



Task 13 Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems

S
P
V
P
S

양면형 태양광 모듈과 시스템: 국제 연구와 파일럿 적용 경험과 결과

Bifacial Photovoltaic Modules and Systems:
Experience and Results from International
Research and Pilot Applications

2021

국제에너지기구
태양광발전시스템 프로그램

윤킴 윤경훈
한국에너지기술연구원



IEA PVPS TCP 란?

1974년 설립된 국제에너지기구(IEA)는 경제협력개발기구(OECD)의 틀 내에서 회원국들 간의 포괄적인 에너지협력 프로그램을 수행하는 자치기구이다. 기술협력 프로그램(Technology Collaboration Programme: TCP)은 미래 에너지 안보와 지속가능성은 글로벌 협력으로 시작된다는 믿음 하에 만들어진 것이다. 이 프로그램에는 정부, 학계 및 산업계의 전문가 6,000 명이 참가하고 있으며 공동 연구의 향상과 특정 에너지 기술의 활용에 기여하고 있다.

IEA PVPS(태양광발전시스템 프로그램)는 TCP 의 하나로 1993년에 설립되었다. 프로그램의 임무는 “지속 가능한 에너지시스템으로 전환하는데 태양광에너지가 핵심적인 역할을 하도록 국제협력을 강화하는 것이다. 이를 달성하기 위해 프로그램의 참여자들은 태양광 발전시스템 활용 분야에서 다양한 공동 연구 프로젝트를 수행하여 왔다. 전체 프로그램은 각국 별로 대표 한 명 혹은 기구 멤버로 구성된 집행위원회(Executive Committee)가 관장하고, 여기서 연구 프로젝트나 활동 영역이 될 수 있는 분명한 “Tasks”를 지정하게 된다.

IEA PVPS 참여국은 호주, 오스트리아, 벨기에, 캐나다, 칠레, 중국, 덴마크, 핀란드, 프랑스, 독일, 이스라엘, 이탈리아, 일본, 한국, 말레이시아, 멕시코, 모로코, 네덜란드, 노르웨이, 포르투갈, 남아공, 스페인, 스웨덴, 스위스, 태국, 터키, 미국이다. EC(유럽연합 집행위원회), Solar Power Europe, Smart Electric Power Alliance(SEPA), Solar Energy Industries Association 그리고 Copper Alliance 도 역시 멤버들이다.

Visit us at: www.iea-pvps.org

IEA PVPS Task 13 이란?

IEA PVPS 틀 내에서 Task 13 은 태양광 구성 부품과 시스템의 가동, 신뢰성 그리고 품질을 향상시키기 위해 노력하는 시장 참여자들에게 관련 지원을 해 주는 것을 목표로 하고 있다. 프로젝트의 범위 내에서 수집한 다양한 기후대에 위치한 태양광시스템의 운영 데이터들은 태양광의 신뢰성과 성능의 현 상태를 추정하는 기반을 제공해 줄 것이다.

Task 13 은 광범위한 환경과 활용분야의 태양광시스템 품질, 성능, 신뢰성과 수명에 영향을 미치는 기술적인 측면에 대한 자료를 요약하고 보고하는 공동의 플랫폼을 제공하고자 한다. 함께 국경을 초월하여 협력함으로써 각 회원국으로부터의 연구와 경험들을 모두 활용할 수 있을 것이고 이들 지식들을 결집 종합하여 태양광시스템이 최적의 상태에서 성능을 낼 수 있는 최선의 사례들과 방법들을 발굴하고 그리고 경쟁력 있는 투자 회수를 위해 지속적으로 노력하고자 한다

Task 13 은 지금까지 태양광 구성 부품과 시스템의 품질에 대한 지표가 될 수 있는 다양한 파라미터들의 계산에 필요한 올바른 체계를 만들어내 오고 있다. 이런 체계들은 지금 준비되어 있어 산업계에서는 이를 사용할 수 있는데, 이런 수준 높은 보고서들에 포함된 결과에 대해 감사함을 표하고 있다.

IEA PVPS Task 13 의 참여국은 호주, 오스트리아, 벨기에, 캐나다, 칠레, 중국, 덴마크, 핀란드, 프랑스, 독일, 이스라엘, 이탈리아, 일본, 네덜란드, 노르웨이, 스페인, 스웨덴, 스위스, 태국과 미국이다.

DISCLAIMER

The IEA PVPS TCP is organised under the auspices of the International Energy Agency (IEA) but is functionally and legally autonomous. Views, findings and publications of the IEA PVPS TCP do not necessarily represent the views or policies of the IEA Secretariat or its individual member countries.

표지 그림

Sandia National Laboratories 에 있는 양면형 태양광모듈, Joshua S. Stein

ISBN 978-3-907281-03-1



INTERNATIONAL ENERGY AGENCY
PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME

IEA PVPS Task 13
Performance, Operation and
Reliability of Photovoltaic Systems

**Bifacial Photovoltaic Modules and Systems: Experi-
ence and Results from International Research and
Pilot Applications**

(양면형 태양광 모듈과 시스템: 국제 연구와 파일럿 적용 경험과 결과)

Report IEA-PVPS T13-14:2021
April 2021

ISBN 978-3-907281-03-1



AUTHORS

Main Authors

Joshua S. Stein, Sandia National Laboratories, USA
Christian Reise, Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany
Johanna Bonilla Castro, TÜV Rheinland, Cologne, Germany
Gabi Friesen, SUPSI, Switzerland
Giosuè Maugeri, RSE, Italy
Elías Urrejola, ATAMOSTEC, Chile
Samuli Ranta, TUAS, Finland

Contributing Authors

Muhammad A. Alam, Purdue University, USA
Marc Abou Anoma, SunPower Corporation, USA
Silvana Ayala Pelaez, National Renewable Energy Laboratory, USA
Djaber Berrian, ISC Konstanz, Germany
Emmanuelle Bertrand, LABORELEC, Belgium
Matthieu Chiodetti, EDF, France
Dimitrij Chudinow, University of Stuttgart, Germany
Hervé Colin, INES, France
Ignacia Devoto, ISC Konstanz, Germany
Roger French, Case Western Reserve University, USA
Edward Fuentealba, University of Antofagasta, Chile
Florent Haffner, INES, France
Andreas Halm, ISC Konstanz, Germany
Joan Haysom, J.L. Richards & Associates Limited, Canada
Karin Hinzer, University of Ottawa, Canada
Imre T. Horvath, IMEC, Belgium
Hugo Huerta, TUAS, Finland
M. Ryyan Khan, Purdue University, USA
Markus Klenk, ZHAW, Switzerland
Radovan Kopecek, ISC Konstanz, Germany
Joris Libal, ISC Konstanz, Germany
Mattias Lindh, RISE, Sweden
Bill Marion, National Renewable Energy Laboratory, USA



Mark Mikofski, DNV GL, USA
Ruben Roldan Molinero, SUPSI, Switzerland
Mark Monarch, National Renewable Energy Laboratory, USA
Anja Neubert, DNV GL, Germany
M. Tahir Patel, Purdue University, USA
Anna Malou Petersson, RISE, Sweden
Gizem Nogay Poulin, CSEN, Switzerland
Santhosh Ramesh, IMEC, Belgium
Oume Lgheit Rhazi, EDF, France
Nicholas Riedel-Lyngskær, Fotonik Technical University of Denmark, Denmark
Daniel Riley, Sandia National Laboratories, USA
Annie C.J. Russell, University of Ottawa, Canada
Andreas Schneider, ISC Konstanz, Germany
Cameron T. Stark, Sandia National Laboratories, USA
Tudor Timofte, ISC Konstanz, Germany
Daniel Tune, ISC Konstanz, Germany
Jill Tymchak, J.L. Richards & Associates Limited, Canada
Christopher E. Valdivia, University of Ottawa, Canada
Felipe Valencia, ATAMOSTEC, Chile
Menghong Wang, Case Western Reserve University, USA

Editors

Joshua S. Stein, Sandia National Laboratories, USA
Boris Farnung, VDE Renewables, Germany

Korean translation October 2021, Yoon, Kyung-Hoon **윤김 윤 경 훈**

Korea Institute of Energy Research (한국에너지기술연구원)



목차

감사인사.....	8
약어.....	9
요약.....	12
1 서론.....	15
2 양면형 셀 유형.....	16
2.1 양면형 셀 개요.....	16
2.2 PERC 셀.....	17
2.3 N-PERT.....	19
2.4 이종접합 셀.....	20
2.5 양면형 셀의 열역학적 한계.....	21
3 양면형 모듈.....	28
3.1 양면형 모듈의 시험 규격과 인증.....	28
3.2 백색 봉지재를 가진 모듈에서의 양면형 셀.....	36
3.3 양면형 셀과 모듈 특유의 열화 이슈.....	38
4 양면형 시스템.....	42
4.1 알베도.....	42
4.2 양면형 이득.....	44
4.3 불균일한 후면 조사강도.....	46
4.4 양면형 시스템 최대 전류.....	51
4.5 고정 경사 시스템.....	54
4.6 단일-축 트래킹 시스템.....	62
4.7 양면형 태양전지의 최적화와 성능: 글로벌 관점.....	65
5 양면형 태양광 배열과 현장 성능에 대한 국제 설문조사.....	74
6 양면형 모델링 비교.....	78
6.1 모델링 시나리오의 설명.....	78
6.2 모델에 대한 설명.....	81
6.3 모델링 결과 비교.....	104
7 국제적인 양면형 현장 연구.....	110
7.1 미국: Sandia National Laboratories 양면형 테스트베드.....	110
7.2 프랑스: INES 양면형 태양광 필드 테스트 사이트.....	114



7.3	칠레: ATAMOSTEC 양면형 태양광 필드 테스트 사이트.....	117
7.4	캐나다: University of Ottawa SUNLAB 사이트.....	120
7.5	독일: TÜV Rheinland 옥외 양면형 모듈 시험.....	122
7.6	스위스: Zurich University of Applied Sciences 양면형 테스트 사이트.....	131
7.7	스위스: SUPSI 옥외 테스트 시설.....	132
7.8	미국: NREL 양면형 실험용 단일-축 트래킹 필드.....	138
7.9	스웨덴: Piteå 에 있는 RISE 양면형 테스트 사이트.....	143
7.10	덴마크: Risø 양면형 테스트 사이트.....	148
7.11	이탈리아: RSE 양면형 필드 테스트 사이트.....	154
7.12	핀란드: TUAS 옥외 테스트 시설.....	158
	참고문헌.....	161
	부록 1 영어-한글 용어 비교.....	168



감사인사

This paper received valuable contributions from many IEA-PVPS Task 13 members and other international experts. Many thanks to Holly Larsen from Sandia National Laboratories for technical editing and to Sophia Archibeque from Sandia National Laboratories for help organizing and formatting references.

This report is supported by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi) under contracts no. 0324304A and 0324304B and by the Swiss Federal Office of Energy (SFOE) under contract no. SI/501788-01.

Sandia National Laboratories is a multimission laboratory managed and operated by National Technology & Engineering Solutions of Sandia, LLC, a wholly owned subsidiary of Honeywell International Inc., for the U.S. Department of Energy's National Nuclear Security Administration under contract DE-NA0003525.

The authors would like to thank the following people for reviewing this report, Laura Bruckman, Jan Vedde, and Matthias Littwin.

본 보고서 한글 번역에 도움을 주신 IEA-PVPS 집행부와 Task 13 OA, 보고서의 저자들, 그리고 한국에너지기술연구원 태양광연구단 멤버들에게 감사인사를 전합니다.

2021년 10월 윤 경 훈 (Yoon, Kyung-Hoon)





약어

2P	Two modules stacked in portrait
2D	Two dimensional
3D	Three dimensional
AC	Alternating current
Al-BSF	Aluminum back surface field
AOI	Angle of incidence
ASPIRE	Arctic Solar Photovoltaics: Innovation for Renewable Energy
ATAMOSTEC	Atacama Module and System Technology
BEST	Bifacial Experimental Single Axis Tracking Field
BF	Bifaciality factor
BG	Bifacial gain
BiFi	Bifacial power gain
BSF	Back surface field
BIFOROT	Bifacial outdoor rotor tester
BOS	Balance of system
BSI	Back side irradiance
BSTC	Bifacial standard test conditions
CHARS	Canadian High Arctic Research Station
CoV	Coefficient of variation
DC	Direct current
DCM	Daylight coefficient method
DHI	Diffuse horizontal irradiance
DNI	Direct normal irradiance
DTU	Technical University of Denmark
EDF	Électricité de France
EMPIR	European Metrology Programme for Innovation and Research
EVA	Ethyl vinyl acetate
E-W	East–West
GCR	Ground coverage ratio
GE	Generated energy
GHI	Global horizontal irradiance
GRI	Ground reflected irradiance
Gv-BF	E-W facing ground sculpted vertical bifacial
HIT	Hetero junction with intrinsic thin layer
HJT	Hetero junction



HPC	High performance computing
HSAT	Horizontal single axis tracker
IAM	Incident angle modifier
IBC	Interdigitated back contacted
IDM	Irradiance distribution module
IEA	International Energy Agency
IEC	International Electrotechnical Commission
IMEC	Interuniversity Microelectronics Centre
IMP	Maximum power current
INES	Institut National de l'Énergie Solaire
ISC	International Solar Energy Research Center
ITRPV	International Technology Roadmap for PV
IV	Current and voltage
IWEC	International Weather for Energy Calculation
LCOE	Levelized cost of energy
LeTID	Light and elevated temperature induced degradation
MAE	Mean absolute error
MBE	Mean bias error
MODIS	Moderate resolution imaging spectroradiometer
MPPT	Maximum power point trackers
MPR	Module performance ratio
MQT	Module design qualification testing
MST	Module safety qualification testing
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NREL	National Renewable Energy Laboratory
N-S	North–South
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
NSRDB	National Solar Radiation Database
PERC	Passivated emitter and rear
PERC+	Bifacial version of passivated emitter and rear
PERT	Passivated emitter rear totally diffused
PID	Potential induced degradation
PID-s	Shunting type PID
POA	Plane of array
POE	Polyolefin elastomer
PR	Performance ratio
PSDA	Atacama Desert Solar Platform
PUMET	Purdue University Meteorological Tool



PUB	Purdue University Bifacial Module Calculator
PV	Photovoltaic
PVK	Perovskite
PVPS	Photovoltaic Power Systems Programme
R&D	Research and development
RMD	Relative mean absolute difference
RMSE	Root mean squared error
RSE	Ricerca sul Sistema Energetico
SAM	System Advisor Model
SAT	Single axis tracker
s-BF	South facing optimally tilted and elevated bifacial plant
SQ	Shockley-Queisser
STC	Standard test conditions
SUPSI	University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland
SURFRAD	Surface Radiation Budget Network
t-BF	East–West tracking bifacial plant
TMY	Typical meteorological year
TNO	Netherlands Organization for Applied Scientific Research
TUAS	Turku University of Applied Sciences
UTC	Coordinated universal time
v-BF	Vertical bifacial
WG2	Working Group 2
WG3	Working Group 3
ZHAW	Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (Zurich University of Applied Sciences)



요약

양면형 태양전지, 태양광 모듈과 시스템이 단면형 태양광기술의 시장 점유율을 빠르게 추월하고 있다. 이는 양면형에서 사용되는 새로운 태양전지 설계기술에 힘입은 것인데, 후면의 불투명한 모놀리식 접촉전극이 분리된 접촉전극으로 대체되면서 빛이 후면으로부터도 셀에 도달할 수 있게 된다. 셀 공정에 약간의 조정을 통하여 후면 효율이 전면 효율의 60~90%에 이를 수 있다. 양면형 태양전지는 다양한 구조(예, PERC+, n-PERT, HIT 등)로 가능하며 셀 라인의 상당 수가 양면형 셀 생산용으로 전환되었다.

P-형 태양전지에서의 한계 때문에 태양광산업의 관심이 n-PERT를 포함하는 고효율 n-형 태양전지로 향하고 있는데, 이는 다음 두 가지 측면에서 유망하다:

- 그 프로세스 시퀀스가 현재 태양전지 생산라인과 호환되는 기계 장비류들을 필요로 한다.
- n-PERT 태양전지 개념은 95%까지의 매우 높은 양면형 계수(bifaciality)를 가능하게 한다.

현재 대량생산 장비로 파일럿 라인에서 제조한 버스바 없는 이종접합(heterojunction: HJT) 셀의 효율은 24% 이상이다. 고효율 잠재력과 복잡하지 않은 제조 프로세스 덕분에 HJT 셀은 향후 시장 점유율을 더욱 더 높여나갈 것으로 기대된다. 양면형 셀로서 다중접합 설계까지 고려되고 있다. 페로브스카이트 상단셀과 실리콘 HJT 하단셀을 기반으로 하는 다중접합 양면형 셀은 유망해 보인다.

양면형 셀은 단면형과 양면형 모듈 모두에서 그 활용도가 소중하다. 양면형 셀을 단면형 패키지에 적용하면서 백색의 후면 봉지재나 반사성 백시트를 사용하면 전면 모듈의 등급을 향상시킬 수 있어 여러 회사들이 이 기술을 연구하고 있다. 그러나 대부분의 양면형 셀은 유리/유리 구조의 양면형 모듈(혹은 투명한 폴리머 백시트를 사용한 양면형 모듈)에 사용된다. 이런 모듈들의 거동과 성능에서의 차이를 감안할 수 있도록 등급과 안전규격은 활발히 업데이트되고 있다. 양면형 모듈의 전기적 특성 측정에 대한 IEC의 새로운 기술 사양서(Technical Specification: TS)가 2019년 (IEC TS 60904-1-2) 발간되었다. 양면형 모듈에 대한 추가적인 제품 인증 요건은 주로 이들 모듈이 갖는 더 높은 작동 전류와 이와 관련된 잠재적인 안전 문제에 관한 것이다.

양면형 모듈이 이미 설치되어 있어 여러 가지 양면형의 고유한 열화 이슈가 발견되었고 이에 대한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 광과 고온 유도 열화(Light and elevated temperature induced degradation: LeTID)는 셀 공정 중에 안정화 프로세스를 거치지 않으면 PERC 셀에 특정적으로 영향을 미친다. 양면형 셀의 후면에 분리된 금속 전극을 추가하는 것은 수소 유도 열화 프로세스를 가속시킬 수 있다. 퍼텐셜 유도 열화(potential induced degradation: PID)는 모듈 패키지 내에서 이온들의 이동으로 야기된다. 모듈에 퍼텐셜 구배가 있을 때 유리로부터 Na 이온들이 셀 표면으로 이동할 수 있으며 적층결함(stacking fault)에서 셀 작동을 방해한다. 이온들의 축적은 표면 부동태화의 손실로 이어질 수 있고, 이는 성능 열화를 가져온다. 봉지재로 폴리올레핀을 사용하면 대체로 PID를 방지할



수 있다. EVA 봉지재를 사용한 유리/유리 양면형 모듈은 유리로부터 Na 이온의 증가 때문에 PID 에 더 취약할 수 있다.

양면형 셀과 모듈의 혁신을 통해 새로이 최적화된 양면형 시스템 설계가 가능하게 되었다. 지면의 반사율(알베도)은 양면형 시스템의 성능에 영향을 미치는 가장 중요한 설치 장소 관련 특성의 하나이다. 적설이 많은 곳은 해당 계절 동안에 알베도가 증가하여 양면형 시스템 성능에 혜택이 된다. 성능상의 양면형 시스템의 장점은 “양면형 이득(bifacial gain)”으로 표시할 수 있는데, 이는 동일한 방향과 크기를 가진 단면형 시스템에 비해 양면형 시스템이 생산할 수 있는 총 에너지의 추가적인 비율이다. 양면형 이득은 알베도, 확산광의 비율, 어레이 높이, 어레이 행간 간격 및 모듈 사이의 간격과 함께 증가한다. 어레이의 후면으로부터 받는 빛은 전면으로 입사되는 빛에 비해 훨씬 더 불균일하다. 불균일성은 모듈 내에서 어느 정도 전기적 불일치를 야기하며 배치 형태에 따라 모듈의 스트링에도 영향을 미칠 수 있다. 양면형 어레이의 또 다른 특성은 단면형에 비해 더 높은 전류에서 작동하기 때문에 시스템 설계 시에 배선, 퓨즈 및 인버터 사이징에 대한 조정이 필요할 수 있다. 국제적인 전기적 설계와 안전 기준은 이런 양면형 기술의 특징을 반영할 수 있도록 활발하게 재검토되고 있다.

양면형 시스템은 다양한 형태로 구현된다. 대부분은 고정 경사각과 단일-축 트래커와 같은 단면형 설계와 거의 동일하다. 이런 시스템용으로 단면형 대비 양면형의 성능상의 이득은 설치 장소의 조건과 시스템 설계 상세에 따라 달라진다. 지면의 반사율 혹은 알베도와 모듈의 양면형 계수는 일반적으로 가장 중요한 인자들이다. 일반적인 자연 지면(알베도 0.2~0.3) 위에 설치된 모듈 대비 단일-축 트래커에 설치된 양면형 모듈은 10% 미만의 양면형 이득을 보여준다. 이 값은 지면이 눈으로 덮여있을 때는 크게 증가한다. 동-서(E-W) 방향에 수직으로 설치된 어레이의 설계는 특별히 양면형 기술에 적합하며 몇 가지 독특한 장점을 제공하는데, 발전 기간이 더 길어 일반적인 부하 프로필에 더 잘 부합하고, 오염율이 매우 낮고 그리고 가용한 부지의 많은 부분을 가축사육과 같은 다른 용도로 사용 가능한 설계가 가능한 점 등이 그러하다. 게다가 수직 설치 양면형 모듈은 고위도에서 성능상의 장점을 가지고 있는데, 이는 여름 동안에는 태양 방위각의 변화가 크기 때문이다. 모든 경우에 있어 어레이 행의 가장자리 부근에 위치한 양면형 모듈은 빛을 여분으로 더 받게 되는데, 이는 모듈 가까이에 있는 모듈의 개수와 인근 지면을 가리는 구조물이 훨씬 더 적기 때문이다. 이런 “가장자리 효과(edge effects)”는 규모가 작은 어레이 혹은 서로 멀리 떨어진 어레이에서는 특별히 중요할 수 있다. 예를 들어 고가 주차용 구조물, 평평한 백색 지붕 위의 고정 경사 어레이, 그리고 수직 방음벽에 설치된 어레이에서 가장자리에 있는 모듈은 추가적인 빛을 더 받는 혜택을 본다. 이런 혜택에도 불구하고 규모의 경제는 역시 중요하다. 최근에 발간된 양면형 시스템의 경제성에 관한 글로벌 분석 보고서에서 단일-축 트래커에 설치된 양면형 시스템이 지구상에 설치 가능한 잠재적인 설치 위치(지표면의 93%) 대부분에서 균등화발전단가(levelized cost of electricity: LCOE)가 가장 낮은 것으로 결론이 내려졌다[1].

27 개의 양면형 태양광 시험 시스템에 대해 양면형 이득을 어레이 설계와 설치 위치 관련 파라미터와 비교한 성능측정 결과 조사에 따르면, 하나의 단독 파라미터만으로는 이를 양면형 이득과 잘 연계시킬 수가 없었다는 결론에 도달하였다. 소규모 연구용의 양면형 시스템의 가장 큰 한계는 그



성능이 가장자리 효과에 의해 지배되거나 혹은 인근에 모듈과 어레이 행이 없어 어레이의 후면에 도달하는 빛의 증가에 의해 지배되는 것인데, 대규모 시스템이라면 후면에 도달하는 빛이 감소하게 된다. 그러므로 더 큰 시스템을 계획할 때 소규모 시스템에서 측정된 동일한 성능을 기대할 수는 없다. 대신, 이런 관련성을 이해하기 위해서는 종합적인 성능 모델링이 필요하다. 이들 모델들은 어레이 후면에 도달하는 빛의 양을 어떻게 계산하는가 하는 측면에서 크게 달라진다. 양면형 모델에는 다음 두 가지 주요 유형이 있는데, (1) view factors 에 기반한 모델과 (2) 광선추적법(ray-tracing)을 사용하는 모델이다. View factor 모델은 계수적으로 덜 비싸며 그 2 차원적인 서술 때문에 무한하게 긴 행들을 가정한다. 이런 이유로 view factor 모델은 상세한 기하학적인 구조를 나타낼 수 없다. 상세한 평가를 위해서는 계산상의 어려움에도 불구하고 광선추적법이 권장된다

최신의 양면형 태양광 성능 모델링에 대한 평가를 목적으로 양면형 모델링 비교시험을 조직적으로 실시하였다. 4 개의 가상적인 시스템 설계와 현장 측정에 기반한 2 개의 설계에 대해 정의를 내리고 필요한 입력 파라미터와 가상 파일을 13 개의 연구와 상업단체에서 온 자원자에게 제공하였는데, 각자는 자신의 양면형 성능 모델을 가지고 있다. 이 보고서에 이들 모델에 대한 상세 내용이 기술되어 있다. 이 비교에서 나타난 결과에 의하면, 현재의 양면형 모델은 다양하며 일부 모델은 모든 시나리오를 시뮬레이션 할 수가 없었다. 추정된 양면형 이득은 2 배 정도로 차이가 심하였다. 이런 결과는 양면형 성능 모델을 확인하고 검증할 수 있는 표준화 시험이 매우 중요함을 보여준다.

이 보고서의 마지막 장은 전세계에 있는 11 개 양면형 현장 시험 사이트에 대한 개요와 실제 운용 결과를 제공하고 있다. 이들 사이트의 상당수는 다양한 방향, 설계 및 사이트 조건을 가진 다양한 양면형 시험 어레이를 포함하고 있다. 많은 연구소들이 백색 암석 혹은 반사성 직물을 사용하여 알베도를 증가시키는 실험을 하고 있다. 이런 시험들은 성능 모델을 검증하고 양면형 성능에서 알베도의 중요한 역할을 이해하는데 매우 중요하다. 미국과 프랑스에 있는 고정 경사 시스템의 양면형 이득 측정 결과는, 태양의 경로가 바뀔에 따라 계절에 따라 양면형 이득이 어떻게 변하는지 그리고 태양 고도각이 최대점에 이르는 여름 동안에 이득이 어떻게 최고가 되는지를 보여준다. 겨울에 태양 고도각이 더 낮아지면 지면의 대부분이 음영에 의해 가려지며 어레이의 후면에 도달하는 빛의 양은 줄어들게 된다.



1 서론

양면형 셀과 모듈 기술이 시장에서 점유율을 빠르게 높여가고 있다. 2019 년 ITRPV(International Technology Roadmap for Photovoltaic) 보고서에 의하면 2020 년 현재 양면형 셀이 전체 시장의 20%를 점유한다 [2]. 2030 년까지 점유율은 70%까지 증가할 것으로 추정된다. 양면형 모듈의 경우 2020 년 점유율은 약 12%인데, 2030 년까지 30%로 증가할 것으로 추정하고 있다. 이는 향후 양면형 셀 생산의 많은 부분은 전면의 출력 등급을 향상시키기 위해 후면에 백색의 봉지재 혹은 반사성 백시트를 사용하는 단면형 모듈에 사용될 것임을 의미한다.

현재 전세계적으로 수 많은 연구팀들이 양면형 기술의 설계를 최적화하고 균등화 발전단가(LCOE)를 낮출 수 있는 양면형 모듈과 시스템 성능을 연구하고 있다. 최근의 한 연구에서는 전 지구를 대상으로 사이트별로 어떤 유형의 시스템 설계가 최저 LCOE 를 가져오는지를 조사하였다 [1]. 수평 단일-축 트래커(HAST) 에 설치한 양면형 모듈이 지구 면적의 93% 에 해당하는 사이트에서의 최적 설계로 결론내려졌다. 단면형 HAST 는 전체 면적의 3.1%에서만 가장 낮은 LCOE 를 보여준다. 위도 70° 이상에 있는 면적의 3.8%는 2-축 트래커에 설치한 양면형 모듈이 최저 LCOE 를 보여주었다. 이런 경향이 다음 10 여년 동안에도 유효하다면, 단면형 대비 양면형의 비율이 현재의 추정치를 초과할 것으로 보인다.

양면형 모듈과 시스템이 시장에서 성공하기 위해서는 등급 매김(rating), 특성분석 및 안전과 관련한 일련의 튼튼한 산업 규격이 개발될 필요가 있다. 모듈과 시스템 성능에 대한 정확한 모델이 필요하고 검증이 이루어져야 한다. 양면형 모듈 설계에 필요한 새로운 소재들의 개발과 시험도 이루어져야 한다. 현장에서의 성능과 신뢰성 연구도 이루어져야 한다. 이 보고서는 양면형 셀, 모듈, 시스템과 모델에 대한 현재의 지식을 국제 협력을 통해 집약한 것이다.

제 2 장은 현재 가용한 다양한 양면형 셀의 개요를 소개하고 있다. 3 장은 시험 규격, 인증, 그리고 양면형 셀과 모듈 고유의 열화 문제를 포함하여 양면형 모듈 전반을 커버하고 있다. 4 장은 양면형 시스템에 대한 논의와 함께 알베도, 양면형 이득, 불균일한 후면 조사강도, 양면형 시스템에서 높은 작동 전류, 고정 경사 시스템, 단일-축 트래커 시스템에 대한 설명을 제공하고 있으며 여러 나라에서 채택하고 있는 최적 양면형 시스템 설계에 대한 개요도 소개하고 있다. 5 장은 문헌 조사뿐 아니라 이 보고서 작성자들로부터 확보한 현장에서의 성능 결과 조사를 소개하고 있다. 6 장은 이 보고서 작성에 참여한 여러 자원자들이 수행한 양면형 성능 모델링의 비교 결과를 보여준다. 제공된 많은 양면형 시스템에 입사되는 조사강도와 생산된 에너지를 시뮬레이션 하기 위해 각 참여자는 그들 고유의 모델을 사용한다. 끝으로 7 장은 전세계적으로 양면형 시스템 성능을 연구하고 있는 11 개 시험 사이트에서의 기술적 개요를 제공한다.



2 양면형 셀 유형

(Gizem Nogay Poulin and Joshua S. Stein)

2.1 양면형 셀 개요

최근까지 대부분의 결정질실리콘 태양전지는 빛에 불투명한 알루미늄 후면 접촉전극을 가진 p-형 실리콘으로 만든다. 알루미늄 후면전계 셀(AI-BSF)이라 불리는 이들 셀은 단면형으로서 전면으로부터 들어오는 빛만 받아들인다. PERC(passivated emitter and rear cell), PERT(passivated emitter rear totally diffused), PERL(passivated emitter rear locally diffused) 및 두께 15 nm의 진성 박막층을 가진 실리콘 이종접합(HIT) 같이 보다 향상된 셀 설계는 셀 후면의 일부분에만 금속전극을 필요로 하는 국부적인 후면 접촉전극(localized back contact)을 사용한다. 이들 최첨단 셀들은 양면형으로, 그림 1과 같이 전면뿐 아니라 후면으로부터의 빛도 받아들일 수 있다.

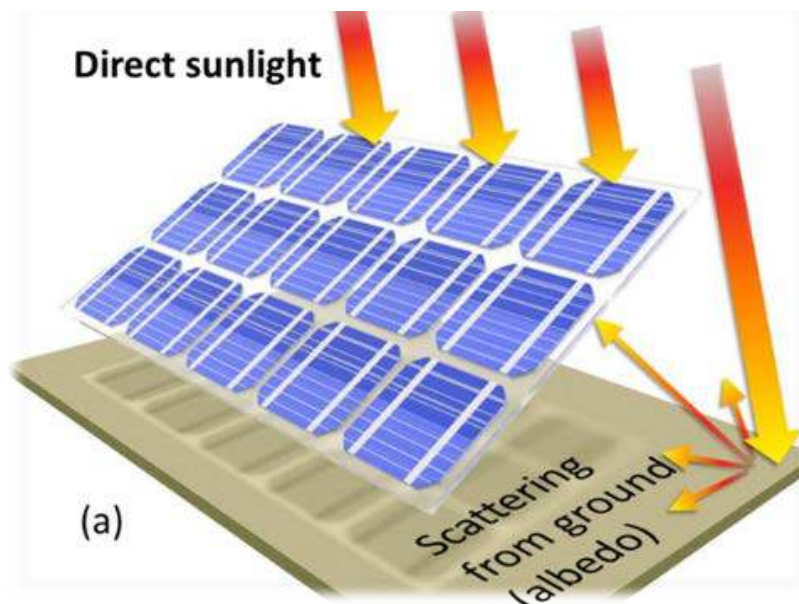


그림 1: 양면형 모듈은 전면과 후면으로부터 들어오는 빛을 전기에너지로 변환한다.

그림 2와 같이 미국 NREL(National Renewable Energy Laboratory)의 계산에 의하면, 단면형을 양면형 구조로 바꾸면 적절한 수준의 생산비용 증가로 에너지 생산을 25~30% 증가시킬 수 있다 [3], [4], [5].

양면형 셀의 개념과 설계에 대한 역사와 진전 과정은 문헌에 요약되어 있다 [6], [7]. 첫 번째 양면형 셀 설계에 대한 특허는 1960년에 공인되었는데, n-형 실리콘 웨이퍼의 양면에 p+ 접합을 사용하였으며 접축은 양면에 부착되었다 [8]. 관련된 셀 설계에 대한 이어진 연구에도 불구하고 양면형 셀은 PERC 셀이 산업 규모로 생산되기 이전까지는 널리 알려지지 않았다.

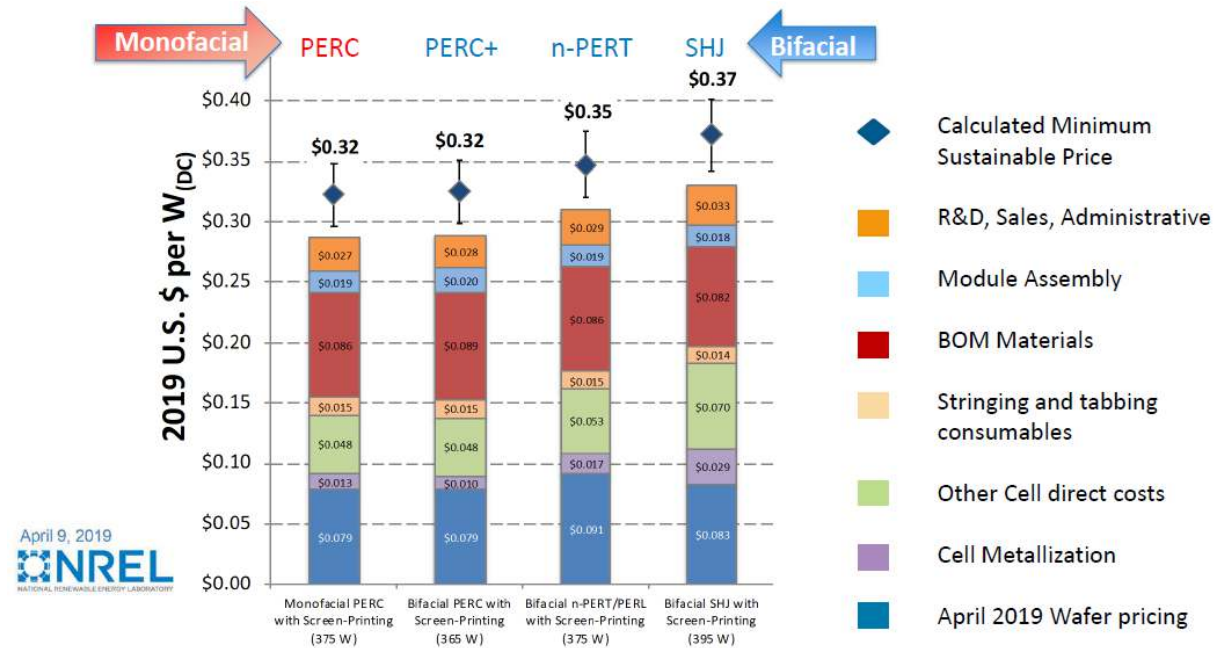


그림 2: 단면형 대 양면형 모듈의 생산비용 계산.

2.2 PERC 셀

2004~2008 년 사이 Al-BSF 셀 생산이 빠르게 증가하여 해당 기간에 생산된 태양전지의 대부분을 차지하였다. 이 셀은 기술적으로 다음과 같은 3 가지 주요 결점이 있다 [3].

- 후면 전체를 커버하는 알루미늄 접촉전극에서의 후면 재결합
- 후면에서 적외선의 부분적인 흡수
- p-형 실리콘에서 캐리어 수명이 짧음

1989 년 실험실에서 개발된 PERC 기술은 국부적인 접촉전극의 도입과 후면에서의 부분적인 부동태화 기술의 적용을 통해 앞의 2 가지 문제를 다루었다 [9]. 그러나 프로세스의 향상을 통한 대량생산이 가능하기까지는 25 년의 개발 기간이 필요하였다. 단면형 PERC 셀은 산업 생산에서 빠르게 Al-BSF 셀을 대체하고 있다. ITRPV 에 의하면, 2019 년 전세계 생산 태양전지의 50%를 PERC 가 차지하였으며 향후 수년 내에 약 80%에 도달할 것이다 [2].

그러나 단면형 PERC 의 효율은 상단 한계 22.5%에 가깝다. PERC 셀을 양면형(PERC+)으로 만드는 것이 출력 산출량을 올릴 수 있는 한가지 방법인데, 그 양면형 계수(bifaciality: 후면 효율을 전면 효율로 나눈 값) 잠재력이 약 80% 수준이다 [5]. 단면형 셀 생산라인을 양면형으로 바꾸는 것은, 그림 2 에 나타난 바와 같이 제조비용 측면에서 부담이 되지 않는다.

그림 3 은 양면형 PERC+ 셀의 전형적인 구조이다. 전면의 n+ 에미터 영역은 튜브로에서 $POCl_3$ 확산을 통해 형성되며 통상 SiN_x 유전체층으로 부동태화하는데 이는 반사방지막의 역할도 함께 한다. 단면형 PERC 를 양면형 PERC+ 로 변환하기 위해서는 스크린 프린팅한 후면 전체의 Al 전극을 Al 핑거 그리드 스크린 설계로 대체하여야 한다. Al 핑거와 후면 부동태화 스택(일반적으로 AlO_x/SiN_y)을 통해 도입된 레이저 접촉 오프닝이 겹치도록 Al 스크린을 정렬해야 하는데, 이 때 핑거 전극의 피치는 국부적인 선형(line-shaped)의 레이저 접촉 오프닝 피치와 동일하게 한다 [7]. 끝으로 국부적인 Al-



BSF는 소성 공정 중에 형성되는데, Al이 실리콘 웨이퍼와 직접 접촉하게 된다. 양면형 PERC+ 셀과 함께 핑거 그리드 설계는 Al 페이스트 소비량을 웨이퍼당 1.0 g에서 0.2 g으로 줄여준다 [3].

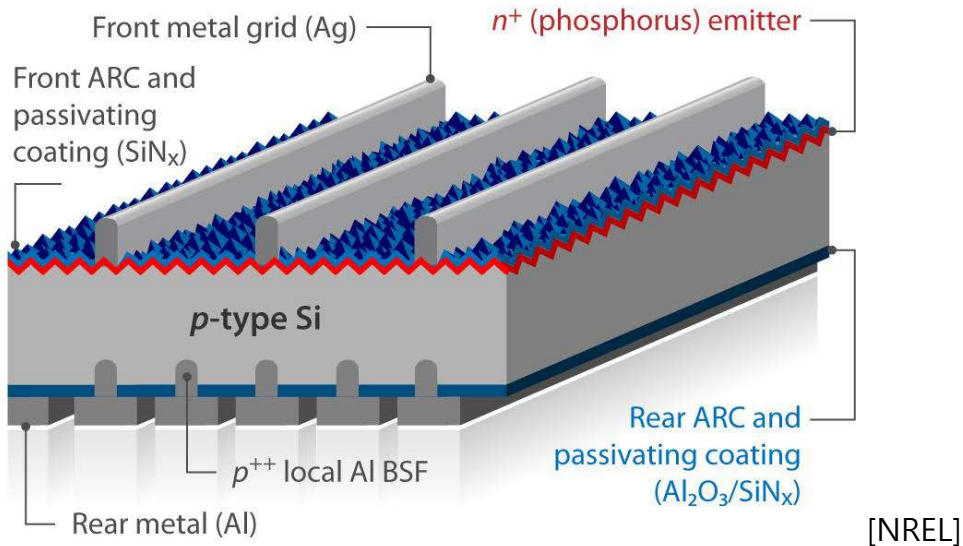


그림 3: 일반적인 양면형 p-형 PERC+ 셀 개략도.

양면형 PERC+ 셀 개발에서는 다음과 같은 이슈들이 중요하다.

- 반사방지 특성을 가진 PERC+ 셀 용의 부동태화 스택 두께의 최적화
- 스크린 프린팅 Al 핑거 전극의 높은 비저항, 이는 직렬저항 손실을 최소화할 수 있는 후면 Al 핑거 그리드의 설계를 필요로 한다.

효율을 향상시키는 것이 최우선 과제이다. 현재 초크랄스키(Czochralski) 성장 p-형 양면형 PERC+ 셀은 대량생산에서의 평균 효율이 21.5% 이상이다 [10]. 중국 Trina Solar 사는 표준 제조장비를 사용하여 9개의 버스바를 가진 면적 252 cm² PERC+ 셀에서 공인 효율 23.39%를 발표하였다 [11]. 연구개발용으로 만든 대면적(>244 cm²) PERC+ 셀에서는 24.1%의 외부 확인 효율이 보고되었다 [12]. 그러나 프로세스와 관련한 정보 공유가 극히 제한되어 이 셀의 구조와 현재 산업용 라인과의 부합성은 아직 알려져 있지 않다.

PERC+ 셀 효율 향상의 다음 스텝은, 대량생산에서 계면에 얇은 산화물로 만든 부동태 접촉과 그 위에 고농도로 도핑한 다결정실리콘(polysilicon) 층(예, TOPCon, POLO, Poly-Si)을 통합하는 것이다. 독일 Fraunhofer ISE 에서 수행한 최근 시뮬레이션 연구에서는, 부동태 접촉을 후면 전체에 도입하고 전면 핑거에는 국부적으로 도입하여 절대적인 값으로 PERC 효율을 약 1% 올릴 수 있다는 것을 보여주었다 [13].

모듈에서는 SolarWorld 사가 2015년에 PERC+ 유리/유리 양면형 모듈 대량생산을 개시하였다. 이후 Neo Solar Power Energy Corporation, Trina Solar 및 LONGi Solar 등 다양한 회사들이 SolarWorld 사의 기술을 따라 상업용 PERC+ 제품을 제공하고 있다.

그럼에도 불구하고 다음과 같은 인자들이 현재의 주류인 p-형 태양전지 기술을 제약하고 있다.

- p-형 벌크 소재의 캐리어 수명이 낮음
- 금속 불순물에 매우 민감 [14]
- B-O 복합체에 의한 광유도 열화 [15]



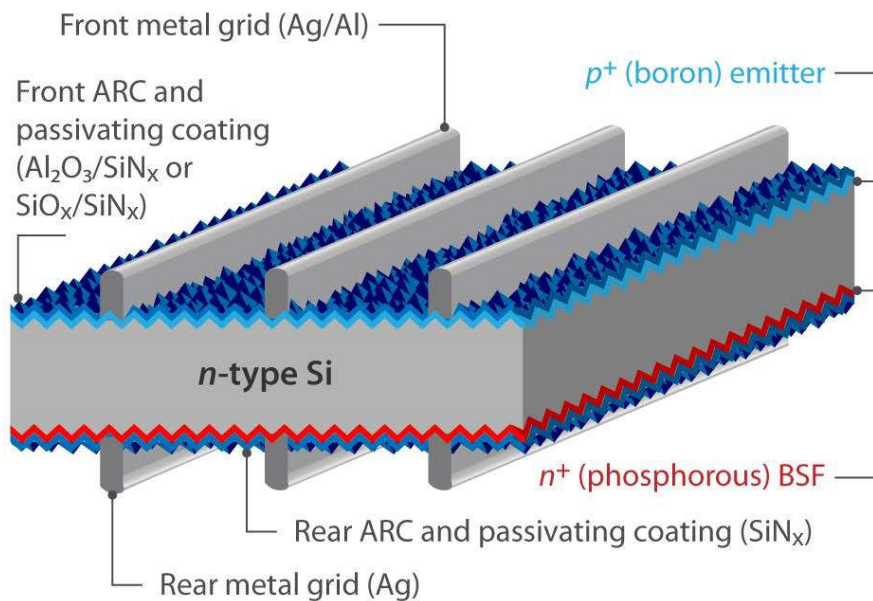
2.3 N-PERT

P-형 실리콘 웨이퍼 태양전지의 제약 때문에, 태양산업계의 관심은 고효율 n-PERT 와 같은 n-형 태양전지로 향하고 있는데, 이는 다음 2 가지 측면에서 유망하다.

- 그 프로세스 시퀀스가 현재 사용하고 있는 생산 라인과 다소 부합이 되는 기계장비류를 필요로 한다.
- n-PERT 셀의 개념에서는 95%까지 매우 높은 양면형 계수가 가능하다 [16].

그림 4 는 n-PERT 셀의 구조를 나타낸 것이다. 일반적으로 n-PERT 셀은 전면에 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ 혹은 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 같은 유전체층으로 부동태화된 붕소(B) 도핑한 p+ 에미터를 갖추고 있다. 인(P) 도핑한 n+ 후면전계(BSF) 셀은 후면을 커버하는데, 이는 두께 약 80 nm 의 SiN_x 유전체 층으로 부동태화된다. 다음과 같은 다양한 방법으로 웨이퍼 내에서 도핑된 영역을 형성할 수 있다.

- 튜브로에서 n+ 도핑용으로 POCl_3 와 p+ 도핑용으로 BBr_3 (or BCl_3) 를 사용하여 2 차례 연속으로 확산 프로세스를 수행한다.
- 표면 위에 확산 소스를 증착하고 이어서 도펀트가 웨이퍼 내부로 확산될 수 있도록 고온 처리를 한다.
- 도펀트 활성화를 위해 이온주입(ion implantation)과 고온 어닐링을 한다.



[NREL]

그림 1: 전형적인 양면형 n-PERT 셀 개략도.

통상적으로 산업계는 다른 것보다 첫 번째 방법을 선호하는데, 튜브 확산로가 높은 처리량(throughput)에 저렴한 작동 및 투자 비용을 제공하기 때문이다. 그러나 튜브 내에서의 가스 확산 프로세스는 양쪽 면에서 일어나기 때문에 다른 면에 의도하지 않은 도핑이 일어날 수 있다. 2 가지 방법으로 이 문제를 다루는데, 다른 면에 확산 방지층을 도입하거나 혹은 확산 후에 원치 않은 면을 에칭하여 제거하는 것이다 [7]. 산업용 n-PERT 셀에서의 금속 접촉전극은 스크린 프린팅으로 형성한다. 이 프로세스에서, 전면 p-형 에미터에는 Al 을 함유한 Ag 페이스트를 그리고 후면 n-형 BSF 형성에는 Ag 페이스트를 사용한다 [17].



2002년 호주의 University of New South Wales 에서 첫 번째 n-PERT 개념의 개발 후에 연구는 주로 개념의 효율을 높이고 산업용 대량생산과의 부합성에 초점을 두었다 [18]. 현재 평균 효율은 대량생산 셀에서 21.5%를 초과하였다 [19]. 벨기에의 Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC)는 최근 Jolywood 와의 협력으로 완전한 스크린 프린팅 방식으로 12 개의 버스바를 가진 양면형 n-PERT 셀(양면형 계수 80% 이상)에서 효율 23.2%를 보고하였다 [20].

여러 연구소들이 PERC+ 개선 시나리오를 반영하여 재결합 손실을 최소화하기 위해 n-PERT 셀의 후면에 얇은 산화물과 폴리실리콘 층을 적용하여 부동태 접촉전극을 통합하는 새로운 접근방법을 모색하고 있다. 소면적 단면형의 실험실 규모의 셀에 n+ 부동태화 접촉과 포토리소그래피에 기반한 전용의 금속전극을 사용하여 효율을 하여 25.7%까지 향상시켰다 [21]. R&D 수준의 스크린 프린팅을 사용하여 대면적(>244 cm²) 양면형 n-PERT 셀에서 외부 확인 효율 24.2%를 획득하였는데, 이 셀은 셀의 후면에 부동태화 접촉 기술을 통합 적용한 것이다 [22]. 중국의 태양광 회사 Yingli Solar, Shenzhou International, Jolywood Solar Technology Co., 그리고 Jiangsu Linyang Energy Co. 는 양면형 n-PERT 모듈을 대량생산하고 있는데, 전면의 효율이 21% 이상에 양면형 계수가 80~85% 이다 [23].

2.4 이종접합 셀

이종접합(hetero-junction: HJT) 셀은 캐리어 선택성 부동태화 접촉 구조를 사용하여 전통적인 셀에서의 재결합 손실을 감소시키는데, 이는 표면 부동태화와 함께 실리콘 흡수체와 금속전극 사이의 재결합 활성도가 높은 직접 접촉 영역 자리에 캐리어 선택성을 동시에 제공한다 [24]. 실리콘 이종접합 셀에 관한 초기 보고서는 Fuhs 등이 발표하였다 [25]. 그러나 현재 이 셀 개념은 일본 Sanyo Corporation(현재는 Panasonic Corporation)사가 개발하고 특허를 획득한 셀 개념과 제휴한 것으로, 이를 진성 박막층을 가진 이종접합(hetero-junction with intrinsic thin layer: HIT) 셀이라고 부른다 [26].

그림 5는 전면 접합 배열 방식의 전형적인 양면형 HJT 셀 구조를 나타낸 것이다. 일반적으로 HJT 셀은, 그 생산 시에 불순물 게터링과 B-O 복합체 결함을 비활성화시키는 고온 처리를 포함하지 않기 때문에 n-형 단결정(mono-Si) 웨이퍼를 기반으로 한다. 그러나 최근에는 p-형 웨이퍼 기판에서도 그 결과가 유망하게 보인다 [27].

HJT 셀 구조에서 표면 부동태화는, 플라즈마 CVD(plasma-enhanced chemical vapor deposition: PECVD) 공정으로 웨이퍼의 양면에 증착하는 진성 비정질실리콘(intrinsic amorphous silicon: a-Si:H(i))에 의해 제공되는데, 캐리어 선택성은 맨 위층에 있는 도핑된 a-Si:H 층에 의해 제공된다. N- 와 p-형 도핑 a-Si:H 층은 웨이퍼에 있는 전자와 정공과의 전기적 접촉을 형성하기 위해 웨이퍼의 각각 반대면에 증착된다. 수집된 전류가 금속 그리드로 수평 방향으로 수송이 잘 이루어질 수 있도록 하기 위해 웨이퍼 양면 위 도핑된 a-Si:H 층 위에 투명전도산화물(transparent conductive oxides: TCO) 층을 스퍼터링 증착한다.

HJT 접촉전극의 표면 부동태화는 250°C 이상의 고온에서 어닐링함에 따라 열화될 수 있기 때문에, 금속 그리드 전극용으로는 경화 온도가 낮은 특별한 Ag 페이스트가 사용된다. a-Si:H 에 제공되는 고품질의 화학 부동태화 때문에 HJT 기술은 매우 높은 개방전압(V_{oc})을 얻을 수 있다. 실험에서 이론적 한계에 가까운 750 mV 까지의 값이 두께 98 μm c-Si 웨이퍼에서 보고된 바 있다. 게다가 대면적 HJT 셀에서 2 가지 배열 방식으로 25% 이상의 변환효율이 실현되었는데, 하나는 전면-후면 접촉 방식[28], 다른 하나는 interdigitated back-contacted (IBC) 이다 [29].

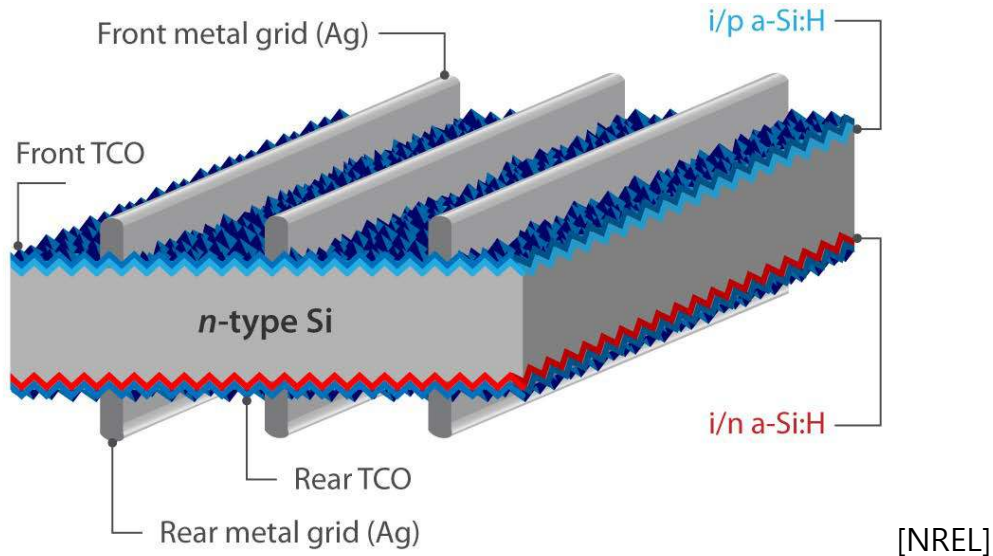


그림 5: 전면 접합 배열 방식의 전형적인 양면형 HJT 셀 개략도.

HJT 기술은 다른 중요한 장점을 가지고 있는데, 온도계수가 낮아 얇은 웨이퍼로 더 저렴한 비용으로 가능하고 그리고 높은 양면형 계수 가능성이다. 두 가지 배열 방식(전면에 p-형 층을 가진 전면 접합 배열과 전면에 n-형 층을 가진 후면 접합 배열)에서 보고된 높은 효율은 HIT 셀 고유의 진성 양면형 특성을 확인시켜 주는 것이다 [7]. 전형적으로 HJT 셀의 양면형 계수는 92% 이상인데, 세심한 최적화를 통해 100%까지도 가능할 수 있다.

HJT 셀의 가장 중대한 한계는 TCO 층과 a-Si:H 층에서의 불가피한 광 흡수인데, 이로 인해 V_{oc} 와 J_{sc} 사이에 절충이 요구된다 [24], [30]. 그러나 PECVD 프로세스 조건의 개선을 통해 이런 절충을 최적화할 수 있다. 현재, 대량생산 장비로 파일럿 라인에서 만든 버스바 없는 HJT 셀은 24% 이상의 효율에 이른다 [31]. 고효율의 잠재성과 간결한 제조 프로세스와 함께 HJT 셀 기술은 향후 태양광 시장에서 그 점유율을 더욱 더 높일 것으로 기대된다 [2].

2.5 양면형 셀의 열역학적 한계

(Muhammad A. Alam and M. Ryyan Khan)

단일접합 단면형 태양전지의 효율은 세월이 흐르면서 일부 기술은 Shockley-Queisser (SQ) [32]가 추정된 근본적인 한계에 근접하기 시작하는 등 지속적으로 증가하여 왔다. 게다가 대량생산에서 확보한 지식은 제조와 설치 비용을 크게 하락시켰다. 태양전지의 수명과 효율의 지속적인 증가를 통해 LCOE 를 더 낮출 수 있게 될 것이다.

그러므로 태양광 모듈의 개선과 다중접합과 양면형 셀 같은 신 기술의 사용에 초점을 둔 많은 노력이 요구된다 [33]. 새로운 셀 구조와 셀 토폴로지에서의 실험은 여러 가지 고무적인 인자들에 의해 구동되고 있는데, HIT 셀의 고유한 양면형 계수, 페로브스카이트(PVK)와 유기 태양전지 같은 밴드갭이 넓은 소재의 가용성, 그리고 양자점(quantum-dot) 태양전지를 통해 구현 가능한 좁은 밴드갭 소재의 가용성 등이 그러하다.



단일접합 셀과 이어진 다중접합에 관한 원본 SQ 논문은 이들 셀이 열역학적 한계를 지향하는 효율상의 이득에 관한 가이드 역할을 제공하고 있다 [34]. 최근의 연구는 직렬저항의 영향을 포함하여 이중접합(2-J)(Si, PVK), N -접합 양면형 셀, 3-J, 4-J 및 5-J 집광형 태양광의 열역학적 한계를 모색한 바 있다. 식품, 물 및 에너지의 수율 최적화에 대한 이들 한계의 일반화와 그리고 다중접합 태양전지에 의한 물의 가수분해에 대해서도 분석되었다[35].

SQ 삼각형의 사용은 양면형 셀 기술의 열역학적 한계를 추정할 수 있는 직관적인 그래픽 방식이다. 이 방식은, 셀 개수와 작동 온도에 대한 비선형 의존성, 최적 밴드갭이 알베도에 따라 변동하는 점, 다양한 알베도용으로 3-터미널 설계의 중요성 그리고 이중접합 양면형 셀의 적절성과 같은 양면형 이득에 고유한 핵심 추이를 설명해 줄 수 있다.

2.5.1 SQ 삼각형

문헌 [35]에 기술된 바와 같이 SQ 삼각형(triangle) 접근법은 열역학적 한계에서 작동하는 태양전지의 전류와 전압(IV) 특성에 관한 2 가지 관찰결과에 의존한다. 최대출력점 전압(V_{mp})은 다음과 같이 주어진다 [36], [37].

$$V_{mp} = (1 - T_D/T_S)E_g - (k_B T_D/q)\ln(\theta_D/c \theta_S) \equiv c_f E_g - \Delta(c) \quad (1)$$

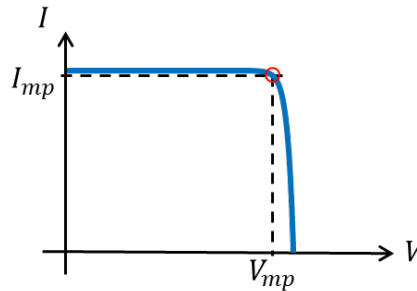


그림 6: 밴드갭을 가진 태양전지의 전류-전압 특성, 최대출력점은 적색 원으로 표시.

여기서 T_D 와 T_S 는 각각 태양전지와 태양의 온도이다. 카르노 인자(Carnot factor) $c_f \equiv (1 - T_D/T_S) \sim 1 - 300/6000 = 0.95$. 각도 엔트로피 인자 $\Delta(c) \equiv (k_B T_D/q)\ln(\theta_D/c \theta_S)$ 는 지구로부터 바라본 solar disk (θ_S)의 크기와 태양전지로부터의 각도 일조량(angular radiation) (즉, 후면 반사체에 따라 $\theta_D = 2\pi$ 혹은 4π) 에 의존하는데, one-sun 집광(즉, $c = 1$)에서 $\Delta = 0.31$ 이다. 마찬가지로 AM1.5G 하에서 최대출력점 전류(I_{mpp}) 는 다음과 같이 주어진다 [38].

$$I_{mp} = c I_{sun} (1 - \beta' E_g) \quad (2)$$

전류는 태양 집광도 c 에 비례하고, I_{sun} 은 $E_g \rightarrow 0$ 에서의 예상 전류이다. β' 는 밴드갭 증가에 따른 광전류의 손실 계수이다. 선형 근사법은 $0.5 \text{ eV} < E_g < 2 \text{ eV}$ 에서 유효하다. I_{mp} 의 어떤 비선형성은 E_g 와 그 선형 근사법 사이의 일대일 매핑으로 쉽게 처리할 수 있다 [39]. 방정식 (1)을 방정식 (2)에 삽입하고 $i_{mp} = I_{mp}/I_0$ 그리고 $v_{mp} = V_{mp}/V_0$ 로 정의하면, SQ 삼각형에 대한 방정식을 얻을 수 있다.

$$i_{mp} = 1 - v_{mp} \quad (3)$$



여기서 $I_0 \equiv cI_{sun} (1 - \beta\Delta)$, $V_0 \equiv (1 - \beta\Delta)/\beta$ 이며 이 때 $\beta = \beta'/c_f$ 이다. 대각선에 있는 각 포인트는 밴드갭 E_g 를 가진 소재를 나타내며 삼각형 내의 박스 $P_{mp}(E_g) = (E_g)(E_g)$ 는 소재의 최대출력 산출량을 정의한다. 어떤 태양전지 토폴로지(예, 탠덤, 양면형)로부터 열역학적 한계에서의 최대출력 산출량은 삼각형 내에 쓰여진 박스의 개수를 최대화하는 것을 포함한다.

2.5.2 2-터미널 다중접합 태양전지의 열역학적 효율 한계

그림 7 과 같이 N -접합 태양전지의 최적 밴드갭과 열역학적 효율은 아래와 같이 커버 범위가 최대가 되도록 직사각형 박스로 삼각형 내에 타일을 붙이는 것과 같다.

$$V_{mp}^{(i)} = iV_0/(N + 1) \text{ 그리고 } I_{mp}^{(i)} = I_0/(N + 1) \tag{4}$$

박스들 전부를 합계하면 조사강도 c 일 때 N -접합 태양전지의 효율은 아래와 같이 주어진다.

$$\eta_N(c) = I_0 V_0 N/(2(N + 1)c) \tag{5}$$

예를 들어 그림 7(a)와 같이 1-sun 조사강도 ($c = 1, N = 1, I_{sun} = 83.5 \text{ mA/cm}^2$) 하에서 단일접합 태양전지의 경우에는, $I_0 = 71.8 \text{ mA/cm}^2, V_0 = 1.92 \text{ V}$ 이다. 그러므로 문헌 [34], [38]-[40]에서 예상되는 바와 같이 $\eta_1 = 34.3\%$ 는 $V_{mp} = 1.92/2 = 0.96 \text{ eV}$ 혹은 $E_g = 1.34 \text{ eV}$ 에서 얻어진다. 열역학적 계산과 비교하면 방정식 (5)가 임의의 접합 수를 가진 태양전지에 맞다는 것을 보여준다 [41].

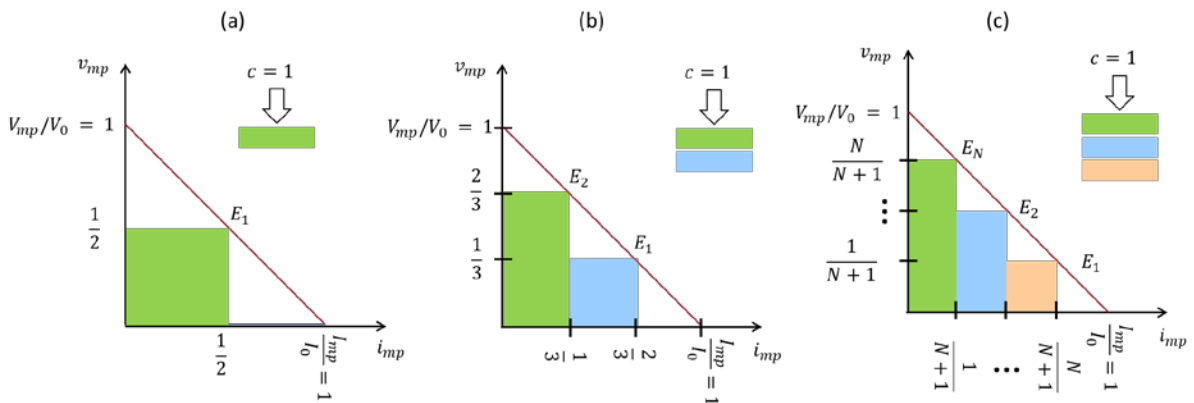


그림 7: 단면형 셀의 SQ 삼각형: (a) 단일접합, SJ; (b) 이중접합, DJ, (c) 3 중접합. 2-터미널 배열에서 동일 전류를 생산하도록 밴드갭을 최적화하였다.

2.5.3 양면형 탠덤 태양전지의 효율 한계

그림 8 은 양면형 탠덤 셀의 효율을 계산하는데 필요한 일반화를 보여준다. 확장된 삼각형은 상단(집광도 c)과 하단(알베도 cR) 양쪽으로부터 빛이 들어오는 셀을 수용한다. 일반적으로 가장 작은 밴드갭 E_0 를 가진 셀은 위에 있는 U 셀과 밑에 있는 D 셀들에 둘러싸여서 $N = U + D + 1$ 이 된다. 박스들의 합계는 출력 산출량: (U, D, R) 이 된다.



$$s_N = \sum_{i=1}^U x(1 - ix) + \sum_{j=1}^D x \left(1 - \frac{jx}{R}\right) - x \left(1 - Ux - \frac{x}{1 + R}\right) = aNx - x^2A \quad (6)$$

전류 $x_0 = I_{mp}/I_0 = N/2A$ 에서 출력은 최대가 되고, 그래서

$$\eta_N/\eta_1 = (s_N/s_1) = N^2/2A \quad (7)$$

$A \equiv U(U + 1)/2 + D(D + 1)/2R + U + (1/1 + R)$ 그리고 $U = 2N - 3R - 1/2(1 + R)$.

D 에 대해 방정식 (7)을 최대화하면, $N < N_{crit} \equiv 1 + R^{-1}, D = 0$ 이 됨을 볼 수 있다.

$$\eta_N(R)/\eta_1 = 2(1 + R)N^2/(N(N + 1)(R + 1) - 2R) \quad (8)$$

그리고 $N > N_{crit} \equiv 1 + R^{-1}, D > 0, R \neq 0$ 인 경우,

$$\eta_N(R)/\eta_1 = (8R(1 + R)N^2)/(2R(2N^2 + 4N + 1) - 9R^2 - 1) \quad (9)$$

방정식 (8)은 $\eta_N(R) = (1 + R)\eta_1(R = 0)$ 이라고 추정하는데, 이는 양면형 단일접합 셀의 효율이 예상한 바와 같이 단면형에 비해 $(1 + R)$ 의 인자만큼 증가한다는 의미이다. 뒤에서 근본적인 열적 상황을 감안하게 되면 이득이 이 한계 이하로 감소한다는 것을 보게 될 것이다.

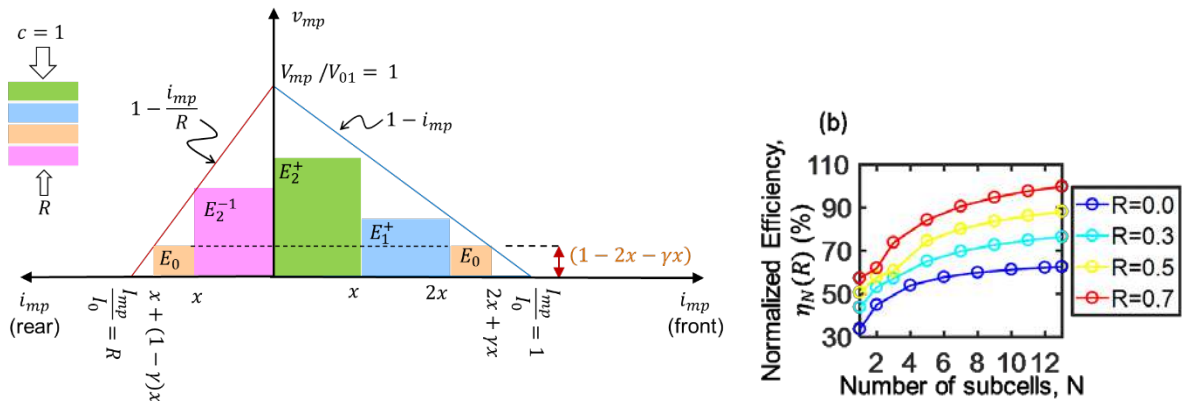


그림 8: (좌) 양면형 다중접합 태양전지용 SQ 삼각형. (우) 알베도 함수에 따른 양면형 이득 (단일접합 단면형 한계 대비).

2.5.4 2-중접합 양면형 태양전지의 열역학적 한계

그림 8 에서와 같이 상대적인 이득은 접합수가 적을 경우에 매우 중요한데, 이는 이중접합(예, HIT-PVK)을 가진 단순한 2~4-터미널 양면형 탠덤 셀의 개발을 부추긴다. 특히, $\eta_2(R)/\eta_1(R = 0) = 4(1 + R)/(3 + 2R)$ 은 보다 효율적인 알베도의 사용[39], [42]뿐만 아니라 1-J 혹은 2-J 단면형 셀의 개선된 이득(예, 인자 4/3)으로부터 혜택을 받는다. 또한 중요한 것은, 상부 셀의 증가된 전류가 지금은 하부 셀의 알베도-생산 광전류와 정합이 되므로 상부 셀 밴드갭은 R 과 함께 감소한다.

열역학적 한계 분석은 2-J 양면형 설계에서의 여러 가지 실제적인 문제를 노출시킨다. 예를 들어, 상부와 하부 셀의 밴드갭이 특정 알베도 (예, $E_t = E_b(1 + R) + (1 - R)$) 에 대해 최적으로 정합하지 않으면 전류 불일치가 총 출력 산출량을 열역학적 한계 이하로 감소시킨다.



$$\eta_N \sim \frac{1}{c P_{in}} \left[\sum_{i=1}^N V_{mp}^{(i)} \right] \min \{i_{mp}\}. \quad (10)$$

실제로 두 셀의 광학적 두께를 변화시킴으로써 전류 불일치를 줄일 수 있다 [42].

열역학적 한계는 고정 값 R 에 대해 계산되었다. 만약 태양전지 작동 중에 유효 R 이 수정되면(분광 혹은 공간적 의존성에 기인함), 출력은 상부 혹은 하부 셀의 $\min(i_{mp})$ 에 의해 결정될 것이다. 2-J 셀은 과잉 출력을 내부적으로 발산시킬 필요가 있을 것인데, 출력 산출량은 효율만큼 증가하지 않지만 Joule 가열은 셀의 신뢰성을 낮출 것이다. 예를 들어, 그림 9의 오른쪽의 플롯은 최적화된 HIT-PVK 탠덤 태양전지에서 $R > 0.2$ 일 때 효율은 33%로 포화된다는 것을 보여준다 [42]–[44]. 실제로, $R > 0.4$ 일 때 단일접합 HIT는 2-J 양면형 탠덤보다 더 많은 출력 산출량을 생산하게 된다. 그림 9의 SQ 삼각형 왼쪽에 나타난 3-터미널 배열은 상부 스택 (U)과 하부 스택 (D)에서의 전류를 독립적으로 제어할 수 있게 하는데, 3 번째 터미널은 E_0 에 연결되며 $0 < R < 1$ 경우 지속적으로 혜택을 보게 된다 [43].

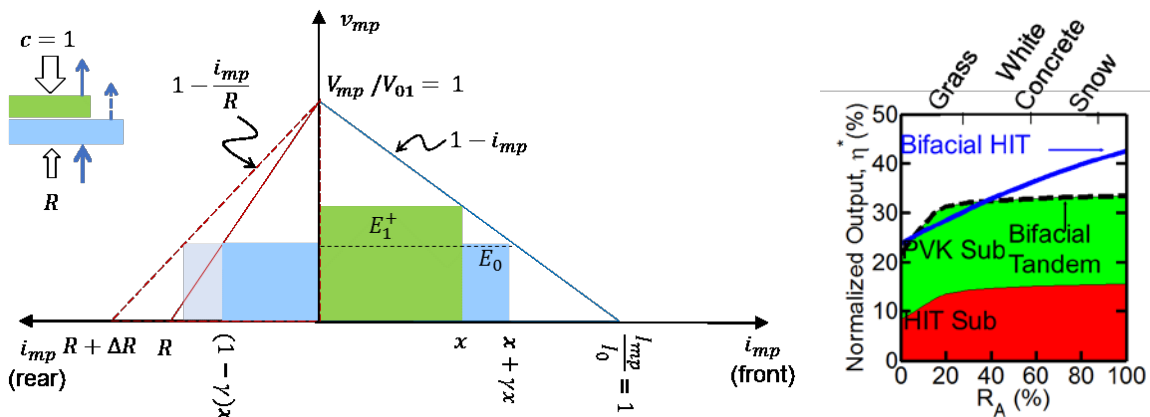


그림 9: (좌) 알베도 변화에 대한 민감도를 설명하는 SQ 삼각형. 다만 3-터미널 배열만이 추가적인 알베도를 사용할 수 있다. (우) 그렇지 않으면 과잉 에너지는 양면형 탠덤에 의해 사용될 수 없다.

2.5.5 단일접합 태양전지의 온도 의존성

셀이 태양광을 노출될 때, 흡수된 출력 중 전기적 산출량으로 전환되지 않는 부분은 셀 내에서 소멸되어야 한다. 열 플럭스 밸런스에 대한 물리학은 다음 방정식을 필요로 한다.

$$T_D = T_A + \frac{c P_{in}(1 + R)(1 - \eta_N(R = 0))}{2h} \equiv T_A + K \cdot P_{in} \quad (11)$$

여기서 T_A 는 주위 온도, h 는 대류와 복사 플럭스 전달에 의존한다[45], [46]. 이 줄(Joule) 열은 효율을 아래 식과 같이 낮춘다.

$$\eta_1(T_D) = \eta_0 [1 - \beta_T (T_D - T_A)] \quad (12)$$



양면형 셀의 온도는 알베도(알베도 에너지의 한 부분은 전기에너지로 변환되므로 온도를 증가시킨다)와 서브 밴드갭 흡수(서브밴드갭 빛은 투과가 되므로 온도를 감소시킨다)에 의존한다. 열역학적 한계에서,

$$\beta_T = \frac{1}{\eta_0} \left| \frac{d\eta}{dT_D} \right| = \beta_V + \beta_I, \text{ 여기서}$$

$$\beta_V = k_B \left[-\frac{E_g}{k_B T_S} - \frac{\Delta}{k_B T_D} \right] / (c_f E_g - \Delta) \text{ 그리고 } \beta_I = -\frac{\beta'}{1-\beta' E_g} \left(\frac{dE_g}{dT_D} \right).$$

$E_g = 1.1 \text{ eV}$ 인 경우, $\beta_T = -0.00172 + 0.0006 = -0.12\%$.

실제로, V_{mp} 는 열역학적 한계보다 더 낮다. 통상적 값을 사용하면, 양면형 셀의 경우는 $\beta_T^{(B)} = -0.25\%$, 단면형의 경우는 $\beta_T^{(M)} = -0.37\%$ 가 된다[12]. 그림 10에 나타난 바와 같이, 1-J 단면형 vs. 양면형 셀의 상대적 이득은 다음과 같이 주어진다.

$$\frac{P_o^{(B)}}{P_o^{(M)}} = \left(\frac{\eta_1^{(B)}}{\eta_1^{(M)}} \right) \cdot \left(\frac{1 - \beta_T^{(B)}}{1 - \beta_T^{(M)}} \right) \cdot \left(\frac{\Delta T_0 + K P_{in}(1 + R)}{\Delta T_0 + K P_{in}} \right). \quad (13)$$

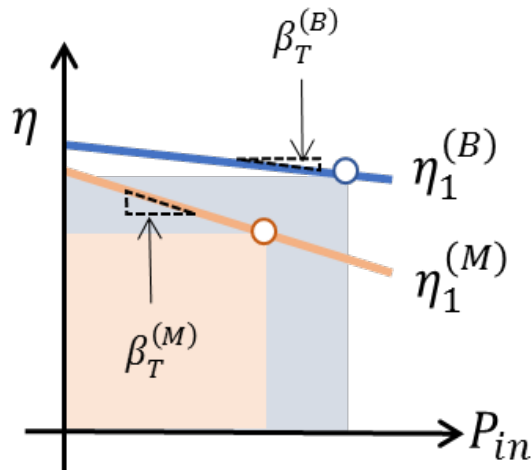


그림 10: 양면형 이득이 $\eta - P_{in}$ 면에서의 박스의 비로 정의된다. 고유(intrinsic) 열역학($\beta_T = \text{const}$)에서 온도 의존성은 양면형 이득을 잠식한다. 실제 $\beta_T^{(B)} < \beta_T^{(M)}$ 가 되면 양면형 이득을 더욱 잠식한다.

다시 말하자면, 온도(서브밴드갭 투과와 과잉 흡수 사이의 균형에 의해)가 근본적으로 $K P_{in} R \ll \Delta T_0 + K P_{in}$ 가 되도록 동일하게 유지되는 한, 양면형 이득은 $\eta_1^{(B)}/\eta_1^{(M)} = 1 + R$ 뿐 아니라 감소한 온도계수가 $(1 - \beta_T^{(B)}) > (1 - \beta_T^{(M)})$ 가 되도록 하기 때문에 향상된다.

2.5.6 결론

SQ 삼각형은 임의의 집광 하에서 양면형 태양전지의 열역학적 한계의 계산을 가능하게 한다. 알베도 R 은 에너지 산출량을 증가시킬뿐 아니라 밴드갭 일치 요건과 두께 민감성을 완화시킨다. PVK 상부 셀과 실리콘 HJT 하부 셀을 적층한 양면형 태양전지는 유망해 보이는데, 특히 양면형 탠덤에서 필요한 더 낮은 밴드갭(예, 1.5~1.6 eV)이 단면형 탠덤 셀에 필요한 더 높은 밴드갭(예, 1.7eV)보다 더 안정하기 때문이다. 또한 양면형 셀의 온도계수가 더 낮은 점(더 높은 V_{mp} 의 결과로)은 단면형 셀



대비 상대적인 이득을 더 향상시켜 준다. 이러한 근본적인 열역학적인 장점이 양면형 태양전지 기술의 상업적 개발의 동기가 되는 것이다.



3 양면형 모듈

단면형과 양면형 셀, 모듈 설계의 차이는 대부분이 후면에서 발생하며 일부 경우에는 모듈의 가장자리에서 일어나기도 한다. 그림 11의 좌측은 단면형 모듈과 셀, 우측은 양면형 셀과 모듈이다. 금속 그리드는 서로 다른데, PERC 셀에서는 Al 그리드이고 n-PERC, TOPCon, HJT 및 IBC에서는 Ag 그리드이다. 양면형 모듈의 후면에 있는 빛에 노출되는 반사방지 코팅에서도 차이를 볼 수 있다.

양면형 모듈에서 후면 커버는 유리 혹은 투명한 폴리머 백시트로 구성된다. 백시트가 사용될 때 모듈은 알루미늄 프레임으로 보강하여야 한다. 하지만 일부 경우에는 유리-유리 모듈이 견고하여 프레임이 불필요하고 다만 가장자리 실링만 한다.

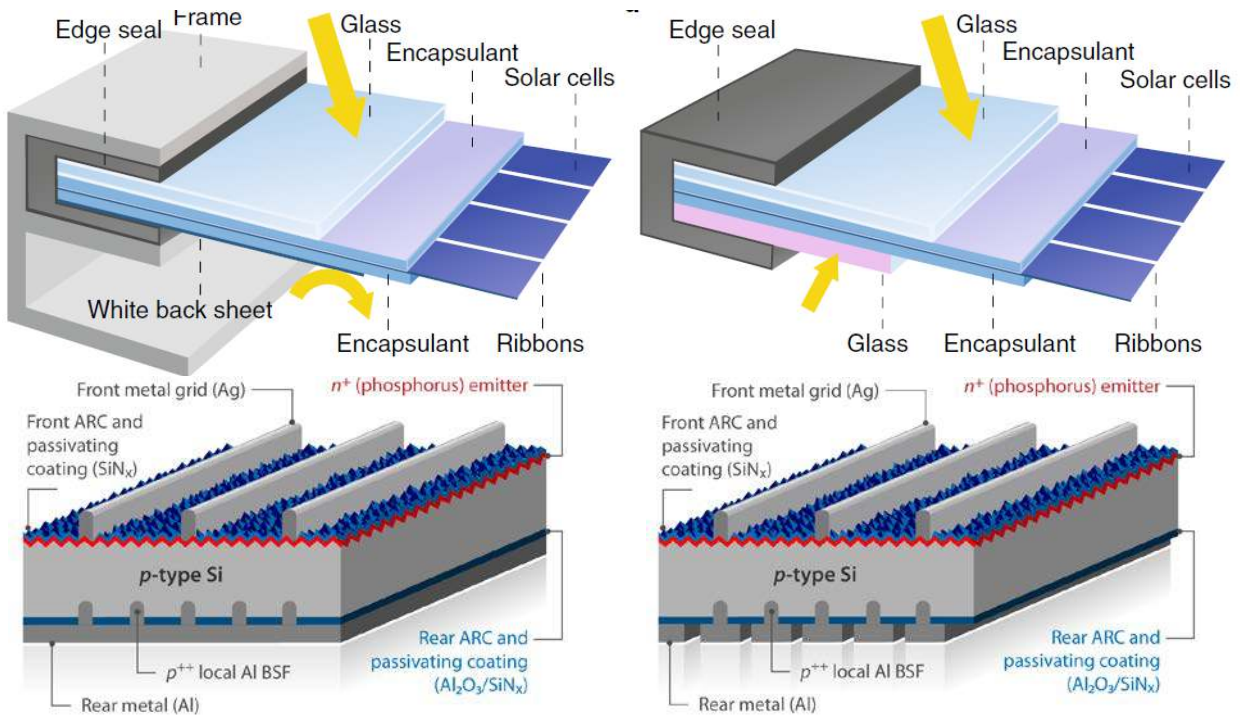


그림 11: 모듈 사이의 차이: 단면형(상단 좌측)과 양면형(상단 우측) 그리고 태양전지 사이의 차이: 단면형 PERC (하단 좌측)과 양면형 PERC+ (하단 우측).

3.1 양면형 모듈의 시험 규격과 인증

(Johanna Bonilla)

국제전기기술위원회(IEC) Technical Committee(TC) 82는 태양광 규격 프로젝트를 담당하고 있다. TC82 내의 IEC 지명 실무그룹(working groups: WGs)의 전문가들은 현재 기존 규격을 재검토하고 양면형 기술을 다룰 새로운 규격의 필요성을 평가하고 있다. 특히, WG 2는 태양광모듈을 책임지며 WG 3는 태양광시스템의 기술적 측면에 초점을 두고 있다. 4 세트의 IEC 규격은 표 1과 그림 12에 기술한 바와 같이 태양광모듈에 관련된 것이다.



표 1: 태양광모듈에 관련되는 IEC 규격.

주제	IEC 규격	양면형을 위한 변경
측정, 특히 출력 산출량 결정	IEC 60891, IEC60904-X	IEC TS 60904-1-2
제품 적격성 시험	IEC 61215-X, IEC 61730	진행 중
에너지 등급	IEC 61853-X	진행 중
태양광 소재와 구성요소	IEC 62852, IEC, 62790, IEC 62930	아직 변경 제안 없음

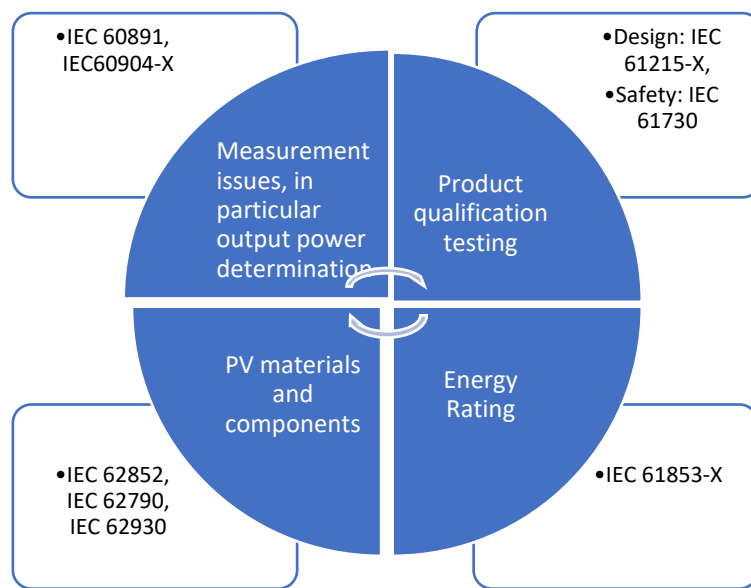


그림 2: 태양광모듈 관련 IEC 규격.

실무 그룹 내에서의 집중적인 논의에도 불구하고 양면형 기술에 대한 합의 절차는 수년이 소요될 것으로 보인다. 특별한 시장 수요에 대응하여 여러 가지 관행(practices)들을 "common"으로 채택하고 있는데, 아래에서 논의하고자 한다.

3.1.1 최대출력 산출량 특성분석

전면과 후면 모두로부터 출력을 생산하는 양면형 모듈의 출력 산출량 특성을 분석하기 위한 특정 측정 절차가 개발되었다. 2019년 1월에 발간된 이 사양서는 IEC TS 60904-1-2에 정의되어 있다 [47]. 이 사양서는 자연 태양광 혹은 솔라 시뮬레이터를 사용했을 때의 출력 산출량을 결정하는 절차를 포함하고 있는데, 이 장치는 셀과 모듈의 성능 특성분석을 위해 태양광산업계에서 통상적으로 사용하는 것이다.

솔라 시뮬레이터로 양면형 모듈의 출력 산출량 특성을 분석하는 데는 다음 3 가지 주요 스텝이 필요하다.

- 표준시험조건(STC)에서 양면형 계수 측정
- 후면으로 들어오는 조사강도에 의한 출력 이득 수율, BiFi의 결정
- 후면 조사강도에서 100 W/m² 와 200 W/m² 에서 출력 산출량 결정

아래에서 각 스텝에 대해 논의하고자 한다.



표준시험조건에서의 양면형 계수

양면형 모듈 후면의 상대적인 성능은 IEC TS 60904-1-2 에서 3 개의 비율로 정의된 양면형 계수(bifaciality factors)에 의해 정의된다. 이 비율은 조사강도 1000 W/m², 온도 25°C 와 에어매스(AM)1.5의 STC 에서 결정한 것이다. 전면과 후면의 분광응답이 다르면 IEC 60904-7 [48]에 따라 분광 불일치 보정을 하여야 한다. 그림 13 이 좀 더 상세한 것을 보여준다.

1. $\phi_{P_{max}}$ = 전면의 최대출력(P_{max}) 대비 후면 최대출력의 비
2. $\phi_{V_{OC}}$ = 전면의 개방전압(V_{OC}) 대비 후면의 비,
3. $\phi_{I_{SC}}$ = 전면의 단락전류(I_{SC}) 대비 후면의 비..

n-PERT 양면형 모듈의 경우 $\phi_{P_{max}}$ 값은 통상적으로 75~95%, p-type PERC 양면형 모듈의 경우는 60~70%, 그리고 HJT 양면형 모듈은 >90%이다.

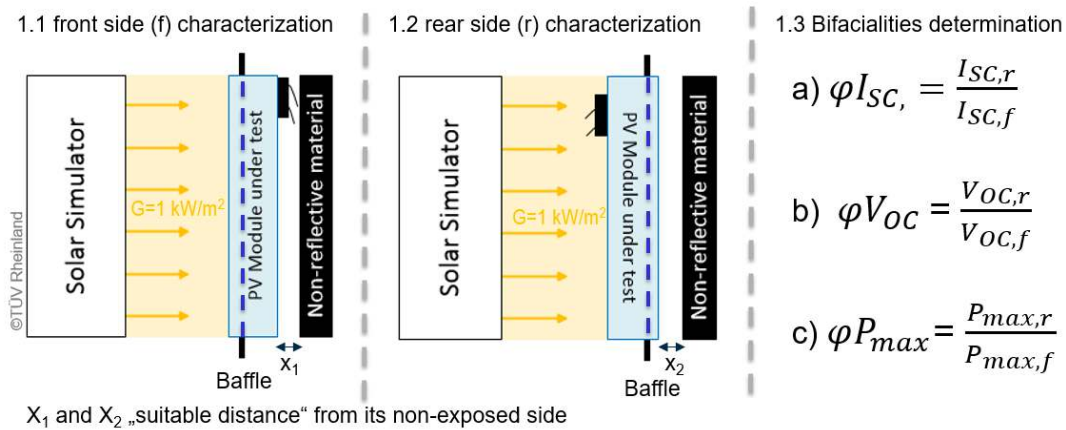


그림 13: 양면형 모듈 IV 측정용 IEC TS 60904-1-2 시험 방법: STC 에서의 양면형 계수 결정. 불투명한 비반사성 배경은 빛을 받고 있지 않은 태양광소자의 어떤 지점에서라도 조사강도가 3 W/m² 미만임을 보장한다.

후면 조사강도에 의한 출력 이득 수율, BiFi 의 결정

최대출력 산출량(P_{max})은 전면 조사강도를 1000 W/m² 에 고정하고 후면 조사강도 (G_r) 를 달리하여 측정한다. 후면 조사강도는 적어도 다음 2 가지 범위를 커버하는데, 이는 현장에서의 작동 기간 중 가장 흔한 경우를 반영한다.

$$G_{r_i(i=1,2,3..)} \begin{cases} 0 < G_{r_i} < 100 \text{ W/m}^2 \\ 100 \leq G_{r_i} < 200 \text{ W/m}^2 \\ G_{r_i} \geq 200 \text{ W/m}^2 \end{cases}$$

이런 목적으로 현재의 TS IEC 60904-1-2 는 두 가지 방법을 기술하는데, 가용한 솔라 시뮬레이터에 따라 단일면 조사와 양면 조사 방식이다.

- 단일면 조사: G_E 방법: IEC 60904-9 [49]에 기술된 바와 같이, 하나의 광원만 가진 솔라 시뮬레이터의 경우 등가 조사강도, G_E 를 사용하여 출력 산출량(P_{max}) 측정을 가능하게 한다.

$$G_E = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} + \phi * G_{r_i} \tag{14}$$

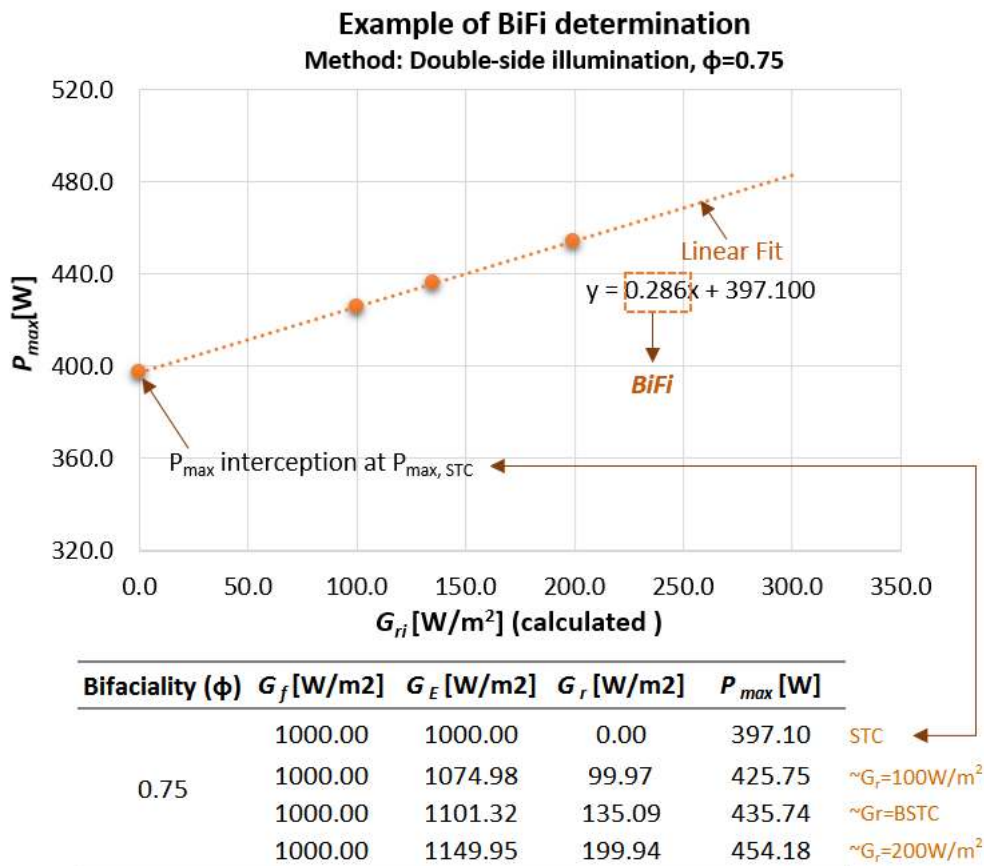


$$\phi = \text{Min}(\phi_{ISC}, \phi_{P_{max}}) \tag{15}$$

- 양면 조사 방법: 2 개의 광원을 가지고 조사강도 조절이 가능한 솔라 시뮬레이터를 사용하여, 전면은 조사강도 $G_f = 1000 \text{ W/m}^2$ 로 하고 후면은 위에서 나타난 범위에 들어가는 적어도 2 개의 조사강도 수준에서 측정이 가능하다.

사용한 방법과 무관하게 P_{max} vs. G_r 관계의 다이어그램이 필요하다. G_r 는 G_E 방법에서처럼 방정식 (14)로부터 계산하거나 혹은 양면조사 방법으로 측정할 수 있다. 데이터 포인트를 선형 피팅하여 Y-축이 $P_{max, STC}$ 에서 교차하도록 한다. 이 그래프의 기울기가 양면형의 출력 이득을 고려한 BiFi 로 정의된다. BiFi 기울기의 사용은 전면은 STC 에서 그리고 후면 조사강도는 어떤 수준에서도 모듈의 성능을 내삽법으로 계산할 수 있다는 가정을 토대로 한 것이다.

그림 14 는 양면형 계수 $\phi = 0.75$ 를 가진 양면형 모듈의 BiFi 결정의 사례를 나타낸 것이다. 출력 산출량(P_{max})은 단면 조사 시스템을 사용하여 측정한 것이다.



©TÜV Rheinland

그림 14: BiFi 파라미터 결정을 위한 G_r 함수에 따른 P_{max} 그래프.

그림 14 에서 BiFi 는 방정식 (15)에 명시한 바와 같이 측정 포인트의 선형 피팅 라인의 기울기로부터 결정된다. 등가 조사강도 G_E 값은 완전하게 임의적이지는 않고, $G_r = 100 \text{ W/m}^2$ 와 $G_r = 200 \text{ W/m}^2$ 조건에 가까운 값들이 구해졌는데, 여기에 대해서는 추후 보고할 계획이다. 마찬가지로, 양면형 기준 시험조건(BSTC)에 해당하는 $G_r = 135 \text{ W/m}^2$ 도 계속하였다. (아래 양면형 출력 등급 섹션 참조).



후면 조사강도 100 W/m² 와 200 W/m² 인 경우의 출력 산출량

이 스텝에서는 2 개의 후면 조사강도 수준에서 모듈의 성능을 결정하기 위해 BiFi 기술을 이용한다.

- $P_{maxBiFi100} = P_{max,STC} + BiFi * 100 \text{ W/m}^2$
- $P_{maxBiFi200} = P_{max,STC} + BiFi * 200 \text{ W/m}^2$

표 2 는 그림 14 에 있는 사례의 계산 값이다.

표 2: 그림 14 사례에서의 $P_{maxBiFi100}$ 와 $P_{maxBiFi200}$ 의 계산.

BiFi	PmaxBiFi100	PmaxBiFi200
0.286	425.7	454.3

3.1.2 양면형 출력 등급

양면형 모듈의 공칭 출력에 대한 명확한 정의가 없는 점이 최종 수요자들로서는 하나의 문제점이다. 대부분의 제조업체들은 출력등급을 통상적으로 사용하는 전면의 STC 출력 산출량에 연관시키며 그리고 일부는 후면으로부터의 기여분을 가정하여 추가한다. 양면형 모듈의 출력 산출량 등급과 관련하여 명확하게 정의된 기준 조건이 없으며 모듈의 명판 혹은 제조업체의 데이터시트에 양면형 측면을 어떻게 포함시키는지에 대한 요건이 없다.

양면형 모듈의 라벨링 관행에 대한 투명성을 제공하기 위해 IEC WG2 는 출력 산출량 등급에 대한 적절한 기준 조건을 고려하고 있다. TÜV Rheinland 는 전면 조사강도 1000 W/m², 후면 조사강도 135 W/m² 로 특정한 양면형 시험 조건을 제안하였다 [50]. 후면 조사강도의 정의는 National Renewable Energy Laboratory (NREL)와 Sandia National Laboratories (SNL)에서 수행한 작업으로부터 나온 것인데, 다음 조건을 고려하였다.

- 알베도 인자: 0.21 (경토)
- 간극 높이(Clearance height): 1 m
- 경사각: 37°
- 전면 조사강도: 1000 W/m²

BSTC 에서의 양면형 모듈의 공칭 출력 산출량은 등가 조사강도, $G_E = 1000 \text{ W/m}^2 + \varphi * 135 \text{ W/m}^2$ 를 가지고 측정된다.

BSTC 는 출력등급의 요건의 하나로 IEC 에서 강력하게 고려되고 있다. 그림 15 는 BSTC 에서 측정한 출력을 가진 양면형 모듈의 라벨링 사례를 보여주고 있다.



Electrical Data		
	STC	BSTC
Nominal Power	300 W ($\pm 3\%$, k=2)	330 W ($\pm 3.5\%$, k=2)
Open-Circuit Voltage (V_{oc})	38.5 V ($\pm 1\%$, k=2)	39 V ($\pm 1.2\%$, k=2)
Short-Circuit Current (I_{sc})	9.4 A ($\pm 2.8\%$, k=2)	10.2 A ($\pm 3\%$, k=2)
Bifaciality (φ)	0.7 (± 0.05 , k=2)	
Maximum System Voltage	1000 V IEC	
Maximum OC Protection Rating	20 A	
Power Temp Coef. (P_{mpp})	-0.4% / K ($\pm 0.05\%$, k=2)	
Voltage Temp Coef. (V_{oc})	-0.31% / K ($\pm 0.02\%$, k=2)	
Current Temp Coef. (I_{sc})	0.05% / K ($\pm 0.01\%$, k=2)	
STC: AM1.5G; Temp. = 25°C; Irradiance = 1000 W/m ² BSTC: AM1.5G; Temp. = 25°C; Irradiance = 1000+ φ ·135 W/m ²		

©TÜV Rheinland

그림 15: STC와 TÜV Rheinland가 제안한 BSTC에서의 양면형 모듈의 출력 라벨링 사례.

3.1.3 양면형 모듈의 제품 적격성 시험

태양광모듈의 제품 적격성 시험은 다음 2 가지 규격에 정의되어 있다.

- IEC 61215 시리즈 [51]에 따른 모듈설계 적격성 시험(Module design qualification testing: MQT)
- IEC 61730 [52]에 따른 모듈안전 적격성 시험(Module safety qualification testing: MST)

양면형 모듈에 대한 추가적인 제품 인증 요건은 주로 이들 모듈들이 보이는 더 높은 작동 전류에 관한 것이다. 표 3 은 양면형 모듈의 잠재적인 추가 요건에 관한 이슈들이고, 표 4 는 잠재적으로 시험조건의 개정과 개정 사유가 필요하다고 확인된 부분들을 요약한 것이다.

양면형 모듈의 추가적인 적격성 시험 요건을 다루기 위해 TÜV Rheinland 는 2018 년에 전용으로 보유한 시험 절차 2PfG 2665/06.18 를 제안하였다. 이 사양서는 등가 조사강도에서 결정되는 더 높은 시험 전류(시험에 따라 I_{mpp} 혹은 I_{sc})나 혹은 필요에 따라서는 G_E 의 사용을 필요로 한다. 합격/불합격(pass/fail) 기준은 여전히 STC 측정(전면과 후면 모두에 조사강도 1000 W/m² 인가)에 기반하고 있다. 사양서 변경 상세는 표 4 에 있다.



표 3: 양면형 모듈의 품질과 안전 적격성에 필요한 잠재적인 추가 요건에 관련되는 이슈들.

시험	단면형 모듈 관행	양면형 시험 이슈
온도 사이클 시험 (MQT 11/ MST 51)	온도를 지속적으로 -40°C 와 $+85^{\circ}\text{C}$ 사이에서 변화시키면서 환경 챔버에서 실행. 솔더 접합부에 추가적인 스트레스를 가하기 위해서는 I_{mpp} 에 해당하는 전류 투입.	최대 출력 전류는 후면으로부터의 기여분을 고려하여야 한다.
바이패스 다이오드 시험 (MQT 18/ MST 25)	인가되는 전류는 첫 1 시간 동안에는 $-I_{sc}$ 두 번째 시간 동안에는 $-1.25 \cdot I_{sc}$.	후면으로부터의 전류 기여분이 고려되면 가열 효과가 더 높아질 것이다.
열점 내구성 시험 (MQT 09/MST 22)	단일의 음영을 가진 셀에서의 출력 소멸은 가능한 범위에서 최고가 되도록 조정하는데, 이는 모듈의 최대 출력 전류 I_{mpp} 에 의존한다.	최대 출력 전류는 후면으로부터의 기여분을 고려하여야 한다.
온도 시험 (MST21)	구성 요소와 소재의 기준 온도는 전면 조사강도 1000 W/m^2 , 주위온도 40°C 와 관련된다.	양면형 모듈의 경우, 추가적인 후면 조사강도에 의해 온도가 더 높아진다.
역방향 전류 과부하 시험 (MST26)	이 시험을 통해, 필드 작동 중에 발생할 수 있는 역방향 전류는 솔더 접합부의 과열 때문에 모듈 결함을 야기하지 않는다는 것을 증명할 것이다. 시험 전류는 명판에 있는 모듈 제조업체에서 명시한 최대 역방향 전류의 1.35 배이다.	최대 역방향 전류는 필드에서 가능할 수 있는 최악의 작동 조건을 반영해야 하는데, 즉 높은 알베도와 솔라 트랙킹에 전면 조사강도 1300 W/m^2 에 해당한다.



표 4: TÜV Rheinland 가 제안한 내구성과 안전 시험에 관한 양면형 소자용의 추가적 요건.

시험	단면형 모듈	양면형 모듈
I_{mpp} 인가 → $I_{mpp}@G_E$		
MQT 11 / MST 51 – 온도 사이클 시험	순차적으로 I_{mpp} 인가	순차적으로 $I_{mpp}@G_E$ 인가
I_{sc} 인가 → $I_{sc}@G_E$		
MQT 18 / MST 25 – 바이패스 다이오드 시험	인가 전류: 첫 번째 1 시간 @ I_{sc} 두 번째 시간 @ $I_{sc} \times 1.25$	인가 전류: 첫 번째 1 시간 @ $I_{sc}@G_E$ 두 번째 시간 @ $I_{sc}@G_E \times 1.25$
기타		
MQT 09 / MST 22 – 열점 내구성 시험	노출 동안의 조사강도는 $1000 \text{ W/m}^2 \pm 10\%$ 에 유지	노출 동안의 조사강도는 $G_E \pm 10\%$ 에 유지
MST 21 – 온도 시험	평균 조사강도는 1000 W/m^2 에 유지	평균 조사강도는 $G_E \pm 10\%$ 에 유지
MST 26 – 역방향 전류 과부하 시험	제조업체가 명시한 $I_R \times 1.35$	고려: $(n-1) \times I_{sc}@G_E \times 1.25 \times 1.35$ (만약 이 값이 더 높으면), 여기서 n 은 병렬 상태에 있는 허용 가능한 최대의 스트링 개수



3.1.5 양면형 모듈의 에너지 등급

IEC 61853 시리즈 규격은 오픈 랙에 장착한 단면형 모듈의 에너지등급 측정용으로 적절한 틀을 제공한다 [53]. 태양광산업계는 에너지등급을 양면형과 같은 새롭게 부상하는 기술과 활용분야에도 확장하고자 하는 필요성을 인식하고 있다. 그러나 그 방법과 측정절차 및 관련 불확도는 여전히 논의 중에 있다.

European EMPIR 프로젝트 Advanced PV Energy Rating(PV-Enerate)은 양면형 소자용의 IEC 61853 시리즈 규격 [54]을 가능한한 확장하여 다루었다. 일부 도출된 결과가 표 5에 요약되어 있다.

표 5: PV Enerate 에 의해 제안된 양면형 모듈용으로 IEC 61853 시리즈 규격의 확장 가능성.

관점	단면형 모듈	양면형 모듈
장착 시나리오	경사각 20°를 가지고 적도를 향함	장착된 동-서 랙 추가, 낮은 알베도
후면 조사강도	가용하지 않음	중간/높은 알베도에 대해 계산된 시간별 후면 조사강도(20°에 적도를 향함) 데이터; 균일하다고 가정
분광 보정 인자	전면 만	모듈 후면에서의 분광 응답과 모듈 아래의 분광 알베도를 포함하는 새로운 정의
기후 프로파일	전면용	후면에 대해 확장: 광대역 조사강도, 경사면의 후면에서의 직달과 확산, 새로운 면(동-서와 경사면의 후면)의 경사각 등.

3.2 백색 봉지재를 가진 모듈에서의 양면형 셀

(Menghong Wang)

양면형 셀이 시장에서 널리 채택되면서, 추가 비용의 소요나 신뢰성의 손실 없이 다양한 활용분야에서 이 기술의 성능을 최적화하기 위해 새로운 모듈 패키지 전략이 개발되고 있다. 모색되고 있는 하나의 개념은 양면형 셀을 백색의 반사성 후면 봉지재와 결합하는 것이다. 후면 조사강도가 거의 없는 지붕에 밀착 설치된 경우에는 이 설계가 에너지 수율을 상당히 증가시킬 수 있다.

백색 백시트와 유사하게, 백색 봉지재는 셀을 지나거나 주위를 통과하는 빛을 반사하여 태양광 전환으로 가용한 전체 빛의 양을 증가시킬 수 있다. 통상의 다양한 백색 백시트 [55]나 혹은 투명 봉지재를 사용하는 이중 유리 모듈에 비해, 백색 봉지재는 반사율이 더 높고 반사 경로가 더 짧은



특징이 있다. 백색 봉지재는 380~1100 nm 파장 범위에서 반사율이 90% 이상인데, 통상의 백색 백시트는 보고된 반사율이 80% 이상이다. 백색 봉지재는 파장 400~700 nm 에서 월등히 더 높은 반사율을 나타낸다 [56]. 투명한 후면 봉지재 모듈의 경우(유리-유리와 유리-백시트 설계), 백색 백시트에 의해 반사된 빛 혹은 후면 유리를 거쳐 투과된 빛은 후면 봉지재를 통과하여야 하는데, 이는 광학적 손실을 포함한다. 이처럼 백색 봉지재는, 최대의 성능 증가를 달성하는데 있어 다른 옵션보다 셀 사이에 투과된 빛을 보다 효과적으로 반사한다.

중국의 Shanghai HiUV New Materials Co., Ltd.에 의해 보고된 바와 같이, 백색 봉지재를 사용하면 양면형 PERC 셀에서 단락전류 I_{sc} 를 2.1% 증가시킬 수 있는데, 그 결과 출력등급이 상당히 증가하게 된다. 네덜란드의 Netherlands Organization for Applied Scientific Research (TNO)은 양면형 셀용으로 새로운 모듈 설계를 채택하였는데, 양면형 셀 사이와 주위에 반사도가 매우 높은 그리드 중간층을 삽입하고 전면과 후면 봉지재 (그리드 백색 봉지재)사이로 라미네이션한 구조이다 [57]. 이중 유리 양면형 모듈에 비해 백색 양면형 모듈의 경우는 단락전류가 2% 더 높은 것이 관찰되었는데, 이는 출력등급이 2.2% 증가하는 것에 해당한다.

백색 봉지재는 단면형 셀이 의사(pseudo) 양면성을 나타낼 수 있게도 도와준다. 시험결과에 의하면 백색 봉지재는 60-셀 단면형 모듈에서 출력을 4.5~5.2 W 증가시켰다 [58]. Hangzhou First Applied Material Co., Ltd 의 주장에 따르면, 백색 봉지재가 이중 유리 단면형 모듈에서 출력을 7~10 W, 그리고 유리-백시트 단면형 모듈에서는 출력을 1.2~3.5 W 증가시킬 수 있다고 한다. 양면형 셀과 같이 출력 증가는 단락전류의 증가에 의한 것이다.

백색 봉지재는 모듈 경제성에도 도움이 된다. 백색 봉지재의 가격은 투명 봉지재와 비슷한 수준이다. 그러나 백색 봉지재는, 백시트에 필요한 UV 안정제에 대한 요건이 줄어들면서 전면 내부로 투과되는 일조량의 대부분을 차단한다. 이처럼 값비싼 불소폴리머(fluoropolymers), 충전제, 혹은 백시트의 셀 쪽에 필요한 UV 흡수체의 사용을 회피하거나 줄일 수 있게 해준다.

백색 봉지재는 상당히 이른 2012 년에 개발되었지만, 대량생산은 최근에서야 이루어졌다. 봉지재 회사들은, 라미네이션 공정 중에 백색 봉지재가 버스바나 셀 위에 넘치는 것과 같은 다양한 기술적 어려움을 극복하였다. 현재 시장에 있는 백색 봉지재의 대부분은 넘치거나 주름이 잡히는 것을 방지하기 위해 사전 가교(pre-crosslinking)가 일어날 수 있도록 전자선(electron beam) 조사로 전처리된 것이다.

그러나 전처리한 백색 봉지재는 피일 오프(peel off) 강도 손실과 박리(delamination)가 일어날 가능성이 높아진다. 게다가 전처리 정도가 높으면 라미네이션 중 셀에 균열이 일어날 가능성이 높아질 수 있다. 일부 백색 봉지재, 특히 백색 EVA 는 고온고습 시험에서 부식이 더 잘 일어날 수 있다(그림 16 참조) [59]. 3 개의 셀들(AI-BSF 단면형 다결정 셀, PERC 양면형 단결정 및 PERC 양면형 다결정 셀)은 백색 EVA 를 사용하였을 때 전계발광 이미지에서 모두 심한 부식현상을 보여준다. I-V 곡선에서는 직렬저항 R_s 가 크게 증가한 것도 볼 수 있다. 반면에 백색 폴리올레핀 탄성체(POE)는 전통적인 투명 봉지재와의 사이에 심한 차이를 보여주지 않았다.

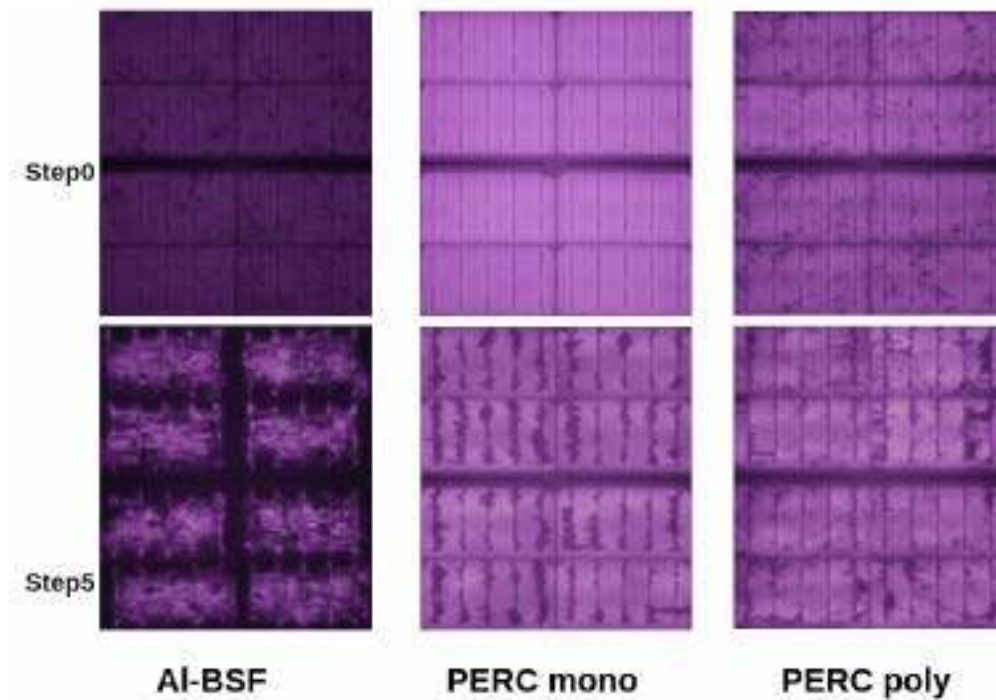


그림 16: 백색 봉지재를 가진 다양한 미니모듈의 전계발광 이미지, 고온고습(80°C, 85% RH) 노출 전과 2,500 시간 노출 후.

3.3 양면형 셀과 모듈 특유의 열화 이슈

(Radovan Kopecek, Ignacia Devoto, Tudor Timofte, Daniel Tune, Andreas Schneider, Andreas Halm)

양면형 셀과 모듈은 그 양면형 특성에 영향을 받아 열화 프로세스를 겪을 수 있다. 가장 중요한 열화는 모듈의 내부에서 시작하는 빛과 고온 유도 열화(light and elevated temperature-induced degradation: LeTID) 혹은 아래에서 기술한 여러 가지 열화 메커니즘의 총합이다. 만약에 초산이 EVA 봉지재의 분해에 의해 형성되거나 혹은 핑거가 떨어지면서 봉지재 내에 셀이 부유하게 되면, 후면에 Al 혹은 Ag 핑거를 프린팅하는 것이 열화 효과를 야기할 수 있다.

반사방지 코팅이 양면 모듈의 후면에 노출되면, 후면 퍼텐셜 유도 열화(PID)가 일어날 수 있고 그리고 셀이 전면 혹은 후면 에미터를 가지고 있는냐에 따라 다양한 영향을 야기할 수 있다. 투명 백시트와 프레임 없는 이중 유리 모듈이 PID의 다른 요인이 될 수 있고, 후면의 불균일한 빛 조사가 전면에서의 불균일한 조사 때문에 일어날 수 있는 핫스팟에 추가될 수도 있다. 아래에서는 이런 다양한 영향들을 좀 더 자세히 기술하고자 한다.

3.3.1 양면 셀/모듈에서의 LeTID

양면형 셀 제조 프로세스에서는 단면형 셀에서의 프로세스에서와는 다른 유전체와 온도를 사용한다. 양면형의 LeTID의 결과는 단면형의 것과는 상당히 다를 수 있는데, 주로 수소 유도 열화(hydrogen-induced degradation)의 기여에 의한 것이다.

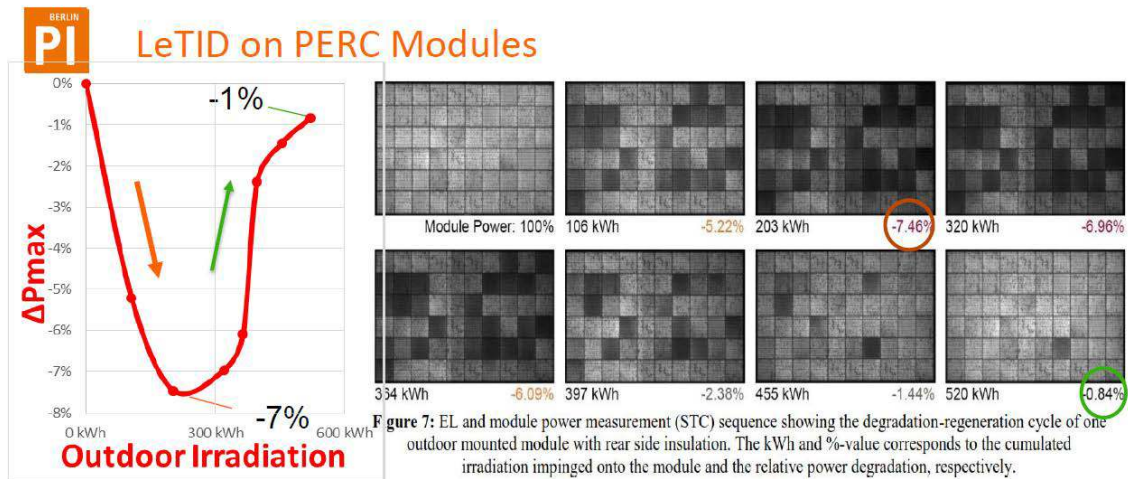
표 6은 붕소-산소(boron-oxygen) 복합체 [60], [61]의 형성과 금속 불순물 [61], [62], [63]의 수소화 그리고 PERC 셀 후면의 비부동태화(de-passivation) [64]에 의해 야기된 알려진 가장 두드러진 열화



메커니즘을 요약한 것이다. 표 6에 나타난 요인들을 감안하여 결정질실리콘 소재와 셀 프로세스를 다르면 열화를 최소화할 수 있다 [65]. 그리고 많은 셀 생산업체들은 태양전지를 열화되지 않는 상태에 유지하기 위해 셀 제조 후에 안정화 프로세스를 사용한다. 이런 조치들을 전혀 취하지 않으면 모듈은 그림 17에 나타난 것과 같이 열화될 수 있다.

표 6: PERC 열화와 셀 프로세스 중의 가능한 해결책의 요약.

열화 메커니즘	LID	HID	부동태화 열화
원인	BO 복합체 형성	높은 수소 농도	확산되지 않는 표면에서 유전체의 탈부동태화
셀 수준에서의 감소	<ul style="list-style-type: none"> • 낮은 산소 함량의 Si 소재 • 높은 비저항의 Si 소재 • 안정화 프로세스 • Ga-도핑 • N-형 소자 	<ul style="list-style-type: none"> • H-poor 유전체 층의 사용 • 프로세스 온도 키네틱스에 적응 • 낮은 소성 온도 • 얇은 웨이퍼 	<ul style="list-style-type: none"> • 도핑 농도가 낮은 BSFs 사용 • PERT 구조로 업그레이드



F. Kersten et al., 31st EUPVSEC 2015

-> Grid connected PV plants will **degrade** over several years and then **regenerate** over several years depending on the PERC cell process

그림 17: 저급의 c-Si 소재로 만든 PERC 셀 모듈에서의 LeTID와 재생, PERC 셀은 매우 높은 H-rich 반사방지 코팅으로 처리하고 프로세스 후에 안정화시키지 않았다.

3.3.2 퍼텐셜 유도 열화

PID는 태양전지와 지면(프레임 혹은 유리) 사이의 전위차 때문에 일어난다. 육안으로는 발견할 수 없고 출력 측정과 서모그래피가 현장에서의 PID 확인에 도움이 된다. 전위차에 의한 열화는 n-형 [66], [67]과 p-형 [68], [69] 등 다양한 양면형 셀을 기반으로 한 모듈에서도 발견되었다.



프레임, 유리, 봉지재 및 여타 모듈 패키지 구성 요소가 모듈의 PID 크기에 중요한 역할을 한다. 프레임이 없는 양면형 모듈의 경우 PID 염려는 줄어든다. 봉지재 소재로 POE 를 사용하면 EVA 사용 시에 비해 PID 가 크게 줄어든다 [66]. 일부 경우에, POE 사용 혹은 유리를 투명 백시트로 대체하면 모듈에서의 PID 를 피할 수 있다 [67].

양면형 셀의 구조와 기판은 모듈이 포지티브 혹은 네거티브 전위차에 의해 영향을 받는지를 결정한다. 붕소(boron) 도핑 기판은 네거티브 전압(셀에 가해진) 하에서 열화를 겪고 [67], [68], 반면에 인(phosphorous)도핑 기판은 포지티브 전압 하에서 열화가 일어난다 [67]. 그림 18 에 나타낸 바와 같이 양면형 모듈은 다음 2 가지 유형의 PID 를 보여준다 [67], [69].

1. 셉팅 유형 (PID-s): 이온이 적층 결함안으로 이동함에 따라 접합을 셉팅하면서 셉팅 저항에 영향을 미침
2. 분극화 (polarization) 유형 (PID-p): 부동태화 층에 이온이 축적되어 표면 부동태화가 손실됨

PID-s 는 이해가 잘 되는 반면에, PID-p 메커니즘은 아직 명확하지 않다. 유리로부터의 Na 이온이 n-도핑 층에 영향을 미치는 것으로 PID-p 를 설명할 수 있다. 그러나 p-도핑 층 역시 PID-p 에 영향을 받지만 [67], 네거티브 이온의 이동 출처는 어떤 것도 설명할 수가 없다. 끝으로 모듈은 후면 보다 전면이 더 큰 영향을 받는다 [67].

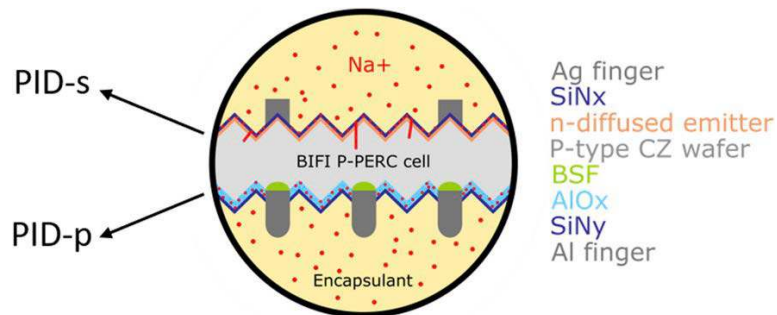


그림 18: 유리/유리 모듈을 사용했을 때 p-PERC 셀의 양면 PID: PID-s 는 전면/에미터 측에서 일어나고 PID-p 는 셀의 후면에서 일어난다.

3.3.3 금속전극과 봉지재

표준 태양전지는 Ag 그리드와 균일한 Al 금속전극을 가진다. 양면형 PERC 의 Al 핑거 혹은 n-PERT 의 Ag/Al 핑거가 사용되면 EVA 의 열화 부산물로 형성된 초산이 핑거들을 에칭할 수 있으며 셉팅 저항이 더 높아지고 충전율이 낮아진다. Yingli Solar 사는 자체 생산 Panda 모듈에서 관련된 문제를 일부 갖고 있다. 또 다른 이슈로 봉지재내에서 셀이 부유하게 되면 취약한 핑거가 떨어질 수 있다.

3.3.4 프레임 없는 모듈과 투명 백시트

현재 양면형 모듈의 90%는 이중 유리 모듈이다. 양면형 초기에는 많은 이중 유리 모듈이 프레임 없는 형태로 제공되었다. 장착 중의 유리 파손과 복잡한 장착 시스템과 관련한 어려움 때문에 프레임을 가진 이중 유리 모듈이 최신기술이 되었다. 일부 이중 유리 모듈은 수분과 다른 화학물질이 모듈내로 들어가는 것을 줄이기 위해 가장자리 실링을 사용한다. 최근에는 가장자리 실링 사용이 줄어들었는데, 모듈 패키지 내로 수분 이동의 가능성이 높아 부식과 다른 화학 프로세스를 통한 열화로 이어질 수



있기 때문이다. Dupont 사가 제공한 것과 같은 투명한 백시트가 양면형 시장에 진입하고 있다. 이런 폴리머들은 수분 침투를 통한 또 다른 가능성 있는 열화의 요인이 되지만, 초산을 소멸하며 이에 따라 부식과 출력 열화를 줄인다. 그러므로 폴리머 백시트와 유리 사이의 장단점은 아직 결론이 내려지지 않았다. 초산을 형성하지 않는 봉지재의 경우, 예를 들어 POE 는 수분과 초산의 투과율이 EVA 에서처럼 부식 문제를 야기하지 않는다. 이런 봉지재를 가진 모듈의 경우에는 둘 중 하나를 선택한다.

3.3.5 핫스팟

IEC 61215 에 의하면 “핫스팟” 가열은 모듈내에서 그 작동 전류가 음영이 진 혹은 모듈내에 결함이 있는 셀과 셀그룹의 낮아진 단락전류를 초과할 때 일어난다. 이런 조건이 일어날 때 영향을 받은 셀 혹은 그룹은 역방향 바이어스에 놓이게 되고 출력을 소멸하게 되면서 과열을 야기한다 [51].

스트링 내의 셀에 음영이 지거나 결함이 있을 때, 최대 출력 소멸은 스트링 작동 포인트, 불일치의 정도 그리고 셀의 역방향 바이어스 특성에 의존한다 [70]. 양면형 모듈 기술의 경우, 전류 매칭의 정도가 작동과 설치 조건에 따라 크게 달라진다. 트래킹 시스템(혹은 고정형)의 토크 튜브와 걸려있는 와이어가 후면에 음영을 만들 수 있다 [71]. 양면형 모듈은 더 높은 출력을 생산하고 따라서 단면형에 비해 더 높은 전류(전체 셀의 사용을 가정)를 나타낸다. 그러므로 셀 미스매치가 모듈에서 국부적인 온도차를 더 높게 만들 수 있다. 파괴(breakdown) 전압이 높은 태양전지는 역방향 바이어스(예를 들어 음영 하에서)에서 작동할 때 더 높은 온도를 유도한다.

중앙에 위치한 트래킹 튜브로부터 특정한 거리에 양면형 모듈을 2 줄로 설치하면 음영을 줄이거나 방지할 수 있으며 그리고 트래킹 튜브 가까이에 정선 박스를 가진 모듈을 설치하면 와이어에 의한 음영을 줄일 수 있을 것이다.



4 양면형 시스템

4.1 알베도

(Bill Marion)

알베도는 표면이 반사하는 입사광의 비율이다. 그 값은 태양광의 분광 및 각도 분포와 함께 변하기 때문에 상수가 아니다. 이런 변화는 하루 중의 시간, 계절 및 위도 그리고 흐린지 맑은지에 따라 태양의 위치가 변하기 때문에 일어난다.

얼음, 눈 및 물을 제외한 대부분의 표면은 700 nm 이상의 파장에서는 알베도가 증가함을 보여준다 [73]. 이른 아침과 늦은 오후에는 태양광 스펙트럼의 분포가 더 긴 파장쪽으로 이동하기 때문에 이 기간의 알베도는 낮 시간에 측정한 값보다 약간 더 큰 값을 가진다. 그리고 특정 면에서의 태양일조량의 입사각이 증가하기 때문에 알베도가 증가할 수도 있다..

표면 상태도 알베도에 영향을 미친다. 건조한 흙은 젖은 흙보다 알베도가 더 크고, 건조 식물이 녹색 식물(식물 성장을 위해 400~700 nm 범위의 태양광을 사용한다)보다 알베도가 더 크다. 표면 거칠기 역시 중요한 인자인데, 자가 음영(self-shading)이 증가하기 때문에 더 거친 표면일수록 알베도가 더 낮다.

Iqbal 가 제공한 다양한 표면의 알베도 값의 범위가 표 7 에 소개되어 있다 [73].

표 7: 다양한 표면의 알베도 범위.

표면	알베도
풀	0.15 ~ 0.26
눈	0.55 ~ 0.98
검은 흙	0.08 ~ 0.13
점토 흙	0.16 ~ 0.23
모래	0.21 ~ 0.60
아스팔트 포장(신규)	0.09
아스팔트 포장(풍화된)	0.18

4.1.1 알베도 측정 데이터

알베도는 알베도계(albedometer)로 측정하는데, 이는 일사량계 같은 수평면 조사강도 센서로 구성되는데, 하나는 천공을 향하고 다른 하나는 지면을 향한다. 알베도는 지면 방향 일사량계로 측정된 조사강도를 천공 방향 일사량계 측정 조사강도로 나눈 값으로 정한다. 알베도계는 통상 매끈한 표면 위 1~2 미터 위에 설치된다. 위치를 높이는 경우는 미확인 식물 혹은 눈이 내린 조건 하에 있는 위치에 흔히 사용된다.

미국에서는 2 개의 측정 네트워크가 알베도를 측정하는데, Surface Radiation Budget (SURFRAD) 와 AmeriFlux 네트워크이다. 전자는 7 개의 스테이션으로 구성되어 있으며 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)에 의해 운영된다. 데이터는, 생태시스템 CO₂, 물 및 에너지



플렉스를 측정하기 위해 북미, 중미, 남미에 있는 스테이션을 운영하는 개별 과학자들에 의해 AmeriFlux 네트워크에 제공된다.

알베도 측정 데이터에 접근을 용이하게 하기 위해 National Renewable Energy Laboratory(NREL)은 SURFRAD 와 AmeriFlux 데이터를 융합하여 다운로드 가능하게 한다 (<https://data-hub.duramat.org/project/about/albedo-study>). 이 사이트는 개별 회사들이 제공한 알베도 데이터도 포함하고 있다. 알베도 데이터 세트는 시계열 데이터를 포함하는데, 표로 작성한 월간과 연간 데이터, 월간과 시간별 알베도 값의 플롯 그리고 사용자 가이드 등이다. 하나의 사례로, 그림 19 는 미국 일리노이즈 Bondville 의 월간 알베도 값 플롯을 보여주고 있다. 겨울 기간의 달에 알베도와 그 변화폭의 증가는 눈과 그 연도별 변화폭 때문이다.

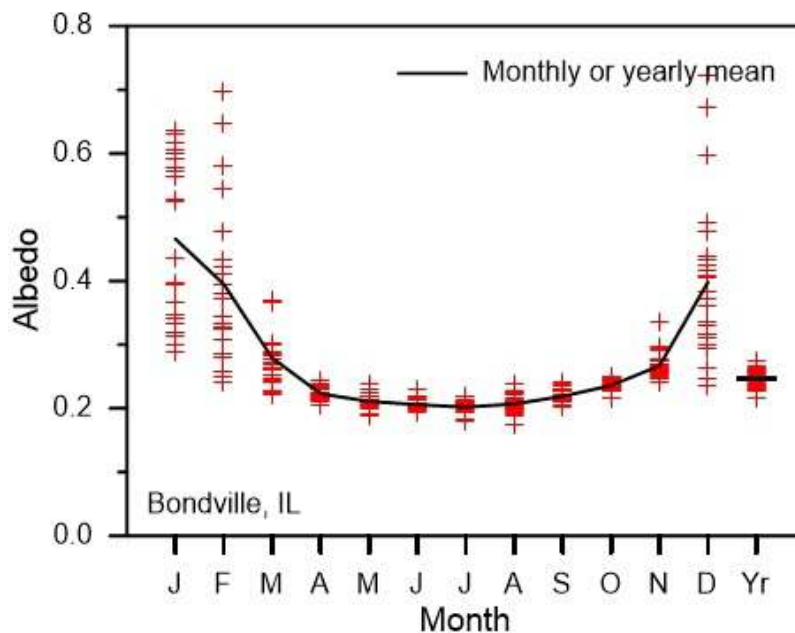


그림 19: 미국 Bondville 의 월간과 연간 알베도 평균.

4.1.2 위성 추출 알베도 데이터

다수의 위성 추출 알베도 데이터베이스가 존재하는데, 공간과 시간적 해상도가 다양하다. 데이터의 주요 소스는 지구의 에너지 수지 결정을 용이하게 하기 위해 수행하는 위성의 원격탐사 작업이다. 21 개의 데이터베이스 목록이 Gueymard 등에 의해 작성되었다 [74].

양면형 시스템의 시간적 및 공간적 요구에 가장 중요한 소스의 하나는 Terra 와 Aqua 위성에 탑재된 센서로 측정된 중간 해상도의 분광복사계 (MODIS) 이미징 데이터이다. 이들 데이터로부터 30 arc-second 격자 알베도 결과물은, 하늘이 청명할 때 16 일 기간에 걸쳐 표면 반사도를 여러 각도에서 측정한 것으로부터 추출한 것이다. National Solar Radiation Database(NSRDB)는 MODIS 알베도 결과물을 그 데이터안에 포함시킨다.

NSRDB 는 21°S 에서 60°N 사이 미국과 아메리카의 시계열 일조량과 기상 데이터를 포함하고 있다 [75]. NSRDB 의 공간 해상도 0.04° (4 km) 를 맞추기 위해 평균을 사용하여 30 arc-second MODIS 화소가 집계되었다. 통상적으로 16 에서 25 MODIS 화소는 NSRDB 화소 안으로 합산되었다 [76]. NSRDB 데이터는 <https://nsrdb.nrel.gov> 에서 다운로드 받을 수 있다.



4.2 양면형 이득

(Christian Reise)

동일한 방향과 설계의 단면형 시스템에 비해 양면형 시스템에 의해 생산된 추가 에너지를 양면형 이득(bifacial gain; BG)이라 한다. 여기서는 이 추가 에너지의 측정과 이 측정에 포함된 이슈들에 대해 논의하고자 한다.

섹션 3.1 은 양면형 모듈의 측정과 특성분석을 기술한 것이다.

시스템 수준에서 양면형 이득은 특정 기간에 걸쳐 생산된 전체 에너지 산출량의 전면 기여분 대비 후면 기여분의 비로 정의된다.

$$BG_{sys} = E_{rear} / E_{front} \quad (16)$$

BG_{sys} 는 후면 모듈에 도달하는 조사량의 양과 분포에 크게 의존하는데, 이는 전면보다는 여러 가지 더 많은 인자들에 따라 달라진다.

- 장착 기하학적 구조(모듈 높이, 경사각, 줄과 줄 사이의 거리)
- 지면 알베도와 그 균일도
- 장착 구조, 이는 후면 조사강도의 균일도에도 영향을 미친다.
- 주변장치(balance of system: BOS) 구성요소의 설계와 사이징

장착의 개념과 영향 인자들의 다양함으로 인해 양면형 이득은 단순히 모듈의 하나의 특성이 아니라 특정 시스템의 환경과 장착 조건에 의존하는 것이 명백하다. 각 시스템의 레이아웃을 개별적으로 평가해야 하며, 영향 인자를 충분히 반영하기 위해 양면형 이득을 다음과 같이 구분할 수 있다.

- BG_{opt} : 광학적 양면형 이득
- BG_{mod} : 모듈 (혹은 직류) 양면형 이득
- BG_{sys} : 시스템 양면형 이득

여기서 광학적 양면형 이득은 모듈 후면으로부터의 (평균) 조사강도를 가르킨다.

$$BG_{opt} = G_{rear} / G_{front} \quad (17)$$

그러나 이 공식은, 전면과 후면 조사강도 모두 모듈면 전체에 대해 일정한 값을 나타내는 것이 아니므로 현실을 너무 단순화시킨 것이다. 전면 조사강도(G_{front})는 부분적인 음영을 겪을 수도 있고, 적어도 대부분의 경우에서 확산 조사강도의 일부분은 이웃하는 모듈 줄에 의해 차단된다. 후면에서는 장착 기하학 구조와 랙킹 구조가 불가피하게 불균일도의 요인이 된다.

다른 이슈 역시 BG_{opt} 의 적절한 측정을 복잡하게 만든다. 예를 들어, 모듈 표면 당 하나의 단일 센서로는 모든 태양전지 전체에 걸쳐 조사강도 수준의 완전한 분포를 포착할 수는 없을 것이다. 이들 이슈는 섹션 0 에서 추가 논의하고 정량화할 것이다.

양면형 모듈의 후면은 일반적으로 전면보다 효율이 떨어진다. 전면 효율 대비 후면 효율의 비를 양면형 계수(bifaciality factor) φ 라 한다. 이처럼 어떤 모듈의 후면에서의 전기 생산은 광학적 이득에 비례하지 않고 양면형 계수에 의해 줄어들게 되는데, 이것이 모듈의 양면형 이득으로 이어진다.

$$BG_{mod} = (G_{rear} * \varphi) / G_{front} \quad (18)$$

이 공식 역시 일부 단순화를 함축하고 있다. 핵심 이슈는 φ 이 상수인지 아니면 조사강도 수준, 전면 대비 후면의 비와 작동 온도 같은 파라미터에 의존하는지이다.



태양광모듈에서 시스템 수준으로 이동할 때 2 개의 주요 비선형 메커니즘이 양면형 이득의 추가 감소로 이어지는데, 오믹 손실과 클리핑(clipping) 손실이 그러하다.

양면형 모듈은 단면형보다 저 높은 전류를 생산하는 반면에 전압은 다소 일정하다. 케이블의 직경이 이 높은 전류에 적합하지 않으면 오믹 손실(직류와 교류 모두)은 전류의 제공에 비례하여 증가한다.

흔히 출력 클리핑이 오믹 손실보다 더 영향이 큰 인자가 될 수 있다. 출력 클리핑은 과부하로부터 인버터를 보호하거나 혹은 유틸리티 그리드의 접속점에서 투입 전력의 제한을 강제할 수 있다. 이들 손실은 주로 AC 대비 DC 의 비에 의해 영향을 받는데, 이 비는 즉 태양광발전기의 공칭 출력을 인버터의 공칭 출력이나 혹은 에너지 생산 포인트에서의 출력 한계로 나눈 것이다.

그러므로 BG_{sys} 의 추가 에너지 생산은 BG_{mod} 의 것과는 다를 수 있다. BG_{sys} 의 최종 값은 2 개의 시뮬레이션 실행(혹은 2 개의 측정)으로부터 유도될 수 있는데, 하나는 양면형 모듈을 그리고 다른 하나는 동일한 특성을 가진 단면형 모듈을 가지고이다.

$$BG_{sys} = E_{rear} / E_{front} = (E_{bifa} - E_{mono}) / E_{mono} \tag{19}$$

BG_{sys} 를 BG_{mod} 에 근사하게 유지하기 위해서는 BOS 구성요소 사이징이 다음 2 방법 중 하나를 통해 양면형 모듈의 추가 이득에 적합하여야 한다.

- 방법 A: 양면형시스템에서 단면형시스템에서와 동일한 수의 모듈을 사용하고 양면형 BOS 구성요소를 증가된 전류와 수율에 피팅하여야 한다.
- 방법 B: 단면형시스템에 의해 생산된 연간 에너지수율과 동일한 값을 얻을 수 있도록 양면형시스템에서 모듈의 개수를 줄인다.

표 8 은 $+\Delta$ 혹은 $-\Delta$ 단위로 표기한 이들 변화를 나타낸 것인데, 여기서 Δ 는 대략 양면형시스템 이득 BG_{sys} 의 백분율에 상당하는 값이다. 표는 구성요소 비용과 토지임대료와 울타리 같은 면적 관련 항목 둘 모두의 비용을 고려한다.

표 8: 단면형에서 양면형으로 전환할 때, BOS 구성요소의 사이징과 면적 관련 비용에서의 변화.

영향을 받는 비용	방법 A: 모듈 개수의 변화 없음; Δ 만큼 수율 증가	방법 B: 양면형 모듈 개수 Δ 만큼 감소; 같은 수율
모듈		$-\Delta$
케이블	$+\Delta$ (직경이 더 커짐)	(길이는 줄고 직경은 더 커짐)
인버터	$+\Delta$	
변압기	$+\Delta$	
면적 관련 비용		$-\Delta$



4.3 불균일한 후면 조사강도

(Joshua S. Stein and Christian Reise)

태양광모듈의 후면은 통상 지면을 향하기 때문에 모듈과 어레이의 후면에 도달하는 조사강도는 통상적으로 전면에 떨어지는 빛보다 훨씬 더 불균일하다. 지면은 일반적으로 식물, 돌, 랙킹 같은 다양한 종류의 물질로 구성되어 있으며 음영 패턴이 복잡하고 변화가 심하다. 이런 불균일성이 시스템내에서의 불일치 손실로 이어지며 양면형 시스템 특유의 손실 인자가 된다.

Deline 등은 조사강도의 공간적 분포를 정량화 하기 위해 2 가지 메트릭(metric)을 소개하였다 [77].

- 변화 계수(coefficient of variation: CoV)
- 상대평균 차이(relative mean absolute difference: RMD)

후면과 전체 조사강도의 변화를 정량화 하기 위해 이들 메트릭스를 사용할 수 있다. CoV(표준편차를 평균으로 나눈 값)는 정규 분포 데이터의 변화에 좋은 메트릭스이고, RMD 는 불균일하게 분포된 데이터를 기술하는데 더 적절하다. 양면형모듈에서 각 셀 i 의 전체 조사강도는 다음과 같이 계산한다.

$$G_{total,i} = G_{front,i} + \phi_{Bifi} G_{rear,i} \quad (20)$$

여기서 $G_{front,i}$ 와 $G_{rear,i}$ 는 이 셀에서 전면과 후면 조사강도이고, ϕ_{Bifi} 는 셀의 양면형 계수이다.

모듈을 가로지르는 조사강도의 CoV 는 다음과 같다.

$$\sigma[\%] = \frac{1}{\bar{G}_{total}} \sqrt{\frac{\sum(G_{total,i} - \bar{G}_{total})^2}{n-1}} \times 100\% \quad (21)$$

여기서 \bar{G}_{total} 는 모듈에 있는 모든 셀들의 전체 조사강도 평균이고, n 은 모듈에 있는 셀의 개수이다.

모듈을 가로지르는 조사강도의 RMD 는 다음과 같다.

$$\Delta[\%] = \frac{1}{n^2 \bar{G}_{total}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |G_{total,i} - G_{total,j}| \times 100\% \quad (22)$$

Sandia 는 양면형 어레이 내에서 후면과 전체 조사강도 변동성을 측정하기 위해 고객용의 조사강도 분포 모듈(irradiance distribution module: IDM)을 개발하였다(그림 20 참조) [78]. 소자는 10 개의 교정된 기준 셀을 표준 60-셀 모듈과 같은 사이즈의 알루미늄 플레이트의 후면에 부착하여 만든 것이다. 이 플레이트는 양면형 어레이 내의 다양한 위치에 두고 후면 조사강도 분포를 측정한다.

2016 년 12 월에 모듈 면적을 가로질러 후면과 전체 조사강도의 공간적 변화를 측정하기 위해 IDM 을 고정 경사 양면형 어레이에 두었다. 이 어레이는 고정 경사각으로 여러 개의 줄로 설치된 것인데, 바닥은 약 0.25 의 지면 알베도를 가진 콘크리트 블록으로 다졌고 그림 21 과 같이 약 35° 의 경사각을 가지고 있다. 그림 22 는 2 일간 측정된 조사강도를 보여준다.

이 장치로부터 2 일간 각 시간 단계별로 후면 조사강도용의 CoV 와 RMD 가 계산되었다. 그림 23 은 시험 기간에 걸쳐 2 개의 메트릭스가 매우 유사함을 보여주고 있다. 매우 높은 입사각과 긴 음영 때문에, 청명한 날에 변화가 더 심하고 항상 매일의 시작과 끝 무렵에 더 심하다는 것을 주목할 필요가 있다. 오후에서의 두드러진 피크는 IDM 가까이 있는 복잡한 빛과 바닥 블록에 의해 야기된 것인데, 오후에 부분적으로 조사가 되면서 이웃 셀이 다른 셀보다 더 많은 빛을 받게 만들어 준다. 이런 결과들은, 일출과 일몰 시에 짧게 태양이 직접 어레이 후면을 비추는 여름 철에는 달라질 수 있을 것이다. 그림 24 는 전체 조사강도(양면형 계수 1 로 가정)용으로 동일한 메트릭스를 보여준다.



변동성은 그림 23 에서보다 약 한자리수 정도 더 낮으며 청명일과 흐린 날 사이의 크기 차이는 상당히 줄어들었다



그림 20: 10 개의 기준 셀의 위치를 보여주는 Sandia IDM 의 후면.



그림 21: (좌) 해당 모듈 줄의 중간에 위치한 IDM 의 전면. (우) IDM 의 후면.

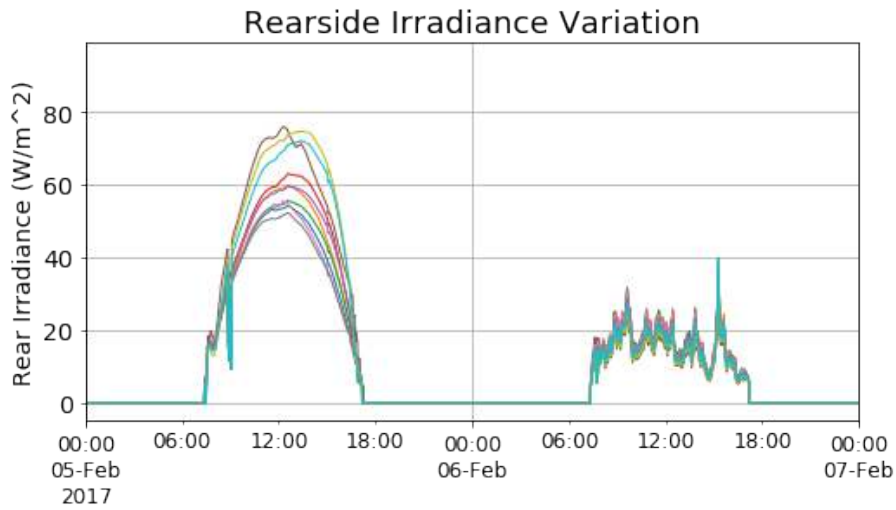


그림 22: 35° 기울기를 가진 모듈 줄의 중간에 위치한 IDM 위에 부착한 10 개의 개별 기준 셀로 측정된 후면 조사강도.

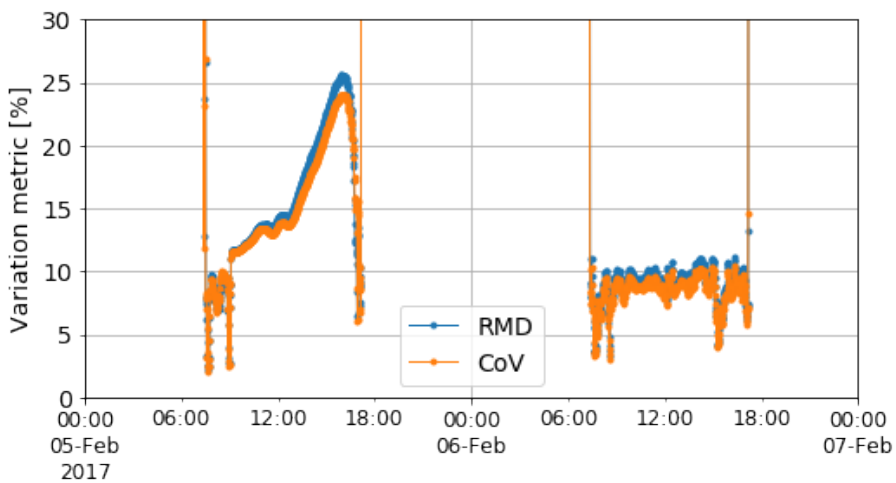


그림 23: 2 일 동안 Sandia 에서 측정된 후면 조사강도에서의 공간적 변화, 미국 New Mexico.

위의 평가는 특정 사이트에서의 측정에 기반한 것이지만 유사 연구를 수치 시뮬레이션으로 수행할 수도 있다.

이 섹션의 2 번째 파트에서 소개한 사례는 사우디아라비아 중앙 사막에 위치한 수평 단일-축 트래킹(HAST) 시스템을 다룬다. 시스템 레이아웃(저자에 의해 상업용 수율 예측에 적용)은 2 개의 모듈 줄과 함께 트랙커 테이블로 구성되어 있다. 모듈은 트랙커 축을 따라 틈을 두고 초상화 모드로 장착되었다. 테이블 폭(틈 포함)은 4.3 미터이고, 트랙커 사이의 축간 거리는 9.08 미터 그리고 알베도는 약 30%로 가정하였다. 지면(수평일 때) 위 모듈 높이는 2.2 미터이다. 시스템에서 지면까지 충분한 거리와 보다 균질한 지면(식물, 콘크리트 블록이 없음)을 가진 최적화된 건설 때문에 불균질도는 더 작을 것으로 예상된다.

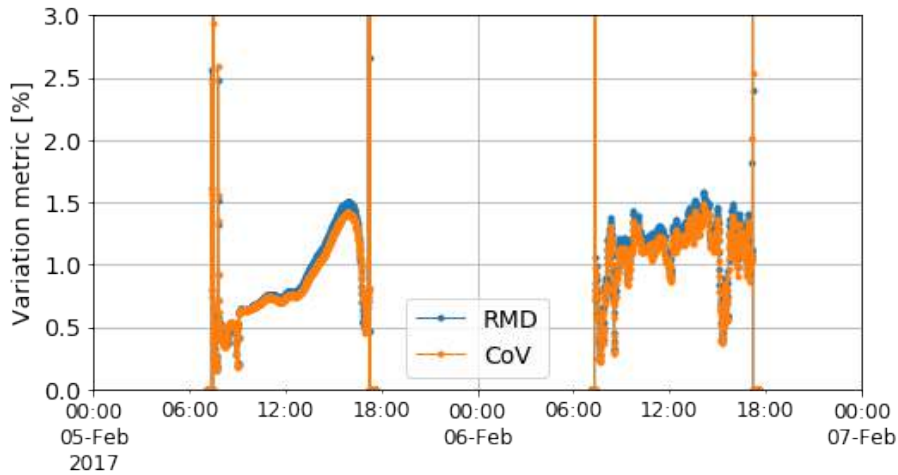


그림 24: 2 일 동안 Sandia 에서 측정된 전체 조사강도에서의 공간적 변화, 미국 New Mexico.

그림 25 는 일련의 주어진 기상 조건에서 하나의 트랙커 테이블(즉, 2 개의 모듈)을 관통하는 횡단면에 대해 전면, 후면과 유효 조사강도 ($\varphi = 70\%$)를 보여준다. 후면 조사강도는 가장자리로부터 트랙커 테이블의 중심 쪽으로 현저하게 감소한다. 토크 튜브(이 경우는 사각형 튜브)의 영향은 무시할 정도이고 다만 후면 조사강도에서만 보인다. 하루 전체 동안 운용한 경우, 그림 26 은 15 분 간격의 조사강도 분포를 보여준다.

위에서 보여준 고정형 시스템과 직접 비교가 가능토록 하기 위해 똑 같은 매트릭스 CoV 를 HSAT 시스템용으로 사용하였다. 그림 27 은 후면 조사강도의 공간적 변동을, 그림 28 은 유효 조사강도(즉, $G_{\text{front}} + \varphi G_{\text{rear}}$)의 변동을 보여준다. 양쪽 그림은 4 일의 서로 다른 날의 결과들을 결합한 것으로, CoV 는 계절이나 절대 조사강도에 거의 의존하지 않는다. 가능한 예측과는 대조적으로 이 트랙커 설계용으로 계산된 CoV 값은 New Mexico 실험 시스템의 것과 매우 유사하다. 이는, 후면 조사강도의 공간적 변동은 주로 전체 기하학적 측면에 의해 영향을 받고 단일 구조 요소에 의해서는 거의 영향을 받지 않는다는 결론에 이르게 한다.

단일-축 트랙커에 대한 추가 계산은, 후면 조사량의 불균질도는 확실히 뚜렷하지만, 전면 조사량과 함께 그것은 단지 전체 조사량에서 $\pm 5\%$ 의 변동을 야기할 뿐이다. 단일-축 트랙커 위에 하나의 모듈을 초상화 모드로 설치한 극한적인 경우에, 모듈 당의 불일치 손실은 0.5% 미만으로 유지된다. 이는 모듈 당 수율에서의 큰 감소는 없다는 것을 의미한다.

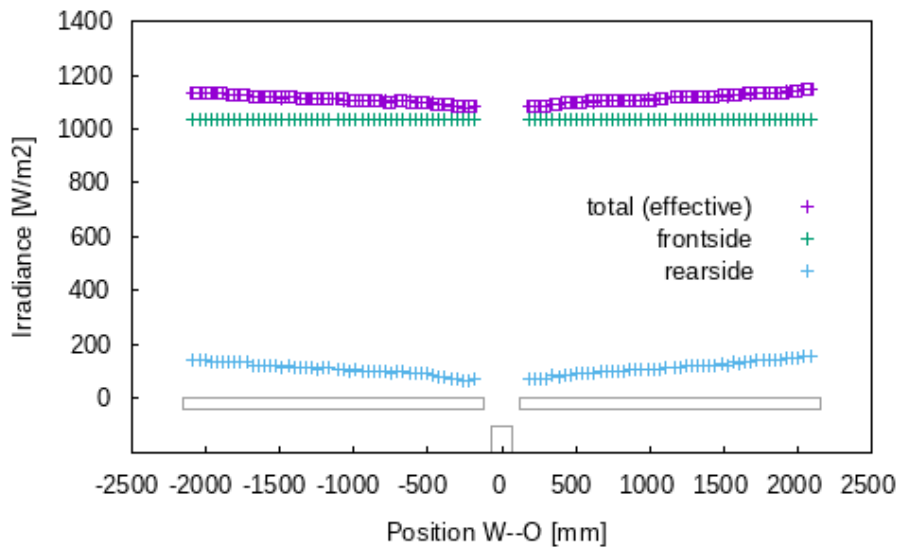


그림 25: 하나의 시간 스텝 동안(6 월 21 일 정오) 수평 단일-축 트래커(2P) 위에 있는 두 모듈을 가로지르는 조사강도 수준. 후면 조사강도는 가장자리로부터 트래커 테이블의 중심 방향으로 대부분 직선 모양의 감소를 보여준다.

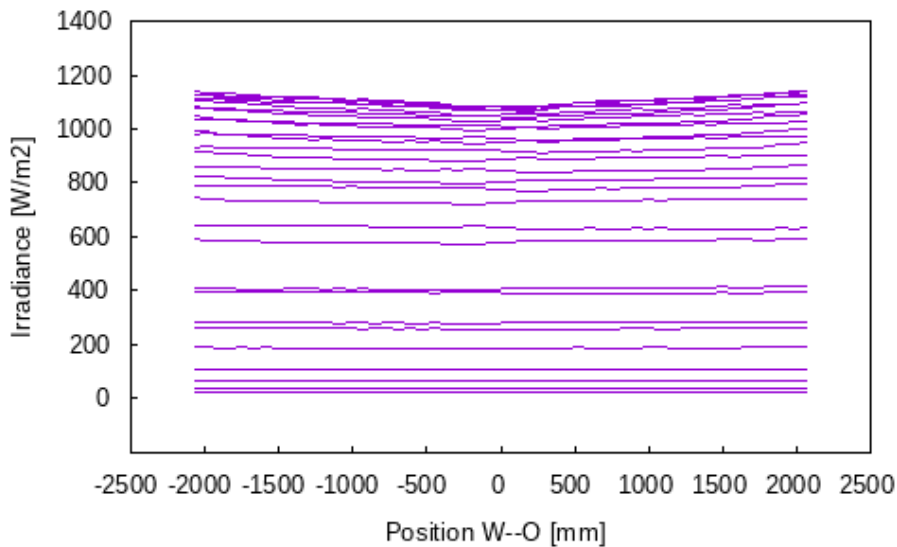


그림 26: 하루 중 모든 시간 스텝 동안(6 월 21 일) 수평 단일-축 트래커(2P) 위에 있는 두 모듈을 가로지르는 조사강도 수준. 트래커 위치가 수평에 가까울 때 조사강도 수준이 높을수록(정오 부근) 불균일도가 더 현저하다.

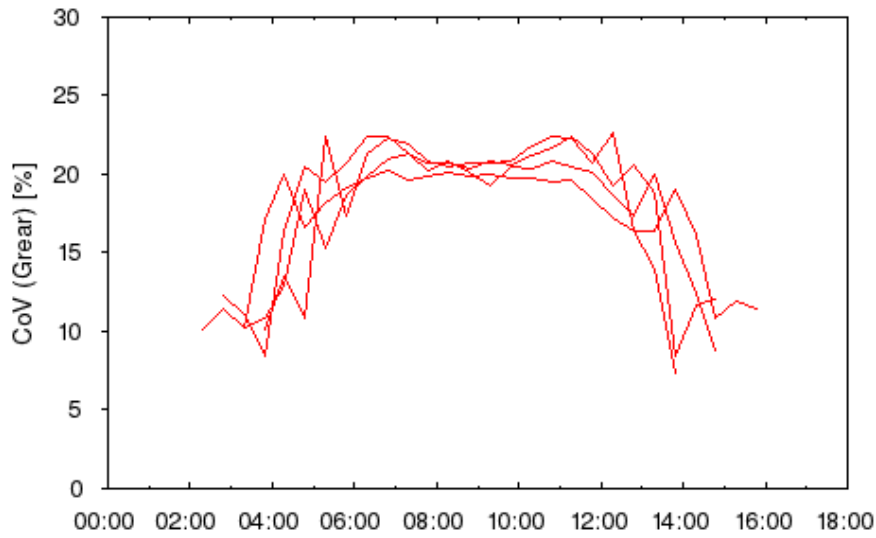


그림 27: 4 일간(3 월 21 일, 6 월 21 일, 9 월 21 일, 12 월 21 일)의 모든 시간 스텝 동안 수평 단일-축 트래커(2P) 위에 있는 두 모듈을 가로지르는 후면 조사강도의 CoV.

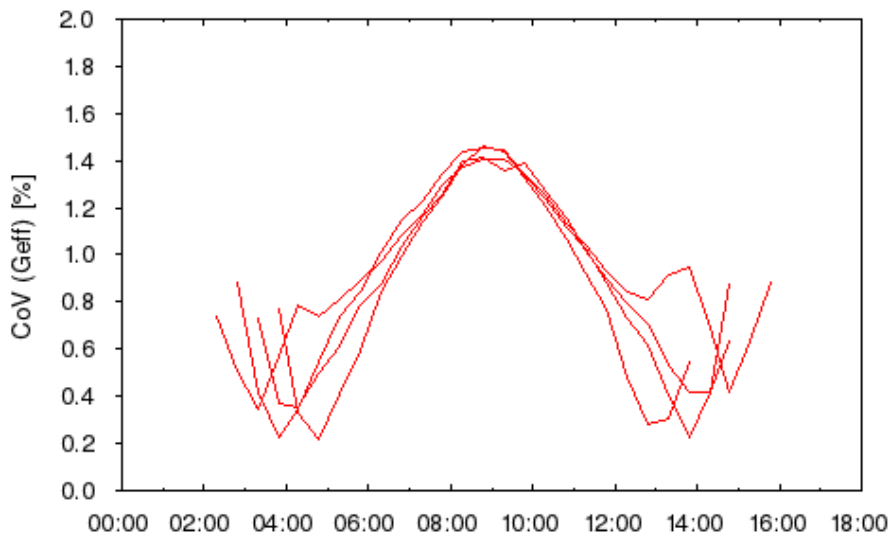


그림 28: 4 일간(3 월 21 일, 6 월 21 일, 9 월 21 일, 12 월 21 일)의 모든 시간 스텝 동안 수평 단일-축 트래커(2P) 위에 있는 두 모듈을 가로지르는 유효 조사강도의 CoV. 트래커 위치가 수평에 가까울 때 높은 조사강도 수준에서(정오 부근) 불균일도가 더 현저하다.

4.4 양면형 시스템 최대 전류

(Joshua S. Stein and Daniel Riley)

양면형 어레이는 전, 후면에 들어오는 빛으로부터 전류를 생산하기 때문에 양면형 시스템의 DC 전류는 한쪽 면으로만 빛을 받는 단면형보다 더 높다. 더 높은 전류가 양면형 시스템 구성요소에 과부하와 안전 이슈를 야기하지 않도록 보장하기 위해, 시스템 설계와 구성요소 선정에는 양면형 모듈의 직류 전류를 고려하여야 한다. 이런 인자들로는 성능 파라미터, 지면 알베도와 시스템 설계 파라미터(예, 사이즈, 경사, 방위각, 높이, 줄의 수, 줄간 간격) 등이 포함된다.



Sandia National Laboratories(SNL) 은 고전류 발생시의 주파수와 크기를 결정하고 이들 값들을 시스템 설계 파라미터에 연관시키기 위해 3 개의 다른 미국 기후에서 양면형과 단면형의 태양광 단일 모듈 시스템으로부터 직류 전류를 3 년 이상 분석하였다. 광학적인 광선추적법(ray tracing) 모델은 어레이 가장자리 부근에서 국부적 전류가 최고가 되게 만드는 가장자리 효과의 크기를 입증하였다. 모델 시뮬레이션은 관찰된 전류를 더 큰 시스템으로 확대할 수 있게 하였으며 다른 사이트와 설계 파라미터에 대해 최대 전류를 추정 가능케 해주었다.

측정결과를 얻기 위해, Sandia 는 기후가 서로 다른 3 개 지역 - New Mexico, Vermont, Nevada - 에 양면형과 단면형 모듈을 설치하였다. 각 위치는 다양한 알베도 범위, 경사각과 방위각에 걸쳐 32 개의 모듈을 가지고 있다. 많은 경우 입사된 조사강도에 의해 각기 부착된 마이크로인버터의 최대 입력 출력을 초과하는 출력이 모듈로부터 생산되었는데, 이는 인버터 클리핑의 결과를 가져온다. 이 연구에서 특히 관심이 가는 것은 각 모듈에 의해 생산된 최대 출력 전류 (I_{mpp}) 와 각 사이트에서의 조사강도 조건이다.

표 9 는 각 사이트에서의 방향과 조건 및 분석에 사용된 데이터를 요약한 것이다. 각 사이트에서 시스템 1 에서 3 은 각각 4 개의 단면형과 양면형 모듈을 가지고, 시스템 4 와 5 는 각각 2 개의 단면형과 양면형 모듈을 가진다. 각 모듈은 마이크로인버터로 계통에 연계되어 있으며 직류 전류와 전압을 모니터링한다. 모든 시스템의 전면과 후면에 떨어지는 조사강도는 각 시스템의 중앙 가까이에 장착된 한쌍의 기준 셀로 측정한다. 모니터링된 모든 값은 5 초마다 측정된 값을 1 분 동안 평균한 것이다.

표 9: 사이트와 실험 데이터의 요약.

	Albuquerque, New Mexico	Henderson, Nevada	Burlington, Vermont
데이터 시작일	2016-02-16	2016-12-24	2017-03-29
데이터 종료일	2020-07-01	2020-07-01	2019-04-01
관찰의 개수	2,218,361	1,850,648	869,540
자연 알베도	0.22	0.2	0.18-0.22 (depends on grass condition)
강화 알베도	0.6	0.3	0.25
System 1	West-facing, 15° tilt, high albedo	West-facing, 15° tilt, high albedo	West-facing, 30° tilt, high albedo
System 2	South-facing, 15° tilt, high albedo	South-facing, 15° tilt, high albedo	South-facing, 30° tilt, high albedo
System 3	South-facing, 30° tilt, natural albedo	South-facing, 30° tilt, natural albedo	South-facing, 30° tilt, natural albedo
System 4	South-facing, 90° tilt	South-facing, 90° tilt	South-facing, 90° tilt
System 5	West-facing, 90° tilt	West-facing, 90° tilt	West-facing, 90° tilt



각 사이트에 있는 각 모듈마다, 전체 조사강도 대비 측정된 I_{mp} 값을 플롯팅 하였는데, 단면형의 경우는 전면 조사강도가, 양면형은 전면과 후면의 조사강도를 합한 값이 전체 조사강도가 된다. 그 다음 데이터의 선형회귀를 이행하였는데, 10.2 A(인버터 자기제한 self-limiting) 이상의 전류값뿐 아니라 저녁 시간 데이터와 작동이 멈춘 동안의 데이터를 피하기 위해 0.05 A 이하의 전류값들을 배제하였다. 선형회귀(기울기)의 첫 번째 항은 전체 조사강도와 I_{mp} 값 사이의 개략적인 관계를 제공하며, 그리고 분석결과는 관찰 기간에 전체 조사강도 최대값에서 평가된 회귀 피팅의 값들을 보여주는데, 이는 인버터 클리핑이 없을 때의 최대 전류를 추정한 값이다(그림 29).

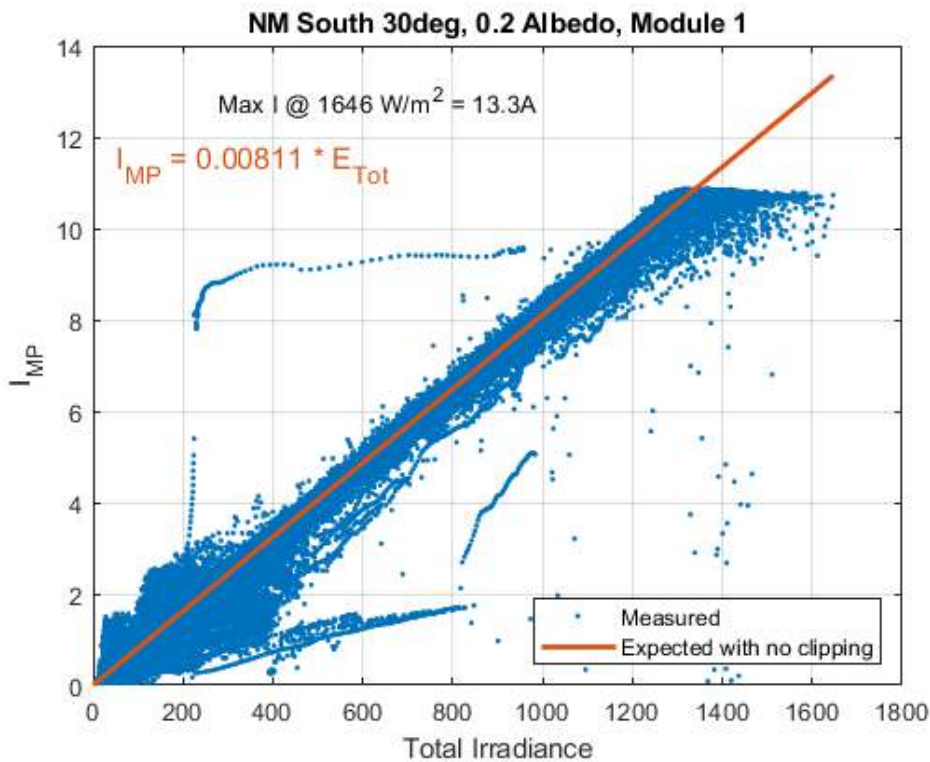


그림 29: New Mexico 에서 양면형 모듈의 전체 조사강도 (front + rear) 대비 1 분간 I_{mp} 값들의 산란 플롯의 사례. 적색 회귀 라인은 측정된 전체 조사강도 최대 값까지 확장된다. 1 분간 최대 전류는 최대 전체 조사강도에서 I_{mp} 값으로부터 추정된 것이다.

그들은 각 방향별로 전면, 후면 및 전체 조사강도에 대한 경험적인 누적 분포함수를 분석하였다. 상단 1% 조사강도의 분석은 각 사이트와 방향에서 높은 조사강도의 느낌을 제공한다. 전체 조사강도에 대한 누적 분포 함수를 회귀 방정식과 결합하면 양면형 모듈의 관찰 기간에 걸쳐 주어진 전류를 초과하는 확률을 추정하는데 사용할 수 있다. 표 10 은 양면형 모듈에 대한 1 분간 최대 전류와 전체 조사강도의 결과를 요약한 것이다.



표 10: 각 사이트에서 양면형 모듈에서 측정된 1 분간 전체 조사강도와 인버터 자기제한(self-limiting)이 없는 최대 전류 기대값.

시스템	Albuquerque, New Mexico		Henderson, Nevada		Burlington, Vermont	
	최대 전류 (A)	최대 조사강도 (W/m ²)	최대 전류 (A)	최대 조사강도 (W/m ²)	최대 전류 (A)	최대 조사강도 (W/m ²)
1	15.3-15.9	2167	13.6-13.7	1672	12.5-13.1	1593
2	15.1-15.7	2050	13.8-14	1708	14.9-15.6	1885
3	13.3-13.4	1646	13.4-13.7	1668	14-14.7	1765
4	10.9-11	1310	11-11.1	1302	14.5	1885
5	9.6-9.8	1273	9.4	1207	11-11.1	1468

표 11 은 3 시간 평균에서의 동일한 양들(quantities)을 보여주는데, 이는 양면형 어레이의 배선 사이징 요건을 평가하는데 중요하다.

이런 결과들은 양면형 시스템이 단면형 시스템보다 더 높은 전류에서 작동한다는 것을 입증한다. 가장 높은 전류는 높은 알베도(예, 강설)와 그리고 구름이 증대되면서도 주로 화창한 조건에 의해 야기되는 짧지만 매우 높은 조사강도의 결과로 일어난다. 이런 결과들은 태양광 설계자들이 양면형 모듈에 의해 생산된 추가 전류를 안전하게 다룰 수 있는 시스템을 창출하면서도 그 비용을 최저화할 수 있도록 양면형 시스템의 설계를 최적화하는 데 도움을 준다.

표 11: 각 사이트에서 양면형 모듈에서 측정된 3 시간 평균 전체 조사강도와 인버터 자기제한이 없는 최대 전류 기대값.

시스템	Albuquerque, New Mexico		Henderson, Nevada		Burlington, Vermont	
	최대 전류 (A)	최대 조사강도 (W/m ²)	최대 전류 (A)	최대 조사강도 (W/m ²)	최대 전류 (A)	최대 조사강도 (W/m ²)
1	10.4-11.2	1520	9.9-10	1225	8.8-9.2	1120
2	11.5-11.9	1566	10.1-10.3	1254	11.3-11.8	1417
3	10.3-10.4	1276	10-10.1	1238	11.3-11.8	1415
4	9.4-9.5	1138	8.5-8.6	1012	10.5	1353
5	7.7	1009	7.6	979	8.7	1153

4.5 고정 경사 시스템

(Cameron Stark, Sandia)

고정 경사 방향을 가진 양면형 모듈의 성능은 많은 연구자들에 의해 조사되었다 [79]–[83]. 그러나 이들 조사의 대부분은 대로는 단일 줄(예, [84])에 하나 내지 몇 개의 모듈로 구성된 매우 작은 시스템에서 측정된 데이터를 사용한다. 이런 조사들은 매우 높은 양면형 이득을 보고하였는데, 이는 더 큰 양면형 시스템이 생산할 수 있는 추가 에너지를 지나치게 낙관적으로 추정하게 만들었다.



많은 어레이 설계 특성들이 고정 경사 양면형의 성능에 영향을 미치기 때문에, 실제로 어레이에서의 양면형 고정 경사 시스템을 조사하는 것이 중요하다. 특히 양면형 모듈의 후면에 도달할 수 있는 빛의 양은 지면 알베도와 어레이 높이, 경사 및 방위각 그리고 줄의 개수와 줄간 간격과 줄 내에서 모듈의 위치를 포함한 여러 인자들에 의존한다 [85], [86]. 가장 높은 후면 조사강도를 받는 모듈은 줄의 양단 가까이와 어레이에서 가장 뒷줄에 위치한 것들이다. 여기에서는 어레이 설계가 성능에 미치는 영향을 보여준 고정 경사 시스템의 시뮬레이션을 소개하고자 한다.

Sandia National Laboratories 는 고정 경사 시스템의 파라미터 조사를 수행하기 위해 NREL 의 오픈소스 Python module *bifacial_radiance* 를 사용하였다. *Bifacial_radiance* module 은 소프트웨어 제품군 Radiance 용의 Python 래퍼(wrapper)이다[87]. 광선추적법은 양면형 시스템의 복잡함을 모델링 할 수 있는 기능을 제공한다. 이런 시뮬레이션은 고강도의 계산을 필요로 하기 때문에 Sandia 는 조사를 수행하기 위해 어레이 고성능 컴퓨터(HPCs)를 활용한다.

여기서 논의한 시뮬레이션과 분석의 범위는, New Mexico, Albuquerque 의 기상 데이터를 사용하여 12 개월에 걸쳐 매월 3 일 동안 총 36 일 동안 실행되었다. 해당 일자 는 매월별로 최저, 평균 및 최대 일간 일조량으로부터 선택한 것이다. 시스템 설계와 사이트 파라미터를 변동시켜 양면형 시스템에서의 그 영향을 분석하였다. 겨울 동지 때 일출/일몰 한 시간 전/후 줄과 줄 사이 음영을 피하기 위해 줄간 간격은 경사각에 따라 조정되었다.

4.5.1 고정 경사 시스템에서 줄을 따라 일어나는 가장자리 영향

시작 단계에서의 일련의 시뮬레이션은 남향의 단일 줄 중앙에 있는 모듈에 초점을 두었다. 초기의 줄은 오직 하나의 모듈로 구성되었고, 그 후면 조사강도는 시뮬레이션한 것이다. 그 다음, 중앙 모듈의 한쪽 편에 하나의 모듈을 추가하고 그 쪽 편에 9 개의 모듈이 있을 때까지 시뮬레이션을 하였다. 알베도, 경사 및 모듈 높이는 각각 0.25, 35°, 1 미터로 고정하였다. 그림 30 의 결과는 단일의 고립 모듈이 완전히 채어진 줄의 중앙 모듈보다 45% 더 높은 후면 조사강도에 노출된 것을 보여준다.

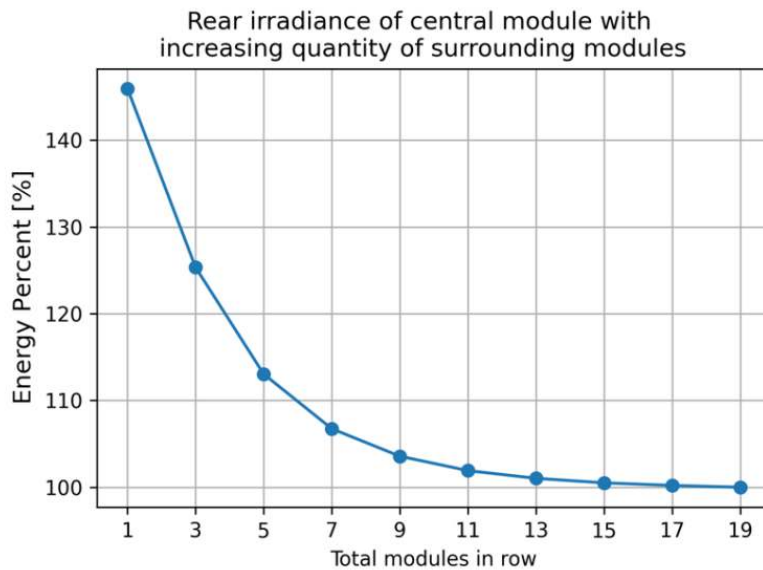


그림 30: 줄에 있는 모듈의 개수 대비 단일 줄의 중앙 모듈의 상대적 후면 조사강도. 100%는 긴 줄의 중앙에 있는 모듈의 가장 낮은 조사강도를 나타낸다.



이어 조사된 시나리오는 남향으로 1 줄로 설치된 49 개 모듈인데, 중앙 모듈로부터 줄의 끝에 있는 가장 서쪽의 모듈까지 각 모듈의 전면과 후면에서의 조사량은 시뮬레이션 한 것이다. 순차적으로 동일한 모듈의 줄을 첫 번째 줄의 북쪽가 남쪽에 추가하였으며, 가운데 줄에 있는 모듈의 후면 조사강도에 대한 영향을 관찰하였다. 이 사례에서 지면 알베도는 0.25, 높이는 1 m 에 경사는 35°이다.

그림 31 은 고정 경사, 복수 줄(multi-row) 양면형 시스템의 두 가지 중요한 특징을 보여준다.

- 줄의 수가 증가하면 후면 조사량이 감소: 줄의 중간에서의 후면 조사량은 줄이 추가로 생길 때마다 15% 이상 떨어진다. 이 영향은 단일 줄과 3 줄 사이에 가장 크다. 줄을 더 추가하면 후면 조사량은 약간씩 줄어든다.
- 줄의 가장자리 모듈에서의 후면 조사량 증가: 단일 줄 사례에서 가장자리 가장 가까이에 있는 모듈은 줄의 중앙에 있는 모듈에 비해 약 25% 더 많은 후면 조사강도를 나타낸다. 흥미롭게도 가장자리 모듈의 상대적인 증가는 복수 줄의 경우 더 높다.

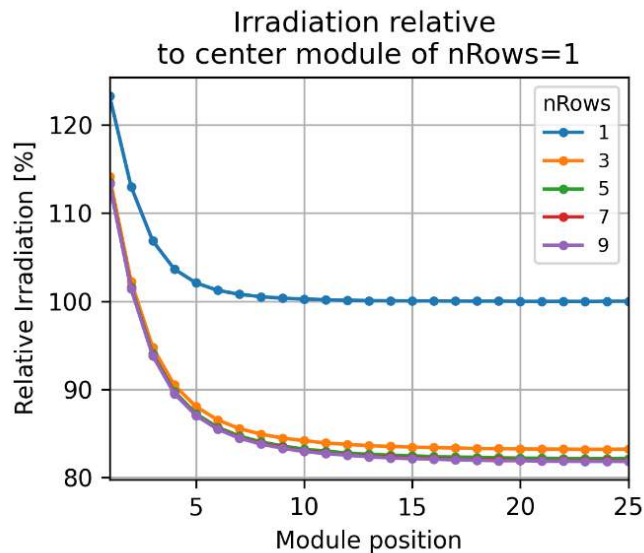


그림 31: 단일 줄 시스템의 가장 중앙 모듈 대비 줄의 수를 달리한 시스템에서 모듈 위치에 따른 후면 조사량의 백분율.

4.5.2 복수 줄 고정 경사 시스템에서 알베도의 역할

다음 시뮬레이션 세트에서는 알베도가 복수 줄 고정 경사 시스템의 후면 조사량에 미치는 역할을 조사하였다. 이 시나리오는 35° 경사각 단일 줄에서 3 개의 알베도 값 - 0.1, 0.25 와 0.8 - 을 대상으로 하였다. 그림 32 는 그 결과를 비교한 것이다.

다시 한번, 이 결과에서 2 가지 주요 결론이 내려진다. 첫 번째, 후면 조사강도는 알베도 값과 높은 연관성을 보여준다. 후면 조사강도의 상대적 증가는 알베도의 상대적 증가보다 약간 더 낮다. 이 감소는 어레이 주변에서의 자체 음영 때문이다. 두 번째, 가장자리 효과는 알베도와 함께 증가한다. 이는 가장자리에서의 모듈은 음영이 없는 지면으로부터 더 많은 빛을 받기 때문에 당연한 것이다.

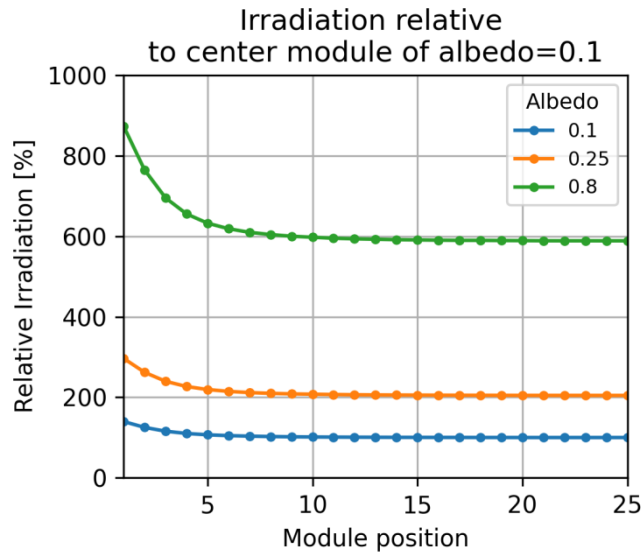


그림 32: 알베도 0.1의 어레이에서 가장 중앙의 모듈 대비 후면 조사량의 백분율.

다음에는, 서로 다른 경사각을 가지며 연관된 피치 값을 가진 알베도 0.25의 5개 줄을 시뮬레이션하여 경사각과 후면 조사강도의 관련성을 살펴보았다. 전면 일조량은 통상적으로 어레이 각도가 사이트의 위도에 가까울 때 최대가 되는 것으로 알려져 있다. 후면의 경우 경사각을 증가시키면 천공 돔(sky dome)으로부터 오는 후면 조사강도의 비율이 증가하게 된다. 이 사례에서 후면 조사강도는 경사각과 함께 증가하였는데, 이는 지면 반사로부터 오는 빛이 천공으로부터 오는 확산광보다 더 적기 때문이다. 지면 알베도가 더 높은 경우, 이 패턴은 바뀌게 되고 지면 알베도가 매우 높을 때(예, 적설)는 반전이 일어날 수 있다. 시뮬레이션 결과는 그림 33과 같다.

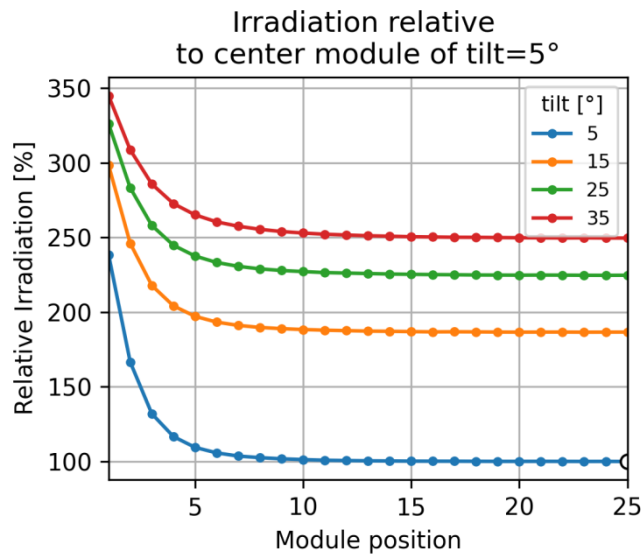


그림 33: 경사각 5°를 가진 어레이에서 가장 중앙에 있는 모듈 대비 후면 조사량의 백분율.



4.5.3 복수 줄 고정 경사 시스템을 가로지르는 후면 조사강도의 공간적 패턴

다음은 단순히 중앙 줄이 아닌 어레이를 가로지르는 파라미터의 영향을 조사하기 위해 시뮬레이션을 하였다. 그림 34는 시뮬레이션 한 어레이의 서쪽 반의 매트릭스를 보여준다. 어레이들은 남향이기 때문에 동쪽 반은 서쪽 반과 대칭적이다. 숫자와 그 관련 색깔은 가장 적은 후면 조사강도를 받기 때문에 베이스라인 기준으로 고려되는 중앙 모듈 대비 후면 조사강도에서의 상대적인 백분율을 나타낸다. 이 매트릭스 내의 각 어레이는 경사/피치와 지면으로부터의 높이가 다르다. 이 가시화 작업에서 모든 어레이의 알베도는 0.8로 고정하였지만 필요에 따라 변화시킬 수 있다.

이런 특이한 가시화로부터 중앙 모듈(3 번째 줄, 10 열)로부터 후면 조사강도의 방사상 증가를 관찰할 수 있다. 관찰된 줄과 줄 사이의 차이는 어레이 모서리에서 가장 현저하다. 어레이 경사가 증가하면 가장 북쪽에 있는(뒤쪽) 줄이 경사각이 더 낮은 경우보다 더 많은 조사강도를 받는데, 이는 앞 줄에서 후면 조사강도가 증가된 것을 보여준다.

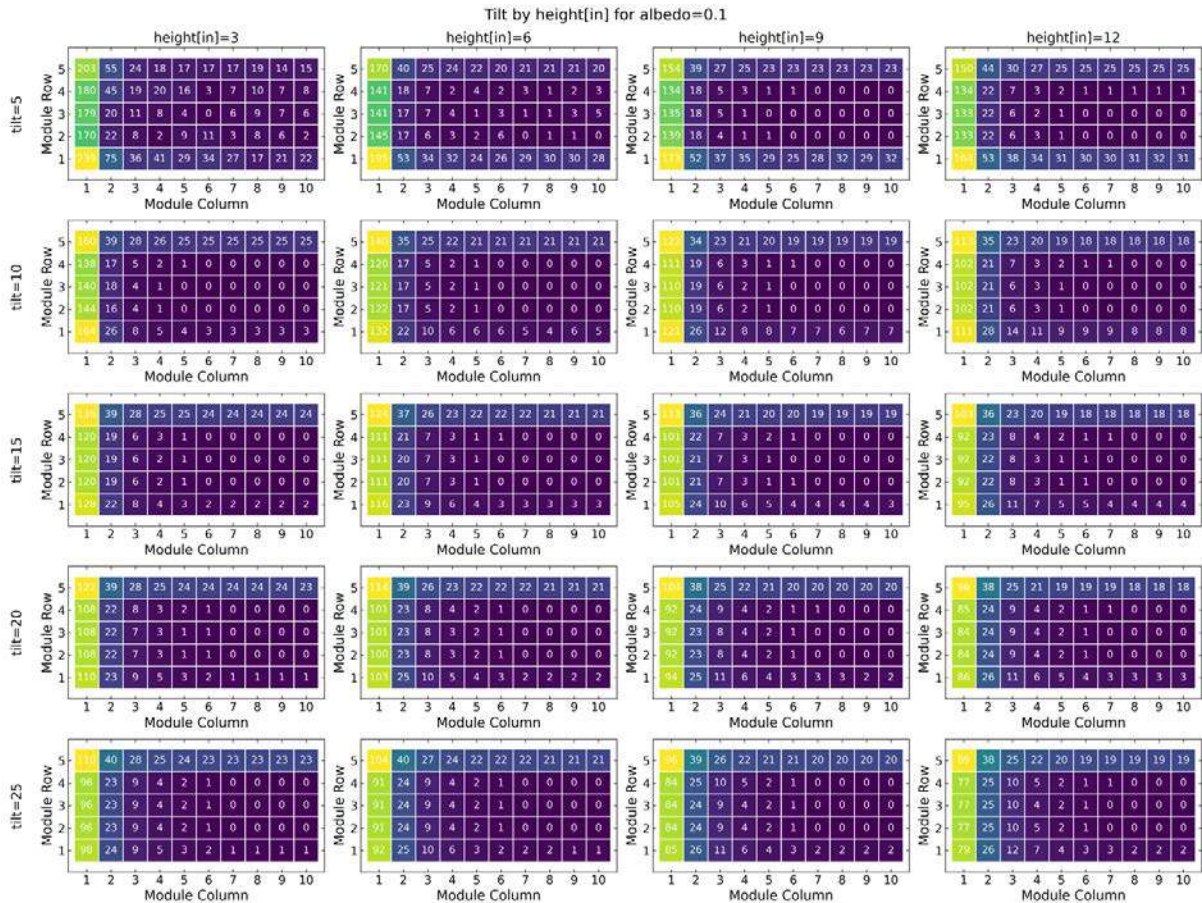


그림 34: 중앙 모듈과 비교하여 후면 조사량 증가 백분율을 보여주는 5-줄 시스템의 서쪽 반의 매트릭스 광경. 각 시뮬레이션은 서로 다른 경사각과 피치(매트릭스에서 줄) 및 모듈 높이(매트릭스에서 열)에서 실행한 것이다.



이들 매트릭스 시뮬레이션은 시스템 가장자리로부터 멀리 위치한 모듈에 대해서는 후면 조사강도의 포화상태를 입증한다. 포화상태는 동쪽과 서쪽 가장자리로부터 7 번째에서 9 번째 모듈과 북쪽과 남쪽 가장자리로부터 3 번째에서 4 번째 줄 내에서 일어난다. 그러므로 더 많은 줄이나 줄 당 더 많은 모듈 수를 시뮬레이션하는 것이 새로운 정보를 추가 제공하지는 않는다.

이 포화상태를 이용하기 위해 이 half-system 시뮬레이션을 더 큰 시스템을 구축하는 템플릿으로 사용할 수 있는 테크닉을 개발하였다. 그림 35 는 소형-템플릿 시스템이 어떻게 더 큰 시스템을 나타낼 수 있는지 보여준다. 템플릿 시스템의 모서리와 측면들이 더 큰 시스템을 둘러싸고, 반면에 중앙 모듈은 어떤 가장자리 영향을 받을 수 있는 가장자리로부터 충분히 멀리 떨어진 영역에서 단순하게 반복된다.

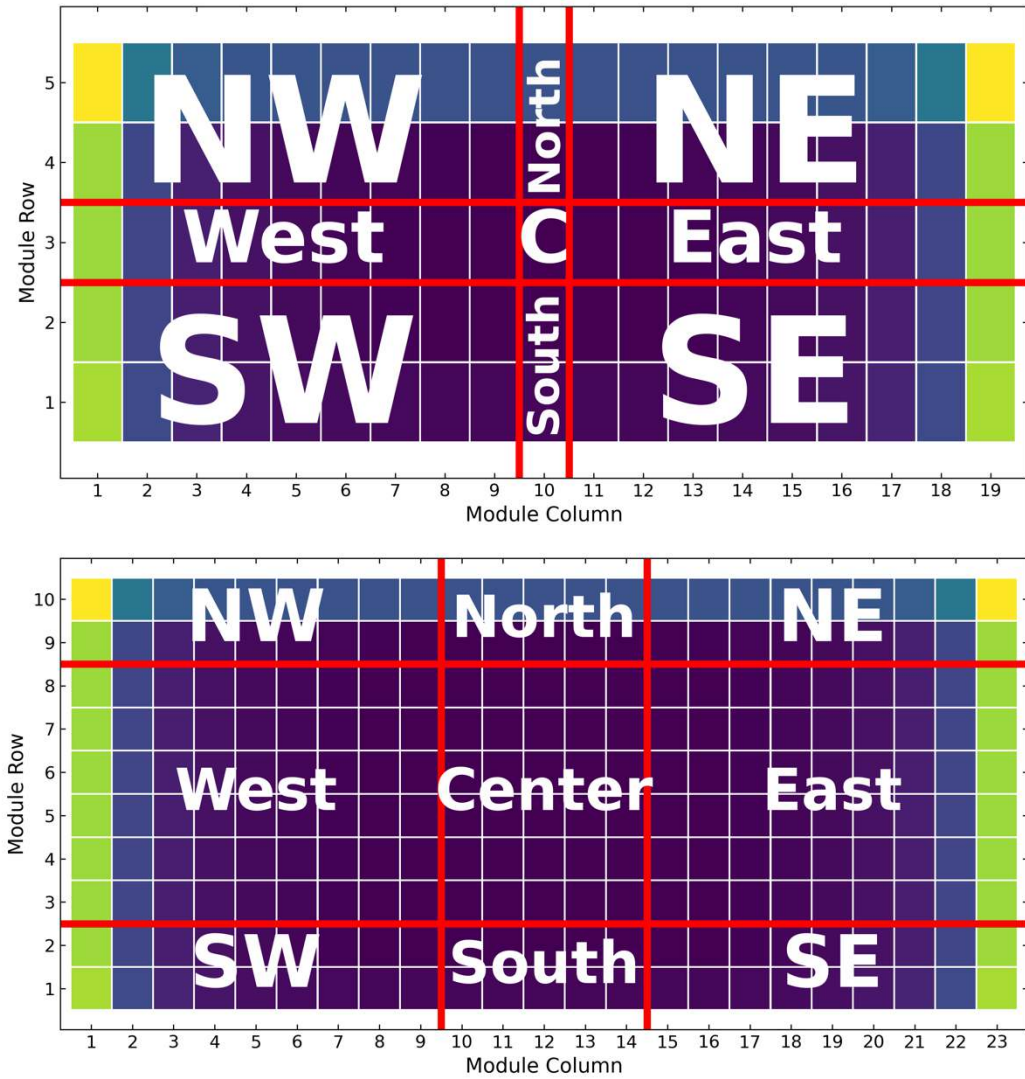


그림 35: (상) 템플릿 시스템 영역의 분류; (하) 분류된 영역을 더 큰 어레이 기하학적 구조에 적용.

그림 35 는 위의 섹션이 이웃 줄 혹은 열로 자기 복제가 되는 기본 방향(북, 남, 동, 서)의 "스트레칭을 입증한다. 모서리는 고유의 가장자리 효과에 노출되기 때문에 템플릿 어레이(북-서, 남-서, 남-동, 북-동)의 모서리는 템플릿과 동일한 사이즈로 유지된다.



다음에는, 가장자리 효과가 더 다양한 시스템 배열에 미치는 영향을 조사하기 위해 이 테크닉을 그림 34에 있는 파라미터 시뮬레이션에 사용하였다. 우선 형상비(aspect ratio) (줄의 개수 대 줄 당 모듈의 개수)가 시스템 양면형 이득에 미치는 영향을 조사하였다. 이 사례에서 6개의 서로 다른 시스템 형상비, 2개의 알베도, 4개의 높이와 5개의 경사각을 조사하였다. 고려한 형상비는 표 12에 요약되어 있다. 그림 36가 보여주고 있는 이들 인자들의 영향에 대한 조사결과는 알베도가 양면형 이득에 가장 중요하고, 이어서 경사각과 높이 순이라는 것을 보여주고 있다. 형상비는 동-서로 좀 더 좁은 시스템에서 양면형 이득에 약간의 증가를 보여준다. 그러나 이 효과는 시스템 높이와 경사각에 의해 지배되는 바가 더 심하다.

표 12. 양면형 이득에 대한 파라미터의 영향을 조사하는데 선택된 시스템 형상비.

형상비	줄의 개수	줄당 모듈의 개수
1:25	5	125
1:6	9	69
1:3	15	43
1:2	19	33
1:1	25	25
2:1	33	19

4.5.4 면적의 제약을 받는 양면형 시스템에 대한 영향

앞의 사례에서는 토지 사용을 고려하지 않았다. 다음 사례는 면적 당 에너지의 최대화, 좀 더 특정적으로는 시스템 투자에 초점을 둔다. 이 사례에서 시스템을 면적을 100 m x 100 m로 한정시켰으며 시스템의 사이즈를 결정하기 위해 경사각 기반 피치 계산을 허용하였다. 이어서 전체 출력 생산을 설명하기 위해 템플릿 시스템이 사용되었다.

그림 37은 공간 제약 고정 경사각 양면형 사례의 결과를 보여준다. 경사각을 증가시키면 줄간 간격(피치)도 증가하는데, 이는 시스템에서 모듈의 총 개수를 낮추고 생산된 에너지를 감소시킨다. 그림 38은 모듈 당 생산된 에너지 측면에서 동일한 결과를 보여주는데, 추이는 반대이다. 각 모듈은 경사각이 증가하면 단면형 어레이에 영향을 미치는 동일한 인자들 때문에 더 많은 에너지를 생산한다. 알베도가 더 높으면 이 영향의 기울기가 증가하게 된다. 증가 곡률(curvature)은 모듈 경사각을 증가시키면 수확체감이 있음을 시사한다.

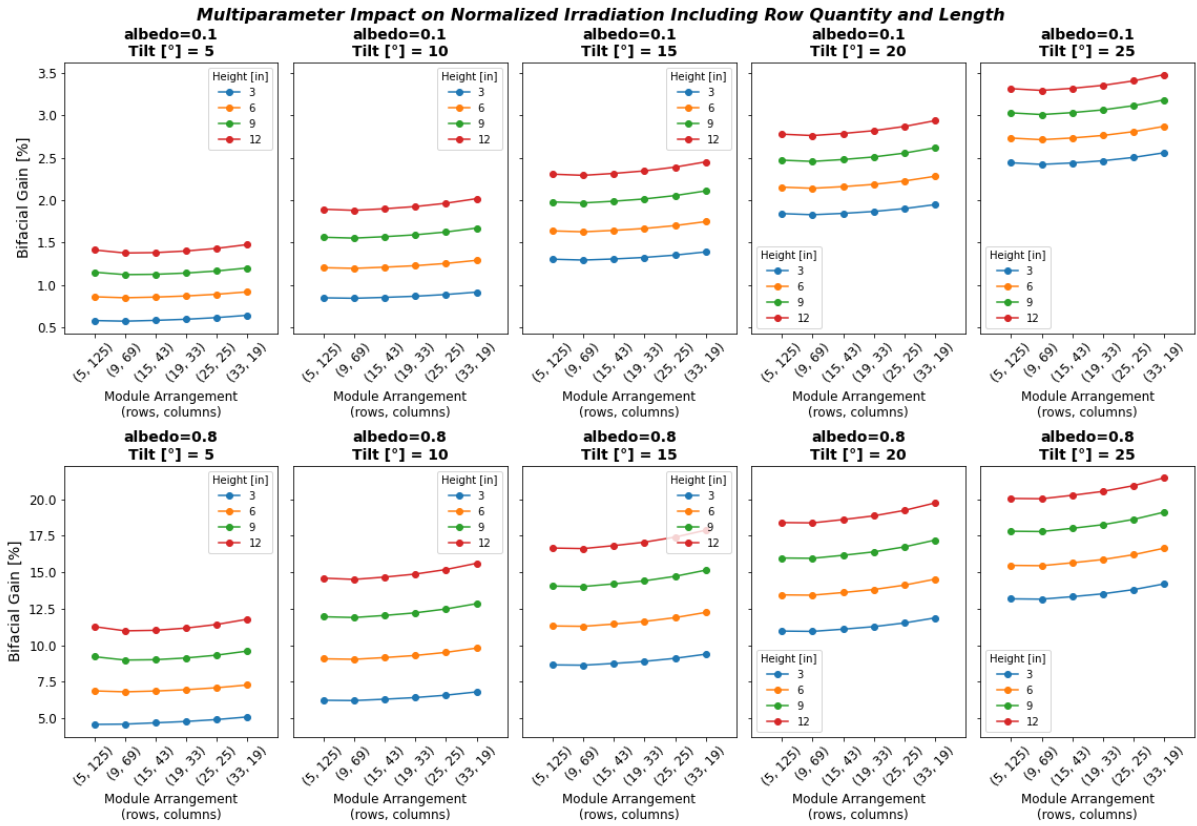


그림 36: 형상비(x-축)를 달리하여 다양한 알베도(줄), 경사각(열)과 높이(라인)를 가진 고정 경사 시스템의 연간 양면형 이득.

Tilt vs. System Energy Generation

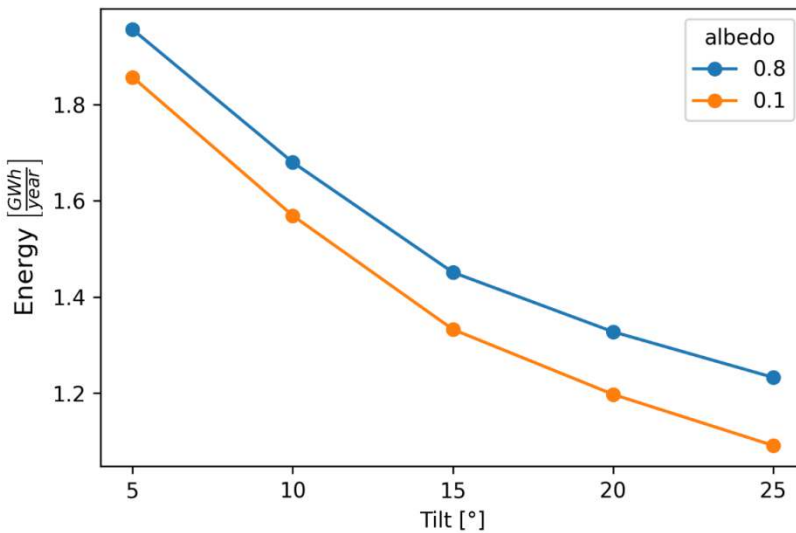


그림 37: 고정된 어레이 면적에서 경사각에 따른 생산된 양면형 어레이 에너지.

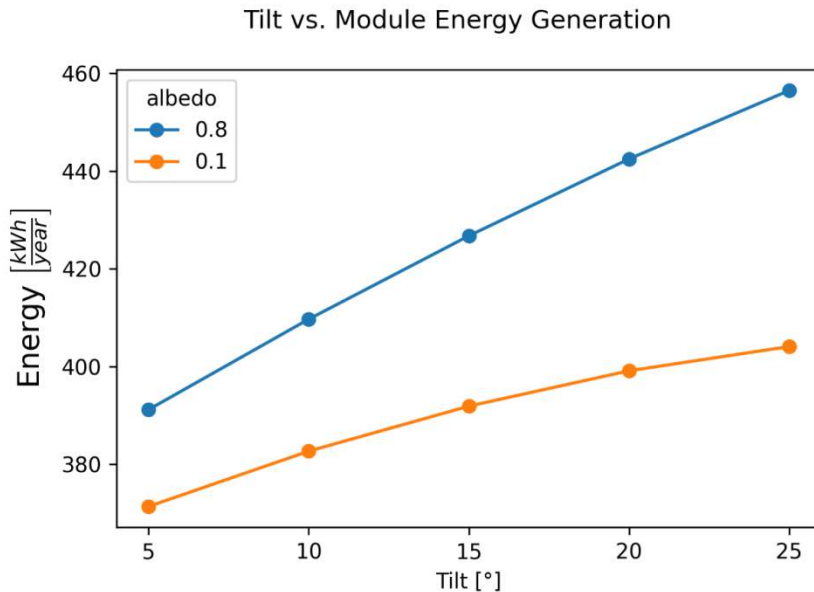


그림 38: 고정된 어레이 면적에서 경사각에 따라 양면형 어레이 모듈 당 생산된 에너지.

이런 시뮬레이션은 남향에 고정 경사 양면형 시스템을 설계할 때 다양한 인자들을 고려하는 것이 중요하다는 것을 분명하게 보여준다. 대부분의 경우, 알베도가 양면형 이득의 정도를 결정하는데 가장 중요한 인자일 것이지만 경사와 높이도 역시 중요하다. 랙킹 시스템 비용이 하락하고 면적에 제약이 없으면 지면(혹은 비중) 훨씬 위로 시스템을 올리고 경사각을 증가시키면 양면형 이득을 증가시킬 수 있을 것이다. 양면형 시스템 가장자리 효과를 최적화하기 위해 마이크로인버터나 DC 옵티마이저를 사용하면 주어진 설계에서 에너지 수율을 증가시킬 수 있을 것이다. 이런 선택에 따르는 비용 추가분은 잠재적인 장점과 비교하여 따져보아야 한다. 전반적으로 위에 기술한 연구들은 일반화된 남향 고정 경사 양면형 시스템에 영향을 미치는 동력학에 대한 센스를 제공한다.

4.6 단일-축 트래킹 시스템

(Annie C. J. Russell, Christopher E. Valdivia, Karin Hinzer)

단일-축 트래커(single-axis trackers: SATs)는 하루 중 에너지생산을 최적화하기 위해 하나의 축 주위로 패널(panel)을 회전시킨다. 평판형 패널의 출력 산출량은 입사 태양광과 패널면에 수직인 선 사이의 입사각의 코사인 인수만큼 감소한다. 이 각도를 최소화하고 에너지생산을 최대화하기 위해 SAT는 패널이 태양을 향하도록 방향을 잡는다. 수평 단일-축 트래커의 경우 회전 축은 대부분의 북-남 방향(N-S HAST)에서는 지면에 평행이다. 이 때 패널은 하루 중 동쪽에서 서쪽으로 천공을 가로질러 태양을 추적한다

양면형 패널은 흔히 SAT 위에 설치하는데, 이는 전면 조사강도를 최대화하면서도 균등화발전단가를 낮출 수 있게 후면 조사강도의 혜택을 활용하기 위해서이다. 2018년에는 SAT 출하량이 40% 증가하였는데, IHS Markit은 향후 5년 간에 양면형 태양광의 매출 증가가 트래커 채택의 핵심 원동력이 될 것으로 예측하였다 [88].

SAT 위에서의 양면형 성능은 트래킹 알고리즘, 시스템 설계와 위치에 고유한 환경 인자(예, 알베도, 태양에너지자원과 위도)를 포함하는 다양한 요인들에 따라 달라진다. 아래에서는 이들 인자들에 대한 연구와 SAT에서 보고된 양면형 이득에 대해 논의하고자 한다



4.6.1 양면형 태양광용 트랙킹 알고리즘

단일-축 트랙킹 시스템의 회전 각도는 다음 2 개 – 천문학(astronomical) 알고리즘 혹은 광강도(light-intensity) 알고리즘 - 의 기본적인 트랙킹 알고리즘 중 하나에 의해 명령을 받는다. 천문학 트랙킹 알고리즘은 직달 광선과 패널면 법선 사이의 입사각도를 최소화하기 위해 태양의 위치에 기반한 트랙킹 각도를 계산한다 [89]. 이 작동 모드는 또한 “true-tracking” 이라고 부르며, 패널은 일조 하(on-sun)에 있게 된다. 그러나 실제로는 트랙커의 기계적 시스템이 트랙킹 범위(통상적으로 수평으로부터 $\pm 60^\circ$)를 제한한다. N-S HSATs 의 경우, 태양이 수평에 가까울 때 아침과 저녁에 줄간 음영이 발생하는데, 그 결과 모듈 전면에서의 조사강도 불균일이 상당한 전류 제한과 핫스팟을 야기한다 [90].

천문학 단일-축 트랙킹 각도의 통상적 조정을 위한 백트랙킹은, 아침과 저녁시간 동안 모든 줄의 각도를 줄여 수평이 되도록 함으로서 이 줄간 음영을 제거하기 위한 목적이다. 이 조정으로 코사인-손실이 더 높아지지만 전기적 불일치가 더 적어 출력 산출량은 실질적인 증가를 가져온다. 조정된 트랙킹 각도는 태양의 고도각, 패널 폭과 트랙커 피치에 기반한 것이다 [91]. 종래의 백트랙킹 알고리즘은 평평한 지면용으로 설계된 것으로 보다 복잡한 지형에서의 줄간의 음영을 제거하지 않는다. 각 줄의 상대적인 높이를 고려하는 백트랙킹 알고리즘은 독립적인 줄 트랙커와 함께 사용하기 위해 개발되었다. 예를 들어, NEXTracker 는 이런 알고리즘은, 3~15% 기울기를 가진 현장에서의 종래 백트랙킹에 비해 단면형 에너지수율을 3.6%나 증가시킨다고 보고하였다 [92]. Asgharzadeh 등은 SATs 의 양면형 일조량 이득 값은 상대적으로 백트랙킹 대 true-tracking (줄과 줄 사이의 음영에 의해 야기된 전기적 불일치 영향 없이)의 경우와 비교적 유사한 것을 발견하였다 [90]. 전면 일조량을 최대화하는 것이 트랙킹 전략의 최우선 순위가 되어야 한다고 강조한다.

천문학 알고리즘과 대조적으로 광강도 알고리즘은 실시간 조사강도 조건을 토대로 트랙커 위치를 조정한다. 2011 년 Kelly & Gibson 은 흐린날 트랙킹 시스템이 패널을 수평으로 위치시키면 연간 에너지수율이 1% 증가한다고 보고하였다 [93]. NEXTracker 의 백서는 산란광의 최적화를 통해 연간 에너지수율이 0.5~2% 증가한다고 보고하였다 [92]. Pelaez 등은 천공 조건에 대한 유사한 최적화를 통해 미국 NM 주 Albuquerque 에서 알베도가 0.2~0.8 범위인 양면형 단일-축 트랙커에서의 조사강도 이득이 0.6~1.1% 에 이를 수 있다는 모델 결과를 보여주었다 [94]. 이 상대적 이득은 위치에 의존하며 확산광 성분이 더 높은 지역에서 증가한다.

4.6.2 단일-축 트랙커 기하학적 구조용 양면형 설계 옵션

종래 단일-축 트랙커의 경우, 패널의 테이블은 일반적으로 토크 튜브에 묶여있는데, 후자는 회전축을 따라 이어지는 샤프트로 수직 말뚝으로 지지된다. 트랙킹 알고리즘은 원하는 패널 위치를 얻는데 필요한 토크 튜브 회전각을 결정한다. 토크 튜브의 단면 모양은 다양하지만 대부분 실리더, 정사각형 혹은 팔각형이다. 패널은 초상화 방향(패널의 짧은 축이 토크 튜브에 평행) 혹은 풍경화 방향(패널의 긴 쪽이 토크 튜브에 평행)으로 설치할 수 있다.

단일-축 트랙커 배열은 일반적으로 ‘X-up’ 명명 규칙에 기반하여 그룹을 만드는데, 이는 회전축의 수직 방향으로 쌓인 X 패널을 나타낸다. 예를 들어, 1P 시스템에서는 단일 패널이 토크 튜브를 가로질러 놓인다. 2P 배열에서는, 하나의 패널이 토크 튜브의 한쪽에 놓인다(예, N-S HSAT 에서는 하나의 패널이 동쪽 토크 튜브에, 다른 하나는 서쪽에 놓인다). 일부 트랙커는 후면쪽 음영을 줄이기 위해 이들 패널 사이에 공간을 포함시킨다. 1P 와 2P 초상화 배열은 각각 1-up 과 2-up 으로 혹은 1MIP 와 2MIP (초상화 배열의 모듈)로 지칭함을 주목해야 한다. 다음에서는 현재 진행 중인 1P 와 2P 트랙커 성능 분석의 사례를 제공한다.



Pelaez 등은 “bifacial_radiance” 광선추적법 소프트웨어로 1P 패널의 후면 조사강도 손실을 모델링하였다 [94]. 토크 튜브에 의한 음영 손실은 후면 입사광의 20%에 근접하며 패널과 토크 튜브 사이의 거리 증가와 함께 감소한다. 패널 조사강도 프로파일은, 부분적으로 금속제 토크 튜브로부터의 반사에 기인하는 토크 튜브 그림자의 중앙에 더 밝은 밴드를 보여준다. Deline 등에 의한 또 다른 “bifacial_radiance” 연구는 단일-축 트랙커 1P 패널에서의 후면 불균일함에 기인한 연간 전기적 불일치 손실이 0.5% 미만(알베도 0.2 조건 하에서)임을 보여준다 [77].

2P 트랙커의 “bifacial_radiance” 시뮬레이션은 후면 음영 인자가 특정 설치에 따라 2~8% 범위임을 보여준다 [95]. 예를 들어, 이 연구는 2P 패널 사이의 15-cm 틈이 토크 튜브로부터 추가적인 빛이 반사되게 허용해서 틈 가까이에 있는 패널 가장자리에 환해진 부분을 발생시킨다는 것을 보여준다. 이 효과가 반사성의 토크 튜브와 흑색 토크 튜브에서의 이질적인 음영 인자를 설명하는데, 각각 0.01% 와 12% 이다.

캘리포니아에 있는 시험 사이트에서 가을과 겨울 6 달 동안의 현장 데이터에 대한 Soltec 분석에서, 1P 와 2P 트랙커는 각각 14.6%와 16.8%의 양면형 이득을 나타내는 것을 발견하였다 [96]. 이 보고서는 기본적으로 2P 트랙커 대 1P 트랙커에서의 양면형 이득의 절대적 증가 2.2% 중 1.3%는 모듈의 평균 작동온도가 더 낮은 것 때문에, 그리고 0.7%는 토크 튜브 음영이 감소한 것 때문으로 간주하고 있다. 이 보고서 광선추적법 결과에서는, 모델링 소프트웨어에서 디폴트 1P 트랙커의 음영 손실이 5.6% 이며, 그리고 패널과 직사각형 금속제 토크 튜브 사이에 틈을 가진 2P 트랙커에서 토크 튜브 반사 때문에 조사강도에서 1.7% 실질적인 증가가 있음을 보여주었다.

Array Technologies 사의 한 백서는 PV Lighthouse 의 3 차원 광선추적 도구로부터 도출한 손실 인자와 함께 PVsyst 으로 1P 와 2P 배열에서 후면/전면 조사강도 비를 모델링 하고 있다 [97]. 조사 보고서는 후면/전면 조사강도 비가 지면 간격 보다는 지면 간격/패널 폭의 비(형상비로 부름)와 함께 증가함을 보여주었다. 보고서에 따르면, 일반적인 2P 트랙커는 동일한 지면 커버율을 가진 1P 트랙커보다 더 낮은 형상비를 가지므로 지면으로부터 반사된 더 많은 빛이 천공으로 손실된다고 판단하고 있다. NEXTracker 역시, 바람 하중이 없는 트랙커를 설계할 때 고려해야 할 핵심 인자는 형상비라고 보고하였다 [98].

4.6.3 단일-축 트랙커 위에서의 양면형 이득

많은 수의 현장 시험 사이트와 대규모 발전소의 성능 결과들이 지금 보고되고 있다. 이들 사이트에서는 양면형 이득(단면형 에너지수율 대비 양면형 에너지수율의 증가)이 특별히 관심의 대상인데, 이 값이 새로운 프로젝트의 파이낸싱에 핵심이고 그리고 이 값은 위치와 사이트 설계와 함께 크게 변동되기 때문이다. 예를 들어, 칠레에 있는 1.7 MW La Silla 발전소는 단일-축 트랙커 위에 단면형과 양면형 모듈을 이웃하여 시험을 하고 있다. 독특한 사막 환경에서 단일-축 트랙킹 시스템은 10.4~12.4%의 양면형 이득을 실증하였다 [99]. Canadian Solar 사는 11~150 kW 범위의 설치 용량을 가진 다양한 시스템에 대한 양면형 이득을 소개하였다 [100]. 이들 이득은 1P 트랙커의 경우 알베도 0.2~0.3 에서 5.2~8.9%, 그리고 1P 12 kW 시스템의 경우 알베도 0.6 에서 17.5%이었다.

더 작은 규모의 현장 사이트도 SATs 위에 장착된 양면형 시스템의 성능에 관한 이해를 제공한다. 예를 들어, NREL 양면형 실증 플랜트는 1P 배열로 20 개 모듈 20 줄로 구성되는데, 3 개의 단면형 스트링과 4 개의 양면형 스트링을 분석 대상으로 한다. 알베도 0.2 에서의 시작 데이터부터 양면형 이득은, PERC 모듈의 경우 4~8%, 실리콘 이종접합 모듈(더 높은 양면형 계수의 혜택을 받음)은 6.5~11% 이었다 [101]. Asgharzadeh 등은 California 에 있는 단일-축 트랙킹 시스템에서 측정된 양면형 에너지 이득이 알베도 0.16 에서는 4.1%, 알베도 0.56 에서는 9%라고 보고하였다 [102]. 해당 논문에서 고려된 고정



경사 시스템이 동일한 위치에 있지는 않지만, SAT 시스템에 비해 약간 더 높은 양면형 이득을 입증하였다. 전면 최적화(트래킹 중 지속적으로 일어남)가 후면 조사강도의 상대적인 기여도를 제한하기 때문에 이 결과는 예상된 것이었다. Atacama 사막에 있는 ENGIE Laborelec's El Aguila 플랜트는 이와 반대되는 추이를 보여주는데, 고정 경사에서 이득이 8%이며 그리고 HAST의 코사인 손실이 가장 클 때인 겨울 동지 무렵 HAST에서의 이득은 10% 이다 [81]. 그러나 확장된 데이터세트에서는 트래킹 시스템의 양면형 이득이 더 낮을 것으로 예상된다.

위의 사이트는 단일-축 트래커의 양면형 이득과 에너지수율에 영향을 미치는 다양한 범위의 트래커 배열, 지리적인 위치와 보고된 알베도에 대한 하나의 작은 사례를 보여준다. 작은 사이트는 자체 음영(self-shading)이 축소되어 있고 가장자리 밝힘(edge-brightening) 효과를 보인다는 것을 주목해야 한다 [81]. "International Survey of Bifacial PV Configurations and Field Performance"를 통한 것과 같은 사이트 파라미터와 양면형 이득과의 추가적인 상관관계가 현실적인 이득 추정의 한도 내에서 좀 더 확실성을 보여주어야 할 것이다.

4.7 양면형 태양전지의 최적화와 성능: 글로벌 관점

(Prof. Muhammad A. Alam, M. Ryyan Khan, and M. Tahir Patel)

4.7.1 서론

열역학적 계산의 의하면, 양면형 태양전지는 단면형에 비해 15~20% 정도 성능이 더 좋고 그리고 일반적인 알베도 $R = 0.2 \sim 0.3$ 에 온도계수 $\beta_T \sim 0.25\%$ 를 가정했을 때 LCOE도 그만큼 감소하게 된다 [103]. 실제 양면형 이득은 위도에 의존하는 조사량, 기상 조건과 열섬 효과에 의해 정의되는 지역 온도와 바람의 흐름, 특정 위치에서의 청명 지수 및 계절적인 알베도(예를 들어, 눈과 잔디에 의한 것)에 민감하다 [104].

다행히 Sandia National Laboratories에 있는 시험 사이트와 칠레의 La Silla 태양광 플랜트와 같은 상업용 플랜트의 여러 가지 양면형 사이트가 다양한 양면형 기술 유형별로 지역별 양면형 이득에 대한 중요한 데이터베이스 창출에 기여하였다. 이 정보는 해당 기술의 글로벌 잠재성에 대한 모델링 노력을 알리고 검증하는데 사용될 수 있다. 이 모델링의 목표는 전세계에 걸쳐 양면형 시스템의 실행 가능성에 대한 폭 넓은 가이드라인을 제시하기 위해 양면형 태양광의 물리학을 다양한 태양광 플랜트로부터의 검증 데이터와 결합하는 것이다. 하나의 글로벌 모델은 다양한 양면형 모듈 기술과 시스템 토폴로지에 대한 상대적인 장점을 지역에 맞게 비교할 수 있도록 해 줄 것이다. 게다가 충분히 정량적인 모델은 고객에게 정보를 제공하고 그리고 투자와 정책 결정에 가이드 역할을 할 것이다.

4.7.2 다양한 양면형 배열과 파라미터를 위한 결정적 혜택

양면으로부터 태양광을 받아 발전을 하는 양면형 태양광의 장점 덕분에 LCOE를 줄이고 단면형 모듈용으로 적합하지 않는 위치에 태양광을 활용할 수 있게 되었다. 예를 들어, 단면형과는 달리 양면형 모듈은 수직으로 설치할 수 있어 오염을 줄여 청소용 물의 소모량을 줄이며 물의 담수화용으로 필요한 에너지를 줄이고 그리고 원격지로의 수송량을 줄일 수 있게 되었다. 이들 인자들은 종합 에너지 산출량을 향상시키고 양면형의 추가 비용 문제를 극복할 수 있게 해준다. 이런 인자들은 오염 손실이 상당한 사막에서도 중요하며, 농업용 장비의 방해 없는 이동이 필요하고 장기간의 음영을 피해야 하는 영농형 태양광에도 중요하다.

수직 동-서 설치 양면형에서 나타나는 쌍봉은 발전기가 가용한 에너지를 보다 효율적으로 사용할 수 있게 하고 전기 수요량 곡선을 평평하게 만들며 그리드 통합을 단순화시킨다.



높게 남향으로 설치된 양면형 시스템은 통상적으로 직달 조사강도로부터 지면 반사된 빛 때문에 수율이 높으며 이들 플랜트는 청명 지수가 낮은 기간 동안 확산광의 수집이 향상되는 것도 보여준다. 그러나 이런 플랜트에서 단면형 기술과 비교한 장점을 보장하기 위해서는 경사각과 간격 높이에 대한 최적화가 필요할 수도 있다. 태양광 추적 단면형과 양면형 시스템을 비교하면, 비록 비추적식 시스템에서 볼 수 있는 것보다는 그 혜택이 더 작지만 양면형의 장점이 상당함을 볼 수 있다.

그림 39는 단면형 대비 다양한 양면형 플랜트 배열과 파라미터에 따른 양면형 셀의 증가된 에너지 산출량, 즉 양면형 이득을 보여준다.

- 지면 형상이 없는 (지면 형상 높이 b 가 zero) 동-서향 수직 설치 양면형 플랜트(v-BF)
- 동-서향 지면 형상을 가진 (형상 높이가 모듈 높이 h 의 1/2) 수직 양면형 플랜트(Gv-BF)
- 남향 최적 경사각과 높이의 양면형 플랜트 (s-BF)
- 동-서 트랙킹 Bf (t-BF)
- 독립형 Bf

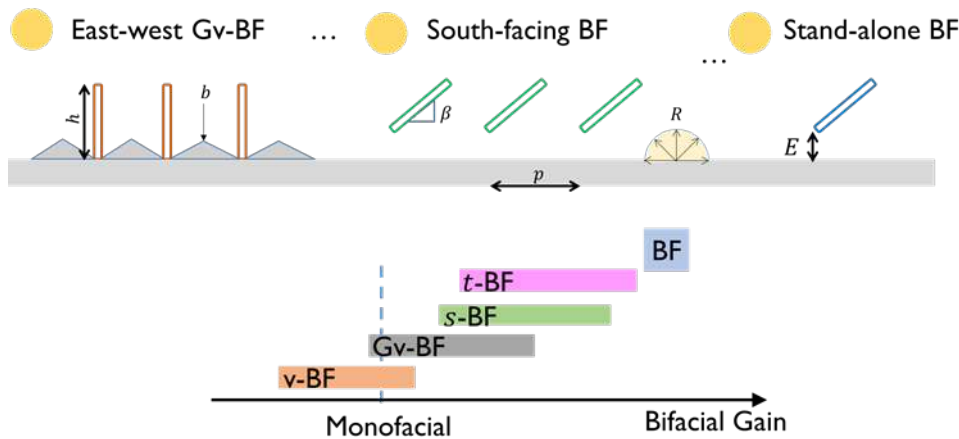


그림 39: 상단 그림은 고려한 양면형 시스템의 파라미터(모듈 높이 (h), 지면 형상 높이 (b), 줄과 줄 사이 피치 (p), 경사각 (β), 지면과의 간격 높이(E))와 양면형 시스템 배열(동-서향 수직 양면형 시스템 ($b = 0$), 동-서향 지면 형상을 가진 수직 양면형 시스템 ($b = h/2$), 남향 최적 경사각과 높이의 양면형 시스템, 동-서 트랙킹 양면형 시스템 및 독립형 모듈)을 보여준다. 하단 그림은 다양한 시스템 유형의 양면형 이득을 그 단면형 상대와 비교한 것이다. 각 박스의 좌측 가장자리는 적도에 가까운 더운 지역에서의 양면형 이득을 나타내고, 우측 가장자리는 위도가 60° N에 근접할 때의 이득을 보여준다.

위에서 목록화되지 않았지만 고려된 다른 파라미터는 줄과 줄 사이 피치 (p), 경사각 (β) 및 지면과의 간격 높이 (E)이다. 비교에서는 위도도 고려되었다. 그림 39의 하단에서, 박스의 좌측 가장자리는 적도에 가까운 더운 지역에서의 양면형 이득을 나타내고, 우측 가장자리는 위도가 60° N에 근접할 때의 이득을 보여준다.

4.7.3 글로벌 양면형 태양광용 시뮬레이터

글로벌 측면에서 어떤 기존 혹은 새롭게 떠오르는 태양전지 기술을 대상으로 지역에 최적화된 에너지수율과 LCOE를 계산하는 것은 다양한 데이터베이스로부터 시분해된 특정 위치의 기상 정보를



필요로 한다. 태양광의 강도, 직달과 산란과의 비율, 지면 알베도, 주위온도, 풍속 및 수분 용량 같은 다양한 파라미터가 태양광 플랜트의 설계와 산출량에 큰 영향을 줄 수 있다. 특정한 계산을 위해서는 시간 분해능(예, 분 단위 대 월간) 혹은 커버된 지역(북 아메리카 대 전세계)에서의 차이를 반영하기 위해 다양한 데이터베이스로부터 정보를 합성할 수 있는 분석가가 필요할 수 있다. 다양한 양면형 성능 시뮬레이션 도구에 대한 추가적인 상세 내용은 섹션 6.2 에서 찾을 수 있다.

예를 들어, Purdue University Meteorological Tool (PUMET) [105]에서 천정각을 예측하는 것은 pvlib-python [106] 혹은 PVLIB Toolbox [107]에서 수행한 것과 같이 NREL 태양 위치(solar position) 알고리즘 사용을 필요로 한다. 다음, 태양 위치의 계산이 제공되었을 때 분 단위 베이스로 글로벌 수평면 조사강도(GHI)를 계산하는데 Haurwitz 청공(clear-sky) 모델이 사용될 수 있다 [108]–[110]. 자기 일관성을 위해서 통합 일사량은 NASA 표면 기상학(surface meteorology)과 태양에너지 데이터베이스에서 위성에서 도출한 월 평균에 맞춰 조정된다.

일단 기상 데이터가 입력 데이터로 가용하면 태양광 플랜트 모델링 도구(예, pvlib [106], [107], PVSyst [111] 혹은 미국 Purdue University bifacial module calculator (PUB))가 기술과 토폴로지별 양면형 에너지수율을 계산한다. 이들 소프트웨어 패키지는 총 에너지수율의 직달, 확산과 알베도 성분뿐 아니라 최적 배열도 예측한다. 끝으로 이 에너지수율은 아래에서 논의되는 바와 같이 다양한 태양광시스템 토폴로지에 대해 지역별로 경제적 실행가능성을 결정하는 LCOE 계산의 입력자료로 사용된다.

4.7.4 단순화한 태양광 플랜트의 기술경제적 분석

태양광 플랜트의 기술과 경제적 분석을 단순화하기 위해 LCOE 를 모듈 관련 비용 측면과 부지 관련 비용 측면으로 나타내는 것이 도움이 될 수 있다. 간격 p 의 줄과 단위 면적당 유효부지 비용 C_L 을 가지고 설치된 태양광시스템의 분석을 고려하자. 유효 비용은 구입가격, 부지 개발, 허가, 운용 및 유지관리를 포함하여 플랜트의 면적과 함께 산정될 수 있다. 다음, h 는 모듈(초상화 혹은 풍경화 모드)의 수직 크기이고, C_M 은 모듈 단위 면적당의 유효 비용이다. 이 비용은 플랜트의 모듈 개수와 함께 산정된다. 생산된 단위 에너지(Y_T) 당 총 비용(C_T) 의 비율로 주어지는 LCOE 의 전통적인 공식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다 [112], [113].

$$LCOE \equiv \frac{C_T}{Y_T} = \left(\frac{C_L}{\chi} \right) \cdot \frac{\left(\frac{C_M}{C_L} + \frac{p}{h} \right)}{YY_0} \equiv C_{L,\chi} \cdot LCOE^* \quad (23)$$

여기서 $YY_0(p/h, E)$ 는 새로운 시스템(패널 길이 (h)에 정규화시킨)의 첫 일년간의 에너지수율로 추가적으로 모듈의 간격 높이 E 에 의존하며, 그리고 $\chi = \sum_{k=1}^Y (1-d)^k (1+r)^{-k}$ 는 연간 열화율 d 와 은행 할인율 r 을 포함하여 전체 에너지수율은 $Y_T \equiv YY_0 \cdot \chi \cdot h$ 이 된다. 특정 위치에서 $C_{L,\chi} = C_L/\chi$ 이 주어졌을 때, $LCOE^*$ 를 비교함으로써 다양한 양면형 시스템 배열별로 상대적인 비용을 비교할 수 있다. 요컨대, 양면형 모듈의 증가된 비용은 태양광 모듈의 양면형 계수(bifaciality)에 의해 허용된 것과 같이 YY_0 를 동시에 증가시키면서 C_M 을 증가시킨다. 이들 양들(quantities)에 관한 글로벌 지도(global map)는 아래에서 논의한다.



4.7.5 독립형 양면형 모듈의 에너지 이득

양면형 이득은 최적 경사 독립형 모듈에서 가장 큰데, 시간 의존성 자체 음영은 별도로 하고 이들 모듈들이 수평으로 확장 (즉, $p \rightarrow \infty$) 되면서 더 넓은 면적에서 알베도에 의한 빛을 수집할 수 있기 때문이다. 그림 40 은 $E = 0$ 에 통상적인 알베도 = 0.25 의 경우에도 하나의 양면형 모듈은 전세계 어디에서라도 단면형 모듈에 비해 적어도 10% 정도 성능이 더 좋다 [4]. 모듈의 설치 위치가 높으면 모듈의 후면은 더 넓은 부분의 지면으로부터 빛 수집이 증가하는 결과를 가져온다. 통상 $E = 1$ 과 더 높은 알베도($R = 0.5$)를 가진 백색 콘크리트 혹은 모래 표면의 경우, 양면형 이득은 30%까지 증가할 수 있다. 양면형 기술과 관련한 낙관적인 예상은 그림 40 과 표 13 에 나타낸 바와 같이 독립형의 경우는 그럴만하다.

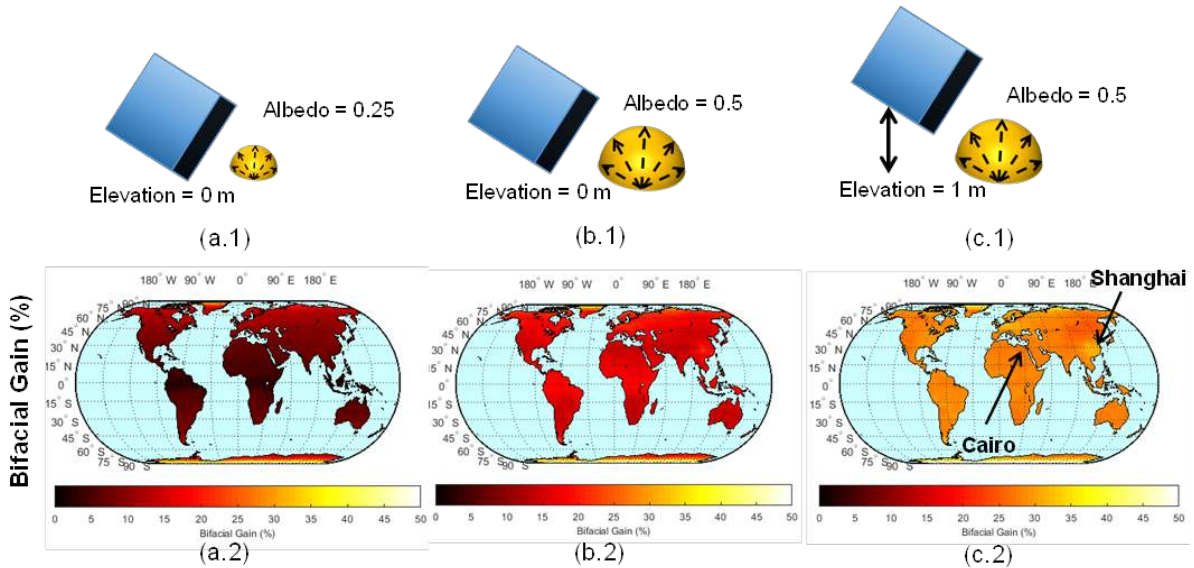


그림 40: 3 개의 시나리오별로 북-서 방향 모듈 대비 동쪽 방향 양면형 모듈의 에너지수율 비를 보여주는 글로벌 지도: (a) 알베도 0.25 를 가진 지면 위 설치, (b) 알베도 0.5 를 가진 지면 위 설치, (c) 지면 알베도 0 을 가진 지면 1 m 위 설치.



표 13: 문헌 대비 모델링 프레임워크 검증.

위치 (유형)	간격 높이/ 모듈 높이(m)	알베도/ 양면형 계수	경사각/ 방향	보고된 양면형 이득 (%)	계산된 양면형 이득 (%)	차이 (%)
Cairo (Sim.)	1 / 0.93	0.2 / 0.8	26° S	11.0	11.1	-0.1
Cairo (Sim.)	1 / 0.93	0.5 / 0.8	22° S	24.8	25	-0.2
Oslo (Sim.)	0.5 / 0.93	0.2 / 0.8	51° S	10.4	13.6	-3.2
Oslo (Sim.)	0.5 / 0.93	0.2 / 0.8	47° S	16.4	22.8	-6.4
Hokkaido* (Exp.)	0.5 / 1.66	0.2 / 0.95	35° S	23.3	25.7	-2.4
Hokkaido* (Exp.)	0.5 / 1.66	0.5 / 0.95	35° S	8.6	13	-4.4
Albuquerque (Exp.)	1.08 / 0.98	0.55 / 0.9	15° S	32.5**	30.2	+2.3
Albuquerque (Exp.)	1.08 / 0.98	0.55 / 0.9	15° W	39**	36.7	+2.3
Albuquerque (Exp.)	1.03 / 0.98	0.25 / 0.9	30° S	19**	14.6	+4.4
Albuquer- que*** (Exp.)	0.89 / 0.98	0.25 / 0.9	90° S	30.5**	32.2	-1.6
Golden (Exp.) ****	1.02 / 1.02	0.2 / 0.6	30°	8.3	8.6	-0.3

* 눈의 영향을 배제하기 위해 5 월에서 8 월까지의 데이터만 사용하였다.

** 여러 개의 시험 모듈의 평균 양면형 이득을 사용하였다.

*** [114]에 있는 동-서 방향 수직 모듈 측정은 2 개의 모듈 사이에 큰 차이를 보여주는데, 여기에서는 포함되지 않는다.

**** National Renewable Energy Laboratory 에 의해 수행된 양면형 측정 (12/2016 to 08/2017).

일반적으로 상대적인 에너지 이득은 위도 L 에 의존하고 그리고 아래 식과 같이 양면형 모듈의 경우 간격 높이 $E^{(B)}$ 에서, 그리고 단면형 모듈의 경우 ($E^{(M)}$) 에서 최대 에너지의 95%에 도달한다.

$$\begin{aligned} (E_0^{(B)}) / h &= 3.3 R + 0.4 - L (0.028 R + 0.009) \\ &= E_0^{(M)} + R (3.3 - 0.028 L) \end{aligned} \quad (24)$$

방정식은 $E_0^{(B)} > 0$ 인 경우 유효하며, 이득의 차이는 예상한 바와 같이 위도 L 과 지면 알베도 R 에 의존한다. 알베도 증가에 따른 태양광 수집이 보다 효과적이 될 수 있게 양면형 모듈은 단면형 모듈에 비해 경사각이 더 높아야 한다는 것도 명확하다. 최적 경사각 β 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \beta_{opt} &= aL + b, \quad (3) \text{ where } a \equiv 0.86 - 0.57 R \cdot \exp(-E/h) \text{ and } b \\ &= 4.5 + 62 R \cdot \exp(-E/h) \end{aligned} \quad (25)$$

지수 항목은 단면형과 양면형 경사각 ($\Delta\beta$) 이 간격 높이가 더 높은 곳에서는 빠르게 감소한다는 것을 시사한다. 끝으로 최적 방향은 아래 식에서 주어지는 임계 위도 이상에서는 동-서에서 북-남으로 바뀐다.



$$L_c = (E/h)(44R - 62) + 37R + 12. \quad (4) \quad (26)$$

요컨대 독립형 양면형 모듈은 YY_0 를 향상시키고 $LCOE$ 를 크게 감소시켜 이 기술이 모듈 비용의 증가에도 불구하고 전 지구에 유익한 결과를 가져올 수 있을 것이다.

4.7.6 지면 형상 유무의 수직 양면형 시스템

수직 양면형 시스템은 평탄한 에너지 산출량, 오염 감소, 건축 구조와의 통합 및 영농형 태양광의 잠재력을 포함하는 많은 장점을 가지고 있다. 이들 장점들은 단면형에 비교하여 증가된 비용과 독립형 양면형에 비해 상호 음영으로 인한 이득의 감소를 초과한다.

그림 41 은 v-BF 에 대한 글로벌 차원의 영향을 조사하기 위해 세심히 계산한 결과를 보여준다 [115], [116].

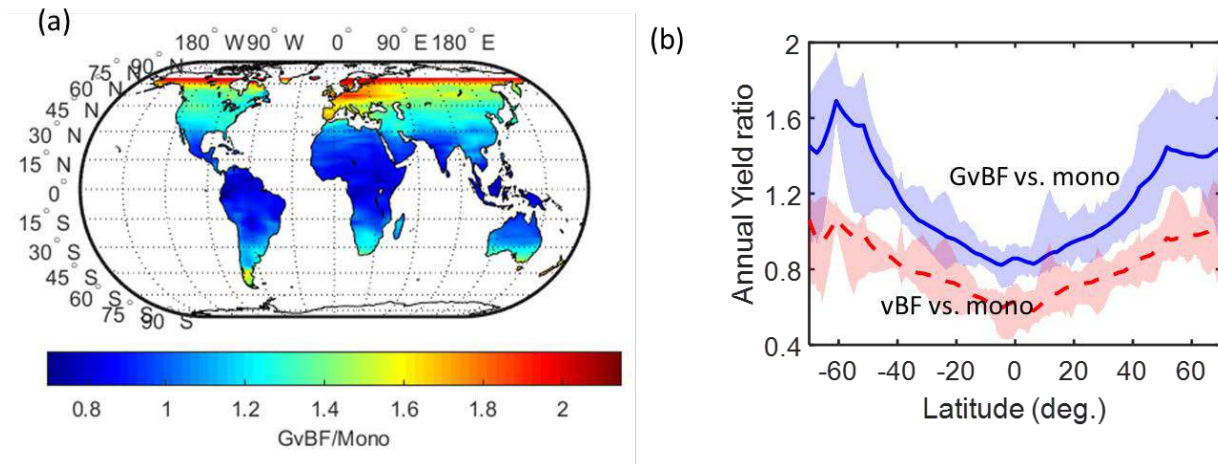


그림 41: (좌) Gv-BF 와 단면형 셀 사이의 전세계 연간 수율 비. (우) 다양한 위도에서 단면형 플랜트 대비 GvBF ($R = 0.5$)의 연간 수율 비, 그리고 단면형 플랜트 대비 v-BF ($R = 0.3$)의 수율 비가 각각 굵은 선과 점선으로 나타나 있다. 단면형 시스템은 10%의 오염 손실을 포함한다. 라인을 따라 음영이 진 영역은 다양한 위도에서 데이터의 스프레드를 나타낸다.

여기서의 결론은 다음과 같다.

- 비교적 높은 알베도 (예, $R = 0.5$)를 가진 경우에도, 양면형 이득은 $30^\circ \sim 40^\circ$ N 이상의 위도와 낮은 청명 지수를 가진 지역에서만 1 을 초과한다. 이 결과는, 단면형 어레이의 에너지수율 대비 동-서 어레이 에너지수율의 위도에 대한 민감도가 더 낮은 것과 그리고 더 높은 위도에서 p/h 비가 더 큰데서 기인하는데, 이는 상호 음영은 줄이고 알베도 수집은 강화한다. 예를 들어, 동경 40 도에 있는 양면형 시스템의 산출량은, $-25 < L < 30$ N ($p/h \sim 0.8$) 에서의 200 kWh/m^2 에서 $30 < L < 60$ N ($p/h \sim 1.2$) 에서는 $80 \sim 100 \text{ kWh/m}^2$ 로 줄어든다. 동일 지역에서 단면형의 산출량은 240 kWh/m^2 에서 $60 \sim 80 \text{ kWh/m}^2$ 로 떨어진다.
- 두 번째, 지면 형상(ground-sculpting) (a poor man's concentrator)을 가진 경우, 과도기적(transitional) 위도는 급격히 감소하고, 그리고 양면형 이득은 적도 가까운 지역을 제외하고는 포지티브가 된다 [116]. 동일하게 중요한 것은, 단면형에 비하여 감소한 양면형의 온도 민감도는 포지티브-이득(positive gain) 위도를 더 낮춘다. 특별히 높은 위도 위치에서는,



상당히 감소한 오염, 증가한 p/h 그리고 확산광의 수집이 더 좋아짐으로 해서 양면형 이득이 50%에 달할 수 있다.

- 세 번째, 가장 중요한 것은 수직 양면형 플랜트에서의 모듈은 높이 설치할 필요가 없다. 독립형 혹은 남향의 최적 경사각의 양면형 플랜트와는 달리 높이 설치된 수직 모듈은 지면의 조각과는 무관하게 항상 에너지 산출량이 줄어든다.

요컨대, 수직 양면형 시스템의 경제적 실행가능성을 확보하기 위해서는 지리적 위치, 오염율 및 주위 온도와 같은 인자들의 세심한 배려가 필요하다.

4.7.7 최적 높이의 고정 경사 양면형 플랜트

남향에 높게 설치된 양면형 플랜트는 단면형 설계에 대한 또 다른 대안이다. 위에서 논의한 독립형 양면형에서와 같이 간격 높이와 더 낮은 온도 민감도의 결합은 양면형 이득에 기여한다 [113], [105]. 그러나 상호 음영은 독립형 양면형 모듈에 비해 양면형 이득을 약화시키고 그리고 더 낮은 간격 높이에서는 에너지 포화가 일어난다. 다음은 몇 가지 핵심 결론이다.

- 지면 ($E = 0$) 가까이에 설치된 모듈에서는 패널이 수평 방향이어야 하고 부지 관련 비용이 높은 위치에서는 밀집하여 채워야 하고, 반면에 모듈 관련 비용이 높은 위치에서는 패널의 경사각이 최적이어야 한다. 일반적으로 최적 경사각은 위치와 부지 비용 대비 모듈 비용의 비 $M_L \equiv C_M/C_L$ 에 따라 달라지는데, 아래와 같다.

$$\beta_{opt} = c_1 M_L + \exp[c_2 (1 - (M_L - M_L^*)^{c_3})] \quad (27)$$

여기서 상수는 위도 L 에 의존한다. 예를 들어, Washington DC (38.91° N, 77.04° W)의 경우 $c_1 = 0.07$, $c_2 = 3.6$, $c_3 = 1.6$ 그리고 $M_L^* = 8$ 이다. 일반적으로 $|L| > 30^\circ$ (그리고 캐나다, 서유럽, 중부 중국과 같이 확산광의 비율이 높은 위치)를 가진 위치에서는, 양면형 모듈이 약 $10^\circ \sim 15^\circ$ 더 높게 경사가 져야 한다. 경사각을 더 높이면 오염의 감소로 청소 비용을 줄일 수 있으므로 LCOE를 더 개선시킬 수 있다. 최적 경사각에서의 차이는 모듈이 최적 높이에 설치될 때에도 계속 존재하고 그리고 에너지수율은 5~15% 향상된다 [113], [105]. 그림 42는 HIT 양면형 시스템의 글로벌 이득과 Al-BSF 단면형 시스템을 비교한 것이다.

(SHJ (Bifacial) – Al-BSF (Monofacial)) / Al-BSF (Monofacial) for $\eta(T)$

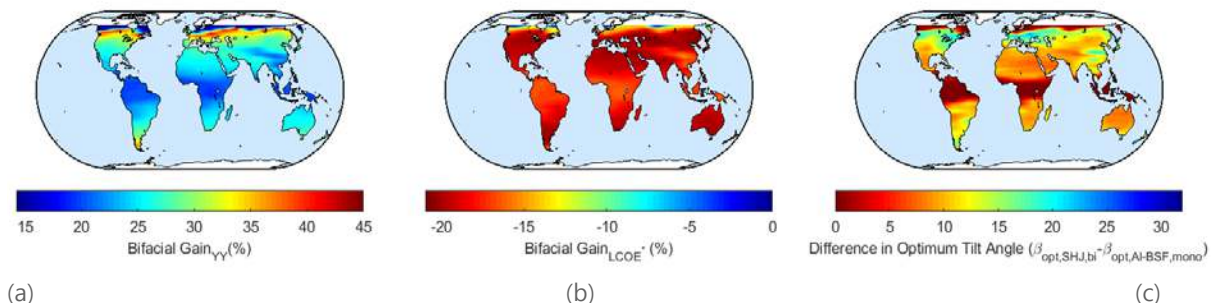


그림 42: 양면형 이득을 비교하는 글로벌 지도 (a) 연간 에너지수율, (b) LCOE* 와 (c) 실리콘 이종접합 양면형 ($\beta_T = 0.26\%/^\circ C$) 대비 Al-BSF 단면형 ($\beta_T = 0.41\%/^\circ C$)의 최적 어레이 경사각 차이. 여기서, $R_A = 0.5$, $M_L = 15$ 이다.

남향으로 높게 설치된 양면형 시스템의 연간 에너지 산출량은 간격 높이와 함께 향상되지만 주위온도가 올라가면 떨어진다. 예를 들어, 아주 더운 지역(사하라 사막, 멕시코와 남부 인도



같은)에서는, STC (η_{STC})에서의 효율과 비교하여 온도 유도 열화 때문에 이들 시스템의 에너지수율이 떨어진다 (30° N 이하에서는 5~7%). 반면에, 더 추운 위치 ($|L| > 30^\circ$)와 평균 온도가 더 낮은 지역(시베리아, 고비 사막, 북 캐나다와 북유럽)에서는, η_{STC} 대비하여 이 시스템이 증가된 효율을 나타내는데, 이는 에너지수율을 높인다 ($|L| > 30^\circ$ 에서 5~12%). 실제 개선 폭은 전세계 평균온도와 함께 거의 완벽하게 상관관계를 갖는다는 것을 보여준다. 양면형 기술에서 온도 민감도가 감소한 것은 단면형 셀과 비교할 때 중요한 장점이 된다. 전반적으로 높이 설치된 최적 경사각 양면형 플랜트의 LCOE 는 단면형보다 10~15% 더 낮아야 한다.

4.7.8 트래킹 대 고정 경사 양면형 시스템

양면형 트래킹 시스템은 법선 방향으로 입사되는 직달광의 수집과 패널 양면에서 알베도 광수집이라는 이중의 장점을 제공한다. 이는 단일-축 혹은 이중-축 트래커와 인버터의 추가적인 비용을 가져온다. 그러나 이들 비용은 많이 축소되었다. 게다가 이중 장점은 잠재적으로 그 대규모 설치를 가능하게 할 정도로 충분히 의미있는 에너지 이득을 창출한다. 예비 분석에서는 양면형의 단일-축 트래킹의 연간 에너지수율이 고정 경사 보다 5~10% 더 높다는 것을 보여준다. 게다가 온도 의존성의 효율 기반 양면형 트래킹 시스템의 에너지수율은 고정된 온도 효율(η_{STC})기반 양면형 트래킹 시스템보다 전세계적으로 5~10% 더 낮을 수 있을 것이다.

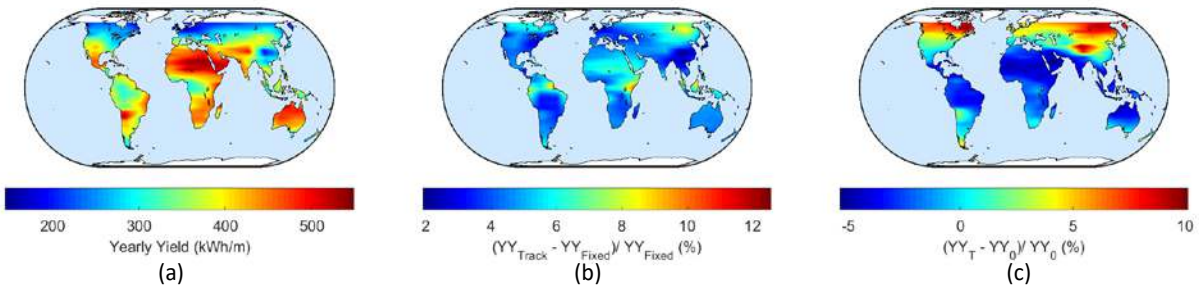


그림 43: (a) 온도 의존성 효율 ($\eta(T)$)을 가진 양면형 트래킹 시스템의 연간 에너지수율. (b) 북-남 고정 경사 양면형 대비 양면형 트래킹의 연간 에너지수율에서의 백분율 변화. (c) 온도 의존성 효율과 고정 온도 효율(η_{STC})을 가진 양면형 트래킹 시스템의 연간 에너지수율에서의 백분율 변화.

4.7.9 결론

양면형 태양전지기술은 단면형 기술에 비해 에너지수율을 개선하고 LCOE 를 줄이는데 유망하다. Sandia 에 있는 소규모 시스템과 전 세계의 대규모 설치 현장에서 모두 이러한 일반적인 결론을 뒷받침하고 있다. 최적 기울기와 높이를 가진 독립형 모듈은 세계 어느 곳이든 동일한 기술을 기반으로 하는 단면형 모듈보다 더 많은 에너지를 생산할 수 있다. 태양광시스템의 양면형 이득은 상호 음영, 온도 민감도, 기울기 각도 등 여러 요소에 따라 복잡한 절충을 하게 된다. 남향 고정 경사 양면형 시스템은 세계 어디에서도 단면형 시스템보다 더 많은 에너지를 생산한다. 시스템이 적도($|L| > 25^\circ \sim 30^\circ$ N)로부터 더 멀어지고 그리고 중간 온도와 낮은 청명 지수를 가진 지역에서는 상당한 이득이 얻어진다.

수직 양면형과 같은 특수 설치의 최적의 높이, 적도 방향 또는 단일-축 트래킹 양면형보다 적은 에너지를 생산하며 고위도에서만 단면형 시스템을 능가한다. 저위도에서는 평탄한 에너지 출력, 피크



온도 감소와 관련된 신뢰성 향상, 오염 감소 및 지면 형상과 같은 특징이 수직 설계를 매력적이고 비용 효율적으로 만든다.



5 양면형 태양광 배열과 현장 성능에 대한 국제 설문조사

IEA PVPS Task 13 Activity 1.2 – 양면형 태양광은 회원기관들로부터 양면형 현장 시험 결과에 관한 데이터를 수집하기 위해 회원들에게 설문서를 발송하였다. 유럽, 아프리카, 아시아와 아메리카를 포함하는 9 개 회원 기관, 13 개 지리적 위치 그리고 27 개 시스템에 대한 완성된 양식을 받았다. 표 14 는 사이트별 제안된 입력 사례를 담은 설문 양식을 보여주고 있다.

보고된 결과의 요약은 표 15 에 정리되어 있다. 양면형 이득은 시스템 설계 파라미터 중 어떤 인자 단독으로만은 상관관계가 좋지 않다는 것을 주목할 필요가 있다.



표 14: 국제적 양면형 시스템 성능 설문조사 양식과 사례 값들(회색).

정보	값	단위	코멘트
1 시스템 ID	ISE-01		내부 기준으로 사이트 이름 혹은 상업적 프로젝트 이름 공개 불필요
2 Task 13 접촉	reise@ise.fhg.de		추가 설명을 위한 Task 13 접촉자의 이메일 주소
3 사이트 위도	48.0	deg N/S	
4 사이트 경도	7.85	deg E/W	
5 시스템 크기	0.35	kW _p	
6 시스템 유형	고정 경사		고정 경사 / 고정 수직 / HSAT / ...
7 사이트 알베도	25	%	
8 양면형 이득	13	%	
9 시간 간격	0.1	H	즉시 / 일일 / 일년 / ...
10 간격 높이	0.6	M	지면 위 더 낮은 모듈 가장자리
11 어레이 경사각	30	Deg	적용할 수 있으면
12 어레이 방위각	135	Deg	S=180; W=270; N=0; E=90
13 지면 커버 비율	n/a	%	줄과 줄 사이 거리 대비 모듈 줄 폭의 비율
14 모듈 양면형 계수	85	%	후면 출력 등급을 전면 출력 등급으로 나눔
15 어레이 배열	1-up 풍경화 모드		1P, 3-up 풍경화 모드 등
16 전기적 정보	I_{sc} 측정		중앙 인버터, 스트링 인버터, 마이크로인버터, 모듈 옵티마이저 ?
17 추가 데이터 ?	다른 경사각		시계열 혹은 다른 상세 측정에 대한 언급 여부



표 15: IEA PVPS Task 13 멤버들이 제공한 양면형 시스템 현장 성능의 개요.

번호	위도 (°)	경도 (°)	시스템 크기 (kW _p)	시스템 유형	알베도 (%)	높이 (m)	경사 (°)	방위각 (°)	모듈 양면형 계수	양면형 이득 (%)	참고
1	48.00	7.85	0.35	Fixed	25	0.6	30	135	85	13	
2	-25.75	28.27	11.3	2-axis tracker	25	4.5	n/a	n/a	56	3	
3	-25.75	28.27	11.3	2-axis tracker	70	4.5	n/a	n/a	55.8	6	
4	-25.75	28.27	0.54	Fixed	14	0.67	25	0	82.5	25	
5	-25.75	28.27	0.56	Fixed	14	0.67	25	0	55.8	12.5	
6	48.40	2.80	10.95	Fixed	32	1	15	180	84	7.6	
7	43.18	3.00	3.1	Fixed	25	1	20	180	78	7.5	
8	43.18	3.00	3.1	Fixed	25	1	20	180	59	5.9	
9	45.48	9.26	1.95	Fixed	27	1	30	180	76	15.8	
10	45.48	9.26	1.95	Fixed	10	1	30	180	76	8.5	
11	60.45	22.30	1.18	Fixed	26	0.62	90	90	90	90	
12	60.45	22.30	0.3	Fixed	30	0.5	45	225	?	?	
13	50.9	7	~0.3	Fixed	15	1	35	180	83	11	
14	33.4	-111.9	~0.3	Fixed	15	1	33.5	180	83	7	
15	22.3	39.1	~0.3	Fixed	20	1	25	180	83	9	
16	13	80	~0.3	Fixed	25	1	15	180	83	20	
17	35	-106	1.08	Fixed	25	1	30	180	90	19	
18	35	-106	1.08	Fixed	55	1	15	180	90	32.5	
19	35	-106	1.08	Fixed	55	1	15	270	90	39	
20	35	-106	0.54	Fixed	25	1	90	180	90	30.5	
21	35	-106	0.54	Fixed	25	1	90	270	90	124	
22	45.64	5.87	3.04	Fixed	40	0.95	30	180	?	9	
23	39.7	-105.2	75	SAT	26	1.5	n/a	n/a	65 to 90	8.9	(1)
24	-18.44	-69.89	12	Fixed	21	1.2	15	0	70	9.5	
25	-18.44	-69.89	12	Fixed	21	1.2	15	0	85	13.2	
26	-18.44	-69.89	12	SAT	21	1.5	n/a	n/a	70	9.3	
27	-18.44	-69.89	12	SAT	21	1.5	n/a	n/a	75	10.1	



Notes: (1): 5 개의 서로 다른 기술



6 양면형 모델링 비교

(Silvana Ayala Pelaez and Joshua S. Stein)

IEA PVPS Task 13 양면형 활동 그룹(bifacial activity group)은 현장 설치 양면형 시스템의 성능 모델링을 위해 현재의 관행을 상세히 기록할 수 있도록 모델 비교 연습을 계획하였다. 이 활동에는 국제적인 연구 실험실, 대학과 산업계로부터 참여자들을 초청하였다. 참여자들은 양면형 시스템 설계에 대해 그들의 양면형 성능 모델을 시험할 수 있도록 하였는데, 일부는 이미 현장에 설치되어 모니터링하고 있으며 이론적인 성격의 일부는 잠재적으로 다양한 범위의 설계를 대표하고 있다.

참여자들은 해당 모델에 대한 간략한 기술적 설명을 제공하였으며 아래에 기술한 시나리오를 위해 그 모델을 운영하고 그리고 결과를 제공하여 이 보고서에서 분석을 하게 된다. 익명 제출 후에는 그룹에서 보고서를 작성하고 해당 모델의 상대적인 성능 요약서를 참여자에게 보낸다. 참여자들은 완성된 익명의 보고서를 발간하기 전에 이를 검토할 기회를 가진다.

6.1 모델링 시나리오의 설명

다음과 같은 모델 시나리오가 정의되었으며 측정 위치를 보여주는 다이어그램과 함께 모델 제작자에게 제공되었다 (그림 44).

1. 고정 경사, 적도 방향 어레이
 - 경사 = 20°, 방위각 = 180° (남향)
 - 지면 커버 비율 (GCR)= 0.35 (줄과 줄 사이 간격 = 2.83 m)
 - 알베도 = 0.62
 - 지면으로부터 간격 높이 = 0.5 m
 - 어레이 사이즈 = 줄당 20 개 모듈 7 줄
 - 랙킹 구조는 시뮬레이션에서 무시
 - 모듈 방향 = 1-up 풍경화
 - 모듈 = Prism Solar BN72-370 (size: 1.91 m x 0.989 m)
2. 고정 경사 서향 어레이
 - 경사 = 25°, 방위각 = 270° (서향)
 - 지면 커버 비율 (GCR)= 0.33 (줄과 줄 사이 간격 = 3.0 m)
 - 알베도 = 0.4 (콘크리트)
 - 지면으로부터 간격 높이 = 0.75 m
 - 어레이 사이즈 = 줄당 20 개 모듈 7 줄
 - 랙킹 구조는 시뮬레이션에서 무시
 - 모듈 방향 = 1-up 풍경화
 - 모듈 = Prism Solar BN72-370 (size: 1.91 m x 0.989 m)



3. 고정 경사, 수직 동-서 어레이
 - 경사 = 90° , 방위각 = 90° (모듈의 전면이 동쪽을 향함)
 - 지면 커버 비율 (GCR) = N/A (단일 줄)
 - 알베도 = 0.4 (콘크리트)
 - 지면으로부터 간격 높이 = 0.3 m
 - 어레이 사이즈 = 20 개 모듈 1 줄
 - 랙킹 구조는 시뮬레이션에서 무시
 - 모듈 방향 = 1-up 풍경화
 - 모듈 = Prism Solar BN72-370 (size: 1.91 m x 0.989 m)
4. 수평 단일-축 트래킹 어레이
 - 방위각 회전축 = 180° (북-남)
 - 지면 커버 비율 (GCR) = 0.35 (줄과 줄 사이 간격 = 5.7 m)
 - 알베도 = 0.25
 - 지면으로부터 토크 튜브의 높이 = 1.2 m
 - 어레이 사이즈 = 줄당 20 개 모듈 10 줄
 - 토크 튜브 직경 = 0.51 m (토크 튜브의 알베도는 0%로 가정)
 - 모듈의 뒷면에서 토크 튜브의 중앙까지 거리 = 0.15 m
 - 모듈 방향 = 1P
 - 모듈 = Prism Solar BN72-370 (size: 1.91 m x 0.989 m)

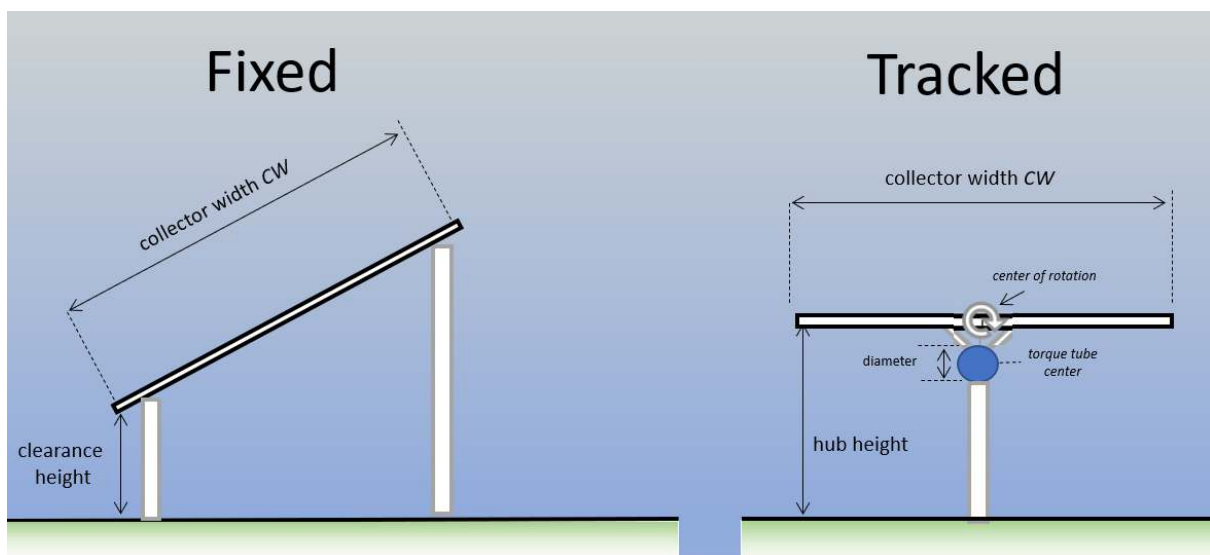


그림 44: 고정 경사와 트래킹 시스템의 파라미터 측정 위치를 보여주는 다이어그램.

다음의 값은 좀 더 많은 세부사항을 필요로 하는 소프트웨어용으로 결정되었는데: 같은 줄에 있는 모듈 사이의 거리 = 0.01m.



6.1.1 비교용으로 사용된 기상 파일

모든 시뮬레이션은 EnergyPlus 웹사이트 (<https://energyplus.net/weather>)의 International Weather for Energy Calculation (IWECC) 데이터로부터 도출한 3 개의 기상 파일을 입력으로 사용하였다. 이 기상 파일은 IWECC 매뉴얼 관례를 따르는데, 데이터는 통상적인 기상년(meteorological year; TMY) 데이터 같이 t-1 에서 t 까지 평균으로 시간별로 집계한다. 표 16 은 상응하는 순서와 함께라 기상 파일의 개요를 제공한다.

표 16: 시뮬레이션 S1-S4 용 기상 파일.

사이트 파라미터	Abu Dhabi, United Arab Emirates	Antofagasta, Chile	Groningen, Netherlands
위도, 경도 (°N, °E)	24.43, 54.65	-23.43, -70.43	53.13, 6.58
시간대 (h vs. UTC)	+4.0	-4.0	+1.0
고도 (m)	27	120	4
연간 DNI (kWh/m ²)	2294.9	2043.7	625.2
연간 DHI (kWh/m ²)	606.7	676.5	608.5
DHI/DNI 비	0.26	0.33	0.97
연평균 주위온도(°C)	27.1	17.0	9.1
연평균 풍속 (m/s)	3.6	4.0	4.6

기상 파일의 품질은 DNI, GHI, DHI, 온도, 풍속, 상대습도의 검증된 값과 시간 이동 없이 python 알고리즘과 PVSyst 으로 확인하였다. 선택된 파일에 검증된 알베도 값은 없었지만 알베도의 특정 값은 각 시나리오의 입력 파라미터 안에 명시되었다. 적설 모델링은 연습의 부분으로 포함되지 않았다..

6.1.2 현장에서 측정된 조사강도와 출력의 선택적인 시뮬레이션

일주일 동안의 현장 측정 데이터와 함께 2 개의 선택적인 시뮬레이션이 포함되었다. 데이터세트는 소프트웨어 도구가 모델링(전면과 후면 조사강도 측정 그리고 해당되면 모듈 출력 결과) 할 것으로 예상되는 출력에 대해서는 블라인딩 처리하였다. 각 선택적인 시뮬레이션은 아래에 기술되어 있다.

선택적 시뮬레이션 1

선택적인 시뮬레이션 1 은 미국 콜로라도 NREL 에 있는 고정 경사각 테스트베드의 전면과 후면 조사강도를 시뮬레이션한다. 기상 데이터는 Solar Radiation Research Laboratory 에 있는 테스트베드로부터 60 미터 거리에서 측정된다 [117]. 이 테스트베드는 중앙 줄의 가운데 모듈을 가로질러 조사강도 프로파일 데이터를 수집하는 전면과 후면 조사강도 센서를 가지고 있다 (그림 45). 테스트베드는 실제 어레이의 축척 버전으로 콜렉터 폭은 0.61 미터이다. 테스트베드는 길이 6.1 미터



줄 3 개로, 각 줄은 0.61 m x 0.305 m 크기의 모듈 10 개가 풍경화 모드로 배치되어 있다. 어레이는 남향(방위각 = 180)이다. 시뮬레이션용으로 제공된 해당 주의 알베도는 0.7, 지면으로부터의 간격 높이는 0.53 m, 줄 간 간격은 0.914 m, 그리고 모듈의 경사각은 10° 이다.



그림 45: 선택적인 시뮬레이션 1 을 위한 고정 경사 테스트베드.

테스트베드에서 조사강도는 중앙 모듈의 경사를 가로질러 2 개의 전면과 4 개의 후면을 향한 기준 셀로 측정되었다. 설치의 상세 내용과 공개된 원래 데이터는 문헌 [118]에서 찾을 수 있다.

선택적 시뮬레이션 2

NREL 에 있는 단일-축 트래커 필드 어레이의 Bifacial Experimental 용으로 1 주일의 데이터가 제공되었다. 선택된 데이터는 2020 년 3 월 2 일에서 9 일까지이다. 필드 자체에 대해서는 섹션 7.8 에 추가로 기술되어 있다. 현장에 대한 완전한 데이터는 공개되어 있는 문헌 [119]에 있다.

해당 연구팀은, 모델링 센서는 필드의 다양한 곳에 잠재적으로 위치시켜 전면과 후면 조사강도를 모델링하도록 요청받았다. 소프트웨어가 계산할 수 있으면 19 개의 Prism Solar Modules Bi72-457BSTC 로 구성된 2 번 째 줄의 출력 데이터도 요구받았다. 제공된 라운드 로빈 입력자료 데이터는 DC 출력, 양면형 계수와 하나의 .PAN file 이다.

6.2 모델에 대한 설명

양면형 커뮤니티 회원들을 이 연습에 참여하도록 초청하였는데, 그들이 가진 소프트웨어 도구나 결과의 재현성을 평가하는데 어떤 도구라도 사용 가능하다. 참여자들은 또한 각자의 소프트웨어 능력에 대한 설명 제공을 요청받았는데, 그 요약은 표 17 에 나와 있고 다음 섹션에서 좀 더 상세히 논의될 것이다.



표 17: 양면형 시스템 모델링용 소프트웨어 도구의 특성 개요.

소프트웨어 이름	시뮬레이션에 사용된 버전	시뮬레이션 실행	모델링 접근방법	사용
bifacial_radiance	v0.3.4	CPU-based simulation/HPC	Raytrace (Radiance)	오픈 소스
bifacialVF	v0.1.8	CPU-based simulation	2D-VF	오픈 소스
PVNOV	5.5.1	CPU-based simulation	3D Reverse raytrace	내부
System Advisor Model (SAM)	2020.2.29 Revision 2 SSC 240	CPU-based simulation	2D-VF	오픈 소스
Chudinzow Model	Matlab 2019b	Windows server 2012, min RAM 100GB for parallel computing	2D-3D VF hybrid	내부
Pvsyst	v6.86	CPU-based simulation	2D-VF	유료
Imec - Energy Yield Simulation Framework	14.05.2020	Linux, CPU - 24 Core Linux server, 375 GB RAM, NVIDIA Tesla GPU	Raytrace (Radiance)	내부
DUET by SUNLAB @ University of Ottawa	v0.2	CPU-based simulation	3D-VF with rack shading	내부
SolarFarmer	1.0.187.0	CPU-based simulation	3D Hemi-cube model, with 2D-VF for bifacial	유료
TUAS PVPM	V0.4	CPU-based simulation	2D-VF (based on pvfactors)	오픈 소스
MoBiDiG hybrid	0.2.5	CPU-based simulation	Raytrace and VF hybrid, user chooses based on system size	유료
Trifactors	May-20	CPU-based simulation	3D-VF	유료
pvfactors	v1.4.1	CPU-based simulation	2D-VF	오픈 소스



소프트웨어 이름	지면 알베도	알베도 시간 분해능	소프트웨어가 분광 의존성 알베도를 고려하는지?	소프트웨어가 각도 의존성 반사율을 고려하는지?
bifacial_radiance	등방성	즉시	Yes	BRDF possible
bifacialVF	등방성	즉시	No	No
PVNOV	등방성	즉시	No	No
System Advisor Model (SAM)	등방성	즉시, 월간, 연간	No	No
Chudinzow Model	등방성	즉시	No	No
Pvsyst	등방성	월간, 연간	No	No
Imec - Energy Yield Simulation Framework	등방성	즉시	No	Yes
DUET by SUNLAB @ University of Ottawa	등방성	즉시	개발 중	IAMs for front and rear module surfaces
SolarFarmer	등방성	월간, 연간	No	No
TUAS PVPM	등방성	월간, 연간	No	No
MoBiDiG hybrid	등방성	시간	No	No
Trifactors	등방성	즉시	No	No
pvfactors	등방성	즉시	No	No



소프트웨어 이름	스카이 모델	조사강도 입력	TMY3 데이터 처리: 11 am 데이터 포인트 용으로 태양 위치의 계산은 몇 시에 ?	소프트웨어는 후면 반사용으로 각도 의존성 반사율을 고려하는지?
bifacial_radiance	Perez, and Stone cumulative sky	DNI 와 DHI	10:30:00	Yes
bifacialVF	Perez	DNI 와 DHI	10:30:00	Yes
PVNOV	Isotropic or Perez	DNI / DHI; GHI /DHI; 어레이면 조사강도	11:30:00	Yes
System Advisor Model (SAM)	Perez, Isotropic, HDKR	DNI 와 DHI, DNI 와 GHI, GHI 와 DHI, 기준 셀로부터 어레이면, 일사량계로부터 어레이면	10:30:00	Yes
Chudinow Model	Isotropic sky diffuse model	DNI 와 DHI 혹은 DHI 와 GHI	11:00:00	No
Pvsyst	Perez, Hay	GHI, DHI 2 가지 결합, 수평면 직달 조사량 혹은 측정된 DNI; 혹은 면내 측정된 글로벌	11:30:00	No
Imec - Energy Yield Simulation Framework	Perez	DNI 와 DHI	11:00:00	Yes
DUET by SUNLAB @ University of Ottawa	Perez	DNI, DHI, GHI	10:30:00	Through IAM
SolarFarmer	Hay or Perez	GHI and DHI	11:30:00	No
TUAS PVPM	Isotropic, Perez	GHI, DHI, DNI	11:00:00	No
MoBiDiG hybrid	Perez model with 1990 coefficients	GHI, DHI, DNI	10:30:00	Yes, with IAM
Trifactors	Perez	GHI, DHI 와 DNI	11:30:00	Yes
pvfactors	Perez	DNI, DHI 와 선택적으로 GHI	11:30:00	Yes



소프트웨어 이름	소프트웨어는 분광 보정 후면 조사강도를 계산하는지?	소프트웨어는 정반사성 반사를 어떻게 처리하는지?	소프트웨어는 후면 조사강도 불균일성을 계산할 수 있는지?	랙킹과 다른 장애물에 의한 음영 손실을 포함하는지?
bifacial_radiance	Yes	각 소재 특성에 확산과 정반사성(specular) 성분 명시.	Yes	Yes
bifacialVF	No	정반사성 반사는 고려하지 않음.	Yes	No
PVNOV	No	고려된 모든 반사는 등방성.	Yes	Yes
System Advisor Model (SAM)	No	정반사성 반사는 고려하지 않음.	No	Yes
Chudinzow Model	No	일정한 인자를 가정함으로써 ($\tau\alpha$, 투과 x 반사율) = 0.9 [120] 토대.	Yes	No
Pvsyst	No	정반사성 반사는 고려하지 않음.	No	Yes
Imec - Energy Yield Simulation Framework	No	선택적으로, Radiance 를 통해 처리된다.	Yes	Yes
DUET by SUNLAB @ University of Ottawa	In development	지면으로부터의 반사는 현재 램버시안이다. 랙킹 혹은 다른 패널로부터의 반사는 현재 고려하지 않는다.	Yes	Yes
SolarFarmer	Yes	고려도지 않는다.	No	Racks only
TUAS PVPM	No	정반사성 반사는 처리되지 않음, 모든 표면은 확산 반사체라고 가정한다.	No	No
MoBiDiG hybrid	No	알베도의 정반사성 반사를 고려한다.	Yes	No
Trifactors	No	고려되지 않음(그러나 로드맵에 목록화)	Yes	No
pvfactors	No	정반사성 반사는 처리되지 않음, 모든 표면은 확산 반사체라고 가정한다.	Yes	No



소프트웨어 이름	단일-축 트래킹	2-축 트래킹	출력은 계산되는지 ?	모듈 온도는 반영되는지 ?	전기적 불일치는 계산되는지 ?	소프트웨어 가 가장자리 효과를 계산할 수 있는지?
bifacial_radiance	Yes	Under develop- ment	Yes	Yes	Yes	Yes
bifacialVF	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No
PVNOV	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes
System Advisor Model (SAM)	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No
Chudinzow Model	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Pvsyst	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Imec - Energy Yield Simulation Framework	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes
DUET by SUNLAB @ University of Ottawa	Yes	Under develop- ment	Yes	Yes	Yes	Yes
SolarFarmer	Yes	No	Yes	Yes	Yes	No
TUAS PVPM	No	No	Yes	Yes	No	No
MoBiDiG hybrid	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Trifactors	Yes	No	Yes	Yes	Yes	Yes
pvfactors	Yes	No	No	No	No	No



6.2.1 bifacial_radiance 모델

(Silvana Ayala Pelaez)

bifacial_radiance 는 python 언어로 미국 NREL 이 생성한 오픈 소스 모듈이다. 이 모델은 광선추적 소프트웨어 RADIANCE [123]를 레버리징하여 양면형 시스템의 성능을 시뮬레이션하는 작업 흐름을 포함하는 일련의 함수들과 사용자 정의를 제공한다 [121], [122]. 그래픽 사용자 인터페이스는 이 모델링 소프트웨어의 사용을 단순화하는 데 도움이 된다. 인터페이스 또는 python 모듈을 사용하면 시스템의 모든 위치에서 조사강도를 계산할 수 있을뿐 아니라 태양광모듈과 어레이의 설계 및 레이아웃이 가능하다.

기본적으로 bifacial_radiancy 는 주어진 모듈의 중심선에서 주어진 포인트 내에서 조사강도를 모니터링한다. 사용자는 샘플링하고자 하는 모듈과 줄을 선택할 수 있다. 모듈의 모든 셀에서 조사강도를 완전히 샘플링할 수도 있다. bifacial_radance 를 사용하는 주요 단계는 다음과 같다.

- 지면, 하늘과 모듈 입력 특성의 생성
- 광선추적과 전면과 후면 조사강도 계산
- 프로세스 사후 결과

천공(sky)의 특성 조건을 만들기 위해 bifacial_radiance 는 확산광용으로 Perez 분포를 사용하는데, 이는 문헌 [124]에서 개발된 천공-모델에 천공 반구를 145 개의 독립 패치로 구분한다. 태양 직달광은 콜리메이티드 포인트 소스로 혹은 태양의 위치를 나타내는 패치에 할당하여 모델링할 수 있다. 천공은 측정된 혹은 통상적으로 DNI 와 DHI 를 입력으로 하는 MYD 를 기반으로 생성한다. 그리고 소프트웨어는 시간별(예, 일년 기간의 모든 시간들) 다양한 포인트에서 생성된 천공을 추가하고 하나의 단일 계산을 하기 위해 “누적 천공”의 사용을 가능하게 한다. 트래킹 누적 천공 알고리즘도 가용하다 [125].

역방향 광선추적은 bifacial_radiance 의 중요한 특징이다. 이는 모델이 내부적으로 광선의 소스가 대상 모듈에서의 위치나 포인트가 되도록 설정하며 모든 가능한 방향으로 광선을 생성한다. 이들 광선은 천공과 교차하거나 혹은 그 출력이 무시할 정도가 될 때까지 현장 상황에 있는 모든 요소들과 교차한다. 그 후에 각 천공 패치에 도달하는 광선들의 개수는 각 패치의 출력으로 가중되고 샘플링된 포인트에서의 전체 조사강도는 가중된 모든 패치의 합이다. 역방향 광선추적법은, 특히 소스(천공)보다 훨씬 더 작은 하나의 탐지기(모듈)를 포함하는 이런 시뮬레이션의 경우에 광선추적 소프트웨어에서의 시뮬레이션 시간을 크게 줄여주는テクニック이다.

내장된 방법은 단일-축 트래킹과 고정 경사 시스템을 처리한다. 트래킹 시스템의 경우 현장 또는 GCR 의 줄간 간격에 기반하여 역추적이 활성화될 수 있다. 또한 모듈의 중심 또는 토크 튜브의 중심과 일치하는 회전 축을 기준으로 추적이 명시될 수 있다. 다양한 프로파일의 토크 튜브를 쉽게 명시될 수 있으므로(원형, 사각형, 육각형, 팔각형) 이 도구를 사용하여 토크 튜브[95] 및 기타 랙에서 발생하는 음영 손실을 계산하여 프로그래밍 방식으로 추가할 수 있다. 입사각 손실을 고려하기 위해 모듈은 그림 46 과 같이 셀 주위에 유리를 가지고 모델링할 수 있다.

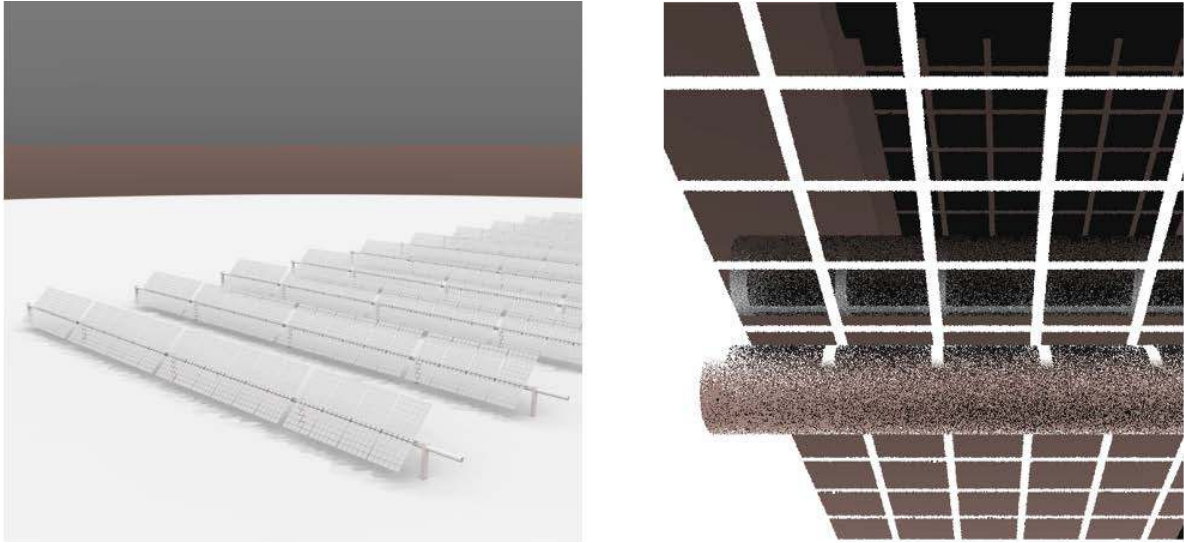


그림 46: (좌) 미국 콜로라도에 있는 NREL 양면형 실험용 단일-축 트래킹 필드 어레이의 bifacial_radiance 모델. (우) 주위에 등근 토크 튜브와 유리를 가지고 셀마다 모델링한 모듈의 클로즈업.

소프트웨어에는 모듈과 줄의 출력 산출량 및 전기적 불일치를 계산하기 위해 조사강도 결과를 프로세싱하는 기능들과 이들을 오픈 소스 소프트웨어 PVMismatch의 입력자료로 사용하는 기능도 포함되어 있다 [126]. bifacial_radiance는 어레이의 어떤 위치도 샘플링할 수 있기 때문에 이는 어레이의 사이즈로부터 발생하는 가장자리 효과를 연구하는 이상적인 도구이기도 하다 [127].

6.2.2 BifacialVF 모델

(Bill Marion and Mark Monarch)

BifacialVF 모델은 양면형 모듈의 후면 조사강도(BSI)를 추정하기 위해 미국 NREL이 개발한 python 실행 모델이다 [128]. 원래 C++로 코딩된 것이지만 python 오픈 소스도 가용하다 [129]. 모델은 BSI를 계산하기 위해 다른 곳에서는 configuration factors라고 하는 view factors(VF)를 사용한다. VF는 어떤 표면에 입사되는 조사강도 대비 그 표면을 떠나는 조사강도의 비율이다 [73].

VF를 사용하는 방정식 사례의 하나로, (28)은 모듈의 전면에서 입사되는 지면 반사 조사량 I_r 계산용으로 잘 알려진 방정식이다.

$$I_r = \rho \cdot GHI \cdot (1 - \cos \beta) / 2 \quad (28)$$

여기서 ρ 는 지면 알베도, GHI는 글로벌 수평면 조사강도 그리고 β 는 수평으로부터 모듈의 경사각이다. 항목 $\rho \cdot GHI$ 는 지면을 떠나는 조사강도이고 VF는 $(1 - \cos \beta) / 2$ 이다.

VF의 사용은 조사량이 등방성으로 고려되는 모든 입사각(AOI)에서 동일한 강도를 가진다는 것을 가정한다. 태양광모듈의 후면에 입사되는 지면 반사 조사량의 경우, 음영은 등방성이란 가정을 완화시킨다. 그러나 지면의 영역은 동일한 조사강도 분포를 가진 영역과 별도로 VF를 적용한 영역으로 나눌 수 있는데, 이를 합하여 지면 반사 조사강도를 최종적으로 결정하게 된다. 천공의 view가 부분적으로 방해받을 때 천공으로부터의 확산 조사강도를 결정하는 데에도 유사한 테크닉을 사용할 수 있을 것이다.



이 모델은 적절한 길이의 단일 줄이나 복수 줄 모듈에 대해서도 적용 가능하다. 모델은 태양광모듈 플랜트 높이 방향에서 조사량 프로필을 정량화하기 위해 셀의 각 줄에 대한 BSI 를 계산한다. 모델은, 어떤 사이즈의 시스템에서도 일반적으로 그리 중요하지 않는 가장자리 효과 같은 줄의 길이 방향에 따른 BSI 의 차이는 구별하지 않는다.

모델은 3 개의 주요 목표가 있다.

- 태양광 어레이에 의해 음영이 생긴 지면을 확인한다.
- 음영과 천공의 제한된 view 를 반영하여 지면에 의해 흡수된 조사강도를 결정한다.
- 태양광모듈의 후면 조사강도를 결정한다.

이들 목표에 대해서는 아래에서 논의하고자 한다.

태양광 어레이에 의해 가려진 지면을 확인한다

어레이 크기와 방향, 사이트 위치와 시간을 사용하여 태양의 위치가 계산되고 음영은 줄과 줄 사이(row-to-row: rtr) 크기로 추정된다. rtr 을 n 개의 부분(segment)(예, 100)으로 나누고 그리고 각 부분에 음영이 있는지 없는지를 확인한다.

지면에 의해 흡수된 조사강도를 결정한다

DHI 를 3 개의 구성 요소 - 태양 주변(circumsolar)(I_{cir}), 천공(sky) (I_{sky}), 수평선(horizon)(I_{hor}) - 로 분해하기 위해, 직달 법선 조사강도(DNI), 확산 수평 조사강도(DHI)와 함께 Perez 경사면 모델이 사용된다 [130]. 방정식 (29)를 사용하면, n 개 각 부분별로 지면 반사된 조사강도(ground-reflected irradiance: GRI), GRI_n 가 결정된다.

$$GRI_n = a \cdot (DNI + I_{cir}) + VF_{sky} \cdot I_{sky} \quad (29)$$

여기서 a 는 지면 부분에 음영이 없다면 태양 천정각의 코사인이 된다. 만약 지면 부분에 음영이 있으면, a 는 태양광모듈의 셀들 사이의 틈과 어레이의 모듈들 사이의 틈에 의한 태양광 어레이의 오프닝 비율로 곱한 태양 천정각의 코사인이 된다. VF_{sky} 는 그림 47 에 나타낸 바와 같이 천공의 view 각도와 함께 방정식 (30)을 사용하여 결정된다. 수평 지면 부분의 경우, I_{hor} 에 의한 기여도가 크지 않아 무시할 수 있다.

$$VF_{sky} = \frac{1}{2} \cdot (\cos \theta_{s1} - \cos \theta_{s2}) \quad (30)$$

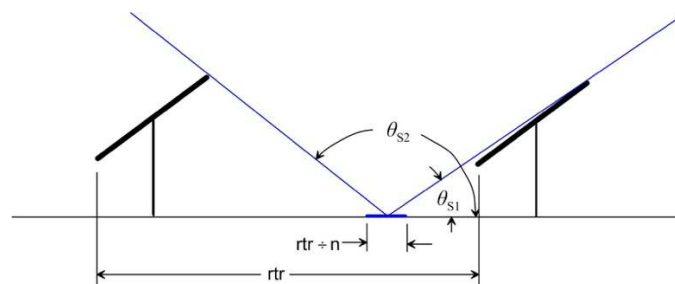


그림 47: 지면의 한 부분에 입사되는 확산 천공 조사량용으로 VF 를 결정하기 위한 시야(Field-of-view) 각도.



태양광모듈의 후면에 의해 흡수된 조사강도를 결정한다

태양광모듈 혹은 패널에서 수평 셀들의 각 줄의 위치에 대해, 후면 조사강도는 천공으로부터의 조사강도, 지면으로부터 반사된 조사강도, 해당 줄의 뒤에 있는 모듈의 전면으로부터 반사된 조사강도 그리고 입사각이 90° 보다 작을 경우 태양 및 천공의 태양 주위 영역으로부터의 조사강도를 합계한 값에 의해 결정된다. 모듈 전면으로부터 반사된 조사강도, I_{ref} 은 전면에 입사되는 확산 조사량에 대해서만 계산된다. 모듈 전면으로부터의 직달과 태양 주위 조사량의 반사는 정반사성(specular)으로 간주되어 해당 줄의 모듈 후면으로 반사되지 않고 어레이의 앞 줄에 반사될 것이다.

BSI 용의 확산 조사강도는 시야(field-of-view)를 1 도씩 180 개 부분으로 나누고, 각 부분에 대해 다음 값들 - VF, 입사각 보정과 각 부분(천공, 수평, 지면 반사 혹은 모듈 반사된)이 보게 되는 소스 조사강도 - 의 곱을 계산하고 합계하여 얻는다. BSI 는 다음 방정식 (31)로 나타낸다.

$$BSI = b \times F_b \times (DNI + I_{cir}) + \sum_{i=1}^{180} VF_i \times F_i \times I_i \quad (31)$$

여기서 $b = \text{maximum}(0, \text{DNI 입사각의 코사인})$; F_b 는 Sjerps-Koomen 등[131]의 공기-유리 모델을 사용한 DNI 용 입사각 보정; VF_i 는 i 1 도 부분의 VF; F_i 는 i 1 도 부분용의 입사각 보정; 그리고 I_i 는 i 1 도 부분이 보게되는 조사강도 (I_{sky} , I_{hor} , ρGRI_h 혹은 I_{ref}) 이다. VF_i 는 방정식 (32)로 나타낸다.

$$VF_i = 1/2 \times [\cos(i - 1)] - \cos(i) \quad (32)$$

여기서 i 는 1°~180° 범위의 각도이다. VF_i 에 해당되는 시야를 나타낸 것이 그림 48 이다.

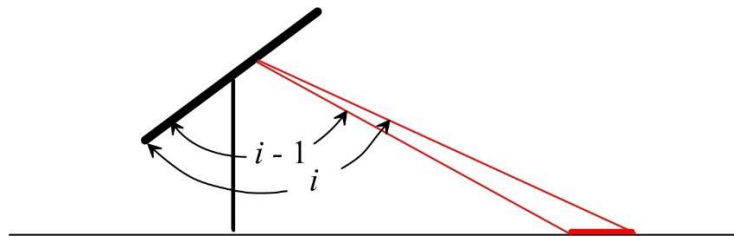


그림 48: 각도 i 와 $i-1$ 로 묘사한 1 도 부분에 대한 지면의 시야.

AOI 확산 조사량의 1 도 부분에 대한 입사각 보정은 입사각 값이 각 i 와 $i-1$ 한계 내에서 변할뿐 아니라 줄의 길이(그림 48 의 경우에는 페이지의 안쪽으로 혹은 바깥쪽으로)를 따라 발생하는 조사량에 대해서도 변화한다는 것을 고려하여야 한다. 1 도 부분에 대한 하나의 F_i 값을 결정하기 위해 이전에 개발된 방법을 사용하였는데 [128], 여기서 하나의 기본적인 조사량의 입사각 보정은 그것의 면내 조사강도에 대한 기여도에 따라 가중된다. 그 결과가 그림 49 이다. 대부분의 확산 조사량이 지표면에 대해 법선으로 향하지 않기 때문에 F_i 는 항상 1 보다 작다.

모듈 전면의 조사강도 변화는 작지만, 다른 모듈 줄의 존재로 인해 줄간 음영과 천공 시야의 변화를 감안하기 위해 동일한 원칙을 적용할 수 있다. 내부 줄의 경우 모듈 하단의 전면 조사강도가 모듈



상단보다 1~2% 작을 수 있다. 후면 조사강도는 그 추이가 정반대인데, 모듈 하단의 조사강도는 일부 상황에서 상단의 조사강도보다 2 배 이상 크다.

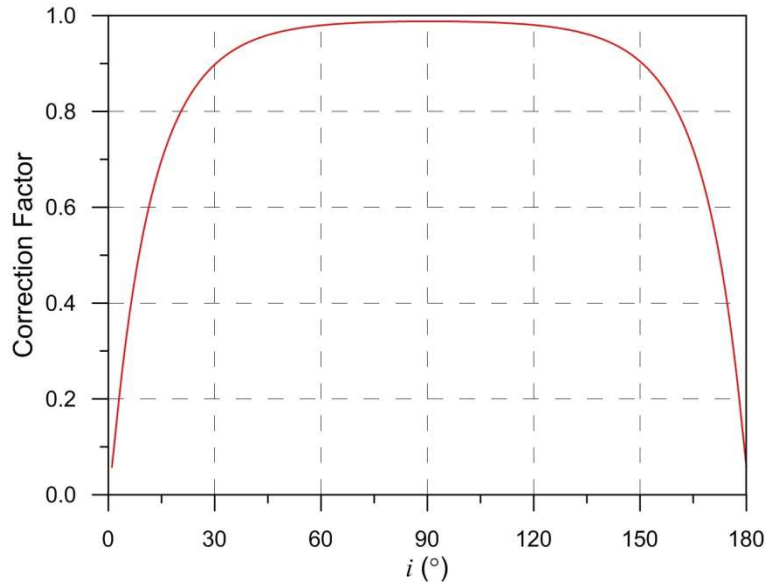


그림 49: 각도 i 의 함수로 1 도 부분의 확산 조사량에 대한 입사각 보정. 대상 모듈은 코팅이 되어 있지 않은 유리를 후면으로 하는데, 그 굴절률은 1.526 이다.

6.2.3 PVNOV 모델

(Oume Lgheit Rhazi, Matthieu Chiodetti)

PVNOV 는 프랑스 Electricité de France(EDF)의 3D 역방향 광선 추적방식의 사내 소프트웨어로 태양광 플랜트의 수치적 모델을 개발하는 데 사용되는 설계 도구이다 [132], [133]. 선택한 장비에 따라 건설되기 전에 미래 프로젝트의 이론적 수율을 예측할 수 있다. 다양한 모듈 및 인버터의 성능을 고려할 수 있으며 수율 추정치에 영향을 미치는 조사강도, 열적 및 전기적 현상을 연구할 수 있다. 다음과 같은 태양광시스템 특성을 정확하게 정의할 수 있다.

- 기상 파일과 천공 모델링(등방성/비등방성)
- 지면 알베도와 현장 상황에 대한 여타 다른 3D 요소 (고려된 모든 반사는 등방성)
- 토폴로지와 수평선
- 모듈 유형과 그 전기적/광학적 특성
- 인버터 유형
- 어레이 배열: 사이즈, 방향, 경사각, 줄간 간격
- 마운팅 구조 정의
- 모듈 스트링 배선
- 패널 위 오염
- 사용자 트래킹 알고리즘
- 첨단 모듈과 셀 열적 모델 (정전 용량, 적외선 교환 등)



- 다년간 열화 계산

사용되는 천공 모델은 등방성 또는 Perez 이며, 입력은 DNI 와 DHI, GHI 와 DHI 또는 POA 조사강도(글로벌 경사 조사강도)이다. 태양 위치는 오전 11 시 30 분에 TMY3 데이터 포인트에 대해 계산된다. 입력 기상 파일에는 시간 단계에 대한 제한이나 제약은 없다. 따라서 사용자는 더 미세한 시간 단계별로 데이터를 담을 수 있다.

PVNOV 는 모듈의 입사각 수정기(incident angle modifier: IAM)를 고려하며 전면과 후면에 대한 응답이 다르다. 조사강도는 태양광시스템의 각 셀 레벨 또는 모듈 레벨에서 계산할 수 있다(그림 50). 현장 상황의 모든 3D 요소(랙, 프레임, 건물, 줄간 음영)에서 음영이 고려된다. 이 소프트웨어에는 역추적이 구현 혹은 구현되지 않은 단일-축 트래킹을 가지고 있다.

출력의 경우 PVNOV 는 PVSyst 와 동일한 기능을 가지고 있으며 인버터 출력단에서 출력을 계산한다(그림 5 1). 출력은 대류, 전도성, 복사열 교환을 고려한 용량성 열 모델을 기반으로 모듈 온도를 고려하여 계산된다. IV 분해능 또는 단순화된 모델에 기초한 소프트웨어에서는 전기적 불일치를 반영한다. 가장자리 효과가 계산에 포함된다. PVNOV 는 다른 도구와 결합하거나 제어 가능한 배치(batch) 버전도 있다.

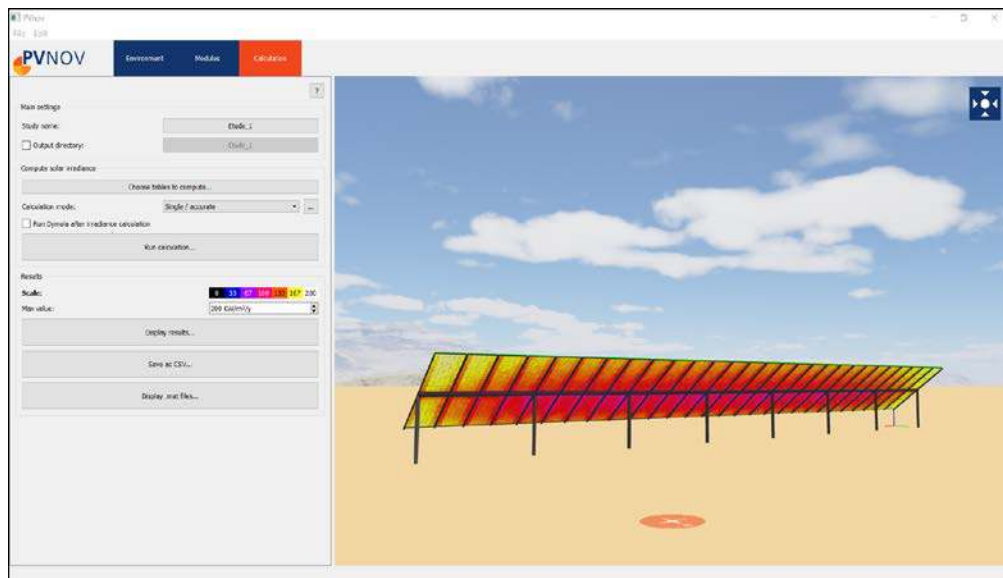


그림 50: PVNOV 를 사용한 각 줄에서의 각 모듈에 대한 조사강도의 계산.

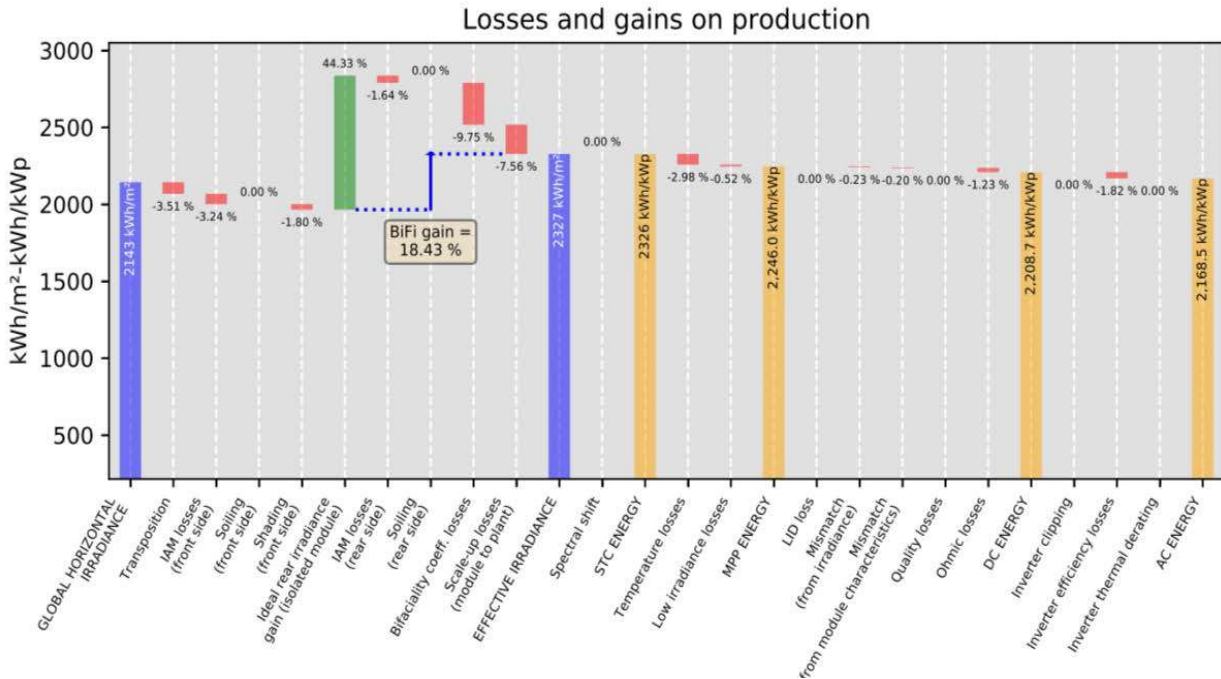


그림 51: PVNOV 로 계산한 에너지 생산에서의 손실과 이득.

6.2.4 System Advisor 모델

(Silvana Ayala Pelaez)

System advisor model (SAM) 은 재생에너지 프로젝트의 성능과 경제성을 모델링하는 무료 소프트웨어이다 [134]. 이는 미국 NREL 이 에너지성(DOE)의 자금 지원으로 개발한 것이다. Windows, OS X 와 Linux 에서 실행되는데 매년 1~2 개의 버전이 만들어진다. 이는 소프트웨어 개발 키트도 가지고 있다. 양면형 태양광모듈의 후면 조사강도를 계산하기 위해 2018 년 10 월에 bifacialVF 모델의 버전이 SAM 에 추가되었다 [135]. 2019 년 4 분기 발표 버전은 단일-축 트래킹 시스템의 확산 계산에 대해 알려진 문제를 정하였으며, 이제 그 실행은 bifacialVF 와 함께 긴밀하게 추적하고 있다 [136],[137]. 또한 SAM 은 광범위한 모듈 및 알고리즘 라이브러리를 통해 시스템 출력 성능과 경제성을 계산할 수 있다.

전면과 후면 사이의 불일치 손실, 장착 구조물 또는 트래킹 시스템으로 인한 음영 및 후면의 오염과 같은 추가적인 후면 조사강도 손실을 SAM 의 입력으로 명시할 수 있다. 모듈 간 및 모듈 내 셀 사이의 간격을 감안하기 위해 투과 분율을 지정할 수도 있다(그림 52). SAM 의 양면형 출력은 각 서브 어레이와 전체 어레이의 전면과 후면의 시계열 조사강도뿐 아니라 양면형 조사강도 이득을 보여주는 손실 다이어그램이다.

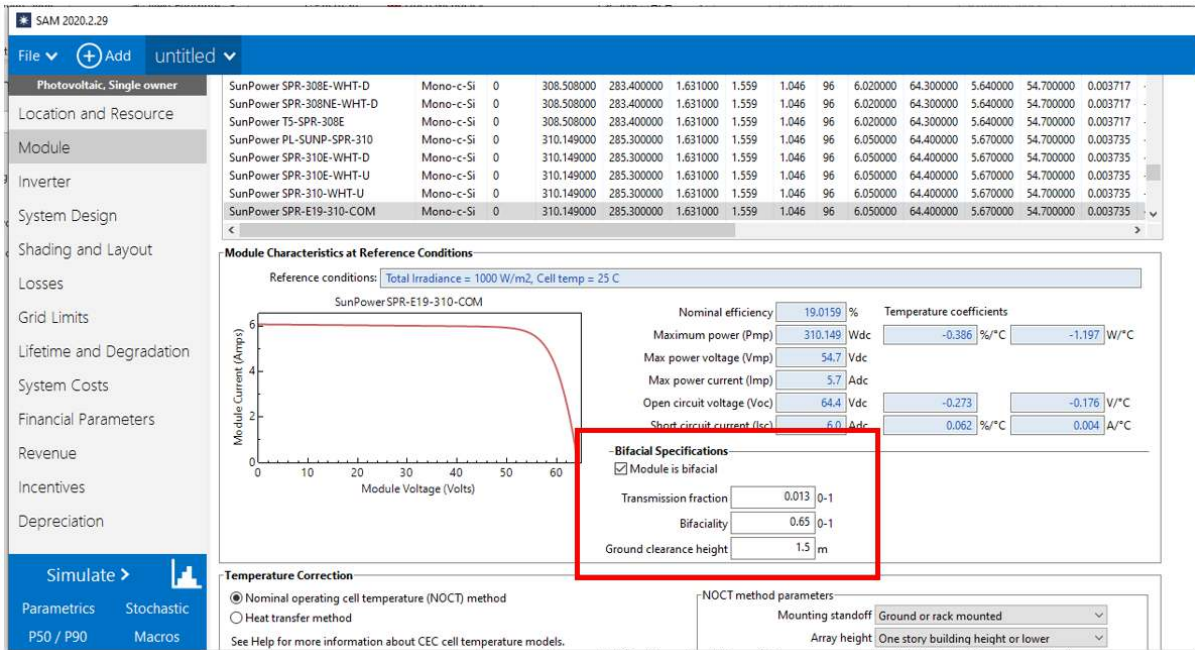


그림 52: 모듈과 시뮬레이션용의 System Advisor Model 양면형 기능성.

6.2.5 University of Stuttgart 모델

(Dimitrij Chudinzow)

양면형 플랜트의 에너지수율 시뮬레이션 모델은 Dimitrij Chudinzow 가 독일 University of Stuttgart 의 Institute of Energy Economics and Rational Energy Use 에서 박사학위 논문의 일부로 개발한 것이다. 모델은 Matlab 을 사용하여 개발하였다. 개발 프로세스는 전기적 혹은 열적 서브모델보다는 주로 광학적 서브모델에 초점을 두고 있다.

이 모델은 고정 경사와 단일-축 트래킹 양면형 플랜트의 에너지수율을 시뮬레이션할 수 있으며 다음과 같이 2 개의 트래킹 원리의 차이를 구별할 수 있다.

- 방위각(Azimuth) 트래킹: 태양의 방위각을 추종하기 위해 모듈 줄의 축은 북-남 방향을 가지고 있는데, 모듈 줄의 전면은 오전에는 동쪽 방향을 그리고 저녁에는 서쪽 방향에 이를 때까지 낮 동안 회전한다.
- 고도(Elevation) 트래킹: 모듈 줄의 축은 동-서 방향을 가지고 있고, 모듈 줄의 경사각은 태양의 고도각을 추종한다.

트래킹 계산에 사용된 알고리즘은 문헌 [120]에서 취한 것이다. 이는 원래 단면형 시스템용으로 개발된 것으로 이 모델의 전후 사정상 양면형 시스템에는 채택되지 않았다. 자기 음영을 피하기 위해 백트래킹은 고려되지 않았다. 시뮬레이션은 어떤 시간 해상도로도 계산될 수 있는데, 보통 시간별 해상도가 선택된다.

흡수된 조사량을 계산할 때, 8 개 항목의 기여도가 고려된다: DNI_{front} , DNI_{rear} , DHI_{front} , DHI_{rear} , $GRI_{DNI-front}$, $GRI_{DNI-rear}$, $GRI_{DHI-front}$ 와 $GRI_{DHI-rear}$ 인데, 여기서 GRI 는 지면 반사된 조사강도를 의미한다.



흡수된 DHI 조사량은 등방성 천공 확산 모델을 사용하여 계산된다. GRI의 기여도를 계산하기 위해 유한 지면 면적이 고려되며 그리고 각 모듈의 각 셀 스트링의 전면과 후면에 대해 3D view factors가 계산된다. 이 절차는 가장자리 효과의 고려를 가능하게 하지만 3D view factors의 계산에는 많은 수고를 필요로 한다.

“view fields”를 정의하는 것은 지면 음영이 각 줄의 에너지수율에 미치는 해로운 영향의 고려와 가장자리 효과의 계산을 가능하게 한다 (그림 53). 모델은 또한 바이패스 다이오드를 모방하여 전면 혹은 후면에 음영이 있는지 각 셀 스트링을 체크도 한다.

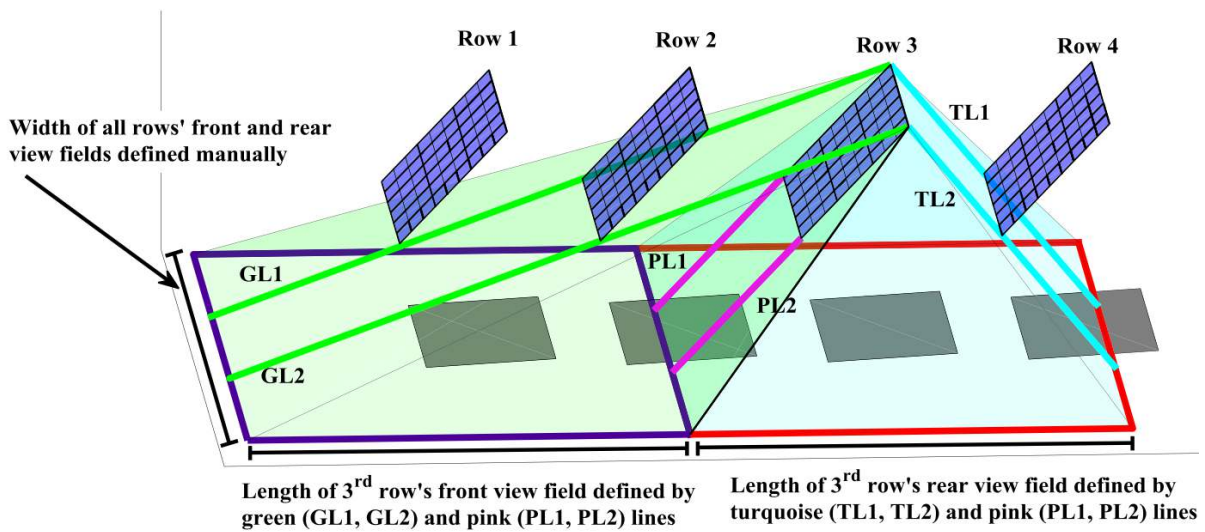


그림 53: 줄 3의 모듈 전면과 후면 view field에 대한 예제 정의. View fields는 각 모듈 줄에 대해 정의된다. 중심 가정은 모든 view field 밖에서 지면에서 반사된 조사강도는 에너지 수율에 기여하지 않는다는 것이다.

GRI 계산은 모듈이 완전히 불투명하며 그리고 지면에 투영된 그림자는 어떤 직달 조사강도도 받지 않는다고 가정한다. 또한 모듈은 투영된 지면 그림자를 부딪치는 DHI 조사량을 약화시키지 않는다고 가정한다. 줄간의 반사는 이 모델에서 무시된다.

유효 투과율-흡수율의 곱 $\tau\alpha$ 에 대해 시뮬레이션에서는 0.9의 값을 사용한다 [120]. 시뮬레이션 모델의 최신 버전은 모듈 양쪽 면의 전기적 효율을 다음과 같이 계산한다 [138].

$$\eta = \eta_{ref} \left(1 - \beta * \left(T_{amb} - T_{ref} + \left(\frac{9.5}{5.7 + 3.8 * v_{wind}} \right) (T_{NOCT} - T_{amb}) \frac{I}{I_{NOCT}} \right) \right) \quad (33)$$

그림 54는 칠레 Felipe 위치에 대한 시뮬레이션 모델의 예제적 결과이다[139].

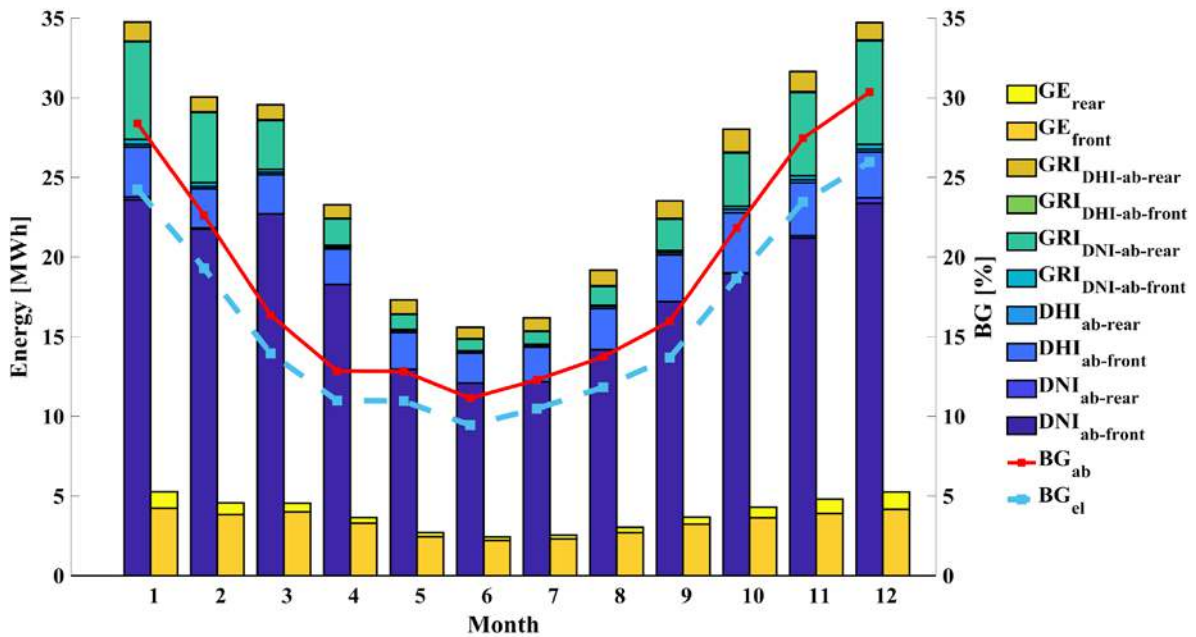


그림 54: 흡수된 조사량(BG_{ab})의 세부 명세, 생산된 전기량 (GE), 흡수된 조사량 (BG_{ab}) 대비 양면형 이득과 생산된 전기량 (BG_{el}) 대비 양면형 이득. 칠레 San Felipe 사이트.

소개된 시뮬레이션 모델을 토대로 양면형 수직 플랜트의 기술경제적 분석을 하고 그 결과를 공개하였다 [140]. 고정 경사와 단일-축 트래킹 시스템의 에너지수율에 미치는 필드 설계와 위치의 영향도 조사하였다 [141].

6.2.6 PVsyst 모델

(Jill Tymchak, Joan Haysom)

PVsyst 은 완전한 태양광시스템의 연구, 사이징 및 데이터분석용의 소프트웨어 패키지이다 [111]. 이는 모듈에 도달하는 유효 태양광의 비율을 계산하기 위해 view factors (혹은 “form factor”),(그림 55 참조)의 사용과 함께 양면형 시스템을 모델링한다 [142], [143]

이를 위해 PVsyst 은 양면형 시스템 계산용의 2 가지 다른 모드를 제시한다.

- 2-차원 계산과 함께 단순한 “unlimited sheds”. 이 역시 다양한 조사강도 기여도의 이해를 높일 수 있는 일련의 교수법적인 도구를 제공한다.
- 여러 가지 트래커의 위치에 대한 완전한 사전 계산을 포함하는 2-차원 계산과 함께 단순한 “unlimited trackers” (수평 축)

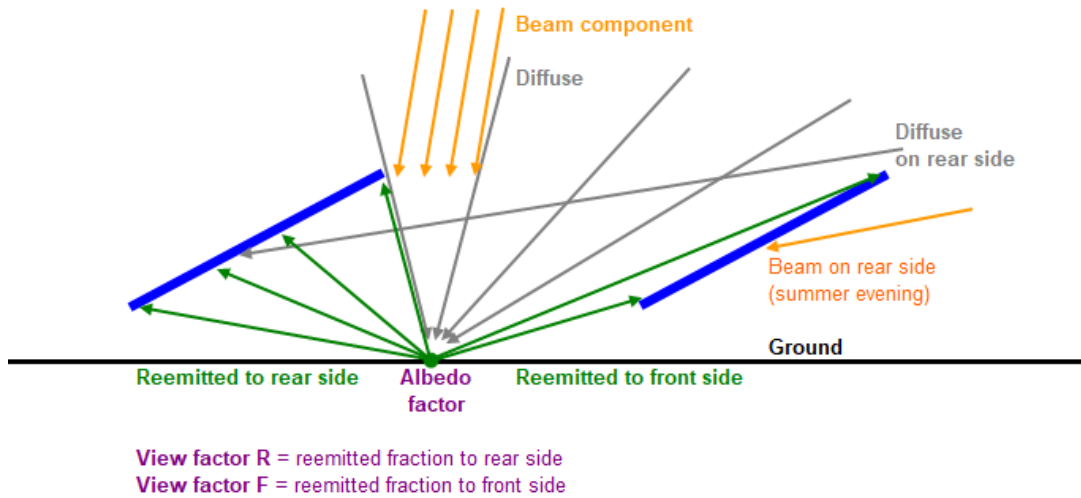


그림 55: PVsyst 에서의 view factors.

PVsyst 에서의 양면형 모델은 다음 3 개의 가정을 토대로 한다.

- 확산 조사강도는 등방성이다.
- 각 지면 포인트의 재방사(re-emission)는 등방성이며 명시된 알베도 인자를 가진다.
- one-diode 모델 적용의 경우, 후면의 추가 조사강도는 전면 조사강도에 추가된다.

후면의 조사강도는 모듈의 글로벌 출력 산출량의 증가시킨다. 시뮬레이션 동안, one-diode 모델을 사용한 출력의 컴퓨팅 전에 PVsyst 는 단순히 후면 조사강도(양면형 계수에 의해 가중된)를 전면 입사 조사강도에 추가한다.

PVsyst 는 모듈 후면의 불균일성과 이것이 전체 스트링의 전류에 미치는 영향을 반영하기 위해 불일치 손실 인자를 고려한다. 이런 불일치 손실 인자를 추정할 수 있는 모델이 없으므로, 이 인자는 기본적으로 10%로 설정하며 사용자에게 의해 변경될 수 있다. 불일치 손실은 후면 조사강도에만 적용된다.

6.2.7 IMEC 에너지수율 시뮬레이션 프레임워크 모델

(Santhosh Ramesh, Imre T. Horvath)

IMEC 에너지수율 시뮬레이션 프레임워크(Imec Energy Yield simulation Framework) 모델은 벨기에 소재 Interuniversity Microelectronics Center (Imec) 에 의해 개발것으로 완전히 내부 사용 목적의 에너지수율 모델링 소프트웨어이다. 프레임워크는 상향식, 물리학 기반 철학을 토대로 개발되었으며 그 구조는 그림 56 과 같다. 보다 상세한 내용은 문헌 [144], [145]에서 가용하다.

입력

모델의 주요 입력 파라미터는 첫 번째 블록에 정의되어 있다. 우선 기후 데이터베이스가 로딩되고(즉, 시계열 글로벌 수평면, 직달 법선, 확산 수평면 조사강도, 주위온도, 풍속과 방향) 확인이 이루어진다. 모듈 레이업은 그 광학적 특성과 열적 거동을 정의하기 위해 서로 다른 층의 소재 특성을 설정함으로써 기술된다. 그 다음, 그림 56 에 있는 CAD 3D 모델을 이용하여 태양광 플랜트의 기하적 구조와 전기적 레이아웃이 정의된다.

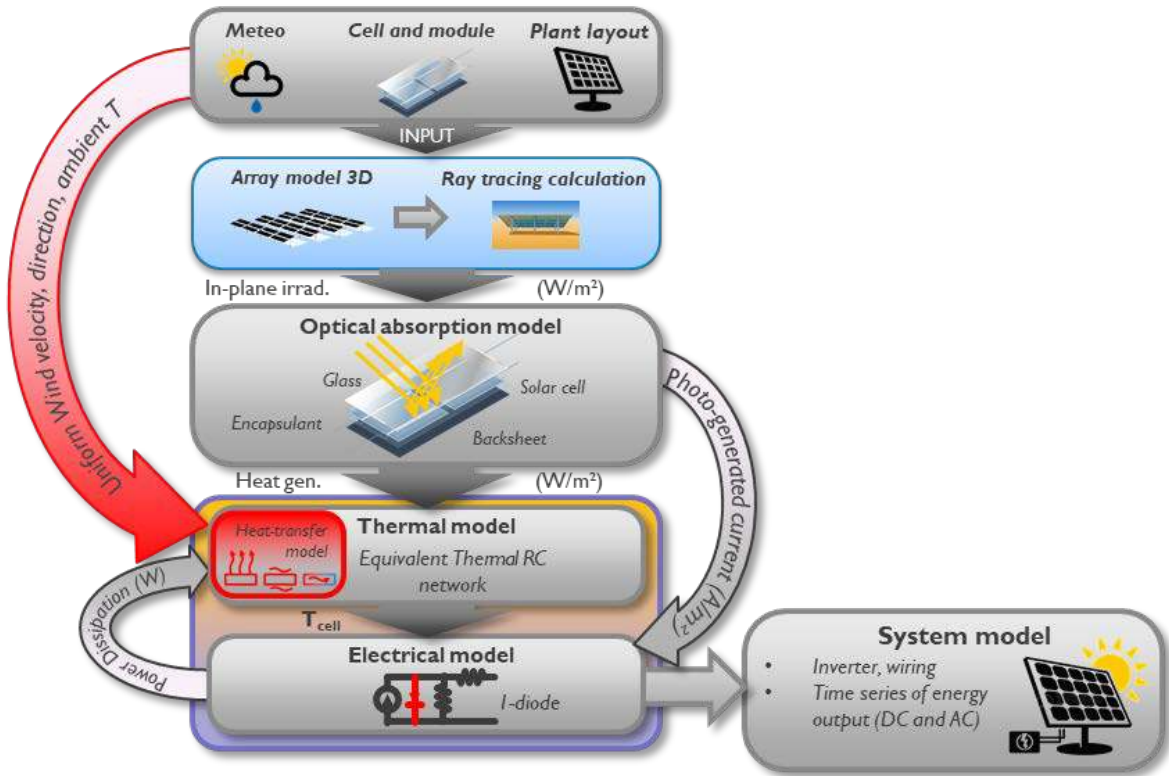


그림 56: Itec 에너지수출 모델링 프레임워크의 구조.

면내 조사강도 계산

현재의 프레임워크는 단면형, 양면형과 HAST 면내 조사강도를 컴퓨팅하기 위해 광선추적 기반 일광 시뮬레이션 테크닉을 사용한다. 이 테크닉은 일광 계수법(Daylight Coefficient Method: DCM)이라고 부른다 [146]. DCM 은 전통적인 광선추적 계산법의 상세 수준과 정확성에 접근하면서도 시간을 크게 줄여준다.

우선 시뮬레이션의 고정 파트를 정의하는데, 현장 상황에서 광원으로 작용하는 모델 기하학적 구조와 스카이 돔이 그 대상이다. 스카이 돔은 유한한 사이즈의 개별 스카이 패치들의 집합으로 정의되는데, 시간에 따라 변하는 직달과 확산 조사강도는 로딩된 기후 데이터와 전 기후 스카이 모델을 토대로 할당할 수 있다 [147]. 어떤 시간 스텝에서든 재사용될 수 있는 또 다른 파라미터는 어떤 스카이 패치의 빛과 모델에서 어떤 포인트에 의해 받아들여진 빛의 양 사이의 변하지 않는 관계이다. 즉, 고유한 선형 연산자를 매트릭스 형식으로 정의할 수 있으며, 이 연산자는 스카이 패치 빛을 모델에 정의된 특정 센서 포인트의 조사강도에 관련시킨다. 이 선형 연산자를 일광계수라고 한다.

시계열 전면과 후면 면내 조사강도 I_p 는 3D 모델 표면에 있는 센서 포인트(p) 의 어떤 개수에서도 계산될 수 있는데, 그 계산은 방정식 (34)와 같이 일광계수 매트릭스 D 와 시계열 스카이 패치 빛을 기술하는 스카이 매트릭스 S 사이의 매트릭스 곱셈에 의한다.

$$I_p = D \cdot S \tag{34}$$

프레임워크는 오픈 소스 Radiance [123]와 GPU 가속 컴퓨팅을 가능하게 하는 Accelerad [148] 패키지 기능을 사용하여 DCM 을 실행한다.

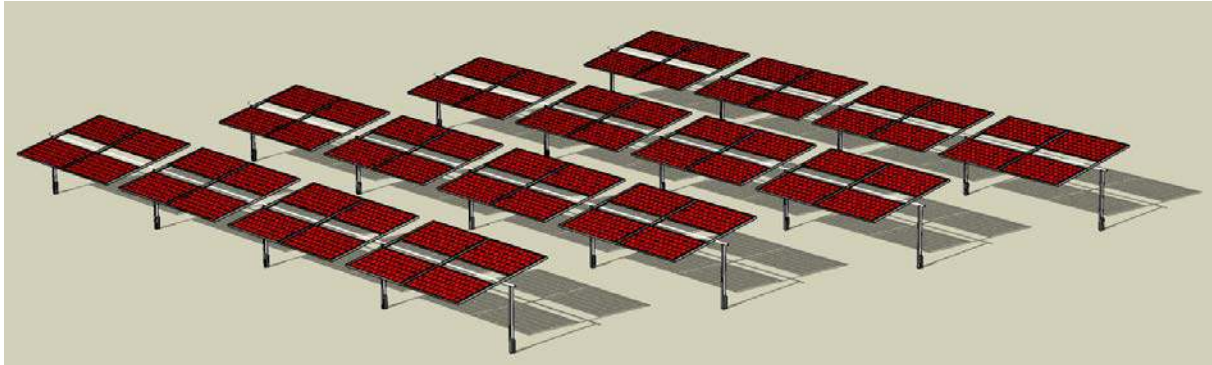


그림 57: Imec 에너지수율 모델링 프레임워크 내에서 양면형 에너지수율 시뮬레이션에 사용되는 태양광 어레이 3D 모델의 사례.

이 3D CAD-기반 DCM 계산 방법은 셀, 모듈 혹은 스트링 수준에서 음영(태양광 모듈 줄 혹은 어떤 다른 구조물), 정반사성 반사, 지면 반사, 입사각 효과 유무, 장착 구조와 모듈 프레임을 고려한 시간 분해(1 초에서 1 년까지) 전면과 후면 조사강도 계산 수행을 가능하게 한다.

면내 조사강도는 그림 58 에 나타낸 바와 같이 태양광시스템의 전기적 레이아웃에 존재하는 모든 태양광 구성요소에 대해 계산된다.

열적-전기적 계산

모델링한 태양광시스템의 열적-전기적 거동은 다음에 계산된다. 각 태양광 요소(셀, 모듈, 스트링 혹은 어떤 다른 스케일)는 2 개의 결합된 전기적 등가회로를 사용하여 별도로 모델링하는데, 하나는 1-diode 태양광 회로 모델을 사용하여 전기적 상태를 컴퓨팅하는 것이고, 다른 하나는 저항-용량성 회로의 방법으로 태양광 요소의 열적 상태를 계산하는 것인데, 후자는 열 생산(기상 입력자료와 전기적 작동 포인트의 함수로), 열전도, 대류 및 복사를 모델링한다. 결합된 회로는 태양광 요소의 IV 곡선을 만들어내는데, 이는 이후 각 인버터 MPPT 채널 입력의 IV 곡선을 생산하기 위해 IV 곡선 중첩의 방법을 사용하여 결합된다. 이 접근방법을 추종하여 태양광시스템 전기적 상태는 최대 1 초의 시간 분해능을 가지며 셀, 모듈, 스트링 혹은 어떤 다른 선택된 수준에 대해서도 해결이 된다.

불균일한 조사강도에 의해 야기된 불일치는 조사강도, 온도와 불일치한 태양광 구성요소들의 전기적 상호작용을 고려하여 컴퓨팅된다.

추가 정보

프레임워크는 제공된 타임스탬프에서 TMY3 데이터에 대한 태양의 위치를 계산한다. 그리고 일정한 지면 반사도 값을 토대로 각 시뮬레이션된 타임 스텝에 대해 알베도 값을 컴퓨팅한다. 고정 경사와 단일-축 트래킹 어레이는 소프트웨어에서 모델링되는데, 그 밖에 후면 조사강도 계산 외에 후면 조사강도 불균일성도 제공하고, 랙킹과 다른 물체에 의한 음영 손실을 감안하고 그리고 출력과 모듈 온도, 가장자리 효과와 전기적 불일치를 계산한다.

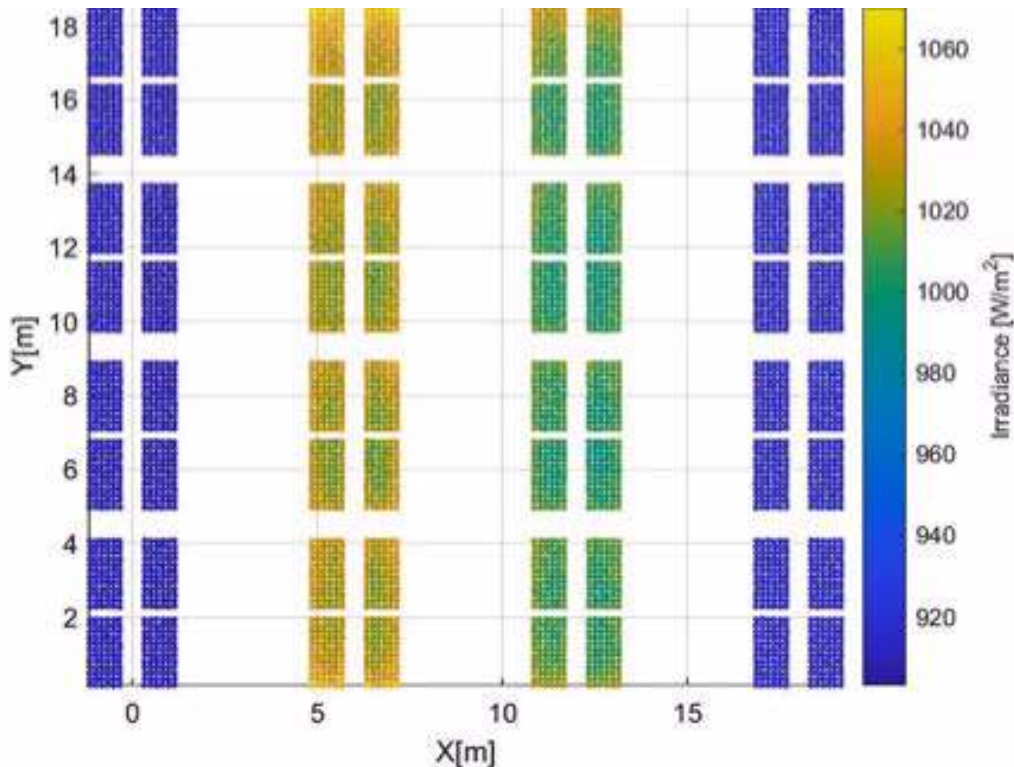


그림 58: Imec 에너지수율 모델링 프레임워크를 사용한 양면형 조사강도 계산의 결과. 플롯은 그림 57에 가시화한 정오 부근에 태양광 어레이의 양면 유효 조사강도의 태양전지-분해(solar cell-resolved) 불균일도를 보여준다. 첫 번째와 마지막 줄은 후면이 커버가 된 양면형 모듈로 구성되며 2개의 중앙 줄은 서로 다른 양면형 계수를 가진 양면형 모듈을 포함하고 있다.

6.2.8 SUNLAB DUET 모델

(Annie C. J. Russell, Christopher E. Valdivia, Joan Haysom, Karin Hinzler)

캐나다 University of Ottawa's SUNLAB에서 개발된 DUET는 고정 경사와 단일-축 트래킹 단면형과 양면형시스템의 상세한 성능과 에너지수율을 계산하기 위해 랙 음영을 가진 섹션별 view factor를 포함하는 플렉시블 3D 시뮬레이션 소프트웨어이다 [149]–[153]. 엄밀한 광학 및 전기적 시뮬레이션과 함께 파라미터화된 셀, 모듈, 스트링과 어레이 설계를 분석할 수 있는데, 시스템 설계 인자 혹은 환경 조건의 영향을 분석할 수 있도록 풍부한 산출물을 제공한다. 신속한 view factor 모델과 긴 시간이 필요한 광선추적 모델 사이에 위치하는 DUET는 각 용도에 최적이 되게 고객의 요구에 따른 시뮬레이션 파라미터 설정을 통해 상세한 성능과 컴퓨팅 효율 간의 균형을 잡아준다.

DUET에서 지면과 패널 표면은 패치로 나눈다. 각 지면 패치에 입사되는 직달과 분산 조사강도는 합계가 된다. 지면 패치(알베도에 의해 조정)로부터의 반사된 빛의 강도는 모든 방향에서 동일하다(램버시안). 지면과 패널 패치의 모든 페어들 사이의 광선들은 음영 요소와의 교차(이 때 조사강도는 낮아지거나 소멸된다) 여부를 체크하게 된다. 패널 패치에 도달하는 조사강도는 패치들 사이의 입체각에 의해 조정된다. 패널 양면의 표면에 입사되는 지면 반사된 스카이 돔과 직달광은 전면과 후면 모두 입사각 수정기(incidence angle modifiers: IAM)로 곱해진다. 입사각은 투과와 흡수하는 패치의 상대적인 위치를 토대로 한다. 랙킹 혹은 여타 패널로부터의 이차적인 반사는 고려되지 않는다.



DUET 는 입력 조사강도 데이터는 매시간의 끝(hour-ending)에 그리고 태양 위치의 계산은 매 시간의 중간(예, 오전 11 시 데이터 포인트, 태양 위치 계산은 10:30)에 하는 것으로 가정한다. 그러나 DUET 는 시간 기반 타임 스텝을 필요로 하지는 않는다. 일반적으로 소프트웨어는 기간의 끝(period-ending) 데이터를 가정하며 태양 위치는 타임스텝 사이의 중간에 하는데, 여기서 기간은 어떤 타임 스텝이라도 무방하다. 소프트웨어는 전면과 후면에 서로 다른 것이 적용되든 어떤 IAM 방정식이라도 고려할 수 있다. 그러나 이 보고서에서 제공된 시뮬레이션의 경우, 전면과 후면의 IAM 은 ASHRAE IAM 모델을 토대로 한다.

DUET 에서는 수직 기둥, 토크 튜브와 면내 랙킹 부품(프레임, 지지대)을 포함하여 많은 수의 음영 요소들을 고려할 수 있다. 음영 요소들은 면, 실린더와 사각형 프리즘으로 시뮬레이션할 수 있다. 2-차원의 전면과 후면 조사강도 프로파일은 셀 수준에서 가용하다. 게다가 조사강도 프로파일은 각 셀에 적용된 패치에 따라 임의의 분해능을 가진 그리드로 출력할 수 있다.

전류-전압 곡선을 계산하기 위해 단일-다이오드 모델이 모듈 내의 각 셀에 적용되었다. 셀 전류-전압 곡선은 셀 온도(주위온도와 셀 조사강도에 의해 주어짐)에 의존한다. 이들 곡선들은 패널 내 셀 배선 구성에 따라 합산되며(직렬/병렬 상호 연결 조합 가능) 바이패스 다이오드가 포함된다. 그 다음에 최대 출력포인트가 추출된다. IV 곡선은 각 타임 스텝에서 산출할 수 있고 모듈 스트링/어레이의 성능은 모듈 IV 곡선과 동일한 형태로 계산할 수 있다.

DUET 는 어레이의 모든 위치에서 모듈의 성능을 모델링하여 음영 또는 가장자리 효과를 포착할 수 있다. 동일한 기간 동안 여러 모듈 위치를 모델링할 수 있으며 IV 곡선은 스트링 및 어레이 수준으로 합산된다. 전체 모듈과 스트링의 IV 곡선을 구성할 때 전기적 불일치가 자동으로 계산된다. 모듈, 스트링 및 어레이 수준에서 전기적 불일치 인자를 계산하고 출력할 수 있다.

6.2.9 DNV GL SolarFarmer

(Anja Neubert, Mark Mikofski)

DNV GL 은 3D 헤미큐브(hemicube) 모델과 2D view factor 를 결합한 소프트웨어를 가지고 있다 [154]. Albedo 값은 매월 또는 매년마다 할당된다. 스카이 모델은 GHI 와 DHI 를 입력자료로 하는 Hay 또는 Perez 일 수 있다. 태양 위치는 TMY3 데이터를 처리하기 위한 시간 간격의 중간점에서 계산된다.

소프트웨어는 스펙트럼 의존적인 알베도를 고려하지 않으며, 모듈의 어느 쪽에서도 각도 의존적인 반사율을 고려하지 않는다. 그리고 IAM 후면 반사도 역시 고려되지 않으며 후면 조사강도 불균일성을 계산하지 않는다. 스펙트럼 보정 후면 조사강도를 계산할 수 있으며 양면형 시뮬레이션에서 랙으로부터의 음영 손실을 감안한다.

소프트웨어는 고정 및 단일-축 추적 시스템에 대한 조사강도를 계산할 수 있다. 모듈 온도를 고려하여 출력을 계산하고 전기적 불일치를 감안한다. 3D 음영 모델(양면형 시뮬레이션에는 사용할 수 없음)도 가장자리 효과를 계산할 수 있다.

6.2.10 TUAS PVPM 모델

(Samuli Ranta and Hugo Huerta)

그래픽 사용자 인터페이스를 갖춘 핀란드 Turku University of Applied Sciences(TUAS) PVPM 오픈 소스 시뮬레이션 도구는 양면형 시스템의 성능을 예측하기 위해 개발되었다. Matlab PV_LIB 틀



박스과 Sandia 의 PV Array 성능 모델을 사용하여 어레이 양면에 대해 수행한 조사강도 변환 계산을 기반으로 단순화된 모델을 개발했으며, 추가로 Python pvfactors 패키지가 인터페이스에 통합되어 입사 조사강도를 추정할 수 있는 2 번째 방법이 가능토록 되어 있다. 사용자 인터페이스를 통해 TU-AS-PVPM 은 태양광시스템의 성능을 모델링하기 위해 Matlab 과 Python PV 라이브러리를 결합하고 두 라이브러리 간에 쉽게 작업이 이루어질 수 있게 한다. 양면형 조사강도 계산에는 어레이의 2D 기하학 표현에 view factor 분석 솔루션을 적용한다 [155]. 모듈의 줄은 무한히 긴 것으로 간주된다(가장자리 효과는 무시할 수 있다고 가정). 스카이 모델은 GHI, DHI 및 DNI 를 입력으로 하는 Perez 또는 등방성이며 태양 위치는 TMY3 데이터에 대해 적용된 타임스탬프에서 계산된다. 추가 라이브러리는 EnergyPlus Weather 파일(EPW) 및 Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) 형식을 직접 사용할 수 있다. 출력 계산은 후면 반사 혹은 스펙트럼 보정에 IAM 을 고려하지 않는다. TUAS PVPM 은 전기적 불일치를 감안하지 않는다.

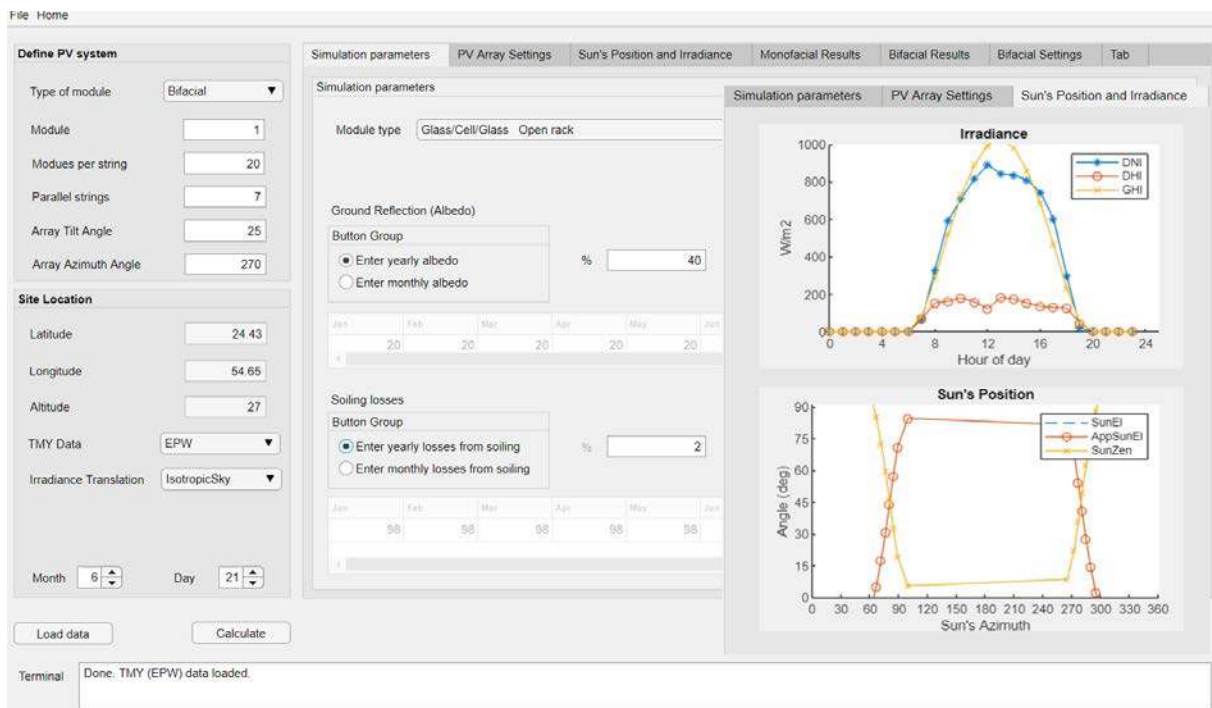


그림 59: TUAS 양면형 성능 모델링 소프트웨어의 스크린샷.

6.2.11 MoBiDiG 하이브리드 모델

(Djaber Berrian)

MoBiDiG 하이브리드는 독일의 International Solar Energy Research Center (ISC) Konstanz 가 개발한 유료 소프트웨어로 view factor 와 광선추적 기능을 결합한 것이다 [156]. 시스템 크기에 따라 사용자는 2D view factor 와 3D 광선추적 광학적 모델 중 하나를 선택할 수 있다. 시뮬레이션을 위해 MoBiDiG 는 1990 계수를 가진 Perezky 모델 [130]과 GHI, DHI, DNI 를 입력으로 사용한다. TMY3 데이터의 경우 태양 위치는 타임스탬프 30 분 전에 델타에서 계산된다. 시간별 알베도는 태양광시스템 아래 전체 지면에서 균일하다고 가정한다. 그 반사는 램버시안이라고 가정한다. 후면 반사에서 IAM 뿐 아니라 알베도의 정반사성 반사도 고려된다. 후면 조사강도 불균일성은 소프트웨어에서 내재적으로 계산된다. 단일-축 트래킹 시스템도 모델링할 수 있지만 랙 및 기타



장애물로 인한 음영 손실은 감안하지 않는다. 소프트웨어는 모듈 온도, 전기적 불일치 및 가장자리 효과를 고려하여 출력을 계산한다.

6.2.12 Trifactors

(Haffner Florent and Hervé Colin)

Trifactors 는 프랑스 “Alternative Energies and Atomic Energy-National Solar Energy Institute (INES)” 가 개발한 유료 소프트웨어이다 [158]. Trifactors 라고 불리기 전에는 잠시 동안 VF3D 라고 언급되었다. Trifactors 는 3D VF 접근법을 사용하는데, 일단 기하학 구조가 정의되면 view factors 가 컴퓨팅되며 보충적인 VF 계산 없이 다양한 임의의 시뮬레이션에서 사용될 수 있다. 특히 다양한 시뮬레이션이 하나의 주어진 패널을 가지고 실행되면 이 소프트웨어는 컴퓨팅 시간 절감 차원에서 이전의 결과들을 재사용한다.

Trifactors 는 시뮬레이션된 각 데이터 포인트에 대해 즉시 등방성 확산 알베도를 고려한다. 스카이 모델은 Perez 로 GHI, DHI, DNI 를 입력으로 한다. TMY3 데이터의 경우 타임스탬프 후 30 분의 델타로 시간은 계산된다. 소프트웨어에서는 ASHRAE 모델을 사용한 후면 반사에 대해 IAM 을 고려하며, 추가 정보가 없을 경우 $b = 0.05$ 이고 사용 가능한 경우 측정값을 고려한다. 현재 정반사성 반사는 소프트웨어에 의해 처리되지 않고 소프트웨어의 로드맵에 목록화되어 있다. 후면 조사강도 불균일성은 제한되지 않은 메쉬 구성요소의 크기를 기준으로 계산된다. 유일하게 고려되는 음영 손실은 줄간 음영이다. 또한 단일-축 트래킹도 계산한다.

Trifactors 에서 양면형 IV 곡선은 각 메쉬 구성요소에 대해 계산되므로 전기 생산에 대한 전면과 후면의 기여를 구분하지 않는다. 시뮬레이션 중에 IV 곡선 데이터베이스가 구축된다는 점을 감안할 때 동일한 모듈에서 더 많은 시뮬레이션을 실행할수록 결과가 더 빨라진다. 전면에 의한 전기생산만 얻기 위해서는 모듈이 단면형이라는 가정하에 시뮬레이션을 다시 실행해야 한다. 모듈 온도의 현장 측정이 없을 경우 출력은 공칭 작동 셀 온도(NOCT) 모델을 사용하여 계산한다. 이 소프트웨어는 전기적 불일치와 가장자리 효과를 반영한다.

6.2.13 pvfactors

(Marc Abou Anoma)

pvfactors 는 태양광어레이의 표면에 입사되는 조사강도 계산 [155]에 사용되는 python 오픈 소스 모델이다 [159]. 이 모델은 평형 상태에 있는 모든 표면 사이의 반사를 동시에 감안하기 위해 2D 기하학과 view factors 를 수학적으로 결합시킨 일련의 시스템 방정식 사용을 토대로 한다. pvfactors 는 원래 SunPower 사가 개발한 'vf_model' 패키지에서 포팅한 것이었다 [155].

이 모델은 각 데이터 포인트의 알베도를 분광 의존성이 없는 전체 지면에 대해 하나의 반사성의 균일한 값으로 고려한다. 소프트웨어는 모든 표면으로부터의 확산 반사를 가정하는데, 각도 의존 반사도와 정반사성 반사는 없다. 스카이 모델은 DNI 와 DHI 를 입력으로 하는 pvlib 에서의 Perez 모델 실행을 다룬다. GHI 는 선택적으로도 제공될 수 있다. pvfactors 는 후면 반사에 대해 각도 의존 반사 손실을 고려하며 분광 조사강도에 대한 보정은 하지 않는다.

이 소프트웨어는 모델링한 2D 표면의 단순함 때문에 직달과 줄간의 확산 음영만 고려하고 랙킹과 여타 방해물로부터의 음영 손실은 고려하지 않는다. 이는 모듈에서 후면 조사강도 불균일도를 계산할



수 있다. 이 소프트웨어는 무한정으로 긴 모듈 줄(2D 기하학 때문)을 가정하며 가장자리 효과는 감안하지 않는다. 이는 단일-축 트래킹 시스템을 모델링 할 수 있다.

6.3 모델링 결과 비교

(Silvana Ayala Pelaez and Joshua S. Stein)

섹션 6.1 에서 설명한 바와 같이, 네 가지 주요 모델링 시나리오가 정의되는데, 남향 고정 경사(S1), 서향 고정 경사(S2), 동-서향 수직(S3), 수평 단일-축 트래킹(S4) 이다. 또한 NREL 의 양면형 단일-축 트래커 필드에서 측정된 실제 데이터를 기반으로 하는 선택적 시뮬레이션이 있었다.

누적 연간 조사강도의 경우 그림 60 에서 볼 수 있듯이 결과에 상당한 변동이 있다. 그러나 모델 간의 상대적 차이는 시나리오마다 일관성이 있다(즉, 만약 하나의 모델이 높은 후면 조사강도를 가지면 모든 시나리오에 대해 그러하다.).

이 연습에서는 각 모델러(modeler)가 사용하는 추적 알고리즘에 대한 정보가 수집되지는 않았는데, 이는 서로 다르고 결과에 영향을 미친다. 또 다른 중요한 요인은 각 시간 단계에서 서로 다른 모형이 어떻게 태양 위치를 나타내는가 하는 방법이다. 표 17 에 나타낸 바와 같이, 시간 단계의 해석 방식 차이는 최대 15 도의 태양 위치 편차를 초래할 수 있다. 시뮬레이션 3 (E-W 수직 양면형 시스템)에서 어레이 동쪽("전면")의 연간 누적 조사강도는 그림 61 에 표시되어 있다. 다른 시나리오와 마찬가지로 모델 간의 상대적 차이는 서로 다른 기후에 대해서 일관성이 있다.

S1-S4 에 대해 선택한 대표적인 결과가 그림 62 인데, 최대 13 개의 양면형 모델링 도구가 실행되었다. 전면 조사강도 결과는 그림 62(a), 춘분은 (b)와 같다. 그림 62 (a)에서 일부 모형이 값을 계산하기 위해 서로 다른 태양 위치를 고려하고 있음을 알 수 있는데, 이 값은 모형이 얼마나 잘 맞는 지 확인하기 위해 (b) 데이터를 이동시켜 보정한다. 제공된 결과를 -1 시간, -30 분, +30 분 이동함으로써 대부분의 결과를 모델 대부분의 전면 조사강도에 대해 $\pm 30 \text{ W/m}^2$ 까지 정렬할 수 있다. 후면 조사강도 결과는 그림 62(c), (d) 및 (e)에 나와 있다. 시뮬레이션 간의 일치하는 모델링 일자와 시나리오에 따라 달라진다. 그림 62(d)의 단일-축 트래킹 시스템은 후면 조사강도에서 더 뾰뾰한 분포를 보여주며 시뮬레이션 S2(e)의 서향 모듈도 마찬가지이다.

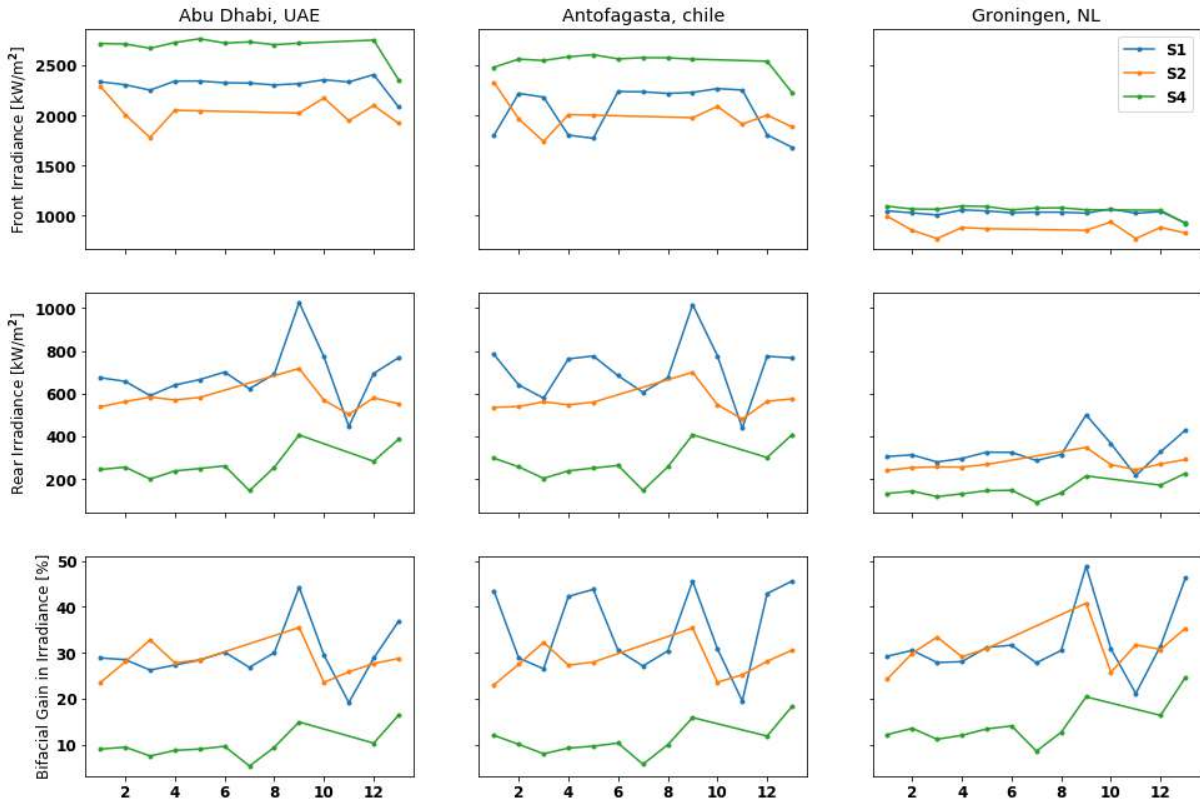


그림 60: 기후가 다른 세 도시에 대한 전면 조사강도, 후면 조사강도와 양면형 이득(후면/전면 조사강도)의 연간 누적 결과. 시뮬레이션 1(파란색)은 적도 방향 고정 경사, 시뮬레이션 2(주황색)는 서쪽 방향 고정 경사, 시뮬레이션 4(녹색)는 단일-축 트래킹이다. 결과는 그림 사이에 동일한 순서로 x 축에 표시되지만 익명으로 표시하기 위해 보고서에 표시되는 방식에 따라 랜덤 순서로 표시된다.

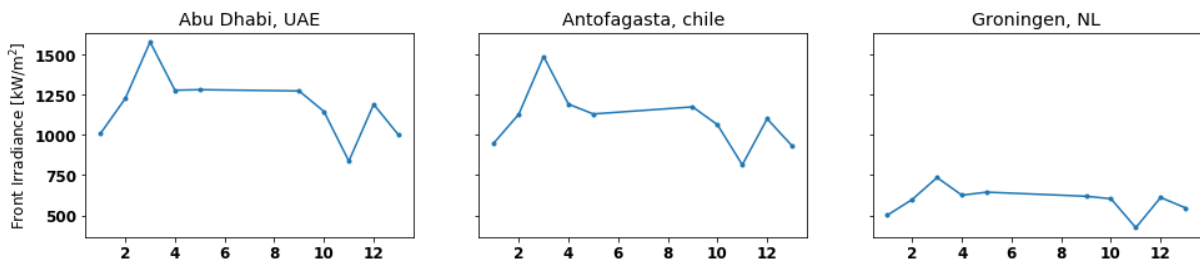


그림 61: 연간 누적 "전면" 조사강도에 대한 수직 양면형 모듈 시뮬레이션(동쪽). 결과는 그림 사이에 동일한 순서로 x 축에 표시되지만 익명으로 표시하기 위해 보고서에 표시되는 방식에 따라 랜덤 순서로 표시된다.

대부분의 소프트웨어 패키지가 전체 전면 및 후면 조사강도에 동의했지만, 태양 정오의 경우 일관되게 전면 조사강도를 거의 200 W/m² 나 과소 예측한 틀이 하나 있었다. 후면 조사강도 값은 다른 틀의 평균과 일치했다. 이러한 전면 조사강도의 과소 예측으로 인해 이 소프트웨어의 양면형 이득 결과는 나머지 틀의 평균보다 약 20% 이상 높아졌다. 이는 그림 62(h), (i) 및 (j)에 나와 있는데, 하지와 동지에 대한 시뮬레이션 1 과 단일-축 트래킹 예제의 양면형 이득을 보여준다. View factor 모델 중 하나는 평균 양면형 이득보다 20% 높은 것을 보여주었는데, 이 틀을 자세히 살펴보면 후면



조사강도 결과는 전체의 평균보다 일관되게 20% 높았다. 시뮬레이션 2 용 태양광 패널의 방위각 변동에 대한 동일한 톨의 반응은 다른 모델의 추세를 따르지 않았다(그림 62(e)에서 볼 수 있음).

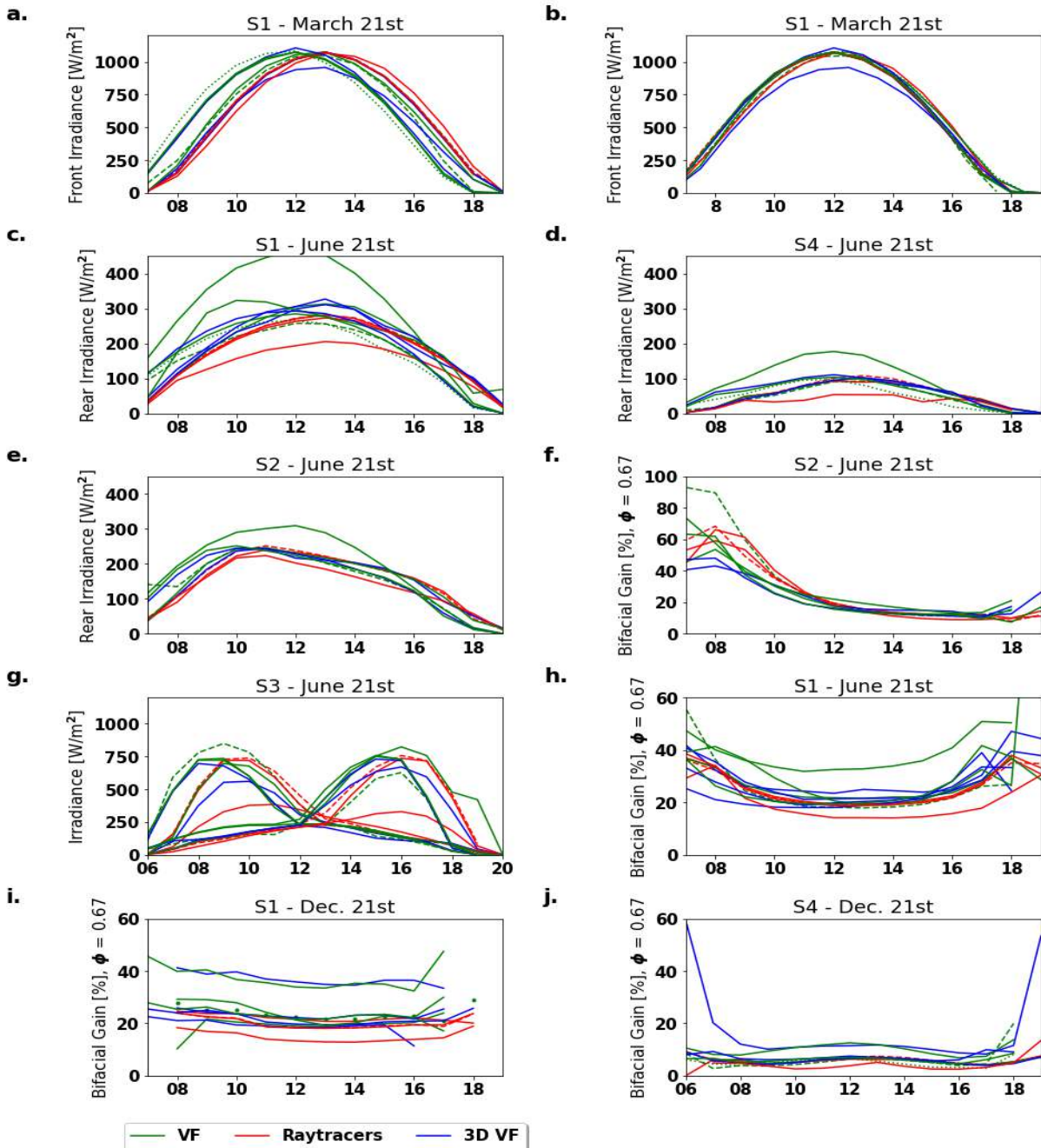


그림 62: view factor 모델(녹색), 광선추적모델(적색), 3D VF 와 기타(청색)에 의한 시간별 시뮬레이션 결과.

선택적 시뮬레이션 2 는 시뮬레이션을 비교하고 검증할 수 있는 현장 데이터를 제공하였다. 두 개의 광선추적 모델과 네 개의 view factor 모델이 이 시나리오 결과에 기여를 하였다. 그림 63(a)는 모델의 입력으로 사용되는 글로벌 수평 조사강도 데이터를 보여준다. GHI 역시 도구의 결과를 정렬하는데 사용되었다. 2 일간의 맑은 날과 간헐적 구름을 동반한 4 일을 모델링하였는데, 전면 조사강도에 대한



전반적인 일치도가 좋았다(그림 63(b)). 그림 63(c)와 (d)에서는 각각 화창한 날과 흐린 날에 대한 전면 조사강도의 클로즈업을 볼 수 있다. 둘 중 세 개는 시간당 타임 스텝의 모델링으로만 제한되었으며, 이는 제공된 15 분 필드 데이터의 단기 변동성은 무시한다. 전면 조사강도에 대한 이 모델 간의 일치도는 맑은 날 전면 조사강도에 대해 30 W/m^2 사이이다.

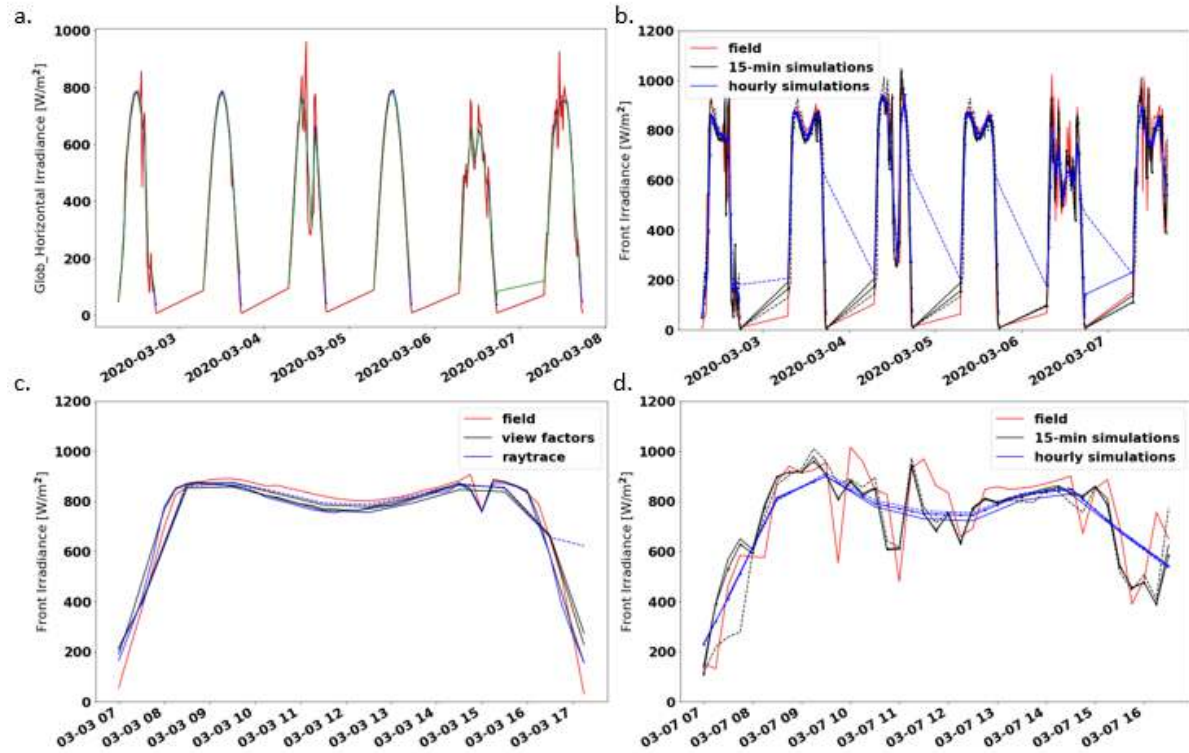


그림 63: 4 개의 view factor 와 2 개의 광선추적 모델링 틀을 포함한 선택적 시뮬레이션 2 에 대한 결과. (a) 모든 틀의 결과를 적절하게 정렬하기 위해 글로벌 수평면 데이터를 사용하였다. (b) 모델링한 주에 대한 전면 조사강도 결과. (c) 맑은 날 하루에 대한 시뮬레이션 및 현장 데이터 클로즈업 및 (d) 구름의 변동이 있는 하루에 대한 데이터이다.

그림 64(a)는 옵션 시뮬레이션 2 의 다양한 모델에 대한 후면 조사강도 결과를 보여준다. 첫날 반나절의 알베도는 매우 높아서 모델의 후면 조사강도에 대한 과소 예측이 가장 심하다. 정규화된 출력 생산량도 표시되는데, 그림 64(b)는 전면과 후면에 대해 측정된 결과와 모델링된 결과를 보여준다. 120 W/m^2 이상의 후면 조사강도에서는 그 결과가 측정된 값과 훨씬 더 심한 편차를 보여주는데, 이는 모두 3 월 2 일 오후 1 시 이전에 측정된 것이다. 표 18 은 높은 알베도 데이터(>0.5)를 제외한 해당 주 데이터의 평균 바이어스 편차(mean bias deviation: MBD), 평균 제곱근 오차(root mean square errors: RMSE) 백분율과 절대값을 보여준다.

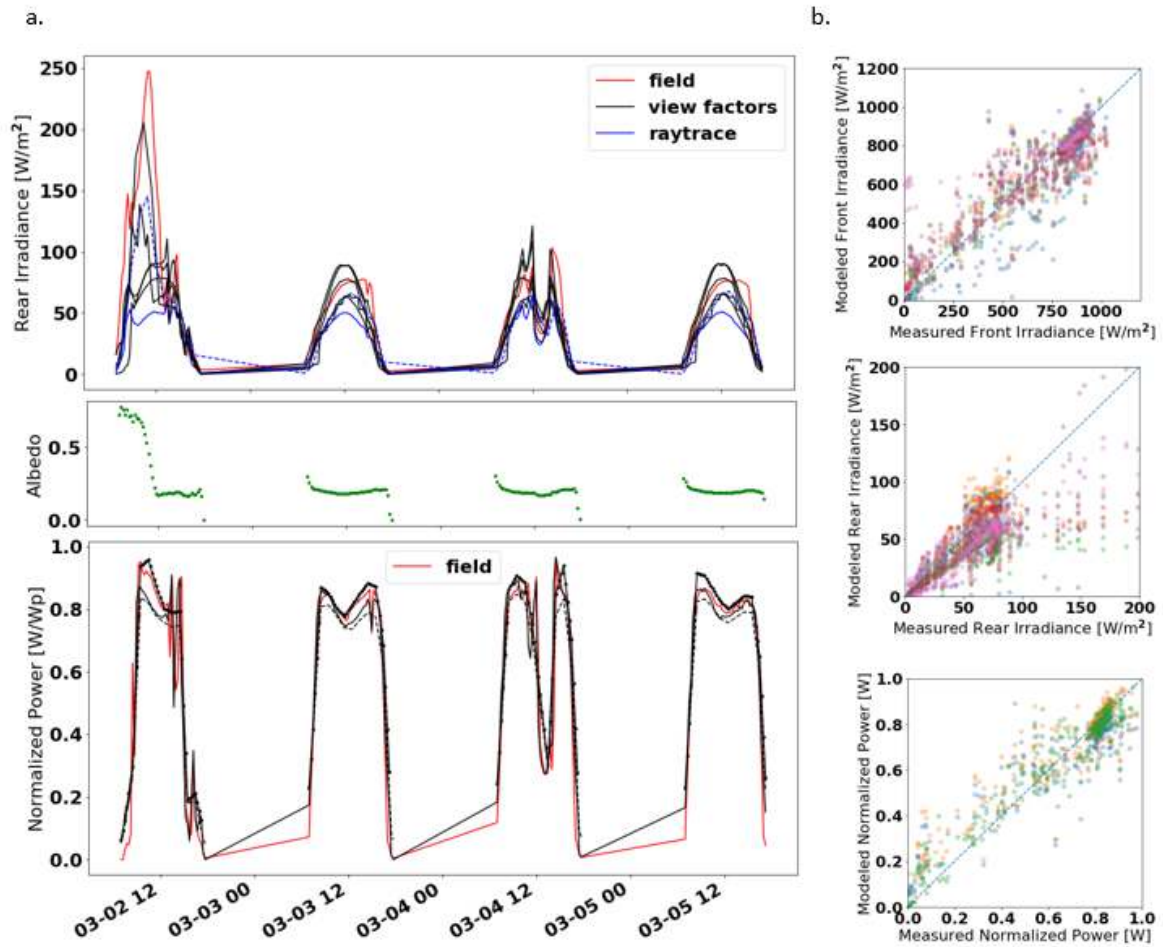


그림 64: 선택적인 시뮬레이션 3의 결과. a) 후면 조사강도와 4일 동안 정규화된 출력, 알베도는 녹색으로 표시. b) 모델링 대 측정된 전면 조사강도와 정규화된 출력.



표 18: 선택적 시뮬레이션 2 에 대한 서로 다른 틀 사이의 변동폭, 높은 알베도 데이터 (>0.5) 를 제외한 일주일 간의 데이터.

도구	전면 조사강도				후면 조사강도				정규화 출력			
	MBD (%)	RMS E (%)	MBD _abs (W/m ²)	RMS E_abs (W/m ²)	MBD (%)	RMS E (%)	MBD _abs (W/m ²)	RMS E_abs (W/m ²)	MBD (%)	RMS E (%)	MBD _abs (W/m ²)	RMS E_abs (W/m ²)
1	-0.15	15.1	-0.96	99.3	8.98	31.1	4.63	16.0				
1 (GHI)	-11.4	23.2	-75.6	153.1	5.85	26.3	3.07	13.8				
2	-1.22	14.8	-8.0	97.7	-32.6	42.4	-17.1	22.3	1.17	14.2	0.01	0.09
3	-2.73	15.5	-18.3	104.0	-4.05	24.2	-2.14	12.8	-1.92	16.4	-0.01	0.11
4	-0.13	15.7	-0.9	105.1	-25.1	34.4	-13.2	18.1	5.76	17.2	0.04	0.11
5	5.53	25.9	35.8	167.5	-19.1	32.8	-9.87	16.9				
6	-1.04	17.1	-6.9	112.7	-24.9	34.1	-13.1	18.0				
Avg	-1.59	18.2	-10.7	119.9	-13.0	32.2	-6.81	16.8	1.67	16.0	0.01	0.10
Max	5.53	25.9	35.8	167.5	8.98	42.4	4.63	22.3	5.76	17.2	0.04	0.11
Min	-11.4	14.8	-75.6	97.7	-32.6	24.2	-17.1	12.8	-1.92	14.2	-0.01	0.09
Std	4.68	4.12	30.8	26.2	15.2	5.51	7.98	2.89	3.16	1.28	0.02	0.01

- * MBD(mean bias deviation): 평균 바이어스 편차
- * RMSE(root mean square errors): 평균 제곱근 오차
- * 백분율, 절대값



7 국제적인 양면형 현장 연구

7.1 미국: Sandia National Laboratories 양면형 테스트베드

(Joshua S. Stein)

7.1.1 양면형 시험에 대한 설명

Sandia National Laboratories 는 2016 년 뉴멕시코주 Albuquerque 에 양면형 태양광 시험 어레이를 설치하기 시작하였으며 이 시스템의 성능을 지속적으로 유지하고 모니터링하고 있다. 이 테스트 필드에는 다양한 방향으로 12 개의 양면형 어레이에 대한 모듈과 스트링 수준의 시험을 하고 있다. 대부분의 어레이에서 지면은 알베도 0.2~0.25 사이의 자갈 표면으로 구성되어 있다. 몇 개의 배열은 0.55~0.6 의 알베도를 가진 하얀 바위들로 지반이 덮혀있다. 표 19 는 셀 유형과 데이터 가용 날짜와 함께 어레이를 요약한 것이다.

Sandia 의 모든 양면형 어레이에는 모듈 표면온도 측정용의 열전대 또는 RTD 뿐 아니라 전면과 후면 어레이면 조사강도를 측정하는 데 사용되는 단면형 기준 셀이 포함되어 있다. 어레이는 모두 그리드로 연결되며 각 시스템의 DC 전기적 성능은 스트링 또는 모듈 수준에서 모니터링한다. 측정은 매 초마다 이루어지며 평균 1 분 간격으로 집계된다. 비교를 위해 각 시스템에는 단면형 모듈과 스트링이 쌍을 이루고 있다. 그러나 이러한 단면형 시스템은 양면형 셀과 동일한 셀기술을 사용하지 않기 때문에 정확성을 높이기 위해서는 양면형 이득 계산에 온도와 스펙트럼 보정이 필요하다.

7.1.2 양면형 성능 결과의 개요

Prism Solar 양면형 시험 어레이

뉴멕시코(NM)주 앨버커키 소재 Sandia National Laboratorys 의 Prism Solar 양면형 테스트 어레이는 2016 년 2 월에 성능 데이터 수집을 시작하였다. 설치는 5 가지 서로 다른 어레이 방향과 2 가지 접지 커버로 구성된다. 각 어레이 방향은 동일한 수의 양면형과 단면형 모듈로 구성되며, 각 모듈은 마이크로 인버터에 의해 개별적으로 제어되고 DC 전류와 전압을 모니터링한다. 앞쪽과 뒤쪽을 향한 기준 셀은 각 어레이의 중앙에 위치한다. 데이터는 1 분 간격으로 저장된다. 그림 65 는 어레이의 사진이며, 그림 66 의 지도는 어레이에 있는 양면형 모듈과 단면형 모듈의 배치를 보여준다.



표 19: New Mexico 주 Albuquerque 에 설치된 양면형 어레이의 개요.

양면형 모듈	셀 유형	방향	알베도	양면형(단면형) 모듈의 개수	코멘트 (설치와 작동 날짜)
Prism Solar	nPERT	S-facing, 35 tilt	0.24	4 (4)	모든 모듈은 마이크로인버터 사용. Suniva 단면형 기준 모듈. (2/2016 ~ 현재)
Prism Solar	nPERT	S-facing, 15 tilt	0.55	4 (4)	모든 모듈은 마이크로인버터 사용. Suniva 단면형 기준 모듈. (2/2016 ~ 현재)
Prism Solar	nPERT	W-facing, 15 tilt	0.55	4 (4)	모든 모듈은 마이크로인버터 사용. Suniva 단면형 기준 모듈. (2/2016 ~ 현재)
Prism Solar	nPERT	W-facing, 90 tilt	0.24	2 (2)	모든 모듈은 마이크로인버터 사용. Suniva 단면형 기준 모듈. (2/2016 ~ 현재)
Prism Solar	nPERT	S-facing, 90 tilt	0.24	2 (2)	모든 모듈은 마이크로인버터 사용. Suniva 단면형 기준 모듈. (2/2016 ~ 현재)
Prism Solar	nPERT	S-facing, 45 tilt	0.24	7 (7)	SolarWorld 단면형 기준 스트링. (9/2016 ~ 5/2019)
Prism Solar	nPERT	S-facing, 25 tilt	0.24	7 (7)	SolarWorld 단면형 기준 스트링. (9/2016 ~ 5/2019)
Sunpreme	HIT	S-facing, 35 tilt	0.24	7 (7)	SolarWorld 단면형 기준 스트링. (9/2016 ~ 5/2019)
Sunpreme	HIT	S-facing, 15 tilt	0.24	7 (7)	SolarWorld 단면형 기준 스트링. (9/2016 ~ 5/2019)
Partner A	IBC	S-facing, 35 tilt	0.24	8 (8)	SunPower 단면형 기준 모듈. (7/2016 ~ 현재)
Partner B	HIT	S-facing, 35 tilt	0.24	8 (8)	Silevo 단면형 기준 모듈. (9/2016 ~ 현재)
Partner C	PERC	S-facing, 35 tilt	0.24	8 (8)	Trina 단면형 기준 모듈. (9/2016 ~ 현재)
Total				68 (68)	



그림 65: 미국 New Mexico 주 Albuquerque SNL 에 있는 Prism Solar 양면형 테스트 어레이.

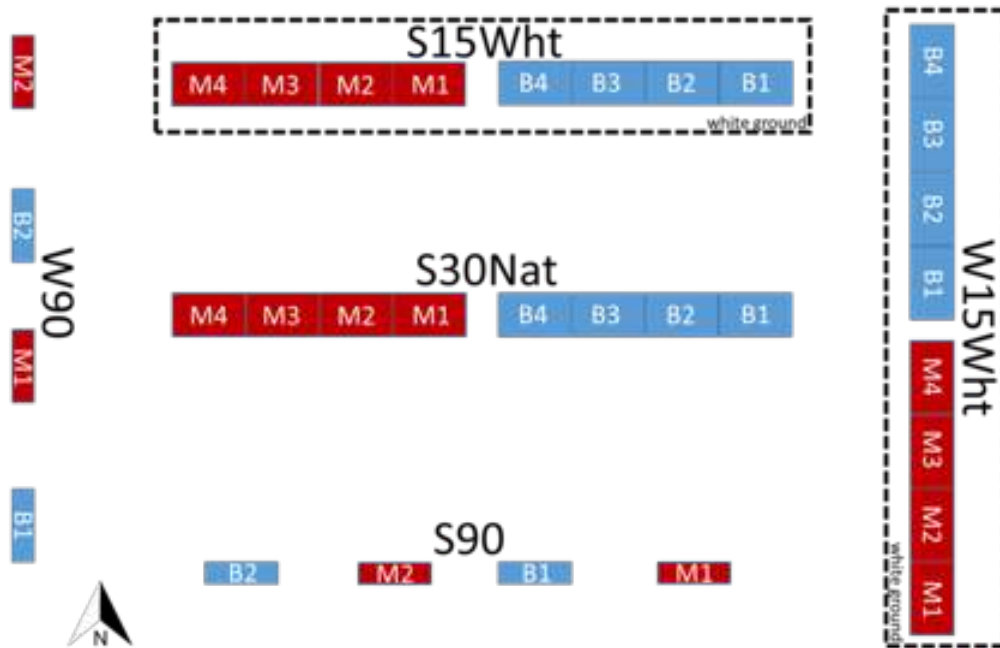


그림 66: 어레이에서 양면형과 단면형 모듈의 배치를 보여주는 지도.

운영 첫 해에 대한 성능 분석이 Sandia 보고서로 발표되었다 [83]. 이 분석에서는 다음과 같은 몇 가지 중요한 결론이 도출되었다.

- 양면형 이득은 하루 종일 변동이 있으며 어레이 방향에 따라 달라진다.
- 어레이 방향이 적도 방향에서 변경이 되어도 양면형 어레이 성능은 단면형 어레이의 성능만큼 빠르게 저하되지는 않는다. 실제로, 동-서향 수직 양면형 어레이는 위도와 동일한 경사의 단면형 모듈과 유사한 성능을 보인다.
- 흰색 자갈 위에 남향으로 15도 경사 시스템이 가장 높은 수율을 보였고, 동-서향 수직 양면형 모듈이 가장 높은 양면형 이득을 보였다.



그림 67 은 운영 첫 해에 Prism 양면형 모듈의 에너지수율과 양면형 이득을 요약한 것이다. 특히, 이러한 수율과 양면형 이득 값은 동일한 방향의 유틸리티 규모의 플랜트로부터 예상되는 값보다 높다. 양면형 모듈 성능은 어레이의 밀도와 지상의 음영에 의해 큰 영향을 받는다. 단일의 짧은 줄의 양면형 어레이는 어레이를 둘러싸고 있는 모두 열린(음영이 없는) 지면의 이점을 얻을 수 있기 때문에 많은 긴 줄의 모듈을 가진 유틸리티 규모의 플랜트에 비해 상당한 성능상의 이득을 볼 수 있다.

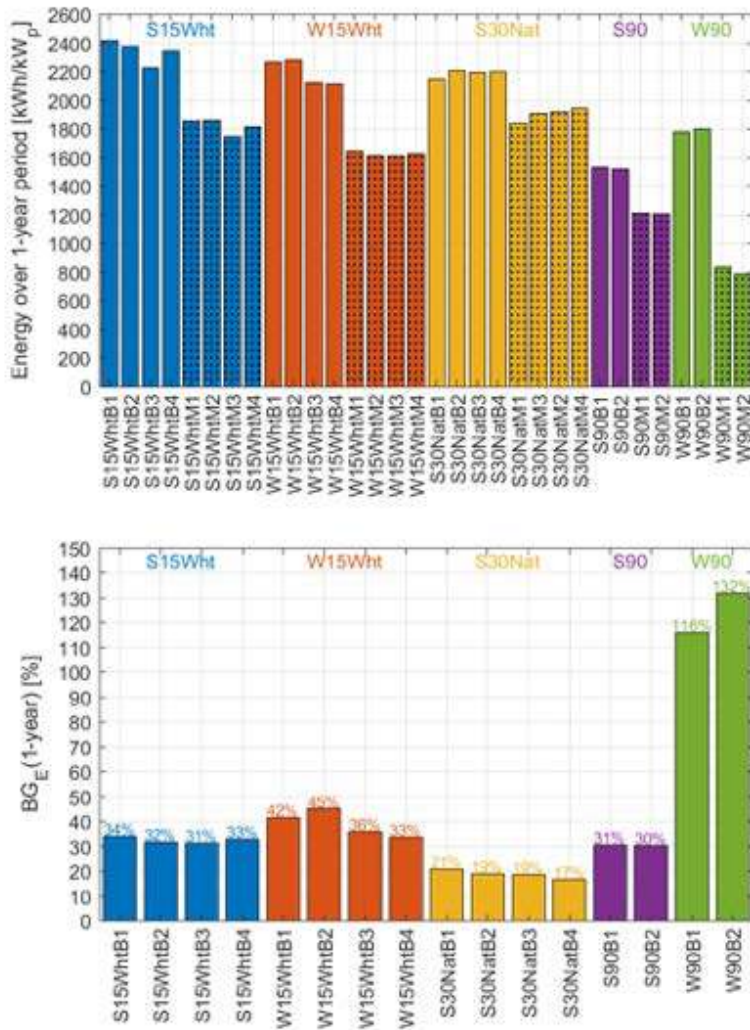


그림 67: New Mexico 주 Albuquerque SNL 에 있는 Prism Solar 양면형 테스트 어레이의 (위) 연간 에너지수율. (아래) 양면형 에너지 이득.

Partner C 양면형 시험 어레이

Partner C 의 모듈은 Sandia 에서 실시한 플래시 시험 측정 결과를 기준으로 61%의 양면형 계수(전면 대비 후면 플래시 시험의 비율)를 가진다. 그림 68 은 수년간의 현장 노출에 대해 계산된 일일 양면형 이득을 보여준다. 평균적으로 양면형 이득은 6%이지만 계절적으로 값이 달라 여름에는 높고



겨울에는 낮아진다. 확산 조사강도가 높은 날은 더 높은 양면형 이득을 가져온다. 맑은 날에는 더 낮고 더 일관된 양면형 이득이 발생한다.

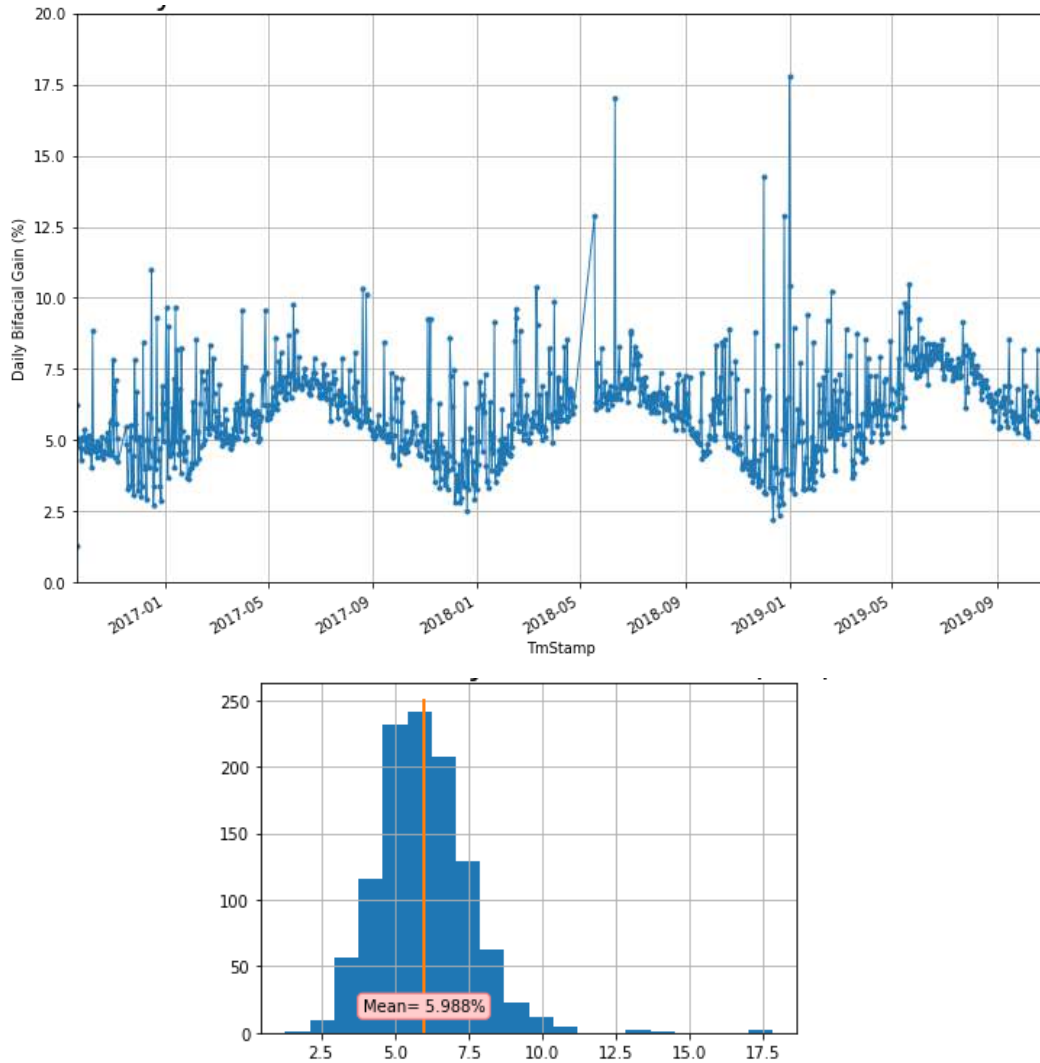


그림 68: (위) Partner C 어레이에 대해 계산된 일간 양면형 이득. (아래) 일간 양면형 이득의 히스토그램.

7.2 프랑스: INES 양면형 태양광 필드 테스트 사이트

(Hervé Colin)

7.2.1 양면형 시험에 대한 설명

양면형 태양광 필드 시험장은 프랑스 알프스 인근에 있는 Chambéry 시(45.6420°N, 5.8722°E) 국립 태양에너지연구소(National Solar Energy Institute: INES)에 있다. 표 20 은 사이트 특성을 요약한 것이다. 그림 69 와 그림 70 은 현장 사진이다.



표 20: INES 양면형 태양광 필드 테스트 사이트의 특성.

정보	값	코멘트
시스템 크기	3.04 kW _p	10 개 모듈을 직렬로 연결
시스템 유형	고정 경사	
사이트 알베도	40%	모듈 앞의 구역
장착 높이	0.8 m (설치부터 ~ 03/2019) 0.95 m (03/2019 이후)	지면 위 더 낮은 모듈 가장자리
어레이 경사각	30°	적용 가능하면
어레이 방위각	18°	S=180°; W=270°; N=0°; E=90°
지면 커버 비율	30.5%	줄 간 거리 대비 모듈 줄 폭의 비율
모듈 양면형 계수	모름	후면 출력 등급 나누기 전면 출력 등급
어레이 배열	2P	
전기적 정보	스트링 인버터	중앙 인버터, 스트링 인버터, 마이크로인버터, 모듈 옵티마이저



그림 69: INES 양면형 태양광 필드 테스트 사이트.



그림 70: INES 사이트에서 시험 중인 있는 양면형 모듈의 전면.

7.2.2 양면형 성능 결과의 개요

3 년간의 모니터링에 걸쳐 INES 양면형 시스템의 평균 양면형 이득(단면형 AI-BSF 기준 시스템과 비교)은 8.9%이다. 그림 71 과 같이 이 같은 평균 이득은 수년간 감소해 2017 년 10.8%에서 2018 년 8.0%, 2019 년 7.2%로 낮아졌다. 이 감소는 조기 열화의 신호일 가능성이 높다.

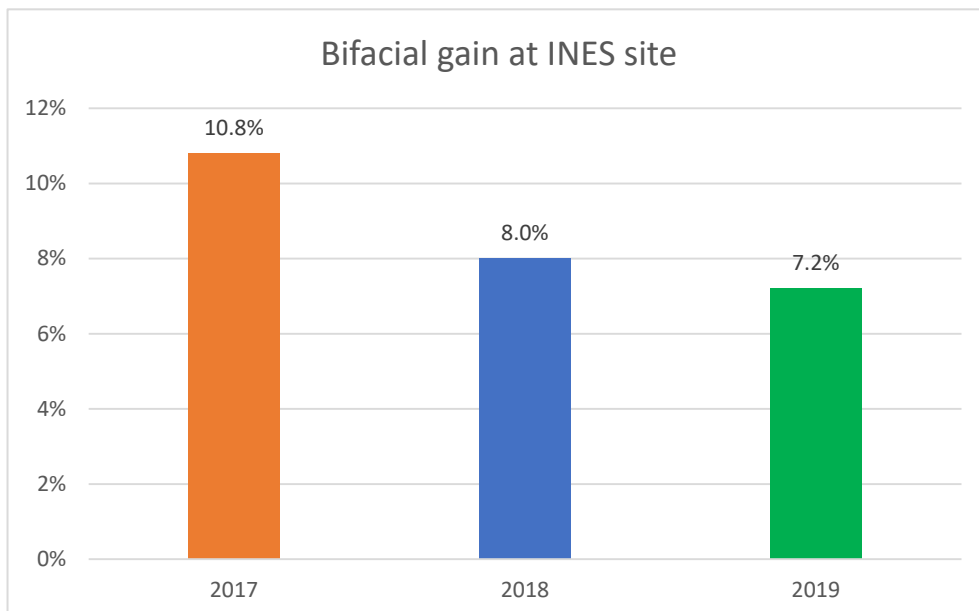


그림 71: 연평균 양면형 이득의 감소.

그림 72 는 2017 년과 2018 년의 후면/전면 일일 조사강도 비를 보여준다. 신호에서 계절성은 여름에는 높고 겨울에는 낮다.

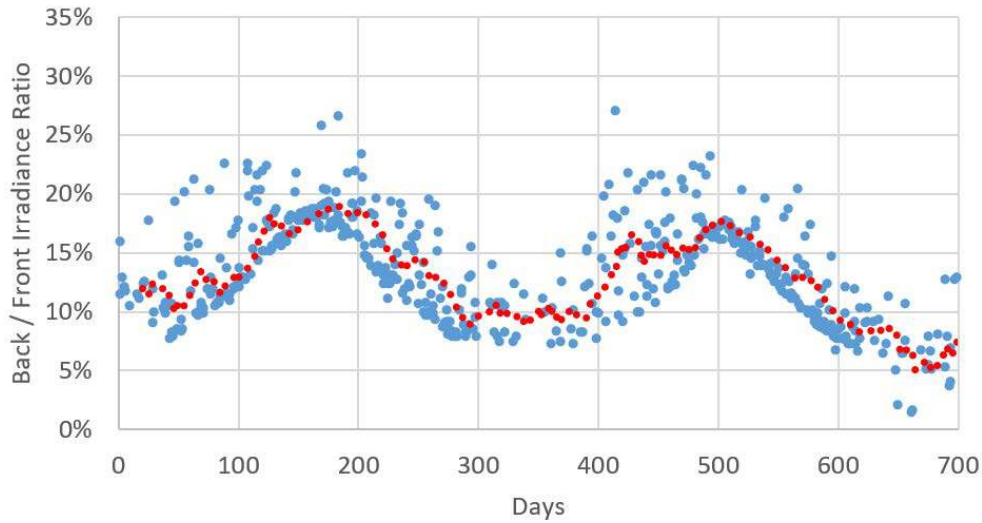


그림 72: 작동 첫 2년 동안 전면 대비 후면 조사강도 비. 청색 점은 일일 값을 나타내고, 적색 점은 20-일 이동 평균이다.

7.3 칠레: ATAMOSTEC 양면형 태양광 필드 테스트 사이트

(Eliás Urrejola, Felipe Valencia, Edward Fuentealba)

7.3.1 양면형 시험에 대한 설명

ATAMOSTEC(Atacama Module and System Technology (<http://www.atamostec.cl/en/>)는 칠레 경제개발청(CORFO)과 산업계 파트너사가 지원하는 민간-공공 칠레 컨소시엄이다. ATAMOSTEC 은 특별히 높은 일조량과 사막 환경에 적합한 태양광 발전기술을 개발한다. 아타카마 사막은 전 세계적으로 태양광을 설치하는 데 매우 흥미로운 경관을 가지고 있으며, 매우 높은 조사량과 연간 일조 시간, 세계에서 가장 맑은 하늘 중 하나, 연간 예상 에너지 수율이 가장 높고 상대적으로 낮은 대기 온도를 특징으로 한다.

ATAMOSTEC 는 칠레 아타카마 사막에 태양광 플랫폼 시설(Atacama Solar Desert Platform: PSDA)을 보유하고 있으며, 모듈, 케이블, 인버터와 장착 구조물 등 태양광 발전기술에 대한 옥외 시험을 수행하고 있다. PSDA 는 2 가지 주요 테스트 시설물을 포함하고 있다.

- Lalcktur 1 MW 태양광 플랜트는 대규모로 기술을 시험하기 위한 목적의 산업 플랜트이다.
- 완전한 옥외 태양 시험 시설(outdoor solar test facility: OST)은 단면형과 양면형 시스템을 가지고 있다 (<https://bit.ly/2YC0SIM>; 24.090570° S, 69.929285° E)

그림 73 에서 볼 수 있듯이 태양광 설비는 해안에서 멀리 떨어져 있어 바닷물의 응축과 증발로 발생하는 문제를 피할 수 있으며 따라서 사막 환경에 맞게 설계된 태양광기술을 테스트하기에 이상적인 장소이다. PSDA 사이트의 특성은 다음과 같다.

- 조사량: 연간 평균 기준으로 글로벌 수평면 조사강도 (GHI)는 2615.3 kWh/m², 확산 수평면 조사강도 (DHI)는 366.5 kWh/m², 직달 법선면 조사강도 (DNI)는 3493.2 kWh/m² 에 달한다.



- 연평균 일조시간 > 4,000 시간.
- 전체 범위에서 자외선 조사강도 높음 (연간 UVA 171.4 kWh/m², UVB 4.6 kWh/m²)
- 일평균 주위온도는 겨울 8.86 °C 에서 여름 22.39°C 범위이다.
- 연평균 강우량: 2 mm
- 연평균 풍속: 3.3 m/s
- 평균 기압: 90.57 kPa
- 평균 상대습도 (RH) 38.75% 이고 범위는 10%~72%.
- 오염 영향이 큰 사막 기후: 월간 약 1% 오염 손실
- 평평한 부지 (원거리 음영이 없음)

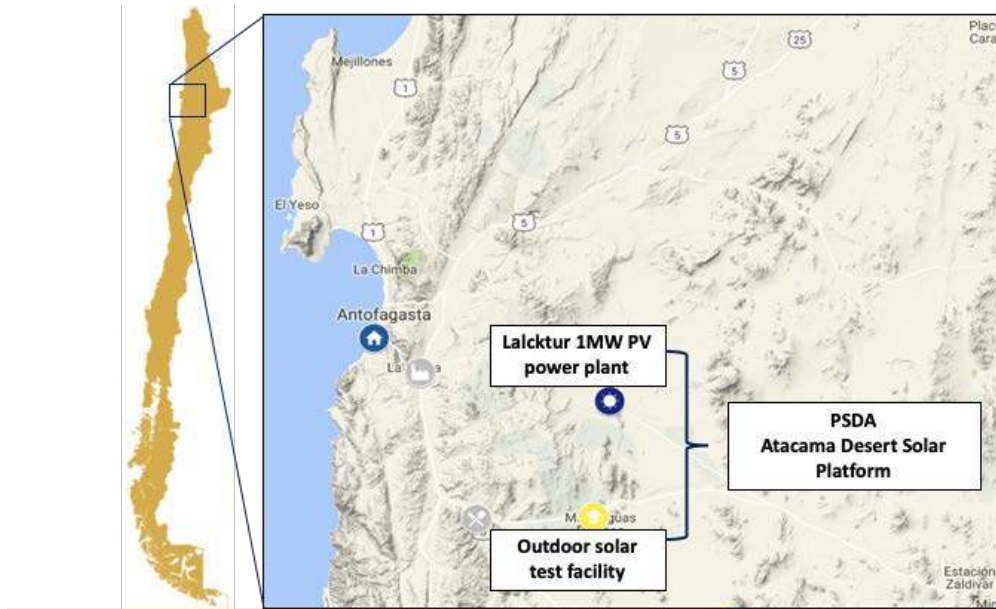


그림 73: 칠레 Atacama 사막의 중심부에 있는 PSDA 시설.

ATAMOSTEC OST 사이트의 특징은 다음과 같다.

- 모듈 후면의 음영을 방지하도록 특별히 설계된 양면형 고정 경사 시스템. 이 시스템은 5 개의 랙(더미 모듈용 1 개와 양면형 모듈 설치용 랙 4 개)으로 구성되어 있다. 모니터링을 통해 모듈과 스트링 성능을 모두 비교할 수 있다. 이 시스템에는 조사강도 측정 센서(전면에 1 개, 후면에 3 개), 온도 센서(모든 모듈 전 후면 각 1 개) 및 풍속 측정 센서 세트가 설치되어 있다.
- 수직 장착 구조 기반의 양면형 시스템. 이 시스템으로 동시에 4 개의 서로 다른 양면형 기술을 비교할 수 있다. 이 기술들은 모듈과 스트링 수준 모두에서 모니터링할 수 있다. 시스템의 가장자리에는 가장자리 효과를 조사하기 위한 더미 모듈이 있다. 고정 경사 시스템에서와 마찬가지로 이 시스템에는 시험 중인 모듈에 영향을 미치는 환경 조건을 측정하기 위해 조사강도 센서(전면에 1 개, 후면에 3 개), 온도 센서(모든 모듈 전 후면 각 1 개) 및 풍속계 센서(시스템의 위와 아래에 각 1 개) 세트가 설치되어 있다.
- 2020 년에 여러 개의 줄로 확장될 예정인 단일 줄 수평 단일-축 트래킹 시스템. 모듈과 스트링 수준에서 최대 4 개의 서로 다른 모듈 기술을 비교할 수 있다 (더미 모듈은 가장자리에 포함). 여러개의 환경 모니터링에는 조사강도 센서(전면 1 개, 후면 3 개), 온도 센서(모듈당 2 개) 및



풍속 센서가 포함된다. 이 시스템은 현재 업그레이드 중인데, 2021년 초까지 HSAT 트랙커 5대로 된 최종 시스템이 가용할 것이다.

옥외 플랫폼은 태양광 발전소에 사용되는 상용 및 비상업용 기기를 주로 시험하며 혁신적인 기술에 초점을 두고 있다. OST에 모듈을 설치하면 사용 가능한 모듈을 고려하여 태양광 발전소와 틈새(niche) 활용분야에 가장 적합한 옵션을 확인할 수 있다. 그림 74는 모듈 테스트에 사용되는 다양한 구조의 배치와 OST 설비를 보여준다. OST 시설에는 기상 데이터 측정, 모듈 기술 특성 분석(양면형 모듈 등), 트랙킹 시스템 평가를 위한 최신의 장비가 포함되어 있다. 또한 기준 방사(radiometric) 측정 실험실도 보유하고 있다. 현재 ATAMO 1세대 기술(n-type 기술: n-PERT와 HJT)을 벤치마크 모듈로 시험하고 있다.



그림 74: ATAMOSTEC 양면형 태양광 시험 플랫폼 (칠레 Antofagasta 소재).

7.3.2 양면형 성능 결과의 개요

ATAMOSTEC이 수집한 자료에 의하면 "ATAMO" 모듈은 20° 고정 경사 시스템에 설치된 단면형 PERC 모듈에 비해 연평균 11%의 추가 이득을 보였다. 기술과 설치 유형(수직, 고정 경사 혹은 HSAT)에 따라 양면형 이득은 7%~14% 사이이다. 수평 단일-축 트랙킹 시스템(SAT)에서 "ATAMO" 모듈을 사용하면 에너지 생산량이 최대 31% 더 향상된다. 이러한 개선 사항을 합하면, 고정 단면형 모듈과 비교했을 때 연평균 44%의 이득을 얻을 수 있다(이는 PVsystem으로 1년 동안 시뮬레이션). 설치된 기술은 ATAMOSTEC의 국제 파트너인 프랑스 CEA-INES와 독일 ISC-Konstanz가 개발했다.

7.3.3 태양에너지 자원 분석 개요

Atacama 사막의 태양광 스펙트럼과 환경 조건은 다른 여러 많은 기후와 비교할 때 독특하다. 따라서 다른 활용 분야 중에서도 태양광소자를 교정하고 평가하는 데 사용되는 기준 스펙트럼은 아타카마의 조건을 가장 잘 나타내지 못할 수 있다. PSDA의 GHI, DHI 및 DNI 태양 조사량은 이 위치를 태양에너지 시설 배치의 이상적인 장소로 만든다(그림 75 참조). 그러나 PSDA는 자외선(UVA, UVB) 영역에서도 다량의 에너지를 공급받는다(그림 76 참조). 따라서 사용되는 기술 부품은 수명이 크게 낮아지는 것을 방지하기 위해 이러한 파장의 에너지에 민감해서는 안 된다. 이 점은 대규모 태양광 발전소에 대한 현재 및 미래 투자에서 고려해야 할 사항이다. PSDA는 또한 온도와 풍속에서 극심한 변동을 겪게 되는데, 이는 오염 문제뿐 아니라 구성 요소와 구조에 높은 열응력을 초래할 수 있다. 이러한 모든 특징을 가진 Atacama는 태양광과 양면형 태양광기술을 시험하고 평가하기에 매우 좋은 장소이다.

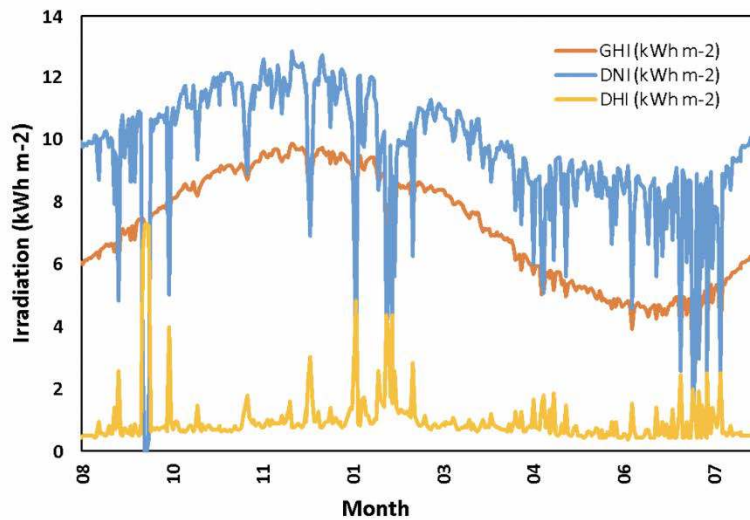


그림 75: PSDA 에서 측정된 누적 GHI, DHI, DNI (University of Antofagasta).

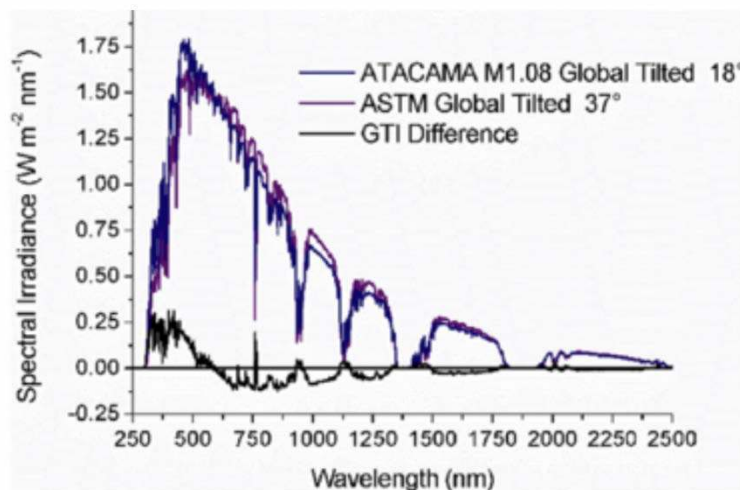


그림 76: 글로벌 경사면 조사강도의 정규화된 스펙트럼: PSDA 측정과 기준 스펙트럼 ASTM G173 의 비교.

7.4 캐나다: University of Ottawa SUNLAB 사이트

(Annie C.J. Russell, Christopher E. Valdivia, Karin Hinzer)

7.4.1 양면형 시험에 대한 설명

ASPIRE(Innovation for Renewable Energy)에서는 연중 대부분 눈과 얼음으로 덮혀 지상 알베도가 크게 향상되는 캐나다 북부에서 이중-축 트래킹 양면형 태양광 발전의 가능성을 조사한다. 이 프로젝트는 두 개의 트윈 R&D 양면형 태양광 테스트 사이트를 포함하는데, 하나는 온타리오주 University of Ottawa(위도 45°)에서, 다른 하나는 케임브리지 만 Nunavut (69° latitude)에 있는 캐나다 고등 북극 연구소(CAS, Canadian High Arctic Research Station, 위도 69°)이다.



고위도에서의 태양 경로의 연간 변동이 매우 크기 때문에 이중-축 트래킹은 특별히 관심을 끈다. 예를 들어, 케임브리지 만에서 정오 태양 고도각은 최고 45°에 도달하며, 5 월 중순부터 7 월 중순까지 직사광선의 방위각의 범위는 360°이다. 저위도 환경과 다른 추가 조건은 표 21 [160]에 요약되어 있다.

표 21: SUNLAB 의 ASPIRE 프로젝트 내 트윈 R&D 양면형 태양광 테스트 사이트에 대한 설명.

사이트 위치	사이트 설명	위도	평균 온도	눈 커버 기간 (개월/연)
Ottawa, ON	도시, 풀	45.4°	6.6°C	4
Cambridge Bay, NU	영구동토층	69.1°	-13.9°C	9.5

장비와 소자

트윈 테스트 현장에는 남향 고정 경사 랙킹과 이중-축 트래커 위에 단면형과 양면형 패널 모두가 설치될 것이다. 이 사이트는 각각 최소 1 개의 Savanna 이중-축 트래커 (산업 파트너인 Morgan Solar 사 제공)를 포함할 것인데, 세로 방향 설치 3 패널 테이블이 각각 장착될 수 있는 4 개의 트래킹 보강장치를 갖고 있어 트래커 당 총 12 개의 패널을 설치할 수 있게 되는 것이다.

Savanna 는 가벼워 중장비 없이도 설치가 가능하기 때문에 북부와 외딴 지역에는 큰 장점이 된다. 트래커 설계는 주입 콘크리트를 필요로 하지 않으며 비침투적 밸러스트(non-penetrating ballasting) 옵션을 사용할 수 있어 영구 동토층에 설치가 가능하다. 또한 이러한 트래커는 단일-축 트래킹 모드에서 작동하도록 프로그래밍할 수 있으며, 두 트래킹 모드 간에 에너지 수율을 비교할 수 있다. Cambridge Bay 연구는 겨울 완전히 어두운 기간에는 중단될 것이다. University of Ottawa 태양에너지 시험장은 이미 이전 프로젝트에 사용한 세 개의 Savanna 트래커(이 중 두 개는 그림 77 에 표시됨)로 채워져 있으며, 이 ASPIRE 프로젝트를 위해 확장될 예정이다.

계량 측정

Cambridge Bay 사이트에서 신뢰성 있는 원격 작동을 위해 태양광 패널 측정이 간소화된다. 성능 분석을 위해 패널은 온도에 따른 전류, 전압 및 충전율이 사전에 분석될 것이다. 태양에너지 자원 센서는 각 사이트에 설치될 것인데, 연구 파트너인 Spectrafy 사의 SolarSIM 분광 조사강도 센서, 직달일사량계, GHI 일사량계, 전후면 면내 일사량계와 알베도계가 포함된다.

University of Ottawa 부지에는 확산 수평면 조사강도와 패널 후면의 불균일도 측정용의 추가 조사강도 센서가 설치될 것이다. 추가 환경 센서로는 모듈 온도 센서, Luft 기상 관측소, 현장 카메라 그리고 수평, 전방 및 후방 면내 2π -steradian all-sky 이미저가 포함된다. 지면의 상황이 Nunavut 에서는 툰드라와 눈 사이, Ottawa 에서는 풀/면지와 눈 사이에서 변화하기 때문에 자연 알베도는 실험 전 과정에 걸쳐 측정될 것이다.



그림 77: ASPIRE 프로젝트 이전에 University of Ottawa SUNLAB 필드 시험장에 설치된 3 개의 Savanna 트랙커 중의 2 대.

7.4.2 양면형 성능 결과의 개요

현장 조립은 2021 년까지 계속된다. 이들 사이트의 에너지수율 데이터를 통해 눈으로 덮인 높은 알베도, 높은 확산 조건 및 넓은 범위의 방위각과 같이 중간 및 고위도 위치에 고유한 양면형 이득의 동인을 분석할 수 있다. 이 프로젝트에서는 위도 45° 및 69°의 연구 목적 이중-축 트래킹과 고정 경사 시스템의 양면형 이득과 여타 성능 매트릭스에 대해 보고할 것이며, 눈 버리기(shedding), 백트래킹과 에너지 예측에 대한 조사도 포함될 것이다.

이 소규모의 비전통적인 시스템은 일반적인 유틸리티 규모의 배치와 비교되는 매우 다른 음영 환경을 제공한다. 이러한 새로운 현장 결과는 이런 독특한 아키텍처 하에서 University of Ottawa's 양면형 태양광 성능과 에너지수율을 위한 수치 모델 DUET의 검증에 도움이 될 것이다. Cambridge Bay의 모델링과 사이트 데이터는 Yukon University의 연구 파트너인 Michael Ross 박사가 주도하는 북부 양면형 태양광의 디젤 범위 가능성에 대한 연구에도 도움이 될 것이다.

이후에는 고위도 조건에 최적화된 실리콘 이중접합 셀 현장 시험이 수행될 예정이다. 연구 파트너인 Arizona State University의 Mariana Bertoni 박사와 함께 셀 제작 및 미니 모듈 조립을 활용하여, 측정은 변환과 수집 효율성을 정량화하고 이러한 요소에 영향을 미치는 원리 조건들을 이해하는데 초점을 맞출 것이다.

7.5 독일: TÜV Rheinland 옥외 양면형 모듈 시험

(Johanna Bonilla)

7.5.1 일반 정보

TÜV Rheinland는 2013년부터 4곳의 옥외 시험장을 운영하며 태양광모듈의 성능을 측정하고 있다. PV-CLIMATE 프로젝트의 틀 내에서 구축된 사이트는 표 22에 요약된 바와 같이 태양광 시설을 위해



일반적으로 선택되는 지역에서 가장 광범위한 기후 조건을 다루기 위해 그림 78 과 같이 전 세계에 위치하였다. 따라서 현장에서는 실제 조건 하에서의 에너지 성능을 연구할 수 있다.

2017 년부터 시험 사이트는 양면형과 단면형 모듈의 에너지 성능 비교연구를 위해서도 사용되고 있다.

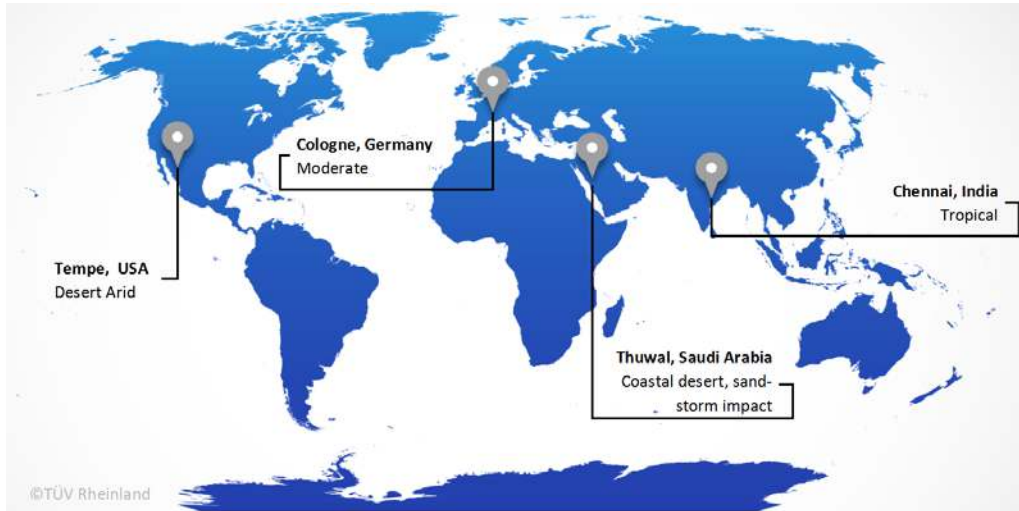


그림 78: TÜV Rheinland 의 태양광모듈 에너지수율 측정용 사이트 위치.

표 22: TÜV Rheinland 태양광 시험 사이트에 의해 커버되는 기후 조건.

사이트 파라미터	Cologne, Germany	Tempe, Arizona, USA	Chennai, India	Thuwal, Saudi Arabia
Köppen-Geiger 기후 분류	Cfb (moderate)	BWh (desert, arid)	Aw (tropical)	BWh (desert, coastal)
경사각/ 지표면	35°	33.5°	15°	25°
연간 면내 글로벌 조사량 (kWh/m ²)	1257	2396	2102	2329
낮은 조사강도 분율 ($G < 200 \text{ W/m}^2$)	17%	5%	9%	4%
평균 주위 온도 ($G > 15 \text{ W/m}^2$)	13.0 °C	25.6 °C	30.5 °C	30.2 °C
연간 평균 강수량 (mm)	774	219	1597	70
평균 상대습도	74.3%	33.4%	74.7%	66.8%

7.5.2 필드 측정 기기장치

4 개 시험장 모두 동일한 하드웨어를 갖추고 있다. 측정 빈도 및 분해능도 동일하여 현장 간 에너지 효율 측정의 비교가능성을 제공한다. 표 23 은 그 내용을 요약한 것이다.



각 시험 모듈에 대해 두 개의 Pt100 온도 센서(한 개는 모듈 중앙에, 다른 하나는 가장자리에 설치)가 30 초의 샘플링 속도로 모듈 후면 온도(T_{BoM})를 측정한다. 각 모듈별 전자 DC 부하는 모든 시험 샘플이 30 초의 데이터 수집 주파수로 MPPT(최대 출력점 추적)에서 연속적으로 작동할 수 있도록 한다.

표 23: TÜV Rheinland 태양광 테스트 사이트의 장비 및 현장 측정 주파수.

파라미터	장비/테크닉	빈도수
모듈 온도, T_{BoM}	2 개의 Pt100 표면 온도 센서, 하나는 각 모듈의 중앙에 다른 하나는 가장자리에. 양면형 모듈의 경우에는 케이블링에 특별한 주의가 필요하다.	30 sec
IV 곡선 측정	전자 부하: IV 곡선 측정을 위해 MPPT 중단	10 min
P_{MPP}	전자 부하: 4-wire 연결	30 sec
$G_{PoA, fr}$, G_{Hor} , G_{dir} , $G_{PoA, r}$	일사량계	30 sec
T_{amb} , 강수량, 바람과 습도	센서 (순간적인 측정)	30 sec
분광 조사강도	스펙트로미터 (300~1600 nm)	1 min

전류 및 전압 곡선은 10 분마다 기록된다. 면내 글로벌 조사강도($G_{PoA, fr}$), 수평(G_{Hor}), 확산(G_{dir}) 및 면내 후면 조사강도($G_{PoA, r}$)는 3 개의 일사량계로 측정한다. 후면 일사량계는 높이가 후면 조사강도의 불균일성에 미치는 영향을 확인하기 위해 세 가지 높이에 장착된다. 주변 온도(T_{amb}), 분광 조사강도, 강수량, 풍속, 풍향, 습도도 측정된다.

또한 각 옥외 시험 장소마다 오염 스테이션을 사용할 수 있다. 매일 수동으로 청소하는 한 개의 미니 모듈과 두 개의 미니 모듈의 조사강도 측정을 나란히 같이 하면 오염 모니터링을 수행할 수 있게 된다. (그림 79 참조). 오염된 미니 모듈 표면에 먼지가 쌓이면 투과 손실이 발생하고 셀에 도달하는 유효 조사강도를 감소시킨다. 사우디아라비아 현장에는 다양한 청소 일정이 에너지 수율에 미치는 영향을 연구하기 위해 미니 모듈이 추가로 설치되었다.

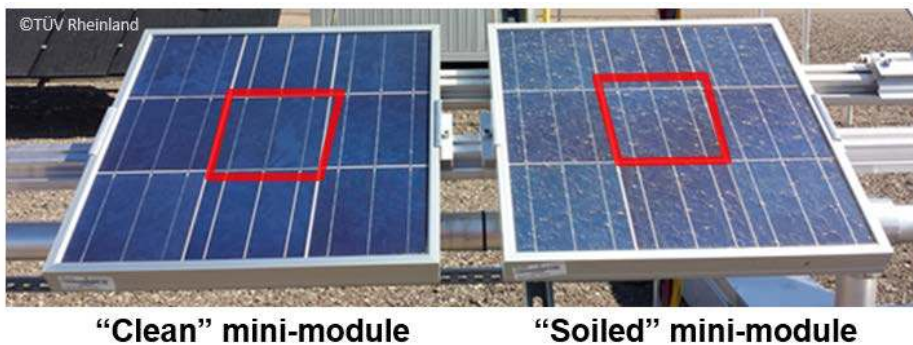


그림 3: TÜV Rheinland 에 있는 오염 스테이션, 중앙의 셀들이 적색 사각형 안에 있다.



중앙에 있는 셀(측정 셀)만 전기적으로 연결되었고, 가장자리에 있는 셀들은 더미 셀의 역할을 한다. 중앙의 셀들은 조사강도 센서(단락 전류)로 작용한다. 미니 모듈은 표준의 태양광 창유리 (3.2 mm 미세구조 패턴을 가진 유리)를 가지고 있다.

7.5.3 실험실 시험

옥외 시험장에 양면형 모듈을 설치하기 전에 TÜV Rheinland 는 전기적 특성과 옥내 성능을 분석하기 위해 실험실에서 모듈을 측정하였다. 모듈은 IEC 시험 규격 60904-1-2[47]와 스펙트럼 보정을 포함한 양면형 계수에 따라 특성이 분석되었다 [48]. 셀기술에 따라 0.75(PERC 셀)에서 0.91(n-PERT 셀)까지의 양면형 계수가 측정되었다. 기술 내에서의 스프레드는 셀의 품질과 양면형 모듈의 설계에 따라 좌우되었다.

다음과 같은 에너지 등급 측정도 수행되었다.

- 온도와 조사강도 변동에 따른 성능 [53].
- 각도 응답 [53].
- 온도 계수 [161].

7.5.4 시험 시설과 양면형 연구 결과

실험실 측정이 끝난 후 시험 모듈은 그림 80 과 같이 4 개의 옥외 위치에서 개방형 랙 설비에 장착되었으며 TÜV Rheinland 는 설치된 단면형과 양면형 모듈의 에너지 수율을 비교하였다 [161-164].

옥외 성능 분석의 경우, 다음과 같이 모듈 성능비(MPR) 파라미터를 사용하여 비교한다.

$$MPR = \frac{\left(\sum_{months} P_{MPP} \right) / P_{MPP,STC}}{\left(\sum_{months} G_{PoA} \right) / 1000Wm^{-2}} \cdot \% \quad (35)$$

MPR ≠ 100% 값은 온도, 낮은 조사강도 거동, 스펙트럼, 각도 영향, 열화, 준안정성 또는 양면형 이득으로 인한 성능 변동을 나타낸다. MPR=100% 는 고려 기간 동안의 평균 모듈 효율이 STC 효율에 합치되는 의미한다.

모듈의 동등한 처리를 보장하고 제조업체 샘플링, 출력 등급(라벨)과 출력 산출량 분류의 영향을 최소화하기 위해 실험실에서 이전에 측정된 STC 출력 산출량이 MPR 계산에 사용된다.

양면형 모듈의 경우, STC 에서의 전면 출력 산출량이 사용되었다. 따라서 100%보다 큰 값이 가능하다.

표 24 에서 표 27 까지는 TÜV Rheinland 에서의 다양한 연구에 대한 결과를 요약한 것이다.



독일 Cologne



미국 Arizona



사우디 아라비아 Thuwal



인도 Chennai

그림 4: 태양광 시험용 TÜV Rheinland 시험 시설 (Photos: ©TÜV Rheinland).

7.5.5 TÜV Rheinland 에서 양면형 성능의 주요 결과들

이 사이트에서의 양면형 성능에 대한 주요 결과는 다음과 같다.

- 옥외 연구는 단면형 모듈에 비해 양면형 모듈의 에너지수율 성능에서 분명한 장점을 입증하였다. 그러나 에너지 이득의 정량화는 모듈 성능비가 전면의 출력 산출량을 나타낼 때만 가능하다.
- 양면형 계수는 셀기술에 따라 크게 좌우되는데, 60%에서 90%까지 변화한다. 그러나 동일한 유형의 모듈이 서로 다른 양면형 계수를 보여주었음을 확인하였다.
 - 동일한 계열로 생산된 모듈의 경우, 양면형 계수는 $\pm 2.0\%$ 에서 $\pm 5.0\%(k=2)$ 까지 변동할 수 있다.
 - 이러한 변동의 대부분은 제조 측면에서의 변동 민감도에 기인한다. 약간의 솔더링 패턴이라도 이 값에 영향을 미칠 수 있다.
- 모듈이 실제 조건에서 작동하게 되면, 양면형 계수는 양면형 이득에 작은 역할을 한다. 모듈 유형 간에 0.15의 차이가 있더라도 MPR 변화는 2% 미만으로 나타난다.
- 알베도, 후면/전면 조사강도와 양면형 이득 간의 상관관계를 설정할 수 있다. 여기서 양면형 이득은 단면형 모듈과 양면형 모듈의 그룹 평균이다. 그러나 이러한 상관 관계는 위에서 설명한 설치 조건에서만 유효하다.
- 최적화된 설비의 경우, 후면/전면 조사강도 비율이 알베도의 약 50%를 나타낼 수 있다는 것을 발견하였다(그림 81 참조).



표 2: TÜV Rheinland 시험 결과 (위치: 독일 Cologne).

위치: 독일 Cologne																	
기간: Aug 2017 ~ Jul 2018																	
16 개 모듈: 단면형 vs. 양면형 [162], [163]																	
<table border="1"> <tr> <td>장착 상태</td> <td>2 racks, fixed, pitch 11m</td> </tr> <tr> <td>지면 위 높이</td> <td>1.5 m</td> </tr> <tr> <td>경사각</td> <td>35° south</td> </tr> <tr> <td>지면</td> <td>Gravel (Albedo = 28%)</td> </tr> <tr> <td>연간 면내 조사량 $H_{POA, f}$</td> <td>1231 kWh/m²</td> </tr> <tr> <td>연간 면내 후면 조사량 $H_{POA, r}$</td> <td>169.4 kWh/m²</td> </tr> <tr> <td>$H_{POA, rear} / H_{POA, front}$</td> <td>13.8%</td> </tr> <tr> <td>양면형 계수, ϕ</td> <td>0.85–0.89</td> </tr> </table>	장착 상태	2 racks, fixed, pitch 11m	지면 위 높이	1.5 m	경사각	35° south	지면	Gravel (Albedo = 28%)	연간 면내 조사량 $H_{POA, f}$	1231 kWh/m ²	연간 면내 후면 조사량 $H_{POA, r}$	169.4 kWh/m ²	$H_{POA, rear} / H_{POA, front}$	13.8%	양면형 계수, ϕ	0.85–0.89	<div style="text-align: center;"> <p>Module Performance Ratio Comparison From Aug 2017 to Jul 2018 Location: Germany</p> <p>©TÜV Rheinland</p> </div>
장착 상태	2 racks, fixed, pitch 11m																
지면 위 높이	1.5 m																
경사각	35° south																
지면	Gravel (Albedo = 28%)																
연간 면내 조사량 $H_{POA, f}$	1231 kWh/m ²																
연간 면내 후면 조사량 $H_{POA, r}$	169.4 kWh/m ²																
$H_{POA, rear} / H_{POA, front}$	13.8%																
양면형 계수, ϕ	0.85–0.89																

참고:

모든 c-Si 모듈의 MPR 계산에 대한 기준으로 SMM 보정 포함한 옥내 실험실 P_{STC} 를 사용하였다. 양면형 모듈에 대해서는 전면 P_{STC} 를 사용하였다.

*박막모듈의 MPR 은 라벨의 P_{STC} 에 기준한다.

연간 조사량 값은 $G_{POA, f} > 15 \text{ W/m}^2$ 에 대해 계산한다.



표 3: TÜV Rheinland 시험 결과 (위치: 미국 Tempe).

위치: 미국 Tempe	
기간: Sep 2018 ~ Aug 2019	
11 개 모듈: 단면형 vs. 양면형 [164]	
장착 상태 지면 위 높이 경사각 지면 연간 면내 조사량 $H_{POA, f}$ 연간 면내 후면 조사량 $H_{POA, r}$ $H_{POA, rear} / H_{POA, front}$ 양면형 계수, ϕ	1 rack, fixed 1.3 m 33.5° South Dark gravel + sand (Albedo = 13.4%) 2237 kWh/m ² 229.2 kWh/m ² 10.2% 0.75–0.85
<div style="text-align: center;"> Module Performance Ratio Comparison From Sep 2018 to Aug 2019 Location: USA </div> <p>©TÜV Rheinland</p>	

참고:

모든 c-Si 모듈의 MPR 계산에 대한 기준으로 SMM 보정 포함한 옥내 실험실 P_{STC} 를 사용하였다. 양면형 모듈에 대해서는 전면 P_{STC} 를 사용하였다.

연간 조사량 값은 $GP_{PoA, f} > 15 \text{ W/m}^2$ 에 대해 계산한다.



표 4: TÜV Rheinland 시험 결과 (위치: 사우디 아라비아 Thuwal).

위치: 사우디 아라비아 Thuwal																			
기간: Oct 2018 ~ Sep 2019																			
8 개 모듈: 단면형 vs. 양면형 [165]																			
장착 상태 지면 위 높이 경사각 지면 연간 면내 조사량 $H_{POA, f}$ 연간 면내 후면 조사량 $H_{POA, r}$ $H_{PoA_rear} / H_{PoA_front}$ 양면형 계수, ϕ	1 rack, fixed 1.3 m 25° south Sand with gravel (Albedo = 30.1%) 2029 kWh/m ² 306.3 kWh/m ² 15.1% 0.74–0.90																		
Module Performance Ratio Comparison From Oct 2018 to Sep 2019 Location: Saudi Arabia																			
<table border="1"> <caption>Module Performance Ratio Comparison Data</caption> <thead> <tr> <th>Module Type</th> <th>MPR [%]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>monofacial 1</td> <td>~85</td> </tr> <tr> <td>monofacial 2</td> <td>~85</td> </tr> <tr> <td>monofacial 3</td> <td>~85</td> </tr> <tr> <td>monofacial 4</td> <td>~85</td> </tr> <tr> <td>bifacial 1</td> <td>~96.5</td> </tr> <tr> <td>bifacial 2</td> <td>~96.5</td> </tr> <tr> <td>bifacial 1</td> <td>~96.5</td> </tr> <tr> <td>bifacial 2</td> <td>~96.5</td> </tr> </tbody> </table>		Module Type	MPR [%]	monofacial 1	~85	monofacial 2	~85	monofacial 3	~85	monofacial 4	~85	bifacial 1	~96.5	bifacial 2	~96.5	bifacial 1	~96.5	bifacial 2	~96.5
Module Type	MPR [%]																		
monofacial 1	~85																		
monofacial 2	~85																		
monofacial 3	~85																		
monofacial 4	~85																		
bifacial 1	~96.5																		
bifacial 2	~96.5																		
bifacial 1	~96.5																		
bifacial 2	~96.5																		
©TÜV Rheinland																			

참고:

모든 c-Si 모듈의 MPR 계산에 대한 기준으로 SMM 보정 포함한 옥내 실험실 P_{STC} 를 사용하였다. 양면형 모듈에 대해서는 전면 P_{STC} 를 사용하였다.



표 5: TÜV Rheinland 시험 결과 (위치: 인도 Chennai).

위치: 인도 Chennai	
기간: Sep 2018 ~ Aug 2019	
11 개 모듈: 단면형 vs. 양면형 [165]	
장착 상태	1 rack, fixed
지면 위 높이	1.3 m
경사각	15° south
지면	백색 스톤 (알베도 = 49.9%)
연간 면내 조사량 $H_{PoA, f}$	1857 kWh/m ²
연간 면내 후면 조사량 $H_{PoA, r}$	472.8 kWh/m ²
$H_{PoA, rear} / H_{PoA, front}$	25.5%
양면형 계수, φ	0.74–0.91

Module Performance Ratio Comparison
From Sep 2018 to Aug 2019
Location: India

©TÜV Rheinland

참고:

모든 c-Si 모듈의 MPR 계산에 대한 기준으로 SMM 보정 포함한 옥내 실험실 P_{STC} 를 사용하였다. 양면형 모듈에 대해서는 전면 P_{STC} 를 사용하였다.

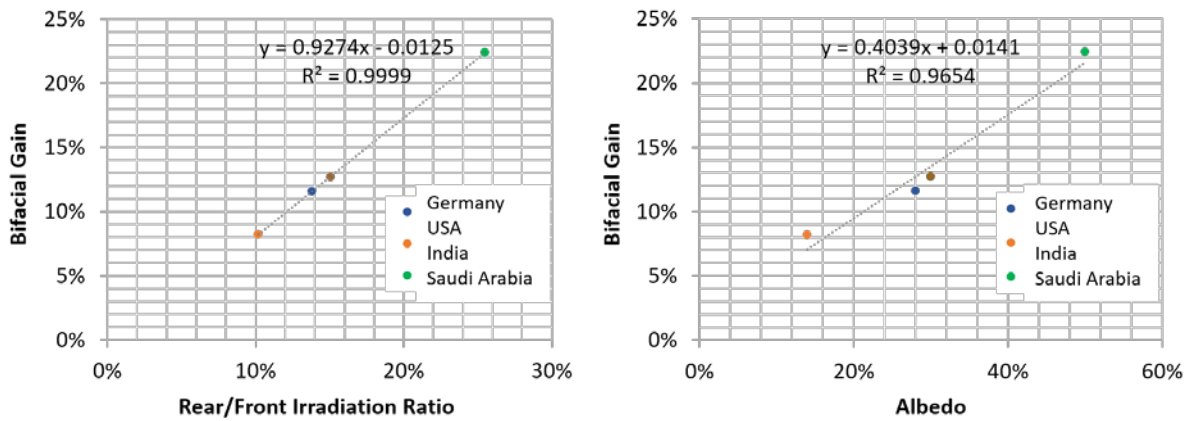


그림 5: (좌) 후면/전면 조사량 비와 (우) 알베도 및 양면형 이득 사이의 상관관계.



7.6 스위스: Zurich University of Applied Sciences 양면형 테스트 사이트

(Markus Klenk)

7.6.1 양면형 시험에 대한 설명

스위스 Winterthur 에 있는 Zurich University of Applied Science (ZHAW)의 지붕에 위치한 양면형 옥외 로토 테스터(Bifacial Outdoor Rotor Tester: BIFOROT)는 장착 조건이 다양한 양면형 시스템의 체계적인 측정을 위한 3x3 모듈 어레이이다. 이 어레이는 상용화된 60 셀 모듈(Megacell, MBA-GG60-270)을 기반으로 하며, 공칭 전면 출력은 268Wp 이고 양면형 계수는 78%이다. 그림 82 는 BIFOROT 의 기본 설정을 나타내며, 그림 83 은 설치된 시험시설을 보여준다.

이 작업에 가장 관련성이 높은 장치는 3x3 매트릭스 중앙에 있는 양면형 모듈로, 그림 82 에서 빨간색으로 표시되고 그림 83 에서 M2 로 표시되어 있다. 이 중앙 모듈은 확장된 양면형 시스템에서 일반적인 위치의 음영을 나타내는 데 이상적이다. 독립형 모듈을 가진 보다 일반적인 시험 시설에 대비한 이점은, 이 사이트가 다른 모듈에 의한 직접 음영과 반사 지면의 간접 음영을 경험하게 되는 확장된 실제 설치 상태와 매우 유사하다는 것이다. 추가 음영 요소가 한쪽에 적용된다. 건물 지붕에 사용 가능한 공간이 제한되어 있어 어레이를 더 연장하는 것은 가능하지 않았다.

줄 간 거리를 수동으로 조절할 수 있는 세 줄의 모듈이 수직 조정 가능한 기둥에 장착된다. BIFOROT 의 중요하고 고유한 특징은 특정 단계에서 기울기 각도의 자동적이고 연속적인 변동이다. 이동식 모듈임에도 불구하고 이 시스템은 트랙커가 아니라 경사 각도에 따른 효과를 분석하기 위한 남향 테스트 필드입니다.

모든 패널은 경사 각도를 중앙 줄에 맞춰 연속적으로 변경한다. BIFOROT 에는 후면 조사량 균일성 측정과 양면형 모듈의 전면 및 후면 측정(그림 83 의 모듈 M1, M3 포함)과 같은 양면형 시스템 특성을 분석하는 몇 가지 기능이 포함되어 있다. 이런 특징을 보여주기 위해 M1 및 M3 모듈에는 각각 전면과 후면에 덮개가 있다.

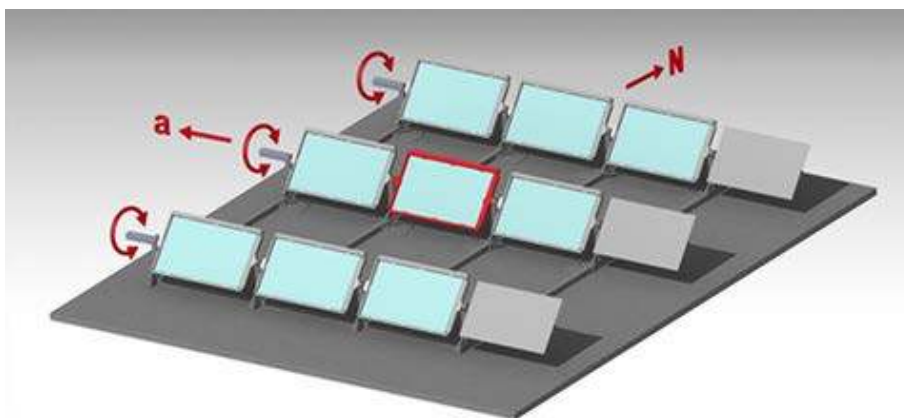


그림 6: 영구적으로 회전하는 모듈을 가진 측정 설비. 실제 설치시 실제 상태를 나타내는데 가장 최적의 중앙은 적색 테두리로 표시되어 있다.



그림 7: Winterthur 소재 ZHAW 의 지붕에 있는 BIFOROT 시설. 백색의 반사성 지붕재 포일이 어레이의 아래에 놓여 있다.

기상 데이터와 환경 조건은 옥상에 있는 기상 스테이션과 시험 장비에 포함되는 측정 장치에 의해 기록된다. 기상 스테이션에는 글로벌 수평면 일조량을 측정하는 일사량계, 수평으로 장착된 기준 셀과 확산 일조량을 측정하는 직달일사량계 등이 있다. 모듈 M2 의 회전 마운팅 프레임에는 또 다른 일사량계와 기준 셀이 설치되어 있다.

7.6.2 양면형 성능 결과의 개요

현재 분석은 기울기 각도와 특정 조사량 조건에 따라 달라지는 시뮬레이션의 정확도에 대한 상세 평가에 초점이 맞춰져 있다. 여기에는 PVSyst 의 결과와 EC.TNO 과 ISC Constanz 의 시뮬레이션 도구를 특정 조사량 조건에서의 측정과 비교하는 것이 포함되었다 [166]. 소개된 실험에서 0°~90° 범위에서 12 개의 각도가 선택되었다. 경사각에 따른 출력을 얻기 위해 각 단계에서 중앙 모듈 M2 의 IV 곡선이 측정되었다. 한 번의 주기가 완료되는 데 1 분이 소요된다. 이를 통해 거의 동일한 조건에서 서로 다른 경사 각도에 대한 IV 곡선을 측정할 수 있으며 경사각 시뮬레이션의 민감도를 알 수 있게 되었다.

각 경사 각도에 대해 시간당 60 개의 IV 곡선 및 Pmp 값을 사용할 경우 시간당 720 개의 IV 곡선과 Pmp 값을 얻게 된다. 일일 수율을 얻기 위해 하루 동안 Pmp 값을 합산할 수 있다. 이용 가능한 결과는 특정 일수로 제한되었다. 이제 연구는 더 긴 기간을 포함하도록 확장되었다[167].

7.7 스위스: SUPSI 옥외 테스트 시설

(Ruben Roldan Molinero, Gabi Friesen)

7.7.1 양면형 시험에 대한 설명

확산 반사체 역할을 하는 백색 후면 패널로부터의 조사강도와 온도 불균일도의 영향을 스위스 University of Applied Sciences and Arts of Southern Switzerland (SUPSI)에 있는 양면형 HIT 모듈에서 시험하였다. 같은 제조사가 공급한 3 개의 양면형 모듈을 개방형 랙에 장착하고 기존의 백색 지면



소재에 대한 대안으로 후면 패널의 확산 반사체 효과를 조사하였다. 건물 환경에 적용할 수 있는 지붕이나 벽면 반사체를 시뮬레이션할 수 있도록 후면에 반사체판을 배치하였다. 그림 84 의 시험 벤치는 문헌에 보고된 모범 사례 지침을 고려하여 설계되었다 [168]. 모듈 주변의 공기 순환을 촉진하고 온도 구배를 최소화하기 위해 테스트 샘플의 높이를 지면으로부터 최소 1m 이상, 다른 물체로부터 10cm 이상 떨어지는 것으로 정의하였다. 이러한 모듈 위치에서 대류 메커니즘에 의한 열 전파를 줄이기 위해 줄의 왼쪽과 오른쪽에 더미 모듈을 추가 배치하였다. 기준을 잡기 위해 동일한 기술의 HIT 단면형 모듈을 양면형 모듈 옆에 장착하였다. 각 양면형 모듈 주위에 4 개의 일사량계를 배치하여 뒤쪽의 조사강도 불균일도를 측정하였다. 모듈 뒤쪽의 온도는 PT100 센서로 서로 다른 3 곳의 위치에서 측정하였다. 모듈 출력 측정에 사용되는 하드웨어 솔루션은 모듈이 최대 출력점 트래커(MPPT)를 통해 최대 출력으로 작동하는 동안 정기적으로 수행되는 IV 트레이싱을 결합한다. 이 과제는 스위스 연방 에너지 청(Swiss Federal Office of Energy)이 지원하는 ENGHENCH 프로젝트 내에서 수행되었다. 자세한 결과는 최종 프로젝트 보고서 [169]에서 확인할 수 있다.

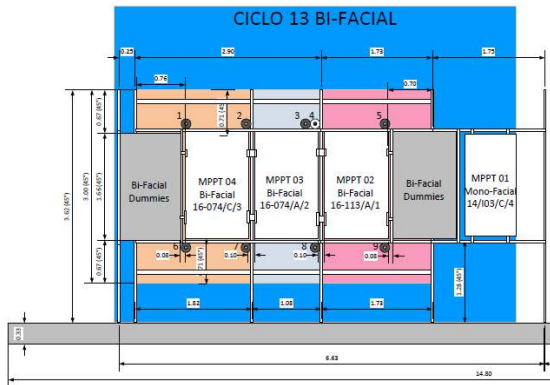


그림 8: (위) 스위스 프로젝트 ENHANCE 의 틀 내에서 SUSPI 에 설치된 양면형 시험 스탠드. 오픈 랙에 설치된 3 개의 모니터링용 양면형 모듈, 2 개의 더미 모듈과 1 개의 기준 단면형 모듈의 배치. (아래) 양면형 모듈 뒤에 장착된 백색 반사체의 전면과 측면.



7.7.2 양면형 성능 결과의 개요

아래 조사강도 불균일도(non-uniformity: NU)를 토대로 백색 반사체 없이 오픈 랙에 장착된 양면형 모듈에서의 불균일 조사강도에 대해 민감도를 분석하였다.

$$NU(\%) = 100 \times \frac{G_{\max} - G_{\min}}{G_{\max} + G_{\min}} \quad (36)$$

여기서 G_{\max} 와 G_{\min} 는 각각 최대와 최저 조사강도를 나타낸다.

그림 85(상단)의 박스 플롯 매트릭스는 각각 A1, A2 및 C3 열에 해당하는 세 모듈의 후면에서 측정된 조사강도 불균일도 NU 를 왼쪽 y 축에 표시한다. 오른쪽 y 축은 2018 율리우스력의 요일 번호 J_d 227, 271 및 331 을 x 축의 조정된 국제 표준시(UTC)에 대해 나타낸다. 표시된 바와 같이 특정 모듈의 불균일도는 연중 일자에 따라 달라지며 227 일(2018 년 8 월 15 일) 내내 10% 보다 상당히 더 낮다. 그러나 331 일(2018 년 11 월 27 일)과 같이 더 낮은 고도각에서의 중앙값은 10%에 가깝다.

플롯 매트릭스의 줄은 시험 벤치의 위치에 대한 조사량 균일도의 민감도를 나타내며, 입사 각도가 더 높은 요일의 처음과 마지막 시간이 모듈 위치에 더 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다. 모든 경우에 있어서, 양면형 모듈 후면의 조사강도의 불균일도와 관련된 불확도는 교정된 광대역 탐지기에서 제공하는 측정치보다 더 크다.

조사강도의 경우와 유사하게, 온도 불균일도는 다음과 같이 정의된다.

$$NU(\%) = 100 \times \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \quad (37)$$

여기서 T_{\max} 와 T_{\min} 는 모듈 후면에서 측정한 최대와 최저 온도를 나타낸다. 그림 85(아래)는 온도 불균일도에 해당하는 박스 플롯 어레이를 보여준다. 일반적으로 그 중앙값은 5% 미만이고, 모듈 A2 와 C3 에 대한 값은 질서정연하게 모듈 A1 값의 아래이다.

양면형 모듈 표면에 의해 시간 경과에 걸쳐 기록된 출력 밀도는 $H_\tau = \int_\tau G dt$ 에 따라 조사강도 G 측정으로부터 실험적으로 결정되는데, 식에서 첨자 τ 는 각각 시간 혹은 하루의 보고 간격 $\tau = h$ 혹은 $\tau = d$ 와 같은 특정 시간 간격을 나타낸다.

그림 86 은 227 일에 측정한 양면형 모듈 16-113-A1 의 시간당 전면 조사량 H_h^f 와 평균 후면 조사량 $\overline{H_h^r}$ 을 보여준다. 이 경우 평균 후면 조사량의 분율 $\epsilon_{\overline{H_h^r}}$ 은 이른 아침에 최대 43.9%에서 정오 UTC 에 최소 10.4%까지 다양하다. 위의 경우 표준편차 $\sigma_{\overline{H_h^r}}$ 로 측정한 분산(dispersion)은 각각 2.3%와 0.3%에 해당한다.

그림 87 의 백색 반사체와 흑색 패널의 비교는 423 일 모듈로부터 거리 $d=38.5\text{cm}$ 에 장착된 백색 반사체를 가진 양면형 모듈 16-113-A1 의 시간당 전면 조사량 H_h^f 와 평균 후면 조사량 $\overline{H_h^r}$ 그리고 447 일에 같은 거리에 장착된 반사체를 흑색으로 교체할 때 기록된 태양 조사량을 보여준다.

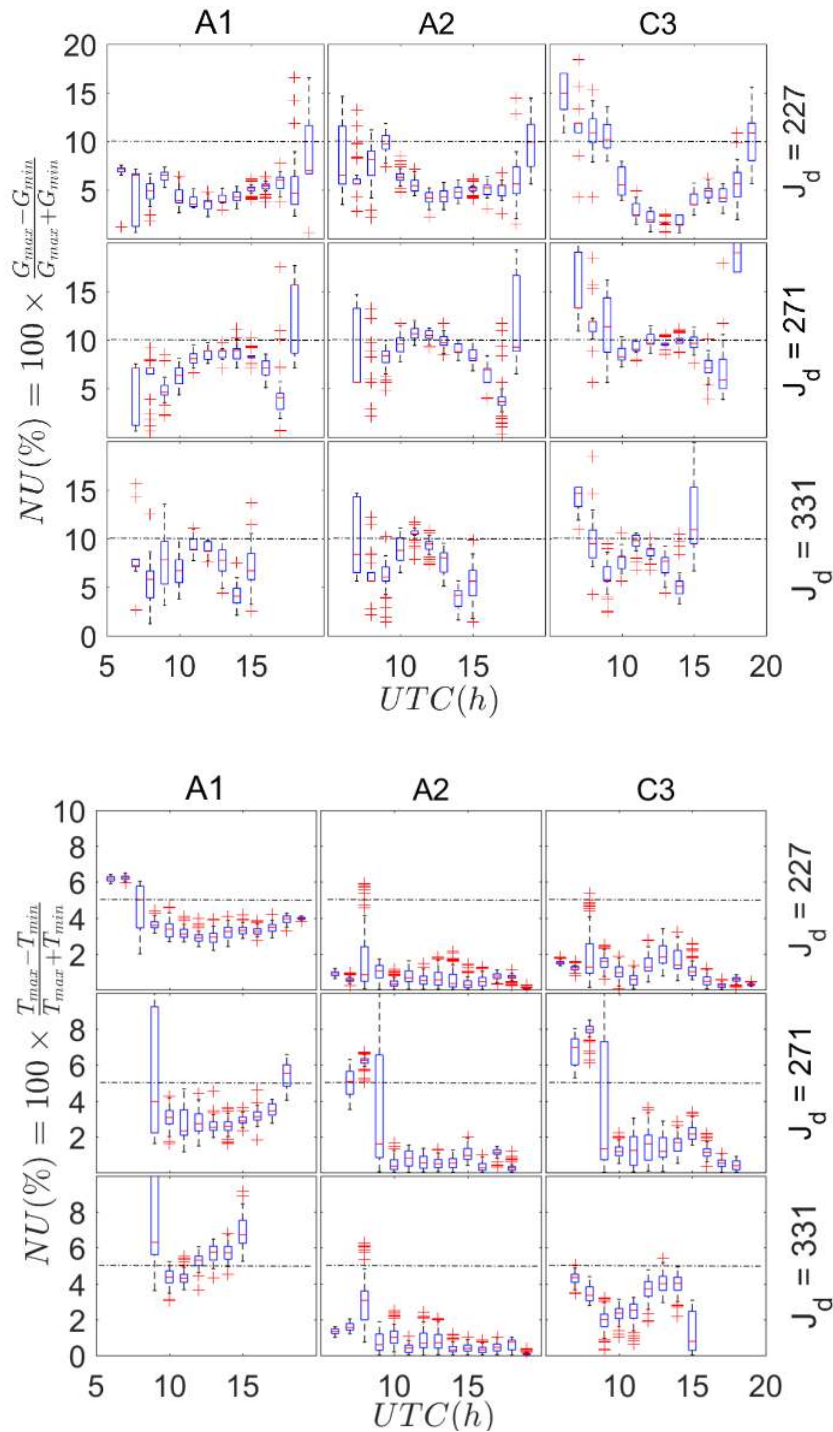


그림 9: 각각 A1, A2 와 C3 옆에 해당하는 양면형 모듈 16-113-A1, 16-074-A2 와 16-074-C3 의 조사강도 불균일도와 후면 온도 불균일도의 박스 플롯 매트릭스. 3 개 줄의 왼쪽 y 축 라벨은 2018 율리우스력의 요일 번호 J_d 227, 271 및 331 에 해당한다. 각 박스에서 중앙 적색 마크는 중앙 값을 나타내고, 맨아래와 맨 위 가장자리는 각각 25 번째와 75 번째 백분위수를 나타낸다. 위스커는 아웃라이어로 고려되지 않은 가장 극단의 데이터 포인트까지 확장되는데, 아웃라이어는 개별적으로 '+' 심볼을 사용하여 플롯한다.



백색 반사체로 얻은 평균 후면 복사에너지 분율 29.6%는 흑색 반사체에서 볼 수 있는 5.1%보다 훨씬 더 높다. 모듈 후면에 반사체가 없는 경우에 대해 수행한 계산을 반영하여, 하루 평균 불균일도는 하루 전체 동안 측정된 후면 조사강도와 그리고 백색 패널과 흑색 패널에서 얻은 26.0%와 8.7%를 통합하여 계산된다. 모듈과 반사체 사이 거리 75.5cm, 48.5cm, 38.5cm 에서 양면형 모듈 16-113-A1, 16-074-A2, 16-074-C3 의 전면과 후면의 일간 태양 조사량은 표 28 에 제시되어 있다.

모듈 후면에 반사체가 없는 초기 배열과 비교하여 백색 반사체와 흑색 패널 모두 조사강도의 불균일성을 증가시켜 순간 평균 값을 최대 50%까지 이르게 한다. 백색 반사체와 흑색 패널 사용 시 온도 분포의 불균일성은 큰 차이 없이 일반적으로 5% 미만으로 유지되었다. 일반적으로 백색 반사체와 단면형 기준 모듈의 표준 시험조건에서 등급을 매긴 양면형 모듈의 성능비 MPR 사이에는 일일 +15% 이상의 상대적 차이가 나타난다. 흑색 후면 패널이 장착된 양면형 모듈은 여전히 단면형 기준 모듈보다 성능이 우수한데, 상대적 차이는 5% 미만이다.

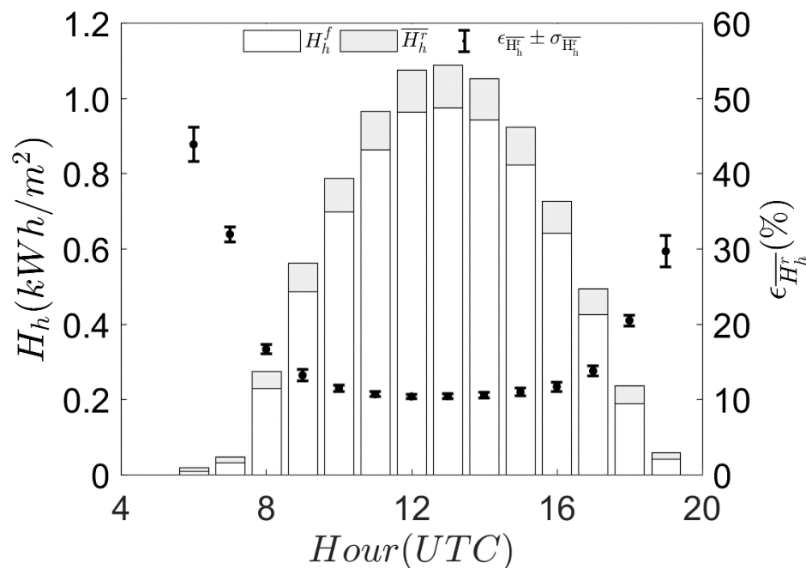


그림 10: 요일 번호 227 에서, 모듈 16-113-A1 에 가용한 태양 조사량. 왼쪽 y 축: 시간별 전면 조사량 H_h^f 와 평균 후면 조사량 H_h^r 을 적층한 컬럼 차트. 오른쪽 y 축: 평균 후면 조사량 $\epsilon_{H_h^r}$ 와 표준 편차 $\sigma_{H_h^r}$ 의 분율.

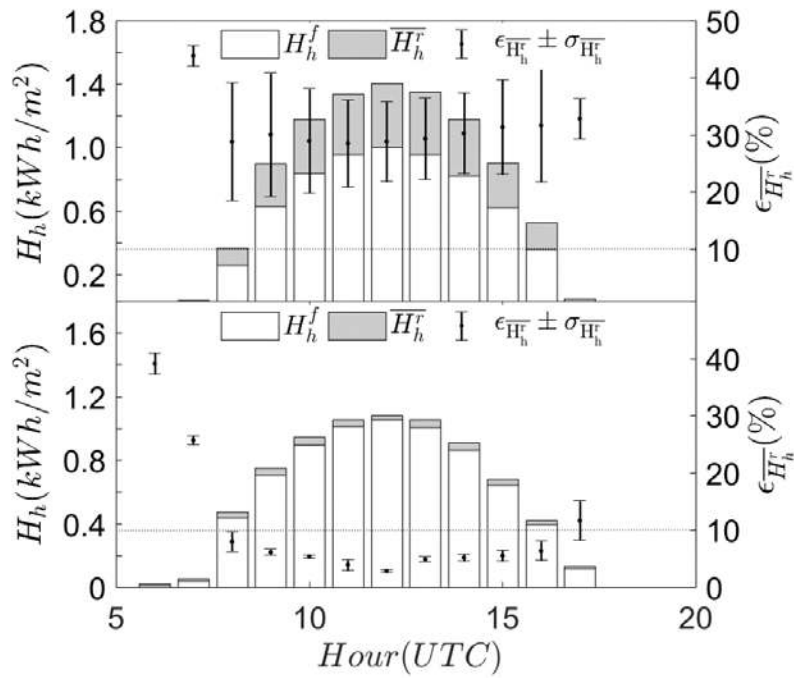


그림 11: 각각 요일 번호 423 과 447 에서, 양면형 모듈의 후면에 백색반사체(맨 위)와 흑색패널(맨 아래) 이 장착되었을 때 모듈 16-113-A1 에 가용한 태양 조사량. 왼쪽 y 축: 시간별 전면 조사량 H_h^f 와 평균 후면 조사량 \overline{H}_h^r 을 적용한 컬럼 차트. 오른쪽 y 축: 평균 후면 조사량 $\epsilon_{\overline{H}_h^r}$ 와 표준 편차 $\sigma_{\overline{H}_h^r}$ 의 분율.

표 6: 모듈 16-113-A1, 16-074-A2 와 16-074-C3 의 전면과 후면의 일간 태양 조사량.

전면		후면 A1		후면 A2		후면 C3		# day	d	반사체
H_d^f	$U_{H_d^f}$	\overline{H}_d^r	$U_{\overline{H}_d^r}$	\overline{H}_d^r	$U_{\overline{H}_d^r}$	\overline{H}_d^r	$U_{\overline{H}_d^r}$			
$(kWh \cdot m^{-2})$		$(kWh \cdot m^{-2})$		$(kWh \cdot m^{-2})$		$(kWh \cdot m^{-2})$			(cm)	
4.73	0.07	1.6	0.8	1.6	0.8	1.6	0.8	342	75.5	White
4.29	0.06	1.7	0.9	1.7	0.8	1.8	0.9	372	48.5	
6.5	0.1	2.7	0.7	2.7	0.7	2.8	0.8	423	38.5	
7.2	0.1	0.41	0.03	0.39	0.03	0.40	0.02	447	38.5	Black
7.5	0.1	0.6	0.2	0.5	0.2	0.6	0.1	506	75.5	
6.9	0.1	0.4	0.2	0.4	0.2	0.4	0.2	508	48.5	



7.8 미국: NREL 양면형 실험용 단일-축 트래킹 필드

(Silvana Ayala Pelaez)

7.8.1 양면형 시험에 대한 설명

미국 NREL 의 양면형 실험용 단일-축 트래킹 필드(Bifacial Experimental Single-axis Tracking Field: BEST)는 Colorado Golden 에 있는 NREL 의 South Table Mountain Campus 에 있다(39.7398341° N, -105.1727827° W). 사이트의 특성은 표 29 에 나와 있다.

이 어레이는 트래커 각도 제한이 60 도인 10 줄의 단일-축 NexTracker 를 가지고 있다(그림 88). 5 가지 서로 다른 양면형 기술과 비교 목적의 단면형 기술이 현장에 배치되었다. 각각 72 개의 셀로 구성된 모듈(~1 m x ~2 m)은 1P 방향으로 설치된다. 지면 커버리지 비율(GCR)은 0.35 이다. 트래커의 허브 높이는 1m 이다. 이 지역의 지면은 유지 관리가 잘 되는 잔디이다. 2 번째와 3 번째 줄에 있는 다양한 어레이면 센서는 전면과 후면 조사강도를 측정한다. 센서의 위치는 그림 89 와 그림 90 에 강조 표시되어 있다.

기상 데이터는 NREL 의 Solar Radiation Research Laboratory 로부터 가용하며, 어레이로부터 100m 떨어진 곳에서 측정된다(39.742, -105.179, 1829 m 고도). 알베도 데이터는 어레이 자체에서 3 개의 알베도미터(Sunkitty 1-3)를 사용하여 측정하는데, 그 중 2 개는 광대역(CM22 와 Apogee 일사량계), 1 개는 기준 셀(IMT Solar)이다. 알베도미터는 GRI 및 GHI 측정값으로 데이터에 기록된다.

2 번째 줄 위치 5 에 "Hydra"(그림 91)라고 하는 맞춤형(custom) 모듈은 토크 튜브 음영 효과에 대한 실험을 수행하도록 설계되었다. 모듈에는 각각 5 개의 셀로 구성된 12 개의 스트링이 있으며, 수평 축을 따라 양쪽에 태빙되어 있고, 각 줄에는 정선박스 또는 기타 접속 연결이 있어 개별적으로 주소를 지정할 수 있다.

각 스트링에 대한 데이터 수집은 2019 년 12 월에 시작되었다. 그림 92 는 정규화된 누적 조사강도 분포에 대한 12 월의 전기적 다이어그램과 예비 결과를 보여준다.

2 번째와 9 번째 줄의 성능 데이터, 모든 전면 및 후면 조사강도 센서, 알베도계와 SRL 기상 데이터, 그리고 Hydra Custom 모듈 데이터를 포함한 양면형 필드에 대한 데이터는 2019 년 6 월부터 2020 년 4 월까지 DuraMAT 의 웹사이트에서 공개되었다[170].

에너지 측면에서 통합 양면형 이득, BG_E 는 다음과 같이 계산된다.

$$BG_E = 100\% \times \left(\frac{\sum E_{\text{bifacial}} / P_{\text{STC,bifacial}}}{\sum E_{\text{monofacial}} / P_{\text{STC,monofacial}}} - 1 \right) \quad (38)$$

여기서 E_{bifacial} 와 $E_{\text{monofacial}}$ 은 측정된 수율 값이고, 그리고 $P_{\text{STC,bifacial}}$ 와 $P_{\text{STC,monofacial}}$ 은 불투명한 소재로 커버한 후면을 가진 양면형 모듈에 대해 STC 에서 플래시 시험 측정된 전면 출력 등급이다. 그림 93 은 두 줄의 PERC 와 HJT 스트링에 대한 월간 결과를 보여준다. 여름 동안 HJT 는 고온으로 인해 PERC 기술을 능가한다. 10 월부터 기온이 내려가면 양면형 이득 격차가 줄어든다. 두 시스템 모두 같은 달부터 눈으로 인한 알베도 증가로 인해 양면형 이득이 증가한다.



표 7: BEST 양면형 필드 테스트 사이트의 특성.

정보	값	코멘트
시스템 크기	75 kW _p	20 개 모듈 10 개 줄; 5 개 줄은 서로 다른 양면기술을 포함하고, 다른 5 개 줄은 비교 목적의 동일한 단면형 기술이다.
시스템 유형	단일-축 트래커	백트래킹 알고리즘을 가진 Nextracker 트래커.
사이트 알베도	26%	연 평균. 사이트에 있는 알베도계로 1-분 측정 가능
양면형 이득	8.9%	Jun 2019 ~ April 2020 사이로부터의 1-분 데이터에 기반
장착 높이	1.5 m	모듈의 회전 축
어레이 방위각	180 deg	
지면 커버 비율	0.35	
모듈 양면형 계수	73.14%	5 서로 다른 기술, 4 개의 PERC 는 65~75%, 하나의 HJT 는 90%
어레이 배열	1P	
전기적 정보	줄의 직류 출력, kWh, V_{DC} , I_{DC} , 모듈의 DC 출력	높은 정확도 (0.5%) 직류 스트링 모니터링. 각 모듈(SolarEdge)에 대해 모듈 수준의 전력 전자 장치
추가 데이터	후면 조사강도, 알베도미터, 모듈 온도, 기상 데이터	필드에 걸쳐 9 개의 전면과 후면 어레이면 조사강도 센서. 3 번째 줄 모듈 4 에서 콜렉터 폭을 따라 4 개의 후면 방향 기준 셀. 3 번째 줄 모듈 10 에서 2 개의 후면 방향 광대역 조사강도 센서 (CM11 와 Apogee 일사량계), 각각 모듈의 동과 서쪽 가장자리에 위치. 필드에 걸쳐 모듈 온도 센서. CM11, IMT Solar 기준 셀과 Apogee 일사량계 위치에서 측정된 알베도. SRRL 에서 100 m 이하에서 가용한 고품질의 기상 데이터. 양면형 2 번째 줄에 대한 풀 데이터를 가진 Duramat.org 에서 가용한 시계열.



그림 12: 단일-축 트래커 테스트베드 (NREL 양면형 모듈과 시스템 성능 모니터링 프로젝트).

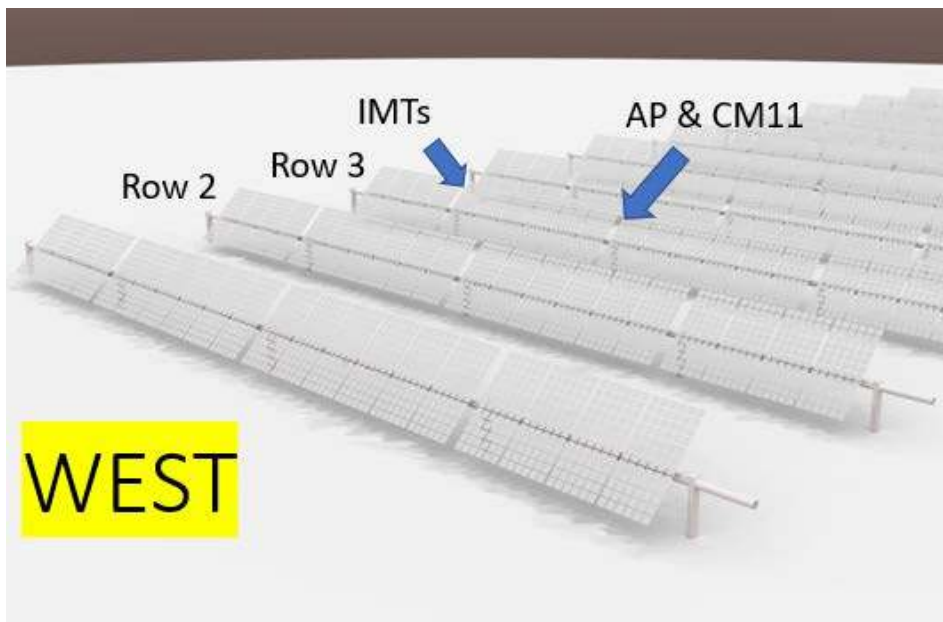


그림 13: 3 번째 줄에 있는 후면 조사강도 센서의 위치와 함께 2 번째와 3 번째 줄을 보여주는 어레이 개략도.



2 photodiode sensors



2 broadband pyranometers



4 reference cells

그림 14: 3 번째 줄에 있는 전면과 후면 조사강도 센서의 위치.



그림 15: NREL 양면형 필드의 중간에 장착된 12 개의 개별적 주소 지정 가능한 스트링을 가진 Custom 모듈.

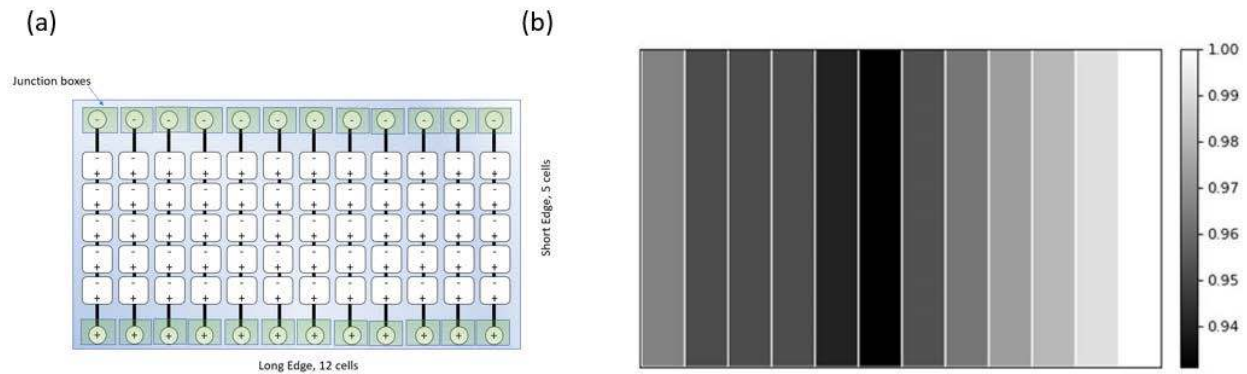


그림 16: (a) 12 개의 개별적 주소 지정 가능한 스트링을 가진 Custom 모듈 의 다이어그램. (b) 12 월 동안 정규화된 누적 조사강도 분포.

어레이에서 예상되는 양면형과 단면형 PERC 모듈의 성능은 SAM v2018.11 과 PVSyst 를 사용하여 모델링되었으며 현장에서 측정한 양면형 이득과 비교한 결과가 그림 94 이다. 후면 조사강도와 마찬가지로 간단한 시뮬레이션은 현장 성능 향상을 과소 예측하므로 데이터에 더 잘 맞도록 파라미터를 추가로 조정해야 한다. 그러나 SAM 대 PVSyst 결과는 대부분의 기간 동안 서로 일관성을 유지한다. 또한 그림 94 는 현장에서 전면과 후면 조사강도 측정으로부터 계산된 양면형 이득을 보여주는데, 이는 양면형 이득과 더 좋은 상관관계를 보여준다. 이는 현장 시스템에서 어레이 전면과 후면 조사강도 측정의 중요성을 강조한다[96].

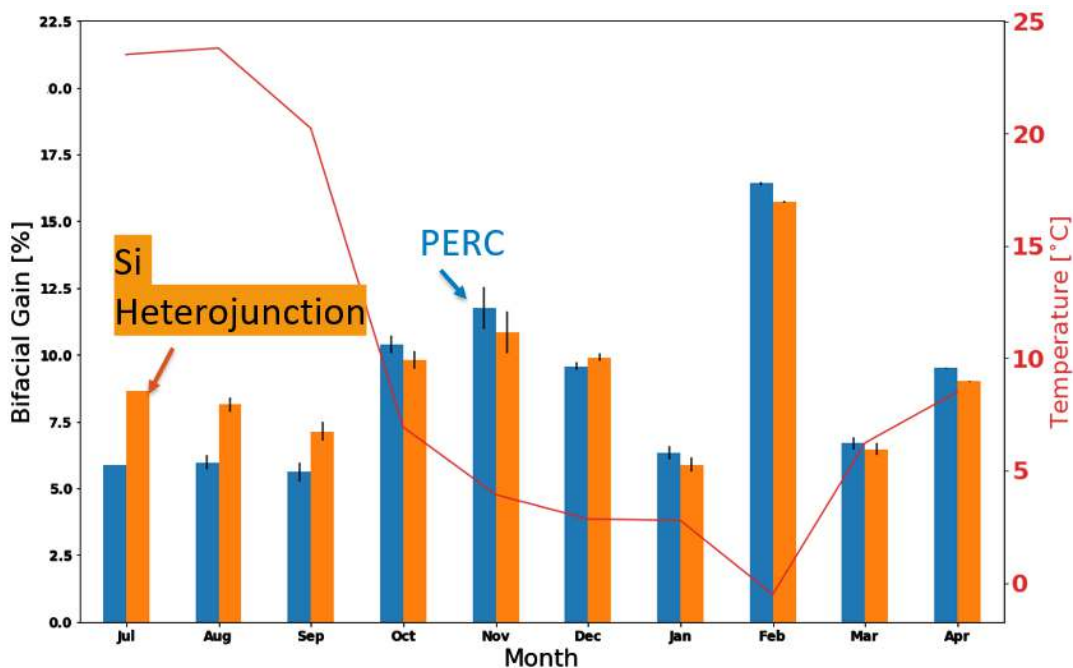


그림 17: 2 개의 PERC 기술과 1 개의 실리콘 이종접합 기술에 대해 6 개월간 수집된 데이터로부터의 월간 양면형 이득. 10 월 초 전과 후에 온도와 눈의 교차 영향을 볼 수 있다.

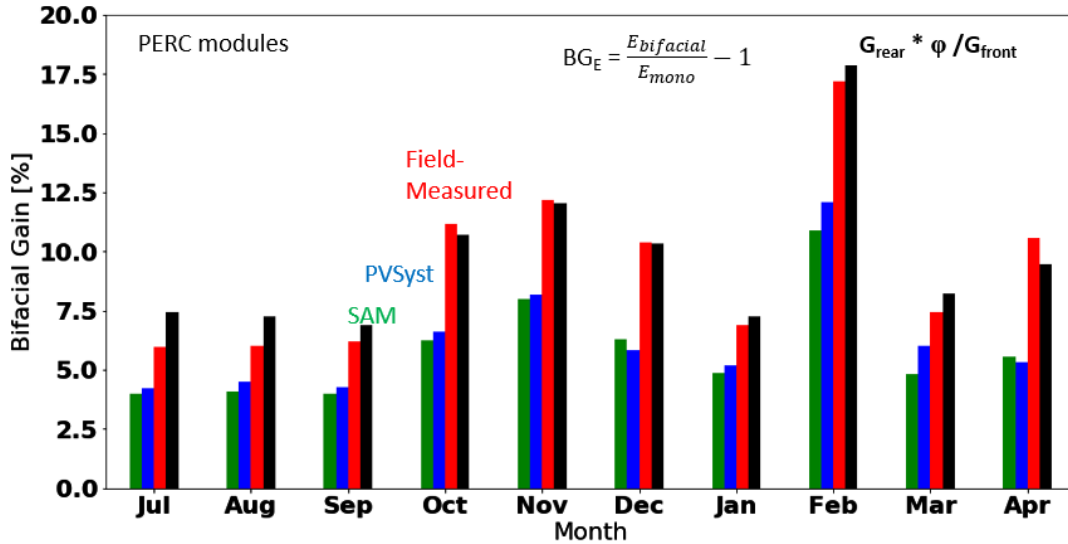


그림 18: SAM 과 PVSyst 으로 모델링한 양면형 이득 대비 필드 측정 양면형 이득(적색). 흑색은, 측정된 전면과 후면 조사강도로부터 예측된 양면형 이득 플롯으로 성능에서 필드 측정 양면형 이득과 좋은 상관관계를 보여준다.

7.9 스웨덴: Piteå 에 있는 RISE 양면형 테스트 사이트

(Mattias Lindh, Anna Malou Petersson)

7.9.1 양면형 시험에 대한 설명

양면형 테스트 사이트의 이름인 Solvåg(Sunwave)는 소나무로 둘러싸인 잔디밭을 가로질러 감아도는 태양광 어레이의 설계를 반영하는데, 모듈의 방위각과 기울기는 어레이에 따라 다르다(그림 95 참조). 솔라 파크는 현지 전력회사인 Pite Energi 를 거쳐 지방 자치체가 소유하고 있는데, 스웨덴 아북극의 Piteå School of Music(65.3°N, 21.5°E)에 위치해 있다. 이 사이트는 PiteEnergi, Norut, Luleå University of Technology 와 Piteå Science Park 간 지역 협력의 결과물로서 2018 년 7 월 스웨덴 에너지부 장관이 발족을 선언한 곳이다.

Solvåg 솔라 파크는 도시 조경에 통합되어 있으며 일반인들의 현장 방문을 독려하기 위해 모듈을 따라 나무판자 산책로가 설치되어 있다. 태양에너지 연구(RISE 를 통해)와 건축 설계를 혼합하고 있는 이 사이트의 특징은 맞춤형 목재 마운팅 랙에 반영되어 있다.



그림 19: 2018 년 3 월 Solvåg 솔라 사이트의 조감도. 적색 화살표는 북쪽을 나타내고, 청색 원은 직접 음영과 관련 이슈를 제한하기 위해 잘라진(2018 년 9 월) 나무를 표시한다. Photo: Mikael Sundqvist (P-town Productions).

Piteå 는 최북단에 있기 때문에 태양 고도가 낮고 태양 방위각은 긴 여름 동안 나침반의 거의 모든 지점에 걸쳐 있다. 11 월부터 1 월까지의 매우 짧은 겨울 동안, 태양은 지평선 위로 거의 떠오르지 않는다. Piteå 의 연평균 기온은 약 1°C 이고 눈은 1 년 중 5~6 개월 동안 땅을 덮고 있다.

양면형 모듈의 수치 모델과 실험적 테스트에 따르면 이러한 조건은 온대의 중간 위도 위치와 비교하여 다른 설치 방향이 필요하다는 것을 시사한다. 그러나 실제 시행을 기반으로 발간된 데이터에는 매우 제한된 범위의 테스트 방향만 포함되어 있다. Solvåg 현장에서의 연구는 높은 위도에서 양면형 모듈에 대한 다양한 방향의 선별이 가능할 수 있도록 이 방향의 범위를 확장하기 위한 것이다.

또한, 에너지 생산에 알베도 측정을 결합함으로써 눈에 의해 높아진 알베도가 에너지 생산에 미치는 영향과 감시 카메라와 이미지 분석을 통해 눈이 모듈을 가리는 영향을 연구하였다. 이를 위해 모듈 수준에서 에너지 생산량과 풍속, 주변 온도 및 글로벌 수평면, 전면과 후면 어레이면 조사강도(선택된 모듈에 대해)와 같은 환경 요인을 지속적으로 모니터링하였다. 또한 목적에 맞게 구축된 모바일 장비를 사용하여 간혹 알베도 측정을 실시했으며, 모바일 장치를 사용하여 모든 모듈의 어레이 전면과 후면 조사강도 측정을 수행하였다. Solvåg 양면형 테스트 사이트의 기술적 세부사항은 표 30 에 제시되어 있다.



표 8. Solvåg 양면형 테스트 사이트의 기술적 상세.

특징	설명	코멘트
설치된 용량	33.9 kW _p	전면 STC 등급 기반
태양광 모듈	Prism, Bi60-362BSTC	117 개, 전면 STC 출력 290 W; 프레임없는 유리/유리.
인버터	SolarEdge	옵티마이저를 통해 모듈 수준 모니터링
장착 랙	Wooden "lounge chair" with adjustable inclination	이 사이트용의 맞춤 설계
눈 커버리지 탐지용 감시 카메라	Hikvision, DS-2CD2655FWD-IZS	4 대의 카메라가 어레이의 다른 부분(전면과 후면)을 모니터링
모듈 경사	0 to 90°	
모듈 방위각	0 to 98° and 171 to 360°	N = 0°, 시계방향 증가
사이트 토폴로지	Grass/Urban	주위 소나무와 건물이 있는 잔디 필드
글로벌 수평면 조사강도 센서	Kipp & Zonen, SMP10-A Mencke & Tegtmeier, Si-01TC	수평 장착; 1 개의 class A 일사량계와 1 개의 Si-기준 셀
전면과 후면 어레이면 센서	Mencke & Tegtmeier, Si-420TC & Si-01TC and Hukseflux, SR05-D1	Si-기준 셀 (선택된 모듈을 계속해서 측정); class C 일사량계, 2 pieces (어떤 모듈에 대한 수시 측정)
주위 온도 센서	Mencke & Tegtmeier, Ta-V-4090	Pt-1000, 2 개 부품
풍속 센서	Thies, Vwind-420	풍속계
알베도 측정	Hukseflux, SR30-D1	가열식 class A 일사량계, 2pieces

7.9.2 양면형 성능 결과의 개요

Solvåg 의 에너지 생산량, 센서, 카메라 데이터는 아직 완전히 분석되지 않았다. 아래에 소개된 2019 년과 2020 년의 예비 결과는 연간 수율에 대한 방향의 중요성, 모듈 기울기에 대한 눈 그림자의존성, 그리고 알베도와 조사강도 측정에 대한 이해의 중요성을 보여준다. 현장 측정 결과 2019 년은 연평균 기온(3.0°C)과 최대(34.9°C) 면에서 평년보다 따뜻했다. 그럼에도 불구하고, 현장 감시 카메라의 사진에 따르면 약 6 개월 동안 눈이 땅을 덮었다.

Solvåg 에 설치된 모듈의 방향은 그림 96(a)의 마커 위치에서 볼 수 있듯이 불균일하게 분포되어 있다. 안타깝게도, 남쪽에서 동쪽으로의 데이터가 누락되어 분석에 어려움을 겪고 있다. 그림 96(b)에서와 같이, 방향의 불균일한 분포는 2019 년 모듈의 전면 STC 출력으로 대표되는 여러 모듈에 대한 연간 수율에 있어 그 분포가 단순하지 않은 결과를 초래한다. 설치된 모듈의 전면 STC 출력은 정상적으로 분포되며(설치 전 플래시 테스트, $P = 290.1 \pm 0.7$ W), 수율 분포는 고르지 못한 방위각의 스프레드에



의해 생긴 결과이다. 경사의 영향으로부터 방위각을 분리하기 위해서는 보다 상세한 다변량 통계 분석이 필요한 것으로 보인다.

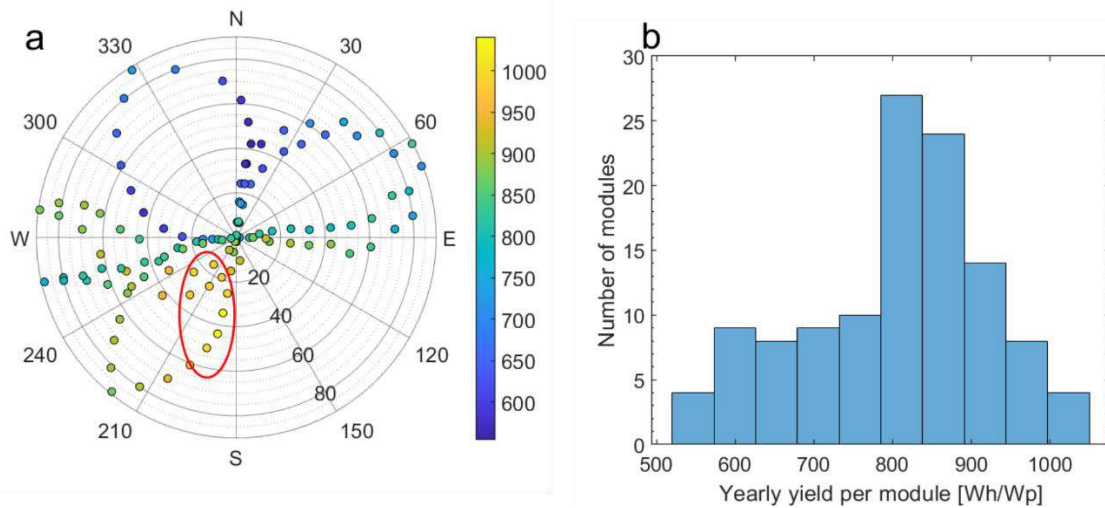


그림 20: (좌) 각각 극축과 방사상 축으로 나타낸 방위각과 경사각을 가진 모듈 방향의 분포. 각 마커는 하나의 개별 모듈을 나타내고, 컬러는 전면 STC 출력 등급 (Wh/Wp)에 대한 연간 수율에 해당한다. 적색 타원은 수율에 최적의 방향을 나타낸다. (우) 2019년 모듈 수율의 히스토그램.

그림 96(a)의 마커 색상은 연간 수율이 방위각과 경사도에 따라 달라지며 방위각이 가장 중요한 변수임을 보여준다. 남향 모듈은 동향과 서향 모듈보다 질적으로 성능이 우수하며, 동과 서향 모듈은 북향 모듈보다 우수한데, 이는 모든 경사각에서 명확한 추세이다. 연간 수율이 가장 높은 방향은 그림 96(a)에서 적색 타원으로 표시되어 있다. 성능이 대등한 2019년 2개의 챔피언 모듈은 방위각 190°에 경사각이 각각 35°, 45°이다.

Solvåg 솔라 사이트는 인근 소나무와 라운지 의자 장착 랙의 음영에 의해 영향을 받는다는 점을 유념해야 한다. 또한 어레이의 레이아웃은 주변 모듈에 의한 음영을 나타낼 수도 있다(그림 97). 음영 영향은 복잡하여, 한 해 동안 모듈마다 다양한 범위와 방식으로 영향을 받는다. 여기에 제시된 결과 분석에서 나무, 장착 랙과 인근 모듈의 직접적인 음영 효과는 제외되었다.

모듈을 덮고 있는 눈과 같은 다른 종류의 음영(현재는 모듈을 덮고 있음)의 영향을 2019년 1월부터 5월까지 연구했으며, 예비 결과는 36th European PV Solar Energy Conference and Exhibition에서 발표되었다[171]. 요약하면, 그림 97에서와 같이 유사한 방위각(204~239°)과 다양한 경사각(0~90°)을 가진 1개 그룹의 모듈이 선택되었다. 일일 분해능으로 모듈은 기본적으로 완전히 눈으로 덮이거나 혹은 완전하게 눈이 없는 경우가 되는데, 그림 98에서와 같이 연구 기간의 약 5%에 해당하는 요일에는 부분적으로 눈에 덮여 있었다.



그림 21: Solvåg 에서의 선택된 섹션의 사진. 각 모듈의 아래에 경사각이 표시되어 있다.

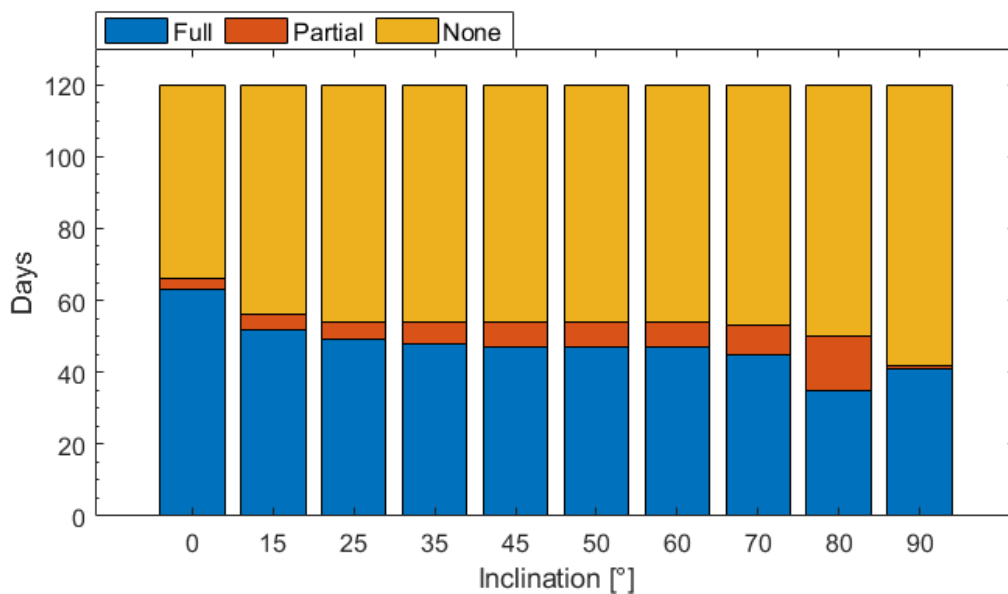


그림 22: 서로 다른 경사각의 모듈에 대해 2019년 1월에서 4월까지 눈으로 덮이거나 덮이지 않는 요일의 수.

이러한 이분법의 눈 덮임(snow coverage) 거동은 눈의 제거 프로세스를 관찰하여 이해할 수 있다. 경사도가 25~90°인 모듈에서는 슬라이딩이 지배적인 모드이지만, 경사도가 낮은 모듈에서는 눈이 녹아 없어지므로 상당히 더 느린 프로세스가 된다. 흥미롭게도, 슬라이딩은 빙점하 온도에서도 발생했는데, 이는 잠정적으로 후면 조사량에 의한 모듈 가열 때문이다.

2월과 3월 동안 에너지 생산량은 모듈 경사각 25~90° 범위에서 유사하였다. 그러나 그림 99에서 볼 수 있듯이, 지금까지의 에너지 생산 관점에서 4월에는 35°와 45° 경사각 모듈이 다른 경사각의 모듈보다 성능이 더 좋아지기 시작하였다. 이러한 관찰은 그림 96a에서 보는 바와 같이 한 해의 남은 기간 동안 남향 방향 모듈에 유효하다.

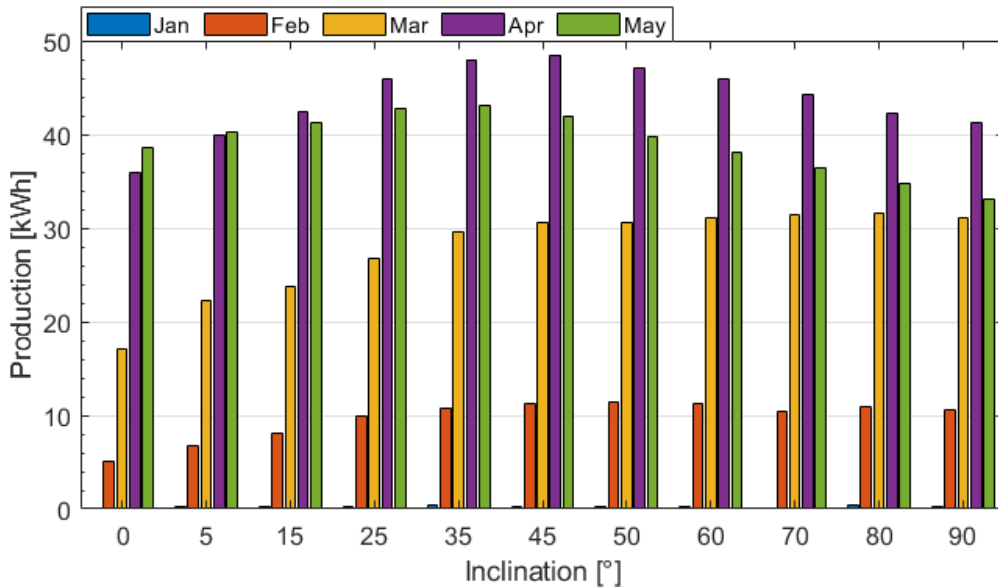


그림 23: 2019 년 1 월~5 월 선택된 남향 모듈의 월간 에너지 생산.

Solvåg 현장에는 단면형 기준 모듈이 없기 때문에 양면형 이득을 신뢰성 있게 측정하기가 어렵다. 그러나 전면과 후면 어레이면 조사각도 측정값을 모듈의 전면과 후면의 변환 효율과 결합하면 예상되는 양면형 이득의 추정이 가능하다. 눈이 지면을 덮은 2020 년 2 월 중순에 알베도는 0.79 ± 0.02 이었다. 이 기간 동안 경사각 35°인 남향 모듈(방위각=190°)의 조사각도 측정은, 가장 맑은 날과 흐린 날 각각 $18 \pm 3\%$ 와 $30 \pm 5\%$ (2 시간 동안의 평균)의 양면형 이득이 있음을 보여주었다.

이러한 추정치는 한낮에 남향 모듈에서 나온 것임을 감안할 때 보수적이다. 그러나 특히 Solvåg 현장의 지상 커버 비율은 복수 줄이 있는 양면형 사이트에서 예상되는 것보다 더 낮다. 모듈의 방향뿐 아니라 풀과 눈의 알베도 차이와 같은 연중 변동하는 인자들을 반영하기 위해 양면형 이득의 분석을 일년 중 다른 시기까지 확장하고자 한다.

7.10 덴마크: Risø 양면형 테스트 사이트

(Nicholas Riedel-Lyngskær)

7.10.1 양면형 시험에 대한 설명

덴마크 Roskilde(55.6°N, 12.1°E)에 위치한 테스트 사이트는 European Energy A/S 와 Technical University of Denmark (DTU) 간의 협력 프로젝트이다. 공동 프로젝트의 목표는 양면형 태양광 시뮬레이션의 정확성을 검증하는 것인데, 알베도, 경사각, 피치 등의 다양한 설치 조건에서 양면형 성능을 조사하고, 새로운 양면형 기술을 시험하는 것이다.

이 현장의 시험 시설은 그림 100 에서 T1-T8 로 표시된 8 개의 수평 단일-축 트래커와 T9-T16 으로 표시된 8 개의 남향 고정 경사 구조 8 개로 구성된다. 16 개 하부구조(남향 장치 포함)는 모두 동일한 제조사의 HSAT 이지만 T9 에서 T16 까지는 남향에 고정 경사를 사용하도록 프로그래밍되어 있다. 수평에서 0°~60°의 기울기 각도가 가능하다. 각 하부 구조에는 단면형 혹은 양면형 모듈 88 개가 있다.



모듈 내의 셀 유형은 156 mm x 156 mm p-PERC 또는 하프 셀 p-PERC 이다. 각 하부구조의 88 개 모듈은 4 개의 스트링으로 나뉘며, 각 스트링은 22 개의 직렬 연결 모듈로 구성된다. 트랙커 2 개당 50 kW 듀얼 MPPT 인버터가 하나씩(즉, 스트링 8 개당) 있으므로 각 하부구조의 88 개 패널의 작동점은 단일 MPPT 에 의해 결정된다. 장점으로, 이 현장의 모든 하부구조는 유틸리티급 태양광 플랜트 설비의 것과 유사한 규모를 가지고 있다.

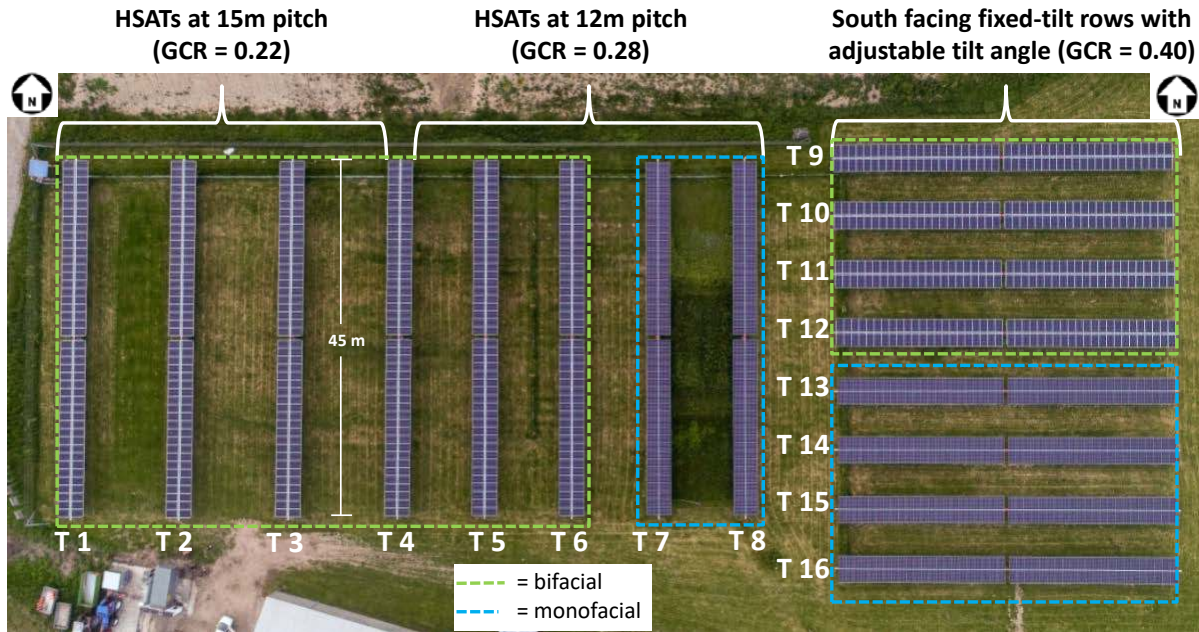


그림 24: DTU 에 있는 양면형 시험 시설의 항공 사진. 주석들은 트랙커 번호, 하부 구조 유형, 피치와 모듈 유형을 보여준다.

7.10.2 양면형 성능 결과의 개요

모니터링 시스템은 갈바닉 절연이 된 센서를 사용하여 64 개의 모든 스트링에서 1 분 샘플링 주파수로 최대출력점 전류(IMP)와 최대출력점 전압(VMP) 데이터를 제공한다. 데이터에 디지털 필터를 적용하여 인버터 전환 시 발생하는 변동과 같은 노이즈를 제거한다. C 등급의 광다이오드 센서뿐 아니라 위쪽과 아래쪽을 향하는 평탄한 A 등급의 일사량계로부터의 알베도 데이터가 현장에서 가용하다. 일사량계 기반 알베도미터의 1 년 데이터는 NREL 의 DuraMat 웹페이지에 공개되어 있다.

그림 101 은 고정 경사와 HSAT 스트링에 대한 알베도 실험을 보여준다. 이러한 실험의 단점은 실험용에서의 지면 커버가 균일한 현장 조건을 나타낼 수 있을 정도로 넓지 않다는 것이다. 즉, 어레이의 후면에 도달하는 상당한 양의 지면 반사광은 실험용 커버가 아니라 잔디로부터 온다. 토크 튜브 근처 셀의 경우, 지면 반사광의 약 80%가 실험 커버에서 나오지만, 이 양은 지상에서 가장 높이 위치한 셀(3 m)의 경우 50%까지 낮아질 수 있다고 판단하였다. 따라서 이러한 실험은 이런 국부적인 알베도 증가를 시뮬레이션할 수 있는 능력이 없는 축소 차수(reduced-order) 모델을 검증하는 데에



유용한 것으로는 입증되지 않았다. 그러므로 이러한 실험의 효용은 지반 개조를 통해 얻을 수 있는 에너지 생산 이득을 관찰하는 것이다.



그림 25: 고정 경사 스트링에 대한 지면 커버(알베도) 실험(좌)과 HSAT 스트링에 대한 등가 실험(우).

그림 102 는 2019 년 7 월부터 9 월까지 사이트의 모든 양면형 어레이에서 기록된 일간 양면형 이득을 보여준다. 24 개의 개별 양면형(6.5 kW) 스트링의 데이터가 그림에 표시되어 있다. HSAT 단면형 기준 시스템(T7 과 T8)의 피치는 12 m 이다. 따라서 백색 방수포와 자갈이 놓인 T2 를 제외하고 15 m 피치를 가진 시스템의 양면형 데이터는 제거되었다. 데이터 포인트는 주어진 지면 커버와 하부구조에 대한 일평균 양면형 이득을 보여준다. 오차 막대는 동일한 지면 커버에서 여러 스트링을 테스트할 때 일별 양면형 이득의 표준 편차를 나타낸다. 일일 DNI 선량이 $< 1 \text{ kWh/m}^2$ 일 때 확산 조건에서 가장 높은 양면형 이득이 발생한다. 표 31 은 3 개월 동안 관측된 양면형 이득의 요약이다. 잔디 위에 있는 HSAT 시스템의 7.2% 양면형 이득이 동일한 알베도에 고정 경사 시스템의 5.9% 상승에 비해 높은 것은 HSAT 시스템은 GCR 이 낮아 자기 음영의 영향을 덜 받기 때문일 것이다.

A 등급 일사량계에 의한 광대역 DHI, DNI 과 GHI 측정은 양면형 테스트 현장에서 약 400 m 남쪽에 위치한 캠퍼스의 태양 복사 모니터링 스테이션에서 이루어진다(그림 103, 왼쪽). 이러한 고품질의 조사강도 측정은 주변 온도 및 풍속과 함께 테스트 사이트의 태양광 시뮬레이션용 기상 파일을 만드는 데 사용된다.

[172]에서 현장 기상 데이터는 8 개의 서로 다른 양면형 성능 도구에 대한 입력으로 사용되었고, 필요할 때 모든 시뮬레이션의 출력을 현장 측정과 비교하였다. 본 연구는 후면 어레이면 조사강도 모델링을 측정 결과와 검증하는 데 중점을 두었지만(그림 103, 오른쪽), DC 출력과 양면형 이득의 비교도 제시되어 있다. 그림 104 는 이 보고서에서 앞서 설명한 2D view factor 방법을 구현하는 네 가지 소프트웨어 도구의 한 달 동안의 결과를 보여준다. 회귀 분석의 x 축은 두 개의 일사량계 측정값의 평균을 보고한다. 즉, 어레이의 상단과 하단에서 측정한 일사량계 평균이 고정 경사 시스템에 사용되고 HSAT 시스템의 경우에는 동쪽과 서쪽에 장착된 일사량계의 평균이 사용된다.

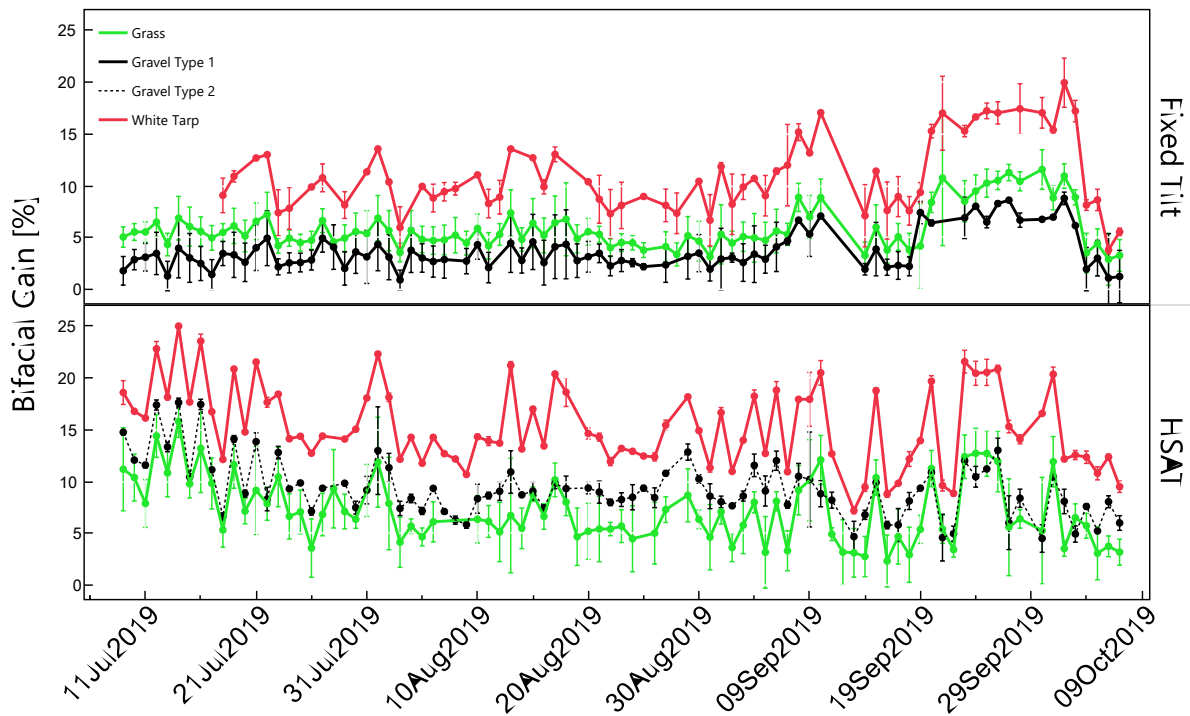


그림 26: 25° 고정 경사 (위)와 HSAT (아래) 서브 구조에 장착된 35 개 6.5 kW 양면형 PERC 시스템 각각의 일간 양면형 이득. 2019 년 기간 동안 3 개의 서로 다른 지면 커버의 시험 결과.

표 9. Risø 사이트에서 3 개월의 시험 동안의 양면형 이득 요약.

서브 구조	지면 커버	GCR	평균 알베도 (%)	시험한 스트링	평균 양면형 이득 (%)	양면형 이득 표준 편차 (%)
25° Fixed Tilt	Natural Grass	0.40	22%*	8	5.89	2.65
	Gravel Type 1	0.40	20%†	2	3.73	2.24
	White Tarp	0.40	60%*	2	11.02	3.82
HSAT	Natural Grass	0.28	22%*	8	7.23	3.84
	Gravel Type 2	0.22	26%†	2	9.32	2.87
	White Tarp	0.22	60%*	2	15.37	3.98

* 일사량계로 알베도 측정.

† Si 광다이오드(기준 셀)로 알베도 측정.



그림 27: (좌) 캠퍼스 Solar radiation monitoring 스테이션에서 측정된 법선면 직달, 수평면 확산과 글로벌 수평면 조사량. (우) 고정 경사 어레이 T11 의 후면에 설치된 등급 C 일사량계.

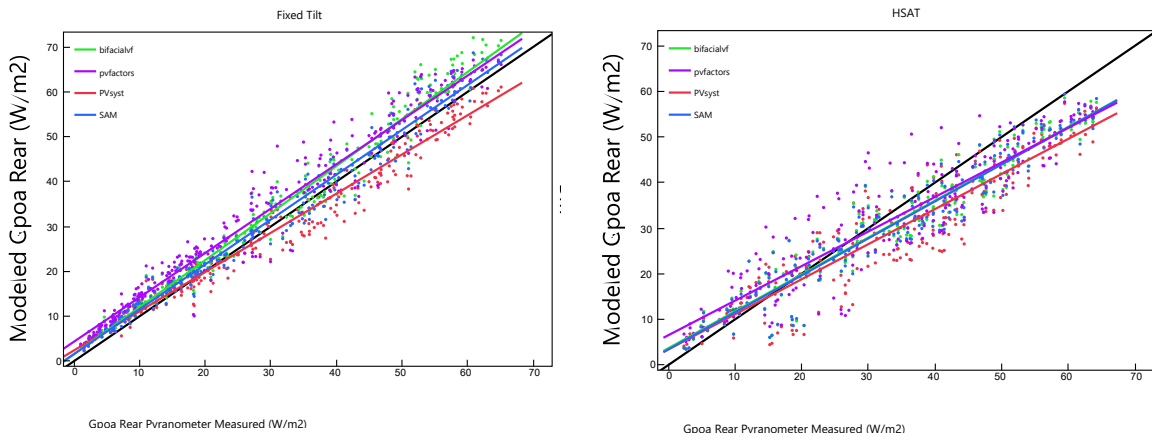


그림 28: 두 가지 시스템 유형(고정 경사와 HSAT)을 시뮬레이션하는 네 가지 view factor 모델에서 모델 및 시뮬레이션된 어레이 후면 조사강도의 회귀 분석. 1:1 라인은 검은색으로 표시되어 있다. 각 플롯에는 2020년 3월 한 달 분량의 데이터가 제공되어 있다.

고정 경사 시뮬레이션의 결과가 단일-축 트래커 시뮬레이션보다 측정에 더 부합한다. 이는 고정 경사 시스템보다 view factor 가 더 동적으로 변경되도록 하는 트래커의 롤링 각도 변경과 관련이 있을 수 있다. 평균 바이어스 오차(MBE), 평균 절대 오차(MAE)와 RMSE(평균 제곱근 오차)는 표 32 에 나와 있다. 트래커 시뮬레이션의 MBE 가 음수이면 모델이 측정값을 과소평가하고 있음을 의미한다. 센서가 가장 가까운 어레이 가장자리로부터 최소 10 m 떨어진 곳에 위치하기 때문에 가장자리 밝기 효과가 이러한 과소평가의 원인으로 간주되지 않으며, 문헌 [94]에 따르면 이 거리는 "반 무한(semi-infinite) 가정을 나타내기에 충분해야 한다. MAE 는 고정 경사 시뮬레이션의 경우 2.6~5.0 W/m² 이고 트래커 시뮬레이션의 경우 4.8~6.7 W/m² 이다. 청명일 전체(즉, 전면과 후면) 조사강도를 고려할 때, 이 오차는 양면형 모델링 체인에 대략 0.5%의 불확도를 야기할 것이다.



표 10. 그림 104 에 있는 회귀분석의 피팅 적합도 요약.

소프트웨어	고정 경사			수평 단일-축 트래커(HSAT)		
	MBE (W/m ²)	MAE (W/m ²)	RMSE (W/m ²)	MBE (W/m ²)	MAE (W/m ²)	RMSE (W/m ²)
bifacialvf	2.9	3.4	4.3	-2.9	4.8	5.8
pvinfos	4.0	5.0	5.7	-1.8	6.4	7.6
PVsyst	-1.1	3.0	3.8	-4.5	6.7	7.9
SAM	1.6	2.6	3.3	-3.0	4.8	5.8

그림 105 는 천연 잔디 위의 테스트 현장에서 두 가지 시스템 유형(HSAT = T6, 고정 경사 = T12)에 대한 월별 시뮬레이션 및 측정된 양면형 이득을 보여준다. 측정된 데이터는 제조업체 명판 값과 광조사(light soaking) 전 DTU 에서 측정된 실내 플래시 IV 측정의 두 가지 방법으로 정규화된다. 시뮬레이션된 양면형 이득은 전면 G_{POA} 대비 후면 G_{POA} 의 비율로 계산되며, 모듈 양면형 계수(0.67), 후면 불일치(0.025)와 구조적 음영(0.07)에 대해 조정된다. 즉, 여기에 표시된 시뮬레이션된 양면형 이득을 얻기 위해 전기적 모델링이 사용되지는 않는다. 고정 경사 시뮬레이션에서 얻은 양면형 이득은 실내 플래시 IV 측정하여 정규화된 모든 DC 출력 대비 $\pm 1\%$ 이내이다. 모든 경우에서 측정된 양면형 이득은 플래시 측정으로 정규화될 때 시뮬레이션에 가장 잘 맞는다. HSAT 시뮬레이션 결과에서는 오류가 7 월에는 3%로 높지만 9 월에는 1%로 낮은 것으로 나타났다. 이는 측정된 양면형 이득이 DC 출력 측정에서 추출되기 때문일 수 있는데, 이 때 시뮬레이션된 값을 계산하는데는 어떤 전기적 모델도 사용되지 않는다.

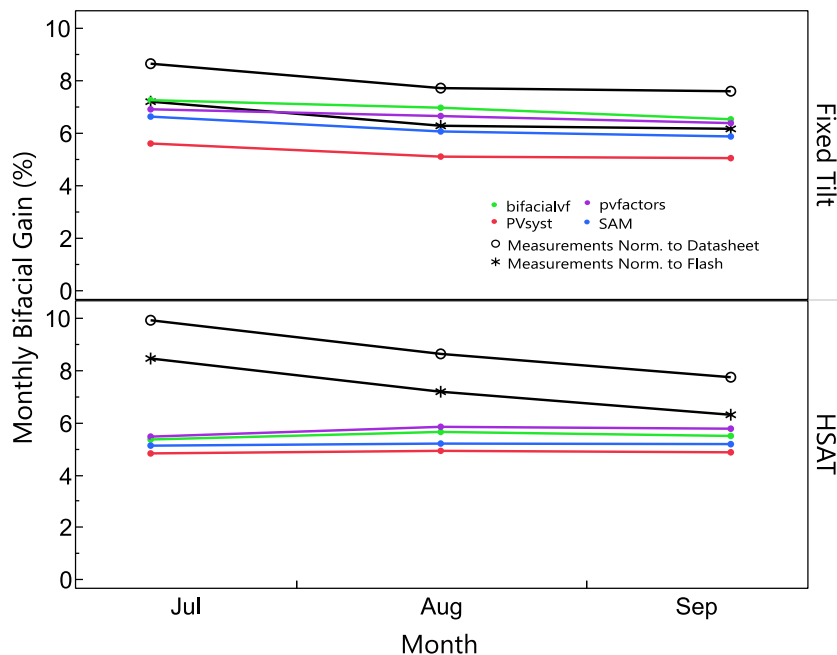


그림 29: 그림 102 에 나타난 3 개월 기간 동안 잔디 위의 2 가지 시스템 유형(고정 경사와 HSAT)의 시뮬레이션과 측정된 양면형 이득.



DTU 사이트는 4 개의 별도 패널에 라미네이션된 40 개의 대면적(156.25 cm²) 셀로 구성된 맞춤형 모니터링 장치를 포함하고 있다. 맞춤형(custom) 패널은 T5 의 4 개 위치에 설치되어 있으며, 2 개의 패널은 남쪽 가장자리에 있고 2 개의 패널은 중앙을 향해 있다(그림 104). 이 배열은 가장자리 밝기(edge-brightening) 효과를 조사하기 위해 선택되었다. 맞춤형 패널은 이동 가능하며, 따라서 [173]에서 수행한 것처럼 빛 강도의 불균일성과 그에 따른 전기적 불일치에 대한 후속 영향을 조사 가능하게 해 준다.

7.11 이탈리아: RSE 양면형 필드 테스트 사이트

(Giosuè Maugeri)

7.11.1 개요

Ricerca sul Sistema Energetico (RSE) 는 Gestore Servizi Energetici SpA 가 소유한 비영리 연구 단체이다. RSE 의 임무는 유럽연합의 연구 이니셔티브에 적극 참여하며 국가 에너지, 환경 및 경제 목표를 다루는 공익 연구개발 프로그램을 수행하는 것이다. RSE 는 이탈리아 영토에 설치된 태양광 발전소의 에너지 생산을 최적화하는 데 도움이 되는 고효율 저비용 평판형 태양광시스템 개발에 초점을 맞추고 있다(그림 106 참조). 자동 진단 도구에 기반한 새로운 운영 및 유지관리 전략에 대한 연구는 유럽 연구 프로젝트와 이탈리아 정부의 지원 틀 아래에서 진행된다.



그림 30: RSE 연구개발에 사용된 태양광 어레이.

7.11.2 양면형 시험에 대한 설명

시험 중인 양면형 시스템은 이탈리아 북부 Milan (45°28'35.7"N 9°15'41.2"E)에 위치하고 있으며 공칭 출력은 1.95 kW 이다. 태양광 시스템은 전체 스트링의 경사와 방위각을 바꿀 수 있도록 특별히 설계된 구조물 위에 설치되어 있다. 표 33 은 시험 중인 시스템의 주요 특징을 나열한 것이다.

태양광 테스트 플랜트는 균질한 밝은 회색의 콘크리트 위에 설치되어 있으며 알베도는 27%이다. 설치된 모니터링 시스템은 다음으로 구성되어 있다.

- DC 파라미터 모니터링용 1 유닛.
- 기상 데이터용 1 유닛.
- AC 전기적 파라미터 모니터링과 중앙 서버로 데이터 전송용의 1-미터 유닛.
- 2 개의 단결정 실리콘 기준 셀: 하나는 모듈 전면의 입사 일조량 측정용이고 다른 하나는 모듈 후면의 일조량 측정용이다. 두 기준 셀의 규격 IEC 60904-1-2 [47]에 따라 모듈의 더 낮은 측에 위치해 있다.
- 모듈 후면의 온도 측정용의 하나의 온도 탐침(probe).



표 11: 양면형 시스템 주요 특성.

태양광 모듈 특성		태양광 시스템 특성	
공칭 출력 P _{nom} (kW)	390	Plant ID	MI-GFV24
모듈의 개수	5	P _{nom} (kW)	1.95
최대 출력점 전압 V _{mpp} (V)	41.4	N°of PV module	5
최대 출력점 전류 I _{mpp} (A)	9.4	V _{mpp} (V)	207
개방전압 V _{oc} (V)	49.2	I _{mpp} (A)	9.4
단락전류 I _{sc} (A)	10.15	V _{oc} (V)	246
모듈 효율 Module Eff (%)	18.5	I _{sc} (A)	10.2
양면형 계수 (%)	70 ±5		
셀의 개수	72		

설치 상세 내용이 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해, 5 개 모듈 스트링의 경사와 지면 알베도를 주기적으로 바꾸어 다음과 같은 3 가지 시험조건을 만들었다.

- 시험 조건 1: 남향, 모듈의 경사각은 30°, 지면 알베도 27% (밝은 회색 콘크리트) (그림 107 왼쪽 참조)
- 시험 조건 2: 남향, 모듈의경사각은 15°, 지면 알베도 27% (밝은 회색 콘크리트)
- 시험 조건 3: 남향, 모듈 경사각 30°, 지면 알베도 10% (녹색의 합성 잔디) (그림 107 오른쪽 참조)



그림 31: 시험 중인 양면형 시스템; 옅은 회색 콘크리트 위에 30° 경사 남향 모듈 (좌); 합성 잔디 위에 30° 경사 남향 모듈 (우).

아래 논의하는 분석 결과는 5 개 모듈 스트링에 대해 6 개월 동안 모니터링한 것에 기반한 것이다. 이 6 개월의 기간은 일년에 걸쳐 일어날 수 있는 전체 기후 조건을 대표하지는 않는다. 그리고 모니터링한 배열은 필드에서 발견될 수 있는 무수한 경우의 제한된 사례만을 나타낸다. 그러므로 더 많은 조사 연구가 수행될 것이다.



7.11.3 양면형 성능 결과의 개요

모듈 후면의 일조량

그림 108 은 동일한 경사각과 방위각을 유지한 상태에서 알베도 감소가 모듈에 미치는 효과를 보여준다. 후면 입사 일조량에 정비례하는 감소가 뚜렷하다. 전면 입사 일조량의 함수로서 후면의 일일 입사 일조량의 추이를 분석하면 두 수량 간에 거의 선형적인 의존성이 나타나는데, 더 높은 기울기는 더 높은 수준의 알베도와 관련된다.

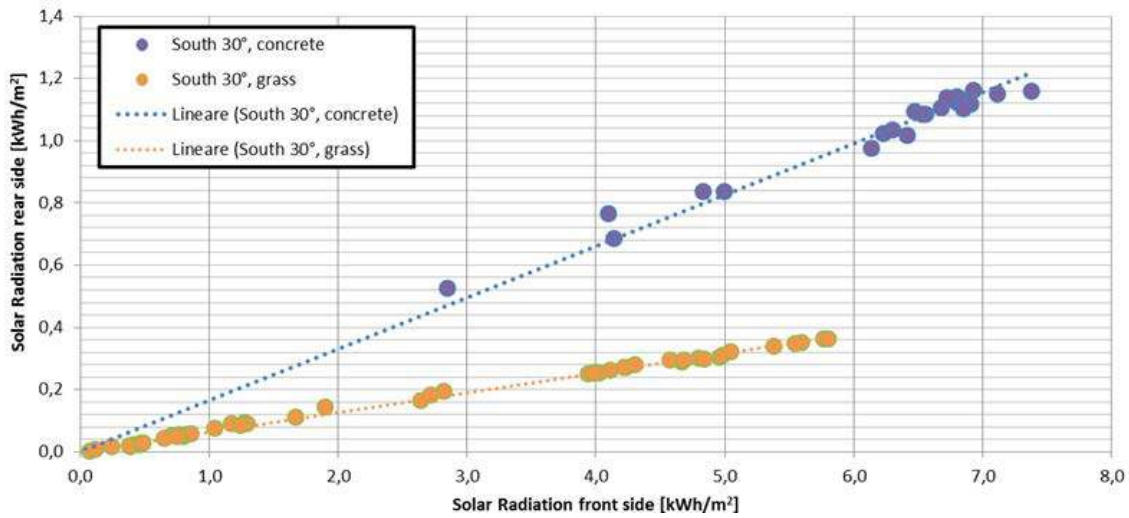


그림 32: 태양광시스템에서 지면 알베도의 변화가 있는 전면과 후면에 입사되는 일간 태양 일조량의 추이.

3 개의 시험 조건 분석은 후면 일조량 값에 균일도가 크게 부족하다는 것을 보여준다. 특정적으로 모듈의 위 가장자리에서 탐지된 평균 일조량은 모듈 아래 가장자리보다 40% 더 많다. 마찬가지로, 스트링의 중앙(오른쪽과 왼쪽)으로부터 가장 멀리 있는 모듈에서 탐지된 일조량은 중앙 위치에 있는 모듈의 일조량보다 평균 16% 더 높다. 그림 109 는 이 분석에서 사용된 시험조건 3 의 측정치를 보여준다.

88	81	73	70	68	69	70	70	71	66	71	72	74	76	80	<- rear side
893	893	893	881	881	883	886	886	885	873	876	877	868	867	867	<- front side
63	58	52	50	51	53	47	45	45	47	50	52	51	53	59	<- rear side
893	894	891	887	889	891	881	883	883	883	881	880	866	867	868	<- front side

<- position of the solar radiation sensors used for the period of monitoring

그림 33: 모듈 후면에 입사되는 태양 일조량 불균일도의 측정, 시험 조건 3, 남향, 30° 경사, 잔디.



양면형 시스템의 성능

표 34 는 각 시험 배열별로 RSE 양면형 시스템의 성능에 대한 결과를 보여준다. +

표 12: RSE 양면형 시스템에서 각 시험 배열별 모니터링 결과

시험 배열	AC 에너지 (kWh)	DC 에너지 (kWh)	전면 조사강도 (kWh/m ²)	후면 조사강도 (kWh/m ²)	후면/전 면 비율 (%)	성능 비 (%)	PR _{DC} * (%)
1) 남향, 30° 경사, 27% 지면 알베도 (콘크리트)	273.6	288.1	141.4	23.4	16.6	99.2	104.5
2) 남향, 15° 경사, 27% 지면 알베도 (콘크리트)	136.0	143.5	72.6	12.5	17.3	96.1	101.4
3) 남향, 30° 경사, 10% 지면 알베도 (잔디)	222.1	235.7	125.6	8.1	6.4	90.7	96.2

DC 성능비 (PR_{DC}) 는 태양광시스템으로부터 생산된 DC 출력의 손실에 대한 전체적인 효과를 강조하는데, 손실은 모듈 온도, 태양 일조량의 불완전한 활용, 그리고 구성 요소의 비효율 혹은 결함(스트링과 모듈 위의 어떤 음영 간의 비동조화) 때문이다.

에너지 성능 비교는 시험조건 1 에서의 지면 알베도 27%를 조건 3 에서 10%로 감소시키는 영향을 강조한다. 이 감소는 후면/전면 일조량 비를 16.6%에서 6.4%로 낮추는 결과로 이어지는데, 이는 다시 DC 성능비 (PR_{DC}) 를 104.5%에서 96.2%로 감소시킨다. .

그림 110 은 3 개의 시험조건 하에서 양면형 모듈 PR_{DC} 를 RSE 가 모니터링한 것 중에서 성능이 가장 좋은 단면형 모듈과 비교하고 있다. 이들 단면형 모듈은 남향으로 30° 고정 경사 구조물 위에 설치되어 있다. 모니터링 기간 동안의 평균 양면형 이득은 10%보다 약간 더 높다.

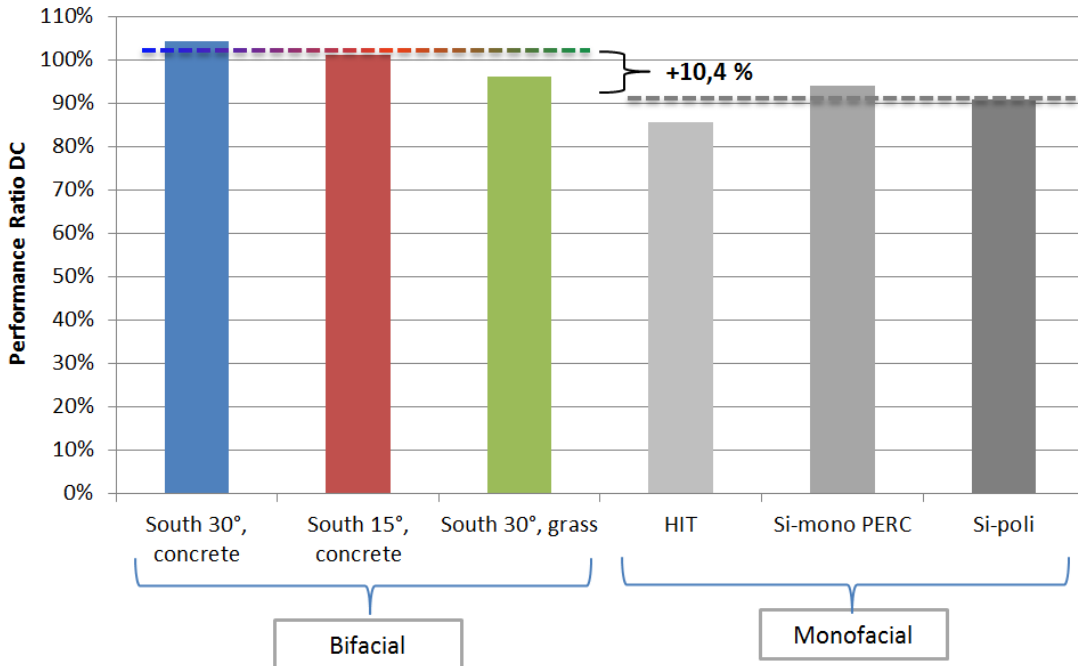


그림 34: 3 개의 시험 배열에서 양면형 모듈의 PRDC 와 RSE 에 의해 모니터링된 최고 성능의 단면형 모듈.

7.12 핀란드: TUAS 옥외 테스트 시설

7.12.1 양면형 시험에 대한 설명

TUAS 옥외 테스트 사이트는 핀란드 Turku 에 있는 Turku University of Applied Sciences(TUAS) 구내 옥상에 있다(60.4491°N, 22.2962°E). 그림 111 은 2017 년 6 월 TUAS 옥상에 설치된 테스트 시스템으로 Prism Solar 295Wp 양면형 모듈 4 개로 구성된 것이다. 시스템은 모듈 양쪽에 음영이 최대한 적게 발생하도록 설계된 자체 개발한 알루미늄 랙에 설치되었다. 지붕 표면은 핀란드의 상업용 옥상에서 흔히 사용되는 방수층인 역청질 멤브레인으로 알베도가 매우 낮다. 눈 덮인 겨울에는 알베도가 훨씬 높아질 것으로 예상된다. 같은 위치에 있는 또 다른 시스템은 남서향에 경사각을 위도와 같게 한 것으로 2 개의 양면형과 여러 개의 단면형 모듈이 설치되어 있다.

모듈 측정은 모듈과 DC 옵티마이저 사이에 연결된 DC-에너지 미터에 의해 이루어지며, 이 미터는 모듈을 최대 출력점 상태로 유지한다. 전압, 전류, 출력 및 에너지 판독값은 PI 3B+ 기반 DAQ 시스템에서 1 분에 한 번씩 모든 미터에서 동시에 읽는다. 정확한 시간을 보장하기 위해 전용 타임서버에서 측정에 대한 타임스탬프를 추가한다. 그런 다음 유선 이더넷을 사용하여 SQL 데이터베이스를 실행하는 서버에 데이터가 복사된다. 설치 전 모듈은 등급 AAA+ 솔라 시뮬레이터(그림 112)로 전류, 전압, 출력에 대한 특성을 분석한다(그림 112).

스펙트럼 플랫 등급 A 소자를 사용한 수평면 확산 조사강도(DHI), 법선면 직달 조사강도(DNI), 수평면 글로벌 조사강도(GHI), UV-E 및 장파 비(long wave ratio)를 포함한 태양에너지 자원 모니터링은 solar radiation monitoring 스테이션을 통해 현장에서 이루어진다. 맨 위에는 여러 개의 결정질 모니터링 셀들도 설치되어 있으며 RaspberryPi 3B+ 기반 DAQ 에 의해 매 초당 측정되는데, 평균 값은 매분 데이터베이스에 기록된다. 추가 환경 센서로는 모듈 온도 센서와 Vaisala 기상 관측소가 있다.



그림 35: TUAS 구내의 지붕에 위치한 옥외 테스트 사이트 (Turku University of Applied Sciences: TUAS), 핀란드 Turku (60.4°N, 22.3°E).



그림 36: (좌) 수평면 확산 조사강도 (DHI), 법선면 직달 조사강도 (DNI), 장착된 트랙커의 남쪽을 포함하는 태양광 조사강도 모니터링. (우) 모듈은 AAA+ 모바일 솔라 시뮬레이터로 특성을 분석한다.

7.12.2 양면형 성능 결과의 개요

Prism Solar의 동-서 어레이는 2017년 8월부터 데이터 수집을 시작해 지금까지 모니터링 중이다. 성능 분석은 2018년에 완료하고, 2019년에 발표되었다 [174]. 데이터를 분석한 결과, 서로 다른 평가 시나리오에 대해 양면형 이득이 평균 5%인 것으로 나타났다.

데이터는 또한 북유럽 조건에서 동-서 수직으로 설치(EWV)한 모듈 유형의 장점을 보여주는데, 예를 들어 2월 동안 명판 출력의 75%에 이르는 초기 피크 생산은 눈에 의한 높은 알베도 때문으로 간주할 수 있다. 일반적인 단면형 설치와 비교했을 때, 이러한 조건과 위도에서 단면형 모듈은 눈으로 덮여 생산량이 제로인 경우가 많다.

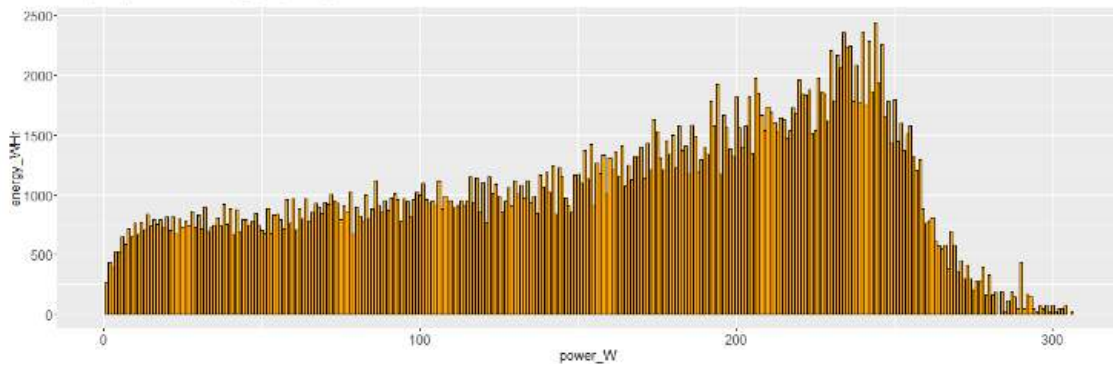
분석 결과는 주거용 건물에서의 자가소비에 대한 이점도 보여주었다. 이러한 어레이 유형의 이점은 표 35와 그림 113에서 볼 수 있다. 일반적으로 연중 대부분의 달 동안 EWV 어레이는 더 양호한 자가 소비 비율을 보여주었다.



표 13: 다양한 유형의 모듈과 어레이(3 kW 시스템)에서 해당 연도 기간 자가 소비 비율

	Profile 1		Profile 2		Avr of 8	
	MoF 1	Bifi 1	MoF 2	Bifi 2	MoF A	Bifi A
Jan	1.00	1.00	0.99	1.00	1.00	1.00
Feb	0.75	0.86	0.77	0.86	1.00	1.00
Mar	0.61	0.71	0.70	0.80	0.92	0.98
Apr	0.60	0.66	0.75	0.80	0.90	0.96
May	0.44	0.42	0.58	0.65	0.70	0.81
Jun	0.51	0.52	0.59	0.66	0.74	0.80
Jul	0.60	0.63	0.61	0.66	0.72	0.75
Aug	0.68	0.80	0.55	0.65	0.62	0.73
Sep	0.89	0.94	0.66	0.79	0.78	0.89
Oct	0.95	0.98	0.84	0.91	0.89	0.96
Nov	1.00	1.00	0.87	0.99	0.96	1.00
Dec	1.00	1.00	0.90	1.00	1.00	1.00
Year	0.62	0.66	0.65	0.72	0.78	0.84
Gain		4%		7%		6%

Power (W) vs. Energy (Wh) Monofacial modules



Power (W) vs. Energy (Wh) Bifacial modules

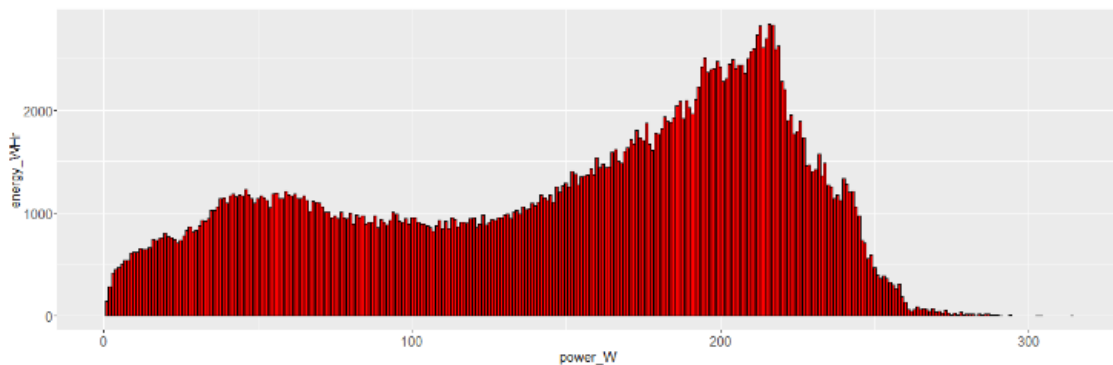


그림 37: 2018 년 기간 단면형(위)과 양면형(아래) 모듈의 출력 대 에너지.



참고문헌

- [1] C. D. Rodríguez-Gallegos *et al.*, “Global techno-economic performance of bifacial and tracking PV systems,” *Joule*, vol. 4, pp. 1–28, 2020.
- [2] “International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) - Results 2019,” Apr. 2020. [Online]. Available: <http://itrpv.vdma.org/>.
- [3] T. Dullweber and J. Schmidt, “Industrial Silicon Solar Cells Applying the Passivated Emitter and Rear Cell (PERC) Concept—A Review,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 6, no. 5, pp. 1366–1381, 2016.
- [4] X. Sun, M. R. Khan, C. Deline, and M. A. Alam, “Optimization and performance of bifacial solar modules: a global perspective,” *Appl. Energy*, vol. 212, pp. 1601–1610, 2017.
- [5] C. Deline, S. A. Peláez, B. Marion, B. Sekulic, M. Woodhouse, and J. Stein, “Bifacial PV System Performance: Separating Fact from Fiction,” presented at the IEEE-PVCS-46, Chicago, 2019.
- [6] A. Cuevas, “The Early History of Bifacial Solar Cells,” presented at the 20th European Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, 2005.
- [7] I. Romijn *et al.*, “Bifacial Cells,” in *Bifacial Photovoltaics: Technology, applications and economics*, J. Libal and R. Kopecek, Eds. IET, 2019.
- [8] H. Mori, “Radiation energy transducing device,” Oct. 1966.
- [9] A. W. Blakers, A. Wang, A. M. Milne, J. Zhao, and M. A. Green, “22.8% efficient silicon solar cell,” *22.8% efficient silicon solar cell*, vol. 55, no. 1363, 1989.
- [10] T. Dullweber *et al.*, “Present status and future perspectives of bifacial PERC+ solar cells and modules,” *Japanese Journal of Applied Physics* 57, vol. no. 8S3, 2018.
- [11] “Trina Solar press release,” Mar. 06, 2020. <https://www.trinasolar.com/us/resources/newsroom/trina-solar-announces-2339-perc-solar-cell-made-standard-fabrication-equipment>.
- [12] “LONGi Solar press release,” Jan. 16, 2019. <https://www.pv-tech.org/news/longi-solar-has-bifacial-monoperc-solar-cell-world-record-verified-at-24.0>.
- [13] C. Messmer, A. Fell, F. Feldmann, J. S. N. Wöhrlé, and M. Hermle, “Efficiency Roadmap for Evolutionary Upgrades of PERC Solar Cells by TOPCon: Impact of Parasitic Absorption,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 10, no. 2, pp. 335–342, Mar. 2020.
- [14] J. Schmidt, K. Bothe, and R. Bock, “N-type silicon- the better material choice for industrial high-efficiency solar cells,” presented at the 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, Milan, Italy, 2007.
- [15] S. W. Glunz, S. Rein, J. Y. Lee, and W. Warta, “Minority carrier lifetime degradation in boron-doped Czochralski silicon,” *J. Appl. Phys.*, vol. 90, pp. 2397–2404, 2001.
- [16] L. Tous *et al.*, “Progress on bifacial Ni/Ag plated nPERT cells for module fabrication with SWCT,” Brussels, Belgium, 2018, pp. 439–443.
- [17] J. Rodriguez, E.-C. Wang, and N. Chen, “Towards 22% efficient screen-printed bifacial n-type silicon solar cells,” *Solar Energy Mater & Sol Cells*, vol. 187, pp. 91–96, 2018.
- [18] J. H. Zhao, A. H. Wang, P. P. Altermatt, M. A. Green, J. P. Rakotoniaina, and O. Breitenstein, “High efficiency PERT cells on n-type silicon substrates,” New Orleans, 2002, pp. 218–221.
- [19] Y. Liu, “nPERC and nIBC Solar Cell Technology,” presented at the Presentation at the 8th n-type PV workshop, Lausanne, Switzerland, 2018.
- [20] IMEC, “IMEC Press Release,” Apr. 2019, [Online]. Available: <https://www.imec-int.com/en/articles/imec-and-jolywood-achieve-a-record-of-23-2-percent-with-bifacial-n-pert-solar-cells>.
- [21] A. Richter, J. Benick, F. Feldmann, A. Fell, M. Hermle, and S. Glunz, “n-Type Si solar cells with passivating electron contact: Identifying sources for efficiency limitations by wafer thickness and resistivity variation,” *Solar Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 173, pp. 96–105, 2017.
- [22] JinkoSolar, “JinkoSolar press release,” Jan. 25, 2019. <https://www.pv-tech.org/news/jinkosolar-pushes-n-type-topcon-solar-cell-to-record-24.2-conversion-efficiency>.
- [23] D. Ding, G. Lua, Z. Lia, Y. Zhanga, and W. Shena, “High-efficiency n-type silicon PERT bifacial solar cells with selective emitters and poly-Si based passivating contacts,” *Solar Energy*, vol. 193, pp. 494–501, 2019.
- [24] R. V. K. Chavali, S. De Wolf, and M. A. Alam, “Device physics underlying silicon heterojunction and passivating-contact solar cells: A topical review,” *Prog Photovolt Res Appl*, vol. 26, no. 4, pp. 241–260, Apr. 2018, doi: 10.1002/pip.2959.
- [25] W. Fuhs, K. Niemann, and J. Stuke, “Heterojunctions of Amorphous Silicon and Silicon Single Crystals,” 1974, vol. 345, pp. 345–350.
- [26] M. Tanaka *et al.*, “Development of New a-Si/c-Si Heterojunction Solar Cells: ACJ-HIT (Artificially Constructed Junction-Heterojunction with IntrinsicThin-Layer),” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 31, 11R vols., p. 3518, 1992.



- [27] A. Descoeurde *et al.*, “The versatility of passivating carrier-selective silicon thin films for diverse high-efficiency screen-printed heterojunction-based solar cells,” *Progress in Photovoltaics*, 2019.
- [28] K. Masuko, M. Shigematsu, and T. Hashiguchi, “Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell,” *IEEE J Photovoltaics*, vol. 4(6), pp. 1433–1435, 2014.
- [29] K. Yamamoto *et al.*, “Record-breaking efficiency back-contact heterojunction crystalline Si solar cell and module,” Amsterdam, 2017, pp. 201–204.
- [30] R. V. K. Chavali *et al.*, “Multiprobe Characterization of Inversion Charge for Self-Consistent Parameterization of HIT Cells,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 5, no. 3, pp. 725–735, May 2015, doi: 10.1109/JPHOTOV.2014.2388072.
- [31] M. Burger, “Meyer Burger press release,” Mar. 11, 2019. <https://www.meyerburger.com/en/company/media-center/news/meyer-burger-announces-record-hjt-cells-with-efficiencies-over-24-at-pv-celltech/>.
- [32] O. D. Miller, E. Yablonovitch, and S. R. Kurtz, “Strong Internal and External Luminescence as Solar Cells Approach the Shockley–Queisser Limit,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 2, no. 3, pp. 303–311, Jul. 2012, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2198434.
- [33] F. I. for S. E. S. ISE, “Fraunhofer ISE Sets Two Records for the Efficiency of Silicon-Based Monolithic Triple-Junction Solar Cells,” Aug. 29, 2019. .
- [34] C. H. Henry, “Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells,” *Journal of Applied Physics*, vol. 51, no. 8, pp. 4494–4500, Aug. 1980, doi: 10.1063/1.328272.
- [35] E. Gençer *et al.*, “Directing solar photons to sustainably meet food, energy, and water needs,” *Scientific Reports*, vol. 7(1), p. 3133, 2017.
- [36] L. C. Hirst and N. J. Ekins-Daukes, “Fundamental losses in solar cells,” *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 19, no. 3, pp. 286–293, May 2011, doi: 10.1002/pip.1024.
- [37] A. Polman and H. A. Atwater, “Photonic design principles for ultrahigh-efficiency photovoltaics,” *Nature Mater*, vol. 11, no. 3, pp. 174–177, Mar. 2012, doi: 10.1038/nmat3263.
- [38] M. A. Alam and M. R. Khan, “Shockley–Queisser triangle predicts the thermodynamic efficiency limits of arbitrarily complex multijunction bifacial solar cells,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116(48), pp. 23966–23971, 2019.
- [39] M. A. Alam and M. R. Khan, “Thermodynamic efficiency limits of classical and bifacial mb] uli-junction tandem solar cells: An analytical approach,” *Applied Physics Letters*, vol. 109(17), p. 173504, 2016.
- [40] W. Shockley and W. J. Queisser, “Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells,” *Journal of Applied Physics*, vol. 32(3), p. 510, 1961.
- [41] M. R. Khan, X. Jin, and M. A. Alam, “PVLimits: PV thermodynamic limit calculator,” 2016.
- [42] R. Asadpour, R. V. K. Chavali, M. Ryyan Khan, and M. A. Alam, “Bifacial Si heterojunction-perovskite organic-inorganic tandem to produce highly efficient ($\eta^* \sim 33\%$) solar cell,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 24, p. 243902, Jun. 2015, doi: 10.1063/1.4922375.
- [43] H. Imran, I. Durrani, M. Kamran, T. M. Abdolkader, M. Faryad, and N. Z. Butt, “High-Performance Bifacial Perovskite/Silicon Double-Tandem Solar Cell,” *IEEE J. Photovoltaics*, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2846519.
- [44] H. Chung, X. Sun, and P. Bermel, “Optical approaches to improving perovskite/Si tandem cells,” *MRS Adv.*, vol. 1, no. 14, pp. 901–910, 2016, doi: 10.1557/adv.2016.33.
- [45] X. Sun, Y. Sun, Z. Zhou, M. A. Alam, and P. Bermel, “Radiative sky cooling: fundamental physics, materials, structures, and applications,” *Nanophotonics*, vol. 6, no. 5, pp. 997–1015, Jul. 2017, doi: 10.1515/nanoph-2017-0020.
- [46] X. Sun, T. Silverman, Z. Zhou, M. Khan, P. Bermel, and M. Alam, “Optics-based approach to thermal management of photovoltaics: selective-spectral and radiative cooling,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7(2), pp. 566–574, 2017.
- [47] “IEC TS 60904-1-2: Photovoltaic devices - Part 1-2: Measurement of current-voltage characteristics of bifacial photovoltaic (PV) devices,” International Electrotechnical Commission, 2019.
- [48] “IEC 60904-7: Photovoltaic devices; part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices,” International Electrotechnical Commission.
- [49] “IEC 60904-9: Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements,” International Electrotechnical Commission, 2007.
- [50] W. Herrmann, M. Schweiger, and J. Bonilla Castro, “Performance characteristics of bifacial PV modules and power labeling,” presented at the 4th Bifi PV Workshop, Konstanz, Germany, 2017.
- [51] “IEC 61215: Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval,” International Electrotechnical Commission, 2016.
- [52] “IEC 61730: Photovoltaic (PV) module safety qualification,” International Electrotechnical Commission, 2016.
- [53] “IEC 61853: Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating,” International Electrotechnical Commission, 2018.
- [54] A. Gracia-Amillo, “Challenges of energy rating of bifacial and BIPV modules - Possible extension of the IEC 61853 standard series to bifacial and BIPV devices,” *Advanced PV Energy Rating (PV-Enerate)*.



- https://www.pv-energie.de/16eng02-blogsingle.html?&tx_ttnews%5Btt_news%5D=804&cHash=8d12bea539af2a236e393c107e1f4bbb (accessed Mar. 05, 2020).
- [55] Kim *et al.*, “Reflection and Durability Study of Different Types of Backsheets and Their Impact on C-Si PV Module Performance,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 146, pp. 91–98, Mar. 2016.
- [56] M. C. López-Escalante, M. Fernández-Rodríguez, L. J. Caballero, F. Martín, M. Gabás, and J. R. Ramos-Barrado, “Novel encapsulant architecture on the road to photovoltaic module power output increase,” *Applied Energy*, vol. 228, pp. 1901–1910, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.073.
- [57] J. a. M. van Roosmalen, S. L. Luxembourg, J. Liu, L. a. G. Okel, and B. B. V. Aken, “White Bifacial Modules – Improved STC Performance Combined with Bifacial Energy Yield,” Munich, Germany, Jul. 2016, pp. 42–47.
- [58] M. C. López-Escalante, M. Fernández-Rodríguez, L. J. Caballero, F. Martín, M. Gabás, and J. R. Ramos-Barrado, “Novel Encapsulant Architecture on the Road to Photovoltaic Module Power Output Increase,” *Applied Energy*, vol. 228, pp. 1901–1910, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.073.
- [59] A. J. Curran *et al.*, “Degradation of Bifacial PERC and Al-BSF Cell Minimodules with White and Clear Encapsulant Combinations in Modified Damp Heat,” presented at the IEEE 47th Photovoltaic Specialist Conference, Calgary, Canada, 2020.
- [60] J. Schmidt and A. Cuevas, “Electronic properties of light-induced recombination centers in boron-doped Czochralski silicon,” *Journal of Applied Physics*, vol. 86, no. 6, pp. 3175–3180, Sep. 1999, doi: 10.1063/1.371186.
- [61] K. Bothe, R. Sinton, and J. Schmidt, “Fundamental boron-oxygen-related carrier lifetime limit in mono- and multicrystalline silicon,” *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 13, no. 4, pp. 287–296, Jun. 2005, doi: 10.1002/pip.586.
- [62] D. Bredemeier, D. Walter, S. Herlufsen, and J. Schmidt, “Lifetime degradation and regeneration in multicrystalline silicon under illumination at elevated temperature,” *AIP Advances*, vol. 6, no. 3, p. 035119, Mar. 2016, doi: 10.1063/1.4944839.
- [63] A. C. nee Wenham *et al.*, “Hydrogen-Induced Degradation,” in *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC)*, Waikoloa Village, HI, Jun. 2018, pp. 0001–0008, doi: 10.1109/PVSC.2018.8548100.
- [64] A. Herguth, C. Derricks, and D. Sperber, “A Detailed Study on Light-Induced Degradation of Cz-Si PERC-Type Solar Cells: Evidence of Rear Surface-Related Degradation,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 8, no. 5, pp. 1190–1201, Sep. 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2850521.
- [65] R. Kopecek, “Is LeTID degradation in PERC cells another degradation crisis even worse than PID?,” *PV Tech*, Nov. 19, 2018.
- [66] M. Barbato *et al.*, “Durability of Bifacial Solar Modules under Potential Induced Degradation: Role of the Encapsulation Materials,” *32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1879-1883*, p. 5 pages, 6555 kb, 2016, doi: 10.4229/EUPVSEC20162016-5BV.1.26.
- [67] I. Devoto and A. Halm, “Comprehensive Study of PID Mechanisms for n-Type Bifacial Solar Cells,” *36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1106-1113*, p. 8 pages, 18659 kb, 2019, doi: 10.4229/EUPVSEC20192019-4AV.1.61.
- [68] W. Luo *et al.*, “Elucidating potential-induced degradation in bifacial PERC silicon photovoltaic modules,” *Prog Photovolt Res Appl*, vol. 26, no. 10, pp. 859–867, Oct. 2018, doi: 10.1002/pip.3028.
- [69] J. Carolus, J. A. Tsanakas, A. van der Heide, E. Voroshazi, W. De Ceuninck, and M. Daenen, “Physics of potential-induced degradation in bifacial p-PERC solar cells,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 200, p. 109950, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2019.109950.
- [70] M. I. Devoto Acevedo, “Solar module characterization via visual inspection in the field, I-V curve and thermal-image analysis,” Univeristy of Chile, Santiago, Chile, 2018.
- [71] J. Melendez, “Bifacial PV Tracking Designing Bifacial PV Projects,” 2018, [Online]. Available: <https://16iwy195vfgoqu3136p2ly-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2018/10/2018-10-25-Bifacial-Webinar-SOLTEC.pdf>.
- [72] “QCells: Hot-Spot Protect prevents solar module fire,” 2020. <https://www.q-cells.eu/products/technology/hot-spot-protect.html>.
- [73] M. Iqbal, *An introduction to solar radiation*. Toronto ; New York: Academic Press, 1983.
- [74] Gueymard *et al.*, “Surface albedo and reflectance: Review of definitions, angular and spectral effects, and intercomparison of major data sources in support of advanced solar irradiance modeling over the Americas,” *Solar Energy*, vol. 182, pp. 194–212, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.02.040.
- [75] Sengupta *et al.*, “The national solar radiation data base (NSRDB),” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 51–60, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.03.003.
- [76] G. Maclaurin, M. Sengupta, Y. Xie, and N. Gilroy, “Development of a MODIS-Derived Surface Albedo Data Set: An Improved Model Input for Processing the NSRDB,” NREL/TP--6A20-67306, 1335471, Dec. 2016. doi: 10.2172/1335471.



- [77] C. Deline, S. Ayala Pelaez, S. MacAlpine, and C. Olalla, “Estimating and parameterizing mismatch power loss in bifacial photovoltaic systems,” *Prog Photovolt Res Appl*, p. pip.3259, Mar. 2020, doi: 10.1002/pip.3259.
- [78] C. W. Hansen *et al.*, “A Detailed Model of Rear-Side Irradiance for Bifacial PV Modules,” in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington, DC, Jun. 2017, pp. 1543–1548, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366707.
- [79] T. S. Liang *et al.*, “A review of crystalline silicon bifacial photovoltaic performance characterisation and simulation,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 116–148, 2019, doi: 10.1039/C8EE02184H.
- [80] I. Shoukry, D. Berrian, J. Libal, and F. Haffner, “Simulation models for energy yield prediction of bifacial systems,” in *Bifacial Photovoltaics: Technology, applications and economics*, J. Libal and R. Kopecek, Eds. Institution of Engineering and Technology, 2018, pp. 119–151.
- [81] J. S. Stein, D. Riley, M. Lave, C. Hansen, C. Deline, and F. Toor, “Outdoor Field Performance from Bifacial Photovoltaic Modules and Systems,” in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington, DC, Jun. 2017, pp. 3184–3189, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366042.
- [82] J. S. Stein, D. S. Riley, M. Lave, C. Deline, F. Toor, and C. W. Hansen, “Outdoor Field Performance from Bifacial Photovoltaic Modules and Systems,” *33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1961-1967*, p. 7 pages, 6649 kb, 2017, doi: 10.4229/EUPVSEC20172017-6CO.13.3.
- [83] J. Stein, L. Burnham, and M. S. Lave, “One Year Performance Results for the Prism Solar Installation at the New Mexico Regional Test Center: Field Data from February 15 2016 - February 14 2017.,” SAND2017-5872, Jun. 2017. doi: 10.2172/1367463.
- [84] I. Shoukry, J. Libal, R. Kopecek, E. Wefringhaus, and J. Werner, “Modelling of Bifacial Gain for Stand-alone and in-field Installed Bifacial PV Modules,” *Energy Procedia*, vol. 92, pp. 600–608, 2016, doi: 10.1016/j.egypro.2016.07.025.
- [85] C. Deline, S. MacAlpine, B. Marion, F. Toor, A. Asgharzadeh, and J. S. Stein, “Assessment of Bifacial Photovoltaic Module Power Rating Methodologies—Inside and Out,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 7, no. 2, pp. 575–580, Mar. 2017, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2650565.
- [86] S. Ayala Pelaez, C. Deline, S. M. MacAlpine, B. Marion, J. S. Stein, and R. K. Kostuk, “Comparison of Bifacial Solar Irradiance Model Predictions With Field Validation,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 9, no. 1, pp. 82–88, Jan. 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2877000.
- [87] G. W. Larson and R. Shakespeare, *Rendering with Radiance: the art and science of lighting visualization*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1998.
- [88] C. Barati, “A record year for trackers,” *pv-magazine.com*, Mar. 27, 2020.
- [89] S. Racharla and K. Rajan, “Solar tracking system—a review,” *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 10, 2 vols., no. 2, pp. 72–81, 2017.
- [90] A. Asgharzadeh Shishavan, “Bifacial photovoltaic (PV) system performance modeling utilizing ray tracing,” Doctor of Philosophy, University of Iowa, 2019.
- [91] E. Lorenzo, M. Pérez, A. Ezpeleta, and J. Acedo, “Design of tracking photovoltaic systems with a single vertical axis: SINGLE-AXIS TRACKING PV SYSTEMS,” *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 10, no. 8, pp. 533–543, Dec. 2002, doi: 10.1002/pip.442.
- [92] V. Abbaraju and A. Daly, “Optimizing Your Energy Yield,” *NEXTracker*, Jun. 2018. <https://www.nextracker.com/2018/06/white-paper-optimizing-your-energy-yield/>.
- [93] N. A. Kelly and T. L. Gibson, “Increasing the solar photovoltaic energy capture on sunny and cloudy days,” *Solar Energy*, vol. 85, no. 1, pp. 111–125, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.solener.2010.10.015.
- [94] S. Ayala Pelaez, C. Deline, P. Greenberg, J. S. Stein, and R. K. Kostuk, “Model and Validation of Single-Axis Tracking With Bifacial PV,” *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 9, no. 3, pp. 715–721, May 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2892872.
- [95] S. Ayala Pelaez, C. Deline, J. S. Stein, B. Marion, K. Anderson, and M. Muller, “Effect of torque-tube parameters on rear-irradiance and rear-shading loss for bifacial PV performance on single-axis tracking systems,” 2019.
- [96] J. Guerrero-Perez and J. N. Berbel, “BiTEC: How to simulate bifacial projects,” Jul. 2019.
- [97] J. Crimmins, K. McIntosh, L. Creasy, and K. Lee, “Field testing meets modeling: validated data on bifacial solar performance,” *Array Technologies*, 2020. <https://arraytechinc.com/field-testing-meets-modeling-white-paper/>.
- [98] A. Roedel and S. Uphill-Brown, “Designing for the wind,” *NEXTracker*, Sep. 2018. <https://www.nextracker.com/2018/06/white-paper-designing-for-the-wind/>.
- [99] F. Bizzarri, G. Leotta, and A. D. Stefano, “La Silla PV plant as a utility- scale side-by-side test for innovative modules technologies,” Nov. 2017, pp. 1978–1982, [Online]. Available: <http://www.eupvsec-proceedings.com/proceedings?paper=44211>.
- [100] J.-N. Jaubert, “LCOE-driven method for selection and layout optimization of albedo enhancer materials,” presented at the BifiPV Workshop, Amsterdam, NL, Sep. 2019.
- [101] C. Deline, S. Ayala Peláez, B. Marion, B. Sekulic, M. Woodhouse, and J. S. Stein, “Bifacial Tracking Testbed at NREL,” presented at the BifiPV Workshop, Amsterdam, NL, Sep. 2019, [Online]. Available:



- http://npv-workshop.com/fileadmin/layout/images/bifiPV/presentations2019/bifiPV2019_POSTER_NREL_Deline.pdf.
- [102] A. Asgharzadeh *et al.*, “A Benchmark and Validation of Bifacial PV Irradiance Models,” in *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Chicago, IL, USA, Jun. 2019, pp. 3281–3287, doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8981272.
- [103] M. T. Patel, R. A. Vijayan, R. Asadpour, M. Varadharajaperumal, M. R. Khan, and M. A. Alam, “Temperature-dependent energy gain of bifacial PV farms: A global perspective,” *Applied Energy*, vol. 276, p. 115405, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115405.
- [104] M. T. Patel, M. Ryyan Khan, A. Alnuaimi, O. Albadwawwi, J. J. John, and M. A. Alam, “Implications of Seasonal and Spatial Albedo Variation on the Energy Output of Bifacial Solar Farms: A Global Perspective,” in *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Chicago, IL, USA, Jun. 2019, pp. 2264–2267, doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8981163.
- [105] B. Zhao, X. Sun, M. R. Khan, and M. A. Alam, “Online Simulation Tools for Global Photovoltaic Performance: Purdue University Meteorological Tool (PUMET) and Bifacial Module Calculator (PUB),” presented at the 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2018.
- [106] W. F. Holmgren, C. W. Hansen, and M. A. Mikofski, “pvlb python: a python package for modeling solar energy systems,” *JOSS*, vol. 3, no. 29, p. 884, Sep. 2018, doi: 10.21105/joss.00884.
- [107] J. S. Stein, W. F. Holmgren, J. Forbess, and C. W. Hansen, “Open source photovoltaic performance modeling functions for Matlab and Python,” presented at the 43rd photovoltaic specialists conference, Portland, OR, 2016.
- [108] B. Haurwitz, “Insolation in Relation to Cloudiness and Cloud Density,” *Journal of Meteorology*, vol. 2, pp. 154–166, 1945.
- [109] B. Haurwitz, “Insolation in Relation to Cloud Type,” *Journal of Meteorology*, vol. 3, pp. 123–124, 1946.
- [110] J. S. Stein, C. W. Hansen, and M. J. Reno, “Global horizontal irradiance clear sky models: implementation and analysis,” SAND2012-2389, 1039404, Mar. 2012. doi: 10.2172/1039404.
- [111] A. Mermoud and B. Wittmer, *Pvsyst User’s Manual*. PVSyst SA, 2014.
- [112] Horowitz *et al.*, “An analysis of the cost and performance of photovoltaic systems as a function of module area (No. NREL/TP-6A20-67006),” *National Renewable Energy Lab (NREL)*, 2017.
- [113] Patel *et al.*, “A worldwide cost-based design and optimization of tilted bifacial solar farms,” *Applied Energy*, vol. 247, pp. 467–479, 2019.
- [114] J. S. Stein, L. Burnham, and M. Lave, “Performance Results for the Prism Solar Installation at the New Mexico Regional Test Center: Field Data from February 15 - August 15, 2016,” 2017.
- [115] Khan *et al.*, “Vertical bifacial solar farms: Physics, design, and global optimization,” *Applied energy*, vol. 206, pp. 240–248, 2017.
- [116] Khan *et al.*, “Ground sculpting to enhance energy yield of vertical bifacial solar farms,” *Applied energy*, vol. 241, pp. 592–598, 2019.
- [117] T. Stoffel and A. Andreas, *NREL Solar Radiation Research Laboratory (SRRL): Baseline Measurement System (BMS); Golden, Colorado (Data)*. National Renewable Energy Lab (NREL), Golden, CO, US, 1981.
- [118] S. Ayala Pelaez and C. Deline, “Bifacial PV test-bed irradiance measurements.” National Renewable Energy Laboratory, 2019, doi: 10.7799/1578176.
- [119] S. Ayala Pelaez and C. Deline, “BEST Field Data.” DuraMAT Datahub, 2020.
- [120] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes / John A. Duffie, William A. Beckman*, 4th ed. Hoboken: John Wiley, 2013.
- [121] S. Ayala Pelaez and C. Deline, “bifacial _ radiance: a python package for modeling bifacial solar photovoltaic systems,” *Journal of Open Source Software*, vol. 5, no. 2020, pp. 1–5, 1865, doi: 10.21105/joss.01865.
- [122] C. Deline and S. Ayala, “bifacial _ radiance.” Dec. 2017.
- [123] G. J. Ward, “The RADIANCE lighting simulation and rendering system,” in *21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1994, pp. 459–472, doi: 10.1145/192161.192286.
- [124] D. Robinson and A. Stone, “Irradiation modelling made simple: the cumulative sky approach and its applications,” in *PLEA Conference, Eindhoven, Netherlands*, 2004, pp. 19–22.
- [125] S. Ayala Pelaez, C. Deline, P. Greenberg, J. S. Stein, and R. K. Kostuk, “Model and validation of single-axis tracking with bifacial PV,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 3, pp. 715–721, 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2892872.
- [126] C. Deline, S. Ayala Pelaez, S. MacAlpine, and C. Olalla, “Estimating and parameterizing mismatch power loss in bifacial photovoltaic systems,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, pp. 1–13, 2020, doi: 10.1002/pip.3259.
- [127] S. Ayala Pelaez, C. Deline, S. Macalpine, B. Marion, J. S. Stein, and R. K. Kostuk, “Comparison of bifacial solar irradiance model predictions with field validation,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 1, pp. 82–88, 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2018.2877000.
- [128] B. Marion, “Numerical method for angle-of-incidence correction factors for diffuse radiation incident photovoltaic modules,” *Solar Energy*, vol. 147, pp. 344–348, 2017.
- [129] NREL, “BifacialVF,” 2020, [Online]. Available: <http://github.com/NREL/bifacialvf>.



- [130] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky, and R. Stewart, "Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance," *Solar Energy*, vol. 44, no. 5, pp. 271–289, 1990, doi: 10.1016/0038-092X(90)90055-H.
- [131] E. A. Sjerps-Koomen, E. A. Alsema, and W. C. Turkenburg, "A simple model for PV module reflection losses under field conditions," *Solar Energy*, vol. 57, no. 6, pp. 421–432, Dec. 1996, doi: 10.1016/S0038-092X(96)00137-5.
- [132] M. Chioldetti, J. Kang, C. Reise, and A. Lindsay, "Predicting Yields of Bifacial PV Power Plants - What Accuracy is Possible?" 2018.
- [133] M. Chioldetti, O. Rhazi, E. Boyere, P. Dupeyrat, M. Bila, and G. Terrom, "A ray-tracing based 3D tool for accurate prediction of PV plants yield," 2019.
- [134] P. Gilman, "SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update," *National Renewable Energy Laboratory, NREL P-6A20-64102*, vol. 3, no. 1, pp. 1–93, 2018, doi: NREL/TP -6A20- 64102.
- [135] N. DiOrio and C. Deline, "Bifacial simulation in SAM," 2018.
- [136] NREL, "bifacialVF." GitHub, 2019.
- [137] B. Marion *et al.*, "A practical irradiance model for bifacial PV modules," in *44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Washington, DC., 2017*, pp. 1537–1542, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366263.
- [138] S. Dubey, J. N. Sarvaiya, and B. Seshadri, "Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review," *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 311–321, 2013, doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.072.
- [139] D. Chudinzow, J. Haas, G. Díaz-Ferrán, S. Moreno-Leiva, and L. Eltrop, "Simulating the energy yield of a bifacial photovoltaic power plant," *Solar Energy*, vol. 183, pp. 812–822, May 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.03.071.
- [140] D. Chudinzow, S. Nagel, J. GÜsewell, and L. Eltrop, "Vertical bifacial photovoltaics - A complementary technology for the European electricity supply?" *Applied Energy*, vol. 264, p. 114782, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114782.
- [141] D. Chudinzow, M. Klenk, and L. Eltrop, "Impact of field design and location on the techno-economic performance of fixed-tilt and single-axis tracked bifacial photovoltaic power plants," *Solar Energy*, vol. 207, pp. 564–578, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.06.096.
- [142] A. Mermoud and B. Wittmer, "Bifacial shed simulation with PVSyst," *4th Bifi PV Workshop, Konstanz, Germany*, 2017.
- [143] B. Wittmer and A. Mermoud, "Yield simulations for horizontal axis trackers with bifacial PV modules in PVSyst," 2018.
- [144] I. T. Horváth *et al.*, "Next Generation Tools for Accurate Energy Yield Estimation of Bifacial PV Systems – Best Practices, Improvements and Challenges," *36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1261-1265*, p. 5 pages, 4854 kb, 2019, doi: 10.4229/EUPVSEC20192019-5DP.2.2.
- [145] I. T. Horváth *et al.*, "Photovoltaic energy yield modelling under desert and moderate climates: What-if exploration of different cell technologies," *Solar Energy*, vol. 173, pp. 728–739, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.solener.2018.07.079.
- [146] J. Mardaljevic, "Daylight simulation: validation, sky models and daylight coefficients," De Montfort University, Leicester, 2000.
- [147] R. Perez, R. Seals, and J. Michalsky, "All-weather model for sky luminance distribution—Preliminary configuration and validation," *Solar Energy*, vol. 50, no. 3, pp. 235–245, Mar. 1993, doi: 10.1016/0038-092X(93)90017-1.
- [148] N. Jones and C. Reinhart, "Accelerad | Daylighting Simulation on the GPU," 2020. <https://nljones.github.io/Accelerad/>.
- [149] M. R. Lewis *et al.*, "Impact of bifacial photovoltaic cell characteristics on module energy yield in high-latitude locations (Conference Presentation)," in *Physics, Simulation, and Photonic Engineering of Photovoltaic Devices IX*, San Francisco, United States, Mar. 2020, p. 31, doi: 10.1117/12.2546583.
- [150] M. R. Lewis *et al.*, "Angular Dependence of Textured Bifacial Silicon Heterojunction Solar Cells for High Latitudes," in *2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Chicago, IL, USA, Jun. 2019, pp. 1919–1923, doi: 10.1109/PVSC40753.2019.8980857.
- [151] A. C. J. Russell, C. E. Valdivia, M. R. Lewis, J. E. Haysom, and K. Hinzer, "Modelling Bifacial Solar Energy Yield for Single-Axis Tracked Systems with Racking," 2019, pp. 61–62.
- [152] A. C. J. Russell, C. E. Valdivia, M. R. Lewis, J. E. Haysom, and K. Hinzer, "Modelling Energy Yield Including Rack Shading for Single-Axis Tracked Bifacial Solar Panels," in *2019 Photonics North (PN)*, Quebec City, QC, Canada, May 2019, pp. 1–1, doi: 10.1109/PN.2019.8819539.
- [153] C. E. Valdivia *et al.*, "Bifacial Photovoltaic Module Energy Yield Calculation and Analysis," in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington, DC, Jun. 2017, pp. 1094–1099, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366206.
- [154] M. A. Mikofski, M. Lynn, J. Byrne, M. Hamer, A. Neubert, and J. Newmiller, "Accurate Performance Predictions of Large PV Systems with Shading using Submodule Mismatch Calculation," in *2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC)*, 2018, pp. 3635–3639, doi: 10.1109/PVSC.2018.8547323.



- [155] M. A. Anoma, D. Jacob, B. C. Bourne, J. A. Scholl, D. M. Riley, and C. W. Hansen, "View Factor Model and Validation for Bifacial PV and Diffuse Shade on Single-Axis Trackers," in *2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Washington, DC, Jun. 2017, pp. 1549–1554, doi: 10.1109/PVSC.2017.8366704.
- [156] D. Berrian, J. Libal, and S. Glunz, "MoBiDiG: simulations and LCOE," 2017.
- [157] D. Berrian, J. Libal, M. Klenk, H. Nussbaumer, and R. Kopecek, "Performance of bifacial PV arrays with fixed tilt and horizontal single-axis tracking: Comparison of simulated and measured data," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, pp. 1583–1589, 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2924394.
- [158] T. Capelle, F. Araya, F. Haffner, J. Sayritupac, and H. Colin, "A comparison of bifacial PV system modeling tools," in *6th BiflPV Workshop, Amsterdam, NL*, 2019, pp. 1–21.
- [159] "SunPower, 'pvfactors,'" 2018. <https://sunpower.github.io/pvfactors/>.
- [160] "Canadian Climate Normals 1981-2010 Station Data," *Environment and Climate Change Canada, Government of Canada*. https://climate.weather.gc.ca/climate_normals/.
- [161] "IEC 60891: Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics," International Electrotechnical Commission, 2009.
- [162] J. Bonilla Castro, M. Herz, C. Monokroussos, and M. Schweiger, "Energy Yield Comparison between Bifacial and Monofacial PV Modules - Real-world measurements and validation with bifacial simulations," presented at the 35th EUPVSEC, Brussels, 2018.
- [163] J. Bonilla Castro, "Energy Yield Comparison between Bifacial and Monofacial PV Modules," presented at the PV Module Forum 2019, TÜV Rheinland, Cologne, Germany, 2019.
- [164] J. Saal, J. Bonilla Castro, and M. Schweiger, "Energy Yield Comparison between Bifacial and Monofacial PV Modules - Real World Measurements in Desert climate," presented at the 36th EU PVSEC, Marseille, 2019.
- [165] J. Bonilla Castro and G. Friesen, "Photovoltaic Module Energy Yield Measurements: Existing Approaches and Best Practice," presented at the IEA PVPS Task 13 Webinar, Mar. 12, 2020.
- [166] H. Nussbaumer *et al.*, "Accuracy of simulated data for bifacial systems with varying tilt angles and share of diffuse radiation," *Solar Energy*, vol. 197, pp. 6–21, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2019.12.071.
- [167] D. Berrian, J. Libal, M. Klenk, H. Nussbaumer, and R. Kopecek, "Performance of Bifacial PV Arrays With Fixed Tilt and Horizontal Single-Axis Tracking: Comparison of Simulated and Measured Data," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 9, no. 6, pp. 1583–1589, Nov. 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2924394.
- [168] G. Friesen, W. Herrmann, G. Belluardo, and B. Herteleer, *Photovoltaic module energy yield measurements: existing approaches and best practice: International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme: IEA PVPS Task 13, Subtask 3: report IEA-PVPS T13-12:2018*. Paris: International Energy Agency IEA, 2018.
- [169] R. R. Molinero, G. Friesen, and M. Caccivio, "Final Report ENHANCE - Next Generation Photovoltaic Performance," Swiss Federal Office of Energy SFOE, 2019. [Online]. Available: <https://www.aramis.admin.ch/Default.aspx?DocumentID=64923>.
- [170] S. Ayala Pelaez, "BEST Field Data," 2020. <https://datahub.duramat.org/dataset/best-field-data>.
- [171] A. Granlund, J. Narvesjö, and A. M. Petersson, "The Influence of Module Tilt on Snow Shadowing of Frameless Bifacial Modules," *36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1646-1650*, p. 5 pages, 7619 kb, 2019, doi: 10.4229/EUPVSEC20192019-5CV.4.36.
- [172] N. Riedel-Lyngskær *et al.*, "Comparison of Large Scale Bifacial PV Test Field Performance to Commercially Available Software, Research-Based and Open Source Tools," presented at the European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC), 2020.
- [173] N. Riedel-Lyngskær, M. Petit, D. Berrian, P. Poulsen, J. Libal, and M. Jalobsen, "A Spatial Irradiance Map Measured on the Rear Side of a Utility-Scale Horizontal Single-axis Tracker with Validation using Open Source Tools," presented at the IEEE 47th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2020.
- [174] S. Ranta, J. S. Stein, H. Huerta, A. Heinonen, and E. Whitney, "Self-consumption rate achieved by the bifacial east-west vertical PV system compared to the conventional south facing system in nordic conditions," presented at the EU PVSEC, Marseille, France, 2019.



부록 1 영어-한글 용어 비교

agrophotovoltaics	영농형 태양광
air mass (AM)	에어매스
albedo	알베도
albedometer	알베도계, 반사율계, 알베도
alternating current (ac)	교류
amorphous silicon (a-Si)	비정질실리콘
angle of incidence (AOI)	입사각
angular	각도
antireflection	반사방지
anti-soiling	오염 방지
aspect ratio	형상비
azimuth	방위각
back surface field (BSF)	후면전계
back-contact	후면접촉
balance of system (BOS)	주변장치
beam	직달 (direct)
bifacial	양면형
bifacial gain	양면형 이득
bifaciality factor (or coefficient)	양면형 계수
bulk resistivity	체적 비저항
busbar (BB)	버스바
Cadmium Telleride (CdTe)	카드뮴 텔루라이드
calibration	교정
carrier	캐리어, 반송자
clearance	간격
characterization	특성분석
clearness index	청명 지수
clear sky	청명
clipping	클리핑
concentrator	집광
contact	접촉
correction	보정
crosslink	가교



crystalline silicon (c-Si)	결정질실리콘
curing	경화
current at maximum power point (IMPP)	최대출력점에서의 전류
current injection	전류 주입
current voltage characteristic (I-V)	전류-전압 특성
cut-off	
damp heat	고온고습
dark	암상태
defect	결함
degradation	열화
degradation rate	열화율
delamination	박리
depletion region	공핍영역
design qualification	설계적격성
dielectric	유전체
diffuse	확산, 산란
direct current (DC)	직류
direct normal irradiance (DNI)	직달 법선면 조사강도
dispersion	분산
dose	선량
edge effect	가장자리 효과
edge seal	가장자리 실링
effective irradiance	유효 조사강도
electroluminescence (EL)	전계발광
elevation angle	고도각
emission	방사
emitter	에미터
encapsulant	봉지재
encapsulation	봉지
endurance	내구성
energy rating	에너지 등급
energy yield	에너지 수율
equivalent	등가
equivalent irradiance	등가 조사강도
external quantum efficiency (EQE)	외부양자효율
failure	불량
fault	결함
fibre pull-out	파이버 이탈



Field-of-view	시야
filler	충전제
fill factor (FF)	충진율
forward	순방향
front sheet	프론트시트, 전면 시트
gain	이득
gap	갭, 틈
gettering	게터링
global horizontal irradiance (GHI)	글로벌 수평면 조사강도
global normal irradiance (GNI)	글로벌 법선면 조사강도
gridline	그리드선 (라인)
ground sculpting	지면 형상
haze	헤이즈
heat island	열섬
heterojunction (HJT)	이종접합
hole	정공
hotspot	핫스팟, 열점
humidity freeze	습도 동결
in plane	면내(面內)
incident angle modifier (IAM)	입사각 수정기
indium tin oxide (ITO)	주석 첨가 인듐 산화물
insolation	일조량
interconnect	상호연결
interdigitated back contact (IBC)	각지형 후면전극
International Electrotechnical Commission (IEC)	국제전기기술위원회
ion implantation	이온주입
irradiance	조사강도
irradiance distribution module	조사강도 분포 모듈
irradiation	조사량
I-V curve	전류-전압 곡선
junction box (JB)	정선 박스, 접속 배선함
lamination	라미네이션
leak current	누설전류
levelized cost of electricity (LCOE)	균등화 발전단가
lifetime	수명
light & elevated temperature induced degradation (LeTID)	광 및 고온 유도 열화
light induced degradation (LID)	광유도 열화
light soaking	광조사, 광흡수



maximum power point (MPP)	최대출력점
mean absolute error (MAE)	평균 절대 오차
mean bias error (MBE)	평균 바이어스 오차
metallization	금속 전극
metastability	준안정성
metrology	계량 측정
minority carrier	소수 캐리어(반송자)
mismatch	미스매치, 불일치
monofacial	단면형
monolithic	모놀리식
morphology	모폴로지
multicrystal silicon (mc-Si)	다중결정 실리콘
multi-junction	다중접합
nominal module operating temperature (NMOT)	공칭 모듈동작온도
open-circuit voltage	개방전압
outlier	아웃라이어, 열외자
parameterized	매개 변수화된
pass/fail	합격/불합격
passivated emitter rear contact (PERC)	후면전극 부동태화
passivation	부동태화
patch	패치
percentile	백분위수
performance ratio (PR)	성능비
photolithography	포토리소그래피
plane of array (POA)	어레이면
polarization	분극화
polyplefin elastomer (POE)	폴리올레핀 탄성체
polysilicon (p-Si)	다결정실리콘
potential induced degradation (PID)	퍼텐셜 유도 열화
power output	출력 산출량, 출력 생산량
preconditioning	전처리
PV module's efficiency (ETA)	태양광모듈 효율
pyranometer	일사량계
pyrheliometer	직달일사량계
qualification	적격성
radiance	빛
radiation	일조량
rambertian	램버시안



rating	등급, 등급매김
ray-tracing	광선추적법
recombination	재결합
recovery	복구, 회복
red shift	장파장 이동
reduced-order	축소 차수
reflector	반사체
reverse	역방향
root mean square error (RMSE)	평균 제곱근 오차
row	줄, 행
sealing	실링
seasonality	계절성
self-limiting	자기제한
self-shading	자기음영
shading	음영
short-circuit current (J_{sc})	단락전류
silicon heterojunction (SHJ)	실리콘 이종접합
single-axis	단일-축
sky	스카이, 천공
sky temperature	천공온도
soiling	오염
solder	솔더, 납땜
solid angle	입체각
specification	사양서
spectral irradiance	분광 조사강도
spectral mismatch (SMM)	분광불일치
spectral response (SR)	분광응답
spectroradiometer	분광복사계
spectrum shift	스펙트럼 변화
specular	정반사성
stacking fault	적층 결함
stand-alone systems	독립형 시스템
standard	규격
standard test condition (STC)	표준시험조건
standardization	표준화, 규격화
string	스트링
survey	조사
temperate	온대성



temperature coefficient	온도계수
template	템플릿
temporal resolution	시간해상도
thermal cycling	온도 사이클
thermography	서모그래피, 열화상장치
time-resolved	시간 분해
torque tube	토크 튜브
tracker	트랙커, 추적기
transparent conducting oxide (TCO)	투명전도산화물
uncertainty	불확도
universal time (UT)	만국 표준시
view factor	시야 인자, 뷰 팩터
visual inspection	육안검사
visualization	가시화
water vapor transmission rate (WVTR)	수증기 투과율
weathered	풍화된
yield	수율
zenith angle	천정각

번역 문의: khdb52@gmail.com



ISBN 978-3-907281-03-1



9 783907 281031 >