

장기 신뢰성 평가를 위한 태양전지의 열충격 시험 특성에 관한 연구

강민수¹ · 김도석¹ · 전유재² · 신영의^{1†}

¹중앙대학교 기계공학부 대학원

²여주대학교 자동차과

(2012년 2월 21일 접수, 2012년 3월 21일 수정, 2012년 3월 21일 채택)

The Study on Thermal Shock Test Characteristics of Solar Cell for Long-term Reliability Test

Kang Min-Soo¹, Kim Do-Seok¹, Jeon Yu-Jae² and Shin Young-Eui^{1†}

¹School of Mechanical Engineering, Graduate School, Chung-Ang University

²Department of Automotive, Yeou-Ju Institute Technology

(Received 21 January 2012, Revised 21 March 2012, Accepted 21 March 2012)

요 약

본 연구에서는 PV(photovoltaic)모듈에서 경년에 따른 효율 저하의 원인을 분석하기 위해 셀 레벨에서의 열충격 시험을 수행하였다. 열충격 시험의 조건은 -40°C 에서 85°C 로 각각 15분씩 30분을 1사이클로 하였으며, 열충격 시험 500 사이클 동안 100 사이클 간격으로 EL분석 및 I-V분석을 수행하였다. 효율 감소율은 단결정 Bare Cell이 8%, Solar Cell이 9%였으며, 다결정 Bare Cell이 6%, Solar Cell이 13%의 감소율을 보였다. 열충격 시험 후 Solar Cell은 표면 손상으로 인한 효율저하를 확인할 수 있었다. Bare Cell의 경우 표면의 손상이 없었지만, 효율이 저하된 것을 확인할 수 있었다. 이는 Fill Factor 분석에 의해 경년 시 나타나는 누설전류에 의한 소모전력 증가로 효율 저하에 영향을 준 것으로 판단된다. 또한, Bare Cell보다 Solar Cell에서의 효율 감소율이 상대적으로 높게 나타난 결과는 표면 손상 및 소모 전력의 증가로 인해 Solar Cell 효율에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 향후 단면 분석법 및 다양한 조건의 시험 기법을 활용하여 PV모듈 뿐 아니라 Cell 레벨에서의 불규칙한 효율 및 Fill Factor의 감소 원인을 검토하고, Solar Cell에서의 효율 저하가 가속되는 원인에 대한 대책 방안 연구가 수행되어야 할 것이다.

주요어 : PV모듈, Solar Cell, Bare Cell, 열충격 시험, EL, I-V, Fill Factor

Abstract— This study has been performed Thermal Shock test for analyze the cause of Power drop in PV(Photovoltaic) Module. Thermal Shock test condition was performed with temperature range from -40°C ~ 85°C . One cycle time is 30min. which are consist of low and high temperature 15min. each other. The test was performed with total 500cycles. EL, I-V were conducted every 100cycle up to 500cycles. Mono Cell resulted in 8% Power drop rates in Bare Cell and 9% in Solar Cell. In the case of Multi Cell resulted in 6% Power drop rates in Bare Cell and 13% in Solar Cell. After Thermal Shock test, Solar Cell's Power drop resulted from surface damages, but in the case of Bare Cell's Power drop had no surface damages. Therefore, Bare Cell's Power drop was confirmed as according to leakage current increase by analysis of Fill Factor after Thermal Shock test. Also, Solar Cell's Power drop rates are higher than that of Bare Cell because of surface damages and consuming electric power increase. From now on, it should be considered that analyzed the reasons of Fill Factor decrease and irregular Power drop in PV module and Cell level using cross section, various conditions and test methods.

Key words : PV module, Solar Cell, Bare Cell, Thermal shock test, EL, I-V, Fill Factor

[†]To whom corresponding should be addressed.
School of Mechanical Engineering, Graduate School, Chung-Ang
University 84 Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul, 156-756 Korea
Tel : 02-820-5315; E-mail : Shinyoun@cau.ac.kr

- PV : Photovoltaic
- EVA : Ethylene Vinyl Acetate
- EL : Electroluminescence
- I-V : Current-Voltage
- FF : Fill Factor
- I_{sc} : Short-Circuit Current
- V_{oc} : Open-Circuit Voltage
- ARC : Anti Reflecting Coating

1. 서 론

최근 들어 전 세계적으로 환경오염으로 인한 탄소 배출권 규제와 원자력 발전소의 사고로 인하여 대체 에너지원인 신재생에너지의 중요도와 관심이 날로 증가하는 추세이다.[1] 태양에너지는 에너지원의 크기가 크고 무한정에 가까우며, 위험요소 또한 적어 신재생 에너지 중 가장 이상적인 에너지원이며 산업화 가능성이 높은 대체에너지원으로 부각 되고 있다. [2]

이러한 태양전지 모듈에 대한 품질 인증은 IEC 및 한국에너지 기술연구원, 한국산업 기술 시험원과 같은 시험공인기관의 인증이 일반적으로 사용되고 있다. 장기신뢰성 측면에서는 STC(표준 시험조건 : 수직복사 $E=1000 W/m^2$, 전지온도 $T=25^\circ C \pm 2^\circ C$, 공기질량 $AM=1.5$ 의 정의된 분광 KSC-IEC 60904-3 따른 태양기준복사의 분광 분포)하에서 전력 90%이며 25년 보증은 STC하에서 전력 80%를 최소한 만족시켜야한다. [3][4]

이와 같이 태양전지 모듈에 대한 인증시험이 이루어지고 있지만, 대부분의 인증시험은 태양전지 모듈인 복합인자에 대해 국한 되어 있고, Cell 레벨에서의 장기 신뢰성 평가 시험의 경우 인증 기준이 아직 정립되어 있지 않아 경년 시 나타나는 효율 저하의 정확한 분석이 미흡하다. 경년 시에 따른 태양전지의 효율 변화를 정확히 분석하기 위해 PV 모듈에서의 태양전지 장기 신뢰성 평가가 아닌 태양에너지를 전기적 에너지로 직접 변환시켜주는 주요 인자인 Cell 레벨에서의 장기 신뢰성 평가기법을 정립할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 열충격 시험을 통해 태양전지 Cell 레벨에서의 효율 저하 특성에 대하여 검토하였다.

2. 실험방법

2-1. 실험 시편

현재 PV 모듈은 결정질 실리콘(Si)의 P형과 N형을 접합 후 표면처리 및 전면 전극을 형성한 Bare cell을 만들고, 그 전면 전극위에 Ribbon을 Tabbing하여 Solar cell로 완성 된다. 이를 모듈화 하기 위해 그림 1(1)과 같이 Back-sheet 위에 EVA(Ethylene Vinyl Acetate), Solar Cell, Glass(저철분 강화유리)를 차례로 Lamination공정을 통해 완성하고 그림 1(2) 와 같은 Array로 배열된다.

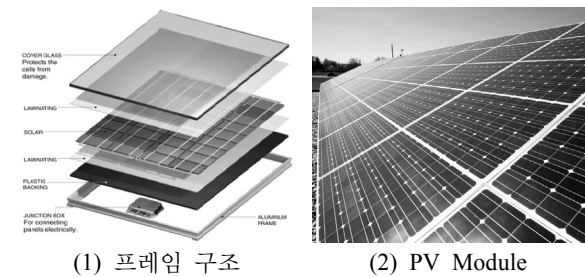


그림 1. PV Module 및 구조

본 실험에서는 외부 환경적 요인에 가장 취약할 것으로 판단되는 PV 모듈내의 Cell 레벨에서의 장기 신뢰성 평가기법을 정립하기 위해 열충격 시험을 수행하였다. 시편은 그림 2와 같이 PV 모듈을 만들기 전 Ag paste로 Gridfinger와 전면전극 3개만을 형성한 Bare cell과 전면전극에 Ribbon을 Tabbing한 Solar Cell이다.

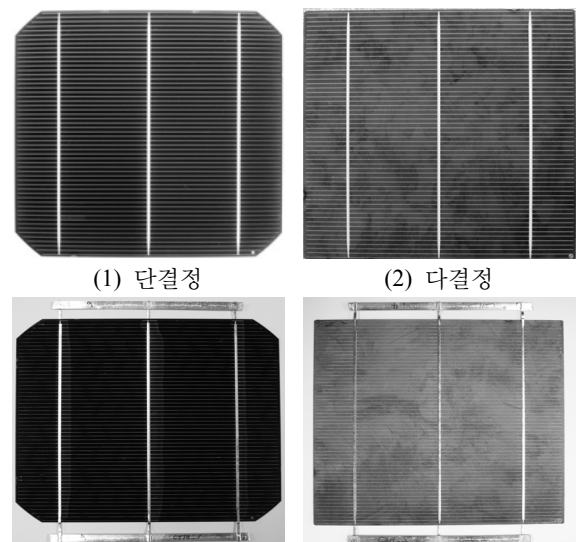


그림 2. 시편 형상

2-2. 열충격 시험

열충격 시험은 저온 -40°C , 고온 85°C 에서 Lamping Time을 포함하여 각각 15분씩 유지하였으며, 총 30분을 1사이클로 500사이클을 수행하였다. 열충격 시험조건은 아직 규격화 되지 않아 PV 모듈에서의 열사이클 시험 규격 KS C IEC 61215[5]를 이용하여 Cell 레벨에서의 열충격 시험을 수행하였다. 그림 3은 열충격 시험의 온도 프로파일을 나타낸 것이다.

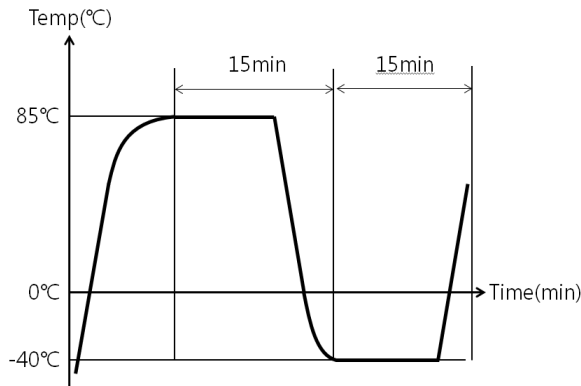


그림 3. 열충격 시험 온도 프로파일

2-3. EL촬영 및 I-V측정

EL 촬영은 태양전지에 전기장을 주면 태양전지가 빛을 내는 현상을 이용하여 표면사진의 음영에 따라 Cell의 균열 및 Gridfinger의 손상 유무를 분석할 수 있는 기법이다. 현재 PV 모듈 및 태양전지의 표면을 분석하는 가장 대표적인 방법으로 사용되고 있다. 또한, I-V측정은 태양전지에 STC 조건의 일사량을 주어 개방전압 (V_{oc}), 단락전류 (I_s), 최대출력전압 (V_{max}) 및 전류 (I_{max}), 최대출력전력 (P_{max}), 효율 (%), 곡선율(Fill Factor :FF) 측정을 통해 태양전지의 효율 및 전기적 특성을 분석하는 기법이다. 본 실험에서는 그림 4의 McScience社 장비를 이용하여 열충격 시험 500사이클 동안 100사이클 마다 EL촬영 및 I-V측정을 통해 Cell의 특성을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 효율 저하

단결정 Cell의 면적(238.95cm^2) 및 다결정 Cell



(1) K3300 Solar Cell Micro- Imaging System

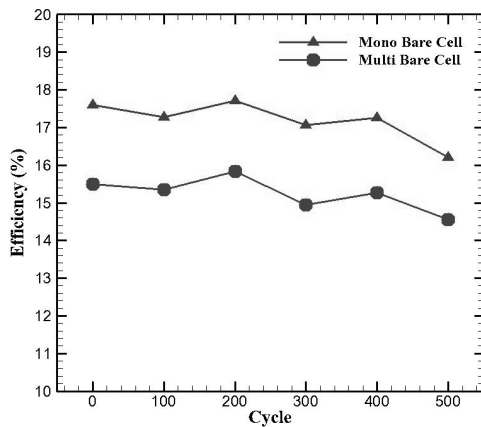


(2) K3000LAB Solar Cell I-V Measurement System

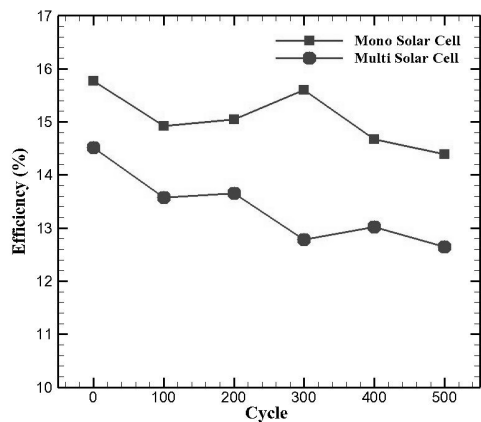
그림 4. 측정장비

의 면적(243.36cm^2)에 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ 을 인가하여 얻은 출력값(P_{max})을 Cell의 면적으로 나누어 효율을 산출하였다. 그림 5와 같이 단결정 Bare Cell의 경우 열충격 시험 전 효율은 17.6%이며 열충격 500사이클 시험 후에는 16.2%로 8%의 감소율을 보였다. 다결정 Bare Cell의 효율은 열충격 시험 전 15.5%에서 열충격 500사이클 시험 후 14.6%로 6%의 감소율을 보였다. 반면, Ribbon을 Tabbing 한 단결정 Solar Cell의 경우 15.8%에서 14.4%로 9%의 감소율을 보였으며, 다결정 Solar Cell은 14.5%에서 12.6%로 13%의 감소율을 보였다. 열충격 시험 전 Solar Cell의 효율이 Bare Cell의 효율 보다 낮게 나타나는 것은 전면전극 위의 Ribbon을 Tabbing한 후 저항체의 증가로 인해 효율이 낮게 측정된 것으로 분석된다. 또한, 단결정 Cell이 다결정 Cell보다 초기 효율이 높은 원인은 단결정 Cell이 원자배열 방향이 일정한 고 순도의 실리콘(Si)으로 높은 효율과 함께 높은 에너지 변환효율을 갖는 반면, 원자배열 방향이 일정치 않은 다결정 Cell은 비교적 효율이 낮아 단결정 Cell 보다 낮은 효율변화 특성에[6] 기인한 것으로 판단된다.

$$\text{Efficiency}(\%) = \frac{P_{\max}}{\text{Input Power} \times \text{Area}} \times 100 \quad (1)$$



(1) Bare Cell

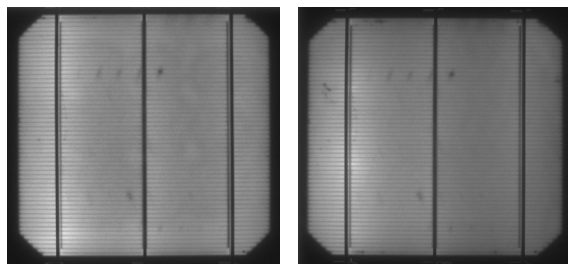


(2) Solar Cell

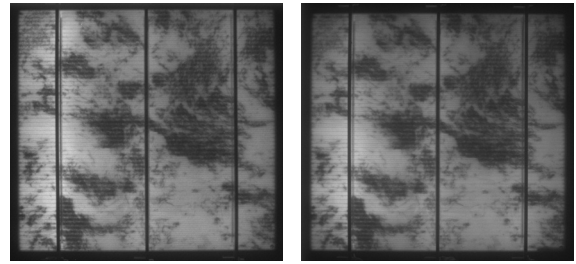
그림 5. 효율의 변화

3-2. 표면 EL분석

단결정 Cell의 열충격 시험 전과 열충격 500사이클 시험 후의 EL촬영 이미지를 그림 6에 나타내었다. EL촬영을 통해 효율 저하의 원인을 분석한 결과, Bare Cell의 경우 효율 저하의 영향을 미칠 수 있는 Cell 표면에서의 이상 유·무는 확인할 수 없었다.

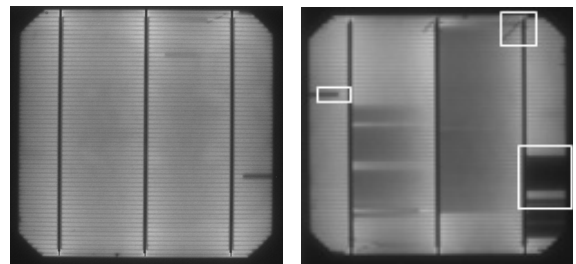


0 사이클 500 사이클
(1) 단결정 Bare Cell

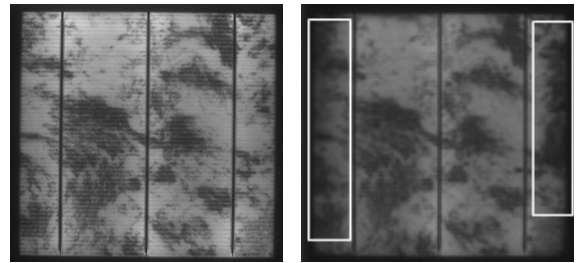


0 사이클 500 사이클
(2) 다결정 Bare Cell

그림 6. 열충격 시험 전, 500 사이클 후 Bare Cell의 EL분석



0 사이클 500 사이클
(1) 단결정 Solar Cell



0 사이클 500 사이클
(2) 다결정 Solar Cell

그림 7. 열충격 시험 전, 500 사이클 후 Solar Cell의 EL분석

반면, Solar Cell의 경우 그림 7과 같이 Cell 표면의 GridFinger 단선 및 균열, Ribbon 접합부의 접합 불량과 함께 ARC(Anti Reflecting Coating)층이나, N도핑층의 손상으로 의심되는 부위가 관찰되었다. Bare Cell과 비교 하였을 때 Solar Cell에서 두드러지게 나타나는 Ribbon 접합부의 손상은 열충격 시험을 통한 Cell(Silicon), Ribbon(Copper), Solder(Sn-Pb)접합부의 이종재료 열응력 차에 의한 것으로 사료된다.

Bare Cell과 Solar Cell을 비교분석한 결과, 열충격 500사이클 시험 후 단결정 Bare Cell에서는 17.6%에서 16.2%로 8%의 감소율이 나타난 반면, Solar Cell에서는 15.8%에서 14.4%로 9%의 감소율이 나타났다. 이는 그림 7(1)의 단결정 Cell의 열충격 500

사이클 시험 후의 표면 모습과 같이 Cell의 균열 Gridfinger 손상, Ribbon 접합부 불량에 영향을 받아 감소율이 더 큰 것으로 판단된다. 다결정 Cell의 경우 열충격 500사이클 시험 후 Bare Cell에서는 15.5%에서 14.6로 6%의 감소율을 나타낸 반면, Solar Cell에서는 14.5%에서 12.6%로 13%의 높은 감소율을 나타냈다. 이는 그림 7(2)와 같이 열충격 500사이클 시험 후 표면에서 나타난 Cell의 좌우 ARC층의 손상이나, N도핑층에서의 손상으로 의심되었던 부분에서 태양에너지의 집광능력저하로 인해 효율에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. ARC층에서의 손상에 의한 집광 능력은 그림 8과 같이 최대 25%의 차이를 가질 수 있어, 본 Solar Cell 시편에서의 효율 저하는 ARC층 손상에 영향을 받았다고 판단된다.

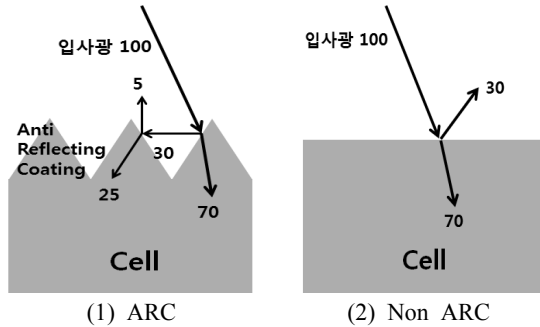


그림 8. ARC의 유무

Bare Cell을 기준으로 열충격 500사이클 시험 후 단결정 Cell이 8% 다결정 Cell 6%로 단결정 Cell이 더 큰 감소율을 보였다. 이는 그림 6과 같이 외관상 표면의 변화가 없는 것을 확인하였지만, 열충격을 통해 나타나는 효율 저하의 영향성이 다결정 Cell보다 단결정 Cell에서 더 크게 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한, Solar Cell을 기준으로 효율 감소율을 분석한 결과, Bare Cell과는 상반되는 결과로 다결정 Cell이 13%, 단결정 Cell 9%로 다결정 Cell이 단결정 Cell보다 큰 감소율을 보였다. 이는 그림 7(1)과 같이 단결정 Solar Cell의 표면 손상이 다결정 Solar Cell보다 GridFinger의 단선 및 Ribbon 접합부의 손상이 확연하게 나타나지만, ARC층 표면 손상이 효율 저하에 더욱 크게 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, ARC층의 손상을 분석한 결과, 열충격 500사이클 시험 후 Gridfinger의 방향성을 기준으로 Gridfinger의 평행한 면에서는 ARC의 손상을 Gridfinger가 억제시

켜 손상이 적은 것으로 나타났으며, 수직인 면에서는 Gridfinger의 사이를 통해 ARC층에서의 손상이 쉽게 확장되는 것을 확인하였다. 이는 추후 추가적인 열충격 시험을 통해 Cell의 결정질에 따른 표면 손상 순서를 고찰해야 할 것이다.

3-3. 전기적 특성

Solar Cell의 경우 열충격 500사이클 시험 후 효율 저하의 원인을 Cell의 균열 및 Ribbon 접합부, ARC층 손상, Gridfinger의 단선으로 판단할 수 있었다. 하지만, Bare Cell의 경우 표면 손상이 관찰되지 않아도 효율이 저하된 것을 확인하였다. 경년 시 나타나는 효율 저하라 판단할 수 있으며, 이를 정확히 확인하기 위해 FF를 통해 분석하였다.

FF란, 이론 출력전력대비 실제 출력전력의 비를 퍼센트(%)로 나타낸 값이며, 이론 출력전력은 Cell의 Diode 구조특성(P-N접합)[7]에 의해 누설전류가 나타나지 않는 I_{sc} (Short-Circuit Current)와 Cell에서의 출력으로 흐르는 전류가 '0'인 상태에서 다이오드의 Shunt저항에 의해 형성된 최대 전압 V_{oc} (Open-Circuit Voltage)의 곱으로 나타낸다.[8] 반면, 실제 출력전력은 Max Point점에서의 I_{max} 와 V_{max} 의 곱으로 표현할 수 있다. 따라서, 그림 9와 같은 이론값 대비 실제 값의 비인 FF의 분석은 전기적 누설 전류에 의한 효율 저하를 분석할 수 있어, 태양전지의 성능을 평가하는 중요한 지표로 사용되고 있다.

$$Fill\ Factor = \frac{I_{max} \cdot V_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad Eq.2$$

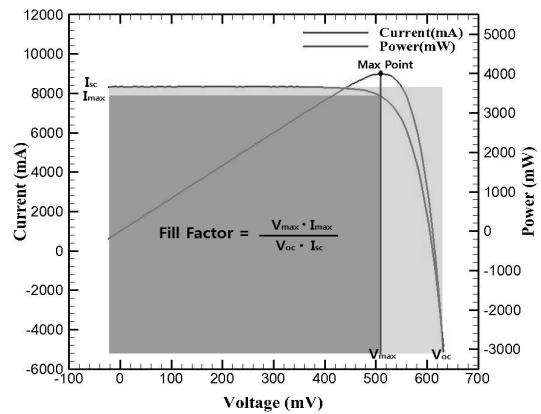


그림 9. Fill Factor

FF분석 결과 그림 10과 같이 열충격 시험 전 단결정 Bare Cell의 FF는 78.9%에서 시험 후 76.4%로 2.5% 감소되었고, 다결정 Bare Cell은 77.4%에서 76.5%로 0.9% 감소하였다. Ribbon이 있는 Solar Cell의 경우 단결정 Cell에서는 73.2%에서 70.3%로 2.9%가 감소하였고, 다결정 Cell은 73.2%에서 69.8%로 3.4% 감소하였다. Bare Cell에서는 단결정 및 다결정의 FF값 감소는 각각 2.5%, 0.9%를 나타냈으며, Solar Cell에서는 각각 2.9%와 3.4%를 나타내었다. 이를 통해 열충격 500사이클 시험 후 Bare Cell에서의 소모 전력 즉, 누설전류 보다 Solar Cell에서의 누설 전류가 크게 증가한 것으로 분석되었다.

Bare Cell에서의 소모 전력은 경년에 의한 Cell 내부의 직렬 저항의 증가 및 병렬 저항의 감소나 다이오드 특성의 변화하여 FF값에 영향을 미쳤으며, 효율에 영향을 준 것으로 분석된다. Solar Cell에서의 효율 저하 또한, 경년 시 나타나는 효율 저하로 판단할 수 있으나, Bare Cell보다 Solar Cell에서의 효율 저하 및 FF값의 감소가 크게 나타나는 것을 고려한다면, 표면 분석 시 Bare Cell에서는 나타나지 않았던, 표면 손상 및 Ribbon 접합부에서 생기는 불량으로 인해 효율 저하가 가속된다고 분석된다.

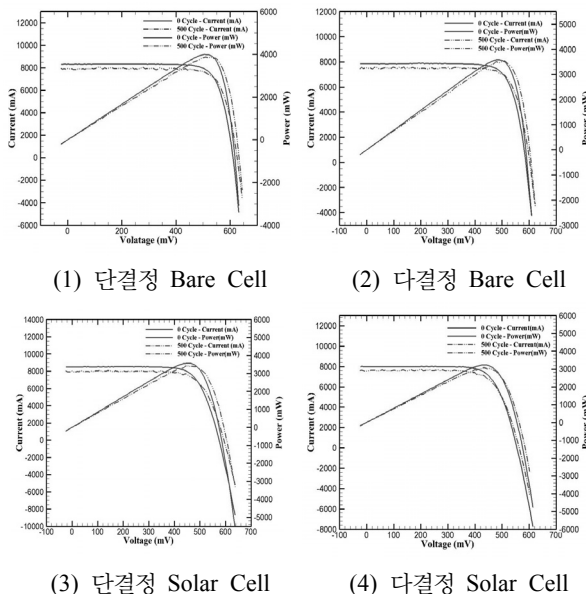
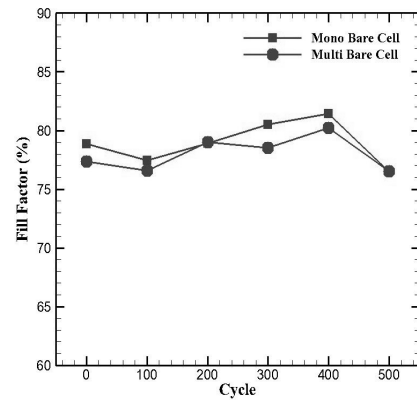
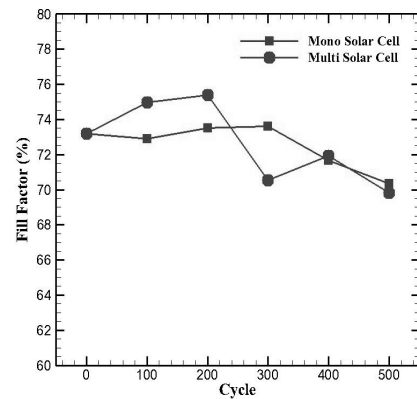


그림 10. Fill Factor의 변화

그림 11과 그림 5의 그래프를 분석한 결과 사이클 수에 따라 불규칙한 효율 및 FF값을 확인할 수 있었



(1) Bare Cell



(2) Solar Cell

그림 11. Fill Factor의 변화

다. 열충격 시험 전과 500사이클 시험 후의 효율 및 FF값은 저하되는 것을 확인할 수 있었으나, 사이클 중간에 효율 및 FF값이 불규칙한 경향성을 나타냈다. 이는 Cell의 생성 구조 및 복합재료(ARC층, N형층, P형층, Al sheet 등)에 따른 특성이 부합하여 간헐적인 효율 변화가 일어난 것으로 판단된다.

향후 Cell 레벨 및 PV 모듈에서 경년 시 나타나는 누설전류의 다양한 조건과 Cell 내부의 분석 기법을 정립하여야한다. 또한, 열충격 사이클마다 효율 및 FF의 불규칙한 원인 및 소모 전력 증가의 원인을 규명하고, Solar Cell에서의 효율 저하가 가속되는 원인에 대한 대책방안을 마련해야할 것이다.

4. 결론

PV 모듈에서 장기 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 Cell 레벨에서의 열충격 시험에 따른 효율 변화 특성에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 열충격 시험 전 대비 열충격 시험 500사이클 후 효율 변화는 단결정 Bare Cell은 8%, Solar Cell 9%, 다결정 Bare Cell 6%, Solar Cell 13%의 감소율을 보였다.
- 2) 열충격 시험 500사이클 후 Fill Factor를 분석한 결과 Bare Cell에서의 효율 저하는 경년 시 나타나는 소모 전력의 증가로 인한 효율 저하로 분석되며 Solar Cell의 효율 저하는 소모전력 증가 및 표면 손상과 Ribbon 접합부에서 생기는 불량으로 인한 효율 저하로 분석된다.
- 3) FF변화 그래프와 효율 변화그래프를 비교분석한 결과 효율의 변화가 비슷한 경향성을 나타냈으며 소모 전력이 효율에 미치는 영향성을 확인하였다.
- 4) 향후 다양한 분석 방법을 통해 불규칙한 효율 값의 특성을 분석하고 Solar Cell에서 효율 저하에 원인에 따른 대책 방안을 마련해야 할 것이다.

후 기

“이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0010674).”

참고문헌

1. Ze Cheng, Hang zhou, Hongzhi Yang, “Research on MPPT control of PV system based on PSO algorithm” CCDC, 2010 pp. 887-892, 2010.
2. Hong, Guen-kee, Cho, Kyeong-yeon, Seo, Jae-Keun, Oh, Dong-Joon, Shim, Ji-myung, Lee, Hyun-woo, Kim, Ji-Sun, Shin, Jeong-Eun, Lee, Eun-Joo, Lee, Soo-Hong, Lee Hae-Seok “Improvement of solar cell efficiency using selective emitter” KSES, VOL.31, NO.2, 2011 pp. 56-59, 2011.
3. “저탄소 녹색 성장을 위한 태양광 발전”, (주) 도서출판 기다리, pp. 112.
4. KSC-IEC 60904.
5. KSC-IEC 61215.
6. “태양전지”, (주) 기술정보, pp. 49-86.
7. M. G. Willalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, “Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 5, pp. 1198-1208, May 2009.
8. G.R. Walker, “Evaluating MPPT topologies using a Matlab PV model”, Journal of Electrical & Electronics Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 49-56, 2001.