

유연 InGaP/GaAs 2중 접합 태양전지 모듈의 신뢰성 확보를 위한 실험 및 수치 해석 연구

김영일 · Xuan Luc Le · 좌성훈[†]
서울과학기술대학교 나노IT디자인융합대학원

Reliability Assessment of Flexible InGaP/GaAs Double-Junction Solar Module Using Experimental and Numerical Analysis

Youngil Kim, Xuan Luc Le, and Sung-Hoon Choa[†]

Graduate School of Nano IT Design Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

(Received December 2, 2019; Corrected December 26, 2019; Accepted December 28, 2019)

초 록: 유연 태양 전지는 최근 휴대용 배터리, 웨어러블 소자, 로봇, 드론 및 비행기와 같은 광범위한 응용 분야로 인해 큰 주목을 받고 있다. 특히, 고효율 및 높은 신뢰성을 갖는 유연 실리콘 및 화합물 반도체 태양 전지의 요구가 계속 증가하고 있다. 본 연구에서는 유연 InGaP/GaAs 2중 접합 태양전지 모듈을 개발하였다. 특히 제작된 유연 태양전지 모듈의 신뢰성을 확보하기 위하여, 풍속 및 주위 온도가 태양 전지 작동 온도에 미치는 영향을 수치해석으로 분석하였다. 3 종류의 풍속(0 m/s, 2.5 m/s 및 5 m/s) 및 2 종류의 주변 온도 조건(25°C 및 33°C)에 대하여 태양 전지 모듈의 온도 분포를 해석하였다. 유연 태양전지 모듈의 유연성은 굽힘 시험 및 굽힘 수치해석을 통하여 평가하였다. 25°C 온도조건에서 풍속이 0 m/s 일 때, 태양 전지 셀의 최대 온도는 149.7°C이다. 풍속이 2.5 m/s로 증가되었을 경우, 태양 전지의 온도는 66.2°C로 크게 감소되었다. 또한 풍속이 5 m/s 인 경우, 태양 전지의 온도는 48.3°C로 급격히 감소함을 알 수 있었다. 주변 온도 또한 태양 전지의 작동 온도에 영향을 미친다. 2.5 m/s의 풍속에서 주변 온도가 33°C로 증가할 경우, 태양 전지의 온도는 74.2°C로 약간 증가하였다. 따라서 태양 전지 셀의 온도에 영향을 미치는 가장 중요한 인자는 풍속으로 인한 열 방출 효과임을 알 수 있었다. 또한 태양 전지의 최대 온도는 사용된 소재들의 유리 전이 온도보다 낮기 때문에, 열 변형 및 모듈의 열화 가능성은 매우 낮을 것으로 예측된다. 제작된 태양전지 모듈은 굽힘 반경 7 mm까지 굽힐 수 있어 비교적 우수한 유연성을 갖고 있었다. 또한 향후 neutral plane 해석을 통하여 태양전지 셀을 neutral plane에 위치시키면 유연성이 크게 증가할 것으로 예측된다.

Abstract: Flexible solar cells have attracted enormous attention in recent years due to their wide applications such as portable batteries, wearable devices, robotics, drones, and airplanes. In particular, the demands of the flexible silicon and compound semiconductor solar cells with high efficiency and high reliability keep increasing. In this study, we fabricated a flexible InGaP/GaAs double-junction solar module. Then, the effects of the wind speed and ambient temperature on the operating temperature of the solar cell were analyzed with the numerical simulation. The temperature distributions of the solar modules were analyzed for three different wind speeds of 0 m/s, 2.5 m/s, and 5 m/s, and two different ambient temperature conditions of 25°C and 33°C. The flexibility of the flexible solar module was also evaluated with the bending tests and numerical bending simulation. When the wind speed was 0 m/s at 25 °C, the maximum temperature of the solar cell was reached to be 149.7°C. When the wind speed was increased to 2.5 m/s, the temperature of the solar cell was reduced to 66.2°C. In case of the wind speed of 5 m/s, the temperature of the solar cell dropped sharply to 48.3°C. Ambient temperature also influenced the operating temperature of the solar cell. When the ambient temperature increased to 33°C at 2.5 m/s, the temperature of the solar cell slightly increased to 74.2°C indicating that the most important parameter affecting the temperature of the solar cell was heat dissipation due to wind speed. Since the maximum temperatures of the solar cell are lower than the glass transition temperatures of the materials used, the chances of thermal deformation and degradation of the module will be very low. The flexible solar module can be bent to a bending radius of 7 mm showing relatively good bending capability. Neutral plane analysis was also indicated that the flexibility of the solar module can be further improved by locating the solar cell in the neutral plane.

Keywords: Flexible, Solar cell, Thermal analysis, Bending, Flexibility

[†]Corresponding author
E-mail: shchoa@seoultech.ac.kr

© 2019, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

유연 태양전지(flexible solar cell)는 휴대용 전자 충전기, 웨어러블 디바이스, 로봇, 및 비행기, 자동차와 같은 다양한 분야로의 적용이 크게 늘고 있어 최근 많은 관심을 끌고 있다.^{1,2)} 기존의 실리콘 기반의 태양전지의 경우 효율은 비교적 우수하지만, 매우 brittle한 특성으로 인하여 유연성의 한계가 있다. 따라서 유연 태양전지는 주로 유기 태양전지(organic solar cell) 혹은 페로브스카이트(perovskites) 태양전지 등 주로 유기소재를 사용한 태양전지가 주로 개발되고 있다.^{3,4)} 그러나 유기소재를 사용한 태양전지는 유연성은 우수하지만, 효율이 낮고 환경 신뢰성에 취약한 단점이 있다. 특히 최근 소형 인공위성과 무인 항공기, 드론 등 항공우주 산업이 발전함에 따라, 항공기 기체에 부착 가능한 유연 태양전지의 수요가 크게 증가하고 있다. 항공기나 드론 등에 부착하기 위해서는 가벼우면서 고효율 및 소자의 안정성이 우수한 고신뢰성 태양전지의 개발이 필수적이다. 따라서 실리콘이나 화합물 반도체 태양전지를 이용한 유연 태양전지의 개발에 요구가 크게 증가하고 있다.⁵⁾

한편 태양전지 셀 및 모듈에서 작동 온도(operating temperature)는 매우 중요하다. 태양전지의 태양광(PV) 효율 및 출력은 작동 온도에 반비례하며, 작동 온도가 증가할수록 태양전지 셀의 효율을 저하된다. 이론에 따르면, 결정형 실리콘 태양 전지의 경우, 셀의 온도가 최적 작동 온도 보다 1°C 이상 상승하면 태양전지 셀의 출력이 약 0.4-0.5% 감소한다고 알려져 있다.^{6,7)} 또한 태양전지 셀 및 모듈의 불균일한 온도 분포는 모듈 내의 열응력(thermal stress)을 발생시켜 태양전지 모듈의 변형을 초래할 수 있다. 특히 유연 태양전지 모듈의 경우 다양한 유기 재료 및 폴리머 소재를 사용하고 있으며, 이러한 소재들은 온도에 매우 민감하고 유리전이 온도(T_g , glass transition temperature)가 비교적 낮기 때문에 고온에서 쉽게 변형이 발생하거나 열화된다. 따라서 유연 태양전지 셀 및 모듈에서 작동 온도 및 온도 분포를 파악하는 것은 매우 중요하다. 태양전지 셀 및 패널(panel)의 작동 온도는 여러 요인에 따라 변하게 된다. 특히 태양의 복사열, 주변 온도, 주변의 풍속(wind speed) 및 방향, 모듈 소재 및 구조 등이 작동 온도에 주로 영향을 미칠 것으로 판단된다. 태양전지 모듈 및 패널의 작동 온도가 태양전지의 효율에 미치는 영향에 대해서는 많은 연구가 진행되었다.^{8,9)}

또한 기존 실리콘 및 화합물 기반의 태양전지로 제작된 태양전지 패널에 대해서 주변 온도 및 풍속이 태양전지 패널의 효율에 미치는 영향에 대해서도 다양한 연구가 진행되었다. 풍속이 증가하면 태양전지 패널의 온도가 감소하고 출력은 향상된다. 이는 풍속이 증가할수록 태양전지 패널의 표면에서 더 많은 열을 방출시켜 온도가 감소함으로써 출력 및 효율은 증가한다. Yang 등¹⁰⁾은 풍속이 2 m/s에서 8 m/s로 변할 경우 태양전지 패널의 성

능 변화를 실험적으로 연구하였다. Armstrong 등¹¹⁾은 풍속 및 주변 온도가 변할 경우 실리콘 기반의 태양전지 패널의 작동 온도가 어떻게 변화하는지를 실험을 통하여 방열 특성을 분석하였으며 및 열적 모델을 제시하였다. Zhou 등¹²⁾은 다결정 실리콘 태양전지 패널에 대해서 후면 시트의 두께 및 소재가 작동 온도에 미치는 영향에 대해서 연구하였다. 한편 주변 온도, 풍속 및 패널의 소재가 태양전지 패널의 열적 거동에 미치는 영향에 대해서 COMSOL 및 ANSYS 등의 다양한 FEM(finite element method) 상용 해석 소프트웨어를 이용하여 다양한 수치 해석이 수행되었다.^{13,14)} 그러나 유연 태양전지 셀 및 모듈의 경우, 주변 온도 및 풍속이 태양전지 셀의 효율에 미치는 영향에 대해서는 아직 연구가 매우 미흡한 실정이다.

한편 유연 태양전지 셀의 경우 태양전지 셀 및 패널의 유연성 확보가 매우 중요하다. 특히 실리콘 또는 화합물 기반의 태양전지는 매우 brittle 하기 때문에 기계적인 변형에 매우 취약하다. 본 연구에서는 InGaP/GaAs 2중 접합 태양전지를 이용하여 고효율 유연 태양전지를 개발하였다. 특히 개발된 유연 화합물 태양전지의 작동 온도가 주변 온도 및 풍속에 의하여 어떻게 변화하는지를 수치 해석을 통하여 분석하였다. 또한 굽힘 실험을 이용하여 개발된 유연 태양전지의 유연성을 평가하였다. 이를 통하여 고효율 유연 태양전지의 신뢰성 향상 연구를 수행하였다.

2. 태양전지 모듈 제작 및 실험 방법

유연 InGaP/GaAs 이중접합 태양전지를 제작하기 위하여 Fig. 1과 같이 2 인치 p-type GaAs (100) 기판 위에

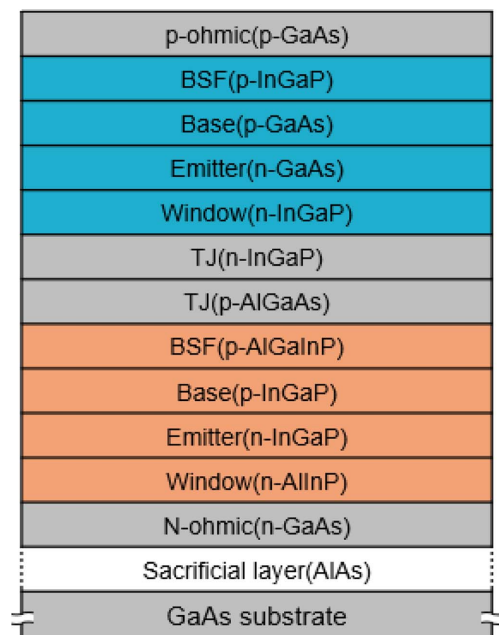


Fig. 1. Schematic illustration of inverted InGaP/GaAs compound solar cell structures.

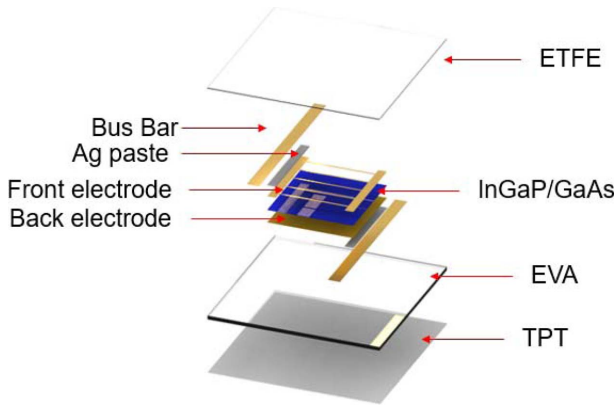


Fig. 2. Schematic illustration of flexible solar cell module.

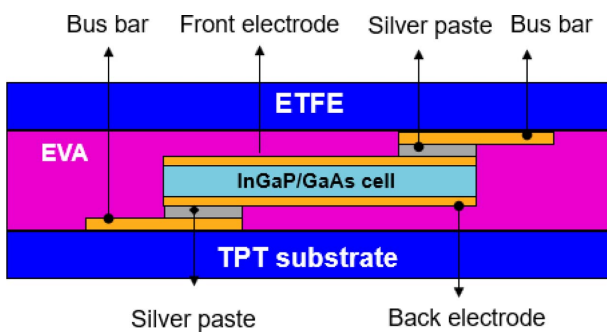


Fig. 3. Cross-sectional schematic illustration of flexible solar cell module.

AlAs 기반의 희생층($Al_xGa_{1-x}As$) 구조를 성장하였다. 그 후 MOCVD(Metalorganic Chemical Vapor Deposition, AIXTRON: 2600 G3) 에피 성장 기술을 이용하여 InGaP/GaAs 이중접합 태양전지 구조를 역방향으로 성장(inverted growth)하고, 기판 박리 공정 기술인 epitaxial lift-off(ELO) 공정을 적용하여 태양전지를 기판으로부터 박리시켰다. 태양전지 셀은 emitter/base p-n 접합 층과 캐리어 재결합 방지를 위한 window 및 back-surface-field(BSF) 층으로 구성되며, 10^{19} cm^{-3} 이상의 고농도로 도핑된 p-GaAs/n-GaAs 터널접합(TJ) 구조에 의해 전기적으로 연결된다. 제작된 태양전지 셀의 각 층의 구조, 두께 및 소재는 n-contact layer($0.5 \mu\text{m}$, n-GaAs), BSF($0.05 \mu\text{m}$, n-GaInP), base($3.5 \mu\text{m}$, n-GaAs), emitter($0.5 \mu\text{m}$, p-GaAs), window 층($0.3 \mu\text{m}$, p-GaInP), p-contact 층($0.3 \mu\text{m}$, p-GaAs)로 되어 있다. 자세한 InGaP/GaAs 이중접합 태양전지 셀의 제작 공정은 참고 문헌^{15,16}에 자세히 설명되어 있다. 최종 제작된 InGaP/GaAs 이중접합 태양전지 셀의 크기는 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 이며, 두께는 약 $5 \mu\text{m}$ 이다.

역방향으로 성장한 InGaP/GaAs 셀을 기판으로 분리한 후 유연 태양전지 모듈을 제작하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 제작된 태양전지 모듈을 도식적으로 나타내고 있다. 태양전지 모듈은 유연 기판인 TPT(tedlar-polyester-tedlar) 기판, bus bar, 전면/후면 전극, 충전 소재인 EVA(ethylene vinyl acetate) 및 상부 봉지재(encapsulation)인 ETFE(ethylene

Table 1. Dimensions of each component of InGaP/GaAs solar cell module

Component	Width (mm)	Length (mm)	Thickness (μm)
ETFE	10	10	50
Bus Bar	1	10	10
Silver paste	0.5	5	50
InGaP/GaAs cell	5	5	1
Front/Back electrode	5	5	5
EVA	10	10	150
TPT	10	10	300

tetrafluoroethylene)의 적층 구조로 구성되어 있다. 태양전지 셀과 전극은 샌드위치 구조로 적층 되어있고, 전면 전극의 상부와 후면 전극의 하부에는 구리 재질의 bus bar가 접합되어 있다. 후면 전극에 본딩된 bus bar의 하부에 TPT 기판이 위치하고 있다. 모듈을 구성하고 있는 각 소재들의 제원이 Table 1에 나타나 있다. 최종 제작된 태양전지 모듈의 크기는 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 이었다.

제작된 모든 태양전지 셀 및 모듈의 특성은 solar simulator (Oriel, Sol2A)와 DC source meter (Keithley, 2400)를 사용해 AM 1.5G ($1,000 \text{ W/m}^2$) 표준 스펙트럼 조건 및 1 Sun 조건에서 측정하였다. 태양전지 모듈의 유연성 평가는 자체 제작한 굽힘 시험기를 이용하여 굽힘 시험을 수행하였다. 샘플이 평평한 상태에서 곡률 반경을 줄이면서 시험하였으며, 각 곡률 반경에서 굽힘 시험을 수행한 후, 태양전지 모듈의 효율 및 J-V(current density-voltage) 곡선을 solar simulator를 이용하여 측정하였다. 또한 현미경을 이용하여 태양전지 모듈의 파괴 및 크랙이 발생하였는지를 관찰하였다.

3. 수치해석 모델링

Fig. 4는 본 연구에서 사용된 유연 태양전지 모듈의 유한요소 모델링을 보여주고 있다. 수치해석은 상용 소프트웨어인 ANSYS를 사용하여 수행하였다. 유한요소 해석을 위해 8개의 절점을 가진 3차원 요소를 사용하였다. 절점의 수는 약 152,000개, 요소의 수는 약 137,000개로 구성 되었다. 본 연구에 필요한 유한요소 해석에서는 유연 태양전지 모듈의 최대 온도와 온도 분포를 관찰하는 것이 목적임으로, 시간에 따른 열의 흐름의 변화가 없는 상태인 정상상태(steady state)로 열 해석을 수행하였다. 유연 태양전지 모듈에서의 발열 조건은 태양에 의해 방사원(irradiation) 에너지가 유연 태양전지 모듈에 도달하면 반사, 투과, 흡수가 일어난다. 그 중 흡수되는 에너지에 의해 태양전지가 발열하게 된다. 본 해석에서는 태양 에너지의 일조 강도 국제표준에 따라서 $1,000 \text{ W/m}^2$ 를 사용하였고, 이 경우 통상적으로 사용되는 실리콘 태양전지의 흡수 에너지인 733 W/m^2 를 발열 조건으로 하였

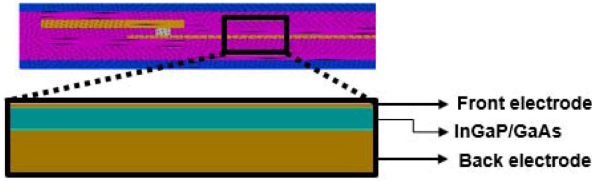


Fig. 4. FEM modeling of flexible solar cell module

다.¹⁷⁾ 또한 본 연구에서는 풍속에 의한 유연 태양전지 모듈의 작동 온도의 변화와 계절에 따른 유연 태양전지 모듈의 작동 온도를 분석하기 위하여 0 m/s, 2.5 m/s, 5 m/s의 세 가지 풍속과 대기 온도인 25°C, 33°C의 온도 조건에 따른 총 6가지 상황에 대하여 태양전지 셀 및 모듈의 온도 분포를 해석하였다. 태양전지 모듈의 상부 표면에 작용하는 대류에 의한 열전달은 풍속과 관련이 있으며, 따라서 풍속에 따른 대류 열전달계수(convective heat transfer coefficient)는 대류 열전달계수(h)와 풍속(v)에 관한 식인 $h = 5.7 + 3.8v^{18)}$ 을 이용하여 계산하였다. 한편 태양전지 모듈에서 발생한 열은 TPT 기판을 통하여 열전도 현상을 통하여 외부로 전달된다고 가정하였다. 열전도 계수(thermal conductivity)는 $0.2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 이다.

또한 열전달 수치해석을 진행함에 있어 아래와 같은 가정이 사용되었다.

- 사용된 모든 소재의 열적 특성은 등방성이며 온도에 일정하다.
- 태양전지 셀 및 bus bar, 전극 사이의 전체 내부 반사는 무시할만한 것으로 간주하였다.

한편 태양전지 셀 및 모듈에서 발생하는 joule heating은 무시하였다. 이는 기존의 연구 결과^{19,20)}에서 언급되었듯이, joule heating에 의한 태양전지 모듈의 온도 증가는 2°C 미만으로 매우 미미하였기 때문이다. Table 2는 열 해석에 사용된 태양전지 모듈 각 소재의 물성을 나타내고 있다.

또한 유연 태양전지의 유연 특성을 알아보기 위한 태양전지 모듈의 굽힘 해석을 진행하였다. 수치해석에서는 태양전지 모듈이 굽혀진 상태에서의 태양전지 셀에 걸리

Table 2. Material properties of each components of solar cell module used for thermal and mechanical bending numerical simulation

Material	Thermal conductivity (W/m°C)	Young's modulus (GPa)	Poisson ratio (ν)	Density (kg/?)
ETFE	0.238	0.89	0.43	1700
Bus Bar	401	110	0.34	8300
Au Electrode	310	79	0.42	19300
EVA	0.23	0.08	0.4	950
InGaP/GaAs	0.046	85.5	0.31	5320
Ag Paste	18.03	17.5	0.35	9310
TPT	0.15	2.7	0.4	1300

는 최대 주 변형률(maximum principal stain)과 응력 분포의 분석을 주로 수행하였다. Table 2는 굽힘 해석에서 사용된 각 소재들의 물성을 나타내고 있다. 해석에 있어서 공정 중에 발생한 잔류 응력은 없다고 가정하여 해석을 진행하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 주변 환경이 태양전지 모듈에 미치는 영향

본 연구에서는 주변 온도 및 풍속이 유연 태양전지 모듈의 온도 변화에 미치는 영향을 수치해석을 통하여 분석하였다. 주변 온도의 경우 상온인 25°C와 여름의 온도인 33°C의 두 조건에 대하여 해석하였다. 풍속의 경우 바람이 불지 않는 실내에서의 조건(0 m/s)과 바람이 불고 있는 실외에서의 조건을 구분하여 열 해석을 진행하였다. 실외 조건에서의 풍속은 0 m/s, 2.5 m/s, 5 m/s의 3 조건에 대해서 해석하였다. 풍속 2.5 m/s는 한국 바람의 평균 풍속이다. 따라서 주변 온도 조건 2가지, 풍속 조건 3가지의 총 6가지의 경우에 대해서 수치해석을 진행하였으며, 그 결과가 Table 3에 나타나 있다. 표에서 온도는 태양전지 셀의 최대온도이다.

Fig. 5(a)는 상온인 25°C의 온도 조건에서 풍속이 없는 즉 0 m/s의 경우의 태양전지 셀의 온도 분포를 나타내고 있다. 태양전지 셀의 최대 온도는 149.7°C로 매우 높음을 알 수 있다. 또한 태양전지 셀의 중심에서 온도가 최대가 됨을 알 수 있다. 태양전지 셀 외곽에서의 온도는 147.5°C로 최소가 되는데, 중심부의 최대온도와 외곽의 최소온도의 차이는 약 2°C로 비교적 적음을 알 수 있다. Fig. 5(b)는 상온 25°C에서 풍속을 2.5 m/s로 증가시킬 경우의 태양전지 셀의 온도 분포를 나타내고 있다. 태양전지 셀의 최대온도는 66.2°C로 온도가 급격히 저하됨을 알 수 있었다. 또한 풍속이 5 m/s로 증가될 경우, 태양전지 셀의 최대온도는 48.3°C가 됨을 알 수 있다. 주위 온도가 33°C로 증가한 경우 당연히 태양전지 셀의 온도는 더 증가한다. Table 3에서와 같이 33°C에서 풍속이 0 m/s, 2.5 m/s, 5 m/s로 증가할 경우, 태양전지 셀의 최대 온도는 각각 157.7°C, 74.2°C, 56.3°C로 선형적으로 감소됨을 알 수 있었다. 해석 결과, 태양전지의 온도를 결정하는데 있어 가장 큰 요인은 대류에 의한 열 손실이고, 주변 온도 또한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 태양전지 셀의 열은 주변 소재로의 열전도(thermal conduction)와 바람에 의한 대류 열전달에 의하여 방출되는데, 풍속이 증가할수록 태

Table 3. Simulated maximum temperature in InGaP/GaAs solar cell for different wind speeds and temperatures

	Wind speed			
	0 m/s	2.5 m/s	5 m/s	
Temperature	25°C	149.7°C	66.2°C	48.3°C
	33°C	157.7°C	74.2°C	56.3°C

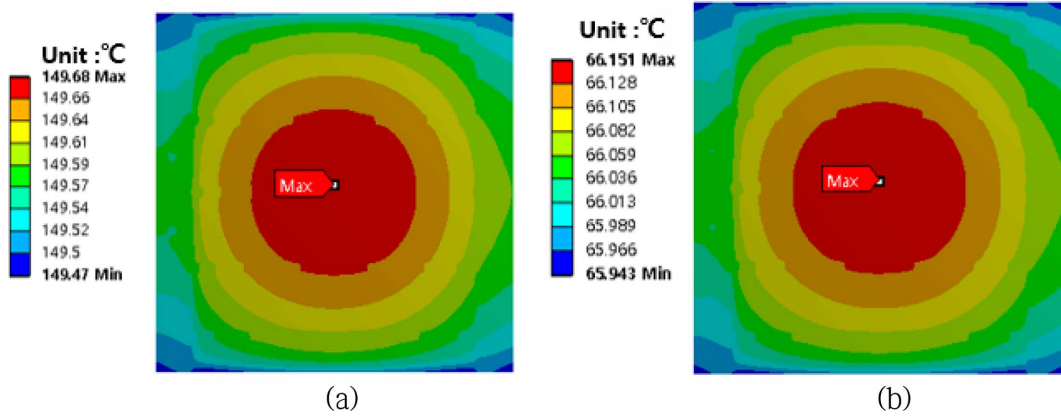


Fig. 5. Temperature distribution of InGaP/GaAs solar cell. (a) When the wind velocity is 0 m/s at 23°C. (b) When the wind velocity is 2.5 m/s at 23°C.

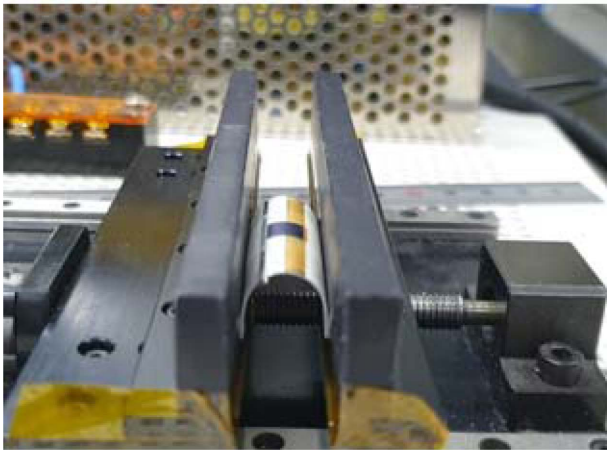


Fig. 6. Photograph of bending test of flexible solar cell module.

양전지 모듈에서 더 많은 열을 방출시킬 수 있으며, 따라서 풍속이 증가할수록 태양전지 셀의 온도는 감소한다. 풍속이 없는 경우에 온도가 제일 높은 이유는 당연하며, 풍속이 없는 자연대류(natural convection) 만으로는 태양전지 모듈의 열을 방출시키는 것이 충분하지 않기 때문이다.

유연 태양전지 모듈은 열에 민감한 폴리머 소재로 구성되어 있다. ETFE 및 TPT의 유리전이 온도는 각각 90°C 및 72°C 이다. 따라서 약 90°C보다 온도가 높게 상승하면 유연 태양전지 모듈의 변형이 발생하거나 열화가 가속화된다. Table 3에서 보듯이 풍속이 없는 0 m/s를 제외하고는 태양전지 셀의 온도는 소재의 유리전이 온도 보다 낮다. 따라서 열에 의한 변형은 매우 미미할 것으로 판단된다.

4.2 태양전지 모듈의 유연성 분석

제작된 유연 태양전지 모듈의 유연성을 파악하기 위하여 자체 제작한 굽힘 시험기를 이용하여 Fig. 6과 같이 굽힘 실험을 진행하였다. 태양전지 모듈을 굽힘 시험기에 장착한 후, 곡률 반경을 줄이면서 시험을 진행하였다. 각

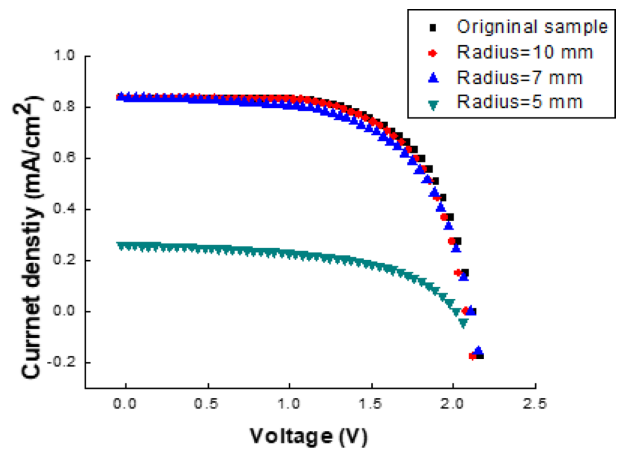


Fig. 7. Photovoltaic J-V curves of flexible solar cell modules for different bending radii.

곡률 반경에서 굽힘 시험을 진행한 후 solar simulator를 이용하여 시험 전후의 태양전지 모듈의 J-V 곡선 및 효율을 측정하였다. Fig. 7은 제작된 유연 태양전지 모듈의 각 곡률 반경에서의 굽힘 시험 후 측정된 J-V 결과이다. 굽힘 시험 전의 태양전지의 효율은 18.66%이었으며, 곡률 반경 20 mm까지 굽혔을 때 효율의 변화는 없었다. 곡률 반경 10 mm에서 굽힘 시험 후의 효율은 18.22%로 거의 변화가 없었다. 곡률 반경 7 mm로 굽힐 경우, 굽힘 시험 후의 태양전지의 효율은 17%로 약간 저하됨을 알 수 있었다. 한편 곡률 반경 5 mm로 굽혔을 경우, 유연 태양전지 모듈의 효율은 4.47%로 급격히 저하됨을 알 수 있었다. 현미경을 이용하여 태양전지 모듈의 상부를 관찰한 결과 Fig. 8과 같이 태양전지 모듈의 표면에 미세한 크랙이 존재함을 알 수 있었다. 따라서 곡률 반경 5 mm에서 태양전지 셀이 파괴되었고, 그로 인하여 효율이 급격히 저하됨을 알 수 있었다. 참고로 사용된 각 소재들 즉 ETFE 필름, EVA 필름, TPT 기판에 대해서 곡률 반경 5 mm까지 굽힘 시험을 실시하였고, 곡률 반경 5 mm에서 각 소재들의 파괴 및 변형은 발생되지 않았다. 따라서 곡률 반경 5 mm에서 파괴된 것은 태양전지 셀임을 알 수

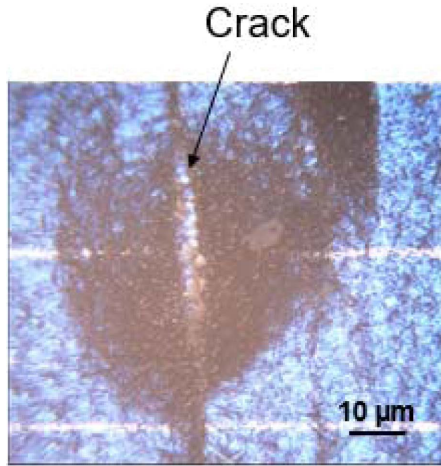


Fig. 8. Photograph of crack generated at the surface of flexible solar cell at a bending radius of 5 mm.

있었다.

제작된 유연 태양전지 모듈의 유연성을 더 향상시킬 수 있는지 파악하기 위하여 수치해석을 이용하여, 굽힘 시의 유연 태양전지 모듈의 응력 및 neutral plane 해석을 수행하였다. Neutral plane이란 태양전지 모듈을 굽혔을 경우 태양전지의 상부에는 인장응력이 작용을 하고, 하부에는 압축응력이 발생한다. 또한 태양전지 모듈의 중간 부분에는 응력 및 변형률이 0이 되는 평면이 존재하게 되는데 이를 neutral plane이라고 한다.²¹⁾ 따라서 유연 태양전지 모듈의 경우 가장 brittle한 재료인 InGaP/GaAs 이중 접합 태양전지 셀을 neutral plane에 위치시킬 경우 태양전지 모듈의 유연성을 향상시킬 수 있다. 한편 굽혔을 경우에 태양전지 셀의 최대 주변형률(maximum principle strain)을 계산하여 태양전지 셀의 파괴 가능성을 파악하였다. 이는 GaAs는 매우 brittle한 소재로서 주로 인장에 의하여 파괴가 되며, 그 경우 주변형률로 파괴의 유무를 파악하기 때문이다.

Fig. 9(a)는 태양전지 모듈을 곡률 반경 7 mm로 굽혔을 경우 태양전지 셀에서 발생한 변형률 분포도를 나타내고 있다. 최대 변형률은 태양전지 셀의 중심의 외곽 끝 부분에서 발생하고 있으며, 최대 변형률은 0.3%이었다. Fig. 9(b)는 곡률 반경 5 mm로 굽혔을 경우의 태양전지 셀의 변형률 분포도이다. 마찬가지로 변형은 태양전지 셀의 중

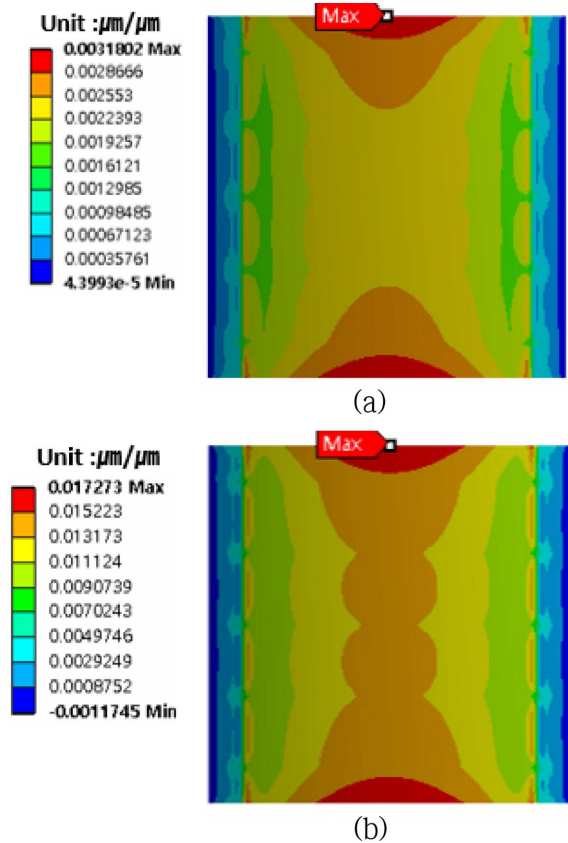


Fig. 9. Strain distribution of the solar cell bent at (a) Bending radius of 7 mm. (b) Bending radius of 5 mm.

심 끝 부분에서 최대가 되며, 굽힘 방향의 수직인 방향으로 변형이 전파됨을 알 수 있었다. 이때 발생된 최대 주 변형률의 값은 1.7%이었다. GaAs의 소재의 파괴 변형률 (fracture strain)은 약 0.62%로 알려져 있다.²²⁾ GaAs 태양 전지 셀을 5 mm로 굽힐 경우 최대 주변형률은 1.7%로 GaAs 소재의 파괴 변형률(0.62%) 보다 크기 때문에 InGaP/GaAs 태양전지 셀이 파괴되었음을 알 수 있다. 특히 변형이 굽힘 방향의 수직으로 가해지고, 따라서 크랙 이 발생하여 굽힘 방향의 수직으로 전파됨을 알 수 있다. 이는 Fig. 7의 굽힘 실험 결과, 곡률 반경 5 mm에서 효율 이 급격히 저하되고 크랙이 발생하는 현상과 일치하는 것 임을 알 수 있다. 따라서 태양전지 셀은 5 mm 이하에서 는 파괴가 됨을 알 수 있다. 따라서 제작된 유연 태양전

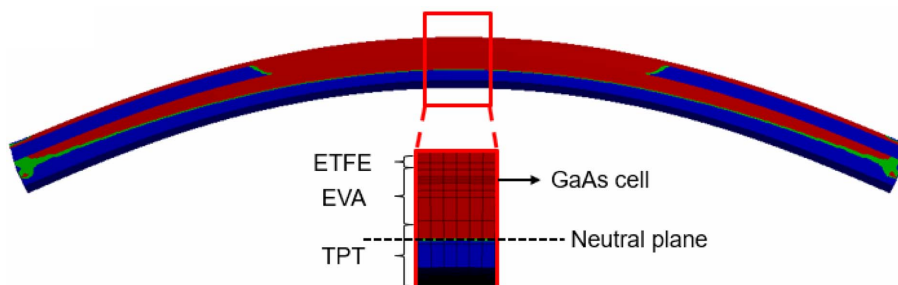


Fig. 10. Cross-sectional map of strain distribution of the solar cell bent at a bending radius of 5 mm and location of neutral plane.

지 모듈의 유연성이 어느 정도 확보되었음을 알 수 있었다. Fig. 10은 곡률 반경 7 mm로 굽혔을 경우에 태양전지 모듈 단면의 응력 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 neutral plane은 InGaP/GaAs 셀 아래쪽에 위치하고 있다. 따라서 두께 300 μm 인 TPT 기판의 두께를 줄이면 InGaP/GaAs 태양전지 셀을 neutral plane에 가깝게 위치시킬 수 있으며, 이 경우 InGaP/GaAs 셀에 걸리는 응력이 최소화되어 유연성이 향상되고, 더 작은 곡률 반경에도 파괴를 방지할 수 있다고 판단된다. TPT 기판의 두께를 줄여 유연성을 향상시키는 연구는 향후에 진행될 예정이다.

5. 결 론

본 연구에서는 유연 InGaP/GaAs 이중접합 태양전지 셀 및 모듈의 신뢰성 확보를 위한 연구를 수행하였다. 특히 유연 태양전지에서 가장 중요한 인자인 온도에 따른 효율의 변화 및 굽힘 유연성을 평가하였다. 25°C의 온도 조건에서 풍속이 0 m/s인 경우, 태양전지 셀의 중심부의 최대 온도는 149.7°C로 매우 높음을 알 수 있었다. 태양전지 셀 중심부의 최대온도와 외곽의 최소온도의 차이는 약 2°C로 비교적 적었다. 풍속을 2.5 m/s로 증가시킬 경우의 태양전지 셀의 최대온도는 66.2°C로 온도는 급격히 저하되며, 풍속이 5 m/s로 증가한 경우 태양전지 셀의 최대온도는 48.3°C가 됨을 알 수 있었다. 주위 온도가 33°C로 증가할 경우, 태양전지 셀의 온도는 더 증가하며, 온도 33°C에서 풍속이 2.5 m/s 및 5 m/s인 경우 태양전지 셀의 최대 온도는 74.2°C 및 56.3°C가 되며, 온도가 약간 증가됨을 알 수 있었다. 태양전지의 온도를 결정하는데 있어 가장 큰 요인은 풍속에 의한 대류 열 손실임을 알 수 있었다. 또한 풍속이 0 m/s를 제외하고 태양전지 셀의 최대온도는 유연태양전지 모듈에 사용된 소재의 유리전이온도보다 낮기 때문에 변형이 발생하거나, 소재의 열화가 가속될 가능성은 낮다고 판단된다. 제작된 유연 태양전지 모듈의 굽힘 시험을 수행한 결과, 곡률 반경 7 mm까지 효율의 변화가 없었으며 파괴도 발생하지 않았다. 그러나 곡률 반경 5 mm에서는 효율이 급격히 저하되며, 태양전지 셀의 파괴가 발생하였음을 알 수 있었다. Neutral plane 해석을 수행한 결과, 태양전지 셀은 neutral plane 위쪽에 위치하고 있으며, 기판의 두께를 감소시켜 태양전지 셀을 neutral plane에 위치시키면 유연성이 크게 증가할 것으로 예측된다.

감사의 글

이 연구는 에너지기술개발사업의 일환인 “초소형 태양광 cell 기반 25% 이상 모빌리티형 박막 태양광 모듈 개발”의 “수치해석을 통한 초소형 태양광 모듈 설계 및 유연성 평가”의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. C. H. Lee, D. R. Kim, and X. Zheng, “Transfer printing methods for flexible thin film solar cells: Basic concepts and working principles”, *ACS Nano*, 8(9), 8746 (2014).
2. S. H. Lee, and H. J. Chang, “Properties of Organic-Inorganic Protective films on flexible plastic substrates by spray coating method”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 24(4), 79 (2017).
3. S. K. Jang, S. C. Gong, and H. J. Chang, “The post annealing effect of organic thin film solar cells with P3HT:PCBM active layer”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 17(2), 63 (2010).
4. D. Yang, R. Yang, S. Priya, and S. Liu, “Recent advances in flexible perovskite solar cells: fabrication and applications”, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 58(14), 4466 (2019).
5. Q. Lin, H. Huang, Y. Jing, H. Fu, P. Chang, D. Li, Y. Yao, and Z. Fan, “Flexible photovoltaic technologies”, *J. Mater. Chem. C*, 2(7), 1233 (2014).
6. T. Hausler, and H. Rogass, “Latent heat storage on photovoltaic”, *Proc. 16th European PV Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)*, 2265 (2000).
7. E. Radziemska, “The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells”, *Renew. Energy*, 28(1), 1 (2003).
8. K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, and M. Osakada, “Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions”, *IEE Proc. Generation Transmiss. Distrib.*, 142(1), 59 (1995).
9. P. Midya, P. T. Krein, R. J. Turnbull, R. Reppa, and J. Kimball, “Dynamic maximum power point tracker for photovoltaic applications”, *Proc. 27th Annu. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, 1710 (1996).
10. J. Yang, Y. Sun, and Y. Xu, “Modeling impact of environmental factors on photovoltaic array performance”, *Int. J. Energy Environ.*, 4(6), 955 (2013).
11. S. Armstrong, and W. G. Hurley, “A thermal model for photovoltaic panels under varying atmospheric conditions”, *Appl. Therm. Eng.*, 30(11-12), 1488 (2010).
12. J. C. Zhou, Z. Zhang, H. J. Liu, and Q. Yi, “Temperature distribution and back sheet role of polycrystalline silicon photovoltaic modules”, *Appl. Thermal Eng.*, 111, 1296 (2017).
13. Y. Du, W. Tao, Y. Liu, J. Jiang, and H. Huang, “Heat transfer modeling and temperature experiments of crystalline silicon photovoltaic modules”, *Sol. Energy*, 146, 257 (2017).
14. M. U. Siddiqui, A. F. M. Arif, L. Kelley, and S. Dubowsky, “Three-dimensional thermal modeling of a photovoltaic module under varying conditions”, *Sol. Energy*, 86(9), 2620 (2012).
15. S. Moon, Y. Kim, K. Kim, C. Z. Kim, S. H. Jung, H. B. Shin, K. H. Park, W. K. Park, Y. S. Ahn, and H. K. Kang, “Flexible InGaP/GaAs double-junction solar cells transferred onto thin metal film”, *Current Photovoltaic Research (CPVR)*, 4(3), 108 (2016).
16. W. Choi, C. Z. Kim, H. K. Kang, and S. Jo, “The Effect of Metal Back-reflective Layers on the Performance of Transfer Printed GaAs Solar Cells”, *Current Photovoltaic Research (CPVR)*, 2(2), 73 (2014).
17. Y. Lee, and A. A. Tay, “Finite element thermal analysis of a solar photovoltaic module”, *Energy Proc.*, 15, 413 (2012).
18. J. Vlachopoulos, and D. Strutt, “Plastics Technicians Toolbox”, *Society of Plastic Engineering (SPE)*, 2, 21 (2002).

19. N. Peter, O. E. Kabu, K. Stephen, and D. Anthony, "3D finite element method modelling and simulation of the temperature of crystalline photovoltaic module", *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJRET)*, 4(9), 378 (2015).
20. G. Acciani, O. Falcone, and S. Vergura, "Analysis of the thermal heating of poly-Si and a-Si photovoltaic cell by means of Fem", *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ)*, 4(4) (2010).
21. S. Lee, J. Y. Kwon, D. Yoon, H. Cho, J. You, Y. T. Kang, D. Choi, and W. Hwang, "Bendability optimization of flexible optical nanoelectronics via neutral axis engineering", *Nanoscale Res. Lett.*, 7(1), 256 (2012).
22. Y. Sun, V. Kumar, I. Adesida, and J. A. Rogers, "Buckled and wavy ribbons of GaAs for high-performance electronics on elastomeric substrates", *Adv. Mater.*, 18(21), 2857 (2006).