

## 論文

### 기계적 하중 하에서 복합재료 시험편에 접착된 단결정 실리콘태양전지의 성능평가

김종천\*, 최익현\*\*, 김대현\*\*\*, 정성균\*\*\*\*

### Photovoltaic performance evaluation of the bonded single crystalline silicon solar cell on composite specimens under mechanical loading

Jong-Cheon Kim\*, Ik-Hyeon Choi\*\*, Dae-Hyun Kim\*\*\*, and Seong-Kyun Cheong\*\*\*\*

#### ABSTRACT

The objective of this study is to investigate appropriate bonding methods of solar cells in order to apply solar cells, which have been receiving particular attention as a renewable energy due to fossil energy depletion and environment issues, to composite structures. Back-contact solar cells with approximately 24.2% energy conversion efficiency were used in this study. Since silicon-based solar cells are mechanically fragile, the secondary-bonding methods using adhesive were examined in this study. The experiment was conducted with three kinds of bonding materials such as EVA film, Resin film and elastic adhesive. The performance of solar cells for three types of adhesives under mechanical loading on test specimens is conducted. In addition, the measuring equipment was designed to evaluate the performance of the solar cells under mechanical loading in real time and the fracture characteristics depending on bonding materials were evaluated. The reason decreasing solar cells efficiency were analyzed and considered by Fractography. The results show that the solar cell performance is largely affected by bonding techniques. Moreover, the bonding method using elastic adhesive shows best solar cell efficiency.

#### 초 록

본 연구에서는 화석에너지 고갈과 환경문제로 인해 새로운 신재생에너지로 주목 받고 있는 태양전지를 대표적인 경량재료인 복합재료에 적용하기 위해 적절한 태양전지 접착 방법에 대한 연구를 진행하였다. 사용된 태양전지는 후면전극 태양전지로 에너지변환 실험실 효율이 약 24.2%인 태양전지를 사용하였다. 하지만, 실리콘계열 태양전지는 재료의 특성상 깨지기 쉽기 때문에 일반적으로 사용되고 있는 동시경화 접착법 대신 접착제를 이용한 이차 접착법을 사용하였다. 접착재료는 태양전지의 충전재 및 접착제로 사용되고 있는 EVA film 과 프리프레그의 수지인 Resin film, 그리고 탄성 접착제를 이용하여 실험을 진행 하였으며, 태양전지가 접착된 복합재료 시험편에 기계적 하중을 부가하여 접착제 종류별 태양전지의 성능변화를 측정하였다. 또한, 기계적 하중 하에서 실시간으로 태양전지의 성능을 평가할 수 있는 측정장치를 설계하여 접착재료별 파단 시점과 특성을 비교·평가 하였다. 파단면분석을 통해 태양전지 효율 감소원인을 분석하여 고찰하였다. 실험결과 태양전지의 접착방법에 따라서 태양전지의 효율이 크게 영향을 받는다는 것을 파악하였다. 또한, 탄성접착제를 사용한 접착 방법이 가장 높은 태양전지 효율 성능을 보여주고 있음을 확인하였다.

**Key Words** : 단결정 실리콘태양전지(single crystalline silicon solar cell), 복합재료(composite materials), 접착재료(adhesion materials), 기계적 하중(mechanical loading)

접수: 2011년 12월 9일, 수정: 2011년 12월 24일, 게재승인: 2011년 12월 26일

\* 서울과학기술대학교 NID융합기술대학원

\*\* 한국항공우주연구원

\*\*\*\* 서울과학기술대학교 기계공학과, 교신저자(E-mail:skjung@seoultech.ac.kr)

### 1. 서론

태양광발전 산업은 화석에너지의 공급한계와 환경문제를 극복하기 위한 방법으로 주목 받고 있는 신 재생에너지의 한 분야로 무한한 태양에너지로부터 우리가 필요한 전기에너지 형태로 에너지를 변환하는 태양전지 기술을 기반으로 발전하고 있다[1]. 태양전지산업의 화두는 지구에 입사되는 태양에너지로부터 보다 높은 에너지 변환효율을 가지는 태양전지를 개발하는 것에 있으며, 그 결과 현재 다양한 종류의 태양전지가 개발되었으며, 사용조건에 따라 적합한 태양전지가 사용되고 있다[2]. Fig. 1은 미국의 신재생 에너지 연구소 (NREL; National Renewable Energy Laboratory)에서 발표한 태양전지 효율 평가 보고서로서 현재의 태양광발전 현황을 한눈에 확인할 수 있다[3]. 전세계 태양전지 시장의 약 85%는 결정형 실리콘태양전지(crystalline silicon solar cells)가 차지하고 있으며, 그 이유는 태양전지를 구성하는 원자재의 가격 경쟁력과 생산공정의 안정화로 좋은 품질의 태양전지를 대량으로 생산할 수 있기 때문이다[4,5]. 그러나, 활발한 태양전지 발전 상황에 비해서 태양전지를 적용할 구조물 개발은 아직 미흡한 상태이다. 대표적인 구조물로는 항공우주산업분야에서 인공위성의 에너지원으로 태양전지를 사용하고 있으며, 항공기의 동력원을 태양광발전을 이용한 고고도 장기체공 비행체 개발 연구가 활발히 진행되고 있다[6,7]. 복합재료는 대표적인 경량재료로서 높은 비강도와 비강성의 재료 특성으로 그 사용범위가 확대되고 있는 추세다[8]. 또한, 에너지효율 측면에서도 금속재료에 비해 상대적으로 가벼운 복합재료를 사용함으로써 에너지 효율을 극대화 하고 시장경쟁력을 확보하기 위한 중요한 요소로 작용하고 있다. 산업범위가 확대되고 있는 복합재료로 구성된 구조물에 태양전지를 안정적으로 결합할 수 있는 연구가 요구된다.

본 연구에서는 선행연구를 바탕으로 이차접착을 이용한 복합재료와 태양전지의 접착기술 개발을 위해 에너지변환 효율이 약 24.2%(lab. Efficiency)인 후면전극 태양전지를 이용하여 태양전지의 충전재 및 접착제로 사용되고 있는 EVA(ethyl vinyl acetate) film과 프리프레그의 수지인 Resin film, 그리고 탄성 접착제를 이용하여 태양전지를 접착 후에 기계적 하중을 부가하여 태양전지 성능변화를 측정하였으며, 기계적 하중 하에서 실시간으로 태양전지의 성능을 평가하여 접착재료별 파단 시점과 특성을 비교·평가 하였다. 또한, 파단면분석을 통해 태양전지 효율 감소원인을 분석하고 고찰하였다.

### 2. 시편제작 및 실험방법

#### 2.1 시편제작

본 연구에 사용된 복합재료는 에폭시 수지계에 탄소섬유를 함침한 고탄성 CFRP(carbon fiber reinforced plastics)를 사용

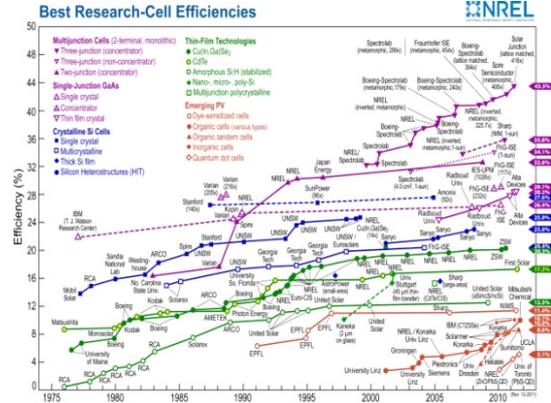


Fig. 1 Best research solar cell efficiencies.

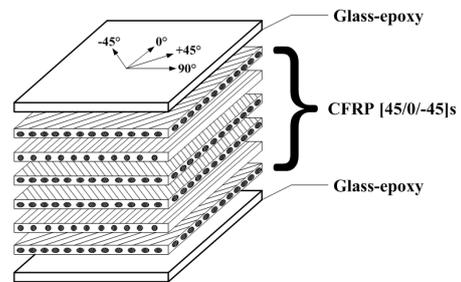


Fig. 2 Processing lay-up of CFRP laminates with glass-epoxy.

하였다. 섬유적층 각도는 실험조건을 고려하여 [+45/0/-45]<sub>s</sub>으로 적층 하였으며, 탄소섬유 복합재료의 절연(insulation)을 위해 Fig. 2의 그림처럼 바깥층에 글라스 에폭시(glass epoxy)로 마무리 하였다. 오토클레이브(autoclave) 장비를 이용하여 경화온도 약 130°C에서 90분 동안 가열하였으며, 진공백(vacuum bag)을 이용하여 내부의 공기를 제거하였다[9]. 성형을 마치고 기계적 하중 부가 조건인 인장 시험편을 만들기 위해 ASTM D3039 규격에 의거하여 다이아몬드 커터기를 사용하여 0° 방향으로 적층된 프리프레그 시트를 기준으로 25mm간격으로 절단하여 Fig. 3의 태양전지 접착특성 실험에 필요한 인장시험편을 제작하였다.

#### 2.2 태양전지

본 연구에 사용된 태양전지는 현재 태양광산업 시장에서 약 85%가 넘는 시장점유율(market share)을 가지고 있는 실리콘계 열 태양전지를 사용하였으며, 그 중에서도 에너지 변환 효율이 가장 높은 단결정 태양전지를 사용하였다[4,5]. 실리콘계 열 태양전지는 반도체 생산 공정과 흡사하기 때문에 높은 품질의 태양전지를 안정적으로 대량생산이 가능하다. 또한, 태양전지를 구성하는 원재료의 풍부성과 가격경쟁력으로 태양전지 시장에서 높은 시장점유율을 가질 수 있는 것이다[10]. Fig. 4는

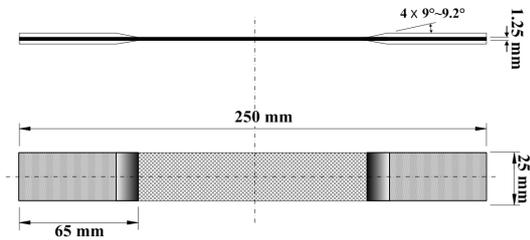


Fig. 3 Geometry of tensile test specimen.

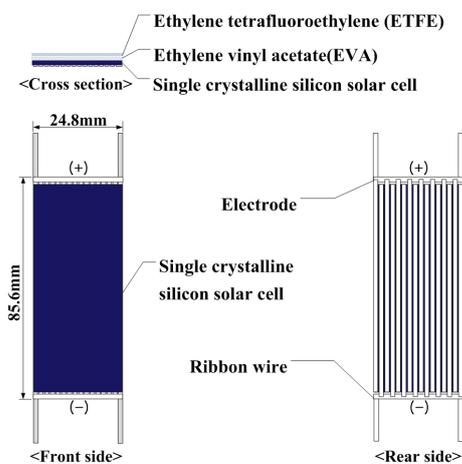


Fig. 4 Schematic of solar module; (top) cross-section and (bottom) front and rear side.

본 연구에 사용된 단결정 실리콘태양전지로 전극(electrode)이 태양전지 전면에 있었던 기존 양산형 셀과 다르게 전극을 태양전지 후면으로 옮겨 태양에너지 흡수 면적을 높여 음영효과(shading effect) 발생을 방지하였다[11]. 본 실험을 위해 5inch 태양전지 셀을 레이저 커터기를 이용하여 인장시험편의 크기에 맞춰 가공하였으며, 태양전지 표면의 오염방지와 자외선 차단을 위한 표면 보호층으로 EVA film의 접착 특성을 이용해 ETFE(ethylene tetrafluoroethylene) film을 태양전지 표면에 코팅하였다[12].

### 2.3 접착기술 개발

태양전지를 복합재료에 적용하기 위해서는 적합한 태양전지 접착기술 개발이 요구된다. 기존의 태양전지는 건물의 지붕이나 발전소개념으로 지상 구조물화 되어 설치되었기 때문에 태양전지 발전성능에 필요한 요소들에서 기계적 하중 및 기타 사용환경에 대한 고려가 배제되었다. 하지만, 앞으로 전기자동차와 항공기와 같은 구조물에 태양전지 기술을 적용하기 위해서는 구조물의 사용환경을 고려한 태양전지 설치기술이 필요하다. 일반적으로 복합재료에 태양전지를 접착할 수 있는 방법으로

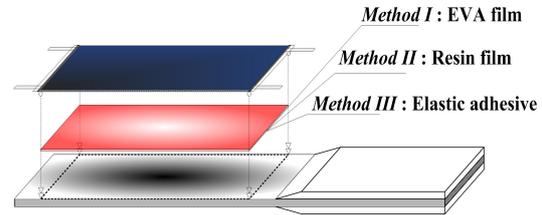


Fig. 5 Description of solar module bonding methods with three types of materials; EVA film, Resin film, and Elastic adhesive.

복합재료 성형 단계에서 복합재료의 수지(resin)을 통해 접착하려는 태양전지와 함께 경화시키는 동시 경화법(co-curing)이 있다[9,12]. 하지만, 이 방법은 선행연구 결과에서 깨지기 쉬운 단결정 태양전지에는 적합하지 않는 방법으로서 복합재료에 부가된 기계적하중이 태양전지에 직접적으로 전달되어 태양전지의 물리적 파손을 야기해 태양전지의 작동성능을 감소시켰다. 실제 현장 구조물에 적용하기 위해서는 물리적 하중 전달 방지기술 및 적용된 구조물의 유지·보수에 필요한 기술적 문제를 해결해야 한다. 따라서 복합재료에 접착된 태양전지에 물리적 요소가 태양전지에 전달되지 않고 유지·보수에 용이한 접착제를 이용한 이차접착(secondary-bonding)법을 제안하고자 한다. 이미 기초연구를 통해 이차 접착법을 이용한 태양전지 접착기술 개발에 가능성을 확인하였으며, 특히 탄성접착제(elastic adhesive, CEMEDINE)를 이용한 방법에서 태양전지의 접착상태를 유지하면서 태양전지의 에너지변환 효율을 최대로 유지하는 결과를 얻었다[8,13]. 접착재료에 대한 비교·평가를 위해 태양전지의 충진재 및 접착제로 사용되고 있는 EVA(ethyl vinyl acetate) film과 프리프레그(prepreg)의 수지인 Resin film을 이용하여 태양전지 접착기술 개발 연구를 진행하였다(Fig. 5). 사용된 EVA film과 Resin film은 표준 경화조건에서 접착을 진행했으며 [9,12], 탄성접착제는 상온 건조타입으로 태양전지를 접착 후 일정기간 동안 자연경화 하였다.

### 2.4 구조시험

태양전지가 접착된 복합재료 인장시험편의 기계적 하중이 태양전지의 발전성능에 미치는 영향에 대한 평가를 위해 Fig. 6의 만능시험기(U.T.M; Universal Testing Machine)를 사용하여 2mm/min의 변형률 속도로 제어하여 인장시험을 진행하였다. 사용된 복합재료의 파단 특성을 고려하여 0.3%, 0.75% 변형률 범위까지 기계적 하중을 부가하였으며[8], 실험 후에 시험편을 시험기에서 탈거하여 태양광모사장비를 이용하여 태양전지의 성능평가를 진행하였다. 태양전지의 평가는 태양전지의 효율측정에 사용되는  $J-V$ (current density vs. voltage) curve,  $I-V$ (current vs. voltage) curve와  $P-V$ (power vs. voltage) curve 데이터분석결과를 기초로 태양전지의 발전성능을 평가하였으며, 태양전지의 광변환 효율 계산은 Fig. 7과 같이 진행하였다 [10,14]. 실험결과와 신뢰도를 높이기 위해 태양전지 가공 및



Fig. 6 Experimental set-up for tensile test.

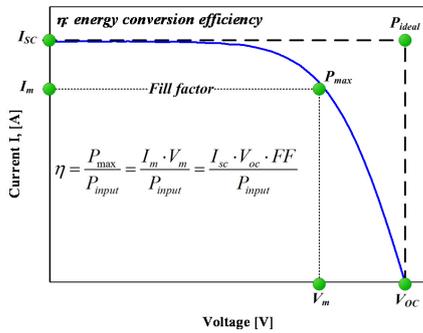


Fig. 7 Schematic procedure for the calculations based on current-voltage curve.

운송과정에서발생 가능한 태양전지 발전성능 감소 요인을 확인하기 위해 실험에 사용된 모든 태양전지의 전수검사(total inspection)를 실시하였다. Fig. 8은 사용된 태양전지의 전수검사 결과로 검사결과를 바탕으로 접착 방법에 따른 기계적 하중이 태양전지 발전성능에 어떻게 영향을 미치는지 비교·평가하였다.

### 2.5 실시간 발전성능 평가

Fig. 9는 기계적 하중 하에서 실시간으로 태양전지의 발전성능을 평가하기 위해 설계된 평가 시스템으로 시험편의 탈거 없이 부가된 기계적 하중 환경에서 상대적인 태양전지의 발전성능을 실시간으로 평가할 수 있다. 실시간 태양전지 평가 시스템의 구성은 1kW 용량 두 개의 할로겐 램프를 통해 태양광 모사(solar simulator)를 진행하였으며, 태양전지효율측정기(solar module analyzer)를 설치하여 실시간으로 태양전지의 발전성능을 평가하였다. 하지만, 사용한 할로겐 램프에서 발생한 열 에너지가 태양전지의 발전성능을 감소시키기 때문에[15] 이를 방지하기 위해서 비접촉식 온도계(non-contact thermometer)를 사용하여 태양전지 표면의 온도를 측정하였으며, 필요에 따라서는 팬(fan)을 작동시켜 태양전지 표면의 온도를 일정하게 유지시켜 태양전지 작동성능평가를 진행하였다.

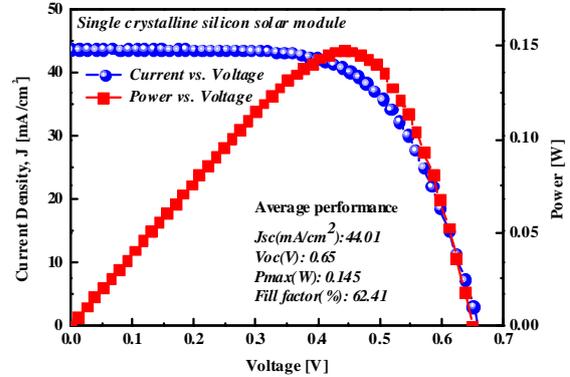


Fig. 8 Performance characterization of as-received silicon solar modules.

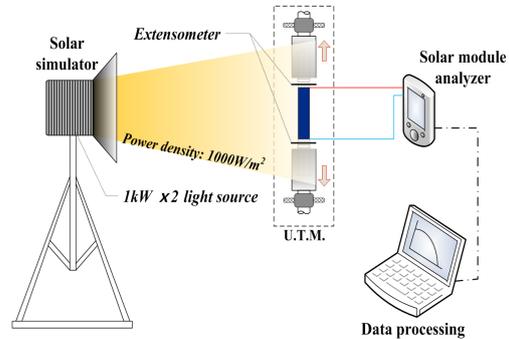


Fig. 9 The system of real-time photovoltaic performance evaluation under mechanical loading.

## 3. 실험 결과

### 3.1 광변환 효율측정

Fig. 10은 태양전지의 충진재 및 접착제로 사용되고 있는 EVA(ethyl vinyl acetate) film을 이용한 태양전지 발전성능 평가결과로 J-V(current density vs. voltage) curve 와 P-V(power vs. voltage) curve로 평가하였다. 그 결과 EVA film을 사용한 접착방법의 경우 0.3% strain, 0.75% strain의 기계적 하중 부가 후에 에너지 변환효율(η: energy conversion efficiency)이 처음 17%에서 0.3% strain 하중에서 13.23%으로 약 3.7% 효율 감소를 보였으며, 0.75% strain 하중 부가 후에는 7.6%로 실험 전 태양전지의 에너지 변환효율 17%을 기준으로 약 9%이상의 에너지 변환효율 감소가 발생하였음을 확인하였다. 이 같은 결과는 복합재료 시험편에 EVA film으로 접착된 태양전지의 경우에는 인가된 기계적 하중이 태양전지에 전달되어 깨지기 쉬운 단결정 실리콘 태양전지(single crystalline silicon solar cell)의 파손을 야기했기 때문으로 분석된다.

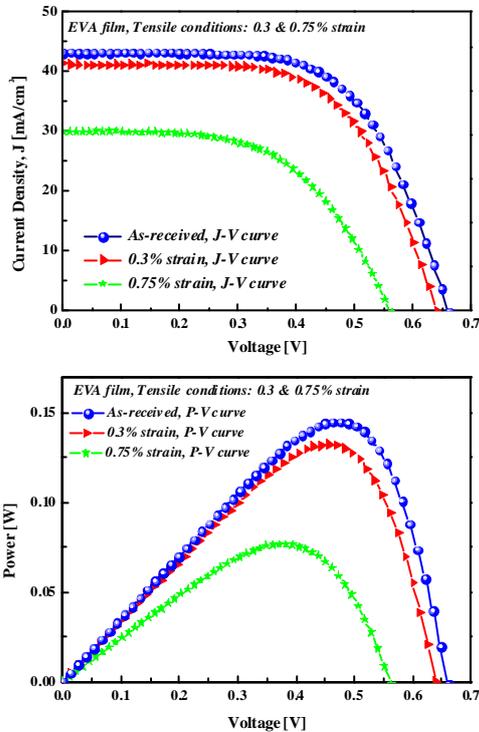


Fig. 10 Performance characterization of silicon solar modules; EVA film, J-V curves and P-V curves.

Fig. 11은 복합재료의 모재(matrix)로 사용되는 *Resin film*을 이용한 태양전지 발전성능 평가결과로 *EVA film*의 경우와 마찬가지로 *J-V*(current density vs. voltage) curve와 *P-V*(power vs. voltage) curve로 평가하였다. 그 결과 *Resin film*을 사용한 접착방법의 경우 0.3% strain, 0.75% strain의 기계적 하중 부가 후에 에너지 변환효율이 처음 17%에서 0.3% strain 하중에서 13.7%으로 약 3% 효율 감소를 보였으며, 0.75% strain 하중 부가 후에는 10.15%으로 실험 전 태양전지의 에너지 변환효율 17%을 기준으로 약 6.8%이상의 에너지 변환효율 감소가 발생하였음을 확인하였다. 하지만, 이 같은 결과는 *EVA film*의 경우의 에너지 변환효율 감소량보다 낮은 결과로 경화 후에 상대적으로 탄성(elastic) 특성을 가지는 *EVA film*의 예상했던 결과와 다른 연구결과를 얻었다. *Resin film*의 경우에는 기계적 하중 환경에서 태양전지와 복합재료 간에 de-bonding 현상이 발생하여 부분적으로 더 이상의 기계적 하중이 태양전지에 전달되지 않았기 때문에 이에 대한 분석을 실시하였다.

Fig. 12는 경화 후에 탄성특성을 가지는 탄성접착제(elastic adhesive)를 사용하여 태양전지를 복합재료에 접착한 시험편의 평가 결과로 *EVA film*, *Resin film*의 경우와 다르게 기계적

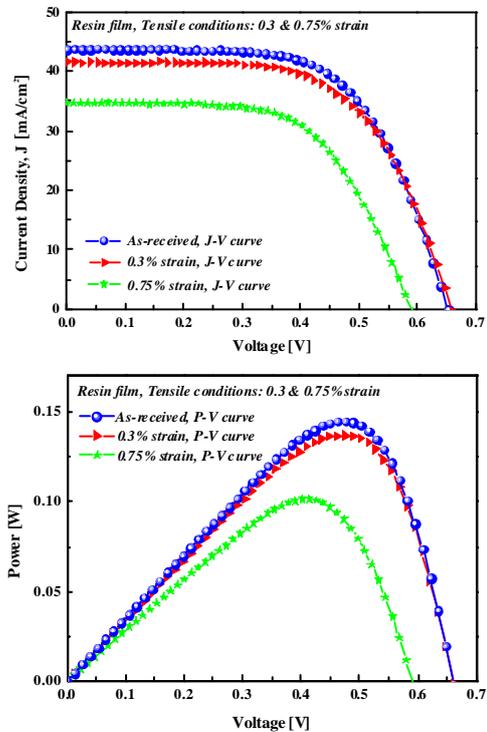


Fig. 11 Performance characterization of silicon solar modules; Resin film, J-V curves and P-V curves

하중으로 인한 태양전지 발전성능 감소가 발생하지 않았다. 이 같은 결과는 접착재료로 사용된 탄성접착제의 탄성성질로 복합재료에 부가된 기계적 하중이 태양전지에 전달되지 않아 접착성능을 유지하면서 기계적 하중을 흡수하는 역할을 하기 때문으로 판단된다.

### 3.2 실시간 태양전지 성능평가

Fig. 13은 기계적 하중 조건인 인장 환경에서 실시간 태양전지 효율 측정 시스템을 이용해서 1.0% strain 범위까지 0.2% strain 간격으로 실시한 태양전지 작동성능을 상대적으로 평가한 결과이다. 0.3%, 0.75% strain에서 태양전지 효율감소 결과를 얻었던 *EVA film*, *Resin film* 접착 방법을 이용해서 접착방법에 따른 태양전지 작동성능 평가 감소원인을 분석하였다. 단락회로전류( $I_{sc}$ , short-circuit current), 최대전력( $P_{max}$ ) 평가결과를 기준으로 적용 하중에 따른 태양전지 성능을 평가한 결과 Fig. 13 (a)의 *EVA film*의 경우에는 적용 하중이 증가할수록 태양전지 발전 성능이 크게 감소하였다. 특히, 0.4% strain 이후 태양전지의 성능감소율이 약 58%( $I_{sc}$ ) 이상으로 태양전지의 발전성능을 크게 상실하였다. 1% strain의 기계적 하중으로 태양전지 표면에 육안식별이 가능한 크랙(cracks)이 형성

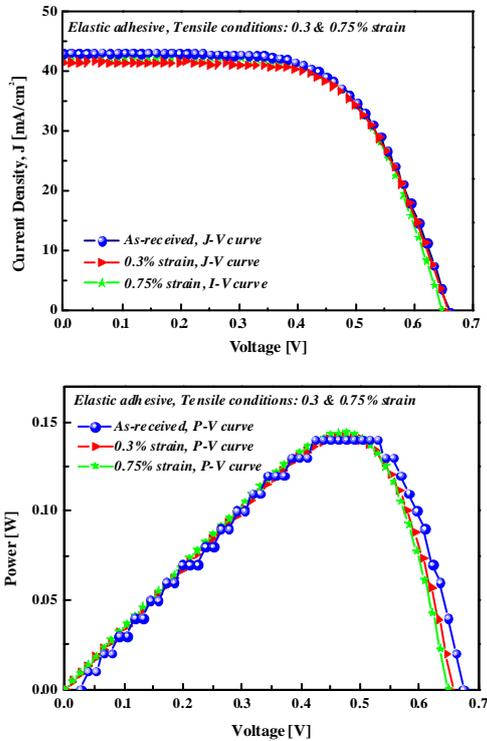
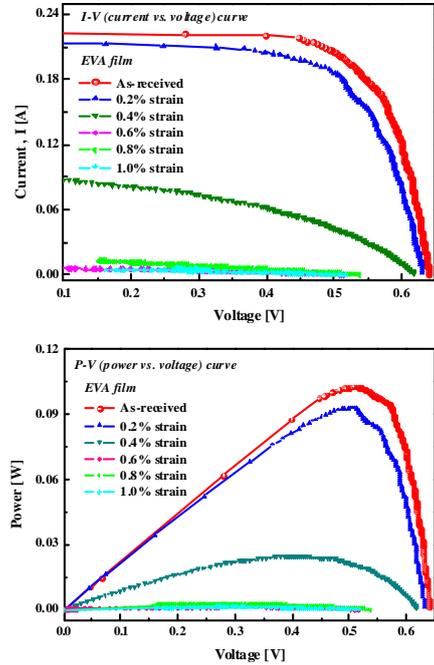


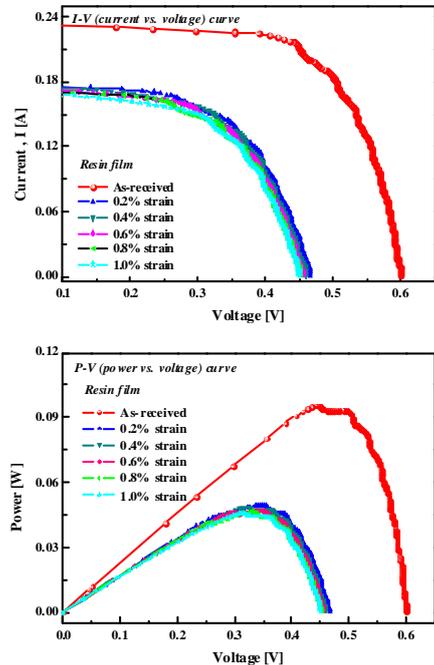
Fig. 12 Performance characteristics of a solar modules after tensile test; Elastic adhesive.

되었지만 미량이지만 발전성을 유지하였다. 이 같은 결과는 Fig. 4의 태양전지의 구조상 상대적으로 깨지기 쉬운 실리콘 태양전지가 기계적 하중으로 파손을 야기하지만 금속재료의 전극(electrode)에는 물리적 파손이 발생하지 않아 미량의 태양 전지의 발전성은 유지할 수 있었다. 이에 대한 분석을 위해 파단면분석을 실시하였다.

반면에 Fig. 13 (b)의 Resin film을 사용한 평가결과에서는 초기 0.2% strain의 기계적 하중 조건에서 태양전지 성능 감소율이 약 48%(Pmax) 이상 발생되어 같은 조건에서의 EVA film 성능 감소율인 약 9.33%(Pmax) 보다 5배가 넘는 태양 전지 발전성능 감소특성을 보였다. 하지만, 초기 감소가 발생한 후에 1% strain 기계적 하중 조건까지 더 이상의 태양전지 발전성능 감소는 발생하지 않았다. 이 같은 결과는 사용된 Resin film의 취성 특성 때문으로 초기에 시험편에 부가된 기계적 하중이 태양전지와 복합재료 시험편 사이에 de-bonding 현상을 야기하여 더 이상의 기계적 하중을 태양 전지에 전달하지 못했기 때문으로 사료되어 이에 대한 분석을 실시 하였다.



(a) EVA film; (top) I-V curves, (bottom) P-V curves



(b) Resin film; (top) I-V curves, (bottom) P-V curves

Fig. 13 Real-time performance characteristics of a solar modules; (a) EVA film, (b) Resin film.

### 3.3 파단면분석(fractography)

Fig. 14, Fig. 15는 각각 *EVA film*과 *Resin film* 접착 방법에 대한 태양전지 효율감소 원인을 분석한 결과이다. 태양전지의 표면 보호층(Protection layer)이 없는 bare cell을 이용하여 파단면분석을 실시하였다.

Fig. 14는 *EVA film*을 이용한 접착결과로 복합재료 시험편에 부가된 기계적 하중 (~ 1.0% strain) 때문에 태양전지 표면을 좌우로 관통하는 크랙(cracks)이 발생되었다. 하지만, 태양전지 후면에 설치된 금속 전극(electrodes)은 아무런 파손 없이 그 상태를 유지하고 있기 때문에 태양전지 작동성능을 유지할 수 있는 것이다. Fig. 15는 *Resin film*을 이용한 접착결과로 *EVA film*의 경우와 마찬가지로 bare cell을 이용하여 1% strain의 기계적 하중 부가 후에 파단면 분석을 실시하였다. 분석결과 *EVA film*의 경우와 다르게 태양전지 표면에 다수의 표면 크랙(cracks)이 관찰되었으며, 부가된 기계적 하중으로 태양전지와 복합재료 시험편 사이에 de-bonding이 발생 하였음을 확인하였다. 이 결과는 실시간 효율측정 시험에서 0.2% strain 이후에 더 이상의 성능 감소가 발생하지 않은 원인으로 de-bonding으로 인해 기계적 하중이 태양전지에 전달되지 않았기 때문으로 판단된다.

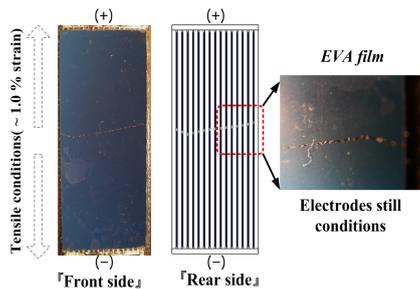


Fig. 14 Fractography of solar module after tensile test; EVA film, bare cell.

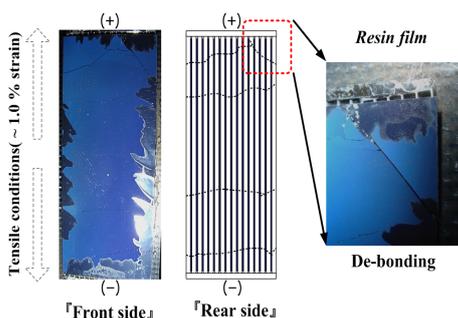


Fig. 15 Fractography of solar module after tensile test; Resin film, bare cell.

## 4. 결론

본 연구에서는 단결정 실리콘태양전지를 복합재료 구조물

에 적용하기 위해 적절한 접착 방법 및 성능평가 방법을 제시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 태양전지 접착법 개발을 위해 *EVA film*, *Resin film*, *Elastic adhesive*를 이용하여 기계적 하중 조건에서의 태양전지 성능평가를 수행한 결과 *EVA film*, *Resin film*을 사용한 경우에는 복합재료 시험편에 부가된 기계적 하중으로 인해 태양전지의 발전성능 감소를 보였다. 반면에 *Elastic adhesive*를 이용한 방법에서는 발전성능 감소가 발생하지 않았다.
- 2) 이 같은 결과는 경화 후 접착성능을 유지하면서 탄성(elastic) 성질을 가지고 있는 elastic adhesive 접착층이 기계적 하중을 흡수하여 태양전지의 발전성능에 영향을 주지 않았기 때문이다.
- 3) 본 연구를 통해 깨지기 쉬운 단결정 실리콘태양전지를 복합재료에 기계적 하중으로부터 안정적으로 접착할 수 있는 기법을 확립하였으며, 추후 다변화 되고 있는 복합재료 구조물에 태양전지를 적용하기 위한 기초 데이터로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 후 기

본 연구는 한국항공우주연구원의 “전기비행체 체계설계 및 운용기술 연구” 과제의 위탁연구로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Miro Zeman, “New trends in thin-film silicon solar cell technology,” *ASDAM*, 2002, pp. 353-362.
- 2) Sik, B.D., “Trends of the solar cell technology,” *KCERS*, 2010, pp. 20-27.
- 3) Peter L.M. Phill. Trans. R. Soc. A 2011;369;1840-1856.
- 4) Nijs, J.F., Szlufcik, J., Poormans, J., Sivonthaman, S., and Mertens, R.P., “Advanced cost-effective crystalline silicon solar cell technologies,” *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 65, Issues 1-4, 2001, pp. 249-259.
- 5) Razykov, T.M., Ferekides, C.S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H.S., and Upadhyaya, H.M., “Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects,” *Solar Energy*, Vol.85, Issues 8, 2011, pp. 1580-1608.
- 6) Noth, A., Siegwart, R., and Engel, W., “Design of solar powered airplanes for continuous flight,” *Autonomous System Laboratory*, 2007, Ver.1.1.
- 7) Frulla, G., and Cestino, E., “Design, manufacturing and

- testing of a HALE-UAV structural demonstrator,” *Composite Structures*, Vol. 83, Issues 2, 2008, pp. 143-153.
- 8) Kim, J.C., Choi, I.H., Kim, D.H., and Cheong, S.K., “Development of single crystalline silicon solar cells lay-downprocess on composites,” *18<sup>th</sup> ICCM*, 2011.
  - 9) Lee, Y.S., Kim, J.C., Lee, J.H., Choi, I.H., Kim, D.H., and Cheong, S.K., “Failure characteristics of the solar cell bonded on the CFRP laminate by co-curing process,” *한국복합재료학회 추계학술대회*, 2010.10, pp. 306-310.
  - 10) Jenny Nelson, “The physics of solar cells,” Imperial College Press, 2003, pp. 177-198.
  - 11) Govaerts, J., Robbelein, J., Gonzalez, M., Gordon, I., and Baert, K., “Development an advanced module for back-contact solar cells,” *IEEE TRANSACTION ON COMPONENTS*, Vol. 1, No. 9, 2011, pp. 1319-1327.
  - 12) Maung, K.Jason, Hahn, H.Thomas, and Ju, Y.S., “Multi-functional integration of thin-film silicon solar cells on carbon-fiber-reinforced epoxy composites,” *Solar Energy*, Vol. 84, Issues 3, 2010, pp. 450-458.
  - 13) Kim, J.C., Lee, Y.S., Lee, J.H., Choi, I.H., Kim, D.H., and Cheong, S.K., “A study on the solar cell lay-down for solar powered aircraft using secondary-bonding method,” *대한기계학회 추계학술대회*, 2010.11, pp. 399-403.
  - 14) Aberle, A.G., Wenham, S.R., and Green, M.A., “A new method for accurate measurements of the lumped series resistance of solar cells,” *Photovoltaic Specialists Conference*, Issues 10-14, 1993, pp. 133-139.
  - 15) Geoffrey, A.Landis, “High-temperature solar cell development,” *NASA John Glenn Research Center*, 2005, pp. 241-247.