

技術論文

전계발광현상을 이용한 우주용 다접합 태양전지의 건전성 평가방법

박제홍*, 장영근**

Multi-Junction Space Solar Cell Health Checking Method
using Electroluminescence Phenomena

Jehong Park* and Young-Keun Chang**

ABSTRACT

The solar cell system operates by facing the sun-light. Minor cracks, static discharge, and thermal shock that can happen during production/testing phase can lead to degradation in performance during operation, since solar cells are exposed to extreme thermal/mechanical environment in space. In order to detect small cracks and internal damages in the solar cells due to thermal shocks, which are the core units of a solar cell system, expensive equipment, complicated test process, and much time are required. Therefore, a qualitative method for easily and quickly testing the 'health' of solar cell functionality is required.

This dissertation describes a theoretical and technical grounds for quickly and easily evaluating the health of solar cells using electroluminescence effect of Gallium-Arsenide solar cells that are most widely used by spacecrafts in recent years. Also described in the dissertation is the technical issues and constraining factors for applying the proposed method to actual space-rated solar cell systems.

초 록

우주비행체의 주 전력원인 태양전지 시스템은 태양광을 직접 바라본 상태에서 운용되어, 우주의 가혹한 열적/기계적 환경에 직접 노출되므로, 제작/시험 중 발생할 수 있는 미세한 균열, 정전기 및 열 충격 등이 궤도 운용 중 태양전지 시스템의 기능상실로 이어질 가능성을 갖는다. 또한 태양전지 시스템의 전력생성 기본 유닛인 태양전지에 발생된 미세한 균열 또는 열 충격에 따른 태양전지의 내부 파손의 발견을 위해서는 고가의 장비와 복잡한 시험 절차, 그리고 많은 시간을 필요로 하게 된다. 따라서 태양전지 시스템 기능의 건전성을 쉽고, 빠르게 확인하기 위해, 정성적인 태양전지 기능 건전성 평가 방법이 요구된다.

본 논문에서는 요즘 우주비행체에서 가장 많이 사용되는 갈륨-비소 계열의 다접합 태양전지가 갖는 전계발광현상을 이용해 복잡한 반도체 구조를 가지는 태양전지의 기능 건전성을 보다 간단하고 저비용으로 그리고 빠르게 평가하는 방법에 대한 이론적, 기술적 근거를 설명하였다. 또한 이를 실제의 우주용 태양전지 시스템에 적용하기 위한 기술적 사항들과 적용 제한 조건들에 대하여 기술하였다.

Key Words : Satellite(인공위성), Solar Array(태양전지배열기), Solar Cell(태양전지), Visual Inspection(육안검사), Power Generation(전력생산)

† 2009년 4월 27일 접수 ~ 2009년 8월 31일 심사완료

* 정회원, 대한항공 기술연구원

** 정회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

교신저자, E-mail : ykchang@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 200-1

I. 서 론

우주용 태양전지 시스템은 태양광 에너지를 전기에너지로 변환해 우주비행체의 각종 부하에 전력을 공급해주는 가장 보편적인 우주비행체 용 전력 공급원이다. 지구궤도를 운행하는 인공위성 및 급성, 화성 등 지구 근접의 우주비행체에서 가장 효율적으로 사용되는 우주비행체용 태양전지 시스템은 실리콘을 기반으로 한 4%대의 저효율 태양전지로부터 시작되어, 현재는 갈륨-비소(GaAs)를 주재료로 하는 28%의 고효율 태양전지 사용에 이르고 있다.

최근 우주비행체에서 가장 많이 사용되고 있는 태양전지는 최대 18.5%의 효율을 갖는 실리콘 BSF (Back Surface reflection Function) 태양전지와 최대 28.5%의 효율을 갖는 갈륨-비소 다접합 태양전지이다. 이 중 갈륨-비소 다접합 태양전지는 기존의 실리콘 태양전지보다 30% 정도의 무겁고, 기본재료인 GaAs가 높은 취성을 갖는 단점에도 불구하고, 단위전압이 높고, 최신의 실리콘 태양전지와 비교해 약 60% 높은 전력 변환 효율로 인해, 소형위성 뿐 아니라 대형의 정지궤도 위성까지 그 사용 영역을 점차 확대해 나가고 있다.

이러한 태양전지는 결정구조를 갖는 화합물 반도체의 광전효과를 통해 전력을 생성하므로, 아모퍼스-실리콘, CIGS와 같은 재료의 태양전지를 제외하고는 대부분 높은 취성과 열 충격에 약한 복잡한 반도체 구조를 지닌다. 특히 우주용으로 주로 사용되는 GaAs 다접합 태양전지는 단위면적당 무게를 줄이기 위해 기계적 특성이 우수한 게르마늄(Ge)기판을 이용해 GaAs 화합물을 증착시켜 단점인 높은 취성을 완화하기 위해 최대 300um의 두께를 갖도록 제작되고 있어, 열충격을 통한 반도체 내부 접합부의 파괴나 터널다이오드의 기능상실 그리고 열팽창에 의한 기계적 결함에 매우 취약한 특성을 지닌다. 또한 우주비행체에 장착되어 우주 공간에서 운용될 때, 태양광을 직접 바라본 상태에서 동작되어, 우주의 가혹한 열적/기계적 환경에 직접 노출되므로, 제작/시험 중 발생된 미세한 균열, 정전기 충격 및 열 충격 등이 궤도 운용 중 태양전지 시스템의 기능상실로 이어질 가능성이 높은 특징도 갖는다[3].

이러한 특징을 지닌 태양전지의 기능 건전성 평가를 위해 전기적 시험 및 측정과 기계적 검사가 수행이 요구되며, 기계적 건전성 평가 방법으로는 정밀 육안 검사가, 전기적 건전성 평가 방법으로는 모사 태양광 조사시험 (이하 LAPSS

Test -Large Area Pulsed Solar Simulation Test) 이 보편적으로 사용된다. 정밀 육안 검사는 5~10 배율의 고배율 확대경을 이용하여 태양전지 및 보호 유리에 생긴 미세한 균열, 깨짐, Grid-Missing 등의 기계적 파손을 찾아내어, 우주환경에서 태양전지의 파손 및 기능정지를 야기할 수 있는 요인을 찾아 위험요소를 제거하거나, 수리하기 위한 검사이다. 모사 태양광 조사시험은 우주에서의 태양광파장인 AM0 파장을 제는(Xenon), 할로겐 등의 램프를 이용해 인공적으로 생성, 태양전지에 조사함으로써 태양전지의 전력 생성 기능의 건전성을 평가하는 시험이다.

그러나 그림 1과 같이, 태양전지, Grid-Finger, 터널다이오드 등의 여러 재질이 기계적으로 적층되어 있는 우주용 태양전지 어셈블리(이하 태양전지 CIC)의 검사에 있어, 정밀 육안 검사는 발견된 기계적 파손이 어떤 층에서 일어났는지 정확하게 분별할 수 없다는 단점과 발견된 기계적 파손이 전기적 기능 상실과 연계되었는가에 대한 정성적 판단이 불가하다는 단점을 지니고 있어, 신뢰성 높은 건전성 평가 방법으로 사용할 수 없다는 문제를 지닌다[2][4].

예를 들어 정밀 육안 검사를 통해 발견된 미세 균열이 그림 2와 같이 태양전지에서 발생된

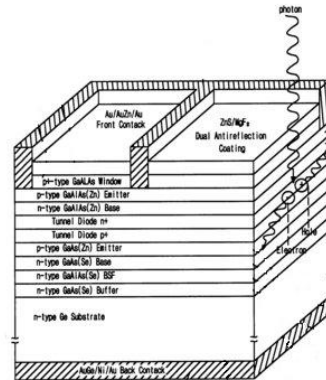


그림 1. 다접합 태양전지 단면도

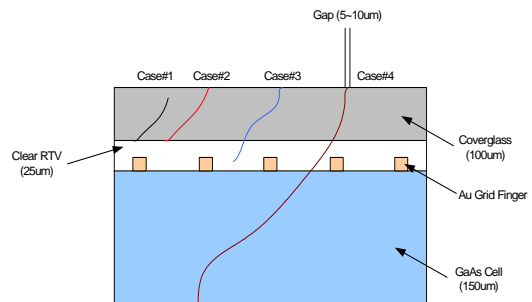


그림 2. CIC의 미세 균열 형태

것인지, 보호유리에서만 발생된 것인지, 아니면 태양전지 하부의 Metalization Layer 까지 확장되어 태양전지가 완전히 분리된 것인지 확인하기 매우 어렵다는 것이다. 또한 정밀 육안 검사를 통해서도 아주 미세한 균열이나 Grid-Contact의 오류 등의 문제도 발견할 수 없는 문제점도 지닌다. 이를 보완하기 위해서 C.G. Zimmermann과 K Dettlaff는 EL을 이용해 미세한 기계적 결함을 발견하는 육안검사 방법을 연구하였으며, 이를 실용화 하기 위한 연구와 제안이 지속되고 있다 [1][2].

그러나 우주용 태양전지의 건전성을 정성적, 정량적으로 판단하기 위해서는 태양전지패널에 대한 LAPSS Test의 수행을 통해 태양전지패널의 기능 건전성이 평가, 확인되어야 한다. 그러나 LAPSS Test의 복잡성으로 인해 패널단위의 시험 이외의 태양전지 단위의 시험은 불가능 하므로 어떤 태양전지가 기능을 상실해 전체 태양전지 시스템에 성능 저하를 일으키는지에 대한 정성적 평가가 어려운 문제가 발생하게 된다. 또한 태양전지 패널에 대한 LAPSS test는 장착된 태양전지에 전기적 충격을 최소화하며, 직접적인 모사 광 조사를 통한 비행 모델의 정량적 성능 평가가 가능한 반면, 시험 장비가 크고, 고가의 운용비가 들며, 교정(Calibration)에 따라 결과가 민감하게 변화하는 등, 사용이 복잡해 실제 저가의 소형위성 등에서의 잦은 사용이 어려운 단점을 지닌다.

그러므로 간단하고 저비용으로 빠르고 정성적으로 태양전지의 기계적 파손 및 기능 건전성을 평가할 수 있는 개선된 평가 기법이 요구된다 할 수 있다.

II. 본 론

2.1 전계발광현상

전계발광현상 (Electroluminescence, 이하 EL 현상)은 전자의 흐름이 빛의 발산으로 변형되는 현상을 통칭한다. 이러한 EL현상의 기본적인 원리는 그림 3과 같이 P-N 접합에 순방향 바이어스를 인가할 때, N형 반도체의 전자는 P형 반도체 쪽에, P형 반도체의 정공은 N형 반도체 쪽에 각각 주입되어 소수 캐리어로서 확산되고, 이 과정에서 바이어스에 의한 다수 캐리어와 재결합할 때, 전자와 정공의 에너지 차이 $E_g=hu$ 에 해당하는 파장을 방출하는 것이다[5][6].

다시 말해, 반도체의 전도대 (Conductive Band, 이하 CB)에 존재하는 전자가 외부에서 인

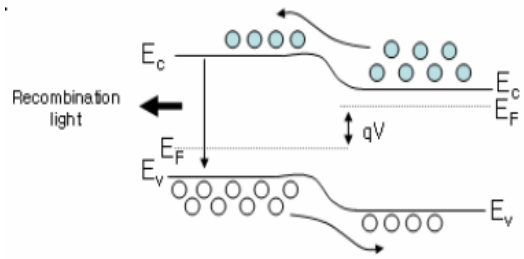


그림 3. 반도체 에너지 준위

파장(nm)	색	화합물반도체
900	적외선	InP, GaAs
800	적외선	GaAs, GaAlAs, GaAsP
700	적외선	GaAs, GaAlAs, GaAsP
600	오렌지	GaAs, GaAlAs, GaAsP, AlGaInP
500	황	AlGaInP, AlAs, GaP, AlP
400	녹	AlGaInP, AlAs, GaP, AlP
300	청	AlGaInP, AlAs, GaP, AlP
300	청자	ZnSe, SiC, GaN
300	자외선	ZnSe, SiC, GaN

그림 4. 반도체 재료에 따른 방출광 파장

가된 바이어스 에너지에 의해 가전자대 (Valence Band, 이하 VB)로 이동될 때, P-N 접합의 재료에 따라 $E_g=hu=hc/\lambda$ 에 해당되는 파장의 빛을 내는 현상이라 할 수 있다.

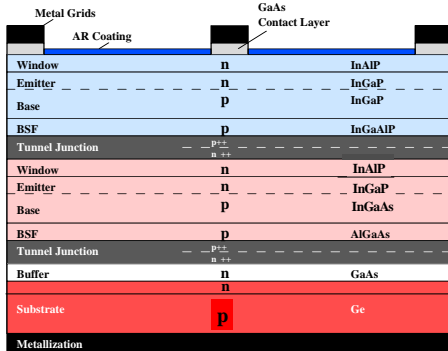
이러한 EL현상은 III-V족 화합물 반도체에서 쉽게 발견되며, 반도체의 결정 재료 및 불순물의 도핑 농도 등의 차이에 의해 달라지는 E_g 에 따라 방출되는 빛의 종류가 결정된다. 그림 4는 화합물 반도체의 재료 조성에 따른 방출광의 파장을 보여준다.

2.2 우주용 GaAs 다접합 태양전지의 전계발광현상

갈륨-비소 계열의 다접합 태양전지는 그림 5와 같이 단결정 게르마늄(Ge) 기판에 입사된 태양 에너지로 전자를 분리시키는 GaAs층과 AlGaAs층을 성장시켜 적층하고, 각 층(Layer) 사이에 분리된 전자를 수집하는 터널다이오드 층을 성장, 적층하는 방식으로 제작된다[7].

태양광이 윈도우(Window) 층인 InAlP 층에 입사되면, 입사된 태양에너지는 InGaP 층에서 전

Advanced Triple-Junction (ATJ) Cell - Cross-Sect. Schematic



Encore Proprietary - The information contained in this slide are approved for Export in accordance with U.S. export laws and regulations. This is not for re-export.



그림 5. GaAs 다접합 태양전지 단면도

자를 분리시키고, 터널다이오드는 다수 캐리어의 반사와 분리된 전자의 재결합을 방지하고, 전위차를 생성시켜 다음 InGaAs층으로 전자를 이동시킴으로써 전자의 흐름, 즉 Metal Grid를 음극, Ge-Metalization을 양극으로 하는 전류를 생성하게 된다. 이렇게 생성된 전류는 InGaAs, GaAs 층을 이동하면서 점차 증가해 단락 전류를 생성하게 된다.

이와 같이 태양전지에서 태양광에너지를 이용해 전자를 분리하는 이미터-베이스 접합 부위와 분리된 전자를 수집하는 터널다이오드는 태양전지의 전력 변환 작용에 있어 가장 중요한 역할을 한다. 만약 터널다이오드 부분에 기능적 문제가 발생할 경우 개방 전압은 측정되지만 단락 전류는 생성이 저하되는 경우가 발생하게 되고, 이미터-베이스 접합 부분에 문제가 발생할 경우 전압, 전류 생성의 두 가지 성능 모두 기능을 잃게 된다. 따라서 태양전지의 전력 변환 기능 건전성을 파악하기 위해서는 이 부분에 대한 기능 건전성 평가 방법이 요구된다.

앞선 2.1의 그림 4에서 살펴본 것과 같이 전계 발광 효과가 나타나는 재료는 주로 III-V 족 화합물 반도체이다. 우주용 다접합 태양전지 또한 III-V족 화합물 반도체인 AlGaAs와 InGaAs 등의 재료로 제작되므로, 전계 인가에 따라 재료의 Eg에 해당하는 전계 발광 효과를 확인할 수 있어야 한다. 따라서 정상적으로 동작하는 태양전지의 경우 P층인 Ge-metalization 부분을 양극으로, N층과 접해 있는 Metal grid 부분을 음극으로 정방향 바이어스의 전압을 인가하면, 임계 전압 이상의 바이어스에서 전류의 흐름이 측정되며, 그림 6과 같이 양자화 효율이 높은 700nm ~ 900nm 파장 대역의 붉은 빛과 적외선 에너지를 발산하는 전계 발광 현상이 나타나게 된다.

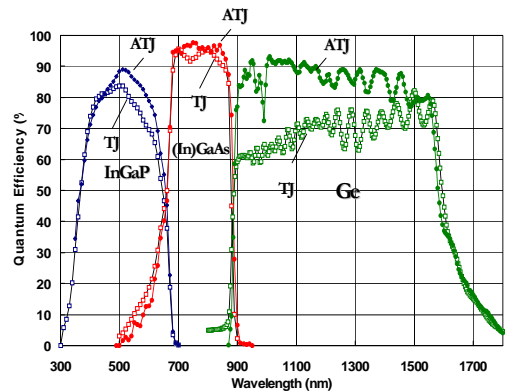


그림 6. 다접합 태양전지의 양자화 효율

그림 5와 같은 GaAs 다접합 태양전지에 정방향 바이어스를 인가할 때, 전류의 흐르지 않고, 전계 발광 현상이 일어나지 않는다면, 터널 다이오드의 역방향 바이어스 부분의 특성이 나타나지 않아 전류가 흐르지 못한 것이므로, 태양전지의 터널 다이오드가 파손된 것으로 그 원인을 파악할 수 있을 것이다. 또한 바이어스 인가 시 전류는 흐르나, 전계 발광 현상이 일어나지 않는 경우라면 전계 발광 현상을 일으키는 III-V족 화합물 반도체 층이 파손된 것으로 파악할 수 있을 것이다. 마지막으로 전계 발광 현상이 일어나는 부분을 통해 Grid Missing, AR-Coating, Window Layer의 균일성 또한 파악할 수 있을 것이다.

따라서 태양전지의 정방향 바이어스를 통한 전계 발광 효과의 확인을 통해 태양전지의 기능 건전성을 간단하게 파악해 낼 수 있다.

2.3 전계 발광 현상에 의한 태양전지 열화 및 노화 문제

태양전지는 일반 정류용 다이오드에 광전효과로 더해진 것과 그 특성을 같이 한다. 다이오드에 정방향 바이어스의 전류가 흐를 때, 다이오드의 접합 부위가 임계전압에 해당하는 저항치에 비례한 발열이 나타나는 것과 같이 태양전지에서도 마찬가지로 정방향 바이어스를 인가해 전류가 흐르면 발열이 발생하게 된다. 실리콘 태양전지의 경우 정방향 바이어스에 의해 미세 진동과 발열이 발생하게 되지만, 앞선 2.2장에서 언급한 것과 같이 GaAs 다접합 태양전지의 경우는 전계 발광 현상이 일어나게 된다. 이때 발생하는 빛의 파장이 700nm ~ 900nm 이므로 필연적으로 적외선에 의한 발열을 동반하게 된다. 또한 전계를 인가할 경우 태양전지 내부의 터널 다이오드에는

역방향 바이어스의 전류가 흐르게 되는데, 높은 수준의 역방향 전압은 터널 다이오드의 정방향 특성을 변형시킬 가능성을 갖는다.

따라서 전계 발광 현상을 이용한 안전한 태양 전지 건전성 평가를 위해서는 전계 발광 현상이 나타나면서도 태양전지의 터널 다이오드나, 각 층의 전계에 의한 파손 또는 열해가 발생되지 않도록 정방향 바이어스 인가전압을 제한하고 이때 흐르는 전류량을 제한하여야 한다.

2.4 전계발광현상 이용을 위한 태양전지 바이어스 입력 기준

그림 7의 GaAs 다접합 태양전지의 전류-전압 곡선은 태양전지가 태양광을 흡수해 전류를 출력할 때의 특성을 나타내므로 태양전지의 정상적인 동작 범위 및 동작 특성을 정의한다 할 수 있다.

태양전지의 반도체 특성은 태양광이 입사하지 않는 태양전지의 암흑 특성과 같으므로, 그림 7에서 단락 전류가 0이 되도록 Y축으로 Isc의 전류량 만큼 평행 이동한 형태가 된다. 이러한 반도체 특성을 갖는 태양전지도 일종의 다이오드 특성으로 보이는 화합물 반도체 이므로, 바이어스를 인가하여 전류가 흐르고 이를 통해 EL현상이 발생되기 위해서는 일반적인 P/N 반도체와 같이 일정 Threshold 전압(임계전압) 이상의 바이어스 입력이 요구된다.

그러나 그림 7에서 X축과의 교점인 Voc 이상의 바이어스를 인가할 경우, 정상적인 태양전지의 전류 출력범위 보다 많은 전류가 태양전지 내부에 급격하게 흐르게 되므로, 많은 열을 발생시킬 뿐만 아니라, 이로 인해 태양전지를 구성하는 반도체 구조를 손상시킬 가능성이 높다. 그러므로 EL 현상을 일으키는 기전력인 역전류의 흐름

을 안정적으로 제어하기 위해서는 인가되는 바이어스 전압을 Threshold 전압부터 태양전지 본연의 특성을 나타내는 범위 내에서 전류가 흐를 수 있는 최대전압인 Voc 내에서 미세하게 조절되어야 한다. 또한 인가 허용 전류는 최대 전력점 전류인 Imp와 최대 허용 전류는 단락전류인 472 mA를 넘지 않도록 조절되어야 한다.

그러나 태양전지는 같은 공정을 사용하여 제작하더라도, 웨이퍼의 결정성장 및 에칭 공정시 불순물 도핑 농도의 미세한 차이에 따라 조금씩 다른 성능을 가지게 되며, 따라서 각각의 태양전지마다 조금씩 다른 전류-전압 특성을 지니는 특성을 갖는다. 또한 태양전지의 LAPSS 시험결과에 따라 측정된 Voc 전압에 대한 오차 때문에 급격한 전류 흐름이 발생할 가능성이 있다.

따라서 태양전지 파손의 위험을 방지하고, 실제 위성에서의 손쉬운 적용을 위해 본 논문에서는 전류-전압 곡선이 급격하게 변화해 차이를 극명하게 알 수 있으면서, 최대 전류가 흐르지 않도록 조절의 여유를 갖는 최대 전력점을 기준으로 정방향 바이어스 인가전압과 최대 허용 전류를 태양전지 셀과 스트링으로 나누어 표 1과 같이 설정하였다.

또한 태양전지가 실험 중 입을 수 있는 기능 상실의 가능성을 최대한 줄이기 위해 시험시 시험환경 및 작업자 안전에 대한 가이드 라인을 표 2와 같이 설정하였다.

본 논문에서 기술된 모든 시험은 표 1과 표 2에서 제시된 시험 가이드라인 하에서 시험된 결과이며, 이에 따라 시험 전, 후의 태양전지 패널의 기능 저하는 없었음을 미리 밝혀둔다. EL현상을 이용한 시험에 따른 태양전지의 기능저하 가능성에 대한 검증은 본 논문 3.4절에서 상세히 기술하였다.

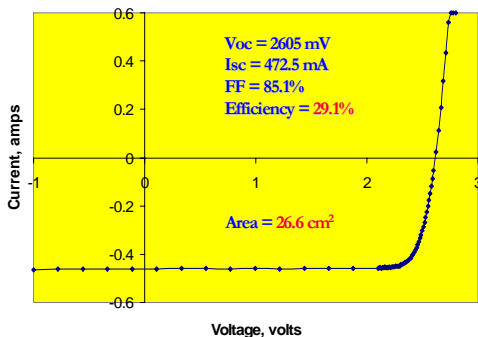


그림 7. GaAs 다접합 태양전지의 전류 - 전압 특성

표 1. EL효과를 위한 바이어스 입력 기준

항목	바이어스 입력 기준 값	비고
태양전지 셀 전압	$V_{mp} \pm 50mV$	
태양전지 셀 전류	Imp의 15%이내	
태양전지 스트링 전압	$\left\{ \sum_{n=1}^N (V_{mp_n} + 0.05) \right\} \times 0.9 + V_{TH_{B-Isis}}$	N: 스트링당 태양전지 개수
태양전지 스트링 전류	$MIN(I_{mp_1}, I_{mp_2}, \dots, I_{mp_N}) \times 0.2$	Vth: Blocking Diode의 임계전압

표 2. 시험 환경 및 작업자 안전 가이드 라인

항목	가이드라인
시험 장소	<ul style="list-style-type: none"> - 시험이 수행되는 장소는 정전기 방지 대전 시설이 장비되어야 함 - 태양전지의 온도별 성능변화를 줄이기 위해 25℃ 항온 기능 요망 - 최대 온도 편차가 1℃ 이내
ESD 방지	<ul style="list-style-type: none"> - 시험 수행자는 ESD Strap을 장착하고 수행되어야 함
오염 방지	<ul style="list-style-type: none"> - 광학 부품의 오염 방지를 위해 시험 작업자는 반드시 장갑과 마스크를 착용해야 함
전원공급기	<ul style="list-style-type: none"> - 전원공급기는 0.5%이하의 직류 Max ripple을 공급할 수 있어야 함

III. 실험 및 결과

3.1 태양전지 셀의 기능 건전성 평가

2.2절에서 설명한 것과 같이 태양전지에 전계 발광 현상이 일어난다는 것은 태양전지가 정상적으로 동작할 수 있는 최소한의 조건을 지니고 있음을 의미한다. 그러나 태양전지의 수광부는 제작상 고르게 도핑 시키기 어렵고, 표면 두께 또한 고르게 성장되지 않으므로 전 부분이 고르게 발광하지는 않는다.

그러나 전 영역에 걸쳐 미세한 발광이 일어나는 경우 태양전지 셀이 정상적으로 발광하는 것으로 파악할 수 있다. 그림 8은 단위 태양전지에 표 1에서 기준한 바이어스 값인 V_{mp} -50mV인 2.2V와 I_{mp} 의 20%인 40mA 전류제한의 조건으로 정방향 바이어스를 인가한 중국 TIPS 사의 TJ CIC의 건전성 평가 시험을 보여준다.

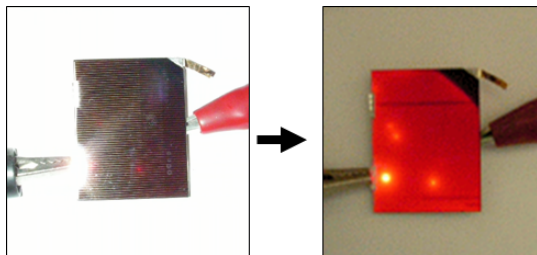


그림 8. 태양전지 전계 발광 현상 시험

3.2 EL 현상을 이용한 태양전지 정밀 균열 검사

태양전지의 단면 구조는 앞선 그림 2와 그림 5와 같다. 이러한 구조의 얇은 태양전지에 있어 그림2의 Case #1 ~ #4 와 같은 균열의 형태들은 결정질의 보호 유리 또는 접착제의 이격에 따른 빛의 산란 현상이 일어나므로, 빛 반사에 의해 어렵지 않게 파악할 수 있다.

그러나 일반적인 육안검사의 문제는 그림 2에서 나타난 기계적 이상 중, 태양전지의 기능상 문제를 일으키지 않는 Case #1 ~ #3의 균열과 열팽창에 따른 태양전지의 파손 또는 완전한 분리를 야기 시켜 반드시 수리되어야 하는 Case #4의 경우를 분리해 낼 수 없다는 것이다. 또한 태양전지의 용접 또는 납땜 중에 발생할 수 있는 후면 금속 접착면(Back-surface metalization) 부분 (그림 5의 Ge층 Metalization 부분)의 균열도 이 부분이 태양전지패널과 접착제로 부착되어 있어 육안검사를 통한 구별이 불가능하다.

하지만 태양전지에 전계 발광 현상을 발생시켜 빛을 발산하게 되면, 균열이 있는 부분에는 인가된 전류가 흐르지 못하여 빛이 발산하지 못하고, 또한 내부에서 발생한 빛이 균열사이의 공간으로 직접 산란하게 되므로 그림 8과 같이 균열의 주변부가 균열의 형태에 맞춰 더 밝게 빛나는 현상이 일어나게 된다. 따라서 태양전지의 전계 발광 현상을 이용하여 태양전지 뒷부분에 있는 기계적 균열을 검사할 수 있다.

그림 9는 태양전지 전계 발광 현상을 이용한 Back surface Metalization 의 균열을 확인이 가능함을 보여준다. 앞서 설명된 것과 같이 일반 육안 검사로는 확인 할 수 없는 균열을 화살표에 제시된 부분과 같이 쉽게 확인할 수 있었으며,

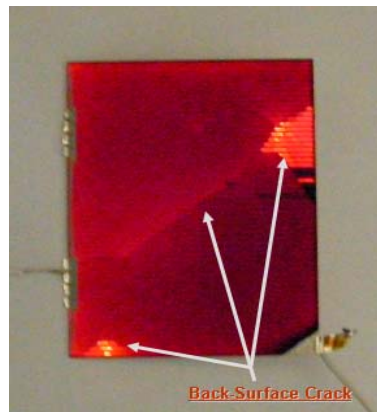


그림 9. Back-surface 균열 검출 (TIPS TJ CIC 태양전지)

이를 통해 EL현상을 이용해 태양전지 셀과 접착제 부착면과 같이 육안으로는 확인할 수 없는 부분의 미세 균열도 확인할 수 있음을 검증하였다. 또한 EL현상을 이용한 정밀 육안 검사가 다양한 GaAs 다접합 태양전지에 보편적으로 사용가능한가를 확인하기 위해, 그림 10과 같이 제조사가 다르며, 결정 성장 공정이 중국 TIPS사의 태양전지와 상이한 미국 TECSTAR 사의 TEC1D 다접합 태양전지에 본 방법을 적용하여, 보편적 가능성을 확인하였다.

EL 현상을 위한 정방향 바이어스의 인가는 광전류의 재결합을 줄이는 Grid-Finger에게 직접 전자를 공급하게 되므로, Grid-Finger의 증착 이상 및 이와 관련된 태양전지의 광전류 미 발생 구역인 무기능 영역(Dead Area)를 식별할 수 있게 해준다. ECSS 규격에 명시된 것과 같이 연속적인 2개 이상의 Grid-Finger의 증착 이상으로 인해 태양전지 셀의 일정 부분에서 전류가 생성되지 못할 관련, 스트링을 구성 증착다른 태양전지에서 생성된 전기에너지가부분에서 에서 열로 발산되는 현상인 열점 현상 (Hot-Spot)이 식별할 가능성이 높다. 따라서 태양전지 시스템의 최종 검사시 EL 현상을 이용한 육안 검사를 통해 열점 현상이 의심되는 태양전지의 교체함으로써, 태양전지 시스템의 성능 저하를 방지하는데 이 방법이 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

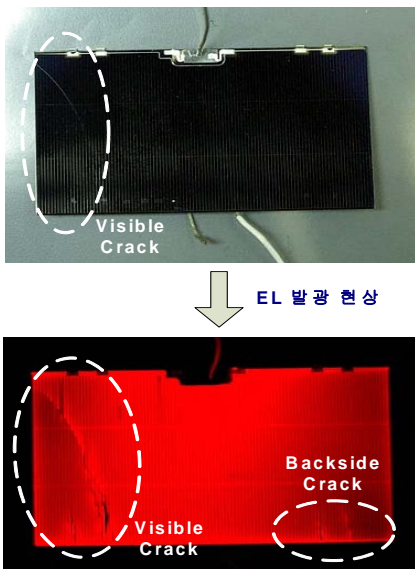


그림 10. TEC1D 태양전지 셀의 EL을 이용한 균열검출 적용

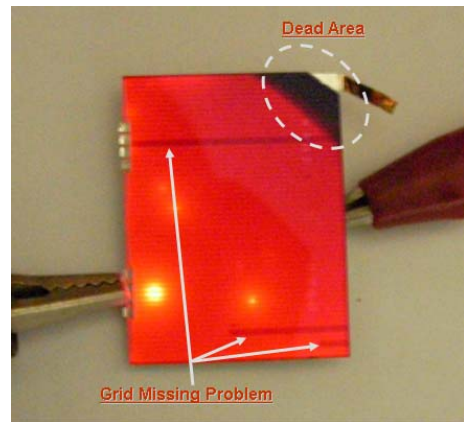


그림 11. Grid 및 Dead Area 검출 (TIPS TJ CIC 태양전지)

그림 11은 Grid-Missing에 따른 열점 (Hot-Spot)발현 예상 지점과 태양전지의 기능이 정지된 무기능 영역 (Dead Area) 의 확인을 EL 현상을 이용한 육안검사를 통해 발견할 수 있음을 보여준다.

3.3 태양전지 패널 단위 건전성 예측

EL 현상은 태양전지에 전압이 인가되어 전계가 발생되면 나타난다. 따라서 여러 개의 태양전지가 직렬로 연결된 태양전지 스트링의 경우에도 직렬연결에 따른 전압 분배 효과로 인해 전계 발광 효과를 이용한 태양전지 스트링의 건전성 평가가 가능하다. 이 때 스트링에 인가되는 전압은 단위 태양전지(CIC)에서 인가되는 단위 전압인 $V_b = V_{mp} \pm 50mV$ 를 직렬 연결된 태양전지의 개수 만큼 곱하는 형식으로 계산할 수 있으며 이는 식 (1)과 같다.

식(1) 에서 0.9의 임의 상수를 곱한 이유는 개별 태양전지의 데이터에서 있을 수 있는 측정 오류 및 사람의 기입오류에 따른 전압 오차로 인해, 태양전지 스트링의 동작 예상점이 스트링의 실제 동작점보다 낮은 전압에 있을 경우에 발생하는 동작점의 Overshoot을 방지하기 위해 10% 전압을 줄여 인가하기 위해 임의로 넣은 안전계수입니다. 이에 대한 설명을 3.2절에 추가적으로 보완, 기술하였다. 식(1)에서 각 태양전지의 V_{mp} 값의 측정 오차 및 제작상 차이에 의한 과전압 인가를 방지하기 위해 스트링당 10%의 전압을 감쇄시켜 시험을 수행하는 것이 바람직하므로 0.9의 감쇄 요소를 첨가하였으며, 스트링의 보호를 위한 Blocking Diode가 있는 경우 Diode의 전압감쇄를 보정하기 위한 요소 또한 첨부되었다.

$$V_b = \left\{ \sum_{n=1}^N (V_{mpn} + 0.05) \right\} \times 0.9 + V_{THB-Diode} \quad (1)$$

(N : 스트링당 직렬연결 태양전지 수)
 ($V_{THB-Diode}$: Blocking Diode의 임계 전압)

그림 12는 3개의 직렬 연결된 태양전지 스트링에 분석된 정방향 바이어스를 식 (1)에 대입하여 $V_b=6.837V$ 의 정방향 바이어스를 인가해, 직렬 연결된 모든 태양전지에서 전계 발광 현상이 발생하는 것을 보여준다. 이 실험에서 사용된 태양전지는 중국 TIPS 사의 TJ CIC 태양전지이다.

세계적으로 우주비행체용 GaAs 계열의 태양전지는 군소회사를 제외하고, 대표적으로 6개 회사에서 생산된다. 각각의 태양전지는 성능 개선을 위해 약간씩은 다른 공정을 취하고 있으나, 이들의 기본적 제조 방법은 2가지 제조방식으로 구분 지을 수 있다.

이 중 가장 보편적으로 사용되는 방법은 Ge 웨이퍼에 AlGaAs, AlGaIn, GaP등과 터널 다이오드를 차례로 증착시키는 방식으로 제작되며, 그림 12에서 시험된 TIPS의 TJ CIC도 이러한 방식으로 제작되었다. 이러한 방식으로 제작된 태양전지는 Grid-Finger와 Interconnector Foil이 (-)인 음극, 후면의 금속접촉면 (Back-surface Metalization) 부분이 (+)인 양극인 특징을 지닌다. 그러나 몇몇 제조사의 태양전지는 이와는 반대 방식으로 제작되며 이에 따라 방식의 태양전지로 Grid-Finger와 Inter connector Foil이 (+)인 양극, 후면의 금속접촉면 부분이 (-)인 음극인 특징을 지닌다.

따라서 제작 방식이나 불순물 도핑 순서에 따라 다양하게 제작되는 GaAs 계열의 태양전지

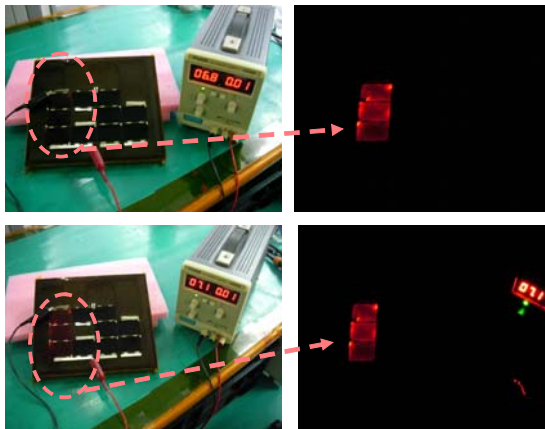
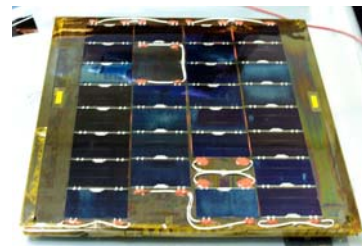


그림 12. 태양전지 스트링의 EL 현상 (TIPS TJ CIC 태양전지)

에 본 방법이 보편적으로 적용 가능한지 확인하기 위해서는 다양한 태양전지에 대한 태양전지별, 스트링 별 실험이 요구된다. 본 논문에서는 EL 현상을 이용한 건전성 평가 방법의 보편성을 확인하기 위해 불순물 도핑, 결정 성장 및 MOCVD 방식이 앞서 실험된 중국 TIPS TJ CIC과는 반대 방식으로 제작되는 미국 TECSTAR사의 TEC1D CIC 태양전지와 TIPS CIC과 같은 방식으로 제작되나, MOCVD 방식이 다른 미국 EMCORE의 ATJ CIC에 동일한 실험을 수행함으로써 시험방법의 보편성을 확인하였다.

그림 13은 TEC1D 태양전지 28개로 구성된 소형 태양전지 패널을 실험한 결과를 나타낸다. 이 태양전지 패널은 14개의 직렬로 연결된 태양전지로 구성되는 2개의 스트링을 지닌 시험용 소형 태양전지 패널로 저궤도 운용시 28V 버스전압의 사용이 가능하도록 설계되었으며, 최대 출력은 25W, 크기는 350mm x 300mm의 특성을 지닌다.

건전성 평가가 수행된 그림 13의 패널은 2,200회의 열주기 시험을 완료한 상태로 태양전지 건전성 평가에서 열피로에 따른 태양전지 노화 및 무기능 셀(Dead Cell)에 가까운 성능 저하가 발견되었으며, 노화의 자세한 형태를 그림 14에 나타내었다.



↓ EL 발광 현상

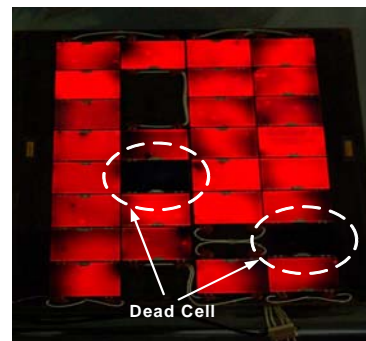


그림 13. 태양전지 패널 건전성 평가 (TEC1D CIC 태양전지)



그림 14. 열 피로에 의한 노화 결함



그림 16. 열 피로에 의한 노화 결함
(EMCORE ATJ CIC 태양전지)

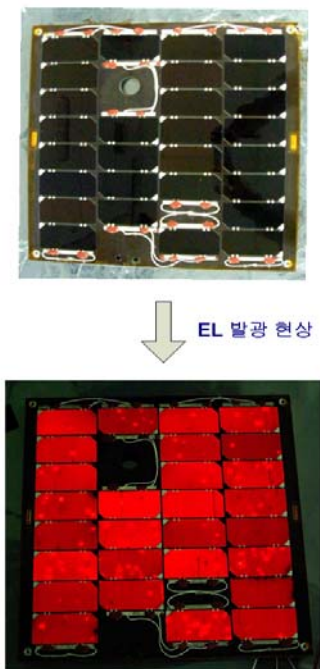


그림 15. 태양전지 패널 건전성 평가
(EMCORE ATJ CIC 태양전지)

그림 15는 ATJ CIC 태양전지를 이용한 소형 태양전지 패널의 건전성 평가 실험을 보여준다.

본 실험에서 사용된 태양전지 패널은 그림 13과 그림 14에서 기술된 태양전지 패널과 동일한 크기와 규격으로 설계되고, ATJ CIC으로 제작된 소형 태양전지 패널로 14개의 직렬로 연결된 태양전지로 구성되는 2개의 스트링을 지니며, 저궤도 운용시 28V 버스전압의 사용이 가능하도록 설계되었다. 최대 출력은 28W, 350mm x 350mm의 크기를 지닌다.

건전성 평가가 수행된 그림 15의 패널 또한 2,200회의 열주기 시험을 완료한 상태로 태양전

지 건전성 평가에서 열 피로에 따른 태양전지 노화가 발견되었으며, TEC1D 태양전지와는 달리 무기능 셀(Dead Cell)은 발견되지 않았다. 노화의 자세한 형태를 그림 16에 나타내었다.

실험된 태양전지 패널은 LAPSS 시험결과 전원으로서의 동작 안정성을 평가하는 Fill Factor가 열주기 시험전보다 3% 정도 하락함을 확인하였다.

이는 그림 16에서 나타난 것과 같은 열 피로에 의한 노화가 전원 안정성에 영향을 미친 것으로 파악할 수 있으며, 이를 통해 EL 현상을 이용한 태양전지 패널의 기능 건전성 평가가 정성적으로 타당함을 확인할 수 있었다.

3.4 상용 태양전지 패널의 건전성 예측 적용

3.3절에서의 실험은 태양전지 스트링과 소형 인공위성의 검증용으로 제작된 저전압 태양전지 패널을 이용한 검증이다. 이들은 대부분 28V 또는 12V의 버스를 사용하며, 최대 100W 부근의 전력을 사용하므로 이러한 패널을 이용한 실험만으로는 제안된 건전성 평가 방법의 실용성 확인이 부족하다 할 수 있다. 따라서 일반적인 실용급 우주비행체를 위한 태양전지 패널에 준하는 태양전지 패널에 대한 실험이 요구된다.

일반적인 저궤도 실용급 위성의 경우, 1~1.5W/Kg에 이르는 전력 요구량을 만족시키며, 안정적인 전력 생성을 위해, 50V 이상의 태양전지판 출력 전압이 요구된다. 이러한 실용급 태양전지 패널은 고온에서 태양전지 패널의 전압 및 전력 변환 효율이 낮아지는 특성을 고려하여 일반적으로 25~30개의 태양전지를 직렬로 연결해 스트링을 구성하는 형식을 지닌다.

III. 결 론

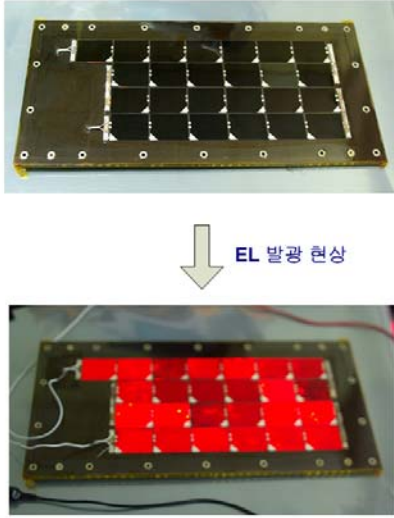


그림 17. 실용급 태양전지패널 건전성 평가 (EMCORE ATJ CIC 태양전지)

본 논문에서는 50V 이상의 태양전지 출력 전압을 요구하는 과학기술위성 2호의 보조 태양전지판 준비행모델(PFM)을 이용한 실험을 통해 EL 현상을 이용한 건전성 평가가 실용급 태양전지 패널에도 적용 가능함을 확인하였으며, 이를 위한 실험 결과를 그림 17에 나타내었다.

본 실험에 사용된 과학기술위성 2호 보조태양전지패널 준비행모델은 ATJ CIC 태양전지 25개를 직렬로 연결해 스트링으로 구성하며, LAPSS 시험을 통해 정상적으로 동작함을 확인한 패널이다. 정방향 바이어스의 인가전압은 식 (1)을 기준으로 계산해 61.4V 로 인가되었으며, 최대 전류 제한은 40mA로 제한하였다.

태양전지 패널에 있어 기능적으로 가장 큰 위험 요소인 열해 (Thermal Defect)에 있어, 바이어스 인가 10분후 태양전지 셀 표면의 온도를 비접촉식 적외선 온도계를 이용하여 측정한 결과, 바이어스 인가 전 보다 약 3.5도 상승한 것으로 측정되었으며, 이는 전류 제한이 온도 상승을 억제하는데 효과가 있음을 반증한다.

앞선 3.3절과 3.4절의 실험을 통해 전계 발광 효과를 이용한 태양전지 건전성 평가가 몇 개의 태양전지를 연결한 정도의 스트링 뿐만 아니라 높은 전압의 스트링 구성을 갖는 태양전지의 패널 레벨에서도 기능 건전성 확인에서부터, 결함 발생 가능성에 대한 예측에 까지 광범위하게 사용 가능함을 확인하였다. 또한 단위 태양전지에 대한 확인을 통해 교체가 필요한 태양전지에 대한 선택 평가가 가능함을 확인하였다.

본 논문에서는 III-V족 화합물 반도체에서 나타나는 전계 발광 현상이 III-V족 화합물 반도체인 GaAs를 이용해 제작되는 우주용 다접합 GaAs 태양전지에서 나타날 수 있는 가능성에 대한 이론적 검토를 수행하고, 이를 위한 실험적 방법에 대해 고찰하였다. 또한 태양전지에 전계 발광 현상을 나타내기 위한 입력 전압 및 전류의 제한 조건을 설정하고, 이를 통해 단위 태양전지와 태양전지 스트링에 대한 실험을 수행하고 그 결과를 기술함으로써 전계 발광 현상을 이용한 태양전지 건전성 평가가 타당함을 확인하였다.

본 논문에서 제시된 우주용 태양전지 건전성 평가 방법은 50V 이하의 비교적 낮은 전압을 이용하는 소형위성용 태양전지 시스템의 건전성 평가에 광범위한 목적으로 사용될 수 있을 것으로 판단되며, 이를 토대로 한 연구의 진행을 통해 이를 발전시킨다면 대형 시스템에서의 사용도 가능할 것으로 예측된다.

참고문헌

- 1) C. G. Zimmermann and K. Dettlaff, "Method and apparatus for optical detection of mechanical defects in semiconductor components, in particular solar cell arrangements", IEEE TRANSACTIONS ON DEVICE AND MATERIALS RELIABILITY, VOL. 6, NO. 3, SEPTEMBER 2006.
- 2) Cell Inspection Criteria based on Electroluminescence (CIEL). Final Report (November 2006), EADS Astrium, Germany, ESA CR(P)-4572
- 3) 이만근, 송진수, 윤경훈, "고효율 GaAs/GaAs, GaAs/Ge 화합물 태양전지에 관한 연구", 통상산업부 에너지기술연구원, 1996.
- 4) 실트론, "터널 다이오드층이 구비된 적층형 태양전지" 특허실용, 출원번호:1020030096658.
- 5) 고려대학교 물리학과 Electronic Material 강의 자료, <http://smartpolymer.korea.ac.kr>
- 6) 광주과학기술원 나노광반도체 연구실, "질화물 반도체를 이용한 차세대 조명용 백색 LED 기술", 2003
- 7) EMCORE Corp. "ATJ Solar Cells Technical Volume", Chapter 1
- 8) TIPS corp. "TJ Solar Cell Data Sheet"
- 9) Martin A. Green, "SOLAR CELLS", Prentice Hall Inc, 1982.
- 10) H.S. Rauschenbach, "Solar Array Design Handbook", 1980.
- 11) Phillip Samson, "Solar Generator Training Program TT14 Course Book #2-2", ALCATEL SPACE, 2004.