

# 태양광 모듈의 불량에 대한 검토

**Review of Failures of Photovoltaic Modules** 





PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME

Report IEA-PVPS T13-01:2014

Ultraviolet fluorescence image of a cracked solar cell in a photovoltaic module. Courtesy of Marc Köntges, Institute for Solar Energy Research Hamelin. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME

# Performance and Reliability of Photovoltaic Systems

(태양광시스템의 성능과 신뢰성)

# Subtask 3.2: Review of Failures of Photovoltaic Modules

(태양광 모듈의 불량에 대한 검토)

IEA PVPS Task 13 External final report IEA-PVPS March 2014

## ISBN 978-3-906042-16-9

### **Primary authors:**

Marc Köntges, Institute for Solar Energy Research Hamelin, Emmerthal, Germany

Sarah Kurtz, Corinne Packard, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA

Ulrike Jahn, TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH, Cologne, Germany

Karl A. Berger, Austrian Institute of Technology GmbH, Energy Department, Vienna, Austria

Kazuhiko Kato, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba, Japan

> Thomas Friesen, SUPSI ISAAC, Canobbio, Switzerland

Haitao Liu, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

> Mike Van Iseghem, Electricité de France, EDF R&D, Moret-sur-Loing, France

### **Contributing authors:**

John Wohlgemuth, David Miller, Michael Kempe, Peter Hacke National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA

Florian Reil, Nicolas Bogdanski, Werner Herrmann TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH, Cologne, Germany

Claudia Buerhop-Lutz The Bavarian Centre for Applied Energy Research, Würzburg, Germany

Guillaume Razongles Institut National de l'Energie Solaire, INES-CEA, Le Bourget-du-Lac, France

> Gabi Friesen, SUPSI ISAAC, Canobbio, Switzerland

> > This report is supported by

Austrian Federal Ministry for Transport, Innovation and Technology (BMVIT) under FFG contract No. 828105,

Chinese Academy of Sciences (CAS),

German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy under Contract No.0325194A&C (BMWi),

Supported by:



on the basis of a decision by the German Bundestag

Swiss Federal Office of Energy (SFOE)

and

U.S. Department of Energy under Contract No. DE-AC36-08-GO28308 with the National Renewable Energy Laboratory (NREL)

한글 옮김 : 2021년 2월 윤 경 훈 (Yoon, Kyung-Hoon)



# 목 차

1	머리말	1
2	요 약	2
3	서 론	4
4	정의	10
	4.1 모듈 불량의 정의	10
	4.2 정의에서 제외된 모듈 불량	10
	4.3 외부 원인으로 인한 중요한 모듈 불량	12
	4.3.1 클램핑	12
	4.3.2 수송과 설치	13
	4.3.3 퀵 커넥터 불량	14
	4.3.4 번개	14
	4.4 안전 불량과 안전 범주의 정의	16
	4.5 출력손실 불량과 출력손실 범주의 정의	17
	4.6 결함의 정의	18
	4.7 모듈 부품의 정의	18
5	불량을 확인하기 위한 측정의 기본	20
	5.1 육안검사	20
	5.1.1 IEC 규격에 따른 육안검사	21
	5.1.2 현장에서의 시각적 불량들의 문서화	23
	5.2 전류-전압 곡선	26
	5.2.1 I-V 곡선의 주요 파라미터들	26
	5.2.2 직렬저항과 병렬저항	27
	5.2.3 정확도	28
	5.2.4 전류-전압 곡선에 미치는 불량의 영향	29
	5.3 서모그래피	33
	5.3.1 정상상태 조건 하에서의 서모그래피	

	5.3.2 펄스 서모그래피	.36
	5.3.3 고정화 서모그래피	.37
ļ	5.4 전계발광	.41
ļ	5.5 자외선 형광분석	.47
į	5.6 신호 전송 방법	.49
6 E	태양광 모듈의 불량	.54
(	6.1 모든 모듈에서 발견된 불량들에 대한 검토	.55
	6.1.1 박리	.55
	6.1.2 백시트 접착 손실	.56
	6.1.3 정션 박스 불량	.58
	6.1.4 프레임 파손	.59
(	6.2 실리콘 웨이퍼 기반 모듈에서 발견된 불량의 검토	.61
	6.2.1 EVA 변색	.61
	6.2.2 셀 균열	.62
	6.2.3 달팽이자국	.67
	6.2.4 탄 자국	.70
	6.2.5 PID	.73
	6.2.6 셀과 스트링 상호연결 리본의 단절	.82
	6.2.7 바이패스 다이오드 결함	.85
(	5.3 박막모듈에서 발견된 불량 검토	.88
	6.3.1 접착된 커넥터에서의 마이크로 아크	.88
	6.3.2 션트 열점	.89
(	6.4 CdTe 박막모듈에서 발견된 특정 불량 검토	.92
	6.4.1 전면 유리파손	.93
	6.4.2 후면접촉 열화	.94
7 <u>-</u>	고듈의 불량 메커니즘에 적용할 시험방법	.97
-	7.1 수송에 의해 일어나는 기계적 부하	.97

7.1.1 단일 모듈의 공진 주파수 결정	97
7.1.2 결정질실리콘 모듈 수송스택의 수송과 환경시험	98
7.1.3 단일 결정질실리콘 모듈의 수송시험	99
7.2 적설로 인한 기계적 부하	104
7.3 자외선 열화 시험	106
7.3.1 자외선 전처리	107
7.3.2 모듈의 성능 열화	108
7.4 암모니아 시험	110
7.4.1 결정질실리콘 유리/포일 모듈에서 수행한 시험	112
7.4.2 유리가 없는 모듈의 시험	113
7.5 결정질실리콘 모듈의 PID 시험	115
7.6 실험실에서 확장된 IEC 시험	119
7.6.1 확장시험의 결과	119
7.6.2 가속시험과 현장경험	122
8 결 론	124
부록 A: 모듈 상태 체크리스트	129
부록 B: 영어-한글 용어 비교	135

# 1 머리말

1974년 11월에 설립된 국제에너지기구(IEA)는 경제협력개발기구(OECD)의 틀 내에서 회원국들 간의 포괄적인 에너지협력 프로그램을 수행하는 자치기구이다. 유럽연합도 여기에 참여한다. 새로운 기술의 연구, 개발과 실증에서의 협력은 프로그램의 중요한 부분이 되어 왔다.

IEA PVPS(태양광발전시스템 프로그램)는 IEA 내에서 수립된 공동 R&D 협약 중 하나이다. 1993년부터 PVPS 참가자들은 태양에너지를 전기로 변환하는 태양광발전 응용 분야에서 다양한 공동 프로젝트를 수행해 왔다.

IEA PVPS 프로그램의 임무는 다음과 같다: 지속가능한 에너지시스템으로 전환하는데 태양광에너지가 핵심적인 역할을 하도록 국제협력을 강화한다. 기본 전제는 점점 더 많은 국가의 그리드 연결 시장에서 배전망과 중앙 송전망 모두 태양광시스템의 진출이 빠르게 확장되고 있다는 것이다.

이런 강한 추세의 시장 확장을 위해서는 태양광시스템의 성능과 지속 가능성, 기술과 설계지침, 계획 방법, 자금조달 등에 대한 신뢰할 수 있는 정보를 다양한 주체와 공유할 수 있어야한다. 특히 주 전력망에서의 태양광 보급률이 높기 때문에 새로운 전력망과 태양광 인버터 관리 전략을 개발하고 태양광 예측과 저장에 더 중점을 두어야하며 전체 에너지시스템에 대한 경제적, 기술적 영향을 조사해야한다. 태양광발전의 탈집중 분산화 특성으로 인해 에너지 생산에 대한 책임이 개인 소유주, 지자체, 도시와 지역의 손으로 더욱 이동함에 따라 새로운 태양광 비즈니스 모델을 개발해야한다.

전체 프로그램은 각 참여 국가와 조직의 대표로 구성된 집행위원회가 이끌며 개별 연구 프로젝트(과제)의 관리는 운영 에이전트(operating agent : OA)의 책임이다. 2013년 말까지 PVPS 프로그램 내에 14개의 과제가 설정되었으며 이 중 6개는 현재 운영 중이다.

IEA PVPS Task 13의 전반적인 목표는 기술성능과 불량에 대한 정보의 수집, 분석을 통해 태양광시스템과 서브시스템의 신뢰성을 향상시키는 것인데, 이렇게 함으로써 태양광시스템의 평가기준을 제공하고, 시스템 용량 설정에 필요한 실제적인 권장 사항도 제공하게 된다.

IEA PVPS Task 13의 현재 회원국은 다음과 같다:

호주, 오스트리아, 벨기에, 중국, EPIA, 프랑스, 독일, 이스라엘, 이탈리아, 일본, 말레이시아, 네덜란드, 노르웨이, 스페인, 스웨덴, 스위스, 터키, 미국.

이 보고서는 태양광 모듈의 불량, 그 원인, 통계, 모듈 출력과 안전 관련성, 후속 불량, 이런 불량들의 탐지와 시험에 대한 상세기술에 중점을 두고 있으며, 주로 웨이퍼 기반 태양광 모듈에 중점을 둔다. 박막모듈도 다루지만 그 시장 점유율이 낮아 신뢰할 수 있는 데이터가 부족한 경우가 많다. 또한 연구팀은 특정 제조업체에만 국한되지 않고 더 광범위한 관련성을 갖는 모듈 불량 유형에 초점을 둔다.

이 보고서의 편집자들은 독일 Institute for Solar Energy Research Hamlin, Emmerthal의 Marc Köntges와, 독일 쾰른 소재 TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH의 Ulrike Jahn이다.

이 보고서는 해당 주제에 대해 Task 13 전문가들 간에 국제적 합의를 본 의견을 최대한 반영한다. 작업의 활동과 결과에 대한 추가정보는 http://www.ieapvps.org에서 찾을 수 있다.

# 2 요 약

태양광시스템 비용을 줄일 수 있는 한 가지 핵심 요소는 모듈의 신뢰성과 서비스 수명을 늘리는 것이다. 통계에 따르면 결정질실리콘 모듈의 정격 출력 열화율은 연간 0.8 %이다[Jordan11]. 모듈의 신뢰성과 서비스 수명을 늘리려면 관련된 도전적인 문제를 이해해야한다. 이러한 이유로 Task 13 국제 전문가 팀은 모듈의 실제 불량에 대한 지식과 개인적인 경험뿐만 아니라 관련 문헌을 정리 요약하였다.

이 작업의 주 대상은 국가와 지역 계획 당국자들은 물론 모듈 설계자, 태양광 산업계, 엔지니어링 관련자, 시험장비 개발자, 시험 회사, 기술 연구 실험실, 표준화위원회 등을 포함한다.

첫 번째 부분에서 이 문서는 모듈 불량을 확인하고 분석할 수 있는 측정방법에 대해 기술한다. 현재 옥외와 옥내 실험실에서 모듈 불량의 특성을 측정하는데 다양한 방법을 사용하고 있다. 진단 도구로 I-V 특성을 사용하는 것뿐만 아니라 이미지 기반 방법과 육안검사에 대해 설명한다. 각 방법에 대한 기초를 설명하고 현재 모범사례를 보여주며, 어떻게 이미지를 해석하는지 소개한다. 정상상태 조건에서의 서모그래피, 펄스 서모그래피와 고정화 서모그래피라는 세 가지 방식 중 가장 일반적으로 사용되는 것은 정상상태 조건에서의 서모그래피 검사이다. 더욱이 전계발광 방법은 모듈의 불량 탐지용으로 좋은 반응을 받고 있어 시험실의 표준적인 접근방식이 되어가고 있다.

그리 흔하지는 않지만 사용하기 더 쉬운 방법은 자외선 형광분석이다. 이 방법은 서모그래피와 전계발광 기술로 탐지된 것과 유사한 모듈 불량을 탐지하는데 사용할 수 있으나, 방법이 효과적이려면 모듈은 최소 1년 반 동안 옥외에 위치해야한다. 현장에 설치된 모듈 상태의 육안관찰 결과를 문서화하기 위해 하나의 규격을 마련했는데, 이 규격는 지금 널리 인정을 받아 관련 시험을 문서화하고자 하는 모든 전문가들이 사용하고 있다. 이 규격의 양식은 표준화된 방식으로 육안확인이 가능한 모듈불량을 문서화하고 통계평가를 목적으로 데이터에 액세스할 수 있도록 한다. 그리고 설치된 모듈에서 결함회로를 탐지할 수 있는 신호전송 방법을 소개한다. 이들 방법으로 발견할 수 있는 모듈 불량에 모든 방법들을 연계시킨다.

두 번째 부분에서는 모듈에서 가장 흔한 불량에 대해 자세히 기술한다. 이 불량들은 다음과 같다: 박리, 백시트 접착 손실, 정션 박스 불량, 프레임 파손, EVA 변색, 셀 균열, 달팽이자국, 탄 자국, PID, 셀과 스트링 상호연결 리본의 단절, 바이패스 다이오드의 결함, 그리고 박막모듈의 특별한 불량으로 커넥터의 마이크로 아크, 션트 열점, 전면 유리파손과 후면 접촉전극 열화이다. 가능한 경우 불량의 원인을 설명한다. 불량을 확인하기 위해 특성 측정방법에 대한 참고문헌이 제공된다. 가능하다면 현장의 불량유형과 가속 노화시험의 통계를 표시한다. 각 불량에 대해 일반적인 후속 불량모드를 포함하여 안전문제와 출력손실에 미치는 영향에 대한 설명이 제공된다.

세 번째 부분에서는 현장에서 모듈 불량을 탐지하기 위한 새로운 시험방법이 제안된다. 지난 몇 년 동안 모듈의 기계적 부하로 인해 많은 문제가 발생했기 때문에 이 부분에 특히 중점을 둔다. 이런 기계적 부하는 수송 중과 경사면에 장착된 모듈위의 적설량으로 인해 발생한다. 또한 모듈의 자외선 열화, 암모니아 부식(종종 동물 사육 건물의 지붕에서 발견됨)과 PID에 대한 시험이 설명되어 있다. 후자의 방법은 여러 나라에서 많은 대안이 제시되었기 때문에 본 보고서가 완성될 때까지 국제 표준화위원회 내에서 논란을 일으켰다. 시험방법을 상세하게 설명하고 이를 불량 설명과 연계시키고 그리고 결과는 가능한 경우 실제 불량 발생과 비교를 하게 된다.

지난 Task 13 프로젝트 단계에서 우리는 "3.2 PV 모듈의 특성측정과 불량의 분류(Characterising and Classifying Failures of PV Modules)"주제가 태양광 연구 분야에서 지속적으로 중요한 주제임을 인식하였다. 현재 불량 메커니즘에 대한 검토에 의하면 일부 중요한 모듈불량과 관련된 원인과 출력손실이 아직 명확하지 않다(예: 달팽이자국과 셀 균열). 그리고 일부 유형의 불량(예 : PID와 셀 균열)을 시험하는 가장 좋은 방법에 대한 몇 가지 의문이 있다. 또한 모듈의 바이패스 다이오드의 결함 혹은 셀 상호연결 리본이 화재로 이어질 수 있다는 사실에도 불구하고 시스템에 일단 설치된 후에는 이런 결함을 쉽고 신뢰할 수 있는 방식으로 탐지하기 위한 작업이 거의 수행되지 않았다. 여기에 대응하기 위해 현재 이 주제에 대해 연구하는 그룹이 있는데, Task 13 프로젝트의 연장선상에서 태양광 모듈의 불량에 대한 심층 검토를 계속할 계획이다.

#### 참고문헌

[Jordan11] D. C. Jordan and S. R. Kurtz, Photovoltaic Degradation Rates - an Analytical Review, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **21** (12–29) (2011) doi: 10.1002/pip.1182

# 3 서 론

일반적으로 제품 불량은 초기 불량(infant failures), 중반기 불량(midlife-failures), 노후(wear-out) 불량의 세 가지 범주로 나뉜다. 그림 3.1은 모듈에 대한 이들 세 가지 유형의 불량에 대한 예를 보여준다. 이들 모듈불량 외에도 많은 모듈은 설치 직후 광유도열화(light induced degradation : LID)를 나타낸다. LID는 원인이 무엇이든 일어나는 불량 유형이고, 모듈에 인쇄된 정격출력은 일반적으로 해당 불량에 의해 예상되는 표준화된 포화 출력손실에 따라 조정된다. 이 문서에서 LID는 포화 출력손실이 예상보다 작거나 같으면 불량이 없는 것으로 정의된다.



그림 3.1: 웨이퍼 기반 결정질실리콘 모듈의 세 가지 일반적인 불량 시나리오. 사용된 약어의 정의 : LID : 광유도 열화, PID : 퍼텐셜유도 열화, EVA : 에틸렌 비닐 아세테이트, j-box : 정션 박스.

초기 불량은 모듈의 동작수명이 시작될 때 발생한다. 결함이 있는 모듈은 빠르게 불량이 일어나고 모듈 제조업체와 설치업체의 비용 상승에 큰 영향을 미친다. 그림 3.2는 독일 모듈 배급업체가 제공한 가동 수명 시작시의 불량 유형분포를 보여준다. 전체 불량의 5 %가 수송 중 손상으로 인해 발생한다. 현장에서 가장 중요한 불량은 정션 박스 불량, 유리파손, 셀 상호연결 결함, 프레임의 느슨함 그리고 박리이다. 아쉽게도 통계에서의 다른 결함들은 잘 정의되어 있지 않다. 모듈의 중반기에 발생하는 불량은 DeGraff [DeGraaff11]의 연구에 설명되어 있다. 그림 3.3은 8년 동안 현장에 있었던 모듈의 불량 분포를 보여준다. 모듈의 2 %는 11~12년의 가동 후 제조업체의 보증을 충족하지 못할 것으로 예상된다. 이 연구는 모듈내 상호연결부의 결함 발생이 상당히 높고, 유리파손에 의한 모듈 불량도 높다는 것을 보여주었다. 모듈 유리파손으로 인한 불량의 비율이 매우 높음을 보여준다. 정션 박스와 케이블(12 %), 셀의 탄 자국(10 %), 봉지재(9 %)의 상대적인 불량률은 비교적 높다.



그림 3.2: 배송 후 초기 2년 내 소비자 불만에 따른 불량률. 비율은 전체 불량 수 대비이다. 모듈은 2006~2010 기간에 독일 배급업체가 제공한 것이다 [Richter11 수정]. 통계는 배송된 약 2 백만 개를 대상으로 작성한 것이다. 다른 불량 카테고리에서 찾을 수 없는 것은 별도로 분류한다.

그림 3.3: 8년 동안 현장에 설치된 21 개 제조업체의 다양한 모듈에서 발견된 모듈 불량에 대한 현장 연구. 비율은 전체 불량 수 대비이다. 전체 모듈의 약 2 %는 약 11~12년 후에 불량이 일어날 것으로 예상된다 (제조업체의 보증을 충족시키지 못함).

대부분의 모듈은 노후 불량 나리오를 거친다. 이 시나리오는 수율분석을 위한 최상의 기반이며 정상 동작하는 모듈의 비용 효율성을 결정한다.

노후 불량은 모듈의 동작수명이 끝날 때 발생하는데, 이것이 모듈의 최대 동작수명을 결정한다. 모듈의 동작수명은 안전문제가 발생하거나 모듈 출력이 통상적으로 초기 정격 출력의 80 %와 70 % 사이로 정의되는 특정 수준 아래로 떨어지면 다하게 된다. 그림 3.4는 15년 이상 동작 후 일부 특수 모듈 유형의 결함율을 보여준다[Schulze12]. 모듈의 주된 불량은 박리, 셀 균열로 인한 셀 조각 분리와 라미네이트의 변색이다. 그러나 이들 모든 불량은 0 %와 20 % 사이, 평균 10 %의 출력손실로 이어진다. 거의 모든 모듈은 제조업체의 출력보증을 충족한다.



그림 3.4: 3개의 제조업체에서 만든 15년 이상 가동 후의 227 개 모듈군에서 발생하는 불량들[Shulze12 수정]. 각 모듈은 하나 이상의 불량유형에 의해 영향을 받을 수 있다. 적갈색과 녹색은 어느 하나의 특정 불량이 있거나 없는 모듈의 비율을 나타낸다. 각 모듈은 하나 이상의 불량유형을 보일 수도 있다.

그러나 Schulze 연구에 사용된 모듈들은 오늘의 모듈들을 대표하지는 않는다. 다른 한편으로 박리와 변색의 원인이 되는 라미네이션 소재는 요즘의 모듈에서는 더 이상 사용되지 않는다. 반면에 이전에는 제조업체가 셀에 균열이 있는지 확인할 가능성이 없었고, 셀과 셀의 금속전극은 요즘 것보다 훨씬 두껍고 셀과 모듈 크기도 요즘 것과 크게 다르다. 이런 사실들은 모듈에서 셀의 일부에서 발생한 셀 조각 분리에 많은 영향을 미친다. 그러나 가장 중요한 장기 열화 메커니즘에 대한 이해도는 장기적으로 안정한 모듈을 생산하는데 핵심이 되는 인자들을 살피는데 도움이 된다. 따라서 불량별 특정시험을 가능하게 하려면 열화 메커니즘을 이해하는 것이 필요하다.

IEC 61215와 IEC 61646 규격에 따른 형식승인 인증은 지난 15년 동안 모듈의 품질 라벨[IEC61215], [IEC61646]로 업계에서 인정을 받았다. 오늘날 대부분의 국내와 국제 자금제공 프로그램에 꼭 필요한 것이다. 결정질실리콘 모듈용 IEC 61215와 박막 모듈용 IEC 61646은 형식승인 규격으로 "초기 불량"을 일으키는 제품의 취약점을 확인하기 위한 목적이지, 제품의 동작수명을 결정하는 시험절차가 아니다. 그러나 이들 규격에는 실제 옥외 스트레스에서 파생된 여러 가지 가속 스트레스 시험이 포함된다.

TÜV Rheinland는 지난 10년 동안 독일 Cologne Solar Testing Centre에서 수행한 총 2,000 개의 인증 프로젝트를 분석하였다. 하나의 인증 프로젝트에서 동일한 모듈 유형의 다양한 변형도 포함되는데, 이는 제조업체가 빈번하게 여러가지 소재를 교체하여 적격성자격을 획득하기 때문이다. 이들 시험은 IEC 61215와 IEC 61646의 설계인증과 IEC 61730[IEC61730]의 안전인증을 기반으로 한 것인데, 그림 3.5에서와

같이 장기적인 추세를 명확하게 확인할 수 있다. 2002년에 모든 프로젝트의 54 %가 여전히 IEC 적격성 인증을 통과하지 못했는데, 2007년에는 새로운 박막모듈이 67 %로 상승하였고, 새로운 결정질 모듈의 경우는 29 %였다. 2007/2008년에 많은 박막모듈 제조 신생업체들이 태양광시장에 진입하여 이러한 불량률 상승에 기여했는데, 이는 새로운 제품 디자인의 선별작업을 빠르게 진행하기 위해 시험기관을 이용했기 때문이다. 마찬가지로, 이 높은 불량률은 특히 아시아에서 시작된 많은 신규 모듈 제조업체들이 시장에 뛰어 들었기 때문인데, 이들은 인증을 시도하기 전에 그 제품들을 완전히 시험하지 않았다. 2012년까지 두 기술에 대한 IEC 프로젝트의 불량률은 10 %로 떨어졌다. 전문가들은 그 이유로, 제조업체가 새로운 모듈 유형을 제조할 때 IEC 규격을 더 충실하게 따라야 한다는 사실뿐 아니라 시장의 지속적인 발전도 꼽는다.



그림 3.5: 2002~2012년 기간 IEC 61215와 IEC 61646 형식승인 시험을 거친 2,000 개 인증 프로젝트의 불량률. 주어진 수치는 수행된 모든 IEC 프로젝트의 합계 대비 최소 1 개의 시험 불량이 있는 IEC 프로젝트의 비율 . 2007년 이후 결정질과 박막 기술은 별도로 표시한다.

그림 3.6과 같이 불량 판정시험의 분포는 결정질 모듈(1,740개 프로젝트)과 박막 모듈 (370개 프로젝트 분석) 사이의 유사성을 보여준다. 2006년에서 2013년 6월 사이에 불량이 난 시험결과들 중, 전체 결정질의 49 %(내부 링)와 모든 박막모듈(외부 링)의 43 %가 TÜV Rheinland 시험소 (그림 3.6에서 파란색으로 표시됨)의 환경 챔버에서 실시한 4개의 시험들에서 불량 판정이 났는데, 200 온도 사이클(TC 200), 고온고습(DH), 습도 동결(HF) 시험과 50 온도 사이클(TC 50)시험이 여기에 포함된다. 환경 챔버 시험들은 예상되는 수명, 소재의 품질과 제품의 제조기술을 나타낼 수 있는 좋은 지표이다. 그러나 요구되는 초기 측정, 즉 스트레스 시험들이 실제로 수행되기 전에 결정질 모듈의 11 %와 박막 모듈의 12 %에서 불량이 발생했다는 것도 주목할 만하다. 이 모듈들의 불량은, 예를 들면 명판의 정보가 요구사항을 충족하지 못하거나 육안검사로 이미 손상이 확인되었기 때문이다. 불량들의 3 % 미만을 포함하는 시험들은 그림 3.6의 "다른 모든 시험(All other tests)(<3 %)"에 요약되어 있다.



그림 3.6: 2006년부터 2013년 6월까지 결정질 모듈에 대한 1,740 IEC 프로젝트(내부 링)와 박막 모듈(외부 링)에 대한 370개 IEC 프로젝트 중 불량 판정 시험의 분포. 하나 이상의 모듈이 특정 시험을 통과하지 못할 경우 불량으로 간주한다. 하나의 인증 프로젝트가 하나 또는 여러 가지 시험 불량에 기여할 수도 있다.

결정질 모듈에서 가장 중요한 시험은 온도 사이클 200(18 %), 고온고습(17 %), 초기 측정(11 %), 습도동결(10 %), 열점 내구성 시험(9 %), 그리고 기계적 부하(8 %) 시험이다. 온도 사이클(TC 200) 시험 중에 웨이퍼 기반 모듈의 납땜 연결이 스트레스를 받게 되는데, 그 결과 결정질 모듈 중 TC 200 시험에서의 불량 비율이 더 높은 것으로 발견되었다. 시간 경과에 따른 TC 200 시험에서의 불량 분포는 2006년 25 %에서 2011년 11 %로 떨어졌다. 습기 침투로부터 태양전지를 보호하기 위한 라미네이션 품질에서 가장 중요한 것은 고온고습 시험이다. 고온고습 시험은 2007년 21 %(최대)에서 2009년 13 %(최소)에 이르는 기간 동안 결정질 모듈에 상당히 중요한 것으로 입증되었다.

박막모듈에 대한 가장 중요한 시험은 고온고습(22 %), 초기측정(12 %), 온도 사이클 200(10 %), 기계적 부하(9 %), 역방향 전류 과부하(9 %) 그리고 열점 내구성(9 %) 시험이다. 그러나 2007~2009년과 2010~2012년 사이의 두 기간을 비교하면 박막 모듈의 경우 불량률이 높은 주요 시험 항목의 관련 특성이 분명히 개선되고 있는데, 이는 고온고습 시험(2007년 44 %, 2011년 11 %), 열점 내구성 시험(2008년 16 %, 2011년 6 %) 들이다. 결정질 실리콘 모듈의 경우 유리 품질이 기계적 부하 시험 불량의 주된 원인이다. 더 많은 제조업체들이 더 높은 최대 과부하 보호율을 추구하는데, 이는 역방향 전류 과부하 시험의 높은 불량률로 이어진다.

가장 중요한 고온고습 시험 후의 불량률은 최근 몇년 동안 감소하였다. 많은 제조업체들은 새로운 제품 혹은 신소재 확장에 따른 사전시험을 위해 현장에 기후/환경 챔버를 보유하고 있는데, 이는 매우 효과적인 불량 예방법이다. 게다가 라미네이션 공정의 개선과 모듈 가장자리의 개선된 보호방안, 예를 들어 커버 밴드의 도입 등도 고온고습 시험 후 박막 모듈의 불량률을 줄이는 핵심 인자들이다.

이 보고서의 목적은 모듈에서의 불량 탐지, 분석과 새로운 시험들을 검토하는 것이다. 문서는 네 부분으로 구성되어 있다. 첫 번째 부분(4 장)에서는 모듈의 불량에 대한 정의를 내리고 모듈 부품을 정의한다. 두 번째 부분(5 장)에서는 모듈의 불량을 확인하고 분석하는데 사용되는 가장 중요하고 새로운 측정방법의 기본 사항에 대해 기술한다. 세 번째 부분(6 장)에서는 모듈의 불량에 대해 자세히 설명하고, 불량 통계, 불량 원인, 불량 분류, 가능한 경우 시간, 온도, 습도 그리고 여타 파라미터들에 대한 불량의 의존성에 대해 기술한다. 네 번째 부분(7 장)에서는 기존 규격에 아직 포함되지 않은 특정 모듈 불량을 시험하는 새로운 시험방법이 제시된다.

#### 참고문헌

[DeGraaff11] D. DeGraaff, R. Lacerda, Z. Campeau, Degradation Mechanisms in Si Module Technologies Observed in the Field; Their Analysis and Statistics, Presentation at PV Module Reliability Workshop, NREL, Denver, Golden, USA, (2011) <u>http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvmrw2011\_01\_plen\_degraaff.pdf</u>

[IEC61215] International Electrotechnical Commission (IEC) 61215: 2nd edn, 2005. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval, Edition 2, 2005-04

[IEC61646] International Electrotechnical Commission (IEC) 61646: 2nd edn, 2008. Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval, Edition 2.0, 2008-05

[IEC61730] International Electrotechnical Commission (IEC) 61730-2: Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 2: Requirements for testing, Edition 1.0 2004-10

[Richter11] A. Richter, Schadensbilder nach Wareneingang und im Reklamationsfall, 8. Workshop "Photovoltaik-Modultechnik", 24/25. November 2011, TÜV Rheinland, Köln

[Schulze12] K. Schulze, M. Groh, M. Nieß, C. Vodermayer, G. Wotruba und G. Becker, Untersuchung von Alterungseffekten bei monokristallinen PV-Modulen mit mehr als 15 Betriebsjahren durch Elektrolumineszenz- und Leistungsmessung, Proceedings of 28. Symposium Photovoltaische Solarenergie, (OTTI, Staffelstein, Germany, 2012)

# 4 정의

## 4.1 모듈 불량의 정의

모듈 불량은, (1) 정상 가동으로 반전되지 않는 모듈출력을 열화시키거나 (2) 안전문제를 일으키는 효과이다. (1) 또는 (2) 의 결과가 없는 순전히 외형적인 문제는 모듈 불량으로 간주하지 않는다. 모듈 불량은 일반적으로 모듈이 현장에서 겪게 되는 상태에서 발생하는 보증과 관련이 있다.

본 보고서에서는, 취급 부주의나 현지의 국부적 환경으로 인한 문제는 "불량"으로 간주하지 않는다. 여기에 몇 가지 사례들이 있다. 한편 모듈의 오염이나 번개로 인한 불량은 모듈 불량으로 간주하지 않는다. 오염 문제는 운영자가 처리해야하며 번개는 모듈 설계에서 반영할 수 없는 불가항력적 사고이다. 반면에, 모듈이 당초에 "폭설 하중"으로 특정되어 있으면, 폭설 하중으로 인한 결함들은 모듈 불량으로 간주된다. 정의의 기본을 명확히 하기 위해 다음 장에서 출력손실 또는 안전문제로 이어질 수 있지만 모듈 불량이 없는 것으로 정의하는 사례를 소개한다.

# 4.2 정의에서 제외된 모듈 불량

모듈 생산과정 중에 직접 발생하는 모듈 결함들이 있을 수 있다. 이 결함들은 가능한 범위에서 일부 모듈이 제대로 동작하지 않는 이유가 될 수 있지만, 결함이 안전과 관련없고 라벨의 출력등급이 생산과정에서의 불완전함으로 인한 출력손실을 반영하는 한 이 결함은 모듈의 불량이 아니다. 결함으로 인해 출력손실이 가속화되지 않거나 향후 안전문제가 발생하지 않는다면 이 결함들은 모듈 불량이 아닌데, 다결정 태양전지에서의 일반적인 결정 결함들 또는 단결정 태양전지에서의 줄무늬 링이 그 예들이다.

게다가 생산에서 유발된 특징 중에 비전문가에게는 불량으로 보일 수 있는 항목이 있는데, 이들 역시 불량이 아니다. 예를 들어, 그림 4.2.1의 모듈은 태양전지 가장자리에 갈색 흔적이 있다. 이 흔적은 반사방지 코팅을 증착하는 동안 태양전지 캐리어로부터 발생하는데, 모듈 불량으로 간주되지 않는다.



그림 4.2.1: 태양전지 가장자리의 갈색 흔적은 불량이 아니다.

모듈 출력을 변화시키고 모듈 불량으로 간주되지 않는 여타 일반적인 효과들은 다음과 같다.

잘 알려진 붕소-산소 복합체 [Bothe06]로 인한 결정질 실리콘 모듈에서의 광유도 출력 열화는 모듈 불량으로 정의하지 않는데, 그 이유는 제조업체가 모듈의 정격출력을 측정할 때 이 효과가 반영되어 있기 때문이다. 이는 규격 EN 50380 [EN 50380]에 정의되어 있다. 제조업체가 출력 등급 측정 시 이 영향을 고려하지 않는다면 이는 모듈 불량이 된다.

비정질실리콘(a-Si) 기반 모듈은 빛으로 인해 초기 열화가 발생하는데, 이는 옥외 노출 후 초기 수개월 내에 최대 10~30 %에 달하는 출력손실의 요인이다[Shah10]. 이 열화의 일부는 연중 따뜻한 달 동안 열 어닐링을 통해 일시적으로 회복될 수 있다. 빛에 의한 열화와 열에 의한 회복이라는 두 가지 상반되는 효과는 모듈 기술, 지역 기후조건과 통합 유형에 따라 평균값에서 0~15 % 정도 성능에 계절적 변화를 가져온다[Fanni11, Skoczek11].

관찰된 열화 현상은 1977년 발견[Staebler77] 이후 연구된 잘 알려진 Staebler-Wronski 효과 (SWE) [Shah10, Gostein11] 때문이다. 아직까지도 완전히 이해되지는 않았지만, 이 효과는 캐리어 수명을 감소시키는 광유도 결함 센터와 관련이 있는 것으로 알려져 있는데, 이는 고온에서의 열 어닐링을 통해 부분적으로 반전될 수 있다. 더 두꺼운 진성(intrinsic) 층을 가진 단일접합 모듈은 비정질실리콘 다중접합 모듈 및 마이크로모프(미세결정/비정질) 모듈과 같이 더 얇은 진성 층을 가진 것에 비해 영향이 훨씬 적다. 열화율이 높을수록 잠재적 회복율도 높아진다. 그림 4.2.2는 열 어닐링 효과를 보여주기 위해 두 개의 스트링 중 하나를 절연시킨 1세대 단일접합 비정질실리콘 시스템의 예를 보여준다.



그림 4.2.2: 단일접합 비정질실리콘 모듈에서 통풍이 되는 스트링(파랑)과 후면 절연시킨 스트링(빨강)의 비교.

관찰된 불안정성으로 인해 I-V 곡선을 측정하여 비정질실리콘 모듈의 출력을 결정하기 전에 반드시 안정화(stabilization)를 거쳐야 한다(5.2 장 참조). 안정화는 [IEC61646]에 설명된 광조사(light soaking) 절차에 따라 수행해야한다. 비정질실리콘 모듈의 경우 광흡수는 주로 충진율(결과적으로 모듈 출력)에 영향을 미치며, 모듈의 단락전류에는 약간의 영향을 그리고 개방회로 전압에는 더 작은 영향을 미친다. 초기 출력과 안정화 출력 모두 규격 EN 50380 [EN 50380]에 정의된 대로 데이터 시트와 명판에 명시해야한다.

여기서 SWE 현상으로 인한 출력 변화는 제조업체가 제공한 모듈의 안정화 출력이 측정 된 안정화 값보다 크거나 같은 한 모듈 불량은 아닌 것으로 간주한다.

# 4.3 외부 원인으로 인한 중요한 모듈 불량

일부 불량은 통상적으로 모듈 불량이라고 정의하기 어렵고 또는 계약자, 설치자, 시스템 설계자의 불량 혹은 다른 이유 때문이라고 정의하기가 어렵다. 여기서는 이러한 유형의 불량에 대한 사례를 설명한다.

#### 4.3.1 클램핑

현장에서 비교적 자주 발생하는 불량은 클램프로 인해 발생하는 무프레임(frameless) 모듈의 유리파손이다. 그림 4.3.1에는 현장에서 발견되는 두 가지 사례가 있다.

유리/유리 모듈은 유리파손에 더 민감하다. 다른 한편으로, 불량의 원인은 계획과 설치단계에서 (1) 모듈의 불량한 클램프 형상(예 : 날카로운 모서리), (2) 너무 짧고

좁은 클램프[Dietrich08] 또는 (3) 제조업체의 매뉴얼에 따라 선택되지 않은 모듈의 클램프 위치 등이 있다. 유리파손을 유발하는 두 번째 원인은 클램프의 장착 또는 위치선정 단계에서 나사를 과도하게 조이는 경우이다[Urban09].

유리파손으로 외부 산소와 수증기가 모듈에 침투하여 셀과 전기회로 부식이 일어나는데, 이는 시간이 지남에 따라 성능손실을 야기한다. 유리파손으로 인한 주요 문제는 전기안전 문제이다. 첫째, 특히 습한 조건에서 모듈의 절연이 더 이상 보장되지 않는다. 둘째, 유리파손으로 인해 열점이 발생하여 모듈의 과열로 이어진다.



그림 4.3.1: (좌) : 나사를 너무 조여서 유리가 파손된 것을 보여준다. (우) : 불량한 클램프 설계로 인해 파손된 모듈이다.

## 4.3.2 수송과 설치

수송[Reil10, Koentges11]과 설치[Olschok12]는 모듈 수명에 있어 첫 번째 중요한 단계이다. 일부 모듈들의 유리 커버가 파손되거나 라미네이트 내에 있는 셀이 진동과 충격으로 인해 파손될 수 있다. 전자의 경우 유리 파손은 수송 또는 설치로 인한 것으로 보기 쉽다. 이것은 분명히 모듈 불량이 아니다. 그러나 셀 파손의 원인은 결정하기가 훨씬 더 어렵다. 육안으로 볼 수 없고, 대부분의 경우 셀 파손 발생 직후 모듈의 출력측정으로는 탐지할 수 없다. 전계발광 이미지(5.4 장) 또는 고정화 서모그래피 이미지(5.3.3 장)로만 손상을 확인할 수 있다. 셀 균열로 이어지지만 반드시 유리 파손으로 연결되지는 않는 일반적인 상황은 다음과 같다:

- 1. 모듈이 넘어짐.
- 2. 수송 중에 견고하지 못한 팔레트가 스택에서 가장 아래에 있는 모듈에 닿음.
- 수송 스택 내 모서리들이 너무 타이트함. 스택의 상단 모듈을 내리는 도중 두 번째 위에 있는 모듈이 같이 들리면서 아래로 갑자기 떨어짐.
- 4. 누군가 모듈을 밟음.
- 적절히 설계된 수송 컨테이너에서 정상적인 수송 과정 중에도 모듈의 셀이 깨질 수 있음.

이 손상은 6.2.1 장에 기술된 결과를 초래할 수 있다. 위 5의 경우 누구 책임인지 결정하기가 특별히 어렵다. 현재 수송 중에 있는 모듈이 무엇에 견딜 수 있어야하는지에 대한 정의가 없다. 따라서 7.1 장에서는 수송을 목적으로 한 모듈의 시험방법에 대해 설명하고자 한다.

### 4.3.3 퀵 커넥터 불량

퀵 커넥터는 모듈에서 모듈 상호간을, 퓨즈 박스, 연장 케이블, 결합기(combiner) 박스와 인버터에 전기적으로 연결할 때 사용한다. 이 부품은 시스템의 안전과 신뢰성 있는 전력생산에 매우 중요하다. 그러나 태양광 커뮤니티에서 사용가능한 퀵 커넥터의 신뢰성에 대한 문헌은 거의 없다. 특수한 종류의 접촉 쌍(contact pair)으로서의 저전압 직류 커넥터는 태양광에서의 활용뿐만 아니라 자동차(전기 자동차)와 관련하여 역시 자주 논의되었다. 일반적으로 전기 접촉은 Electrical contact conferences [Schoepf12]에서 언급되었는데, 태양광시스템과 관련한 여러 발표가 있었다. 주제에 대한 간략한 소개는 Rieder [Rieder00, Rieder01]의 간행물을 참조하면 된다.

대부분의 경우 퀵 커넥터로 인한 문제는 모듈 불량으로 간주하지 않는다. 일반적인 불량들은 모듈 설치현장에서 모듈을 확장 케이블, 퓨즈 박스, 결합기 박스 또는 인버터에 연결할 때, 정확히 맞지 않는 다른 유형의 퀵 커넥터이거나 잘못 압착된 퀵 커넥터를 사용하였기 때문에 발생한다.

잘맞지 않거나 잘 압착되지 않은 퀵 커넥터는 전체 스트링에서 총 출력손실을 유발할 수 있다. 더 나쁜 경우에는 전기 아크가 발생하여 화재로 이어질 수 있다. 대부분의 경우 퀵 커넥터는 모듈의 라미네이트보다는 목재 지붕 빔이나 단열 재료와 같은 가연성 재료에 훨씬 더 가깝게 위치한다. 화재가 발생한 75개 태양광시스템에서 그 원인에 대한 통계 검토에 따르면 퀵 커넥터가 화재를 유발할 가능성(29 %)이 모듈의 나머지 부품(34 %) 혹은 여타 시스템 부품(37 %)만큼 높은 것으로 나타났다 [Schmidt13].

퀵 커넥터의 안전 관련성에도 불구하고 규격화된 퀵 커넥터는 아직 없다. 오히려 그 반대로, 시장에는 매우 비슷해 보이고 심지어는 꼭 맞는 것처럼 보이는 퀵 커넥터가 많지만 결코 결합되어서는 안 된다.

현재, 국제 태양광 커넥터 규격(international PV connector standard) [IEC62852]은 그 초안만이 존재하는 반면에, 유럽에서의 규격 EN 50521[EN50521]은 보다 일반적인 IEC 61984[IEC61984]를 기반으로 2008년부터 제공되어왔다.

### 4.3.4 번개

번개로 인한 바이패스 다이오드의 결함은 모듈이 설계에 반영하지 못한 외부 요인으로 인해 발생한 것이다. 이는 흔히 발견되어왔고 후속 안전 불량을 일으킬 수 있지만 모듈 자체가 불량의 원인은 아니다. 번개로 인해 발생하는 일반적인 결함들은 바이패스 다이오드의 개방회로 혹은 직접 번개를 맞아 기계적으로 모듈이 깨지는 것이다. 두 가지 결함 유형 모두 후속 불량으로 열점을 유발할 수 있다.

## 참고문헌

[Bothe06] K. Bothe, J. Schmidt, Electronically activated boron-oxygen-related recombination centers in crystalline silicon, *Journal of Applied Physics* **99** (2006), p. 013701

[Dietrich08] S. Dietrich, M. Pander, M. Ebert, J. Bagdan, Mechanical Assessment of large photovoltaic modules by test and finite element analysis, Proc. 23rd EUPVSEC (WIP, Valencia, Spain, 2008), p. 2889-2892

[EN 50380] European Standard (EN) 50380: Datasheet and nameplate information for photovoltaic modules, 2003-09

[EN5021] EN 50521:2008 + A1:2012: Connectors for photovoltaic systems - Safety requirements and tests, CENELEC, 2013-02

[Fanni11] L. Fanni, A. Virtuani, D. Chianese, A detailed analysis of gains and losses of a fully-integrated flat roof amorphous silicon photovoltaic plant, *Solar Energy* **85** (2011), pp. 2360–2373

[Gostein11] M. Gostein, L. Dunn, Light soaking effects on photovoltaic modules: Overview and literature review, Proc. 37th IEEE PVSC (IEEE, Seattle, USA, 2011), pp. 003126–003131

[IEC 61646] IEC 61646 Ed2.0: Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval. English & French version - 81p. IEC 2008-05

[IEC62852] IEC62852 Ed.1.0: Connectors for DC-application in photovoltaic systems – Safety requirements and tests. Draft version 82/707/NP. 40p. IEC 2012

[IEC6984] IEC 61984 Ed. 2.0 Connectors - Safety requirements and tests. English & French, 91p. IEC 2008-10

[Koentges11] M. Köntges, S. Kajari-Schröder, I. Kunze, U. Jahn, Crack statistic of crystalline silicon photovoltaic modules, Proc. 20th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011), pp. 3290-3294

[Olschok12] C. Olschok, M. Pfeifer, M. Zech, M. Schmid, M. Zehner, G. Becker, Untersuchung von Handhabungsfehlern bei der Montage und Installation von PV Modulen, Proc. 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI, Bad Staffelstein, Germany, 2012), p. 202

[Reil10] F. Reil, J. Althaus, W. Vaaßen, W. Herrmann, K. Strohkendl, The Effect of Transportation Impacts and Dynamic Load Tests on the Mechanical and Electrical Behaviour of Crystalline PV Modules, Proc. 25th EUPVSEC (WIP, Valencia, Spain, 2010), pp. 3989 – 3992

[Schoepf12] Thomas Schöpf (ed.): Electrical Contacts 1953 to 2012. Proceedings of the IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts (1953-2012) - International Conference on Electrical Contracts (1961-2012) - Albert Keil-Kontaktseminar (1972-2011). ISBN 978-3-8007-3459-7, 97 conference proc. on DVD app. 4500p. VDE-Verlag 2012

[Rieder00] Werner Rieder, Electrical Contacts. An Introduction to their Physics and Applications. ISBN-13: 9780780396395. IEEE 2001 - 90 pages, [Rieder01] Werner Rieder, Elektrische Kontakte: Eine Einführung in ihre Physik und Technik. ISBN-13: 9783800725427. VDE Verlag GmbH, 2000 - 56 pages

[Schmidt13] H. Schmidt, F. Reil, Begrüßung zum 2. Workshop "PV-Brandschutz", Zweiter Brandschutz-Workshop, Freiburg, Germany, 24.01.2013 (<u>http://www.pv-brandsicherheit.de/fileadmin/WS 24-01-13/01 Schmidt Begr%C3%BC%C3%9Fun g.pdf</u>)

[Shah10] A. Shah, W. Beyer, Thin-film Silicon Solar Cells. Shah A (ed.), EPFL Press, 2010, pp. 30-35

[Skoczek11] A. Skoczek, A. Virtuani, T. Cebecauer, D. Chianese, Energy yield prediction of amorphous silicon PV modules using full time data series of irradiance and temperature for different geographical locations, Proc. 26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011), pp. 3248–3252

[Staebler77] D. L. Staebler, C. R. Wronski, Reversible conductivity changes in discharge-produced a-Si, *Applied Physics Letters* **31**, (1977), pp. 292-294

[Urban09] H. Urban, Befestigungstechniken von Dünnschichtmodulen, Fifth User Forum Thin Fim Photovoltaics (Würzburg, Germany, January 2009)

# 4.4 안전 불량과 안전 범주의 정의

안전 불량은 모듈을 활용 및 사용하거나 단순히 모듈 주변을 지나가는 사람을 위험에 빠뜨릴 수 있는 불량이다. 안전 범주는 태양광시스템의 안전에 대한 불량유형에 따라 분류한다. 표 4.3.1은 세 가지 등급을 정의한 것이다. 이러한 등급들은 불량이 발생하는 경우 취해야하는 조치를 평가하는 데 유용하다.

안전 범주	설명
А	불량이 안전에 미치는 영향이 없다.
B(f,e,m)	불량이 화재를 야기하는 원인이 될 수 있다 (f), 불량은 전기적 충격의 원인이 될 수 있다 (e), 후속 불량과/혹은 2 차 불량이 일어나면 불량이 물리적 위험을 유발할 수 있다 (m).
C(f,e,m)	불량이 직접적인 안전문제를 유발한다 (f, e, m의 정의는 B 참조)

표 4.3.1: 안전 범주의 목록.

그러나 안전 장애가 발생한 후 필요한 조치는 모듈의 활용에 따라 다르다. 예를 들어, 전기적 충격의 중요도는 모듈이 사용되는 활용등급에 따라 달라지는데, 이는 IEC 61730-1 [IEC 61730-1]에 정의되어 있다. 예를 들어, C(e) 안전등급은 손상된 모듈이 해당 활용 등급에 전기적 위험을 초래할 수 있음을 의미한다.

또한 불량으로 일어나는 물리적 위험은 또 다른 조치로 이어질 수 있는데, 예를 들어 머리 위에 설치된 모듈 또는 숙련된 사람만 접근할 수 있는 울타리로 둘러싸인 현장에 설치된 모듈에서 기계적 결함이 발생하는 경우이다. 전자의 경우 B(m) 또는 C(m) 안전 범주에 속하는 모듈은 즉시 교체해야하지만, 후자의 경우 모듈이 제자리에 남아있을 수도 있다.

### 참고문헌

[IEC 61730-1] International Electrotechnical Commission (IEC) 61730-1: Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction, 2004-10-14

# 4.5 출력손실 불량과 출력손실 범주의 정의

IEC 60904 [IEC 60904]에 따라 측정된 모듈 출력 Pm에 측정의 총 불확도 △Pm 을 더한 값이 모듈 라벨에 인쇄된 출력 Pi에서 라벨에 명시된 허용오차 △Pi를 뺀 값보다 더 작으면 출력손실 불량이 일어난다.:

 $P_{\rm m} + \varDelta P_{\rm m} < P_{\rm l} \cdot \varDelta P_{\rm l} ~~. \label{eq:pm}$ 

(4.4.1)

반대의 정의는 출력손실이 없는 경우 규격 IEC 61853-1 [IEC 61853-1]에 나와 있다. 출력손실 범주는 출력손실이 초기 출력 값에서 모듈의 서비스 수명 시간에 따라 어떻게 변화하는지 설명한다. 대부분의 경우 기준 값 사이의 이러한 불일치는 모듈 라벨에 인쇄된 출력이 초기 모듈 출력에서 크게 벗어날 수 있기 때문에 일관성 없는 결과를 초래할 수 있다.

그러나 각 정의는 그 활용 분야별로 유용하다. 1. 법적 활용: 출력손실 불량은 모듈 라벨에 인쇄된 출력을 기준 값으로 사용한다. 2. 기술적 활용: 출력손실 범주는 초기 출력을 기준 값으로 사용한다.

표 4.4.1의 출력손실 범주 정의는 시간 경과에 따른 불량의 영향 평가를 가능하게 한다.

Ŧ	4.4.1:	출력손실	범주의	정의.
---	--------	------	-----	-----

출력손실 범주	설 명
Α	출력손실이 탐지 한계 미만 <3 %
B	시간에 따른 출력손실 열화가 기하급수적
<u>C</u>	시간에 따른 출력손실 열화가 직선적
D	시간에 따른 출력손실 열화가 포화
E	시간에 따른 출력손실 열화가 단계적
E	출력손실이 탐지 한계 미만 <3 %

출력손실 범주에 대한 부록은 출력손실의 종속성에 대한 정보를 추가하였다. 가능한 부록은 표 4.4.2.에 설명되어 있다. 다음 예는 시간 C(t, h, u)에 따른 직선적인 출력손실을 기술한다. 이 사례에서 출력손실은 온도, 습도 그리고 자외선 조사와 함께 증가한다.

부록 letter	출력손실이 아래와 함께 증가
t	온도
V	전압
i	전류
h	습도
m	기계적 부하
u	자외선 조사
tc	열 사이클
s	음영

표 4.4.2: 출력손실에 영향을 미치는 의존성 인자 목록.

### 참고문헌

[IEC 60904] International Electrotechnical Commission (IEC) 60904: Photovoltaic devices, 2006

[IEC 61853-1] International Electrotechnical Commission (IEC) 61853-1: Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 1: Irradiance and temperature performance measurements and power rating, 2011

# 4.6 결함의 정의

모듈에서의 결함(defect)은 예측한 바를 벗어난 모든 것이다. 하나의 결함이 모듈 불량을 의미할 수도 있고 아닐 수도 있다. 결함은 불량보다 훨씬 광범위한 용어이다. 결함이 반드시 모듈의 안전 또는 출력손실을 초래하지는 않지만 완벽한 모듈과는 다른 모듈의 한 부분을 명시한다.

# 4.7 모듈 부품의 정의

모듈 구성요소(components)와 다양한 수준의 전기적 상호연결에 대한 용어들은 때때로 모호하거나 서로 바꿔 사용하여 혼란을 초래한다. 아래에서는 각 구성요소에 특정된 결함과 불량을 언급할 때 보다 명확성을 기하기 위해 여러 가지 모듈 부품(parts)에 대하여 정의하고자 한다. 간결함을 위해 혹은 이미 IEC/TS 61836 [IEC61836]에 제공된 모호하지 않은 모듈 구성요소(예 : 프레임, 정션 박스, 봉지재 등)에 대해서는 정의를 제공하지 않는다.

'셀'은 단일접합과 연관된 전압을 갖는 가장 작은 반도체 조각으로 정의한다. 다결정 또는 단결정실리콘 모듈에서 각 셀은 단일 실리콘 조각으로 구성된다. 박막모듈에서 반도체 소재는 전기적 절연 영역을 생성하기 위해 소재를 가로질러 스크라이빙하여 정의되는 셀들로 넓은 면적의 기판에 증착된다. 셀들의 '스트링'은 일련의 셀을 나타낸다. 일반적으로 웨이퍼 기반 모듈의 경우 10~12개의 셀, 그리고 박막모듈의 경우 약 60~100개 셀들이 직렬로 연결된다. 2개 이상의 셀 스트링을 바이패스 다이오드와 병렬로 연결하여 전기적으로 독립된 '서브모듈'을 형성하는데, 이 기능은 서브모듈에 없는 모든 셀 혹은 스트링들과는 분리되어 있다.

최대 4개 수준의 금속전극과 전기적 상호연결부(interconnect)들이 고려될 수 있다. '그리드 선'(gridlines, 또 fingers라고 바꿔 부르기도 함)은 셀 표면에 있는 가장 미세한 수준의 금속전극으로 두께가 0.4 mm 미만인 선들의 배열로 구성된다. 그리드 선의 전류는 역시 셀 표면에 있는 '버스바(busbar)'에 수집된다. 그림 4.6.1은 단결정 또는 다결정실리콘 셀의 그리드 선과 버스바의 개략도이다.



Busbars

그림 4.6.1: 실리콘 셀의 금속전극은 그리드 선들과 버스바들로 구성된다.

직렬로 연결된 셀은 '셀 상호연결 리본'에 의해 스트링을 형성하도록 연결된다. 셀 상호연결 리본은 종종 버스바 검사를 모호하게 하는데, 이는 그리드 선이 직접 버스바와 겹치기 때문이다. 여러 개의 스트링들은 스트링 상호연결부(string interconnect)'를 통해 연결되는데, 주로 모듈의 가장자리에 위치하여 모듈 프레임이나 커버 층들에 의해 가려질 수 있다. 그림 4.6.2는 셀 상호연결 리본과 스트링 상호연결부를 설명하는 개략도이다. 금속전극 혹은 상호연결부의 배열은 단결정과 다결정실리콘 모듈보다는 박막모듈에서의 규격화가 미흡하다. 박막 모듈의 경우 4가지 수준의 금속전극과 전기적 상호연결부들이 모두 필요하지는 않을 수도 있다. 이러한 모듈에 대한 명명 규칙은 위에서 설명한 특정 상호연결부 수준의 기능에 해당한다.



그림 4.6.2: 셀은 상호연결 리본들을 통해 스트링으로 전기적으로 연결되고, 스트링 상호연결부는 여러 스트링을 연결한다.

#### 참고문헌

[IEC61836] IEC/TS 61836 Ed. 2.0 2007-12, Solar photovoltaic energy systems - Terms, definitions and symbols

# 5 불량을 확인하기 위한 측정의 기본

여기서는 가장 중요한 측정방법에 대한 장치의 구성, 최선의 사례와 해석에 대해 기술하고자 한다. 각 장의 끝에는 이 측정방법들로 확인할 수 있는 불량의 목록을 제시하였다.

# 5.1 육안검사

태양광 모듈에서의 불량과 결함을 찾아내는 가장 효과적이고 빠른 방법은 육안검사(visual inspection)이다. 이 방법은 국제시험규격인 IEC 61215에 있는 것으로 새로운 모듈에 적용되는데, 오래 사용된 모듈에는 적합하지 않다.

## 5.1.1 IEC 규격에 따른 육안검사

시험소에서 환경, 전기 혹은 기계적 스트레스(응력) 부가 전과 후에 육안검사가 이루어진다. 스트레스 시험은 생산 전 단계에서의 모듈 설계 평가, 생산 품질 그리고 모듈의 수명을 평가하기 위해 사용된다. 가장 널리 적용되는 스트레스는 : 온도 사이클링(thermal cycling), 습도-동결 사이클링(humidity-freeze cycling), 고온고습 노출(damp heat exposure), 자외선 조사(UV irradiation), 기계적 부하(mechanical loading), 우박 충격(hail impact), 옥외노출(outdoor exposure) 그리고 열적 스트레스이다.

육안검사에서는 모듈을 구성부품으로 나누어 각 부품을 검사할 수 있고 관련 결함들에 대한 문서 작업을 별도로 할 수도 있다. IEC 61215에서는 육안검사에 1000 룩스 이상의 밝기를 필요로 하고 맨 눈으로 탐지할 수 있는 결함들만 고려대상이 된다.표 5.1.1은 각 구성부품별로 발견되는 불량 항목을 정리한 것이다.

태양광 모듈 부품	모듈 불량
모듈의 앞면	거품, 박리, 황변, 갈변
태양전지 셀	깨짐, 금이 감, 반사방지막의 변색
셀 금속전극 셀과 셀 연결	탄 자국, 산화됨
프레임	휘어짐, 깨짐, 스크래치, 틀어짐
모듈의 뒷면	박리, 거품, 황변, 스크래치, 탄 자국
정션 박스	헐거워짐, 산화, 부식
와이어-커넥터	분리됨, 취약함, 전기 부품 노출

표 5.1.1: IEC 61215 육안검사에서 발견되는 전형적인 불량들.

육안으로 확인되는 모든 결함을 기록하는 것은 비록 적절하지 않은 것으로 판명이 나더라도 시험소로서의 훌륭한 관행이다. 왜냐하면 시험절차 중에 더 나빠지는 결함들의 경우에도 문서작업이 보다 완전하게 이루어지고 그 이후까지 추적할 수 있기 때문이다. 훌륭한 문서작업을 위해서는 다음 규칙들이 고려되어야 한다. 빛이나 플래시 반사 그리고 거울 이미지 없이 사진을 촬영해야한다. 각 결함의 위치와 크기가 기록되어야 한다. 결함을 설명할 수 있는 명확한 용어와 정의가 사용되어야 한다. 적어도 같은 시험소에서는 개인의 판단에 의해 야기될 수 있는 해석상의 오류를 최소화하기 위해 결함을 설명하는 표준적인 방법이 요구된다. IEC 61215와 IEC 61646의 7절에 모듈의 설계 적격성에서 불량(통과되지 못함)을 야기한 주요 시각적인 결함들이 정의되어 있는데, 그 상세 내용은 표 5.1.2에 요약되어 있다. 표 5.1.2: IEC 61215 [IEC61215]와 IEC 61646 [IEC61646]의 7 절에 정의된 시각적 결함. 불량들은 "장 절" 열에 표기한 장절에서 상세 설명을 볼 수 있다. "안전"과 "출력" 열에 사용된 코드는 4.3 장, 4.4 장에 정의되어 있다.

장 절	유형	안전	출력	이미지
	외부 노출된 표면, 기판, 프레임, 정션 박스가 휘어지거나 정렬이 어긋나 있어 모듈의 설치와 동작에 손상을 줄 경우	B(m,e)	A	
	아크 방전의 위험이 있을 정도로 모듈 와이어가 다이오드를 접촉하고 있는 경우 - 동작이 제대로 원활하지 않음	B(f)	A	and a set
	라미네이트된 모듈 내에 셀 조각이 발견되어 동작에 손상을 줄 경우	В	A	
6.2.2, 6.2.3	셀에서의 균열 - 셀 면적의 10% 이상이 전기회로로부터 벗어나는 균열 전파	A	D	
6.1.1	버블이나 박리가 생겨 전기회로의 특정 부분과 모듈의 가장자리 사이에 연속적인 경로가 형성되는 경우	C(e)	<u>D/E</u>	[Zamini07]
	모듈의 동작이나 설치에 장애가 있을 정도로 기계적인 일체성이 손실된 경우	B(e,m)	A	

## 5.1.2 현장에서의 시각적 불량들의 문서화

육안검사는 모듈의 불량 원인을 확인하거나 미래에 불량을 일으킬 수 있는 문제를 확인할 수 있는 강력한 도구이다. 때때로 미적 문제로 연결되는 변화들은, 비록 변경 모듈이 동작하더라도 불량으로 간주된다. 성능에서의 많은 변화들은 눈에 보이지 않아 더 정밀한 도구로 조사할 필요가 있지만, 육안검사는 열점들(탄 자국들), 박리, 봉지재 황변, 백시트 터짐, 정션 박스 불량 그리고 여타 많은 결함들을 확인하는데 상당히 효과적이다.

육안검사는 매우 간편하여 매우 광범위하게 데이터들을 수집할 수 있게 해준다. 여기서는 현장에 설치된 모듈에서 시각적으로 관찰 가능한 결함들의 평가용 검사 체크 리스트를 개발하여 이런 데이터들의 수집을 정규화하고자 한다. 모듈 상태에 대해 Task 13 그룹들이 합의한 체크 리스트는 부록 A에 있다. 이 보고서에서는 이런 체크 리스트를 사용하여 시각적인 불량들을 수집하였다. 이 체크 리스트를 현장에서의 육안검사용 국제규격으로 권장한다. 표 5.1.3은 육안검사로 탐지할 수 있는 불량들의 목록과 사진을 담은 것이다.

표 5.1.3: 육안검사로 탐지할 수 있는 불량들의 목록. 불량들은 "장 절"열 표기한 장절에서 상세 설명을 볼 수 있다. "안전"과 "출력" 열에 사용된 코드는 4.3과 4.4 장에 정의되어 있다

장 절	여명	안전	출력	이미지
6.2.4	하나의 버스바를 따라 가열되면서 백시트에 탄 자국들	B(f,e,m)	<u>D/E</u>	-
6.2.4	전면에서의 탄 자국들, 금속 상호연결부를 따라 가열과 연관된 봉지재의 탈색	B(f,e,m)	<u>D/E</u>	Dark Discoloration on String Interconnect Gridline Cell Interconnect Ribbon
6.1.1	다결정 실리콘 모듈의 박리	B(e)	<u>D/E</u>	

6.1.1	결정질 실리콘 모듈의 박리	B(e)	<u>D/E</u>	
-	박막 모듈의 전기화학적 부식과 관련된 박리	B(e)	<u>D/E</u>	
6.4.1	박막 모듈의 유리 파손	B(e)	<u>D/E</u>	
6.2.1	셀의 중앙에 약간 갈변된 EVA, 그러나 표백현상은 대기 중 산소와 접촉이 가능하거나, 초산이 셀에서 빠져나오는 가장자리에 충분히 가까운 EVA의 일부분에서 일어남	A	<u>C</u>	
6.2.1	하나의 단일 셀의 온도가 더 뜨거우면 다른 부위들보다 더 빨리 갈변됨	B(f)	D	

6.2.1, 6.2.2	2 개의 균열을 가진 셀 위의 갈변된 EVA. 셀 균열들을 따라 광표백이 일어나 균열이 보임. 갈변이 나타날 때까지는 수년이 소요됨. 이것을 달팽이자국으로 오인하지 않도록 주의.	B(f)	<u>C</u>	[Schulze13]
6.2.3	달팽이자국은 셀 위에 있는 그리드 선에 사용된 실버 페이스트의 변색. 변색은 셀 균열들을 따라 나타남. 이것을 셀 균열들을 따라 일어나는 광표백으로 오인하지 않도록 주의.	B(f)	C	
6.1.2	백시트의 박리	B/C(e)	<u>D</u>	

구부러지거나 잘못 정렬된 외부표면, 프레임 또는 정션 박스와 같은 시각적 결함들은 현장에서 불량들로 이어질 수 있다. 그렇지 않으면 균열된 셀들과 같은 결함들이 출력손실 또는 안전 문제가 있는 모듈의 후속 불량들을 일으킬 확률이 높다. 박리 또는 셀과 프레임 사이의 좁은 거리 등 여타 결함들은 안전 불량을 야기할 수 있는데, 이는 절연이 보장되지 않기 때문이다.

## 참고문헌

[IEC61215] International Electrotechnical Commission (IEC) 61215: 2nd edn, 2005. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic modules - Design qualification and type approval.

[IEC61646] International Electrotechnical Commission (IEC) 61646: 2nd edn, 2008. Thin-film terrestrial photovoltaic modules - Design qualification and type approval.

[Schulze13] K. Schulze, M. Groh, M. Nieß, C. Vodermayer, G. Wotruba und G. Becker, Untersuchung von Alterungseffekten bei monokristallinen PV-Modulen mit mehr als 15 Betriebsjahren durch Elektrolumineszenz- und Leistungsmessung, Proc. 28. Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI, Staffelstein, Germany, 2013)

[Zamini07] S. Zamini, S. Mau, T. Krametz: "IEC 61215 - Erfahrungen aus 4 Jahren Prüftätigkeit." TÜV Modulworkshop, (TÜV, Cologne, Germany) 2007

# 5.2 전류-전압 곡선

I-V 특성곡선의 측정을 통해 모듈의 단락전류(short-circuit current), 개방전압(opencircuit voltage), 그리고 여타 파라미터들을 확인한다. 일반적인 모듈 I-V 측정 시스템은 자연광 또는 인공 시뮬레이션 광원, 시험 중에 모듈에 빛을 조사하는 시험 벤치, 그리고 외부 전자부하나 전원장치로 모듈을 가로질러 전압 혹은 전류를 변화시킬 때 I-V 곡선을 측정할 수 있는 모듈 온도 제어, 모니터링 설비, 데이터 수집시스템으로 구성된다.

자연광 조건에서 휴대용 I-V 추적기를 측정에 자주 사용하는데, 표준 시험조건(STC, 1,000 W/m<sup>2</sup>, 25°C, AM 1.5G IEC 60904-3 기준 스펙트럼 [IEC60904-3]) 하에서는 별로 사용하지 않는다. 일반적으로 일사계 혹은 태양광 조도 센서를 글로벌 조사강도 등급을 매기는 기준 태양광 소자로 사용한다. 비교를 위해서는, STC에서의 데이터 시트 값들로 측정된 I-V 곡선을 수정해야한다. IEC 60891 [IEC60891] 참조.

시뮬레이션 된 광조사 조건 하에서 광원의 조사강도 기준 측정을 위해, 시험하고자 하는 모듈과 동일한 혹은 유사한 분광응답 특성을 가진 기준 태양전지 혹은 기준 태양광모듈을 사용한다. 측정환경은 제어하기 훨씬 쉽기 때문에 시험 파라미터들(Isc, V<sub>oc</sub>, P<sub>max</sub>, 온도)을 보다 정확하게 STC로 변환할 수 있다. 다른 태양광 기술의 요구사항과 특성을 충족시키기 위해 시뮬레이터 광원(또는 태양 시뮬레이터)은 정상상태 유형이거나 펄스형(플래시 형) 시뮬레이터를 사용한다. 펄스형 시뮬레이터는 다시 단일펄스와 다중펄스 광원으로 나뉜다. 다양한 인공 시뮬레이션 광원들을 다양한 태양광 기술에 맞게 사용할 수 있다. 예를 들어, 높은 정전용량(capacity)의 모듈들은 I-V 특성을 정확하게 평가하는데 훨씬 더 긴 펄스 시간 또는 정상상태의 시뮬레이터를 필요로 한다. 시뮬레이터 광 펄스의 일반적인 지속시간은 프로필에 따라 1~20 ms 사이이다. 이종접합(HIT) 또는 플로팅 에미터(floating emitter) 태양전지(SUNPOWER 셀)와 같은 고효율 태양광 소자의 적절한 평가에는 해당 시간 간격이 너무 짧다. 이들 모듈의 셀은 전하 캐리어의 수명이 길어 그 만큼 확산 용량이 높아서 50 ms 이상의 긴 시험 시간을 필요로 한다. 따라서 이들 모듈에는 긴 펄스 또는 정상상태 시뮬레이터가 더 적합하다. 고효율 모듈 I-V 특성측정의 절차와 요구사항은 Mau, Virtuani와 Herman에 의해 기술된 바 있다[Mau05, Virt08, Herman12]]. 게다가 박막 모듈은 여러 가지 준안정 상태를 보여주는데, 이 때문에 각 기술에 대해 규격화된 모듈 출력을 정의하기가 어렵다. 준안정 박막 모듈의 출력 측정 절차는 Silverman이 기술한 바 있다[Silverman14].

### 5.2.1 I-V 곡선의 주요 파라미터들

I-V 특성 곡선의 측정 결과로부터 모듈의 성능을 평가할 수 있는 핵심 성능인자들을 도출할 수 있다. 그림 5.2.1은 광조사 하에서의 전형적인 I-V 곡선이다.

개방전압(Voc)은 모듈로부터 얻을 수 있는 최대의 전압으로 전류가 '0'일 때 일어난다. 단락전류(Isc)는 태양광 모듈에 걸려있는 전압이 제로일 때(즉 태양광 모듈이 단락회로일 때) 태양전지를 가로질러 흐르는 전류이다. 최대출력(P<sub>max</sub>)은 광조사 하에서 모듈의 I-V 곡선 위에 있는 한 점으로 정의되는데, 그 점에서 최대전류(I<sub>mpp</sub>)와 최대전압(V<sub>mpp</sub>)의 곱이 최대가 되는 점이다. 충진율(FF)은 태양전지나 태양광 모듈의 품질을 측정하는 핵심 척도이다. 이 값은 최대전류(I<sub>mpp</sub>)와 최대전압(V<sub>mpp</sub>)을 개방전압과 단락전류라고 했을 때 실현될 수 있는 가상 최대출력(P<sub>T</sub>) 대비 모듈의 최대출력 비에 해당한다. 충진율은 그림 5.2.1에 묘사된 것과 같이 사각형 면적의 비로 해석할 수 있다.

이 파라미터들로부터 모듈에 미치는 광학적인 영향(단락전류), 태양전지 셀의 열화와 병렬저항(개방전압) 그리고 직렬저항 혹은 불균질(inhomogeneity)에 따른 효과(충진율) 등을 평가하게 된다.



그림 5.2.1: 광조사 하에서 모듈의 개략적 I-V 곡선과 가장 중요한 파라미터들 : 단락전류 I<sub>sc</sub>, 개방회로 전압 V<sub>oc</sub>, 최대출력점 P<sub>mpp</sub>, 최대출력점 I<sub>mpp</sub>와 V<sub>mpp</sub>에 속하는 전류와 전압 그리고 가상 전력점 P<sub>T</sub>

## 5.2.2 직렬저항과 병렬저항

태양광 모듈의 전류-전압 특성을 잘 이해하기 위해서는 각 교차점에서의 기울기에 대한 정의가 필요하다. 기울기는 저항(resistance)의 단위를 가지는 숫자인데, 직렬저항 (series resistance: R<sub>s</sub>)과 병렬저항(shunt resistance: R<sub>sh</sub>)이다. 그림 5.2.2는 태양광 모듈의 I-V 곡선이 직렬저항과 병렬저항에 따라 변하는 것을 보여주고 있다.

직렬저항은 여러 가지 인자들이 포함된 파라미터인데, 태양전지의 모든 직렬저항 성분과 상호연결부 등이 영향을 미친다. 그래서 태양광 모듈에서의 직렬저항들의 영향을 평가할 수 있어야 한다. 일반적으로 태양광 모듈을 만들기 위해서는 전류-전압 특성이 서로 다른 다양한 태양전지들이 사용되는데, 전류-전압 특성의 차이는 태양광 모듈의 전체 직렬저항에 영향을 주게 된다. 모듈에서의 직렬저항 성분들이 추가되거나 개별 태양전지들 사이의 특성 불일치(mismatch)에 의해 직렬저항 값이 높아지게 된다.

병렬저항은 태양전지의 활성영역을 우회하는 전류 흐름이 발생한다는 것을 의미한다. 병렬저항 값이 작다는 것은 션트 경로를 통한 누설 전류가 더 커진다는 의미이다. 단일 태양전지에서 병렬저항의 변화는 모듈의 병렬저항에 의해 감지되지 않는데, 그 이유는 다른 모든 태양전지들이 그 태양전지로부터의 추가적인 전류 흐름을 차단하기 때문이다. 모든 태양전지들이 낮은 병렬저항을 갖는 희박한 가능성이 없는 경우에서만 태양광 모듈의 병렬저항도 작은 값을 가진다. 기타 대부분의 경우, 단일 태양전지의 병렬저항은 모듈의 충진율에는 영향을 미치고 병렬저항에는 영향을 미치지 않는다. 병렬저항은 또한 태양전지의 단락전류와 개방전압에 영향을 미치는데, 특히 열점 현상이 일어날 경우에 그러하다.

모듈에 있는 모든 태양전지들이 거의 비슷한 경우에만 R<sub>s</sub>를 직렬저항으로, R<sub>sh</sub>를 병렬저항으로 해석할 수 있다. 실제 대부분의 경우에서는 R<sub>s</sub>와 R<sub>sh</sub>가 여러 요소를 일괄적으로 포함하는 파라미터로서 전류-전압 곡선의 단락전류와 개방전압에서의 기울기로 얻어진다. 어떤 경우에는 태양광 모듈의 거동을 분석하기 위해 R<sub>s</sub>와 R<sub>sh</sub>에 물리적인 의미를 부여할 필요가 있다.



그림 5.2.2: 직렬저항과 병렬저항이 태양광 조사 하에서 모듈의 I-V 곡선에 미치는 영향.

### 5.2.3 정확도
여러 가지 인자들이 전류-전압 특성측정의 정확도에 영향을 미치는데, 사전에 응답 시간, 전류, 바이어스 전압 등 필요로 하는 모든 측정 시스템의 구성 기기나 부품에 대하여 인정된 시험소나 기관으로부터 교정을 받아야 한다. 보다 정확성을 기하기 위해서는 시험하고자 하는 모듈의 특성에 대해 잘 알아야 하는데, 일부 고효율 태양광 모듈의 높은 정전용량(capacitance)은 측정결과에 영향을 미친다. 정전용량이 높은모듈에 기인하는 측정 문제는, 다른 측정조건은 변경하지 않고 단락전류로부터 개방전압 조건으로 측정한 I-V 곡선과 그리고 그 반대 방향으로 측정한 것을 비교하여 탐지할 수 있다. 여기에 대한 상세한 절차는 Mau, Virtuani 그리고 Herman [Mau05, Virt08, Herman12]이 기술한 바 있다.

전류-전압 특성 측정 이전에 시험하고자 하는 모듈의 분광응답(spectral response)을 측정하여야 한다. 통상적으로 봉지한 셀을 분광응답 측정용 시료로 사용할 수 있다. 분광의 불일치에 의한 영향을 최소화하기 위해 기준 태양전지는 시험하고자 하는 모듈과 같거나 유사한 분광응답을 가져야 한다. 옥외 자연 태양광 하에서 I-V 측정을 할 경우에는 일사량계나 조사강도 센서 등은 사전에 인정받은(accredited) 시험소로부터 교정이 되어 있어야 한다.

태양전지나 모듈의 I-V 측정 시 모든 측정결과는 표준시험조건(standard test condition : STC)이나 혹은 표준보고조건(standard report condition : SRC)으로 실시간 변환하여야 한다. 이를 위해서 태양광이나 인공광원의 조사강도(irradiance)는 기준 태양전지 소자로 측정되어 있어야 하는데, 이 기준 소자는 ISO 17025[ISO 17025] 규격에 따라 인정 받은 시험소에 소급될 수 있어야한다. 옥내에서 측정할 경우, 빛의 분광 조사강도 분포는 자연 태양광과 같지 않으므로, 인공광원의 스펙트럼은 관련 규격(IEC 60904-9)을 만족시킬 수 있도록 하여야 한다. 반면에 조사강도의 불균일성과 빛의 안정성도 동시에 측정 결과에 영향을 미치므로, 시험하고자 하는 모듈은 가장 균질한 빛의 분포를 가진 위치에 장착하고 조사강도가 거의 안정된 플래시 시간 간격 안에 측정되도록 하여야 한다.

옥내이든 옥외이든 주위 환경인자들을 지속적으로 모니터하여 온도가 최대한 균일하고 안정적인지 확인하여야 한다. 태양광 모듈에 따라 특정 온도계수가 다르므로 전압과 전류 값의 보정을 줄일 수 있도록 원하는 온도 수준에 가깝게 제어하여야한다.

현재, 전 세계에서 4 개의 시험소들이 여타 시험소, 연구기관 그리고 제조업체들에게 태양광 측정과 기준 태양전지 소자를 제공할 수 있는 "World Photovoltaic Scale"을 유지하고 있다. 대부분의 태양광 시험소들은 I-V 측정에서 3 % 보다 더 좋은 정확도(인증)를 얻기 어렵다.

### 5.2.4 전류-전압 곡선에 미치는 불량의 영향

적절하게 측정된 전류-전압 곡선 측정 결과는 모듈의 불량에 대한 정보를 제공하는데, 그 해석은 다음과 같이 확보 가능한 데이터에 의존한다:

a. 측정된 전류-전압 곡선 결과만 있고 모듈에 대한 전기적 특성 값이 없을 경우 다음과 같이 평가할 수 있다:

- 단락전류 값은 태양전지의 면적, 태양전지 기술 그리고 모듈에서 태양전지 상호연결과 일관성을 유지 – 직렬연결에서 셀의 개수와 병렬연결 스트링의 개수(표 5.2.1),
- 개방전압 값은 태양전지 기술 그리고 모듈에서 태양전지 상호연결과 일관성을 유지 – 직렬연결에서 셀의 개수와 병열연결 스트링의 개수(표 5.2.1),
- 충진율은 모듈 기술로부터 예상되는 값
- 전류-전압 곡선의 형태는 두 가지 결함들을 보여준다. 셀의 균열이나 다른 이유(그리드 결함들)에 기인한 비활성 셀 부분들, 바이패스 다이오드의 단락.

b. 모듈의 라벨이나 제조업체로부터 제공된 모듈에 관한 특정 전기적 데이터가 있는 경우, 이를 측정된 값과 비교하면 잠재적인 불량이나 기술적 문제점들에 대해 추정할 수 있는 좋은 지표로 활용된다.

c. AAA 인공 시뮬레이터, 기준 셀과 모듈 온도와 같은 유사한 장비와 조건에서 측정된 동일 모듈에 대한 과거 전류-전압 곡선이 있으면, 이로부터 열화 효과와 불량에 대한 확실한 평가가 가능하다.

	다결정실리콘 셀	단결정실리콘 셀	모듈로부터 기대되는 값
J <sub>sc</sub> 단락전류 밀도 [mA/cm²]	28 - 33	30 - 35	셀 면적 * 전류밀도
V <sub>oc</sub> 개방회로 전압 [mV]	550 - 600	600 - 700	직렬에 있는 셀의 개수 * V <sub>oc</sub>
FF 충진율	0.75 - 0.80	0.80 - 0.85	

표 5.2.1: STC에서의 일반적인 전기적 값들.

데이터 시트나 사전 측정결과로부터 확보한 측정 값과 예상된 전류-전압 곡선 사이의 편차는 표 5.2.2에서와 같이 다음과 같은 범주로 나눌 수 있다:

1. S1의 경우와 같이, 예상보다 낮은 단락전류 값은 봉지재의 투과도 손실에 의한 것으로 볼 수 있는데, 이는 봉지재의 황변, 갈변, 모듈의 광포획을 감소시키는 유리의 부식, 혹은 봉지재의 박리에 의해 층들 사이의 광학적 디커플링에 의한 것으로 볼 수 있다. 2. S4와 같이 단락전류 값 부근에서 곡선의 기울기가 급격해지는 것은 태양전지들의 상호연결 부분에서의 션트 경로 때문에 병렬저항이 감소하였다는 것을 의미한다.

3. S3와 같이 개방전압 부근에서 곡선의 기울기가 완만해진 것은 모듈에서의 직렬저항이 증가한 것을 나타낸다. 모듈에서의 직렬저항은 상호연결 부분의 저항 증가, 정션 박스에서의 부식 혹은 상호연결 부위와 접합 부분의 느슨함 때문에 증가할 수 있다.

앞의 두 요인들은 모듈의 충진율을 저하시키고 결과적으로 최대 출력생산을 낮추게 된다.

4. S2와 같이 개방전압이 예상 보다 낮은 경우, 그 불량 요인으로는 셀들의 상호연결부의 불량, 셀로부터 셀까지의 단락전류 혹은 바이패스 다이오드의 불량을 들 수 있다. 개방전압은 또한 결정질실리콘 모듈의 광유도 열화(LID) 혹은 퍼텐셜 유도 열화(potential induced degradation: PID) 현상에 의해서도 감소할 수 있다.

5. S6와 같이 곡선이 계단형으로 나타나는 것은 바이패스 다이오드의 결함, 셀의 손상 혹은 모듈에서 셀들 사이의 불일치가 심한 것이 그 원인일 수 있다.

			P <sub>max</sub>	S1: <i>I</i> <sub>sc</sub>	S2: V <sub>oc</sub>	S3: <i>R</i> oc	S4: <i>R</i> sc	S5: 기울기 변화*	S6: 변곡점 들*
불량	안전	大百			Hand Hand	- Forsilization based statistics May	- Convet Suffer - Devet Suffer - Devet Suffer May	- Deschinder -	- Canaditability - Canaditability - Daniel Statistics May
바이패스 다이오드 단절	В	<u>A</u>							
단락회로 바이패스 다이오드	В	<u>E</u>	x		x				
인버터 바이패스 다이오드	В	<u>E</u>	x		х				
균질한 투과도의 손실	A	<u>C</u>	x	x					
불균질한 투과도의 손실	A	<u>E</u>	x	x			х		х

표 5.2.2: I-V 곡선으로 탐지할 수 있는 모듈 불량.

\* 동작하는 바이패스 다이오드로 보호 받는 셀들의 여러 스트링들을 가진 경우에만 가능.

균질한 유리 부식	А	D	Х	х					
불균질한 유리 부식	А	<u>D</u>	Х	х			х		х
균질한 박리	В	<u>D</u>	Х	х					
불균질한 박리	В	<u>D</u>	Х	х			х		х
균질한 셀들의 부식 반사방지 코팅	В	<u>C</u>	x	х					
불균질한 셀들의 부식 반사방지 코팅	В	<u>C</u>	х	х				Х	
열화 부동태화	А	<u>D</u>	х		х				
PID 극성 유도 열화	А	<u>C</u>	Х		Х			х	
LID 결정질실리콘 셀의 광유도 열화	A	<u>D</u>	х	(X)	х				
단락회로 셀들, 예:셀 상호연결 리본에 의한	A	Ē	x		х				
납땜 부식	А	<u>C</u>	Х			х			
균질한 납땜 단절	В	<u>E</u>	Х			х			
셀 상호연결 리본 깨짐	В	<u>E</u>	x			x			x
셀 균열들	А	E	X	x					x

*P*<sub>max</sub> = 불량은 출력손실로 감지 *R*<sub>oc</sub> = 개방회로 저항(V<sub>oc</sub> 에서의 기울기) *R*<sub>sc</sub> = 단락회로 저항 (I<sub>sc</sub> 에서의 기울기)

표 5.2.2에서 언급한 일부 불량 메카니즘의 출력 열화는 제한적이다. 반사방지 코팅의 부식에 의한 출력 손실은 보통 4 % 정도로 이는 초기 코팅에 의해 향상되는 값이다. 여타 불량 역시 제한적인데, 라미네이션 박리는 4% 정도, 초기 광유도열화는 2~4 %이고, 유리 부식은 최대가 3 %이다. 셀의 균열, 납땜 부식, 깨진 셀의 상호연결 등은 출력손실에 한계가 없고 태양광 모듈은 사용 불능이 될 수 있다.

### 참고문헌

[Herman12] M. Herman, M. Jankovec, M. Topic, Optimal *I-V* Curve Scan Time of Solar Cells and Modules in Light of Irradiance Level, *International Journal of Photoenergy*, Volume 2012, Article ID 151452, doi:10.1155/2012/151452

[IEC60904-3] International Electrotechnical Commission (IEC) 60904-3 Ed. 2: Photovoltaic devices - Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data, 2008

[IEC60891] International Electrotechnical Commission (IEC) 60891 Ed.2.0 Photovoltaic devices – Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics, 2009

[IEC 60904-9] International Electrotechnical Commission (IEC) 60904-9 ed2.0: Solar simulator performance requirements, 2007-10-16

[ISO 17025] International Organization for Standardization 17025: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2005

[Mau05] S. Mau, Influence of Solar Cell Capacitance on the Measurement of *I-V* curves of PV Modules, Proc. 20th EUPVSEC (WIP, Barcelona, Spain, 2005), pp. 2175-2177

[Silverman14] T. Silverman, U. Jahn, "Characterization of Performance of Thin-film Modules", Technical Report IEA-PVPS T13-02: 2014, in preparation.

[Virtuani08] A. Virtuani, H. Müllejans, F. Ponti, E. Dunlop, Comparison of indoor and outdoor performance measurements of recent commercially available technologies, Proc. 23rd EUPVSEC (WIP, Valencia, Spain, 2008), pp. 2713-2718

# 5.3 서모그래피

모듈내 불량을 찾아낼 수 있는 서로 다른 세 가지의 서모그래피(thermography) 법이 있다. 가장 흔하고 적용하기 쉬운 방법은 정상상태(steady state) 조건 하에서의 서모그래피이다. 이 방법으로 실제 동작 중인 모듈의 분석이 가능하다. 펄스(pulse) 서모그래피와 고정화(lock-in) 서모그래피는 좀 더 자세한 분석이 가능한데, 두 방법 모두 실험실 조건 하에서 이루어져야 한다.

### 5.3.1 정상상태 조건 하에서의 서모그래피

서모그래피 혹은 적외선(IR) 이미징은 비파괴적인 측정기술로 모듈의 특징을 2차원 분포로 신속하게 실시간으로 제공한다. 모듈내 일부 열적 전기적 불량을 진단하는 비접촉 기법이다. 측정은 동작 중에 있는 개별 모듈 뿐 아니라 대규모 시스템의 스캔도 가능하다. 다만 모듈의 측정은 정상상태 하에서 이루어져야 한다.

서모그래피 측정에서는 모듈에 부가된 외부 전류나 빛에 의해 발생한 온도의 차이를 보여준다. 어두운 상태에서의 측정 중에는 모듈에 부가되는 빛이 없으므로 외부에서 순(forward)방향으로 전류(단락전류와 비슷한 정도)를 흘려준다[Hoyer09]. 박막 모듈의 경우에는 열 손상을 파하기 위해 모듈 단락전류의 30 % 이상 넘지 않도록 한다.

빛의 조사 중에는, 예를 들면 자연 태양광에 의해 열과 전류가 생성되는데, 이로 인해 모듈 온도가 불균일해 질 수 있다. 좀 더 정밀한 결함 탐지를 위해서는 서모그래피 이미징은 빛 조사 중에 이루어져야 하고, 다양한 부하조건(단락전류, 개방전압, 최대 출력) 하에서의 온도분포를 비교하여야 한다.

적절한 적외선 카메라를 사용하여 온도분포를 측정할 수도 있다. 서모그래피 이미징은 대개 휴대용의 비냉각 방식의 적외선카메라를 사용한다. 사용되는 적외선탐지기의 파장은 8~14 µm이다 [Zamini12].

옥외에서 빛 조사하의 서모그래피 측정은 구름이 없는 청명한 날 해야 하고, 모듈 어레이에서의 조사강도는 최소 700 W/m<sup>2</sup>가 되어야 한다. 주변온도와 풍속은 낮을수록 좋다. 사각(angle of view)은 90°에 가깝도록 하고 모듈의 앞면 창면에 대해 60°보다 낮아서는 안 된다. 측정자는 이웃하는 건물이나 구름에 의한 반사 그리고 자신과 카메라에 의한 자체방사를 인지하여야 한다[Buerhop07]. 정확한 온도측정을 위해 카메라는 정확하게 주변온도와 측정하고자 하는 표면에 대한 방사율(emissivity) 값에 맞게 설정하여야 한다[Buerhop11a]. 만약 사각이 유리는 90°~60°, 폴리머는 90°~45°일 경우, 방사율은 보통 유리의 경우 0.85, 폴리머 백시트의 경우는 0.95 이다. 가능할 경우 백시트 측으로부터 측정하면 유리 측보다 더 정확하다.

빛의 조사가 균일하고 동작 바이어스 하에 있으면 셀의 온도들은 불과 몇 도 밖에는 차이가 나지 않는다. 모듈이 단락회로 상태이거나 결함이 있는 경우 온도의 변화폭은 더 커질 수 있다. 열점과 주변 정상동작 부분과의 온도 차이는 수십도 K에 달할 수 있다. 게다가 태양광발전시스템 내에서, 예를 들어 지붕에 설치한 약 8 미터 모듈에서는 13 K 정도의 온도구배가 있을 수 있고, 심지어 개별 모듈 내에서도 3~5 K의 온도구배가 있는데, 이는 대류 열전달에 기인한다[Buerhop11b]. 표 5.3.1은 적외선카메라로 확인할 수 있는 불량의 목록이다. 표 5.3.1: 옥외에서 측정된 모듈의 적외선 이미지 패턴들, 그 설명, 가능한 불량 모드, 전기 출력에 미치는 영향들의 요약([Buerhop07] 수정).

패턴	설명	가능한 불량 이유	전기적 측정	비고, 관련 장 절	안전	출력
	하나의 모듈이 다른 것들 보다 더 따뜻함	모듈이 단락회로- 시스템에 연결 안 됨	모듈은 완전 정상적 가동	배선 체크	A	시스템 불량
	하나의 열( 서브스트링)이 모듈의 다른 열보다 더 따뜻함	단락회로 혹은 서브스트링 개방 – 바이패스 다이오드 단락 혹은 내부 단락	서브스트링의 출력 손실, V <sub>OC</sub> 하락	모듈에서 탄 점들을 형성 가능 6.2.7 션트된 하나의 다이오드	B(f)	상수 혹은 E
	단일 셀들이 더 따뜻, 어떤 다른 패턴(패치워크)은 알려지지 않음	모든 모듈이 단락회로 - 모든 바이패스 다이오드 단락 혹은 연결 오류	모듈 출력이 급격하게 하락 (거의 제로), V <sub>OC</sub> 크게 하락	배선 체크 6.2.7 션트된 모든 다이오드	A ( <i>외부</i> <i>단락</i> ), B(f) <i>다이오</i> <i>드 단락</i>	상수 혹은 E
	단일 셀들이 더 따뜻, 아래 부분들과 프레임 가까이는 상단과 중간 부분 보다 더 뜨거움	PID와/혹은 극성에 의해 대규모 션트들이 발생	모듈 출력과 충진율 하락. STC보다 낮은 조사강도에서의 성능이 더 영향을 받음	- 어레이 접지 상태 변경 -역방향 전압에 의한 회복 6.2.5 (PID)	A	<u>C</u> (v,h,t)
	하나의 셀이 다른 것들 보다 확실히 더 따뜻함	- 음영 효과 - 셀의 결함 - 셀의 박리	출력 감소가 반드시 항구적이지 않음, 예: 나뭇잎에 의한 음영	육안검사 필요. 클리닝(셀 미스매치) 혹은 션트된 셀 6.1.1(박리)	A B(f)	<u>A</u> , <u>B</u> , or <u>C(</u> m, tc, h)
	하나의 셀의 부분이 더 따뜻함	- 깨진 셀 -스트링 상호연결부의 단절	급격한 출력 하락, 충진율 하락	6.2.2(셀 균열) 6.2.4(탄 자국) 6.2.6(상호연결부)	B(f)	<u>C(</u> m, tc)
	 뾰족한 가열	-인공물 -부분적 음영, 예 조류 분비물, 피뢰봉	출력 하락, 균열된 부분의 형상과 크기에 의존	가능한 셀의 상세한 육안검사 후 균열 탐지 6.2.2 (셀 균열)	B(f)	<u>C(</u> m, tc)
dashed: shaded area	음영이 균일할 때 서브스트링 부분이 다른 곳보다 더 뜨거움	바이패스 다이오드가 없거나 개방된 서브스티링	이 서브 스트링에 음영이 있을 때 단락 전류와 출력 크게 감소	열점이 이 서브스트링에 있을 때 심각한 화재 위험 초래할 수 있음	A, B(f)	<u>A</u> , <u>C</u>

### 5.3.2 펄스 서모그래피

펄스 서모그래피는 외부로부터 열 공급원이 필요한데, 예를 들어 하나의 모듈을 통해 동적인 열 플럭스를 발생시킬 수 있는 강력한 플래시라이트를 1회 이상 동시에 촉발시키는 것이다. 펄스의 지속 시간은 흐릿한 이미지를 피할 수 있도록 천분의 수초 이상 길어서는 안 된다. 플래시는 모듈의 후면 앞에 위치시키고 표면 온도를 어느 정도 균일하게 순간적으로 1~5 K 올릴 수 있는 강도로 하여야 한다. 면적이 큰 모듈의 경우에는 수 kJ의 램프출력이 필요하다. 여기(excitation) 후에 표면 온도는 시간의 경과와 함께 ~1/√*time* 씩 떨어진다. 반복 이미지 획득 주파수가 적어도 수 10 Hz 혹은 그 이상 수백 Hz인 서모그래프 카메라는 모듈의 후면으로부터 연속적으로 이미지를 얻는다. 소재의 열용량과 열전도도의 불균질한 분포, 즉 열 확산계수의 차이로 인해 온도 분포의 변화가 영향을 받는다. 시간에 따른 표면 온도 변화 기록은, 주파수 영역에서의 시그널의 푸리에 변환을 거쳐 평가가 이루어진다. 이렇게 얻어진 펄스 서모그래피 이미지로부터 모듈의 내부구조에 대한 세밀한 정보를 얻게 되는데, 불투명한 백시트를 통해서는 볼 수 없는 각 층에서의 기포들, 내부의 전기적 연결 등이 확인된다.

열 발산(dissipation)의 침투깊이는 주파수 값에 반비례한다. 그림 5.3.1은 후면에서 관찰한 펄스 서모그래피 이미지들이다.



그림 5.3.1: 불투명 후면을 통해 얻은 모듈의 펄스 서모그래피 이미지. (좌) : 다결정 실리콘 태양전지 사이의 후면 쪽 셀 상호연결부, (중) : 봉지재 소재 내에 있는 기포들, (우) : 후면전극(back-contact) 모듈 내의 상호연결 구조, 0.3 Hz 이미지는 상호연결 점들을 묘사, 반면에 2 Hz 이미지는 구리 포일의 구조를 보여줌[Voronko12].

표 5.3.2는 펄스 서모그래피 이미지로 탐지할 수 있는 불량의 목록이다.

표 5.3.2: 펄스 서모그래피 이미지로 탐지할 수 있는 불량의 목록. 불량의 설명은 장절에 명시된 항목을 참조하세요. 안전과 출력 코드에 대한 설명은 4.3과 4.4를 참조하세요.

장 절	설명	안전	출력	이미지
5.1	불투명한 백시트를 통해 아래층에 대한 준 육안검사와 구조 검사			그림 5.3.1(좌)
6.2.6	스트링과 셀 상호연결부의 위치. 결함이 있는 납땜 연결부의 탐지.	B (f,e,m)	<u>D/E</u>	이미지 없음
6.2.6	후면 접촉 모듈에서 상호연결부의 위치와 그 연결의 질적 수준.	B (f,e,m)	<u>D/E</u>	그림 5.3.1 (우) 상
6.1.1 6.1.2	탐지 가능한 불균질한 소재 특성. 기포, 박리가 있어나는 곳에서의 깊이 방향 탐지	C(e)	<u>D/E</u>	그림 5.3.1 (중)

펄스 서모그래피의 단점은 고속에 고해상도 적외선카메라 시스템이 필요하다는 것이다. 이런 적외선 탐지 칩 기술은 고가이고, 주로 미사일 등에 필요한 적외선시스템에 사용되어 수출도 엄격히 제한되고 있다.

### 5.3.3 고정화 서모그래피

비파괴 시험용 고정화 서모그래피((lock-in thermography : LIT))는 Busse[Busse92]와 Breitenstein [Breitenstein03]이 개발한 것으로, 이 방법 사용하여 제어된 주파수에서 시험시료를 여기하고 탐지한다. 이렇게 함으로써 노이즈 대비 시그널의 비를 키울 수 있어 약한 열원도 탐지가능하다. 그리고 시료에 대한 열 충격이 낮아 열 전파에 대한 영향이 적고, 위상 변환 고정화 이미지로부터 추가적인 정보의 확보도 가능한 것이 장점이다. 이 기법은 결정질실리콘 태양전지[Breitenstein11] 뿐 아니라 박막모듈[Tran11],[Buerhop12]이나 유기 태양전지[Bachmann10]를 조사하는 데에도 사용된다.

본 측정에는 비냉각 방식의 8~14 µm 범위의 방사열계(放射熱計 : bolometer) 뿐만 아니라 2~5 µm 범위의 냉각식 적외선 카메라도 적당하다. 이미지 기록과 동시에

이루어지는 시료의 주기적인 여기 때문에 10 µK 정도의 온도차가 생길 수 있다. 고정화 알고리즘은 두 개의 주된 이미지와 이로부터 파생되는 두 개의 이미지, 진폭신호 (amplitude signal)와 위상신호(phase signal)를 제공한다. 진폭 신호가 항상 포지티브이므로 태양광 모듈의 이미지는 통상 진폭 신호로 표시된다. 특히 위상신호는 방사율이나 열원의 출력 어느 쪽에 의해서도 영향을 받지 않는다.

태양전지나 태양광 모듈의 측정에 필요한 여기에는 전기적으로는 전압원이나 전류원을 혹은 광학적으로는 광원을 사용한다. 전류나 전압을 인가한 경우의 측정기법을 통상적으로 DLIT(dark lock-in thermography)라 부르고, 광원을 사용한 경우는 ILIT(light lock-in thermography)라 부른다[Isenberg04]. 작업이 완전히 비접촉 방식이라 이 기법은 매우 매력적인데, 초기 제조공정 단계에서의 검사에도 적용할 수 있다.

모듈의 결함을 탐지하고 평가하기 위해서는 불규칙적인 열원, 신호의 강도와 고정화 서모그래피 측정의 확장이 중요하다. 열파(heat wave)가 한 사이클 안에 패키지 소재들을 가로질러 흐르도록 LIT 방법의 주파수를 사용해야 한다. 그러므로 열확산 길이(heat diffusion length) Λ는 모듈 패키지 소재의 두께와 같다면, 아래 식과 같이 고정화 주파수 f 는 가장 높은 해상도의 이미지에 최적화되어 있다.

 $f=\frac{\lambda}{2\pi\Lambda^2\varrho c_p},$ 

(5.3.1)

여기서 소재의 특성 : λ 열전도도, ρ 비중, cp 비열용량 일반적 소재의 파라미터들을 예로 들면, EVA 두께 0.45 mm, 백시트 포일 두께 0.15 mm, 열확산길이 Λ 0.6 mm의 값을 모듈의 후면으로부터 DLIT 측정할 때 사용한다. 소재의 특성 값을, λ = 0.32 W/mK, ρc<sub>p</sub> = 1.19 x 10<sup>6</sup> J/m<sup>3</sup>K를 대입하면, 고정화 주파수 f ~0.12 Hz는 첫 번째 시도해도 되는 적절한 평가용 주파수이다. 두께 3~4 mm의 유리를 통한 측정용은 기본적으로 해상도가 더 낮고 최적화된 고정화 주파수는 0.01 Hz로 한 차원 더 낮다.

소재의 특성 외에 신호는 여러 가지 측정 파라미터들에 의해 영향을 받는다. 측정 주기를 증가시키면 결함들의 이미지가 더 선명해진다. 고정화 주파수는 측면 열 전파를 결정하는데, 열에 의해 영향을 받는 구역의 크기와 내포된 열의 총량이 결정된다. 이와 같이, 주파수를 증가하면 한편으로는 열의 영향을 받는 구역이 줄어들면서 열원의 정확한 결정이 가능해 진다. 다른 한편으로는 신호강도가 크게 낮아진다. 여기 강도를 변화시키면, 예를 들어 낮은 혹은 높은 전류 혹은 전압과 같이 변화시키면, 병렬 혹은 직렬저항에 의해 좌우될 수 있는, 모듈 내에서의 서로 다른 동작 체제에 있는 열원들이 표시가 된다. 표 5.3.3은 표준과 고정화 서모그래피를 사용하여 동일 모듈을 측정한 적외선 이미지들이다.

LIT를 이용하면 불규칙적인 열원과 온도 분포가 가시화시킬 수 있다. 표준 서모그래피를 사용하면 이웃하는 더 강한 소스에 의해 묻힐 수 있는 있는 작은 것들이라도 국부적인 해상도 증가로 인하여 나타나게 된다. 이처럼, 다양한 셀과 모듈들의 결함들, 예를 들어 선형과 비선형 거동을 하는 션트 등도 구분이 된다. 결함들의 정확한 개수와 위치도 알아낼 수 있다. 결함의 특징들에 대한 지식의 축적으로 결함의 원천도 조사할 수가 있고 그것이 모듈의 성능에 미치는 영향도 알아낼 수 있다. 표 5.3.4는 고정화 서모그래피로 결정질실리콘과 박막 태양광 모듈에서 탐지된 가능한 여러 불량들을 정리한 것이다.

표 5.3.3: 결함이 있는 동일한 결정질실리콘 모듈 전면으로부터 측정한 IR 이미지 3 개, (좌): 지속적으로 여기시킨(excited) 모듈, (중)과 (우): 주기적으로 여기시킨 모듈의 DLIT 이미지, (중) : 진폭, (우): 위상. f = 0.1Hz, I = 5A, 공간 해상도 약 2 mm/픽셀, 공칭 STC-출력 115 W, STC-출력(8년 가동 후) 50 W.

정상 상태 서모그래피	고정화 서모그래피, 주기적으로 여기	
온도 이미지	진폭 이미지	위상 이미지

표 5.3.4: 고정화 서모그래피를 사용하여 시각화한 태양전지와 모듈에서의 결함들과 불량들의 개요. 단락전류 Isc를 전류 진폭으로 취하여 얻은 이미지들이다.

장 절	설명	안전	출력	진폭 이미지
6.2.4	가장자리 절연 션트. 직선형의 션트를 확인하기 위해서는 션트 면적의 강도가, I <sub>sc</sub> 의 10 %에서(위 이미지) 그리고 I <sub>sc</sub> 의 100 %에서 (아래 이미지)얻은 이미지들의 경우, 대부분 일정하게 유지되어야 한다. 가장자리의 절연 션트는 셀의 가장자리에서만 일어난다.	B(f)	A	
	셀 상호연결 리본에 의해 션트된 셀 : 셀을 거쳐 흐르는 전류가 없다.	B(f)	A	

6.2.6	셀 상호연결 리본이 부러진 경우	B(f)	A	
	봉지재 소재에서 중간 크기의 기포들	A	A	
6.2.2	셀 균열 유형 A/B.	В	<u>C</u>	
6.2.2	셀 균열 유형 C	B(f)	<u>C</u>	
6.3.2	국부적인 오믹 션트 혹은 비선형 임피던스	B(m)	E	•

### 참고문헌

[Bachmann10] J. Bachmann, C. Buerhop-Lutz, C. Deibel, I. Riedel, H. Hoppe, C. J. Brabec, V. Dyakonov, Organic Solar Cells Characterized by Dark Lock-in Thermography, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **94** (2010), pp. 642-47

[Buerhop07] C. Buerhop, U. Jahn, U. Hoyer, B. Lerche, S. Wittmann: "Überprüfung der Qualität von Photovoltaik-Modulen mittels Infrarot-Aufnahmen", <u>www.sev-bayern.de/content/downloads/IR-Handbuch.pdf</u> (2007)

[Buerhop11a] C. Buerhop, D. Schlegel, C. Vodermayer, M. Nieß: Quality control of PV-modules in the field using infrared-thermography, 26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011), pp. 3894 – 3897

[Buerhop11b] C. Buerhop, H. Scheuerpflug, R. Weißmann: The Role of Infrared Emissivity Of Glass on IR-Imaging of PV-Plants, Proc. 26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011), pp. 3413 – 3416

[Buerhop12] Cl. Buerhop, J. Adams, F. Fecher, C. J. Brabec, Lock-in Thermographie an Dünnschichtmodulen, *ep Photovoltaik aktuell*, no. **7**/**8** (2012) pp. 37-41

[Breitenstein03] Breitenstein, O., M. Langenkamp, Lock-in Thermography, Advanced Microelectronics 10. Berlin: Springer, 2003

[Breitenstein11] O. Breitenstein, H. Straube, Lock-in Thermography Investigation of Solar Modules, Proc. 26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011), pp. 1451-1453

[Busse92] G. Busse, D. Wu, and W. Karpen, Thermal Wave Imaging with Phase Sensitive Modulated Thermography, *Journal of Applied Physics* **71** (1992) pp. 3962

[Hoyer09] U. Hoyer, A. Burkert, R. Auer, C. Buerhop-Lutz, Analysis of PV Modules by Electroluminescence and IR Thermography, Proc. 24th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2009), pp. 3262-3266

[Isenberg04] Jörg Isenberg, Neue Infrarotmeßtechniken für die Photovoltaik, Dissertation, KOPS, 2004

[Tran11] T. M. Tran, B. E. Pieters, M. Siegloch, A. Gerber, C. Ulbrich, T. Kirchartz, R. Schäffler, U. Rau, Characterization of Shunts in Cu(in, Ga)Se2 Solar Modules Via Combined Electroluminescence and Dark Lock-in Thermography Analysis, Proc. 26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011), pp.2981-2985

[Tscharner85] R. Tscharner, K.H.S. Rao, A.V. Shah, Evaluation Of Photovoltaic Panels With Ir. Thermography, Proc. SPIE 0520, Thermosense VII: Thermal Infrared Sensing for Diagnostics and Control, 130(March 20, 1985); DOI: 10.1117/12.946143

[Voronko12] Y. Voronko, G. Eder, M. Weiss, M. Knausz, G. Oreski, T. Koch, K. A. Berger, Long term Performance of PV Modules: System optimization through the application of innovative non-destructive characterization methods, Proc. of 27th EU-PVSEC, Frankfurt 2012, p. 3530-3535

[Wolf05] A. Wolf, P. Pohl, R. Brendel, Determination of thermophysical properties of thin-films for photovoltaic applications, Proc. 31st IEEE PVSC (IEEE, Florida, USA, 2005), pp. 1749-1752

[Zamini12] S. Zamini, R. Ebner, G.Újvári, B. Kubicek, Non-destructive techniques for quality control of photovoltaic modules: Electroluminescence imaging and infrared thermography, *Photovoltaics International* **15** (2012), pp. 126-135

## 5.4 전계발광

전계발광(Electroluminescence : EL)은 태양광 모듈에 직류(dc) 전류를 공급하여 태양전지에서 복사성(radiative) 재결합(recombination)을 불러일으키는 것으로, 쉽게 구할 수 있는 실리콘 전하결합소자(charge coupled device : CCD) 카메라로 탐지가능하다.

EL 이미지는 태양광 모듈에서 방출되는 1150 nm 부근의 적외선 복사광이 백그라운드 빛 보다 약하기 때문에 암 상태에서 이루어진다. 암 상태의 환경이 좋지만 EL 이미징 동안에 백그라운드 노이즈를 낮춰야 할 만큼 필요하지는 않다. 게다가 850 nm를 에지로 하는 고역 통과(high pass) 필터가 있어 여타 소스로부터의 간섭광을 줄여준다. 카메라의 해상도는 모듈에 있는 태양전지 핑거(finger) 전극들이 분명히 확인될 수 있을 만큼 충분히 높아야 한다. 카메라 출력의 노이즈는 가능한 낮아야 한다. 미광(迷光 :stray light)의 영향을 줄이기 위해서는 모듈을 통하는 직류전류가 없는 이미지를 취하여 추출한다(암시야 추출법 : dark field subtraction). 그러면 미광의 영향이 없는 이미지를 얻게된다. 옥외 측정 역시 암 상태에서 가능하고, 혹은 암시야 추출법이나 민감한 카메라와 함께 고정화 기법을 사용하면 된다.

표 5.4.1은 결정질실리콘 모듈에서 EL 기법으로 탐지가능한 모든 결함들을 요약한 것이다. 이 표는 각 효과들이 모듈의 전기적 파라미터에 미치는 영향도 보여주고 있다.

EL 이미지를 사용하면 모듈에서의 셀 균열을 탐지할 수 있는데, 셀의 균열은 태양전지 위에 검은 선들로 나타난다. 특히 다결정 실리콘 태양전지에서는 결정 결함들도 검은 선들로 나타난다. 그러므로 EL 이미징에 의한 균열 셀의 탐지는 아직 자동화에 성공하지 못하고 있다. 이런 이유로 셀의 균열은 어떻게 확인하는지 훈련을 받은 인력의 힘을 빌리고 있는데, 숙련자들은 모듈의 EL 이미지를 보고 셀의 균열을 탐지할 수 있다. 다결정실리콘 모듈에서 균열의 확인을 위해 셀 균열에 대한 다음과 같은 기준을 두고 있다:

1. EL 이미지에서 셀의 균열은 검은 회색으로 나타난다. 균열의 폭과 회색톤(greyscale)은 균열의 전체 길이에 걸쳐 대부분 일정하다.

2. 핑거 전극 대비 셀의 균열이 ±45~±5 각도 방향으로 있으면 균열이 물결 모양의 계단함수와 같이 보이도록 핑거와 부분적으로 평행하게 진행한다.

3. 잉곳 내에서 이웃했던 웨이퍼들이 태양광 모듈에서 발견될 수 있는데, 이들 웨이퍼들은, 탐지된 검은 회색선이 실리콘의 결함 구조인지 셀의 균열인지 확인하는데 사용된다.

4. 검은 회색 선에서 EL의 강도가 급격히 변하면 이는 셀의 균열이다. 이 경우, 균열은 이미 균열을 가로질러 금속 전극의 전도도를 감소시킨 것이다.

5. 상호 교차하는 균열을 제외하고, 셀의 버스바나 모서리에서 셀 균열이 시작하거나 혹은 끝나지 않는 경우는 거의 찾기가 어렵다. 교차하는 균열은 셀의 중간에서 발견될 가능성이 높다.

표 5.4.1: EL 검사로 탐지할 수 있는 불량의 목록. 불량에 대한 상세 설명은 장 절에 명시된 내용을 참조하세요. 안전과 출력에 대한 코드는 표 4.4.1과 4.4.2에 정의되어 있다.

장 절	설 명	안전	출력	이미지
	모듈 불량 없음			

	다결정 웨이퍼에서 결정 전위	A	A	
	모서리 웨이퍼	A	A	
	줄무늬 링들	A	A	
	셀 불량들			
6.2.2	셀에서의 균열 모드 A. 셀의 균열은 있으나 균열을 가로질러 전류 흐름에 영향을 미치지 않는다(균열 저항 없음).	В	<u>C</u>	
6.2.2	셀에서의 균열 모드 B+(A). 셀의 균열이 있고 그리고 균열이 셀 상호연결 리본으로의 전류 흐름에 영향을 미친다. 그러나 셀은 여전히 연결되어 있다.	B(f)	<u>C</u>	
6.2.2	셀에서의 균열 모드 C+(B+A). 셀의 균열이 있고 그리고 균열이 셀 상호연결 리본으로부터 셀의 일부분을 완전히 분리시킨다. 모듈 정격전류의 약 1/10에서 얻은 EL 이미지(위)는 정격전류 100 %에서 얻은(아래) 이미지에 비해 분리된 셀 부분들을 더 잘 드러낸다. 두	B(f)	<u>C</u>	

	이미지의 왼쪽 하단 부분들을 비교.			
6.2.2	균열 선을 가로질러/횡단 균열	B(f)	A	
	핑거 불량 A, 모듈 내에서 일부 셀들 위에 동일한 핑거 연결 끓어짐	А	<u>A</u>	
6.2.2	핑거 불량 B, 셀 균열들을 따라 핑거 연결 끓어짐	B(f)	<u>C</u>	
	핑거 불량 C, 납땜으로 인한 핑거 연결 끓어짐이라 부른다(GICS) [WENDT09]	B(f)	<u>C</u>	
7.6.1	습도에 의한 부식	A	<u>F</u>	
	불량 유형 A를 형성하는 접촉전극, 셀의 소성 공정 중의 시료 운송 벨트의 온도 불균일성은 타이어 같은 자국으로 이어진다.	A	A	

	불량 유혈 B를 형성하는 접촉전극, 셀의 소성 공정 중의 시료 운송 벨트의 온도 불균일성이 중심 가장자리에서 핑거 전극의 접촉 저항의 구배로 이어진다.	A	A	
6.2.4	태양전지 위에서의 션트 결함(fault)	B(f)	A	
	셀 상호연결로 인한 션트 결함	B(f)	<u>A</u>	
6.2.6	셀 상호연결의 단절	B(f)	A	
	모듈에서의 셀 패턴			
6.2.5	PID 현상이 있는 모듈은 출력손실을 알아채기 전의 초기 단계에서 정격전류의 1/10에서 촬영한 EL 이미지로 확인할 수 있다[Berger13].	A		EL @ 10% lsc
				EL @ Isc

6.2.2	균질하게 걸린 무거운 기계적 부하. 모듈에서의 전반적인 균열 패턴은 X-자 균열 패턴으로 보인다. 이 패턴은 이미지 위에 적색 선으로 표시되어 있다.	B(f)	<u>C</u>	
6.2.2	모듈의 기울어짐. 수많은 수지상 같은 균열들이 주로 모듈 중간의 셀들에 위치하고 있다.	B(f)	<u>C</u>	
6.2.7	바이패스 다이오드의 션트 혹은 스트링에서 어딘가에 전류 흐름이 끊김	B(f)	Ē	

### 참고문헌

[Berger13] K.A. Berger, B. Kubicek, G. Újvári, G. Eder, Y. Voronko, M. Weiss, G. Oreski, M. Knausz, T. Koch, J. Wassermann, *Innovative, non destructive methods for investigations of PV-modules* (in German: *"Innovative, nichtzerstörende Methoden zur Untersuchung von Photovoltaikmodulen"*), Proc. 28th Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI, Bad Staffelstein, Germany, 2013), Regensburg 2013, ISBN 978-3-943891-09-6

[Fuyuki05] T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki, Y. Takahaschi, Y. Uraoka, Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence, *Applied Physics Letters* **86** (2005), p. 262108

# 5.5 자외선 형광분석

자외선 형광분석(fluorescence : FL) 기법은 1977년에 태양광 모듈의 변색을 분석하기 위해 EVA에 적용한 것이 그 시작이다[Pern97]. EVA가 자연광, 특히 자외선에 노출됨에 따라 봉지재 내의 분자들이 분해되어 형광체(lumophore)를 형성한다. Pern 등은 EVA에 있는 형광체를 여기하는데 315 nm 자외선광을 사용하였는데, 그 결과 325~800 nm 범위에서 형광이 방출되었다. 자외선 FL 이미지의 특징과 셀의 균열 사이의 상관관계도 밝혀졌다[Schlothauer10]. Schlothauer 등은 모듈 내에 있는 셀에서의 균열을 EL 이미지로 확인하고 이를 자외선 FL 이미지와 비교 상관관계를 해석하였다. 형광에 의한 열화 생성물이 셀의 모서리와 균열을 따라 비형광 생성물로 바뀌는 것으로 확인되었는데, 이들 열화는 백시트를 관통하여 모듈의 전면 EVA로 확산된 산소에 의해 산화된 것이었다[Pern96]. 이런 효과를 광표백(photobleaching)이라 하는데, 암 상태의 환경에서라도 모듈 내에 있는 셀들의 균열의 개수, 위치, 방향을 결정하는데 사용된다.

소재의 열화를 나타내거나 가능하게 하는 형광에 관련된 화학종은 형광 분광학(fluorescence spectroscopy) 기법으로 조사할 수 있다[Silverstein91]. 우선, 예를 들어 315 nm와 같은 특정 여기 파장에 대한 반응을 모니터하여 방출 스펙트럼을 확보한다. 그 다음, 특정 형광 파장에서 모니터링과 여기 신호 파장을 스캔하여 여기 스펙트럼을 얻는다. 시험은, 각 형광 피크에 해당하는 여기 스펙트럼과의 관련성이 확인될 때까지 반복적으로 이루어 질 수 있다. 이 기법은 탄화수소와 실리콘계 봉지재에 적용할 수도 있다[Pern93,Miller12]. 그러나 이 기법은, 흔히 사용되는 전면 유리나 백시트는 350 nm 이하의 자외선에는 불투명하므로 봉지재에 직접 접근해야 한다. 그러므로 완전한 형광 분광분석을 위해서는 태양광 모듈을 훼손해야한다. 형광 분광분석과 FL 이미징에서의 강도는 형광체의 농도에 비례하고 파장은 형광체 종의 특징을 나타낸다.

FL 이미징에서는 여기 목적으로 흑색광원 어레이를 사용할 수도 있는데, 흑색광은 310~340 nm 사이의 파장을 방출해야 한다. 350 nm 보다 큰 에너지를 가진 대부분의 포톤들은 모듈 전면에 있는 유리에서 대부분 흡수되어 라미네이션 소재까지 도달하지 못한다. 그리고 400 nm 보다 낮은 에너지를 가진 포톤들은 여기광과 형광 방출의 구분을 더 어렵게 만든다. 태양광 모듈에 빛을 조사하기 위해 사용하는 소스 램프는 모듈 표면에서 약 10~100 W/m<sup>2</sup>의 강도를 가진다. 봉지재 소재는 400~800 nm 범위의 파장에서 형광을 방출한다[Pern97, King00, Schlothauer10]. 카메라 대물렌즈 앞에 있는 long 패스필터는 카메라로 들어가는, 여기광으로 사용하는 흑색광을 차단하는데 사용한다. FL 이미지 분석에 주로 사용하는 노출시간은 약 10초 정도이다.

태양광 모듈은 일정 시간 자연광에 노출시켜 자외선 형광으로부터 충분한 신호가 방출될 수 있을 정도의 형광체 종이 생성될 수 있게 해야 한다. 통상적으로, 자외선에 노출이 길어질수록 형광 방출 강도는 더 강해진다. 충분한 형광 신호를 얻기 위해서는 모듈을 약 80 kW/m<sup>2</sup> 정도의 자외선량에 노출시켜야 하는데, 이는 독일이라면 약 1.5년 동안의 옥외 노출에 해당한다. 표 5.5.1은 FL 방법으로 탐지할 수 있는 모든 효과들을 요약한 것이다.

FL 이미징을 이용하면 모듈 내에 있는 셀들의 균열을 탐지하는 것이 가능하다[Koentges12]. 셀의 균열은 FL 이미지 상에서 태양전지 위에 검은색의 막대기 모양으로 나타나는데, EL 이미지 보다 셀의 균열 탐지가 훨씬 더 용이하다. 정규 셀들의 프레임에서의 표백 때문에 셀 모서리에서의 균열들은 탐지하기 어렵다. 게다가, FL 이미지는 때때로 상호연결부의 회색 구역을 따라 드러나기도 한다. 이 처럼 상호연결부 가까이에 있는 셀 균열들은 확인하기 어렵다.

표 5.5.1: FL 검사로 탐지할 수 있는 불량의 목록. 불량에 대한 상세 설명은 장 절에 명시된 내용을 참조하세요. 안전과 출력에 대한 코드는 표 4.4.1과 4.4.2에 정의되어 있다.

장 절	설명	안전	출력	이미지
	불량 없음	A	A	
6.2.2	셀 균열들	B(f)	<u>C</u>	The
6.2.2	분리된 셀 부분, 분리되지 않은 부분에 역방향 바이어스를 가하면 형광이 증가한다.	B(f)	<u>C</u>	

6.2.6	셀 상호연결의 단절. 전류는 다만 하나의 셀 상호연결 리본을 통해서만 흐르고 그리고 하나의 셀의 옆면을 다른 곳보다 더 강하게 가열시켜 더 많은 형광체를 생성한다.	B(f)	<u>A</u>	
-------	---	------	----------	--

### 참고문헌

[King00] D. L. King, M.A. Quintana, J.A. Kratochvil, D.E. Ellibee and B.R. Hansen, Photovoltaic module performance and durability following long-term field exposure, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **8** (2000), pp. 241-256 doi: 10.1002

[Koentges12] M. Köntges, S. Kajari-Schröder, I. Kunze, Cell cracks measured by UV fluorescence in the field, Proc. 27th EUPVSEC (WIP, Frankfurth, Germany, 2012), pp. 3033-3040

[Miller12] D. C. Miller, M. T. Muller, M. D. Kempe, K. Araki, C.I E. Kennedy, S. R. Kurtz, Durability of Polymeric Encapsulation Materials for Concentrating Photovoltaic Systems, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* **21**(4) (2012) doi: 10.1002/pip.1241

[Pern93] F. J. Pern, Luminescence and absorption characterization of ethylene-vinyl acetate encapsulant for PV modules before and after weathering degradation, *Polym. Deg. Stab.* **41** (1993), pp. 125-139

[Pern96] F.J. Pern, Factors that affect the EVA encapsulant discoloration rate upon accelerated exposure, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **41**-**42** (1996), pp. 587-615

[Pern97] F.J. Pern, S.H. Glick, Improved Photostability of NREL Developed EVA Pottant Formulations for PV Module Encapsulation, Proc. 26th IEEE PVSC, (IEEE, Anaheim, USA, 1997)

[Schlothauer10] J. Schlothauer, S. Jungwirth, B. Röder, M. Köhl, "Flourescence imaging- a powerful tool for the investigation of polymer degradation in PV modules", *Photovoltaics International* **10** (2010), pp. 149-154

[Silverstein91] R .M. Silverstein, G. C. Bassler, T. C. Morrill, Spectrometric Identification of Organic Compounds: Fifth Edition. John Wiley and Sons Inc.: New York, 1991, Chapter 7: ultraviolet spectrometry

# 5.6 신호 전송 방법

이 신호전송소자(signal transmission device : STD) 방법은 원래 모듈의 불량을 탐지하기 위해 설계된 것이 아니고 누설전기가 발생하는 지점과 벽에서의 배선 경로 탐지와 같은 전기 작업 현장에서 정비를 목적으로 한 것이었다[Kato10]. 이 방법을 태양광시스템, 특히 태양광 어레이의 직류회로에 적용하면 태양광 모듈에서 상호연결 리본의 단절 지점과 정션 박스 내에서의 바이오패스 다이오드의 개방회로 불량을 찾아낼 수 있다.

그림 5.6.1은 STD의 외관인데, 소형이고 가볍고 값이 싼 것이 특징이다. 소자는 송신기와 수신기 2개의 부분으로 구성되어 있다. 송신기는 작은 교류신호 전류를 연결된 회로 내로 보내주고 수신기는 이 시험 신호전류에 의해 생성된 자속(magnetic flux)을 탐지한다.



그림 5.6.1: 신호 전송소자(STD)의 사례

그림 5.6.2는 태양광 모듈 내 상호연결 리본의 단절된 지점을 탐지하는 것을 보여주고 있다. 우선, 태양광시스템의 동작을 정지한 다음 송신기를 태양광 결합기(combiner) 박스 내에서 목표로 한 모듈의 스트링에 연결한다. 시험 신호전류는 자동적으로 모듈 스트링으로 전달되기 시작한다. 그림 5.6.2의 밝은 푸른색의 점으로 표시된 선들은 시험 신호의 경로를 시각화한 것이다. 이어서 수신기는 각 모듈 전면 혹은 후면에 있는 상호연결 리본을 따라 움직인다. 셀의 상호연결 리본들이 양쪽 모두 셀들에 연결될 때 수신기는 시험신호를 탐지한다. 그러나 수신기는, 그림 5.6.2에서 A로 표시한 셀 상호연결 리본의 단절 지점 상의 신호전류를 탐지할 수 없다. 만약 한 개 셀의 모든 상호연결 리본(통상적으로는 2개 혹은 3개)이 단절되어 있으면 그림 5.6.2에서 B로 표시된 단절된 서브모듈 위 어디에서도 신호는 감지될 수 없다. 왜냐하면 신호는 단절된 서브모듈에 결합된 바이패스 다이오드를 통해 가기 때문이다.



그림 5.6.2: 모듈 내에서 상호연결 리본이 국부적으로 단절된 것을 탐지하는 절차의 개념도.

그림 5.6.3은 태양광 모듈 내에서 바이패스 다이오드 불량을 탐지하는 절차를 나타낸 것이다. 바이패스 다이오드 불량을 찾아내는 데는 특히 개방회로 불량인 경우, STD 외에 서브모듈 위에 자연광이 비치는 것을 차단하기 위해 하나의 고무 시트를 사용하는 사례도 있다.

위에서 언급한 바와 같이, 우선 태양광시스템을 정지시켜야 한다. 송신기를 모듈 스트링에 연결한 후에 고무 시트를 하나의 서브모듈 위에 놓고 바이패스 다이오드를 작동시킨다. 이어서 수신기가 모듈의 후면에 있는 연결 리본을 따라 이동하게 된다.

그림 5.6.3의 C로 표시된 바이패스 다이오드가 활성화되면 고무 시트에 의한 부분 음영(shading) 때문에 서브모듈 위에서는 어떤 신호 전류도 검지되지 않는다. 왜냐하면 신호가 바이패스 다이오드를 따라가기 때문이다. 그림에서 D로 표시된 개방회로 바이패스 다이오드인 경우는, 비록 서브모듈에 음영이 있어도 서브모듈에서 시험신호를 탐지할 수 있다.



그림 5.6.3: 모듈 내에서 개방회로 바이패스 다이오드 불량을 탐지하는 절차의 개념도.

그림 5.6.4는 동작 중인 모듈에서 셀 상호연결 리본이 단절된 부분을 STD로 탐지하는 사례이다. 하나의 EL 이미지는 2개 셀의 상호연결 리본이 왼쪽 반에서 단절된 것을 보여주고 있는데, STD는 왼쪽에 있는 상호연결 리본에 단절이 있는 것을 쉽게 탐지한다. 표 5.6.1은 STD 방법으로 탐지 가능한 모든 불량들을 요약한 것이다.



그림 5.6.4: 가동 중인 모듈에서 탐지된 STD의 결과들을 모듈의 EL 이미지에 삽입시킨 것이다. EL 이미지는, 2개의 셀들, 이 셀들의 위에 있는 핑거 그리드들은 2셀의 반쪽에서는 분리되어 있는데, 그 왼쪽 반 위에서의 셀 상호연결 리본이 단절된 것을 보여준다. 양쪽 결과들은 완전히 일치한다. 대부분의 EL 관찰은 실내에서 이루어지고 고가인 반면에 STD 방법은 설치 현장에서도 모듈을 제거할 필요가 없는 값싸고 쉽게 적용할 수 있는 방법이다.

표 5.6.1: STD 검사로 탐지할 수 있는 불량의 목록. 불량에 대한 상세 설명은 장 절에 명시된 내용을 참조하세요. 안전과 출력에 대한 코드는 표 4.4.1과 4.4.2에 정의되어 있다.

장 절	설명	안전	출력	이미지
5.3.8	상호연결 리본이 단절된 하나의 셀: 단절된 리본에서 탐지된 시그널은 없음.	B(f)	CI	60.1°C 67.9 64.9 62.0 49.0 46.1 43.1 40.2°C
5.3.8	하나의 셀의 모든 상호연결 리본이 단절되었거나 스트링 상호연결 부가 단절된 경우 : 단절된 서브모듈 위 어디에서도 탐지된 시그널이 없음.	B(f)	Ш	60.4°C 67.9 64.9 64.9 64.9 64.9 64.9 64.9 64.9 64
5.3.9	개방회로 바이패스 다이오드 : 음영이 있는 서브모듈 위 어디에서도 시그널 탐지	C(f)	A	이미지 없음

### 참고문헌

[Kato10] K. Kato, Taiyoko Hatsuden Sisutem no Fuguai Jirei Fairu, p.38-40 published from Nikkan Kogyo Shimbun, 2010 (in Japanese)

# 6 태양광 모듈의 불량

태양광 모듈은 다양한 이유로 불량이 된다. 모듈이 태양광시스템에 연결되는 방식과 관련된 불량과 일반적인 패키징 불량은 모든 모듈에 공통적인데, 표 6.0.1에 일반사항 범주로 분류되어 있다. 일부 결함은 특정 모듈유형에서만 관찰된다. 일부 결함들은 모듈에 의해 야기된 것이 아니라 모듈 라벨의 인쇄를 통해 제조업체에서 이미 고려를 마친 외부 요인들 혹은 고유의 영향들에 의해 발생한다. 이런 목록은 우선순위가 지정되지 않았고 가능한 모든 불량 메커니즘을 포함하고 있지도 않다. 이어서 자세한 내용을 소개하고자 한다.

표 6.0.1: 태양광 기술별로 알려진 그리고 예상되는 불량 모드와 열화 메커니즘

알려진 그리고 예상되는 불량 모드와 열화 메커니즘	관련 장 절
일반 사항	
퀵 커넥터 신뢰성	4.3.3
박리	6.1.1
유리 파손	4.3.1, 6.1.4, 6.4.1, 7.2
정션박스 불량	6.1.3
웨이퍼 기반 실리콘 모듈	
셀 균열	6.2.2, 6.2.3, 7.1, 7.2
박리	6.1.1
EVA 변색	6.2.1, 6.2.3, 7.3
탄 흔적	6.2.4
PID	6.2.5, 7.5
열사이클링에 의한 리본 전극의 피로현상	6.2.6
바이패스 다이오드 불량	6.2.7
정션박스 불량	6.1.3
광유도 셀 열화	4.2
실리콘 박막	

초기 광열화 (a-Si)	4.2
어닐링 불안정 (a-Si)	4.2
션트 열점	6.3.2
CdTe 박막	
셀 층의 일체성 - 후면전극 안정성	6.4.2
버스바 불량 - 기계적(접착)과 전기적	6.3.1
션트 열점	6.3.2
CIGS 박막	
션트 열점	6.3.2

### 6.1 모든 모듈에서 발견된 불량들에 대한 검토

아래에서는 거의 모든 모듈 유형에서 발견되는 모듈 불량에 대해 설명하고자 한다. 모든 다른 종류의 모듈에서 가장 유사한 부분은 라미네이트이다. 따라서 일반적인 방식으로 라미네이트 불량에 대해 논의하고자 한다.

### 6.1.1 박리

유리, 봉지재, 활성층 그리고 후면층 사이의 접착은 여러 가지 이유로 절충이 될 수 있다. 박막과 기타 유형의 태양광 기술은 투명전도성산화물(transparent conductive oxide : TCO) 혹은 인접한 유리 층으로부터 박리될 수 있는 유사한 층을 포함할 수 있다[Jansen03]. 일반적으로 오염(예 : 유리의 세척 불충분) 혹은 환경적 요인으로 인해 접착력에 손상이 생기면 박리가 일어나고 이어서 수분 침투와 부식이 발생한다. 태양광이 들어오는 경로 내에 위치한 계면에서 박리가 발생하면 빛 반사(예 : 공기/폴리머 단일계면에서 최대 4 %까지, 출력손실 D와 안전등급 A)가 일어나게 되고 이어서 모듈에서 전류(출력)손실이 생긴다.

박리(delamination)는 표 5.1.3에 표시된 것처럼 비교적 쉽게 볼 수 있다. 이론적으로 계면의 분리는 반사계를 사용하여 정량화 할 수 있다. 5.3.2와 5.3.3에서 설명한 펄스와 고정화 서모그래피를 사용하면 시각적으로 확인할 수 없는 박리를 탐지할 수 있다. 명백한 탐지가 어려운 박리를 X-선 단층촬영과 초음파 스캐너를 사용하여 더 높은 해상도로 검사할 수 있지만 둘 다 검사시간이 더 소요된다[Veldmann11].

EVA 봉지재에서 접착 촉진제(유리 계면용)는 일반적으로 가장 불안정한 첨가제인데, 가교에 사용되는 과산화물보다 EVA의 저장수명을 훨씬 더 제한한다. 모듈 내 계면의 내구성에 영향을 미치는 인자들로는 자외선, 온도 그리고/또는 수분이 포함될 수 있다. 예를 들어, 백시트를 포함하는 polyethylene terepthalate(PET)의 박리는 PET[McMahon59]의 가수분해에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있는데, 이는 "고온고습" 조건 하에서의 가속시험 검사를 받을 수 없게 만들 수 있다. EVA와 태양전지 사이의 계면에서 박리가 더 많이 발생할 수 있는데, 이는 EVA/유리 계면에서보다는 초기에 계면 강도가 더 제한될 수 있기 때문이다. 다른 한편으로, 자외선 열화와 이어지는 취성은 태양빛에 노출된 계면의 장기적인 접착력을 낮출 수 있다.

박리 후에 생겨나는 새로운 경로들과 이어진 부식으로 인해 모듈 성능이 저하되지만 안전상의 문제로까지 직결되지는 않는다. 그러나 백시트의 박리는 전기적으로 활성인 구성요소까지 노출시킬 수 있다. 백시트의 박리로 인해 모듈이 분리되는 결함(isolation fault)이 발생할 수도 있다(안전 등급 C(e)). 레일본드(rail bond)가 불량하면 모듈이 장착 시스템에서 분리되어 설치장소 내의 사람이나 재산에 위험을 초래할 수 있다. 정션 박스의 분리는 전기 아크의 가능성 외에도 전기적 활성 구성요소들이 노출될 위험을 초래할 수도 있다. 태양광 설치 현장에서 아크로 인한 화재가 몇 건 보고가 되었다.

가장 일반적으로 봉지/유리와 봉지/셀 계면의 접착 강도는 이중 캔틸레버 빔(double cantilever beam : DCB) [ISO25217] 측정, 압축 전단 시험(compressive shear tests) [Chapuis12] 또는 중첩 전단 테스트(overlap shear tests) [Kempe09]를 사용하여 검사한다. DCB와 같은 파괴역학 기반 접근방식의 장점은 접착(그리고 그 열화)이 근본원리에 관련될 수 있다는 것이다. 유연한 프론트 혹은 백시트의 접착강도는 180° peel 시험으로 측정할 수 있다[ISO8510].

### 6.1.2 백시트 접착 손실

모듈의 백시트는 전기적 구성부품이 외부 환경에 직접 노출되지 않도록 보호하고 높은 직류전압 하에서 안전한 동작을 가능하게 한다. 백시트는 유리 또는 폴리머를 사용할 수 있고, 그리고 금속포일도 사용가능하다. 일반적으로, 백시트는 매우 안정적이고 자외선 내성이 있는 폴리머를 가진 라미네이트 구조로 구성되는데, 외부환경에 직접 노출되는 바깥층은 불소폴리머(fluoropolymer)가, 안쪽에는 PET 소재의 층이 있고 이어서 봉지재 층이 따르는 구조이다. 최근에 자외선과 열 안정성을 위해 만들어진 PET의 단일 층을 사용하는 새로운 디자인이 구현되었다. 소재의 선택은 비용, 필요한 기계적 강도의 종류, 전기적 절연의 필요성 그리고 패키지에서 수증기를 차단해야 하는지 여부에 따라 달라진다.

백시트 대신 후면에 유리를 사용하면 파손 가능성이 있다. 이는 부적절한 장착, 우박의 충격, 바람에 날리는 물체의 충격 또는 기타 유형의 기계적 스트레스로 인해 발생할 수 있다. 모듈이 백시트(예 : 기판형 CIGS) 위에 박막 소자로 만들어진 경우, 해당 모듈은 심각한 혹은 그보다 더한 완전한 출력손실과 더불어 심각한 안전위험에 노출될 수 있다. 균열을 따라 작은 틈과 전기 아크를 생성하고 유지시킬 수 있는 약간의 전압이 있을 수 있다. 이것이 바이패스 다이오드의 불량과 함께 발생하면 전체 시스템전압이 틈을 가로질러 걸릴 수 있는데, 이는 유리를 녹여 화재를 일으킬 수 있는 크고 지속적인 아크를 생성할 수 있다. 그러나 일반적으로 유리 백시트를 사용하는 결정질실리콘 모듈에서 파손되는 경우에는, 전기절연을 제공할 수 있는 봉지재 층이 여전히 남아 있을 가능성이 있다.

모듈이 전면 유리와 백시트로 구성되면 박리와 그리고/또는 유리파손을 증대시키는 추가 응력이 있을 수 있다. 라미네이션을 적절히 제어하지 않으면 과잉의 봉지재가 모듈 측면에서 밀려나와 유리를 약간 구부러지게 할 수 있다. 이로 인해 모듈의 가장자리에 있는 봉지재에 상당한 인장 응력이 발생하여 박리 가능성이 높아진다. 유사하게, 강화 유리는 완벽하게 평평하지 않으며 그리고 셀 재료가 있는 구조로 인해 추가적인 잔존 기계적 응력으로 이어질 수 있다. 이러한 모든 응력은 박리와 유 파손의 가능성을 높이게 되며, 이 둘 모두 심각한 성능과 안전문제로 이어질 수 있다.

백시트 재료는 또한 가볍고 잠재적으로 신축성이 있으면서 수분이 침투할 수 없도록 폴리머 라미네이트에 금속 포일의 구조로 구성할 수 있다. 이 구조는 안전문제와 관련하여 많은 추가적인 이점을 제공한다. 여기에서는 셀과 금속 포일 사이에 보다 견고한 전기 절연 층을 제공 할 필요가 있다. 포일의 전체 표면에서의 전기절연에 약간의 문제라도 있으면 전체 포일이 시스템 전압으로 충전되는 결과를 초래한다. 따라서 더 넓은 영역에서 전기절연에 관심을 가져야한다. 게다가, 금속포일은 전극 중의 하나로서의 역할을 하는 셀들과 함께 고전압 커패시터 역할을 할 수 있다. 이런 특정한 안전문제의 해결을 위해 IEC 규격 커뮤니티는 현재 IEC 61730 [IEC61730]의 초안을 작성하고 있다.

결정질실리콘 모듈에서와 같이 통상적으로 폴리머 백시트를 사용하여 모듈의 라미네이트를 구성한다. 여러 층을 사용하면, 열, 온도 사이클링, 기계적 스트레스, 습도, 자외선 또는 여타 물리 혹은 화학적 스트레스에 반응하여 박리될 수 있는 많은 수의 계면이 있게 되는 것이다. 만약 박리로 인해 후면의 중앙에 오픈된 영역에 거품(표 5.1.3 참조)이 형성되어도 그 자체로 즉각적인 안전문제가 되지는 않는다. 이 영역은, 열이 후면 쪽으로 잘 전달되지 않기 때문에 약간은 더 뜨겁게 동작할 수 있으나, 거품이 더 이상 방해를 받지 않고 깨지거나 확대되지 않는 한 성능과 안전문제는 최소에 그친다.

그러나 백시트의 박리가 정션 박스 근처 또는 모듈의 가장자리 근처에서 발생하면 더 심각한 안전문제가 발생할 수 있다. 가장자리의 박리는 호우나 혹은 이슬에 반응하여 액체상태의 물이 모듈로 들어가는 직접적인 경로를 제공할 수 있다. 이는 접지에 대한 직접적인 전기적 경로를 제공하여 매우 심각한 안전문제를 야기할 수 있다. 마찬가지로 정션 박스 근처의 박리로 인해 그 자체가 느슨해져 활성 요소에 기계적 응력을 가해 파괴에까지 이를 수 있다. 여기서의 파괴로 인해 바이패스 다이오드에 대한 연결 불량을 유발할 가능성이 더 높아지며, 그 결과 전체 시스템전압에서 아주 심한 아크의 발생으로 이어질 가능성이 있다. 접착 문제를 세심히 고려하여 모듈이 제작되지 않아, 셀 표면들이 제대로 준비되지 않거나 (예 : 잔류 플럭스), 백시트의 포일 부분이 잘 접착되지 않거나 혹은 자외선에 민감해지거나 하는데, 혹은 만약에, 납땜으로부터 너무 많은 플럭스나 EVA에서의 물의 기화 때문에 모듈 내부에서 가스가 형성되면, 백시트는 접착이 잘되지 않고 셀 표면들에 거품들이 형성될 수 있다. 습도가 높은 기간 동안, 특히 야간에 복사 냉각으로 인해 모듈에 이슬이 맺히면 거품 내에 물방울이 형성될 수도 있다. 액체의 물은, 특히 고전압과 결합될 경우, 셀 구성 요소에 심각하고 돌이킬 수없는 손상을 일으킬 수 있다. 이런 유형의 열화로 인해 모듈은 급작스럽게 안전문제를 유발할 수 있고 심지어는 동작불능이 된다.

백시트 소재에는 다양한 형태와 구성들이 있다. 이들 각각에는 모듈 패키지를 설계할 때 고려해야하는 고유한 잠재적 불량 모드 세트가 있다.

### 6.1.3 정션 박스 불량

정션 박스는 모듈 뒷면에 고정된 컨테이너로 모듈의 셀 스트링과 외부단자의 연결을 보호한다. 일반적으로 정션 박스에는 열점 또는 음영이 있을 경우를 대비하여 스트링의 셀을 보호하기 위해 바이패스 다이오드가 포함되어 있다. 현장에서 관찰된 불량은 다음과 같다.

- a) 정션 박스를 백시트에 제대로 고정하지 않음. 일부 접착 시스템은 단기적인 당김에는 좋지만 장기적인 접착에는 좋지 않음[WOL10].
- b) 열악한 제조 공정으로 인해 정션 박스가 열려있거나 잘못 닫혀있음.
- c) 정션 박스의 연결부와 스트링 상호연결 부위에 부식을 야기하는 수분침투.
- d) 배선 불량으로 인해 정션 박스에서 내부 아크가 발생. 이 불량은 아크로 인해 화재가 발생할 수 있기 때문에 특히 위험함.

스트링 상호연결부에서의 납땜 접촉에 신뢰성이 결여되면 저항이 크게 높아지고 정션 박스에서의 가열로 이어진다. 극단적인 경우 화재위험이 증가한다. 이러한 불량 납땜 접촉은 납땜 온도가 낮거나 또는 납땜 접합부에 이전 프로세스에서 잔류한 화학물질에 의해 일어날 수 있다.



그림 6.1.3: 정션 박스 불량들 : (좌) 정션 박스 열림, (중) 백시트에 본딩 불량, (우) 배선 불량

### 6.1.4 프레임 파손

많은 모듈은 폭설이 많은 지역을 염두에 두고 설계되고 설치되는데, 폭설 부하가 심한 지역용 모듈의 시험과 인증을 목적으로 IEC 61215 [IEC61215]의 적설 부하시험이 적용되었다. 실제 적설 부하 특성과 관련하여, 기계적 부하시험은 경사가 진 상태에서 모듈 하단의 프레임 부분에 매우 큰 응력을 가할 수 없다. 적설 하중은 서서히 아래로 이동하여 프레임 가장자리와 상단 표면 사이에 생길 수 있는 공간으로 침투해 들어간다. 압축으로 인해 아래 부위의 눈이 형성한 얼음은 프레임 끝부분을 밀어낸다.



그림 6.1.4: 1.2 m의 폭설 후 손상된 모듈 프레임, 2012년 겨울에 35 cm까지 녹아내림. 해발 620 m, 경사각 25°의 알파인 위치. 60개의 셀로 구성된 모듈 크기 1660 mm x 990 mm, 50 mm Al 프레임 사용.

(좌): 얼음 층이 모듈 가장자리 위로 미끄러짐.

(중): 프레임이 얼음에 의해 굽혀짐. (우): 모서리 나사 조인트의 고장 [Leitner12].

모듈의 경사면 또는 상단은 쌓인 눈이 모듈의 하단부분으로 움직일 수 있도록 하는데, 이것이 클램프로 고정시킨 지점에서 토크를 유도하기도 한다. 이런 거동은 모듈의 중앙 또는 상단에 비해 더 높은 중력에 의해 증폭된다. 그림 6.1.5가 이런 관계를 보여주는데, 수평과 수직으로 장기간의 적설 영향의 차이를 단순화한 것이다.



그림 6.1.5: 적설 부하의 도입, 부하의 벡터에 따른 차이

하방향 힘은 경사각의 함수로, 모듈 아래 부분에 응력을 증가시켜 잠재적으로 유리의 구조적인 일체성을 유지하는데 필요한 저항력의 결핍이란 결과를 낳을 수 있다. 이러한 종류의 변형은 현장에서 관찰되었는데, 이후 상판의 손상으로 이어진다. 프레임이 유리에서 분리되면 모듈이 파손되므로 교체해야한다.

일반적으로 모듈에 대한 적설 부하는 4가지 특성으로 요약할 수 있는데, 이는 7.2 장에 기술한 새로운 시험방법을 개발하는데 사용된다.

- 경사면에 작용하는 수직하중은 수직방향 힘 F<sub>N</sub>과 내리막 방향 힘 F<sub>H</sub>의 두 가지 요소로 나뉜다. 힘 F<sub>R</sub>은 눈과 유리 사이의 마찰이고 F<sub>H</sub>에 반대방향으로 작용한다.
- 표면 아래로 미끄러지는 눈은 모듈 표면에 불균일하게 분포된다.
- 불균일한 하중은 시험시료의 축 방향을 따라 모듈 하부에 모멘트와 토크를 유발한다. 하단 모듈 클램프는 큰 모멘트를 받는다.
- 저온 (<0 ℃)은 접착제의 취성을 유발하고 안정성을 더욱 떨어뜨릴 수 있다. 더 높은 온도에서는 크리프 현상이 발생할 수 있다.

### 참고문헌

[IEC61730-1] International Electrotechnical Commission (IEC) 61730-1: Photovoltaic (PV) module safety qualification - Part 1: Requirements for construction, 2004-10-14

[ISO25217] ISO 25217:2009 Adhesives -- Determination of the mode 1 adhesive fracture energy of structural adhesive joints using double cantilever beam and tapered double cantilever beam specimens, International Electrotechnical Commission: Geneva, 1–24 (2009)

[ISO8510] ISO 8510-2:2006 Adhesives -- Peel test for a flexible-bonded-to-rigid test specimen assembly -- Part 2: 180 degree peel, International Electrotechnical Commission: Geneva, 1–6 (2006)

[Chapuis12] V. Chapuis, S. Pélisset, M. Raeis-Barnéoud, H.-Y. Li, C. Ballif, L.-E. Perret-Aebi, Compressive-Shear Adhesion Characterization of PVB and EVA at Different Curing Times Before and After Exposure to Damp-Heat Conditions, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* (2012), doi: 10.1002/pip.2270

[Jansen03] K. W. Jansen, A. E. Delahoy, A Laboratory Technique for the Evaluation of Electrochemical Transparent Conductive Oxide Delamination from Glass Substrates, *Thin Solid Films* **423** (2003), pp. 153–160

[Kempe09] M.D. Kempe, M. Kilkenny, T.J. Moricone, Accelerated stress testing of hydrocarbon based encapsulants for medium-concentration CPV applications, Proc. IEEE PVSC (IEEE, Philadelphia, PA, USA, 2009), pp. 001826–001831

[Leitinger12] Pictures submitted by M. Leitinger

[McMahon59] W. McMahon, H.A. Birdsall, G.R. Johnson, C.T. Camilli, Degradation Studies of Polyethylene Terephthalate, *J. Chem. Eng. Data* **4** (1), (1959), pp. 57-79

[Veldmann11] D. Veldman, I. J. Bennett, B. Brockholz, and P. C. de Jong, Non-Dsetructive Testing of Crystalline Silicon Photovoltaic Back-Contact Modules, Proc. 37th IEEE PVSC (IEEE, Seattle, USA, 2011), pp. 3237 - 3240 [WOL10] J. Wohlgemuth, D.W. Cunningham, A. Nguyen, G. Kelly, D. Amin, Failure Modes of Cristalline Si Modules, PV Module Reliability Workshop 2010 (NREL, Golden, USA, 2010)

## 6.2 실리콘 웨이퍼 기반 모듈에서 발견된 불량의 검토

가장 일반적인 모듈은 웨이퍼 기반 실리콘 태양전지로 만들어진다. 따라서 대부분 이런 유형의 모듈 불량에 대해서는 방대한 지식의 기반이 축적되었다. 그러나 이런 모듈의 경우에도 PID와 달팽이자국과 같은 일부 영향들이 지난 3년 동안 처음으로 자세히 연구되었다. 따라서 여기에 대한 기술은 현 시점에서의 상황을 보여 주는 것으로 최종 보고발표가 아니다. 심지어는 더 오래된 모듈에서 또 다른 불량에 대한 기술이 필요할 수도 있는데, 이는 현재의 모듈과 소재 설계와의 차이를 보여준다.

### 6.2.1 EVA 변색

모듈의 가장 명백한 열화 메커니즘 중 하나는 EVA 또는 여타 봉지재 소재의 변색이다. 이런 유형의 열화는 주로 외관상의 미적인 문제로 간주된다. 모듈의 전류(따라서 출력 생산)가 감소하기 전에 변색은 관찰자가 분명하게 볼 수 있는데, EVA 변색은, 실리콘 모듈에서 일반적으로 관찰되는 연간 ~0.8 %의 열화 중에 연간 0.5 % 미만을 차지할 것으로 예상된다[Jordan11]. EVA의 변색에 대한 사례는 표 5.1.3에 나와 있다.

통상적으로 EVA는 자외선과 열 안정제를 포함하는 첨가제로 제조된다. 그러나 첨가제 그리고/혹은 그 농도의 선택이 부적절할 경우 EVA는 표 5.1.3과 같이 변색될 수 있다. 설명하자면, 현장에서 호환되지 않는 첨가제 사이의 상호작용은 변색을 일으키는 발색단 종을 생성하거나[Holley98] 시간이 지남에 따라 첨가제(예 : 자외선 흡수제)의 고갈[Shioda11]이 EVA를 손상에 취약하게 만들 수 있다. 현장에서 관찰되는 변색 패턴은, 산소의 확산이나 열과 자외선이 EVA와 상호 반응할 때 생성되는 초산[Pern97]과 같은 생성물로 인해 매우 복잡해 질 수 있다. 산소는, 웨이퍼 기반 셀 주변에 변색 발색단 종이 존재하지 않는 곳에 투명한 EVA 고리를 생성하면서 발색단을 광표백(photobleach)한다. EVA 내외부로 제한된 화학확산의 영향과 그리고 유사한 발색단 종을 생성하는 여러 화학경로의 존재를 기반으로 하여 대칭적인 패턴들 그리고 때때로는 다중의 고리들을 보게되는 것은 매우 일반적이다. 표 5.1.3의 사진은 단일 셀이 인접한 셀보다 훨씬 더 어두운 사례를 보여준다. 통상적으로 이는 가장 변색된 셀이 주변 셀보다 더 높은 온도에 있음을 의미하는데, 아마도 모듈의 다른 셀에 비해 셀의 광전류가 더 낮거나 정션 박스의 위에 위치한 셀 때문일 수 있다.

변색이 매우 심각하고 단일 셀에 국한되어서 서브스트링의 바이패스 다이오드가 켜지지 않는 다면, EVA의 변색이 안전문제를 나타내는 것은 아니다(안전등급 A). EVA 변색이 셀 내에서 다른 불량을 유발하는 경우는 드물지만 변색은 다음과 같은 것-중요한 열 이력(현장에서의 고온), 초산 생성[Pern98]과 수반되는 부식[Weber12] 그리고 EVA의 취성 [Dhere98]-들에 관련될 수 있다.

EVA 변색이 대부분의 실리콘 모듈에서 나타나는 느린 열화의 원인이 될 수도 있다는 몇 가지 증거가 있다. 연간 약 0.5 %의 열화율 중간 값은 약 1,800개 실리콘 모듈 열화에 대한 연구의 요약 중 하나로 보고되었다[Jordan11]. 이 열화는 단락 전류의 손실에 의해 지배되는 것으로 밝혀졌다. 이들 중 약 60 %에서 변색이 보고되었다. 모듈 성능에서 총 10 %의 손실은 심각한 변색으로 보이는데, 이는 EVA 변색이 대부분의 실리콘 모듈에서 관찰된 전체 성능의 감소를 완전히 설명하지는 못하는 것을 의미한다. 결론적으로 EVA 변색은 자외선 복사와 온도에 대한 포화시간 의존성이 느린 출력손실 범주 D(t, uv)로 분류된다.

### 참고문헌

[Dhere98] N. G. Dhere, K. S. Gadre, Tensile Testing of EVA in PV Modules. Proc. Int. Solar Energy Conf. Solar Engineering 1998, ASME 1998, Albuquerque, NM, (1998), pp. 491-497

[Jordan11] D.C. Jordan, S.R. Kurtz, Photovoltaic Degradation Rates—an Analytical Review, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* (2011) doi: 10.1002/pip.1182

[Jordan12] D.C. Jordan, J.H. Wohlgemuth, S.R. Kurtz, Technology and Climate Trends in PV Module Degradation, 27th EUPVSEC (WIP, Frankfuth, Germany, 2012), pp. 3118-3124 (<u>http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56690.pdf</u>)

[Holley98] W. W. Holley, Agro SC, Advanced EVA-based encapsulants: final report, NREL/SR-520-25296 (1998)

[Pern97] F.J. Pern, Ethylene-vinyl acetate (EVA) encapsulants for photovoltaic modules: degradation and discoloration mechanisms and formulation modification for improved photostability, *Angew. Makromol. Chem.* **252** (1997), pp. 195-216.

[Shioda11] T. Shioda, UV-accelerated test based on analysis of field-exposed PV modules, *Proc. SPIE* 8112, Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems IV, 81120I (San Diego, California, USA, 2011); doi:10.1117/12.894597

[Weber12] U. Weber, R. Eiden, C. Strubel, T. Soegding, M. Heiss, P. Zachmann, K. Nattermann, H. Engelmann, A. Dethlefsen, No. Lenck, Acetic Acid Production, Migration and Corrosion Effects In Ethylene-Vinylacetate-(EVA-) Based PV Modules", Proc. of 27th EUPVSEC, (WIP, Frankfurth, Germany, 2012) pp. 2992-2995

### 6.2.2 셀 균열

태양전지의 원소재인 실리콘은 소재 자체가 매우 취약하다. 셀 균열은 종종 육안으로는 볼 수없는 태양전지의 실리콘 기판에 있는 균열이다. 셀 균열은 태양전지에서 서로 다른 길이와 방향으로 형성될 수 있다. 모듈의 제조 공정에서 많은 태양전지가 모듈에 내장되는데, 지금의 모듈에서는 모듈 당 60개의 태양전지가 내장되어 있다. 다음에서는 정상으로 간주되는 셀 균열의 수와 이것이 제품의 셀 균열 예상속도 측면에서 무엇을 의미하는지를 기술하고자 한다. 웨이퍼 슬라이싱, 셀 생산[Pingel09], 태양전지와 모듈 생산 중 스트링과 임베딩 프로세스가 셀 균열을 유발한다. 고유 제조공정의 변화로 인해 모듈 제조공정 중에 셀 균열이 일어난다. 특히 태양전지의 스트링 공정은 셀 균열의 발생 위험성이 높다[Gabor06]. 생산을 마친 후 셀 균열의 가장 큰 요인은 모듈의 패키징/수송과 재장전이다[Reil10]. 끝으로 모듈의 설치 시에 떨어뜨리거나 모듈을 밟는 사고 등으로 인해 셀 균열의 가능성이 커진다[Olschok12]. 그림 6.2.1은 ISFH와 TÜV Rheinland에서 다양한 제조업체의 모든 모듈에 대한 평균 균열 분포를 해석한 것이다[Koentges11]. 그러나 이 모든 셀들의 균열이 반드시 모듈 불량은 아닌데, 왜냐하면 불량의 원인이 외부 요인이기 때문이다(4.3.2 장 참조).

그러나 생산 중에 발생되는 셀 균열도 있다. 이에 대해서는 다음에서 설명하고자 한다. 일정한 조건 하에서 각 생산 라인별로 셀 균열이 있을 확률 p 를 특정할 수 있다. 모듈을 만들기 위해 생산된 셀의 개수 *n*=60을 취하면 모듈에서 셀 균열이 있는 셀의 특정 개수 *k*를 가질 확률 *p*<sub>k</sub> 는 이항 분포로 주어진다.

 $p_k = \binom{p}{k} \cdot (1-p)^{(n-k)}$ 

(6.2.1)

즉 방정식 (6.2.1)은 모듈(*n* 개의 셀 포함)이 생산 중에 셀 균열의 확률(*p*)을 알고 있는 경우 *k* 개의 균열된 셀을 가질 확률(*p*<sub>k</sub>)을 나타낸다. 따라서 모듈의 품질기준을 평가하는 가장 좋은 방법은 이항 분포를 사용하여 생산 직후 모듈 당의 균열의 개수를 기록하는 것이다. 생산 중 셀 균열 분포의 예는 그림 6.2.1과 같다. 이항 분포는 이런 생산으로 인해 유발된 셀 균열 분포를 잘 설명한다.

생산 중 셀 균열의 원인은 세 가지인데, 각각 고유의 발생 확률 p가 있다.

1. 셀 상호연결 리본에서 시작되는 균열은 납땜 공정에서 유발된 잔류응력으로 인해 발생한다. 이런 균열은 잔류응력이 가장 높은 커넥터의 끝 혹은 시작점에 주로 위치한다[Sander11]. 이 균열 유형이 가장 흔하다.

2. 생산 과정에서 웨이퍼를 누르는 바늘들에 의해 발생하는 소위 교차 균열.

3. 셀 가장자리에서 시작되는 균열은 셀이 단단한 물체에 부딪혀 발생한다.

모듈에 셀 균열이 있으면 모듈 동작 중에 짧은 셀 균열이 더 길어지고 더 넓은 균열로 발전할 위험이 높아진다. 이는 바람이나 적설 부하로 인한 기계적 스트레스[Kajari11]와 지나가는 구름과 날씨 변동 등 온도변화 요소에 의한 모듈에서의 열 기계적 스트레스[Sander11] 때문이다.

또한 모듈에는, 특정 원인으로 간주할 수 있는, EL 이미징으로 탐지할 수 있는 몇 가지 일반적인 균열 패턴이 있다. 표 5.4.1은 이런 균열 패턴의 예를 보여주고 있다. 한 스트링에서 인접 스트링으로 외관이 180° 회전하는 반복적인 균열 패턴은 모듈을 라미네이션하기 전의 생산 과정상의 잘못(일반적으로 스트링거에 의해 발생)으로 인해 발생한다. 이런 반복적인 균열 패턴은 라미네이션 후에는 생길 수 없다.



그림 6.2.1: 모듈 당의 특정 균열 수를 보여주는 60개 셀 모듈의 로그 히스토그램. 빨간색 사각형은 한 제조업체에서 생산 직후 모듈(#80)의 균열 분포를 보여준다. 파란색 다이아몬드는 현장에서 발견된 모듈의 균열 분포(#574)를 보여준다[Koentges2012]. 직선은 *p* = 5 %인 경우 식 (6.2.1)의 이항분포를 나타낸 것이다.

셀 상호연결 리본 너머에 있는 균열은 핑거 불량유형 C의 범주에 들어간다. 표 5.4.1을 참조하세요. 이 불량 유형은 일반적으로 납땜 조인트에서의 높은 변형으로 나타난다. 이런 유형의 불량은 일반적으로 열기계적인 스트레스 후에 더 많이 나타나고, 이런 불량이 없는 모듈에 비해 온도 사이클링(TC 200) 시험에서 더 높은 출력손실로 이어진다[Wendt09].

수지상(dendritic) 형태의 셀 균열패턴을 보여주는 모듈은 무거운 기계적 부하[Koentges11] 혹은 높은 가속에 노출된 것들이다. 무거운 기계적 부하의 일반적인 이유는 운송 중 잘못된 패키징, 지면과 평행하게 모듈 떨어뜨리기, 모듈의 기울어 짐 또는 매우 무거운 적설 부하 등이다. 이 균열 패턴은 라미네이션 공정 후 균열이 발생했음을 나타낸다. 수지상 균열 패턴이 있는 셀은 생산 라인에서 가공할 수 없다. 경험적으로, 셀에 수지상 균열 패턴이 있는 모듈은 다른 균열 패턴이 있는 셀의 모듈보다 습도 동결 시험에서 더 높은 출력손실을 보여준다.

더 큰 균열의 균열 패턴에 따라, 열, 기계적 스트레스 그리고 습도는 출력손실을 유발하는 "죽은" 혹은 "비활성" 셀 부분의 발생으로 이어질 수 있다. 죽은 또는 비활성 셀 부분이라는 것은 셀의 특정 부분이 더 이상 모듈의 총 출력생산에
기여하지 못함을 의미한다. 셀의 이 죽은 부분이나 비활성 부분이 전체 태양전지 면적의 8 %보다 크면, 비활성 셀 면적에 따라 대략 선형적으로 증가하는 출력손실이 발생한다[Koentges10]. 이 규칙은 60개 셀, 길이 156 mm 그리고 3개의 바이패스 다이오드가 있는 230 Wp의 모듈에 적용된다. 마지막으로 50 % 이상의 비활성 영역은 바이패스 다이오드가 활성화되고 모듈의 이 부분을 우회할 때 모듈 출력의 1/3의 손실로 이어진다. 이것은 모듈의 서브스트링 세 개중 하나에서 하나의 셀의 불량 때문에 발생한다. 모듈 스트링들의 경우는 출력손실이 훨씬 더 극적으로 비활성 영역에 의존한다. 비활성 셀 영역과 출력손실 간의 의존성을 확인하기 위해 어레이를 그림 6.2.2에서와 같이 단일 모듈과 시뮬레이션된 20개 모듈 비교하였다[Koentges08]. 그림 6.2.2는 비활성 전지 영역이 8 %일 때 단일 모듈보다는 어레이에서의 출력손실이 훨씬 더 가파르게 증가함을 보여준다. 그러므로 8 % 이상의 비활성 셀 영역은 허용해서는 안 된다. 출력손실의 위험 외에도 8 % 이상의 비활성 셀 부분으로 인해 열점이 발생할 가능성이 있다. 이것은 균열된 셀이 여전히 활성 셀 부분에 국부적인 역전류 경로를 갖는 경우 발생한다. 없어진 셀 영역으로 인해 셀이 역방향 바이어스로 구동되고 전체 전류가 국부적 인 경로를 따라 흐를 수 있다. 이로 인해 핫스팟과 탄 자국이 발생할 수 있다(6.2.4 장).



그림 6.2.2: 비활성 셀 영역의 비중에 따른 하나의 단일 태양전지를 가진 230 Wp 용량의 단일 모듈의 출력손실 시뮬레이션. 이 결함이 있는 모듈을 포함하는 20개의 모듈로 구성된 어레이의 시뮬레이션 된 출력손실도 함께 나타내었다. 20개 모듈의 어레이에서 비활성 셀 영역이 8 % 이상이 되면 독립 모듈에 비해 훨씬 더 높은 출력손실이 발생한다. 이런 시뮬레이션들은 실리콘 모듈에 대해 가정한 역방향 바이어스 특성에 따라 달라진다.

모듈에서 셀 균열의 개수가 많을수록 모듈의 수명기간 동안 더 길고 더 넓은 균열이 발생할 가능성이 높아진다. IEC 61215에 정의된 시험절차 10.11과 10.13의 조합인 습도 동결 가속 노화시험은 균열의 개수와 출력손실 사이의 상관관계를 보여준다(그림 6.2.3). 모듈 당 균열이 있는 셀 수가 많을수록 가속 노화시험 후 더 높은 출력손실이 나타난다[Koentges10]. 출력손실이 태양전지에서 셀 균열의 방향에 의존하기 때문에 셀 균열 수와 출력손실 사이의 상관관계는 상당히 어수선하다. 그러나 더 큰 통계의 경우 평균 출력손실 위험은 그림 6.2.3으로부터 가정할 수 있는 셀 균열을 가진 셀 개수와 직선관계를 나타내어야한다.



Number of cracked cells per module

그림 6.2.3: 기계적 부하와 200회 습도 동결 사이클링 시험 후 출력손실은 기계적 부하시험에서 균열된 셀의 개수와 관련이 있다. 각 포인트는 하나의 단일 모듈을 나타낸다. 약 3 %의 바이어스 출력손실은 유리부식으로 인해 발생한다.

현재 가동 중인 모듈에서 균열 발생과 균열된 셀 부분의 분리속도는 아직 알려지지 않았다. 균열된 셀이 많은 모듈이 보이지만 현장에서 2년이 지난 후에도 의미 있는 출력손실이 탐지되지는 않았다. 그러나 셀 균열이 모듈의 출력에 극적인 영향을 미칠 수 있음을 보여주는 문헌이 있다. 용량 165 Wp의 모듈 159개가 설치된 태양광 공원에서 모듈의 거의 50 %는 6년의 동작 후에 약 ~10 % 내외의 출력손실을 보여준다[Buerhop11]. 심지어 모듈의 3.8 %는 바이패스 다이오드가 균열된 서브모듈을 우회하도록 하는 셀 균열을 보여준다.

#### 참고문헌

[Buerhop11] C. Buerhop, D. Schlegel, C. Vodermayer, M. Nieß: Quality control of PV-modules in the field using infrared-thermography, 26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011), pp. 3894-3897

[Gabor06] A. M. Gabor, M. M. Ralli, L. Alegria, C. Brodonaro, J. Woods, L. Felton, Soldering induced damage to thin Si solar cells and detection of cracked cells in modules, Proc. 21st EUPVSEC (WIP, Dresden, Germany, 2006), p. 2042-2047

[Kajari11] S. Kajari-Schröder, I. Kunze, U. Eitner, M. Köntges, Spatial and orientational distribution of cracks in crystalline photovoltaic modules generated by mechanical load tests, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95**(11):6 (2011), doi: 10.1016/j.solmat.2011.06.032

[Koentges08] Köntges M., Bothe K., Elektrolumineszenzmessung an PV-Modulen, ep Photovoltaik aktuell, 7/8, 36-40, 2008

[Koentges10] Köntges M., Kunze I., Kajari-Schröder S., Breitenmoser X., Bjørneklett B., Quantifying the Risk of Power Loss in PV Modules Due to Micro Cracks, 25th EuUPVSEC (WIP, Valencia, Spain, 2010) and Köntges M., Kunze I., Kajari-Schröder S., Breitenmoser X. and Bjørneklett B., The risk of power loss in crystalline silicon based photovoltaic modules due to micro cracks, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95**(4) (2011) p. 1131-1137

[Koentges11] M. Köntges, S. Kajari-Schröder, I. Kunze, U. Jahn, Crack statistic of crystalline silicon photovoltaic modules, Proc. 20th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011), p. 3290-3294

[Koentges12] M. Köntges, S. Kajari-Schröder, I. Kunze, Crack Statistic for Wafer-Based Silicon Solar Cell Modules in the Field Measured by UV Fluorescence, *IEEE Journal of Photovoltaics* **3**(1) (2012) pp. 95-101, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2208941

[Olschok12] C. Olschok, M. Pfeifer, M. Zech, M. Schmid, M. Zehner, G. Becker, Untersuchung von Handhabungsfehlern bei der Montage und Installation von PV Modulen, 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI, Bad Staffelstein, GER, 2012), p. 202

[Pingel09] S. Pingel, Y. Zemen, O. Frank, T. Geipel and J. Berghold, Mechanical stability of solar cells within solar panels, Proc. 24th EUPVSEC (WIP, Dresden, Germany, 2009), p. 3459-3464

[Reil10] F. Reil, J. Althaus, W. Vaaßen, W. Herrmann, K. Strohkendl, The Effect of Transportation Impacts and Dynamic Load Tests on the Mechanical and Electrical Behaviour of Crystalline PV Modules. Proc. 25th EUPVSEC (WIP, Valencia, Spain, 2010), p. 3989 – 3992

[Sander11] M. Sander, S. Dietrich, M. Pander, and M. Ebert, S. Schweizer, J. Bagdahn, Investigations on crack development and crack growth in embedded solar cells, Proc. Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems IV, 81120I (SPIE, San Diego, California, USA, 2011); doi:10.1117/12.893662

[Wendt09] J.Wendt, M. Träger, M. Mette, A. Pfennig, B. Jäckel, The Link Between Mechanical Stress Induced by Soldering and Mircos Damages in Silicon Solar Cells, Proc. of 24th EU-PVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2009), p. 3420-3424

# 6.2.3 달팽이자국

그림 6.2.4는 현장에서 발견된 "달팽이자국(snail tracks)"의 일반적인 이미지를 보여준다. 달팽이자국은 육안으로 확인할 수 있다. 달팽이자국은 스크린 인쇄된 태양전지의 전면 금속전극의 실버 페이스트가 회색/검정색으로 변한 것인데, 이 영향으로 모듈 전면유리 위로 달팽이가 지나간 것 같은 자국이 나타나게 된다. 변색은 태양전지의 가장자리와 보통은 잘 보이지 않는 셀 균열을 따라 발생한다. 변색은 일반적으로 모듈설치 후 3개월에서 1년 후에 발생한다. 초기 변색속도는 계절과 환경조건에 따라 달라지는데, 여름과 더운 기후에서는 더 빨라지는 것 같다.





그림 6.2.4: (좌): 달팽이자국 모듈 사진. (우): 동일 모듈의 EL 이미지. 달팽이자국은 셀의 가장자리와 셀 균열을 따라 일어난다[Koentges08].

실버 페이스트의 변색 원인은 명확하지 않다. 그러나 달팽이자국 영역에서 셀 전면 실버 핑거 전극을 따라 변색이 일어나면 실버 핑거 위의 EVA에서 나노 미터 크기의 실버 입자들이 나타난다. 이 실버 입자가 변색을 유발한다. 모듈에 따라 실버 입자들은 황, 인 또는 탄소의 화합물들로 나타난다[Richter12, YI-Hung12, Richter13]. 따라서 달팽이자국에는 다른 원인이 있을 수 있다. 게다가 변색된 실버 핑거는 일반 실버 핑거보다 높은 다공성을 보인다[Richter13]. 이것이 특히 셀의 균열선을 따라 실버 핑거 전극의 전도도를 감소시킬 수 있다. 통상의 IEC 61215 시험으로는 달팽이자국을 신뢰성 있게 확인하기 어렵다[Philipp13]. 달팽이자국을 만들려면 모듈에 셀 균열이 있어야하므로 달팽이자국 시험에는 기계적 시험이 포함되어야한다. 또한 자외선 복사와 온도의 조합이 중요한 역할을 하는 것으로 보인다 [Berghold12]. Berghold는 그림 6.2.5a와 같이 달팽이자국[Berghold12]을 시험하기 위해 기계적 부하, 자외선과 습도 동결이 결합된 시험을 제안하였다.



그림 6.2.5a: 모듈에서 달팽이자국을 유발하는 시험 절차 제안[Berghold12 수정]

소재 측면에서 EVA와 백시트의 선택은 달팽이자국 발생에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. 달팽이자국은 셀 제조에 사용된 실버 페이스트의 종류와는 무관하다. 달팽이자국은 매우 다양한 모듈과 제조업체에서 발견되었다. 달팽이자국의 영향을 받은 모듈은 그림 6.2.5b에서처럼 누설 전류가 높은 경향을 보인다.

달팽이자국 변색의 증가속도는 매우 느리거나 처음 발생한 직후 포화상태에 이른다. 변색 자체가 모듈의 측정 가능한 출력손실로 이어지는 경우는 없다. 그러나 달팽이자국은 셀 균열을 가시화시켜 모듈 출력을 감소시킬 수 있다(6.2.2 장 참조). 달팽이자국 영향을 받은 모듈에서 관찰된 다공성의 실버 핑거전극으로 인해 균열된 셀 부분의 분리가 달팽이자국이 없는 경우보다 더 가속화 될 수 있다.



그림 6.2.5b: 달팽이자국의 영향을 받은 모듈의 습윤 누설시험에서 측정된 누설전류의 히스토그램. 백분율 값은 시험을 한 모든 모듈의 개수에 관한 것이다[Berghold12].

#### 참고문헌

[Berghold12] J. Berghold, M. Roericht, Anja Böttcher, S. Wendlandt, M. Hanusch, S. Koch, P. Grunow, B. Stegemann, Electrochemical corrosion within solar panels, 27th EUPVSEC (WIP, Frankfurt, Germany, 2012), p. 3511

[Koentges08] Köntges M., Bothe K., Elektrolumineszenzmessung an PV-Modulen, *ep Photovoltaik aktuell* **7**/**8**, 2008, pp. 36-40

[Philipp13] D. Philipp, C. Peike, T. Kaltenbach, S. Hoffmann, I. Dürr, "Schneckenspuren" - Schadenanalyse und Möglichkeiten der Früherkennung, 28th Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI, Staffelstein, Germany, 2013), p. 071

[Richter12] S. Richter, M. Werner, S. Swatek, C. Hagendorf, Understanding the Snail Trail Effect in Silicon Solar Modules on Structural Scale, 27th EUPVSEC (WIP, Frankfurt, Germany, 2012), pp. 3439 - 3441

[Richter13] S. Richter, M. Gläser, M. Werner, M. Sander, S. Meyer, S. Dietrich, M. Ebert, C. Hagendorf, Schneckenspuren: Ursachenanalyse und Testverfahren, Proc. of 28th Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI, Staffelstein, Germany, 2013), p. 082

[YI-Hung12] Yi-Hung (Ivan) Chou, Wen-Yao Chou, Shr-Ming Shiu, Yu-Chen Chien, Shih-Yu Huang, Sunny Chi, Ethan Wang, Robert Struwe, Chemical Analysis and Proposed Generating Mechanism For Snail Tracks Contamination of EVA Encapsulated Modules, 27th EUPVSEC (WIP, Frankfurt, Germany, 2012), pp. 3132 - 3136

#### 6.2.4 탄 자국

실리콘 모듈에서 때때로 관찰되는 가장 흔한 불량 중 하나는, 납땜 본드 불량, 리본 파손 (6.2.6 장), 역방향 전류 흐름이나(6.2.2 장) 기타 열점으로[Degraaff11] 인한 국부적 가열로 매우 뜨거워지는 모듈의 부품과 관련된 탄 자국(burn marks)이다.

납땜 본드와 리본 불량은 열 피로(thermal fatigue)로 인해 발생할 수 있다. 연결부위에 불량이 나기 시작하고 이 부위를 통해 전류가 계속 흐르기 때문에 저항이 증가하고 그에 따른 가열로 인해 불량 발생이 더 빨라질 수 있다. 온도가 증가함에 따라 저항은, 온도가 전면과/혹은 후면 봉지재를 모두 변색시킬 수 있을 만큼 뜨거워 질 때까지 증가할 수 있다. 표 5.1.3은 그 사례를 보여준다. 이러한 불량은 리본 또는 기타 금속 전도체 내부를 포함하여 어떤 금속-반도체 또는 금속-금속 상호연결 부위에서 발생할 수 있다.

두 번째 유형의 탄 자국은 셀 혹은 셀의 일부에 강제로 역방향 바이어스가 걸려 발생한다. 때때로 이는 모듈의 일부에 음영이 생겨 발생하기도 하는데, 균열된 셀(6.2.2 장)을 포함한 모듈 내의 불균일성 또는 션트를 유발하는 결함으로 인해서도 발생할 수 있다. 경우에 따라 역방향 전류 흐름이 전류 흐름을 더욱 국지화시킴으로써 가열이 일어나 열 폭주 효과와 관련되는 탄 자국으로 이어진다.

탄 자국은 종종 출력손실과 관련이 있지만, 여분의 전기적 연결이 존재하는 경우 납땜 본드의 불량으로 인해 출력 생산에 미치게 되는 영향은 무시할 있다. 만약 하나의 셀에 연결된 모든 납땜 본드가 끊어지면 해당 스트링의 전류 흐름은 완전히 차단되고 바이패스 다이오드를 통해 전류가 우회할 수 없다. 그리고 시스템이 고전압에서 작동하면 전기 아크가 발생할 수 있는데, 이러한 아크는 화재를 일으킬 수 있다.

전기 아크는 전기적으로 전도성(플라즈마 상태)을 나타낼 정도로 매질(medium)을 해리하고 이온화할 수 있을 만큼 충분히 높은 온도의 입자를 가진 소위 열 플라즈마 방전이다. 태양광시스템에서 의 직류 결함 아크의 경우, 아크는 전도체와 절연재료 구성성분으로부터 증발된 물질에 의해 조정된 공기 플라즈마에서 연소한다. 플라즈마 상태에서 자유 연소 아크를 유지하기 위한 최소 아크 온도는 6,000 K 이상이고, 안정적인 연소 직류 아크를 허용하는 최소전압(전극 재료와 전류에 따라 다름)이 존재한다(그림 6.2.6 참조). 전기적 접촉, 관련 소재 그리고 아크 플라즈마 문제에 대한 간략한 소개는 [Rieder00, Rieder01]을 참조하세요.

그림 6.2.6에 묘사된 태양광시스템 특성을 사용하여, 최대 길이가 200 mm인 직렬 아크를 동작시킬 수 있는데, 소멸 출력이 6 kW에 이른다. 단일 60셀, 용량 240 Wp 표준 모듈의 출력으로 약 2~5 mm의 최대 아크 길이에 도달할 수 있다. 태양광시스템(안정화된 전류 소스)의 I-V 특성은 안정적인 아크 조건을 생성하는데 완벽하게 들어맞는다. 아크와 태양광 특성이 2지점에서 교차하면, 전류가 더 높은 점이 안정된 동작점이다. 그 높은 온도 때문에 아크는 인접한 소재를 증발시켜 유체 역학적인 힘을 발생시킨다. 게다가 전자기 로렌츠 힘이 아크 플라즈마에 작용한다. 따라서 아크 길이와 그 전압이 완벽하게 일정하지는 않은데, 이것이 아크 결함 탐지에 사용될 수 있는 고주파 노이즈 패턴을 발생시킨다[Bieniek11].



그림 6.2.6: 일반적인 태양광시스템 특성(파란색 곡선)과 비교한 아크 길이(주황색, [Rieder55]에서)에 따른 구리 전극의 공기 중 자유 연소 직류 아크의 I-V 특성.

탄 자국은 통상 육안으로 확인할 수 있다. 탄 자국의 존재로 인해 모듈 교체가 필요한지 여부에 대한 질의가 있는 경우, 빛 조사 하에서와/혹은 부분적으로 음영 처리한 상태에서의 적외선 이미지는 해당 영역이 계속 뜨거워지고 있는지 여부와/혹은 전류 흐름이 해당하는 회로 부분에서 멈추었는지 여부를 신속하게 확인한다.

#### 참고문헌

[Bieniek11] S. Bieniek, H. Behrends, G. Bettenwort, T. Bülo, A. Häring, M. Hopf, M. Kratochvil, C. Merz, T. Wegener: Fire prevention in PV plants using inverter integrated AFCI. 4DO.4.6. 26th EU-PVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011), p. 3199-3203

[Degraff11] D. DeGraaff, R. Lacerda, Z. Campeau, Degradation Mechanisms in Si Module Technologies Observed in the Field; Their Analysis and Statistics, Presentation at PV Module Reliability Workshop 2011 (NREL, Denver, Golden, USA, 2011), <u>http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvmrw2011\_01\_plen\_degraaff.pdf</u>

[Rieder55] W. Rieder: Stability of shunted dc arcs. (German: Die Stabilität geshunteter Gleichstromlichtbögen) Elin-Z 7(1955) ISSN: 0302-2560, Vienna, p.145-149

[Rieder00] W. Rieder, Elektrische Kontakte: Eine Einführung in ihre Physik und Technik. ISBN-13: 9783800725427. Vde Verlag GmbH, 2000 - 56 pages.

[Rieder01] W. Rieder, Electrical Contacts. An Introduction to their Physics and Applications. ISBN-13: 9780780396395. IEEE 2001 - 90 pages

#### 6.2.5 PID

지난 몇년 동안 실리콘 웨이퍼 기반 태양광시스템의 성능이 저조한 것의 원인이 모듈의 "새로운" 불량모드 때문인 것으로 발견되었다. 고효율 n-형 태양전지는 셀에서부터 접지까지가 양극성(positive polarity)인 이유로 퍼텐셜 유도 열화(PID)가 일어났다[Swanson05]. 이 효과를 분극(polarization)이라고 한다. 최근에는 p-형 셀로 만든 여러 다른 유형들의 모듈이 음극성(negative polarity) 스트링에서 열화가 일어났다[Pingel10]. 일반적으로 모듈의 일부만이 출력손실을 보이며 접지와 관련하여 전압 극성이 뚜렷한 스트링에서만 발생한다. 출력손실은 전압이 높을수록 더 두드러지는데, 이런 불량 모드를 "PID"라고 불렀다. 결정질실리콘 모듈에서 PID는 각각 음 전위와 양 전위에서 p-형과 n-형 셀에 대해 어느 정도 가역적인 분극 효과이다. PID 효과는 셀의 션트를 일으켜 I-V 곡선의 충진율을 감소시킨다(그림 6.2.7 참조).



그림 6.2.7: 다결정 셀로 만든 모듈의 I-V 곡선. a): 60°C/85% 상대습도의 환경 챔버에 보관된 2x3-셀-모듈을 STC에서 측정한 I-V곡선 ; t<sub>0</sub>...t<sub>1</sub> : 셀과 프레임 사이 -1000 V에서 96시간, t<sub>1</sub>...t<sub>2</sub>: -1500 V에서 96시간. 시간이 지남에 따라 PID 효과가 증가하면서 출력이 감소한다. b): 조사강도를 달리하여 측정된 ±400 V 시스템 전압에서 6x9-셀-모듈의 현장에서(Ia)와 초기(Io) I-V 곡선 [Berger13].

모듈의 일부 셀이 원래 단락전류 값으로 유지되면 모듈의 단락전류는 거의 변하지 않는다. 초기 단계에서 PID는, 조사강도가 높을수록 출력의 열화가 줄어들고, 반면에 낮은 조사강도 하에서는 더 두드러지는데[Mathiak12], 발전소의 모니터링 데이터 내에서 쉽게 탐지하기는 어렵다. 게다가 대규모 PID조차도 시각적으로는 효과가 확인되지 않는 경우가 많기 때문에 보고되지 않은 수많은 사례가 존재할 수 있다[Bagdahn12, Berghold10]. 그림 6.2.8은 프레임이 있는 결정질실리콘 모듈의 전기회로와 단면도의 개략도이다.



그림 6.2.8: (좌): 변압기 없는 인버터로 그리드에 연결된 태양광어레이의 회로도. (중): 모듈의 단면. (우): 프레임((접지) 옆 단면의 상세도. (좌), (중): [PID-TI-UEN113410], (우): [Hacke12a]

모듈의 전기화학적 열화는 1978년에 처음으로 언급되었다[Hoffman78]. 이 효과는 전면 유리에서 봉지재를 통해 셀 표면의 반사방지 코팅(SiNx)으로 이온이 이동하는 것으로 설명되었는데[Mon89], 셀에서부터 접지회로로의 누설전류에 의해 발생된다. 이 누설전류는 일반적으로 µA 정도인데, 그 값은 모듈 온도와 인가전압뿐 아니라 소재 특성, 표면 조건과 습도에 따라 크게 달라진다(그림 6.2.9 a) [Hacke11].



그림 6.2.9 : a) : 낮 시간 중 조사강도, 습도, 누설 전류와 온도 [Hacke11]. b) : SiNx/Si 경계의 AES 이미징 [Hacke11].

PID 효과를 설명하는 미시적 모델을 정교하게 만들기 위해 여러 차례 실험이 수행되었다.

오제전자분광법(Auger Electron Spectroscopy : AES)[Hacke11]을 사용한 셀-봉지재 경계에 대한 심층조사(그림 6.2.10b)에서는 반사방지 코팅-Si 계면에서 나트륨이 풍부한 영역이 탐지되었다.



그림 6.2.10: TOF SIMS를 사용하여 얻은 depth profiles, a) : PID 있음, c) PID 없음 c) : SiNx/Si 경계의 AES 이미징. b) : 원래의 밴드갭 구조와 PID에 의해 변경된 에너지 레벨(점선) [Naumann12].

또한 그림 6.2.10 a)와 c)의 2차 이온질량분광법(secondary ion mass spectroscopy : SIMS)[Naumann12] 결과는 실리콘 질화물 반사방지 코팅의 소위 K-centers에 포획된 나트륨 이온의 증거를 제공한다. 이 포지티브 공간전하는 반도체의 밴드갭 구조를 바꾸는 전자와 함께 이중층을 형성하는데, 그림 6.2.10 b)의 에너지밴드 모델이 보여주는 바와 같이 셀의 p-n 접합에서 션트 경로를 야기한다.

추가로 불순물 모델이 제시되었는데, 이 모델에서는 양이온들이 셀 쪽으로 이끌려가고 불순물 자체는 접합에서 재결합을 일으키고 그리고 질화실리콘에 대비 높은 전기적 퍼텐셜 때문에 전하가 격자 손상의 발생을 가속시킨다[Hacke12].

그림 6.2.7에서와 같이 STC와 낮은 조사강도 조건에서의 I-V 곡선 측정결과는 PID의 명확한 증거를 제공한다(5.2 장 참조). 5.3장에 있는 표 5.3.1의 서모그래피는, 어레이가 광조사 하에서 최대출력 점에서 동작할 때 현장에서 사용하기 적절한 방법이다(그림 6.2.11).



그림 6.2.11: 빛 조사 하에서 서모그래피로 측정한 동작 모듈 어레이. 네거티브 모듈 전압은 오른쪽에서 왼쪽으로 감소하고, 션트된 영역에서 모듈을 가열하는 출력손실도 오른쪽에서 왼쪽으로 증가하고 있다[Weinreich13].

그림 6.2.12는 10 %와 100 %  $I_{sc}$ 에서 얻은 전계발광 이미지와 100 %  $I_{sc}$ 에서 얻은 서모그래피 이미지인데, 그림 6.2.7 b)의 것과 동일 모듈로 만든 것이다. 그림 6.2.11의 옥외 서모그래피 촬영 어레이와 달리, 이 모듈은 가로방향으로 랙(rack)에 장착된 것이다. 중간과 상단 부분에 있는 검은색 EL 이미지가 있는 셀들은 션트를 통해 가열이 되나, 가장 아래 열의 셀들은 매우 낮은 저항으로 션트되어 있어 서모그래피 이미지에서 어두운 부분으로 되어 있다.

지금까지 PID와 직접 관련된 안전문제는 보고되지 않았지만 "중간(medium)" 정도로 열화된 셀들은 더 높은 온도(핫스팟)를 갖는 반면, 심각하게 열화된 셀들의 낮은 저항성 션트는 온도가 더 낮다(그림 6.2.12 참조). 열점과 부식은 셀과 봉지재 사이에 박리를 일으킬 수 있고, 모듈의 내부 회로를 주변에 노출시킬 수 있다(6.1.1 장 참조).



그림 6.2.12: 그림 6.2.7 (b)에 표시된 I-V 곡선이 있는 현장 설치 6x9-셀-모듈의 EL 이미지. (좌) 10 % I<sub>sc</sub>, (중) 100 % I<sub>sc</sub>, (우) 100 % I<sub>sc</sub>에서 어두운 색(dark) 서모그래피[Berger13].

PID로 인한 출력손실의 크기는 모듈설계 파라미터들뿐만아니라 주변 조건과 시스템 구성에 따라 달라진다. 주어진 모듈 설계에서, 누설전류 값(그리고 그 시간 적분)은 일부 상황 하에서는 PID 효과의 지표가 될 수 있다. 그림 6.2.13은 인가된 전압(온도와 습도 파라미터들을 가짐), 일정한 전압에서의 상대습도와 상호 절대온도(모듈의 외부 표면접촉을 위한 세 가지 다른 변이 포함)에 대해 셀과 모듈 프레임 사이의 누설전류에 대한 측정값을 보여준다[Hoffmann12].

이들 가변적인 가속인자들은 그림 6.2.9 a)에 묘사된 것처럼 옥외 누설전류의 복잡한 변화를 초래한다. 게다가 유리표면 전도도는 강우와 바다 근처의 소금 안개 등의 오염 물질을 통해 낮아진다. 현장에서의 출력저하는 몇 개월 내에 진전될 수 있고 그리고 거의 100 %에 이를 수 있다. 그림 6.2.14는 그 사례를 보여주는데, 그림 6.2.7을 참조하세요. 충진율 열화는 2차 다이오드 사전지수와 이상계수의 증가 그리고 two-diode 모델에서 감소하는 션트 저항으로 모델링 할 수 있다[Hacke11a].



그림 6.2.13: 셀과 모듈 프레임 사이의 누설전류(LC)에 대한 측정 값. (좌): 온도와 습도 파라미터와 함께 LC의 전압 의존성. (중): 측정된 습도(사각형)의 함수로서의 LC의 시그 모이드 함수(파란색 곡선)에 의한 근사치. 환경 챔버에서 습도의 효과는 시간 의존적인데, 이는 모듈에서의 응축 때문이다[Mathiak12], (우): 모듈의 외부표면을 접촉하는데 있어 3개의 변이를 가진 LC의 Arrhenius 플롯 ; 건조한 공기 중에서 프레임만 있는 ; 전면 유리와 추가 알루미늄 포일로 덮은 추가 프레임 ; 프레임만 접촉된, 85 % 상대습도[Hoffmann12].



그림 6.2.14: 스트링에서 모듈의 위치에 따라 STC 하에서 개별 모듈의 측정 출력. 네거티브 퍼텐셜에서의 출력손실은 극성이 바뀌고 원래의 Pmax 값으로 회복될 때까지 계속 증가하고 있다[Herrmann12].

높은 온도에서 역방향 바이어스 전압, 유리와 프레임에 낮은 비저항의 접촉을 적용함으로써 몇시간 내에 빠른 복구가 가능하다. 더 높은 온도(85℃)에서 발생하는 PID는 훨씬 덜 가역적이다[Pingel12]. 전압과 온도만으로도 일부 회복은 가능하지만 훨씬 더 긴 시간상수가 필요하다. 야간에는 역방향 전압을 인가하여 회복시킬 수 있다. 그러나 적절한 가속인자들 없이는 여기에 몇 달 혹은 몇 년이 필요할 수 있는데[Mathiak13], 그림 6.2.13을 참조하세요. 그림 6.2.13에 묘사된 것과 같이 측정에 기반한 옥외 모듈 출력열화 예측용 기후모델과 회복 프로세스를 포함한 지역별 특정기후 프로필들을 [Raykov12]가 제시하였다. 회복과정에 관한 추가문헌은 [Pingel12], [Koch12], [Nagel12], [Taubitz12] 그리고 [PID-TI-UEN113410]에서 찾을 수 있다.

경향성이 다분한 하나의 모듈이 어떻게 PID의 영향을 받는지에 대해서는 모듈설계가 근본적인 영향을 미친다. 표 6.2.1은 환경과 시스템 영향에서부터 셀 디자인 측면까지 다양한 수준에서의 조건들과 대처방안을 정리한 목록으로 이런 주제에 대한 추가정보에 대한 참조자료도 정리되어있다.

설계 수준	영향 인자/ 가속 인자	참고 자료
환경 조건(미시, 거시기후)		
<ul> <li>온도</li> <li>습도, 비, 그리고 응축</li> <li>일조량 (- 분포)</li> <li>에어로졸</li> </ul>	<ul> <li>표면 전도도, 누설전류, 이온 이동도, 화학반응도</li> <li>표면과 봉지재 벌크 전도도, 누설전류</li> <li>낮은 조사강도에서의 에너지 수율의 분율</li> <li>표면 전도도, 누설전류</li> </ul>	[Raykov12] [Hoffmann12] [Berghold12] [Hoffmann12] [Hacke11] [Berger13] [Mathiak12]
시스템 관련 인자들		
<ul> <li>동작과 개방회로 시스템 전압</li> <li>인버터 토폴로지와 어레이 퍼텐셜</li> <li>저녁시간 동안 역방향 어레이 극성</li> <li>접지 컨셉</li> </ul>	<ul> <li> 누설전류</li> <li> 어레이 극성 수준(DC + AC 비중), 전류, 그리고 극성</li> <li> 복구</li> <li> 전류 경로의 전도도, 누설전류</li> </ul>	[AE13] [Berghold12] [Herrmann12] [PID-TI-UEN113410]
모듈 관련		
• 장착 방향 (각도, 가로	• 습윤, 더 높은 표면 전도도를 가진	

표 6.2.1: PID에 영향을 미치는 인자들

혹은 세로) • 프레임과 구조체 위의	하단 가장자리 인근 셀들의 개수, 오염, 온도 그리고 누설전류 • 전기 경로의 전도도, 누설전류	[Herrmann12] [Berghold12] [Richardson11]
장착	<ul> <li>별크 비저항, 이온 이동도, 누설전류</li> <li>수증기 전달 속도(WVTR), 봉지재의 수분 함량, 별크 비저항, 화학반응도, 누설전류</li> <li>전기전도도, Na 이온 농도, 이온 이동도, 누설전류</li> <li>표면 전도도, 오염, 누설전류</li> </ul>	[Raykov12] [Herrmann12]
≥ (제고) 관련 • 반사방지 코팅(ARC) 두께와 균일도, Si/N 비율	<ul> <li>No ARC - no PID, ARC 위에 전도성 코팅하면 PID 방지, SiNx의 굴절률이 높으면 PID 감소(그러나 반사 손실 증가)</li> </ul>	[Hacke12] [Nagel12] [Pingel10] [Raykov12]
<ul> <li>표면 구조</li> <li>에미터 깊이</li> <li>도핑 : p- 혹은 n-형 반도체</li> </ul>	<ul> <li>"끌어당기는" K-centers 의 감소</li> <li>에미터 sheet 비저항이 PID에 영향을 미침</li> <li>웨이퍼의 베이스 비저항이 PID에 영향을 미침</li> </ul>	[Naumann12] [Koch12] [Koch12a] [Schutze11] [Richardson11]

# 참고문헌

[AE213] AE Solar Energy: *Understanding Potential Induced Degradation,* White Paper of Advanced Energy, Doc. ENG-PID-270-01, 8 p. Bend, Oregon 2013

[Bagdahn12] J. Bagdahn, S. Dietrich, M. Ebert, J. Fröbel, C. Hagendorf, S. Großer, D. Lausch, V. Naumann, Potential induced degradation of crystalline Silicon photovoltaic modules, Presentation, technical seminar 6 (materials and reliability) at the PV Japan, Oct. 2012

[Berger13] K.A. Berger, B. Kubicek, G. Újvári, G. Eder, Y. Voronko, M. Weiss, G. Oreski, M. Knausz, T. Koch, J. Wassermann, Innovative, non destructive methods for investigations of PV-modules (in German: *"Innovative, nichtzerstörende Methoden zur Untersuchung von Photovoltaikmodulen"*), Proc. 28<sup>th</sup> Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI, Bad Staffelstein, Germany, 2013), Regensburg 2013, ISBN 978-3-943891-09-6

[Berghold10] J. Berghold, O. Frank, H. Hoehne, S. Pingel, B. Richardson, M. Winkler, Potential Induced Degradation of solar cells and panels, Proc. 25th EUPVSEC (WIP, Valencia, Spain, 2010), pp. 3753-3759

[Berghold12] J. Berghold, S. Koch, S. Lehmann, S. Wendlandt, M. Leers, A. Preiß, S. Pingel, P. Grunow, PID and correlation with field experiences (in German: *"PID und Korrelation mit Felderfahrungen."*) 27th Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI, Bad Staffelstein, Germany, 2012), Regensburg 2012

[Hacke11] P. Hacke, K. Terwilliger, R. Smith, S. Glick, J. Pankow, M. Kempe, S.K.I. Bennett, M. Kloos, System voltage potential-induced degradation mechanisms in PV modules and methods for test, Proc. 37th PVSC (Seattle, Washington, USA 2011), pp. 814-820, 19-24

[Hacke11a] P. Hacke, R. Smith, K. Terwilliger, S. Glick, D. Jordan, S. Johnston, M. Kempe, S. Kurtz, Testing and Analysis for Lifetime Prediction of Crystalline Silicon PV Modules Undergoing Degradation by System Voltage Stress, Proc. 38th PVSC (IEEE, Austin, Texas, USA, 2011), pp. 814–820

[Hacke12] P. Hacke, S. Glick, S. Johnston, R. Reedy, J. Pankow, K. Terwilliger, S. Kurtz, Influence of impurities in module packaging on potential-induced degradation, Presentation at the 22<sup>nd</sup> Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes. Vail, Colorado, July 22–25, 2012. Technical report NREL/TP-5200-56301, 10 p., Sept. 2012, 32p.

[Hacke12a] P. Hacke, Potential induced Degradation in Crystalline Silicon PV Modules: Evaluation of Durability, Presentation at PV Japan 2012, Dec. 5-7 2012

[Herrmann12] W. Herrmann, G. Mathiak, Potential induced degradation (PID) in crystalline Silicon PV-modules (in German: "Potential-Induzierte Degradation (PID) bei kristallinen Silizium PV-Modulen, Presentation at 9<sup>th</sup> Workshop Photovoltaik-Modultechnik, Nov. 2012, TUV Rheinland, Cologne

[Hoffman78] A.R. Hoffman and R.G. Ross, Environmental Qualification Testing of Terrestrial Solar Cell Modules, 13th IEEE PVSC, Washington DC 1978, pp. 835–842

[Hoffmann12] S. Hoffmann, M. Koehl, Effect of humidity and temperature on the potential-induced degradation, *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 2012, doi: 10.1002/pip.2238

[Koch12] S. Koch, D. Nieschalk, J. Berghold, S. Wendlandt, S. Krauter, P. Grunow, Potential induced degradation effects on crystalline silicon cells with various antireflective coatings, Proc. 27<sup>th</sup> EUPVSEC, (WIP, Frankfurt, Germany, 2012), pp. 1985-1990

[Koch12a] S. Koch, J. Berghold, O. Okoroafor, S. Krauter, P. Grunow, Encapsulation influence on the potential induced degradation of crystalline silicon cells with selective emitter structures, Proc. 27th EUPVSEC (WIP, Frankfurt, Germany, 2012), pp. 1991-1995

[Mathiak12] G. Mathiak, M. Schweiger, W. Herrmann, E. Eikelboom, M. Sedlacek, M. Hejjo Al Rifai, Potential-induced degradation - comparison of different test methods and low irradiance performance measurements, Proc. 27th EUPVSEC (WIP, Frankfurt, Germany, 2012), pp. 3157-3162

[Mathiak13] G. Mathiak, Potential induced Degradation (PID) for crystalline PV Modules - Analysis and Counter measures (in German: "Potentialinduzierte Degradation (PID) bei kristallinen PV-Modulen - Analyse und Gegenmaßnahmen"), Proc. 28th Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI, Bad Staffelstein, Germany, 2013), Regensburg 2013, ISBN 978-3-943891-09-6, pp. 272-273

[Mon89] G.R. Mon, L.C. Wen, R.S. Sugimura, R.G. Ross, Jr., Reliability studies of photovoltaic module insulation systems, 1989 IEEE - CH2788-8/89/0000-0324 pp. 324-329

[Nagel11] H. Nagel, Possible cause for PID of crystalline silicon cells, Sophia Workshop PV Module Reliability, Lugano, Switzerland, 2012

[Nagel12] H. Nagel, R. Pfeiffer, A. Raykov, W. Wangemann, Lifetime warranty of crystalline silicon modules for potential-induced degradation, Proc. 27th EUPVSEC (WIP, Frankfurt, Germany, 2012), pp. 3163-3166

[Naumann12] V. Naumann, C. Hagendorf, S. Grosser, M. Werner, J. Bagdahn, Micro Structural Root Cause Analysis of Potential Induced Degradation in c-Si Solar Cells, SiliconPV: April 2012, Leuven, Belgium, *Energy Procedia* **27** (2012), pp. 1-6

[PID-TI-UEN113410] SMA: Technical Information on PID, Doc. PID-TI-UEN113410, Version 1.0. SMA Solar Technology AG, Niestetal, Germany. Undated, 4 pages. <u>http://files.sma.de/dl/7418/PID-TI-UEN113410.pdf</u> (15.5.2013)

[Pingel10] S. Pingel, O. Frank, M. Winkler, S. Daryan, Potential Induced Degradation of solar cells and panels, Proc. 35th PVSC (IEEE, Hawai, US, 2010), pp. 002817 - 002822

[Pingel12] S. Pingel, S. Janke, O. Frank:, Recovery methods for Modules Affected by Potential Induced Degradation (PID), Proc. 27th EUPVSEC (WIP, Frankfurt, Germany, 2012), pp. 3379-3383

[Raykov12] A. Raykov, H. Nagel, D. Amankwah, W. Bergholz, Climate model for potential induced degradation of crystalline silicon photovoltaic modules, Proc. 27th EUPVSEC (WIP, Frankfurt, Germany, 2012), pp. 3399-3404

[Richardson11] W. Richardson, *Potential Induced Degadation*. NREL PV-Reliability Workshop Febuary 1st, 2011, 37p.

http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvmrw2011 26 csi richardson.pdf

[Schutze11] M. Schütze, M. Junghänel, M.B. Koentopp, S. Cwikla, S. Friedrich, J.W. Müller, and P. Wawer, Laboratory study of potential induced degradation of silicon photovoltaic modules, Proc. 37th PVSC (IEEE, Seatle, Washington, USA, 2011), pp. 821-826

[Swanson05] R. Swanson, M. Cudzinovic, D. DeCeuster, V. Desai , J. Jürgens, N. Kaminar, W. Mulligan, L. Rodrigues-Barbarosa, D. Rose, D. Smith, A. Terao, and K. Wilson, The Surface Polarization Effect in High-Efficiency Silicon Solar Cells, 15th PVSEC (Shanghai, China, 2005), 4p. 2805d1306844541

[Taubitz12] Christian Taubitz, Matthias Schütze, Max B. Koentopp, Towards a kinetic model of potetial-induced shunting, 27th EUPVSEC (WIP, Frankfurt, Germany, 2012), pp. 3172-3176

[Weinreich13] B. Weinreich, Field study module and generator quality based on thermography measurements of 100 MW (in German: *"Feldstudie zur Modul- und Generatorqualität auf Basis thermografischer Messungen über 100 MW"*), Proc. 28th Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI, Bad Staffelstein, Germany, 2013), Regensburg 2013, ISBN 978-3-943891-09-6

# 6.2.6 셀과 스트링 상호연결 리본의 단절

웨이퍼 기반 결정질실리콘 모듈에는 더 높은 전압을 얻기 위해 셀 상호연결 리본으로 여러 장의 태양전지들을 직렬로 연결한다. 이러한 셀 상호연결 리본은 태양전지의 전면으로부터 후면으로 연결되는데, 상호 연결된 일련의 셀들을 스트링이라 한다.

이들 셀 스트링 자체는 일반적으로 스트링 상호연결 리본에 의해 직렬로 혹은 경우에 따라서는 병렬로 상호 연결된다. 상호연결된 모듈에서 때때로 약화된 셀이나 스트링 상호연결 리본 그리고 그 연결이 끊어진 것을 발견한다. 특히 셀과 셀 상호연결 리본 그리고 스트링 상호연결[Munzo8] 사이의 연결부 사이에 발생하는 소위 리본 구부러짐(kink : 킹크)은 피로 파손을 일으키기 쉽다. 이런 불량의 원인은 여러 가지가 있을 수 있다. 모듈 생산 공정에서 셀 상호연결 리본과 스트링 상호연결 사이를 연결하는 납땜 불량이 단절의 가장 중요한 이유이다. 셀 사이의 리본을 제작하는 동안 너무 심한 변형은 셀 상호연결 리본을 기계적으로 약화시킨다. 셀 사이의 좁은 거리는 셀 상호연결 리본 파손을 촉진한다. 모듈 수송, 열사이클과/혹은 장기간의 시스템 동작 중에 부분적인 셀 음영으로 인한 열점 같은 물리적 스트레스가 기계적으로 약한 킹크 부위를 끊어지게 만든다[Kato2].

리본 파손은 EL, IR 이미징, UV 이미징 또는 신호 전송 방법으로 탐지할 수 있다. 5.3, 5.4, 5.5 및 5.6 장을 비교하세요. 그림 6.2.14는 3개의 분리된 셀 상호연결이 있는 모듈의 이미지이다.





그림 6.2.14: 현장에서 발견된 단절된 셀 상호연결의 사례.

(좌): IR 이미지, (우): EL 이미지.

그림 6.2.15는 하나의 상호연결 리본이 국부적으로 단절된 한 모듈의 IR 이미지와 I-V 특성곡선(표준시험 조건에서 측정)을 보여주고 있다. 이 이미지에는 STD에 의해 탐지된 단절위치도 나타나 있다. I-V 특성곡선에서 볼 수 있듯이 많은 상호연결 부위 중에 하나의 연결 단절로 35 %의 출력손실이 발생한다. 그러나 이 불량단계 1에서("failure stage 1") 안전에 관한 위험은 그리 높지 않은데, 왜냐하면 이 열점 셀의 온도가 약 100℃ 이상까지 증가하지는 않기 때문이다. 이 모듈 불량은 안전등급 B(f,m,e)로 분류된다.



그림 6.2.15: 하나의 상호연결 리본이 국부적으로 단절된 모듈의 이미지("failure stage 1"). (좌): IR 이미지, (우): 모듈의 I-V 곡선 (실내 STD) ("failure stage 1"). 공칭과 초기 정격 I-V 곡선 파라미터들이 그래프에 표시되어 있다.

그림 6.2.16 왼쪽과 오른쪽은 다른 모듈의 IR 이미지와 I-V 특성 곡선(역시 표준 시험조건에서 측정)을 보여준다. 이 단계("failure stage 2")에서는 두 개의 상호연결 리본이 전기적으로 단절되고 전류 흐름이 낮 동안 계속해서 바이패스 다이오드를 통과하기 때문에 서브모듈이 발전을 전혀 하지 못했다. 이 모듈의 I-V 특성 곡선은 46 % 출력손실을 나타낸다. 이 불량 2단계에서 안전위험은 이 바이패스 다이오드의 내구성에 크게 좌우된다. 이 모듈 불량은 역시 안전등급 B(f, m, e)로 분류되는데, 왜냐하면 이 불량이 안전문제로까지 연결되기 위해서는 추가적인 불량(다이오드의 결함 발생)이 발생해야하기 때문이다.

그림 6.2.17은 "최종 단계(final stage)"에 있는 모듈의 사진이다. 커버 유리가 완전히 깨졌고 백시트에 많은 탄 자국이 보인다. 이 상황은 낮에 동작했던 바이패스 다이오드가 닳아서 개방된 상태가 된 것으로 추측된다. 결과적으로 생성된 전류는 불량이 난 셀 스트링으로 되돌아가 단절된 위치에서 열을 생성한다. 커버 유리파손은 급격한 온도상승으로 인한 것이다.



그림 6.2.16: 불량단계 2("failure stage 2"). 두 개의 병렬 셀 상호연결 리본이 국부적으로 단절된 모듈. (좌): IR 이미지, (우): I-V 특성 곡선(옥내 STC 측정)



그림 6.2.17: 최종단계(Final stage). (좌): 셀 상호연결 리본이 끊어진 모듈의 유리 파손. (우): 셀 상호연결 리본이 끊어진 모듈 후면의 탄 자국.

그림 6.2.18은 이 최종단계 모듈의 IR 이미지를 보여준다. 단절된 위치에서 관찰된 최고 온도는 500℃ 이상이다. 이 모듈 불량은 안전등급 C(f, m, e)로 분류되는데, 왜냐하면 이것이 화재를 일으키고 사용자가 전기가 통하는 부품에 노출되게 만들고 모듈의 기계적 일체성을 파괴할 수 있기 때문이다. 출력손실은 단계적으로 발생하므로 이 불량 모드는 출력손실 등급 E에 속한다.



그림 6.2.18: "최종단계" 모듈의 IR 이미지(후면에서 관찰)

그림 6.2.19는 태양광시스템에서 발생하는 이런 모듈 불량 개수의 연도별 추이이다. 바이패스 다이오드는 결정질실리콘 모듈에서, 셀 스트링에서의 일부 전기적 피로가 발생할 경우를 대비한 "안전 밸브"로서의 매우 중요한 역할을 한다.



그림 6.2.19: 태양광시스템에서 발생하는 셀 상호연결 리본 불량이 있는 모듈 수의 연간 추이. 이 시스템은 총 1,080 개의 모듈로 구성되어 있으며 2004 년에 설치된 것이다.

# 6.2.7 바이패스 다이오드 결함

바이패스 다이오드는 특정 개수의 태양전지와 병렬로 모듈에 결합되어 있다. 바이패스 다이오드는 모듈의 부분적인 음영으로 인한 출력손실을 줄인다. 출력손실 외에도 다이오드는 태양전지에서 허용되는 역방향 바이어스 전압보다 높은 단일 태양전지의 역방향 바이어스를 방지한다. 설계된 것보다 더 높은 전압으로 셀에 역방향 바이어스가 걸리면 열점[Hermann09]이 발생하여 갈변, 탄 자국 또는 최악의 경우 화재를 일으킬 수 있다. 일반적으로 쇼트키 다이오드가 바이패스 다이오드로 사용된다. 쇼트키 다이오드는 정적 고전압 방전과 기계적 스트레스에 매우 민감하다. 따라서 조심스럽게 다루어야하며 접지 없이는 사람의 접촉을 피해야한다.

따라서 많은 바이패스 다이오드 불량이 발생할 수 있다. 그러나 모듈이 단일 셀의 개별 I-V 특성과 심각한 불일치가있을 때만 관심의 대상이 되기 때문에 찾기가 어려운데, 예를 들어 셀 균열로 인해 셀의 음영 또는 연결이 끊어진 부분으로 인해 발생한다.

우리가 아는 한 결정형실리콘 모듈의 바이패스 다이오드 결함에 대한 비대표적 연구는 단 한 건뿐이다[KATO02]. 이 연구는 4 kWp 용량의 시스템 53개를 운영하는 일본 National Institute of Advanced Industrial Science and Technology의 주차장에 설치된 태양광시스템을 대상으로 수행된 것이다. 180 Wp 공칭출력을 가진 단결정실리콘 모듈의 총 개수는 1,272에 이른다.

그림 6.2.20 왼쪽은 탄 자국이 있는 모듈의 뒷면을 보여준다. 왼쪽과 중앙의 서브모듈에 약간의 탄 자국이 있다. 그림 6.2.20의 오른쪽은 옥외에서 측정한 I-V 곡선이다. 검정, 빨강, 녹색과 파랑 곡선은, 각각 부분 음영이 없는 모듈, 왼쪽 서브모듈에 부분 음영이 있는 모듈, 중앙의 서브모듈에 음영이 있는 모듈 그리고 오른쪽 서브모듈에 부분 음영이 있는 모듈에 해당한다. 파란색 곡선은 검은색 곡선에 비해 전압이 1/3 감소한다. 이는 오른쪽 서브모듈과 결합된 바이패스 다이오드가 잘 동작함을 의미한다. 반면, 적색과 녹색 곡선은 청색 곡선과 모양이 다르기 때문에 적절한 전압강하 없이 낮은 수준의 전류를 측정할 수 있다. 이 결과는 왼쪽과 중앙 서브모듈에 결합된 바이패스 다이오드가 개방 회로에서 동작함을 나타낸다. 아직 확인되지 않았지만 가능한 원인으로는 바이패스 다이오드 결함 또는 바이패스 다이오드와 정션 박스 내부의 금속 접점 사이의 납땜 단절이다.



그림 6.2.20: 탄 자국이 있는 모듈의 후면 (좌), 측정된 I-V 특성 곡선 (우).

이 시스템은 모듈의 47 %에서 바이패스 다이오드의 결함이 있음을 보여준다(그림 6.2.21 참조). 결함이 있는 모듈의 3 %는 서브모듈에도 탄 자국이 있다. 탄 자국이 있는 서브모듈에는 항상 바이패스 다이오드 결함이 있다. 탄 자국은 그림 6.2.22에 표시된 것과 같이 백시트에 있는 셀 가장자리를 따라 발견된다. 이 모든 모듈은 이웃하는 나무, 가로등과 인접한 모듈에 의해 부분적으로 음영이 생긴다. 태양전지 수준의 에지 분리(edge isolation) 오류는 정상적인 상태에서는 문제가 되지 않지만 바이패스 다이오드가 개방회로에 있을 때 전류는 태양전지의 션트를 통해 역방향으로 구동되어 봉지재를 태운다.



그림 6.2.21: 용량 180 Wp 한 가지 유형의 1,272개 모듈에 대한 바이패스 다이오드 검사 결과. 하나 이상의 바이패스 다이오드 결함이 있는 모듈의 개수와 비율을 나타낸다. 모듈은 약 4년 동안 현장에 있었다.



그림 6.2.22: 개방회로 바이패스 다이오드로 인한 탄 자국.

#### 참고문헌

[Hermann09] W. Herrmann, W. Wiesner, W. Vaaßen, Hot Spot Investigations on PV Modules - new Concepts for a Test Standard and Consequences for Module Design with Respect to Bypass Diodes, Proc. 26th PVSC (IEEE, Anaheim, CA, USA, 1997), pp. 1129-1132

[Kato02] K. Kato, "PVRessQ!": A Research Activity on Reliability of PV System from an user's viewpoint in Japan, Proc. Optics + Photonics 8112 (SPIE, San Diego, California, USA, 2011), 811219

# 6.3 박막모듈에서 발견된 불량 검토

박막모듈의 경우 결정질실리콘 모듈보다 지난 몇 년 동안 축적된 경험이 훨씬 적다. 그리고 박막 모듈 유형은 결정질실리콘 모듈보다 그 범위가 훨씬 넓다. 따라서 많은 모듈 불량은 특정 제조업체 특유의 것일 수 있다. 여기서는 광범위한 모듈유형에서 찾을 수 있는 불량에 중점을 둔다.

# 6.3.1 접착된 커넥터에서의 마이크로 아크

박막모듈의 경우 스트링 상호연결부를 셀과 연결하는데 다양한 기술이 사용된다. 가장 일반적인 기술은 초음파 납땜, 납땜과 전도성 접착제이다. 전도성 접착제의 경우, 연결부 영역부위에 가해지는 압력이 전기전도도의 중요한 인자이다. 압력이 충분하지 않은 경우 연결부가 전도성을 잃어버려 모듈의 출력이 최대 100 % 손실된다. 여기 설명된 불량은 주로 I-V 곡선의 충진율에 영향을 준다(5.2.4 장 참조). 접촉 손실로 인해 연결부에 마이크로 아크가 나타나는데, 그림 6.3.1을 비교하세요. 이 불량이 발생하는지 확인하기 위해 스트링 상호연결부와 셀 또는 스트링 상호연결부들 사이의 의심되는 연결지점에서 모듈을 누르거나 클램프로 고정시킬 수 있다. 모듈의 충진율은 연결지점에 대한 압력을 높여 증가시켜야한다. 평가된 사례에서는 설치 후 첫해에 불량이 발생한다. 알려진 안전문제 또는 후속 불량은 없다. 따라서 이 불량은 안전등급 A이다.



그림 6.3.1: 스트링 상호연결부 전도성 접착제의 접촉이 불충분한 경우 발생하는

마이크로 아크.

#### 6.3.2 션트 열점

박막모듈의 전기적 성능은 증착공정의 품질에 크게 좌우된다. 예를 들어, 그림 6.3.2는 비정질실리콘 모듈의 전계발광 이미지를 보여주는데, 션트는 어둡고 밝은 영역으로 명확하게 보인다. 두 가지 유형의 션트를 구별해야한다.

- 1) 제조 공정에서 발생하는 유형 A 션트.
- 실의 역방향 바이어스 동작에서 비롯된 유형 B 션트. 이러한 션트 경로는 후속 불량이며 시스템에서의 모듈/셀 음영으로 인해 발생한다.



그림 6.3.2: 비정질실리콘 박막모듈의 전계발광 이미지. 어두운 영역은 생산 공정에서 발생하는 션트(유형 A 션트). 밝은 반점은 열점 동작에 의해 형성된 심각한 션트 경로 (유형 B 션트).

박막 태양전지에서의 유형 A 션트는 모듈에서의 일반적인 위치에서 찾을 수 있다.

- 1) 셀 상호연결 라인에서: 불완전한 레이저 스크라이빙 프로세스 (스크라이브 라인 P1, P2, P3). 레이저 빔은 어느 정도 결정화를 일으킬 수 있다(그림 6.3.3a 참조).
- 실 영역: 가공 중에 생성된 모든 입자 또는 불순물, 유리 표면의 입자 또는 TCO 표면 거칠기(핀홀).
- 3) 활성 셀 영역의 가장자리: 불완전한 가장자리 분리(isolation)공정 (즉, 샌드 블라스팅).

박막 태양전지의 션트는 EL 이미징으로 쉽게 볼 수 있다. 다른 방법으로는 고정화 서모그래피(5.3.3 장 참조)를 션트의 시각화 기술로 적용할 수도 있다. 이 기술을 사용하면 A형 제조 결함[Buerhop10]으로 인한 약한 전기적 션트와 강한 전기적 션트를 구별할 수 있다.

주요 후속 불량은 박막 셀의 역방향 바이어스 동작으로 인한 손상이다. 이 조건은 셀이 모듈의 동작 전류에 비해 더 적은 전류를 생성할 때 모듈에서 발생한다. 일반적으로 박막 모듈의 경우 이는 음영으로 인해 발생한다. 이런 상태가 발생하면 영향을 받은 셀 또는 셀 그룹이 강제로 역방향 바이어스 상태에 놓이게 된다. 박막 셀은 역방향 바이어스 동작에 매우 민감하다. 따라서 접합 파괴(junction breakdown)가 쉽게 발생하고 션트 경로가 형성되거나(유형 B 션트) 이미 존재하는 유형 A의 션트가 전류를 전달한다. 모듈 전류는 션트 경로에 집중되고 출력 소실은 점 초점(point-focal) 가열(열점 가열)을 유발하여 심각한 모듈 손상을 일으킬 수 있다(그림 6.3.3c 비교).

음영 상태 하에서 박막과 결정질실리콘 모듈의 열점 동작 거동은 매우 다르다. 이는 박막 모듈의 경우 바이패스 다이오드를 사용하는 예방 조치로는 영향을 받는 셀에서의 역방향 전압을 제한할 수 없기 때문이다. 표 6.3.1은 두 기술의 열점 거동에 대한 요약이다.

	박막모듈	결정질실리콘 모듈
열점 션트의 형성	셀이 역방향 바이어스 전압에서 동작하는 경우 접합 파괴에 매우 민감하다. 손상의 외부 모양은 매우 다를 수 있다 (핀, 작은 영역 반점, 벌레 모양의 자국). 그림 6.3.3은 옥내 열점시험(IEC 61646)에서 관찰된 열점 손상의 몇 가지 예이다.	바이패스 다이오드를 사용한 보호 조치가 잘 설계된 경우에는 셀의 역방향 바이어스 동작에 대한 내성이 있다.
열점 가열 방지를 위한 대책	열점 션트의 형성은 피할 수 없다. 손상은 시각적으로 확실하게 볼 수 있고, 일반적으로 영향을 받은 셀 그룹 전체에 퍼진다. 다양한 기술을 이용한 추가적인 레이저 스크라이빙으로 셀들을 전기적으로 분리시킨다. 이는 잠재적인 열점 손상을 줄인다.	바이패스 다이오드는 셀의 상호연결 회로에 구현된다. 음영이 있는 셀의 역방향 전압은 p-n 접합 파괴를 방지하기 위해 적절한 값으로 제한한다. 예를 들어, 바이패스 다이오드 당 직렬로 연결된 20 개의 셀의 역방향 전압은 최대 약 -12 V에 이르게 된다.

표 6.3.1: 박막과 결정질실리콘 모듈의 열점 거동 비교

열점 가열	선트는 일반적으로 셀 전체에 퍼지고 모듈은 저 전류에서 동작하기 때문에 이는 사소한 불량 메커니즘이다. 열 강화유리를 사용하지 않기 때문에 모듈 가장자리에서 열점가열이 위태로울 수 있다 (유리파손 위험).	음영이 있는 셀의 동작온도는 셀 영역의 누설전류 분포와 전류 밀도에 따라 달라진다. 접합 파괴가 발생하지 않더라도 봉지재 또는 후면 절연의 용융, 납땜 접합부 파손 또는 유리파손과 같은 과열이 일어날 수 있다.
출력손실	열점 형성으로 인한 출력손실은 셀 기술과 영향을 받는 셀 개수에 따라 다르다. 일반적으로 셀 그룹이 영향을 받으면 상당한 출력손실이 발생한다. 모듈 단자 사이에 바이패스 다이오드로 보호 조치를 취하지 않으면 시스템의 출력손실이 영향을 받는 모듈의 출력을 훨씬 초과 할 수 있다. 출력손실 범주 E(s).	열점 형성으로 인한 출력손실은 통상적으로 단일 셀이 영향을 받기 때문에 보통은 그렇게 중요하지 않다. 출력손실 범주 A(s).
안전성 문제	과열은 보통 발생하지 않기 때문에 모듈안전은 유리 파손에 의해서만 영향을 받는다. 이로 인해 모듈의 기계적 불안정성이 야기될 수 있고, 그리고 전기쇼크도 발생할 수 있다. 안전 등급 B(e, m).	과열로 인해 고분자 재료가 박리되거나 녹는 경우 모듈안전이 영향을 받는다. 안전등급 B(e).
기타	그림자를 만드는 도구로 박막 모듈을 청소하는 것은 셀의 역방향 바이어스 동작을 일으키기 때문에 위태로울 수 있다. 박막 모듈의 단락회로 동작은 피해야한다. 생산 시 셀 성능의 허용오차로 인해 Isc가 낮은 셀의 역방향 바이어스 동작이 일어나 모듈이 손상될 수 있다. 특히 측정할 때 지속적인 광원이나 자연광을 사용하는 경우 교정기관에서 이 문제를 고려해야한다.	청소 대책은 열점 형성과 관련하여서는 비판적





a)





C)

그림 6.3.3: IEC 61646에 따른 박막모듈의 열점시험에서 관찰된 모듈 손상과 불량 : a) 레이저 스크라이빙 라인을 따라 열점 션트 형성, b) 대면적 셀 손상과 관련된 셀 상호연결부에서의 열점 션트 형성, c) 벌레와 같은 셀 손상과 관련된 열점 션트 형성, d) 높은 열 구배를 통해 발생한 비 강화유리의 파손[Wendlandt11].

# 참고문헌

[Buerhop10] Cl. Buerhop, J. Bachmann, Infrared analysis of thin-film photovoltaic modules, *Journal of Physics* **214** (2010), p.012089

[Wendlandt11] St. Wendlandt, Hot Spot Risk Assessment of PV Modules, Investors day, PI Berlin, 28th September 2011, Berlin, Germany

# 6.4 CdTe 박막모듈에서 발견된 특정 불량 검토

대부분의 최근 CdTe 모듈은 유리를 프론트와 백시트로 사용한다. 프론트시트 유리는 투명전도성산화물인 전면 접촉전극에서 시작하여 기능성 박막 스택을 구축하기 위한 "상판(superstrate)"으로서의 역할을 하고, 그 위에 CdS(n-형)가 버퍼층으로 증착된다. 그리고 CdTe(p-형), 마지막으로 후면 접촉전극이 증착된다. 층 사이의 확산을 방지하기 위해 여러 개의 장벽층이 필요하다(그림 6.4.1 참조). 셀 스크라이빙과 접촉 리본 배열 후 EVA와 같은 봉지재가 제 위치를 잡게 된다. 강화 유리로 만든 백시트를 추가하고 정션 박스를 접착하여 모듈을 완성하기 전에 모듈 테두리에 가장자리 실링을 하고 그리고 커넥터가 빠져 나오게 된다.



그림 6.4.1: 전형적인 CdTe 태양전지의 구조 [Visoly-Fisher03].

#### 6.4.1 전면 유리파손

상판 개념의 불편한 것 중 하나는 전면유리가 다른 공정 단계를 거치야 하므로 기본적으로 경화 혹은 템퍼링이 배제된다는 것이다. 실제로 열 템퍼링은 증착된 박막에 해가 될 수 있는 초기 고온을 필요로 하고 그리고 공기로 매우 빠른 급냉이 수반되어야하므로 박막 제조공정과 양립하기 어렵다.

3.2 mm 두께의 유리를 열 템퍼링하면 잠재적인 충격을 받을 수 있는 전면에 100 MPa 이상의 압축응력[Daudeville98, Gardon80]을 가하게 되는데 반해, 어닐링 혹은 일부 경화된 유리의 같은 표면은 1~5 MPa의 압축응력이 가해진다. 따라서 낮은 충격 응력에서도 전면 유리파손이 발생할 수 있다. 유리가 깨지면 처음에 유리에 어떤 유형의 템퍼링 또는 경화가 있었는지 쉽게 알 수 있다. 템퍼링 유리는 전 시트 위에 작은 조각들으로 깨어진다. 표면 단위당(5x5 cm<sup>2</sup>) 조각의 개수는 템퍼링 혹은 경화 응력 수준을 보여주는 좋은 지표이다.

유리파손의 두 번째 이유는 유리 가장자리 위에서의 충격 응력 때문이다. 이러한 유형의 파손은 CdTe 모듈에서 일반적이다. 프레임리스 모듈은 프레임 모듈보다 가장자리 파손에 더 취약하다. 파편화가 일어나지 않기 때문에 비 강화 유리에서는 충격 위치를 쉽게 찾을 수 있어 두 파손 발생점을 구별하는데 유리 파손 전문지식이 거의 필요하지 않다.

#### 참고문헌

[Daudeville98] L. Daudeville, H. Carré, Thermal tempering simulation of glass plates: Inner and edge residual stresses, *Journal of Thermal Stresses* **21** (1998), pp. 667-689

[Gardon80] G. Robert, Thermal tempering of glass, *Glass science and technology* **5** (1980), pp. 145-216

# 6.4.2 후면접촉 열화

상용 CdTe 모듈의 후면접촉은 설계하기가 매우 어려운데, 주된 이유는 CdTe에서 전하를 추출하는 데 필요한 에너지 때문이다. Cu, Mo, C 또는 Ag는 일반적으로 이런 목적으로 사용되지만 Cd 또는 Te 기반 합금과 같은 미세 조정에는 다른 구성요소가 필요하다.

많은 연구가 후면접촉의 안정성에 대해 다루었다[Jenkins03, Albin09]. 최근 First Solar는 이 주제[Strevel12]와 흥미로운 열화 동력학에 대한 개요를 발표하였다. 기후와 시스템 상호연결 인자들에 따라 처음 동작 1~3년 동안 4~7 %의 최초의 초기 열화를 예상할 수 있다. 고온기후는 이러한 초기 안정화를 가속화하는 경향이 있다.

동작 2년차부터 매년 온도 기후조건에 따라 연간 0.5~0.7 %의 열화율이 예상될 수 있다(그림 6.4.2 참조).



그림 6.4.2: 후면접촉에서 CdTe 광흡수체로의 Cu 확산으로 인한 열화의 시간 의존성 [Strevel12, 수정됨]. EPM은 Engineered Performance Margin의 약어이다.

두 단계 모두 Cahen 등이 논의한 바와 같이 후면접촉에서 Cu의 입계(grain boundary) 확산에 기인한다[Cahen01](그림 6.4.3 참조). 후면접촉 영역에 풍부한 Cu는 CdTe/CdS 계면을 거쳐 이동한다. 온도와 바이어스를 증가시킨 상태에서 가속 수명시험을 하면 확산은 가속화 될 수 있다. 설치된 모듈이 개방회로 조건 하에 오래 놓이게 되면 최대 출력점에서의 일반적인 전압조건에 비해 셀의 역방향 바이어스가 증가하고 열화도 증가한다.



그림 6.4.3: CdTe 소자를 관통하는 Cu의 이동[Strevel12].

Visoly-Fisher[Visoly-Fisher03]와 [Carlsson06]에 의해 두 번째 열화 메커니즘이 확인되었다. O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O를 함유하고 있는 환경에서 CdTe 후면이 산화되면 후면접촉 장벽을 생성한다. 이 장벽으로 인해 I-V 곡선에서 보는 바와 같이 롤오버가 발생한다(그림 6.4.4 참조). 그러나 모듈의 자세한 열화 동력학은 아직 없다.



그림 6.4.4: CdTe 모듈의 I-V 곡선에서의 롤오버 [Carlsson06]. 현장에 배치된 모듈 F1과 F2는 모두 참고 시료에 비해 최대 출력(*P*m)과 충진율(FF)의 감소를 보여준다. 롤오버 감소는 모듈 F1에서 더욱 두드러진다.

# 참고문헌

[Albin09] D.S. Albin, R.G. Dhere, S.C. Glynn, W.K. Metzger, The direct correlation of CdTe solar cell stability with mobile ion charge generation during accelerated lifetime testing, Proc. 34th PVSC (IEEE, Philadelphia, PA, USA , 2009), pp. 001903-001908

[Cahen01] D. Cahen, G. Hodes, K. Gartsman, Overcoming degradation Mechanisms in CdTe Solar Cells, second annual report 2001, NREL/SR-520-29416, <u>http://www.nrel.gov/docs/fy01osti/29416.pdf</u>

[Carlsson06] Th. Carlsson, A. Brinkman, Identification of degradation mechanisms in field tested CdTe modules, *Progress in photovoltaics: research and applications* **14** (3) (2006), pp. 213-224

[Jenkins03] Jenkins, C., A. Pudov, M. Gloeckler, S. Demtsu, T. Nagle, A. Fahrenbruch, J. Sites, CdTe Back Contact: Response to Copper Addition and Out-Diffusion, NREL/CD-520-33586, 2003, pp. 900-903

[Korevaar11] B.A. Korevaar, R. Shuba, A. Yakimov, H. Cao, J.C. Rojo, T.R. Tolliver, Initial and degraded performance of thin-film CdTe solar cell devices as a function of copper at the back contact, *Thin Solid Films* **519** (2011), pp. 7160-7163

[Strevel12] N. Strevel, L. Trippel, M. Gloeckler, First Solar, Performance characterization and superior energy yield of First Solar PV power plants in high-temperature conditions, *Photovoltaics International*, August 2012, pp. 148-154

[Visoly-Fisher03] I. Visoly-Fisher, K. Dobson, J. Nair, E. Bezalel, G. Hodes, D. Cahen, Factors affecting the stability of CdTe / CdS Solar cells deduced from stress tests at elevated temperature, *Adv. Funct. Mater.* **13** (2003), pp. 289-299

# 7 모듈의 불량 메커니즘에 적용할 시험방법

여기서는 아직 표준화되지 않은 시험방법에 대해 논의하고 설명하고자 한다. 이러한 방법은 향후 표준으로 이어질 수 있다. 대다수의 Task 13 전문가는 현장에서 모듈의 신뢰성을 평가하는데 있어 표준화되지 않은 이런 시험방법이 누락된 것이 중요하다는 데 동의한다.

# 7.1 수송에 의해 일어나는 기계적 부하

모듈의 형식승인 시험을 위한 IEC 61215/61646에서 기계적 부하시험(시험코드 10.16)은 정적부하만 고려한다는 점이 눈에 띈다. 동적부하 하에서 모듈의 성능과 수명 동작을 추정하고 특성화하려면 다른 부하 파라미터에서 추가시험을 수행해야한다. 실제로 다양한 기계적 응력은 운송, 바람과 열-기계적 부하로부터 예상될 수 있다[Reil10]. 적용된 시뮬레이션하에서의 영향 분석을 목적으로 다양한 결정질 모듈의 기계적 및 전기적 거동을 평가하기 위한 시험 절차를 수행한다.

모듈에 가해지는 진동으로부터의 충격의 영향을 추정하기 위해 트럭 수송 시뮬레이션이 전체 선적 스택에서 수행되고 단일 모듈의 단일 공진 주파수가 결정된다. EL 이미지와 I-V 측정은 기계적 및 전기적 요인에 의해 발생한 열화 상태를 확인하기 위한 특성측정 도구로 사용된다.

#### 7.1.1 단일 모듈의 공진 주파수 결정

모듈의 공진 주파수를 추정하기 위해 (1) 감쇄 곡선 결정에 의한, (2) 사인파 여기에 의한 공진 주파수 스펙트럼, (3) 광대역 잡음 여기(여기서는 보이지 않음), 주로 이 세 가지 측정이 적용된다. 모듈은 여러 개의 개별 중간층과 정션 박스와 같은 부착된 부품들로 구성되기 때문에 진동 거동은 다중 질량 발진기(multi-mass oscillators)의 특성과 관련이 있는데, 이는 감쇠 곡선에 의한 정확한 공진 주파수 결정에서의 복잡성을 보여준다. 모듈은 지면에 평행하게 배치하고(햇볕이 잘 드는 쪽이 위로 향하게) 중앙 부분에 자극을 주는데, 그 반대쪽에는 가속센서가 부착되어 있다. 18 개의 개별 모듈에 대한 공명은 5.5~18 Hz 사이였다.

3.5~15 Hz 사이의 최대 여기 길이 5 mm에 대해 1 *g*의 일정한 가속(*g*는 중력 상수) 하에서 정현파 여기를 사용하여 모듈의 편향을 측정한다. 공명은 약 11 Hz에서 발견된다. 이 방법의 경우 모듈은 반대쪽의 짧은 프레임 요소에 고정되어 있고 두 개의 동기화된 서보 유압봉(servo-hydraulic rods)으로 자극을 주었다. 그림 7.1.1의 EL 이미지는 전체 모듈에 분포된 단일 셀들의 파괴를 명확하게 보여준다. 이 경우 8 %의 총 출력손실이 발생한다.



그림 7.1.1: 공명 탐색 전(좌)과 후(우)의 전계발광 이미지.

# 7.1.2 결정질실리콘 모듈 수송스택의 수송과 환경시험

모듈의 수송시험에 사용된 시뮬레이션 방법은 ASTM D 4169/4728의 규격을 채택하였다. ASTM D 4728-2006의 부록 X1.1에 트럭 수송에 대한 조건은 180 분 시험 하에서 *g*<sub>RMS</sub>=0.52 g를 가진 출력 스펙트럼 밀도 (power spectrum density: PSD)-스펙트럼과 보증(assurance) 레벨 II (180분 시험에서 *g*<sub>RMS</sub>=0.52 g)에 의해 명시된다[ASTM1, ASTM2]. 이 규격은 진동 시뮬레이션을 위한 주파수 범위 내에서 위의 공진 주파수를 포함하여 모듈의 운송 시험을 위한 토대를 형성하였다[ASTM2]. 도로 상태, 다양한 충격 그리고 고려해야 할 진동에 따라 실제 제품의 완전한 수송 스택이 검사를 받는다. 모듈 측면에서 트럭 내부 수송은 제조업체로부터 유통 업체 그리고 최종 고객에게 모듈을 운반하는 일반적인 방법이다. 스탠딩과 지면과 평행하게 구성한 완전한 모듈스택을 이 시험방법[IEC62759-1]에 적용한다. 아직까지 스탠딩과 지면과 평행하게 구성한 모듈스택을 이 시험방법[IEC62759-1]에 적용한다. 아직까지 스탠딩과 지면과 평행하게 구성한 모듈스 다른 시험이 수행되었다. 수송 택 전체를 고려해야 하는데, 이는 팔레트, 포일, 스트랩 밴드, 부착물 또는 서스펜션 요소도 평가해야 한다는 것을 의미한다. 모듈의 방향만이 적격성을 논하는 요건은 아니다.

이어서, 수송 스택에 있는 10개의 새로운 모듈 (5개의 모듈은 수평으로, 5개의 모듈은 수직으로)을 IEC 61215 [IEC61215] 및 DIN EN 12210/12211 [DIN EN 12210, DIN EN 12211]에서 파생된 시험방법으로 수송 시뮬레이션 후에 다양한 환경시험을 수행하였다. 이들 시험 시퀀스의 목적은, 잠재적으로 현장에서도 발생할 수 있는 프리스트레스(수송)로부터 불량을 예측하는 데 도움이 되는 의도적으로 유도된 스트레스를 생성하는 것이다. 확장된 스트레스시험과 관련하여 모듈의 전기적 및 기계적 거동을 결정하기 위해 온도사이클과 동적 바람 하중 시험을 수행하였다. 습윤 누설과 절연시험과 같은 전기적 측정의 조합과 함께 출력 생산을 결정하기 위해 I-V 측정뿐 아니라 EL 이미지도 촬영한다.

온도 사이클은 재료 화합물뿐만 아니라 전도성 소재들과 상호연결에도 높은 열-기계적 응력을 유발하는데, 총 100 사이클을 수행한다. 돌풍을 대체하는 목적의 단일 기계적 하중을 전달하기 위해 교차 충격(alternating impacts) (±1000 Pa에서 0.04 Hz) 형태의 동적부하가 시험시료에 인가된다.

수송 시뮬레이션 후 단일 셀 균열들이 단일 모듈에서 탐지될 수 있다[Reil11]. 결정질 웨이퍼의 개별 부품이 영향을 받지만 STC 하에서 발전된 출력 생산에 대한 심각성과 영향은 미미하다. 그림 7.1.2에 표시된 것처럼 이후에 수행된 환경시험조차도 수송에서 발생하는 기계적 불량을 훼손시키지는 않았다.

I-V 측정의 진행과정과 결과에 따르면, ASTM D4169/4728에 따른 두 개의 완전한 모듈스택의 수송 시뮬레이션은 최대 Δp<sub>MAX</sub>=1.5 %에 이르는 출력의 변화를 초래하였다. 수송 시험 후 인접에서 실시한 환경시험(열 사이클링, 동적 바람 하중)은 최대 Δ*p*<sub>MAX</sub>=2.8 %의 출력열화를 보였다.



그림 7.1.2: 모듈의 장기 거동을 결정하기 위한 수송과 환경 시뮬레이션 결합 시험 패턴

#### 7.1.3 단일 결정질실리콘 모듈의 수송시험

균열거동과 모듈출력에 대한 수송의 영향을 평가하기 위해 여러 번의 모듈 수송을 참관하였다. 진동과 충격을 측정하기 위해 일반적인 기구가 사용되는데, 그림 7.1.3은 수송 중 센서의 위치를 보여준다. 모듈의 가속을 기록하기 위해 두 종류의 센서가 사용된다. 교정한 규격에 맞는 가속 로거는 팔레트에서 충격을 측정하는 데 사용된다. 그러나 이러한 로거는 상당히 무겁다. 로거가 모듈의 진동에 미치는 영향을 방지하기 위해 경량의 보정되지 않은 데이터 로거를 사용하여 모듈의 진동을 기록한다. 경량 로거는 교정된 셰이커 센서에 대해 효과적인 1 g과 10 g 사인파로 10 Hz에서 셰이커(shaker)에서 교정한다. 충격 측정을 위해 MSR 165는 충격 모드에서 사용한다. 충격 모드에서는 두 센서 모두 최소 3 g의 가속 후 로깅을 시작하도록 프로그래밍되어 있다. 진동측정을 위해 로거는 자체제작한 원격 제어장치에 연결되어 10초 동안의 진동을 측정할 수 있다. 이를 위해 자동차가 트럭을 따르면서 경로 섹션을 문서화하고 리모컨으로 센서를 가동한다.

60셀의 다결정 모듈에 대한 진동의 영향을 평가하기 위해 셰이커시스템을 사용한다. 이 센서는 매우 가볍기 때문에 모듈의 진동에 영향을 주지 않는다.



그림 7.1.3: 모듈 수송 스택에서 가속 데이터 수집용 데이터 로거의 표준 위치를 보여주는 스케치. 표준 로거는 팔레트 모서리에 나사로 고정되어 있다. 하단, 중간 그리고 상단에 위치한 각 모듈에는 두 개의 경량 로거가 장착되어 있다. 모듈 백시트에 양면 카펫 테이프로 붙여져 있다. 위에서 언급한 모듈에서 로거 하나는 모듈 중앙에, 하나는 모듈 모서리에 위치한다. 모듈 모서리에 있는 로거는 경량 로거 바로 위에 있는 정션 박스의 반대쪽 모서리에 있다.

셰이커 포함 확장기 플랫폼(expander platform)에는 3~140 Hz 범위의 공진 주파수가 없다. 7가지 유형의 모듈에 대한 균열 발생 민감도를 시험하기 위해 단일 모듈이 셰이커 플랫폼에 장착된다. 모듈은 모듈 수송스택에 있는 것처럼 모듈 모서리를 단단히 고정하여 셰이커에 장착된다.

셀 균열의 개수를 셀 수 있는 차동 전계발광(differential EL) 방법을 사용하였는데, 이는 다결정 태양전지에서의 작은 셀 균열도 드러내 보인다. 모듈의 EL 이미지는 초기 상태와 모듈의 공칭 전류에서 어떤 시험 절차 후에 측정된다. 이어서 두 EL 이미지를 비교한다. 두 이미지를 비교하기 전에 이미지 등록 기술을 적용하면 두 이미지의 고품질 정렬이 이루어진다. 이 방법은 이전 균열 분석에서 이미 사용되었다[Kajari11]. 균열이 모듈 출력에 미치는 직접적인 영향을 특성화하기 위해 균열이 발생한 전지는 전지 균열등급 A (균열에 대한 전기적 손실 없음), B (전기적 손실이 있는 균열) 그리고 C (전기적 절연성 균열)에 따라 분류된다. 이는 표 5.4.1에 정의되어 있다.
가득히 적재된 40톤 트럭과 트럭 유형을 모르는 운송회사에서 수행한 수송 핸들링에 대한 충격 강도와 빈도를 비교한 것이 그림 7.1.4이다. 결과는 수송 중에 가장 강도가 높은 충격이 팔레트에 가해지지만 모듈에는 발생하지 않음을 보여준다. 가득히 적재된 40톤 트럭 수송은 예상대로 낮은 강도와 낮은 빈도의 충격을 보여준다. 운송회사의 수송은 가장 높은 충격강도와 가장 높은 충격빈도를 보여준다. 그래서 우리는 최악의 수송(트럭 회사)에 집중한다. 제조업체의 포장을 사용하는 경우 모듈 패키지를 운반한 후 모듈 당 최대 셀 균열 수는 2개이다. 시험에서 수송 처리로 인한 셀 균열인지 아니면 수송 자체에 의한 셀 균열인지 구별할 수 없다는 불확실성이 여전히 존재한다.



그림 7.1.4: a) 수송 핸들링, b) 가득히 적재된 40톤 트럭으로 수송, c) 동일한 거리를 운전하는 트럭 회사의 수송에 대해 측정된 충격 주파수. 팔레트, 하단, 중간 그리고 상단은 패키징의 하단, 중간, 상단에 있는 모듈 위치에서의 측정을 나타낸다.

단일 모듈에 대한 시험 PSD 스펙트럼을 생성하기 위해 모듈의 진동을 측정하고 규격 DIN EN 15433-5 [DIN EN 15433]에 따라 축소된(reduced) PSD-스펙트럼을 생성한다. 그림 7.1.5는 수송 스택의 상단과 하단 모듈에 대한 축소된 PSD를 보여준다. 이 분석은 도시, 시골 길 그리고 아우토반에서 수행한 것이다. 시골길은 상단 모듈에서 가장 높게 축소된 PSD 스펙트럼을 보여준다. 기존 규격과의 비교에서, *g*<sub>RMS</sub>=0.52g인 ASTM D4169-09 Truck Assurance Level II의 PSD-스펙트럼과 잘 일치함을 보여준다[ASTM1]. 셰이커에서 단일 모듈을 시험하기 위해 아래에서는 표준 스펙트럼이 사용된다.



그림 7.1.5: 앞면을 아래를 보게 쌓은 모듈의 수송 스택에서 모듈의 모서리에서 측정된 축소된 PSD. (좌): 스택의 상단 모듈, (우): 스택의 하단 모듈. 축소된 PSD는 규격 DIN EN 154335 [DIN EN 15433]에 따라 생성된다. 붉은색과 검은색 PSD 스펙트럼은 유사한 표준 스펙트럼이다.

선택된 PSD 스펙트럼을 사용하여 7가지 서로 다른 유형의 모듈이 시험되었다. 평균 가속강도(a<sub>RMS</sub>)를 낮게하여 15분 동안 시험이 시작된다. 동일한 모듈의 경우 선택한 스펙트럼의 평균 가속 강도가 15분 동안 다시 0.98 m/s<sup>2</sup> 씩 증가한다. 중간에 있는 EL 이미지가 촬영되고 새로이 발생한 셀 균열의 개수를 세고 그리고 균열등급 A, B와 C로 분류된다. 그림 7.1.6은 7가지 모듈유형 모두에 대해 계수된 평균 누적 균열을 보여준다.



그림 7.1.6: 그래프는 15분 후 A, B, C 유형의 새로운 균열이 발생한 태양전지의 누적 평균 개수를 보여준다. ATSM D4169-09 Truck PSD-spectrum을 사용한 소음시험[ASTM1]. 시험은 PSD-spectrum의 RMS 가속 진폭 *a*<sub>RMS</sub> 를 변화시키면서 수행하였다. 오차막대는 시험된 모듈 세트의 최대분산을 보여준다.

ASTM D4169-09 Truck Assurance Level II [ASTM1]는 수송 중 모듈스택에 가해지는 진동을 시뮬레이션하는데 적합한 PSD 스펙트럼이다. 그러나 그림 7.1.6을 살펴보고  $g_{RMS}=0.52g$  수준에서 발견된 셀 균열 수를 비교하면 15 분 후에도 실제 시험에서 발견된 것보다 더 많은 셀 균열이 있음을 알 수 있다. 만약 실제 수송에서 발견되는 균열 수로 최대 2개의 수준을 선택하는 경우, 시험을 위해 평균 시험 가속 강도 3~4 m/s<sup>2</sup> ( $g_{RMS} = 0.32-0.41g$ )를 선택해야한다. 그리고 모든 모듈에서 셀 균열이 처음 발생했을 때의 평균 가속 수준의 명확한 한계를 찾는다. 평균 가속강도 3 m/s<sup>2</sup> 미만에서는 셀 균열이 발생하지 않고, 4 m/s<sup>2</sup> 미만에서는 B형 셀 균열이 발생하지 않고, 5 m/s<sup>2</sup> 미만에서는 C형 셀 균열이 발생하지 않는다. 셀 균열 거동의 시간의존성은 아직 조사 중이다.

# 참고문헌

[ASTM1] ASTM 4169 - Standard Practice for Performance Testing of Shipping Containers and Systems1 - 2008

[ASTM2] ASTM 4728 - Standard Test Method for Random Vibration Testing of Shipping Containers1 - 2006[DIN EN 12210] DIN EN 12210, Windows and doors - Resistance to wind load - Classification (includes Corrigendum AC:2002), 2003-08

[DIN EN 12211] Windows and doors - Resistance to wind load - Test method; German version EN 12211:2000, 2000-12

[DIN EN 15433] DIN EN 15433-5, Transportation loads - Measurement and evaluation of dynamic mechanical loads - Part 5: Derivation of test specifications, Feb2008

[IEC61215] International Electrotechnical Commission (IEC) 61215: 2nd edn, 2005. Crystalline silicon terrestrial photovoltaic modules - Design qualification and type approval

[IEC62759-1] International Electrotechnical Commission (IEC) 62759: CDV, 26-07-2013. Transportation testing of photovoltaic (PV) modules – Part 1: Transportation and Shipping of Module Package Units

[Kajari11] S. Kajari-Schröder, I. Kunze, U. Eitner, M. Köntges, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **95** (2011), p. 3054-3059

[Reil10] F. Reil, J. Althaus, W. Vaaßen, W. Herrmann, K. Strohkendl, The Effect of Transportation Impacts and Dynamic Load Tests on the Mechanical and Electrical Behaviour of Crystalline PV Modules, Proc. 25th EUPVSEC (WIP, Valencia, Spain, 2010), pp. 3989-3992

[REIL11] F. Reil, K. Strohkendl, J. Althaus, M. Thiele, S. Raubach, G. Winkler, B. Heinzel, Development of a New Test Standard and Experiences of Transportation and 'Rough Handling' Testing on PV Modules, Proc. 26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011), pp. 3270-3274

# 7.2 적설로 인한 기계적 부하

현장에서의 여러 가지 사고는 6.1.4 장에 보고된 바와 같이 장기간 적설의 영향으로 설치된 모듈의 다양한 구조적 불량 메커니즘을 밝혀주었다. IEC 61215와 IEC 61646은 2.4 kPa와 5.4 kPa에서 기계적 부하(ML)시험(10.6)을 요구하지만 모듈에 대한 인증시험 시퀀스는 아직 현장에서의 잠재적인 기계적 불량들을 반영하지 못하고 있다. 기계적 부하시험은 중량과 같이 균일하게 분포된 부하를 시뮬레이션된 돌풍 또는 적설의 형태로 모듈의 위부분과 후면에 전달한다. 모듈은 수평 방향이 아닌 경사각으로 설치되기 때문에 이러한 제품이 과중한 적설에 노출될 때 완전히 다른 부하 특성이 발생한다.

이전의 연구 및 출판물은 이미 이런 문제들을 다루었고 그리고 산업계에 이 문제를 소개하였다[Schletter08, Haeberlin07]. 후속으로 TÜV Rheinland는 경사진 면에 불균일하게 분산된 적설하중을 받는 모듈의 폭설 하중시험을 위한 장치를 개발하였다. 이 연구의 주요 목표는 장기 적설부하가 있는 여러 지역에서 발견되는 유사한 적설부하 특성을 시뮬레이션하고, 잠재적으로 이런 환경영향에 대한 저항성이 있는 모듈을 검증하기 위한 시험절차를 정립하는 것이다.

따라서 이런 요인을 자연환경 실험실로 이전하기 위한 시험장치가 개발되었으며, 여기에서 Eurocode [EUROCODE10]의 표준화된 부하 계산을 기반으로 유사한 불량을 재현할 수 있다. 그림 7.2.1은 TÜV Rheinland에서 새로 개발한 장비로, 총 20개 이상의 모듈을 대상으로 일련의 여러 시험들이 수행된다. 이 장치는 개별부하를 최대 10 kPa까지 확장할 수 있고, 이와 함께 자유로운 위치지정과 다양한 설치각도의 조정이 가능하다[Reil12].

초기 하중의 15 %에 불과한 하중과 2지점(two-point) 하중 적용에서 모듈은 프레임 강성이 부족하여 최대 5 mm의 변형이 생기는 취약점을 이미 노출시켰다. 약간의 프레임 변형은 또한 프레임과 유리 표면 사이의 접착 결합이 느슨해짐에 따라 크게 영향을 받는다. 다른 프레임 디자인에서는 코너 클램프로부터 나사가 분리된 단일 시편을 관찰하였다.



그림 7.2.1: 적설 부하 시험용 새로운 시험장치. TÜV Rheinland 2012: Application of load elements causing the bending of a PV module frame.

이러한 초기 관찰 후에는 부하를 처음 2.37 kPa에서 시작하여 45°와 37°의 모듈 경사면에서 시험이 수행된다. 하중은 EN 1991-1-3 [EUROCODE10]의 계산에 따라 강화되었다. 처음 60분 동안 발생되었다고 기술된 대부분의 손상은 프레임 변형과 유리 파손으로 인한 직접적 변형 혹은 장시간 동안 접착제의 느린 연면(creepage)으로 인한 변형이다.

더 긴 프레임의 모듈은 높이가 낮은 프레임에 비해 쉽게 구부러지기 쉽고 그리고 장착 지지구조(마운팅 레일)가 있는 후면의 소재접촉에 더 취약하다. 그리고 프레임이 전기 전도체와 접촉하거나 긁힘으로 인해 백시트의 절연특성이 저하될 경우 전기안전에 영향이 미칠 수 있다.

실리콘 기반 접착제가 있는 모듈은 프레임 휨이나 영구적인 손상 없이 최대 약 500 kg(~3 kPa)의 하중을 견딜 수 있는 반면, 크기와 프레임 디자인이 동일하지만 테이프 기반 접착제를 사용하는 모듈은 230~360 kg(1.4~2.3 kPa) 사이의 낮은 하중에서도 프레임의 휨과 유리파손이 불가피하다. 하중은 모듈 길이의 2/3에 가해졌다.

TÜV Rheinland에서 수행된 작업은 불균일하게 가해진 적설하중 하에서, 프레임과 접착제에 따른 모듈 유형별 약점을 명확하게 확인시켜준다. 시험결과는 이러한 스트레스 상황에서 설계상의 취약점(건축 치수, 소재 등)을 추정하는데 도움이 되고 그리고 해당 모듈이 경사지게 설치될 때 적설 하에서 그 기계적 저항성에 따른 모듈의 검증에도 도움이 된다. 결과와 제안된 시험방법론은 향후 IEC 규격화 작업에 제시될 것이다.

# 참고문헌

[EUROCODE10] EN 1991-1-3: Eurocode 1: Eurocode 1 - Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads, 2010

[Haeberlin10] Heinrich Häberlin, Photovoltaik. Strom aus Sonnenlicht für Verbundnetz und Inselanlagen, VDE Verlag, 1st edition 2007 (in German), pp. 167-170

[Reil12] F. Reil, G. Mathiak, S. Raubach, C. Schloth, B.v.Wangenheim, K. Fotak, Experimental Testing of PV Modules under Inhomogeneous Snow Loads, 27th European PVSEC, Frankfurt, September 2012, pp. 3414 - 3417

[Schletter08] Schletter GmbH, Extended module testing procedure in accord. with RAL GZ 966,

http://www.schletter.de//files/addons/docman/solarmontage/allgemeineinformationen/ /Modultest\_RAL\_komplett\_I113113GB.pdf (02.04.2013)

# 7.3 자외선 열화 시험

태양광스펙트럼은 여러 다른 파장범위로 이루어져 있다. 일반적으로 자외선(200~400 nm), 가시광선(400~750 nm)과 적외선(750 nm~1 µm)은 태양광스펙트럼의 대부분을 차지한다. 기준 태양광스펙트럼 분포 AM 1.5G는 그림 7.3.1에 나와 있다. 태양광 조사에서 자외선 강도는 기후와 고도에 따라 달라지며, 이는 지구에 도달하는 조사량(irradiation)의 약 3~5 %이다. 소재에 대한 자외선 효과는 자외선 파장 변화에 따라 크게 다르다. 자외선 파장범위는 일반적으로 UVA(320~400 nm), UVB(280~ 320nm)와 UVC (200~280 nm)의 세 범위로 나뉜다. 사람의 피부, 눈과 일부 폴리머들은 장기간의 자외선 조사에 의해 쉽게 영향을 받을 수 있다. 전체 태양광스펙트럼 조사량에서 자외선 자체만은 작은 부분에 불과하지만, 자외선 조사의 중요성과 영향은 무시할 수 없다. 연간 자외선 조사선량은 저고도 지역에서 약 100 kWh/m<sup>2</sup>, 고원지역(해발 3000 m)에서 150 kWh/m<sup>2</sup> 이상에 이른다.



그림 7.3.1: AM1.5G 기준 스펙트럼 조사강도의 분포. 태양광스펙트럼은 자외선, 가시광선과 적외선을 포함한다.

## 7.3.1 자외선 전처리

태양광 모듈은 태양광 조사 하에서 동작하므로 자연광의 자외선은 봉지재에 사용되는 고분자 물질의 성능을 저하시킬 수 있다. 대부분의 태양광 소자들의 분광 응답은 UVA와 UVB 파장범위를 포함하므로 장기간의 자외선 조사 후에 고분자 소재의 성능이 I-V 특성을 변화시키는지 확인하는 것이 중요하다.

옥외 자외선 전처리(preconditioning)는 모듈의 전기적 성능에 대한 변화와 영향을 반영하는데 훨씬 더 많은 시간이 소요되기 때문에 시험기관들은 대부분 옥내 자외선 시뮬레이션 방법들을 널리 채택하고 있다. 자외선 조사 전후 모듈의 열화 수준을 확인하기 위해 현재 IEC 61215와 IEC 61646 규격에 따라 자외선 조사시험이 수행된다. UVA에서 UVB까지의 파장범위를 포함하는 단 15 kWh/m<sup>2</sup>의 조사선량으로 자연광 조건에서 낮은 선량의 자외선을 시뮬레이션하도록 정의되어 있다. 모듈의 최대 출력열화는 자외선 노출 후 5 % 미만으로 제한되어야한다.

옥내 자외선 조사시험을 수행하기 위해 가장 중요한 것은 자외선 광원의 선택이다. 모듈 크기와 동작조건의 요구사항을 충족하려면 대면적과 고강도 자외선 광원이 필요하다. 그리고 자외선 스펙트럼은 특정 파장범위에 걸쳐 자연태양광 스펙트럼과 일치해야한다. AM1.5G에 최대한 가까운 스펙트럼을 갖는 필터를 사용하는 제논 광원은 가시광선과 적외선 조사강도가 모듈을 심하게 가열하기 때문에 자외선 노출용으로는 적합하지 않다. 모듈 온도를 정상동작 온도범위로 유지하는 것은 어렵다. 게다가 제논램프의 사용은 소모품 비용이 높아 기피대상이다. 그러므로 많은 태양광 실험실에서는 형광램프를 자외선 광원으로 선택한다. 옥외 자외선 조사의 정확한 시뮬레이션을 위해 가시광선과 적외선 파장범위의 조사량이 적고 모듈 온도상승에 영향이 적은 형광등과 기타 신형 램프가 개발되고 있다.

모듈온도는 옥외 장기 자외선 조사에서 또 다른 중요 인자이다. 자외선 조사의 영향은 특정기간 동안의 자외선 선량뿐만 아니라 동작 중 모듈 온도와도 관련이 있다. 최악의 자외선 조사조건을 얻으려면 전 세계 여러 지역의 통합 자외선 조사 데이터를 모니터링하고 확인해야한다. 다른 환경조건에서 사용되는 모듈온도는 자외선 조사량과 결합되어야한다. 모듈온도는 동작 중 광열화 프로세스를 가속화하기 때문에 실험실 시험에서 실제 자외선 조사조건을 시뮬레이션하고 반영하려면 적절한 자외선 가속수준과 모듈온도가 필요하다. 관련 연구와 실험은 문헌에 기술되어 있다[Koehl01].

## 7.3.2 모듈의 성능 열화

IEC 61215와 IEC 61646 규격은 280~400 nm 파장범위에서 15 kWh/m<sup>2</sup>의 총 자외선 조사를 요구한다. 이 중 280~320 nm 파장범위는 총 에너지의 3~10 %인데, 이 자외선 선량은 실제 자외선 조사조건을 반영하지 못한다. 자외선 선량과 출력열화의 상관관계를 명확히 확인하기 위한 일반적인 실험결과가 그림 7.3.2에 나와 있다. 5 개의 단결정 모듈(다른 제조업체들)이 시험대상으로 선택되었는데, 자외선 시험은 옥내 형광등 조사 하에서 수행되었다. UVA와 UVB 조사량은 IEC 61215 요구사항을 준수한다. 자외선 강도는 자연광의 5 배이며 그 스펙트럼 분포는 그림 7.3.3과 같다.

자외선 챔버의 온도는 55~70℃이다. 160 kWh/m<sup>2</sup>의 총 자외선 선량은 오랜 기간 동안에 여러 지역들에서의 자외선 효과를 시뮬레이션한 것이다. 자외선 조사선량은 현장에 따라 1년에서 2년의 옥외 내후에 해당한다.

IEC 61215 규격에 따라 시험한 15 kWh/m<sup>2</sup> 자외선 조사 후 5개 모듈의 생산 출력열화가 5 %에 도달하지 못하는 것이 분명하다. 그러나 5개 모듈 중 2개 샘플은 20 kWh/m<sup>2</sup> 조사선량 후 약간의 출력 변화를 보여준다. 모듈 중 하나는 160 kWh/m<sup>2</sup> 조사 후 출력열화가 5 % 이상인데, 이 결과는 모듈의 전기적 성능과 고분자 소재의 불량을 보여준다. 두 개의 모듈은 장기간 자외선 조사에 따른 출력열화의 명백한 경향을 보여준다.



그림 7.3.2: 시뮬레이션된 자외선 광원 노출 후의 단결정 모듈의 최대 출력열화. 모듈 온도는 75~85℃ 사이이다.



그림 7.3.3: 시험기관에서 사용된 형광램프의 스펙트럼 조사강도 분포. UVB (280~320 nm 파장범위) 조사량은 총 자외선 에너지의 9 %이다.

IEC 61215 규격은 15 kWh/m<sup>2</sup>의 자외선 총 에너지만 요구한다. 시험 중인 모듈은 일반적으로 이러한 조건 하에서의 승인 요구사항을 만족할 수 있다. 그러나 이들 중 일부는 장기간 자외선 조사(150 kWh/m<sup>2</sup> 이상) 후 5 % 이상의 출력열화 가능성이 있다. 또한 이런 모듈들은 흔히 상당한 출력손실과 함께 EVA 소재의 갈변을 보여준다. 실험실(형광 램프 또는 여타 인공 자외선 광원)의 자외선 시험방법은 자연 태양광 조건 하에서의 장기간의 자외선 조사를 시뮬레이션하는 가속시험을 제공한다. 옥외조건에서 서로 다른 자외선 조사량과 모듈온도를 고려할 때, 원하는 자외선 조사량과 모듈과 환경의 제어온도를 실제 옥외조건에 맞게 설정할 수 있다.

모듈의 고분자 소재(예 : EVA)는 자외선 조사에 매우 민감하다. 이런 물질의 분광응답은 열화속도와 상태를 지배한다. 자외선 광원의 스펙트럼 조사강도 분포가 자외선 조사 효과에 영향을 미친다는 점에 유의해야한다. 따라서 자외선 시험결과는 자외선 조사량뿐 아니라 UVA와 UVB의 파장범위에서의 스펙트럼 분포에 의해서도 영향을 받는다.

## 참고문헌

[Koehl01] Michael Koehl, D. Philipp, N. Lenck, M. Zundel. Development and application of a UV light source for PV-module testing, Proc. Reliability of Photovoltaic Cells, Modules, Components, and Systems II 7412 (SPIE, San Diego, CA, USA, 2009) 741202; doi:10.1117/12.825939

# 7.4 암모니아 시험

모듈의 품질시험, 예들 들어 IEC 61215 혹은 IEC 61646 [IEC61215, IEC61646]의 고온 고습시험에서는 흔히 셀 커넥터, 납땜 조인트 그리고 기타 금속 부품의 부식을 보여준다. 농업 환경에 있는 농장의 지붕에 모듈을 설치하면 추가적인 환경 스트레스가 나타난다. 장착 시스템의 부식 외에도 출력손실과 실링이 손상된 것들이 현장에서 발견되었다[Mathiak12]. 실리콘(silicone) 기반 접착용 실링의 부식은 접착 강도뿐만 아니라 절열 효과의 손실을 초래할 수 있고, 그리고 인간과 동물 또는 주변 시설에 위험을 초래할 수 있다. 부식성 대기는 아크를 발생시켜 화재를 일으킬 수 있다. 현장에서 발견된 불량은 환경시험 챔버에서 분석하고 시뮬레이션해야한다. 이에 따라 TÜV Rheinland는 특별한 환경 스트레스 하에서 모듈에 대한 부식효과를 연구하였다. 풀 사이즈 크기의 모듈을 수용할 수 있는 시험 챔버를 개발하였고, 규격 IEC 62716 [IEC62716]에 따라 암모니아 시험용으로 인정을 받았다.

암모니아의 상대적으로 높은 부식효과는 구리 합금(황동)과 폴리카보네이트의 경우에 잘 알려져 있는데, 두 소재 모두 태양광 소자에 사용된다 : 셀 상호연결 리본의 전도체로 구리와 플러그와 정션 박스용 폴리머 혼합물에 들어가는 폴리카보네이트.

여러 시험기관이 자체적으로 암모니아 내성 시험방법을 개발하기 시작했으므로[Petzold11] 상호조정을 통해 일관된 과학적 기반을 제공하는 것이 중요하다. 다수 돼지 사육농장으로부터의 암모니아 방출 데이터가 분석되었다. 독일 INRES의 연구 프로젝트에서 수집한 데이터는 암모니아 농도가 최고 46 ppm인 것으로 나타났다[INRES06]. 지붕일체형 시스템에서 이런 농도 수준은 설치된 모듈의 후면에서 봤을 때 현실적으로 보인다. 이 프로젝트의 데이터는 돼지사육농장으로 제한되었다. 그런데 양계장은 일반적으로 암모니아 농도가 훨씬 더 높다.

TÜV Rheinland는 Kesternich 시험을 기반으로 한 IEC 62716 [IEC62716] "태양광 모듈의 암모니아 부식 시험절차(Ammonia corrosion test procedure)"에 따른 시험절차를 사용한다. 표 7.4.1은 암모니아 부식 시험절차의 파라미터들을 보여준다.

표 7.4.1: IEC 62716 [IEC62716]에 따른 시험 파라미터들. NH<sub>3</sub> 농도수준은 이산화황 대신 암모니아 가스를 사용하는 ISO 6988 [ISO6988]을 기준하여 선택된다. 이 규격은 챔버 부피 300리터에 2리터의 가스와 2리터의 물을 제시하는데, 이는 농도 6667 ppm이 된다.

규 격	IEC 62716 (초안)
NH₃ 농도 (초기)	6,667 ppm
온도	60°C / 23°C
상대습도	100% / 75%
시험 기간	20일 (20 사이클)
사이클	8 h @ 60°C, 100%

촉촉한/습한 이산화황 시험은 산성비의 영향을 시뮬레이션하기 위해 Kesternich(1951)가 개발하였다. 시험방법은 DIN 50018 : ""이산화황의 존재 하에서 포화 대기에서의 시험("Testing in a saturated atmosphere in the presence of sulphur dioxide")"[DIN50018]에 설명되어 있다. 이 시험은 자동차와 건설산업에서 광범위하게 사용되어 왔으며 초기에는 현재와 같이 이산화황뿐만 아니라 암모니아 가스를 사용하여 수행되었다. 원래의 형태로 금속 부품들은 캐비닛 안에서 이산화황이 존재하는 높은 온도와 높은 습도에 노출된다. 노출조건은, 예를 들어 부식 방지 필름과 같이 다양한 규격에 명시된 특정 요구 사항에 맞게 변경될 수 있다. DIN 50018 [DIN50018]에 기술된 방법은 이산화황 분위기와 주변 대기에 교대로 노출되는 주기를 요구한다. 실링된 시험 캐비닛에는 시료 아래에 물통이 있다. 챔버가 가스로 채워지는 동안 물통은 100 % 상대습도의 포화수준까지 가열된다. 가스는 물과 혼합되어 부식성 암모니아 용액을 형성한다. 수용액은 시험시료 표면에 응축되어 부식과정을 시작한다. 약간 기울어진 모듈 쌍(하나는 전면이 위로, 다른 하나는 아래로)이 시험대상이 되는데, 시편은 부식성 가스와 물이 혼합된 분위기의 캐비닛에 8시간 동안 방치된 후 주변 대기에 16시간 동안 노출된다. 캐비닛 바닥의 물과 가스는 매일 교체된다. 실제 조건을 보다 잘 시뮬레이션하기 위해 완전히 조립된 제품에 대해 시험을 수행할 수 있다.

모듈성능과 절연특성은 암모니아 대기에 노출되기 전후에 평가된다. 표 7.4.2는 IEC 61215 Ed. 2에 따라 수행되는 육안검사, 절연시험과 출력측정을 포함한 전체 시험 시퀀스를 보여준다[IEC61215].

표 7.4.2: IEC 62716의 시험 경로 : 2개의 모듈이 전체 경로를 거쳐 실행된다. 참조 모듈은 전처리와 초기 측정만 거치게 된다. 흐름도는 IEC 61701 Ed.2에 따른 염수 미스트 부식 시험과 유사하다[IEC61701].

\* 번호는 규격 IEC 61215의 시험번호에 해당한다[IEC61215].

\*\* 코드번호는 규격 IEC 61730-2의 모듈 안전시험(MST) 번호에 해당한다[IEC61730].

암모니아 부식시험 단계	설 명
전처리	개방회로 조건에서 강도 5 kWh/m²의 태양광에 노출
초기 측정	10.1* 육안검사 10.2* 최대출력 결정 MST16** 유전내력 시험 10.15* 습윤 누설 시험 MST13** 접지 지속성 시험
부식 시험	ISO 6988 에 따른 암모니아 저항시험, 이산화황 대신에 암모니아 가스 사용
회복	클리닝과 회복(recovery)
최종 측정	10.1* 육안검사 10.2* 최대출력 결정 MST16** 유전내력 시험 10.15* 습윤 누설 시험 MST13** 접지 지속성 시험
최종 측정	바이패스 다이오드 기능 시험

# 7.4.1 결정질실리콘 유리/포일 모듈에서 수행한 시험

작은 챔버에 30개의 서로 다른 소형모듈 샘플들과 새 챔버에 20개 이상의 풀 사이즈 모듈을 사용하여 일련의 시험들이 수행된다. 다양하게 기간을 바꾸면서 하는

Kesternich 기반 시험에 시료들을 제출하기 전후에 육안검사, 절연측정과 출력측정이 수행된다. 모든 샘플들은 최대 출력저하 5 % 미만의 권장 통과기준을 통과한다. 어떤 샘플도 절연 또는 습윤 누설 전류시험의 최소 요구사항에 불합격한 것은 없다. 후속 바이패스 다이오드 기능시험에서는 다이오드 불량이 없음을 보여준다.

그러나 육안검사는 현장에서 채취한 샘플에서 발견되는 것과 유사한 부식과 침식효과를 드러내 보인다. 실링, 양극 산화 처리된 알루미늄 프레임의 표면과 유리의 반사방지 코팅은 약간의 영향을 받는다. 잠재적으로 위태로울 수 있는 것은 백시트에서의 크기 10 µm의 작은 기공(그림 7.4.1과 그림 7.4.2 참조)을 발견한 것인데, 이는 백시트의 바깥층과 암모니아의 화학반응으로 인한 것이다.



р — 20 µт —

그림 7.4.1: 암모니아 시험 전 백시트의 주사전자현미경 이미지

그림 7.4.2: 암모니아 시험 후 백시트의 주사전자현미경 이미지. 작은 기공(직경 10 µm)을 볼 수 있다.

# 7.4.2 유리가 없는 모듈의 시험

암모니아 시험 IEC 62716은 평판 모듈에만 적용된다. 시험절차는 유리가 없는 플렉시블 모듈에도 적용할 수 있어야 하는데, 이 모듈은 1 mm 두께의 금속 시트에 접착된 비정질 실리콘 태양전지를 사용한 것으로 길이가 3 m 이상이다. 모듈의 길이로 인해 펄스형 솔라 시뮬레이터로 성능측정이 불가능하다. 암모니아 노출 전후에 모듈은 43 kWh/m<sup>2</sup> 빛에 노출되며 최대출력은 광조사(light-soaking) 조건 하에서 지속적으로 기록된다. 또한 암모니아 노출 동안에 하나의 모듈을 폴리에틸렌 포일로 감싸 암모니아 수용액의 효과는 억제하고 기체 암모니아의 작용이 가능하도록 한다.

상술한 바와 같이 금속판의 부식에 대한 효과에 있어서는 그 차이가 분명하다. 포일로 감싼 모듈의 금속시트는 덜 부식된다. 두 모듈의 전기적 성능은 비슷한데 : 첫 번째 광조사 단계에서 모듈은 예상대로 열화된다. 암모니아 노출 후 최대 출력은 첫 번째 광조사후 값의 70 %로 감소한다. 두 번째 광조사 단계에서 모듈은 초기 빛 흡수 후 값의 80 %로 회복되었다. 이들 측정은 유연한 모듈의 출력 결정 오류가 10 % 정도이지만 비정질실리콘 또는 TCO 층에 대한 기체 암모니아의 부정적인 영향을 시사한다.

암모니아 시험 챔버에서 품질이 좋은 모듈에 대한 연속검사에서는 정션 박스(바이패스 다이오드 시험) 내부 또는 절연 그리고 성능에서 중대한 불량은 없음을 보여준다. 그러나 육안검사 결과 현장에서 채취한 샘플에서 발견된 것과 유사한 경미한 부식과 침식효과가 나타났다. 암모니아 부식시험에서 잠재적으로 위태로울 수 있는 발견은 백시트에서 직경 10 µm의 작은 기공과 유리를 사용하지 않는 모듈의 출력손실이었다. 특히 이런 건물에 적용된 지붕일체형 시스템은 암모니아 대기에 지속적으로 노출되고 모듈에 응축될 가능성이 다분하다. 물과 가스 혼합물은 부식성이 있어서 모듈과 구성품의 내구성에 잠재적인 위험이 될 수 있다.

실제 수명 기간 동안에 미치는 영향과 관련되는 암모니아 농도와 시험기간을 벤치마킹하기 위한 조사가 계속되고 있다. 가속인자를 결정하기 위한 목적으로, 암모니아 시험 챔버에서와 농촌 지붕에서의 노출을 위해 폴리카보네이트와 황동으로 구성한 비교 샘플을 사용하는 연구가 수행되고 있다.

## 참고문헌

[DIN50018] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) 50018: 2013-05 Prüfung im Kondenswasser-Wechselklima mit schwefeldioxidhaltiger Atmosphäre (Testing in saturated atmosphere in the presence of sulphur dioxide)

[ISO6988] Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) Europäische Norm (EN) ISO 6988:1997-03 Metallische und andere anorganische Überzüge (Metallic and other non-organic coatings - Sulfur dioxide test with general condensation of moisture), Edition March 1997

[IEC61215] International Electrotechnical Commission (IEC) 61215: 2nd ed. 2005, Crystalline silicon terrestrial photovoltaic modules - Design qualification and type approval

[IEC61646] International Electrotechnical Commission (IEC) 61646: 2nd ed. 2008. Thin-film terrestrial photovoltaic modules - Design qualification and type approval

[IEC61701] International Electrotechnical Commission (IEC) 61701: 2nd ed. 2011. Salt mist corrosion testing of photovoltaic (PV) modules, Edition 2.0 2011-12

[IEC61730] International Electrotechnical Commission (IEC) 61730-2: Photovoltaic (PV) module safety qualification – Part 2: Requirements for testing, ed. 1.0 2004-10

[IEC62716] International Electrotechnical Commission (IEC) 62716: 2013 Photovoltaic (PV) modules - Ammonia corrosion testing, Edition 1.0 2013-06-27 [INRES06] Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz (INRES), Bonn University, 2006: Forschungsbericht Nr. 138-"Biofilters in livestock farming as a relevant source of nitrous oxide and ammonia"

[Mathiak12] G. Mathiak, J. Althaus, S. Menzler, L. Lichtschläger, W. Herrmann, PV Module Corrosion from Ammonia and Salt Mist - Experimental Study with Full-Size Modules, 27th EUPVSEC, WIP, Frankfurt, Germany, 2012, pp. 3536 - 3540.

[Petzold11] K. Petzold, Ammonium hydroxide attacks panels, *PV Magazine* **09** (2011), pp. 220-223.

# 7.5 결정질실리콘 모듈의 PID 시험

실험실에서 시스템전압 스트레스 효과에 대한 내구성 측정은 일반적으로 명판에 표시된 모듈의 정격 시스템전압과 같은 고전압을 단락된 모듈의 도선에 인가하고 그리고 다양한 방법으로 모듈 외부표면을 접지하여 수행한다. Jet Propulsion Laboratory [Mon84, Mon85a, Mon85b]는 다양한 모듈 기술을 대상으로 그리고 이 목적을 위해 제작된 결정질 실리콘 미니 모듈에서 시스템전압의 영향을 처음으로 연구하였다. 그들은 또한 열화의 함수로 이동된 전기량을 연구했고, 모듈 프레임 가장자리로 약 1 C/cm가 이동된 후 모든 경우에서 극심한 열화를 발견하였다. 일부 경우에서는, 이 임계값 이전에 상당한 열화를 볼 수도 있다. 누설전류는 모듈소재에 따라 다르고, 이들 소재 내의 온도와 습도에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 이온 전류가 PID 메커니즘의 기본이라는 것을 이해하고 있음에도 불구하고, 누설전류는 열화 정도의 약한 지표로 간주되는데, 이는 결정질 실리콘 태양전지 기술에 영향을 미치는 많은 외부 인자들 때문이다[Hattendorf12].

문헌에 의하면, PID 시험을 위해 시스템전압 하에서 모듈에 스트레스를 주는 것은 25~85℃까지의 범위에서 수행되었다. 그림 7.5.1은 전압 스트레스를 가하는 회로의 예를 보여준다. 접지는, 전도성 매체(페이스트, 젤)를 이용하고, 젖은 응축수 또는 젖은 타월로 모듈표면에 흡착된 습기 자체를 사용하여, 그리고 금속포일로 모듈의 표면을 감싼 상태로 고온고습 챔버에서 수행되었다. 안정성과 재현성을 확인하기 위해 누설 전류를 모니터링 할 수도 있다. 시험을 선택하는데 있어 주요 고려사항에는 자연환경에 존재하는 스트레스의 묘사, 재현성 그리고 편의성이 포함된다.



그림 7.5.1: 단락 도선을 통해 모듈의 활성층에 전압인가. 이 사례에서 누설전류는 접지에 연결된 저항 R1을 통해 전압계로 모니터링된다. 전압계는 제 2 저항 R2에 의해 과전압으로부터 보호될 수 있다[Hacke11]. 대안으로 누설전류를 계량하는 고전압 전원공급 장치를 사용할 수도 있다.

일부 기관에서는 모듈 표면을 접지하기 위해 필름 포일 사용을 선호하였다. 상당수의 회사가 25°C에서 168시간 동안 이러한 시험을 수행하고 있다[Schütze11]. 일부는 이 접지 방법으로 시험을 더 높은 온도(50°C, 60°C, 70°C)로 수정하고 시험기간을 단축했다 [Hattendorf12, Dietrich13]. 그러나 이러한 다양한 스트레스 수준의 의미를 이해하고 실제 조건과 동등함을 보여주기 위해 옥외에서 수행된 체계적인 장기시험은 없으며 현재 발표된 이러한 포일 시험의 실험실 간 반복성을 보여주는 정보도 없다. 비교를 위해 주어진 모듈 설계를 시험할 때는 문제가 되지 않지만, 고체의 전도체 필름을 사용하면 작은 에지 클램프나 후면 레일 사용과 같은 모듈 프레임 설계의 모든 구성요소를 우회할 수 있는데, 이들은 활성 셀 회로로부터 접지로의 저항경로를 증가시킬 수 있고 그리고 PID와 관련된 유리를 관통하는 이온전류를 느리게 할 수 있다[Hacke13a]. 따라서 의미 있는 결과를 얻기 위한 최적의 시험조건을 이해하고 금속 포일과 같은 필름 전도체로 접지한 시험의 한계를 이해하려면 더 많은 작업이 필요하다.

흡착된 습도 자체가 아닌 다른 전도체를 사용하지 않는 고온고습 챔버는 시스템전압 스트레스 테스트에도 사용된다. IEC 61215 Ed. 2에서 시작된 시험에는 시스템 전압 바이어스를 적용한 온도 85℃, 상대습도 85 %인 조건이 존재하는데[Koch12]; 그러나 이 영역에서 확장된 시험은 실리콘 질화물 분해와 번갈아 발생하는 유리 프릿을 포함하는 금속-실리콘 계면의 용해와 같은 열화 메커니즘으로 이어질 수 있다[Hacke13b]. 60°C의 낮은 온도와 85 %의 상대습도와 - 600 V 시스템전압에서 96시간 동안 약 5 %의 성능열화를 보여준 모듈 설계를, 플로리다에서 낮 시간 동안 셀 회로에 - 600 V를 인가하는 옥외시험도 하였는데, 28개월 동안 안정적인 출력을 보여주었다. 60℃ 에서 5 % 이상 열화된 모듈은 옥외시험에서는 PID로 인해 불합격(fail) 평가를 받는다[Hacke12]. 그 이후로 이 스트레스 시험을 통과하지 못한 다른 모듈도 자연환경에서의 PID로 인해 불합격된 것으로 밝혀졌다[Hacke13c].

두 개의 모듈설계를 대상으로 60°C와 85 % 상대습도에서 5개의 시험기관들 간에 시험의 반복성이 조사되었다. 극성 당 2개의 모듈 샘플을 사용하여, 시험의 일관성이 만족스러운, 5 %의 합격/불합격 기존에서 PID 문제가 있는 모듈을 구별할 수 있음이 확인되었다. 챔버를 균일하고 정확한 온도와 상대습도에 유지시킴에도 불구하고 온도 상승 중 차가운 모듈 표면의 불균일한 수분은 주의를 요하는 문제로 나타났다[Hacke13c]. 이들 시험방법들을 더욱 구체화하기 위해 추가적인 시험과 시험기관들 간 라운드 로빈(round robin) 비교가 수행되고 있다.

낮 시간 동안의 자연환경의 스트레스를 시뮬레이션하기 위해 스페인 시험이라고 하는 다중 시퀀스 시험이 고안되었다[Nagel12]. 그 절차에는 고전압, 온도와 습도가 적용된 초기 단기 가속시험 단계가 있고, 이어서 상대습도 85 %에서 24시간, 야간에는 저온에 전압인가 없이, 주간에는 바이어스 전압을 인가하면서 75°C까지 종 모양의 온도곡선을 적용하는 가혹한 기후 사이클 시험이다. 일부 경우에는, 지속적인 성능열화가 발생하는 반면 다른 PID에 취약한 모듈에서는 출력회복이 보인다.

PID 결정에 대해 세계적으로 인정된 규격은 아직 없다. 위의 개발 결과는, 시스템전압, 습도와 온도의 조합이라는 스트레스에 모듈이 견딜 수 있는지를 관찰하기 위한 일반적인 시험을 정의하는 것으로 간주되고 있다. IEC 62804 Ed. 1. "결정질실리콘 모듈에 대한 시스템전압 내구성 적격성 시험(System Voltage Durability Qualification Test for Crystalline Silicon Modules)"은 이런 요구에 대응하기 위해 현재 개발 중인 규격이다.

#### 참고문헌

[Dietrich13] S. Dietrich, J. Froebel, M. Ebert, J. Bagdahn, Experiences on PID Testing of PV Modules in 2012, Proc. Photovoltaic Module Reliability Workshop (NREL, Golden, Colorado, USA, Feb. 26–27, 2013), http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pvmrw 2013.html

[Hacke11] P. Hacke K. Terwilliger, R. Smith, S. Glick, J. Pankow, M. Kempe, S. Kurtz, I. Bennett, M. Kloos, "System voltage potential-induced degradation mechanisms in PV modules and methods for test," 37th PVSC, (IEEE, Seattle, USA, 2011), pp. 814-820

[Hacke12] P. Hacke, Considerations for a Standardized Test for Potential Induced Degradation of Crystalline Silicon PV Modules, Proc. Photovoltaic Module Reliability Workshop (NREL, Golden, Colorado, USA, Feb. 28–Mar. 1, 2012), http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pvmrw 2013.html

[Hacke13a] P. Hacke, R. Smith, K. Terwilliger, G. Perrin, B. Sekulic, and S Kurtz, Development of an IEC test for crystalline silicon modules to qualify their resistance to system voltage stress, submitted 28th EU PVSEC (WIP, Paris, France, 2013), 4DO.1.5

[Hacke13b] P. Hacke, R. Smith, R., K., Terwilliger, S. Glick, D. Jordan, S. Johnston, M. Kempe, S. Kurtz, Testing and Analysis for Lifetime Prediction of Crystalline Silicon PV Modules Undergoing Degradation by System Voltage Stress, *IEEE Journal of Photovoltaics* **3** (1) (2013), pp. 246-253, doi: 10.1109/JPHOTOV.2012.2222351

[Hacke13c] P. Hacke K. Terwilliger, S. Koch, T. Weber J. Berghold PI-Berlin, S Hoffmann, M. Koehl, Initial Round Robin Results of the IEC 62804 (draft) System Voltage Durability Qualification Test for Crystalline Silicon Modules, Proc. Photovoltaic Module Reliability Workshop (NREL, Golden, Colorado, USA, Feb., 26-27, 2013), <u>http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvmrw13 ps4 nrel hacke.pdf</u>

[Hattendorf12] J. Hattendorf, R. Loew, W.-M. Gnehr, L. Wulff, M. C. Koekten, D. Koshnicharov, A. Blauaermel, J. A. Esquivel, Potential Induced Degradation in Mono-Crystalline Silicon Based Modules: an Acceleration Model, 27th EUPVSEC (WIP, Frankfurt, Germany, 2012), pp. 3405-3410, DOI: 10.4229/27thEUPVSEC2012-4BV.2.51

[Koch12] S. Koch, J. Berghold, D. Nieschalk, C. Seidel, O. Okoroafor, S. Lehmann, S. Wendlandt, Potential Induced Degradation Effects and Tests for Crystalline Silicon Cells, Photovoltaic Module Reliability Workshop (NREL, Golden, Colorado, USA, Feb. 28–Mar. 1, 2012), http://www1.eere.energy.gov/solar/sunshot/pvmrw 2012.html

[Mon84] G. R. Mon, J. Orehotsky, R. G. Ross, G. Whitla, Predicting Electrochemical Corrosion in Terrestrial Photovoltaic Modules, Proc. 17th PVSC (IEEE, Kissimmee, FL, USA, 1984), pp. 682-692

[Mon85a] G. R. Mon, R. G. Ross, Electrochemical Degradation Of Amorphous-Silicon Photovoltaic Modules, Proc.18th PVSC, (IEEE, Las Vegas, NV, USA, 1985), pp. 1142-1149

[Mon85b] G. R. Mon, L. Wen, R.G. Ross, Jr., D. Adent, Effects of temperature and moisture on module leakage currents, Proc. 18th PVSC (IEEE, Las Vegas, NV, USA, 1985), pp. 1179-1185

[Nagel12] H. Nagel, R. Pfeiffer, A. Raykov, K. Wangemann, Lifetime warranty testing of crystalline silicon modules for potential-induced degradation, 27th EUPVSEC, (WIP, Frankfurt, Germany, 2012), pp. 3163-3166, dio:10.4229/27thEUPVSEC2012-4DO.6.4

[Schütze11] M. Schütze, M. Junghänel, O. Friedrichs, R. Wichtendahl, M. Scherff, J. Müller, P. Wawer, Investigations Of Potential Induced Degradation Of Silicon Photovoltaic Modules, Proc. 26th EUPVSEC (WIP, Hamburg, Germany, 2011), pp. 3097-3102, DOI: 10.4229/26thEUPVSEC2011-4CO.5.4

# 7.6 실험실에서 확장된 IEC 시험

결정질실리콘 모듈의 제품인증은 IEC 61215 시험규격을 인용한다. 시험 프로그램에 정의된 스트레스 시험은 적시에 불량 발생을 촉진하기 위해 운영 스트레스 수준보다 높은 스트레스 수준에서 수행되는 단기 가속시험이다. 적격성시험은 신뢰성시험에 대한 최소 요구 사항으로 구성하며(비용과 시간의 합리적인 제약 내에서), 모듈이 소위 일반적이라고 할 수 있는 옥외 자연기후에서의 장기간 노출에 견딜 수 있는 능력을 실증한다.

일반적인 관점에서 IEC 적격성시험의 주요 목표는 현장에서 초기의 단기 신뢰성 문제를 확인하는 것이다. 그 결과 주로 초기에 제품불량이 탐지된다. 그러나 IEC 규격은 적격 제품의 실제 기대수명에 관한 결론을 내릴 수는 없다. 수명은 디자인, 환경과 제품이 동작하는 조건에 따라 달라진다는 점에 유의하여야한다.

그러나 확장된 시험이 실제 불량으로 이어지는지 아니면 실제 조건에서 발견되지 않는 불량으로 이어지는지 아는 것이 필요하다. 따라서 확장된 규격시험의 결과를 보여주고 이어서 이를 현장에서의 경험과 연계시키고자 한다.

## 7.6.1 확장시험의 결과

적격성 시험을 통해 모듈성능에 가장 큰 영향을 미치는 시험은 온도 사이클 시험과 온도와 습도가 모듈에 작용하는 시험이다. 그림 7.6.1은 고온고습 1,000시간, 1,500시간과 2,000시간 후 동일한 유형의 8개 모듈의 생산 출력의 변화를 보여준다. 분명히 이런 모듈들의 성능저하는 유사하게 진행되지 않는다. 이것은 예를 들어 Arrhenius 방정식을 사용하는 것과 같은 이론적 모델로 열화의 상관관계를 분석할 때 중요한 문제이다. 다른 유형의 모듈들의 열화 거동의 차이는 적격성시험 결과로부터 모듈열화를 예측하는데 방해가 된다.

그러나 IEC 61215에서 요구하는 시간의 두 배인 2,000시간의 고온고습에 노출된 후에도 8개 모듈 중 7개는 5 % 미만의 출력열화를 보여주었다. 그러나 열화는 분명하게 측정할 수 있었고 옥외에서의 열화와 비교하는데 도움이 되었다.



그림 7.6.1: 85℃/85 % RH[Herrmann11]에서 1,000시간, 1,500시간과 2,000시간 고온고습 시험 후 동일한 유형의 8개 모듈의 출력 변화.

그림 7.6.2의 EL 이미지에서도 볼 수 있듯이 2,000시간 고온고습 시험 후 다른 모듈의 출력열화는 4 %에 달했다. 시험을 3,000시간으로 더 연장하면 심각한 셀 열화가 발생한다. 모듈의 생산 출력은 28 % 감소한다. EL 이미지 상에서 셀의 바깥 부분은 완전히 어둡다. 셀 사이의 틈새에서 모듈 후면을 통해 확산된 수분은 셀 전면에 셀의 부식을 야기하였다. 이런 결과를 옥외 열화 거동과 비교하면, 3,000 시간 후에 모듈이 분명히 과도한 스트레스를 받은 것을 발견했는데, 왜냐하면 수증기 침투에 의한 이런 극심한 열화가 일어나는 모듈은 현장에서는 수십 년 동안 노출 된 후에도 거의 발견할 수 없기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 약간의 갈변을 보인 하나의 모듈(5.3.1 비교)이 있긴 하지만 5.3.5와 5.3.6 장에 기술한 박리나 접착강도 손실은 관찰되지 않았다.

스트레스 유형은 다르지만 생산 출력손실과 관련하여, 온도 사이클(TC) 시험의 연장은 비슷한 결과로 연결된다. 그림 7.6.3은 서로 다른 회사에서 제조한 7개 결정질 모듈의 결과를 보여주는데, 200, 400과 600 사이클 동안 TC 시험을 받고 각 서브시험 후에 재측정 한 것이다. 두 배의 스트레스에서는 모든 모듈의 출력손실이 IEC 61215에서 설정한 한계 내로 유지되었다. 모듈 중 하나에서 상당한 열화를 관찰하기 위해서는 또 다른 200 사이클 시험이 필요했다. 800 사이클 후에도 3개의 모듈은 5 % 미만의 출력열화를 보여주었다.



그림 7.6.2: 1,000시간, 2,000시간, 3,000시간 고온고습(85°C/85 %) 시험 후 모듈의 전계발광 이미지. 좌로부터 우로 생산 출력이 각각 -1 %, -4 %, -28 % 감소하였다 [Herrmann11].



그림 7.6.3: 200, 400, 600 그리고 800 온도 사이클 이후 7개 모듈의 생산 출력 변화 [Herrmann11].

온도의 빈번한 변화는 셀 상호연결을 마모시키는 것으로 알려져 있다. 온도 사이클 시험은 모듈 내에서의 취약한 연결부위를 드러낸다. 그림 7.6.4는 각각 200, 400과 600 사이클 후 모듈의 EL 이미지를 보여준다. 사이클 수가 증가하고 200 사이클 후에는 어두운 영역에서 분명히 알 수 있듯이 점점 더 많은 수의 버스바 연결이 끊어진다. 이러한 연결부위의 단절 중 일부는 영구적으로 지속되지 않을 수 있지만(빨간색 마커 참조) 일반적으로 사이클 수가 증가하면 생산 출력이 감소한다. 결과는 열화가 더 심해지는 것이다. 버스바가 파손된 셀 간의 불균일한 전류 분포로 인해 고온 또는 열점들이 발생할 수 있다. 접촉이 느슨해지면 아크가 발생할 수도 있다.



그림 7.6.4: 200, 400과 600 온도 사이클(IEC 61215 규격 준수) 후의 전계발광 이미지, 어두운 영역은, 항상 영구적인 것은 아닐 수 있지만 버스바의 단절을 나타낸다.빨간색 마커를 참조하라[Herrmann11].

# 7.6.2 가속시험과 현장경험

이러한 확장된 스트레스 시험이 현장에서 발생하는 실제 충격을 제대로 반영하는지에 대한 의구심으로 그 상관관계의 의미가 손상을 받을 수 있다. 결과적으로 확장된 스트레스 시험들은 현장의 모듈에게는 어떤 특정 방식으로는 발생하지 않는 성능열화를 생성하는 과도한 스트레스를 줄 수도 있다.

셀 상호연결 리본과/혹은 납땜 본드의 불량은 실리콘 모듈의 불량을 유발할 수 있다는 많은 연구가 있다[Degraaff11, Kato02, Munoz08, Wohlgemuth93]. 주입된 전류를 사용한 온도 사이클 시험은 모듈의 조기 불량으로 이어지는 설계 결함을 확인시켜주는 것으로 입증되었지만, 일반적으로 적격성시험에 사용되는 200회 사이클은 약 20년의 보증기간을 보장하기에는 부적절하다고 보고되었다 [Wohlgemuth05, Bosco10]. 더 긴 온도 사이클이 보증 기간 내에 현장 불량을 줄이는 데 유용할 것이라는 증거가 있지만, 얼마나 많은 사이클이 필요한지 그리고/혹은 온도 사이클로 인한 손상이 기후에 따라 크게 변하는지 여부는 명확하지 않다. 수백 개의 온도 사이클을 추가하면 시험에 상당한 시간이 추가되므로 손상율을 높일 수 있는 다른 전략을 탐색하는 것이 더 유용하다. 위에서 언급했듯이 800 사이클 이상을 견딜 수 있는 모듈의 제작은 가능하다(그림 7.6.3 참조).

모듈의 내구성이 더 높다는 것을 입증하려고 시도할 때 일반적으로는 고온고습 시험을 2,000시간, 3,000시간 이상으로 늘렸다. 그러나 3,000시간은 현장에서 보고되지 않은 불량을 일으키는 것으로 보고되었다. 예를 들어, 그림 7.6.2는 현장에서 아직 보고되지 않은 태양전지의 전면 실버 핑거 전극의 분리를 보여준다. 따라서 통기성 백시트가 있는 모듈에 3,000시간의 고온고습을 적용하는 것이 현장에서의 수명을 예측하는 데 어떤 가치가 있는지는 확실하지 않다. 그러나 가장자리 실링을 한 두 장의 유리를 사용하여 모든 습기를 차단하려고 시도한 모듈은 노화가 매우 다르게 일어나고 그리고 최근 한 논문에 따르면, 현장에서의 20년에 가까운 동안의 옥외 노출을 시뮬레이션 하는데 있어 3,000시간이 가장자리 실링을 통한 수분 움직임을 정량화하는데 적절할 수 있다고 추정한다[Kempe12]. 그럼에도 불구하고 현장 성능의 예측 인자로서 3,000시간의 고온고습 시험 값은 아직 보고되지 않았다.

더 긴 온도 사이클과 고온고습의 영향에 대한 탐구 외에도 더 긴 자외선 노출의 필요성에 대한 실질적인 논의가 있었다. 적격성시험에 사용된 자외선 노출은 모듈 수명기간 동안 예상되는 자외선 선량의 극히 일부에 불과하다. 역사적으로 EVA 제조업체는 더 긴 시간 자외선 노출을 적용하여 공식을 최적화했지만 이러한 유형의 시험이 적격성시험에는 채택되지 않았다. 한 리뷰에 따르면, 장기간 설치한 결정질 실리콘 모듈 대부분에서 봉지재의 변색이 어느 정도 나타나지만[Jordan12], 그럼에도 불구하고 일부 열화 메커니즘의 복잡성으로 인해 봉지재에 대한 가속 시험결과를 옥외 시험결과와 연계시키는 것이 어려울 수 있다.

# 참고문헌

[Bosco10] Nick Bosco, Sarah Kurtz, "Quantifying the Weather: an analysis for thermal fatigue", Proc. PV Module Reliability Workshop (NREL, Golden, CO, US, May 23, 2011), http://www1.eere.energy.gov/solar/pv\_module\_reliability\_workshop\_2010.html.

[Degraaff11] D. DeGraaff, R. Lacerda, Z. Campeau, Degradation Mechanisms in Si Module Technologies Observed in the Field; Their Analysis and Statistics, Proc. PV Module Reliability Workshop (NREL, Golden, Golden, USA, 2011) http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvmrw2011\_01\_plen\_degraaff.pdf

[Herrmann11] W. Herrmann, N. Bogdanski, Outdoor weathering of PV modules — Effects of various climates and comparison with accelerated laboratory testing, 37th PVSC, (IEEE, Seattle, USA, 2011), pp. 2305 - 2311, doi: 10.1109/PVSC.2011.6186415 [Kato02] K. Kato, "PVRessQ!": A Research Activity on Reliability of PV System from an user's viewpoint in Japan, Proc. Optics + Photonics 8112 (SPIE, San Diego, California, USA, 2011), 811219

[Kempe12] M.D. Kempe, M.O. Reese, A.A. Dameron, D. Panchagade, Long term performance of edge seal materials for PV applications, Proc. SPIE Optics + Photonics, Reliability of photovoltaic cell, modules and systems V, OP206 (San Diego, CA, USA, August 12-16, 2012)

[Munoz08] J. Munoz, E. Lorenzo, F. Martinez-Moreno, L. Marroyo and M. Garcia, An Investigation into Hot-Spots in Two Large Grid-Connected PV Plants, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* **16** (8) (2008), p. 693–701

[Wohlgemuth05] J.H. Wohlgemuth, D. W. Cunningham, A.M. Nguyen and J. Miller, Long Term Reliability of PV Modules, 20th EU PVSEC, (WIP, Barcelona, Spain, 2005), p. 1942

[Wohlgemuth93] J.H. Wohlgemuth, R.C. Petersen, in Reliability of EVA modules, Proc. 23rd PVSC (IEEE, Louisville, KY, USA, 1993), p. 1090-1094

# 8 결 론

모듈은 여러 가지 방식으로 성능이 열화하거나 적격성시험에 불합격할 수 있다. 불량의 유형은 모듈의 설계(또는 설계의 불량)와 모듈이 설치된 환경에 따라 크게 달라지지만 보고 된 내용에 대한 통계적 평가는 가장 흔한 불량 중의 일부를 이해하는 데 도움이 된다. Hasselbrink는 최근 약 20개 제조업체로부터 300만개 이상의 반환된 모듈의 데이터를 요약하였다[Hasselbrink13]. 연구에 따르면 모듈의 0.44 %는 평균 5년의 설치 후 반환되었으며, 대부분(~66 %)은 라미네이트의 상호연결 문제(예 : 리본과 납땜 본드 파손)로 인해 반환되었다. 반품에 대한 두 번째로 가장 흔한 이유(~ 20 %)는 백시트 또는 봉지재 문제 (예 : 박리) 때문이었다. 따라서 시각적으로 결함이 없는 모듈은 고객이 확인하기 더 어렵기 때문에 이 데이터에 편향이 있을 수 있지만 반환된 대부분은 일반적으로 시각적으로 확인할 수 있는 불량과 관련이 있었다.

모듈은 일반적으로 현장에서 서서히 열화되는 것으로 관찰되기 때문에 불량으로 제조업체에 반환된 모듈만 고려해야하는 것은 아니다. 그림 8.1은 실리콘 모듈의 열화율에 대한 약 400개의 보고문헌을 요약한 것이다[Jordan13]. 열화는 단락전류의 손실에 의해 좌우된다. 대부분의 경우 연구진은 이런 단락전류의 감소가 봉지재의 변색과/혹은 박리와 관련이 있음을 관찰하였다. 따라서 모듈 반환에 대한 통계와 느린 속도의 열화에 대한 통계는 시각적으로 관찰할 수 있는 메커니즘과 상관관계가 있는 것으로 보인다. 보다 정교한 조사가 더 바람직할 수도 있겠지만 시각적 관찰결과는 수집의 단순성으로 훨씬 큰 규모 모듈들의 세트를 수집할 수 있고 그리고 변화의 발생유형들과 환경을 연계시킬 수 있다. 분석을 크게 단순화하여 체계적인 형식으로 데이터를 수집할 것을 제안한다.



그림 8.1: 출력, 전류, 전압에 대한 최대출력점 값의 열화율. (좌): 단결정실리콘, (우): 다결정실리콘. 눈 기준으로 점선은 성능열화가 없음을 나타낸다. 네거티브 열화는 개선을 의미한다. 기호 N은 통계에서의 모듈 수를 나타낸다[Jordan13].

데이터 수집을 위한 규격화된 방법과 형식이 개발되었으며 IEA Task 13 회원들이 여러 데이터 세트를 제공하였다. 정의상의 모호함을 피하기 위해 규격화된 형식으로 수정되었다. 공유된 데이터 세트를 분석한 결과 샘플 세트를 획득한 방법을 정의하기 위해서는 추가적인 현장 데이터가 필요하다는 사실을 발견했다. 예를 들어 표 8.1은 모듈 선택 프로세스에 따라 매우 다양한 결과를 보여준다. 표 8.1의 각 데이터 세트들은 가장 일반적으로 관찰되는 상위 5개 결함들을 기반으로 채워진다.

표 8.1: 다양한 선택 방법을 사용하여 Task 13 멤버들로부터 확보한 데이터 세트의 요약.

	I S F H 1	I S F H 2	T U V	I N E S	N R L 1	N R L 2	N R L 3	N R L 4	A I T 1	A I T 2
모듈의 개수	33	10	4	3	32	18	18	16	38	5
백시트										
백시트-찌그러짐/균열/스크래치/박리	58%	100%	75%						24%	
백시트-박리								100%		
백시트-변색			50%							
백시트-초크								100%		
배선/커넥터/정션박스/프레임										

배선 열화	45%	80%							
커넥터 열화				33%					
정션 박스 노후	30%				100%				
프레임 손상		100%	25%	33%				11%	
프레임 접착제 문제									40%
프레임 접지 부식							100%		
유리/가장자리 실링									
유리의 스크래치 조각					81%				
유리 균열						6%			
유리 변색(희부연 색)								8%	40%
프레임 없는 가장자리 실링 열화					100%				
오염	94%							21%	
금속전극									
그리드 선 문제						78%			40%
버스바 정열 오류				33%					
셀 상호연결부 변색						100%	100%		
스트링 상호연결부 변색					100%		100%		
실리콘									
실리콘-변색	30%							39%	100%
실리콘-이물질 매몰		30%							
실리콘-박리						100%			60%
실리콘-손상 탄 자국						6%			
박막									
박막-균열				33%					
박막-박리				33%					

제안된 육안검사 도구가 널리 채택되면 다양한 데이터 발굴과 분석기술이 모듈 성능열화와 불량을 이해하는데 유용할 수 있다. 기본분석들에는 단일 위치에서의 동일한 모듈세트 중에서 가장 자주 관찰되는 결함들의 확인이 포함된다. 이러한 유형의 연구를 확장하면 Sanchez-Friera 등의 접근방식과 유사하게 어떤 결함이 성능 저하율과 관련이 있을 가능성이 더 높고 어떤 결함이 해가 되지 않을 가능성이 더 높은지 확인하는 방법을 모색할 수 있다[Sanchez-Friera11]. 보다 포괄적인 연구는 현장에서의 동일한 노출시간 동안 단일 위치 [Dunlop06, Ishii11] 또는 여러 위치에서 유사한 모듈 유형의 데이터를 비교한다. 여기에서 개발된 데이터 수집방법을 사용하면 이런 연구 내에서 그리고 연구 간의 비교가 크게 단순화된다. 환경 노출로 인해 발생하는 열화 문제는 결함 빈도와 위도와 경도 데이터의 연결을 통해 기후대와 연관시킬 수 있다. 매우 큰 데이터 세트에 대한 통계분석은 특정 결함 또는 결함 그룹 간의 미묘한 연결과 모듈의 전기적 성능 특성과의 상관관계를 드러내 보여줄 수 있다. 이러한 유형의 데이터는 현재 제한적으로 공급되고 있지만 현장 열화 연구를 기반으로 신뢰성을 평가하기 위한 분석 프레임 워크가 개발 중이다[Vazquez08]. 시각적으로 관찰 가능한 결함이 전기적 성능 열화율 측정과 상관관계가 있거나 결정적으로 연결될 수 있는 경우, 육안검사는 발생하는 결함의 빈도와 유형에 따라 어떤 모듈이 가속된 성능 열화를 보일 가능성이 더 높은지 그리고 일어나는 결함들의 유형을 평가하는데 비교적 충격이 적은 방법이 될 수 있다.

지난 Task 13 project 단계에서 "태양광모듈의 불량 특성화와 분류(Characterising and Classifying Failures of PV Modules)"를 태양광 연구 분야에서 진행 중인 중요한 주제로 인식하고 있다. 현재의 불량 메커니즘 검토에 따르면 일부 중요한 모듈 불량의 원인과 출력손실 평가가 아직 명확하지 않거나(달팽이자국, 셀 균열) 혹은 커뮤니티가 특정 불량(PID, 셀 균열 평가 시험)에 대한 시험을 어떻게 할 것인지에 대한 물음이 빠져있다. 또한 모듈에서 바이패스 다이오드의 결함 또는 셀 상호연결 리본의 결함으로 인해 화재가 발생할 수 있다는 사실에도 불구하고 시스템에서 이러한 결함을 쉽고 신뢰할 수 있는 방식으로 탐지하기 위한 작업이 거의 없었다. 현재 이 주제에 대해 작업하는 그룹이 있는데, Task 13 프로젝트의 범위에서 태양광 모듈의 불량에 대한 검토를 계속할 것을 제안한다.

### 참고문헌

[Dunlop06] E. D. Dunlop and D. Halton, The performance of crystalline silicon photovoltaic solar modules after 22 years of continuous outdoor exposure, *Progress in Photovoltaics* **14** (2006), pp. 53-64, doi 10.1002/Pip.627

[Hasselbrink2013] E. Hasselbrink, M. Anderson, Z. Defreitas, M. Mikofski, Y.-C. Shen, S. Caldwell, A. Terao, D. Kavulak, Z. Campeau, D. DeGraaff, Site Data Validation of the PVLife Model Using 3 Million Module-Years of Live, Proc. 39th PVSC (IEEE, Tampa, FL, USA, 2013) in press

[Ishii11] T. Ishii, T. Takashima, and K. Otani, Long-term performance degradation of various kinds of photovoltaic modules under moderate climatic conditions, *Progress in Photovoltaics* **19** (2011), pp. 170-179, doi 10.1002/Pip.1005

[Jordan13] D. C. Jordan, J. H. Wohlgemuth, and S. R. Kurtz, Technology and Climate Trends in PV Module Degradation, Proc. 27th EUPVSEC (WIP, Frankfurt, Germany, 2013), to be published

[Sanchez-Friera11] P. Sanchez-Friera, M. Piliougine, J. Pelaez, J. Carretero, and M. S. de Cardona, Analysis of degradation mechanisms of crystalline silicon PV modules after 12 years of operation in Southern Europe, *Progress in Photovoltaics* **19** (2011), pp. 658-666, doi 10.1002/Pip.1083

[Vazquez08] M. Vazquez and I. Rey-Stolle, Photovoltaic module reliability model based on field degradation studies, *Progress in Photovoltaics* **16** (2008), pp. 419-433, Doi 10.1002/Pip.825

# 부록 A: 모듈 상태 체크리스트

#### 현장 노출된 모듈상태의 문서화

일자	데이터 기록자 이름	
위치		
위도	경도	고도

#### <u>1. 시스템 데이터</u>

시스템 설계: 🛛 단일 모듈 🔅 다수 모듈 (a.) 🗆 모름
(a.) 다수 모듈 시스템 □ 적용 불가
모듈 위치/직렬 스트링의 개수 (음극으로부터)
직렬 모듈의 개수 (스트링) 병렬 모듈의 개수 (어레이)
바이패스 다이오드의 개수 바이패스 다이오드 당 모듈의 개수
시스템 바이어스: 🛛 개방 회로 🗆 저항 부하 🗆 최대출력 추적
□ 단락 회로 □ 모름
시스템 접지: 🛛 접지된 (a.) 🗆 접지 안 됨 🗆 모름
(a.): □ 음극 □ 양극 □ 스트링의 중앙 □ 모름

#### 모듈의 후면부터 검사 시작

#### <u>2. 모듈 데이터</u>

태양전지	기술: □ 단결정 S	i □ 다결정 Si □ a-Si □ CdT	e 🗆 CIGS/CIS
	기타 :		
인증서:	□ 모름 □ UL 1703	3 🗆 UL 61730 🗆 IEC 61215	□ IEC 61646
	□ IEC 61730 □	기타 :	
추정 설치	일자:		
명판 사진	촬영: □예 □아님		
제조업처			
모델 번호	፰ 		
시리얼 변	번호		
설치 사여	이트/시설 시리얼 번호	र् <u>र</u>	
폭	cm 길이	cm	
명판: 🗆	명판 없음		
최대출력	{(Pmax)	개방전압(Voc)	단락전류밀도(Jsc)
시스템전	1압	_ 최대전압(Vmax)	최대전류(Imax)
바이패스	- 다이오드		
시리즈 퓨	퓨즈(Series fuse)		

#### <u>3. 후면 유리</u>: 🛛 적용 불가 🗆 적용 가능

손상: □ 손상 없음 □ 작음, 국부적 □ 광범위

#### 손상 유형 (해당사항 모두 표시):

□ 잔금 혹은 기타 비균열 손상 □ 산산조각 (강화유리)

- □ 산산조각 (비강화유리) □ 균열 (a.) □ 칩핑 (b.)
- (a.) 균열 개수: □ 1 □ 2 □ 3 □ 4-10 □ >10

균열의 시작: 🛛 모듈 모서리 🗆 모듈 가장자리 🗆 셀 🗆 정션 박스

- 🗆 이물질 충격 위치
- (b.) 칩 개수: □ 1 □ 2 □ 3 □ 4-10 □ >10
  - 칩핑 위치: □ 모듈 모서리 □ 모듈 가장자리

#### <u>4. 백시트</u>: 🗆 적용 불가 🗆 적용 가능

- □ 새것처럼 □ 약간의 변색 □ 진한 변색 외관: 텍스쳐: □ 새것처럼 □ 물결 모양(박리되지 않음) □ 물결 모양(박리) □ 움푹들어간 소재 품질 쵸킹: □ 없음 □ 약간 □ 상당히 심함 □ 손상 없음 □ 작음, 국부적 □ 광범위 손상: 손상 유형 (해당사항 모두 표시): □ 탄 자국(a.) □ 기포 (b.) □ 박리 (c.) □ 균열/스크래치 (d.) (a.) 탄 자국 개수: 01020304-100>10 탄 면적 비율: □ <5% □ 5-25% □50% □ 75%-100% (전체적인 일관성) (b.) 기포 개수: □ 1 □ 2 □ 3 □ 4-10 □ >10 기포 평균 크기: □ <5 mm □ 5-30 mm □ >30 mm 기포 면적 비율: □ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75%-100% (전체적인 일관성) (c.) 박리된 면적 비율: □ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75%-100% (전체적인 일관성) 회로나 셀을 노출시킨 박리의 비율: □ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75%-100% (전체적인 일관성) (d.) 균열/스크래치 개수: □ 1 □ 2 □ 3 □ 4-10 □ >10 균열/스크래치 위치: □ 무작위/패턴 없음 □ 셀 위에 □ 셀들 사이 균열/스크래치에 의해 영향을 받은 면적 비율 (대략): □ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75% - 100% (전체적인 일관성) 회로를 노출시킨 균열/스크래치의 비율 (대략): □ 0% □ 25% □ 50% □ 75% □ 100% 5. 배선(wires)/커넥터:
  - 배선:
     직용 불가 □ 새것 처럼 □ 유연하나 열화된 □ 부서지기 쉬운

     (해당사항 모두 표시):
     □ 균열/해체된 절연 □ 타버림

     □ 부식된 □ 동물 깨물기/자국

     커넥터:
     □ 적용 불가 □ 새것처럼 □ 유연하나 열화된 □ 부서지기 쉬운

     유형:
     □ unsure □ MC3 or MC4 □ Tyco Solarlok □ 기타

(해당사항 모두 표시): □ 균열/해체된 절연 □ 타버림 □ 부식된

#### 6. 정션 박스:

정션 박스 자체: □ 적용 불가/관찰 불가 □ 적용 가능 □ 온전한 □ 불안정 구조 물리적 상태: (해당사항 모두 표시): □ 풍화된 □ 균열된 □ 타버린 □ 뒤틀린 뚜껑: □ 온전한/potted □ 느슨한 □ 떨어진 □ 균열 정션 박스 접착제: □ 적용 불가/관찰 불가 □ 적용 가능 부착상태: □ 잘 부착된 □ 느슨한/취약한 □ 떨어진 유연성: 🛛 새것처럼 🗆 유연하나 열화된 🗆 부서지기 쉬운 정션 박스 배선 부착: □ 적용 불가/관찰 불가 □ 적용 가능 부착상태: □ 잘 부착된 □ 느슨한 □ 떨어진 실링: □ 양호 □ 리크 예상 기타: 🗆 아크/화재 시작

#### <u>7. 프레임 접지</u>:

원래 상태:	□ 배선 접지 □ 저항 접지 □ 접지 없음 □ 모름
외관:	□ 적용 불가 □ 새것처럼 □ 약간의 부식 □ 심한 부식
기능:	🗆 접지가 잘된 🗆 연결 없음
사진 촬영:	□ 후면, 라벨, 정션 박스

#### 모듈의 전면 검사 계속

#### 8. 프레임: □ 적용 불가 □ 적용 가능

외관: □ 새것처럼 □ 손상된 (a.) □ 없어진 (a.)(해당사항 모든 표시): □ 일부 부식 □ 중대한 부식 □ 프레임 연결부 분리 □ 프레임 균열 □ 프레임 휘어짐 □ 변색

#### <u>9. 프레임 없는 가장자리 실</u>링: □ 적용 불가 □ 적용 가능

외관: □ 새것처럼 □ 변색 (a.) □ 육안으로 열화 (a.) 변색으로 영향 받은 부분 □ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75%-100% (전체적인 일관성) 소재 문제: □ 압착/빠져나옴 □ 수분 침투의 징후 보임 박리: □ 없음 □ 박리된(a.) 면적(s.) (a.) 박리된 부분: □ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75%-100% (전체적인 일관성)

#### <u>10. 유리/폴리머 (프론트)</u>:

- 소재: □ 유리 □ 폴리머 □ 유리/폴리머 복합 □ 모름
- 특징: □ 매끄러운 □ 약간의 텍스쳐 □ 피라미드/물결 모양 텍스쳐 □ 반사방지 코팅
- 외관: □ 깨끗한 □ 약간의 오염 □ 심하게 오염된
- 오염의 위치: □ 국부적으로 오염된 가까운 프레임:
  - □ 왼쪽 □ 오른쪽 □ 위 □ 아래 □ 모든 면
  - □ 유리 위 국부적 오염/조류 배설물
- 손상: □ 손상 없음 □ 작은, 국부적 □ 광범위
- 손상 유형 (해당사항 모두 표시):
  - □ 잔금 혹은 기타 비균열 손상
  - □ 산산조각 (강화유리) □ 산산조각 (비강화유리)
  - □ 균열 (a.) □ 칩핑 (b.) □ 희부연(milky) 변색 (c.)
- (a.) 균열의 개수: □ 1 □ 2 □ 3 □ 4-10 □ >10
- 균열의 시작:
   □ 모듈 모서리 □ 모듈 가장자리 □ 셀 □ 정션 박스

   □ 이물질 충격 위치

   (b.) 칩의 개수:
   □ 1 □ 2 □ 3 □ 4-10 □ >10

   칩핑 위치:
   □ 모듈 모서리 □ 모듈 가장자리
- (c.) 면적의 부분: □ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75%-100% (전체적인 일관성)

#### <u>11. 금속전극 (Metallization)</u>:

그리드 선/핑거전극:	: 🛛 적용 불가/간신히 관찰 가능 🗆 적용 가능
외관:	□ 새것처럼 □ 약간의 변색 (a.) □ 진한 변색 (a.)
(a.) 변색 부분:	
	□ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75% -100% (전체적인 일관성)
버스바:	□ 적용 불가/관찰 불가 □ 적용 가능
외관:	□ 새것처럼 □ 약간의 변색 (a.) □ 진한 변색 (a.)
(a.) 변색 부분:	
	□ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75% -100% (전체적인 일관성)
(해당사항 모두:)	□ 명백한 부식 □ 탄 자국으로부터 확산
	□ 정렬 어긋남 구별 가능
셀 상호연결 리본:	□ 적용 불가/관찰 불가 □ 적용 가능
외관:	□ 새것처럼 □ 약간의 변색 (a.) □ 진한 변색 (a.)
(a.) 변색 부분:	
	□ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75% -100% (전체적인 일관성)
(해당사항 모두:)	□ 명백한 부식 □ 탄 자국 □ 깨어짐
스트링 상호연결:	□ 적용 불가/관찰 불가 □ 적용 가능
외관:	□ 새것처럼 □ 약간의 변색 (a.) □ 진한 변색 (a.)
(a.) 변색 부분:	
	□ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75% -100% (전체적인 일관성)
(해당사항 모두:)	□ 명백한 부식 □ 탄 자국 □ 깨어짐

미아크	자군	(얇으	자으	타 자구	•)
니어그	시녹	(ᆲ는	ㅋ근	긴 시 녹	)

# <u>12. 실리콘 (단 혹은 다결정) 모듈</u>: 🛛 적용 불가 🗆 적용 가능

개수:				
모듈에서 셀의 수				
스트링 당 직렬 셀의 수 스트링 당 바이패스 다이오드 수				
병렬 연결 스트링의 수				
셀 사이즈: 폭 cm 길이 cm				
프레임과 셀 사이의 거리: 🛛 >10 mm 🗆 <10 mm				
스트링에서 셀 사이의 거리: □ >1 mm □ <1 mm				
변색: □ 없음/새것처럼 □ 약한 변색 □ 어둡게 변색				
변색이 있는 셀의 개수:				
변색된 평균:				
□ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75%-100% (전체적인 일관성)				
변색 위치 (해당사항 모두 표시):				
□ 모듈 중앙 □ 모듈 가장자리 □ 셀 중앙 □ 셀 가장자리				
□ 그리드 선 위 □ 버스바 위 □ 태빙 위 □ 셀들 사이				
□ 다른 셀보다 더 짙은 개별 셀들 □ 부분적인 셀 변색				
정션 박스 면적: □ 여타와 같음 □ 영향을 더 받음 □ 영향을 더 적게 받음				
손상: 🗆 없음				
(해당사항 모두 표시:)				
□ 탄 자국(a.) □ 균열 (b.) □ 수분 □ 벌레 자국/달팽이자국 (c.)				
□ 이물질 매몰				
(a.) 탄 자국 개수: □ 1 □ 2 □ 3 □ 4-10 □ >10				
(b.) 균열 셀의 개수:				
(c.) 벌레 자국/달팽이자국 잇는 셀의 개수:				
박리: □ 없음 □ 가장자리로부터 □ 균일함 □ 모서리 □ 정션 박스 가까이				
□ 셀들 사이 (a.) □ 셀들 위에 (b.) □ 셀 혹은 스트링 상호연결부 가까이				
(a.) 셀들 사이 박리된 부분:				
□ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75% -100% (전체적인 일관성)				
(b.) 셀들 위에 박리된 부분:				
□ <5% □ 5-25% □ 50% □ 75% -100% (전체적인 일관성)				
계면 가능성 (2 개를 선택):				
□ 유리 □ 반도체 □ 봉지재 □ 백시트 □ 버스바				

# <u>13. 박막 모듈</u>: 🗆 적용 불가 🗆 적용 가능

개수:

모듈에서 셀의 수	
직렬/스트링에서의 셀의 수	

병렬 연결 스트링의 수 셀 사이즈: 폭\_\_\_\_\_\_cm 길이 \_\_\_\_\_cm 프레임과 셀 사이의 거리: □ >10 mm □ <10 mm 외관: □ 새것처럼 □ 약간/연한 변색 □ 진한 변색 변색 유형 (해당사항 모두 표시): □ 점 무늬 모양이 열화 □ 헤이즈(봉지재 갈변) □ 기타 변색 위치 (해당사항 모두 표시): □ 전반적/위치 패턴 없음 □ 모듈 중앙 □ 모듈 가장자리 □ 셀 중앙 □ 셀 가장자리 □ 균열 가까이 손상: □ 손상 없음 □ 작은, 국부적 □ 광범위 손상 유형 (해당사항 모두 표시): □ 탄 자국 □ 균열 □ 수분 가능성 □ 이물질 매몰 박리: □ 박리 없음 □ 작은, 국부적 □ 광범위 위치 □ 가장자리로부터 □ 균일함 □ 모서리 □ 정션 박스 가까이 □ 버스바 가까이 □ 스크라이브선 따라 가능한 계면(선택 2): □ 유리 □ 반도체 □ 봉지재 🗆 버스바 박리 유형 □ 흡수체 박리 □ 반사방지 코팅 박리 □ 기타

#### 사진 촬영: 전면과 결함들

#### 

빈칸에 전자적으로 기록된 사진과 I-V 곡선들의 파일명		
사진 파일	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
I-V curve		
<u>커넥터 기능</u> : □ 기능 □ 짝이 더 이상 없음 □ 노출	<b>투</b> 된	
조사강도(Irradiance) 선		
온도 선		
전계발광(EL) 사진		
적외선(IR) 사진		
<u>바이패스 다이오드 시험</u> : 🛛 적용 가능 🗆 적용 불가		
다이오드의 개수:		
총 개수, 단락된 것,	개방된 것	

#### <u>기타</u>

# 부록 B: 영어-한글 용어 비교

accredited	인정받은
active	활성
aging	노화, 에이징
amorphous	비정질
angle of view	사각
back contact	후면전극
bubble	기포
burn marks	탄 자국
capacitance	정전용량
certified	인증받은
chromophore	발색단
combiner	결합기
creepage	연면
crystalline	결정질
defect	결함
degradation	열화
degradation rate	열화율
delamination	박리
dendritic	수지상
dielectric withstand	유전 내력
dislocation	전위
edge sealing	가장자리 실링
emissivity	방사율
failure	불량
finger	핑거
frit	프릿
grain boundary	입계
ground continuity	접지 지속성
high pass	고역 통과
humidity freeze	습도 동결
ideality factor	이상 계수
insolation	일조량
irradiance	조사강도
irradiation	조사량
junction breakdown	접합 파괴
kink	구부러짐, 킹크
label	라벨
lattice damage	격자 손상

leakage current	누설전류
light induced degradation (LID)	광유도 열화
lock-in thermography (LIT)	고정화 서모그래피
lumophore	형광체
microcrystalline	미세결정
microscopic	미시적
mismatch	불일치, 미스매치
photobleach	광표백
potential induced degradation (PID)	퍼텐셜 유도 열화
preconditioning	전처리
pre-exponential	사전 지수
pulse thermography	펄스 서모그래피
qualification test	적격성 시험
quick connector	퀵 커넥터
radiative	복사성
recombination	재결합
reverse bias	역방향 바이어스
sealing	실링
shaker	셰이크
shunt	션트
signal transmission device (STD)	신호 전송 소자
snail tracks (trails)	달팽이자국
solder	납땜
spectral response	분광응답
STC (standard test condition)	표준시험조건
stray light	미광
stress	스트레스, 응력
superstrate	상판
test sequence	시험 순서
thermal cycling	온도 사이클링
thermal fatigue	열 피로
thermal runaway	열 폭주
thermography	서모그래피
tomography	단층 촬영
transparent conducting oxide (TCO)	투명전도성산화물
weathering	내후
wet leakage	습윤 누설
For further information about the IEA – Photovoltaic Power Systems Programme and Task 13 publications, please visit www.iea-pvps.org.



