


고출력 씽글드 태양광 모듈의 라미네이션 공정조건 최적화

정정호¹, 지홍섭¹, 김정훈², 최원용³, 정채환⁴, 이재형¹ 

¹ 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과

² (주)탑선 기술연구소

³ 제너셈(주) R&D센터

⁴ 한국생산기술연구원 스마트에너지나노융합연구그룹

Optimizing Lamination Process for High-Power Shingled Photovoltaic Module

Jeongho Jeong¹, Hongsub Jee¹, Junghoon Kim², Wonyong Choi³, Chaehwan Jeong⁴, and Jaehyeong Lee¹

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

² Research Institute, Topsun Co, Jangseong 57241, Korea

³ R&D Center, Genesem Inc, Incheon 21984, Korea

⁴ Smart Energy & Nano R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 61012, Korea

(Received January 12, 2022; Revised February 11, 2022; Accepted February 28, 2022)

Abstract: Global warming is accelerating due to the use of fossil fuels that have been used continuously for centuries. Now, humankind recognizes its seriousness, and is conducting research on searching for eco-friendly and sustainable energy. In the field of solar energy, which is a kind of eco-friendly and sustainable, many studies are being conducted to enhance the output performance of the module. In this study, the output improvement for the shingled module structure was studied. In order to improve the output performance of the module, the thickness of the encapsulant was increased, and the lamination process conditions have been improved accordingly. After that, the crosslinking rate was analyzed, and the suitability of the lamination process conditions was judged using this. In addition, a peeling test was conducted to analyze the correlation between the adhesion of the encapsulant and the output performance of the module. Finally, the optimization for the encapsulant material and the lamination process conditions for high-power shingled modules was established, and accordingly, the market share of high-power shingled modules in the solar module market can be expected to rise.

Keywords: EVA, POE, EVA thickness, Vacuum time, Press time, Output improvement, Crosslinking rate, Peeling test, Mechanical load test, Shingled PV module

1. 서론

✉ Jaehyeong Lee; jaehyeong@skku.edu

Copyright ©2022 KIEEME. All rights reserved.
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.

최근 태양광 산업에서는 모듈의 출력을 높이기 위해 소재의 개선, 다양한 직/병렬 어레이 등을 적용하는 등 여러 연구가 진행되고 있다 [1-3]. 특히, 고출력 모듈 제작을 위한 방법으로 씽글드(shingled) cell을 사용한 방식이 큰 관

심을 끌고 있으며 이와 관련된 연구가 활발히 진행되고 있는데 [4-6], 싱글드 방식은 full size cell을 사용하여 만드는 기존의 모듈과 비교하여 동일 면적 대비 수광 면적이 넓기 때문에 고집적이면서 고효율, 고출력 모듈의 제작이 가능하다 [7].

일반적으로 태양광 모듈은 커버 글래스/봉지재(encapsulant)/Cell/봉지재/백시트의 구조를 가지고 있으며 각각의 재료들은 라미네이션 공정을 통해서 일체화된 모듈로 제작된다. 이때 최적화되지 않은 라미네이션 공정조건은 봉지재 층의 기포 발생으로 인한 출력 저하 및 cell의 파손을 야기하기 때문에 태양광 모듈의 정상 출력 및 장기 신뢰성을 달성하기 위해서는 최적화된 라미네이션 공정조건으로 모듈을 제작해야 한다 [8].

싱글드 기술을 적용하여 제작하는 모듈은 기존의 full size cell을 사용하여 제작하는 모듈과 제작 방식에서 차이점이 있다. 싱글드 방식은 기존의 모듈 제작 공정에서 full size cell을 레이저로 분할하고 전도성 접착제인 electrical conductive adhesives (ECA)를 사용하여 접합하는 단계를 추가한 방식으로 그림 1(a)를 통해 알 수 있듯이 divided cell의 전면 버스바(bus bar) 위에 다른 divided cell의 후면을 접합하는 방식으로 모듈을 만드는 구조이다 [9,10]. 이러한 방식은 cell의 버스바 노출 영역을 최소화하며, 셀과 셀 사이의 간격을 없앨 수 있기 때문에 일반적인 방식으로 제작된 모듈과 비교했을 때 더 넓은 수광 영역을 갖게 되어 고집적, 고효율, 고출력을 달성할 수 있다 [9]. 그러나 개별 divided cell을 겹쳐서 모듈을 제작하는 싱글드 방식

은 유리와의 각 divided cell 또는 유리와의 back sheet 사이에서 봉지재(encapsulant)의 두께 편차가 발생하게 된다. 이로 인해 봉지재의 두께가 얇은 구간은 외부의 충격으로부터 cell을 보호하는 기능이 약해지고 결과적으로 cell의 파손 위험성이 증가하기 때문에 싱글드 모듈 제작 시에 외부 충격에서 cell을 충분히 보호할 수 있게 봉지재의 두께를 증가시킬 필요성이 있다. 따라서 기존의 모듈 제작 방식에 적용하는 봉지재의 두께와 라미네이션 공정조건은, 싱글드 모듈 공정에 적합한 봉지재의 두께와 이에 적합한 라미네이션 공정조건으로 최적화하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 싱글드 기술을 사용하여 모듈을 제작하는 과정에서 발생한 출력 저하 문제 해결을 다루었으며, 봉지재의 두께를 증가시킴으로 모듈의 내구성 향상과 출력 저하 개선을 목표로 하였다. 증가한 봉지재의 두께에 따라 라미네이션 공정조건을 조절하였으며 가교율 분석과 접착 강도 시험, 기계적 하중 시험 등으로 싱글드 모듈에 적합한 봉지재의 두께 및 라미네이션 공정조건의 검증을 진행하였다.

2. 실험 방법

태양광 모듈의 봉지재(encapsulant)는 전면 커버 글래스와 back sheet 사이에 위치하여 고온·고압의 라미네이션 공정 시 가교를 통해 cell의 기능을 저하시킬 수 있는 수분의 침투를 막고 외부 충격 등으로부터 보호하며, 접착 특

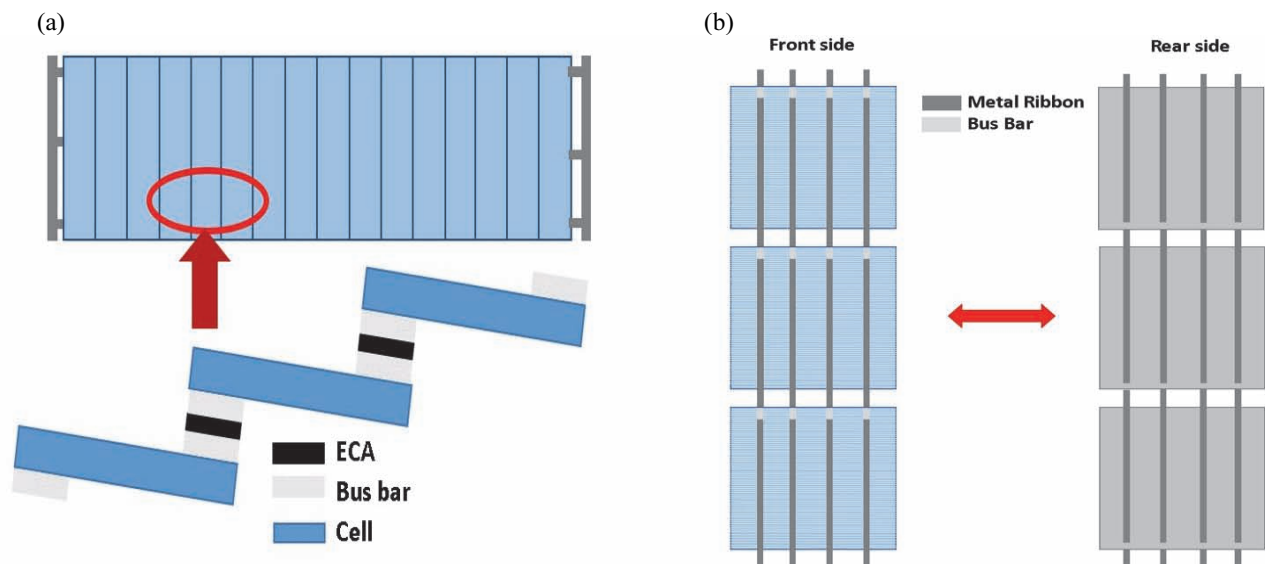


Fig. 1. (a) Shingled string Interconnection and (b) conventional cells Interconnection.

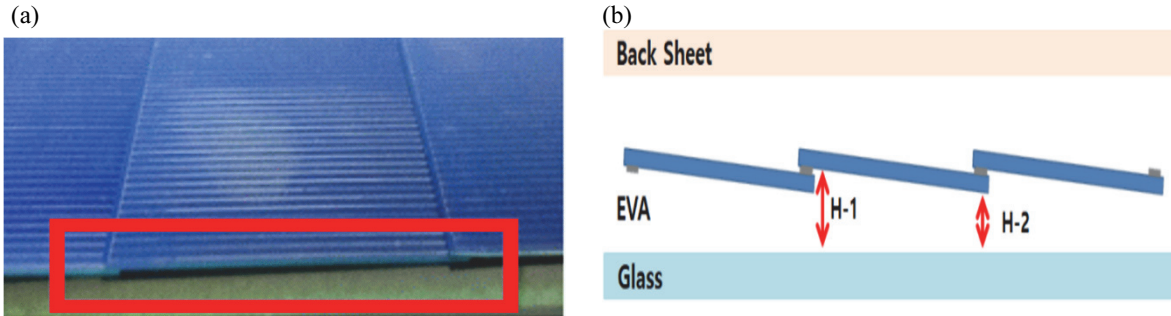


Fig. 2. (a) Height difference caused by shingled structure and (b) thickness difference of EVA sheet.

성을 통해 각 재료들을 결속시켜 주는 역할을 한다 [11]. 현재 태양광 산업에서 보편적으로 사용되고 있는 봉지재의 한 종류인 ethylene vinyl acetate (EVA) sheet는 접착성(bondability), 유연성(flexibility), 충격 강도(impact strength), 열 봉합성 등이 뛰어난 특성이 있으며 low density polyethylene (LDPE)에 비해 투명성과 접착력이 더 크고 탄성과 저온 열 봉합성이 우수하다. 또한 가격이 저렴하고 가공하기에 용이하며 높은 광 투과율을 가지는 이점이 있으므로 현재 태양광 산업에서 보편적으로 사용되고 있다 [11,12]. 따라서 본 연구에서는 먼저 씬글드 태양광 모듈의 봉지재로 EVA sheet를 적용하여 라미네이션 공정조건에 따른 특성을 조사하였다.

씬글드 방식을 사용하여 만든 씬글드 태양광 모듈의 경우 그림 2(a)와 같이 divided cell 접합 시 오버랩으로 인해 cell의 두께만큼 단차가 발생하게 된다. 그 결과, 씬글드 string 내에서 divided cell 위치에 따라 커버 글래스와 cell 사이에 위치한 EVA의 두께는 그림 2(b)에 보이는 것과 같이 두께 차이가 발생하게 된다. 즉 두께가 얇은 구간에서 (H-2) cell의 파손에 대한 위험성이 증가하기 때문에 씬글드 모듈의 경우 EVA sheet 두께 및 이에 따른 lamination 공정을 최적화할 필요가 있다.

먼저 씬글드 모듈의 단차에 따른 파손 위험성을 감소시키기 위해 표 1의 조건과 같이 cell (string) 상층과 하층에 위치하는 EVA의 두께를 각각 0.1 mm씩 증가시켜 총 1.2 mm의 두께를 적용하였으며 모듈의 구조는 cover glass/EVA/cell (string)/EVA/back sheet로 구성하였다.

기존에 사용하던 EVA보다 두께가 0.1 mm 증가한 0.6 mm 두께의 EVA를 사용하여 라미네이션을 진행한 결과 표 2에 보이는 것과 같이 모듈 내부에 기포가 발생하였는데 증가한 두께에 최적화된 조건을 찾기 위해 공정상에서의 vacuum time을 1분씩 증가시키는 큰 범위를 통해 기포가 발생하지 않는 조건을 찾고 세부적으로 10초씩 감소시켜 실험을 진행하였다 [13]. 라미네이터는 Boostsolar

Table 1. EVA thickness applied to each module.

| PV module type | EVA thickness of standard module | EVA thickness of shingled module |
|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Glass side | 0.5 mm | 0.6 mm |
| Back sheet side | 0.5 mm | 0.6 mm |
| Total thickness | 1 mm | 1.2 mm |

Table 2. Conventional lamination process conditions and test results (0.6 mm thickness of EVA).

| Lamination process | Conventional condition | Test result (bubble generation) |
|--------------------|------------------------|---------------------------------|
| Vacuum time | 4 min 50 sec | |
| Press time | 10 min 55 sec | |
| Cycle time | 15 min 45 sec | |
| Temperature | 150°C | |

회사의 장비(BSL2222OC, Qinhuangdao Boostsolar Photovoltaic Equipment Co., Ltd, China)를 사용하였으며 라미네이션 공정의 적합도를 평가하기 위해 gel content 방식을 통해 가교율을 측정하였다 [14,15].

가교율 분석을 위해 ASTM-D2765 조건으로 [16] 라미네이션 공정이 끝난 샘플을 자일렌(xylene) 용액에 넣고 오븐에서 일정 시간 건조하였으며, 건조 후 EVA의 전후 무게를 비교하는 방식으로 분석을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 EVA sheet 두께 증가에 따른 라미네이션 공정

라미네이션의 공정조건은 소재 및 두께 등 봉지재 고유

의 특성에 따라 달라진다 [17,18]. 최초 실험에서는 EVA의 두께를 0.1 mm 증가시킨 뒤, 표 1에 나와 있는 기존의 공정조건을 적용한 결과 그림 3과 같이 기포가 생성되는 문제가 발생하였다.

라미네이션 공정조건이 두께가 증가한 EVA에 최적화되



Fig. 3. Bubble generated module.

Table 3. Improved lamination process condition.

| Lamination step | Test-1 (bubble generated condition) | Test-2 (optimized condition) |
|-----------------|-------------------------------------|------------------------------|
| Vacuum time | 4 min 50 sec + 10 sec | 4 min 50 sec + 20 sec |
| Press time | 10 min 55 sec | 10 min 55 sec |
| Cycle time | 15 min 55 sec | 16 min 5 sec |
| Temperature | 150°C | 150°C |

어 있지 않았기 때문에, 기포 문제를 해결하기 위해 vacuum time을 조절하였는데 라미네이션 공정 중 EVA가 녹으면서 내부에 형성되는 공기층을 vacuum time을 증가시킴으로써 제거할 수 있기 때문이다 [18]. Vacuum time 6분에서는 그림 3에서 발생한 기포가 관찰되지 않았는데 라미네이션 공정 시간이 길어질 경우 열로 인한 cell의 손상이 발생할 수 있으므로 공정시간은 최소로 해야 한다. 따라서 vacuum time 6분에서 10초 단위로 공정 시간을 감소시켜 기포가 발생하는 시간을 분석하였는데 vacuum time을 5분 10초까지 감소시켰을 때도 그림 4(a)와 같이 기포가 관찰되지 않았지만 vacuum time이 5분 일 때 그림 4(b)와 같이 기포가 발생하였다. 해당 라미네이션 공정조건으로 각각 모듈을 3개씩 제작하여 기포 발생 여부를 검증하였다. 따라서 표 3에 나와 있는 것과 같이 vacuum time이 5분 10초일 때, 싱글드 모듈에 적용한 0.6 mm 두께의 EVA sheet에 적합한 라미네이션 공정조건임을 확인할 수 있었다.

3.2 EVA sheet의 가교율

증가한 EVA의 두께와 라미네이션 공정조건이 싱글드 모듈 공정에 적합한지 알기 위해 가교율 분석을 진행하였다. 그림 5의 샘플은 개선된 조건을 적용하여 제작하였으며 위치에 따라 시료를 채취하여 가교율 측정을 통해 표 4에 보이는 바와 같이 시료 1번 86.6%, 시료 2번 86.14%, 시료 3번 86.46%의 가교율을 확인하였고 위치에 따른 분석을 통해 전 영역에서 가교율이 평균 86%인 것을 확인하였다. 태양광 모듈 제작에 있어 EVA의 적정 가교율은 일반적으로 80~90% 정도로 간주한다 [12,19]. 적정 범위보

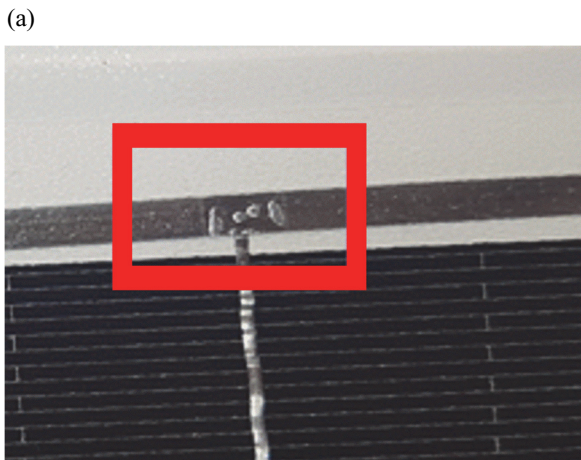


Fig. 4. (a) Bubble generated condition and (b) optimized condition (after lamination).

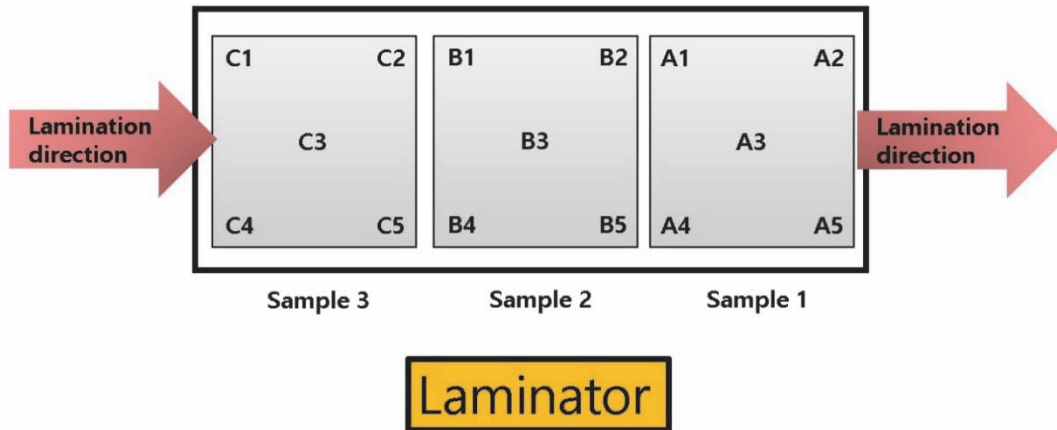


Fig. 5. Sample collection locations of EVA.

Table 4. Crosslinking rate of extracted EVA samples.

| Classification | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Average |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| Sample 1 | 86.2% | 86.8% | 86.8% | 86.5% | 86.7% | 86.6% |
| Sample 2 | 85.9% | 86.3% | 86.4% | 86.1% | 86.0% | 86.14% |
| Sample 3 | 86.5% | 86.1% | 86.2% | 86.8% | 86.7% | 86.46% |

다 낮은 가교율의 경우 모듈에서 접착력 감소, 변형 및 변색 현상이 발생할 확률이 높아지며 봉지재의 박리 (delamination)와 낮은 빛의 투과율로 인한 모듈의 출력 저하를 일으키게 된다 [18]. 반대로 적정 범위 이상의 가교율에서는 cell에 물리적인 스트레스를 가할 수 있으며 물리적인 파손 또한 초래할 수 있는데, 이때 싱글드 구조는 직렬로 연결된 구조상, 낮은 스트링의 출력값을 따라가는 경향성이 있기 때문에 파손된 cell이 전체 모듈의 출력 저하 요소로 작용할 수 있다 [20,21]. 가교율은 식 (1)을 이용하여 산출하였으며 분석을 통해 개선된 라미네이션 공정

조건이 적합함을 알 수 있었다.

$$\text{Gel content [\%]} = \frac{w_2}{w_1} \times 100, \quad (w_1 = \text{Weight before experiment}, w_2 = \text{Weight after experiment}) \quad (1)$$

3.3 싱글드 모듈에 적용

확보된 싱글드 모듈 공정에 적용할 EVA sheet의 두께 및 라미네이션 공정조건을 소면적 싱글드 모듈에 적용하

Table 5. Characteristics analysis after applying EVA sheet for shingled module.

| Sample | Image | EL | Crack | Bubble | Other defects |
|----------|-------|----|-------|--------|---------------|
| Module-1 | | | None | None | None |
| Module-2 | | | None | None | None |

여 제작하였다. 표 5에 보이는 바와 같이 제작된 모듈에서 내부의 기포가 발생하지 않았으며 EL 분석을 cell에 크랙이 발생하지 않았음을 확인하였다.

3.4 POE 라미네이션 공정조건

EVA는 분자 구조상 초산비닐(vinyl acetate)을 포함하고 있으며 [22] 고온다습환경에서 초산이 발생할 확률이 높다. 모듈 내부에서 cell과 초산이 접촉하면 산화 반응에 의해 직렬저항이 증가한다. 또한 수분 투습도가 높고, 자외선(UV)에 의한 변색으로 투과율(transmittance)이 감소되는데 이에 대한 결과로 모듈의 출력 저하가 발생한다 [23]. 반면 polyolefin (POE) sheet의 경우 뛰어난 체적저항 및 투습도 특성으로 인해 모듈의 내구성 및 신뢰성 부분에서 뛰어난 특성을 가지고 있다. 이러한 특성으로 인해 가혹한 환경에 적용되어 사업화가 이루어지고 있다. EVA의 경우 80~90%의 가교율을 가질 때 접착력 및 변형, 변색, 박리 등의 내구성 특성이 가장 우수한 반면, POE는 70~75% 가교율 범위에서 가장 우수한 내구성을 갖는다 [24]. EVA sheet에서 POE sheet로 봉지재의 소재가 변화함에 따라 최적의 가교율을 갖는 POE sheet의 공정조건을 찾기 위

해 press time 5분에서 20분 사이 구간에서 라미네이션을 진행하였으며, 제작된 모듈의 기계적, 전기적 특성 분석 및 라미네이션 이후 시편에 대한 가교율과 접착강도 실험을 진행하였다. 표 6에 보이는 바와 같이 vacuum time은 5 min 10 sec, 온도는 150°C로 고정시켰으며 press time을 가변 시키며 실험을 진행하였다. 그림 7은 press time에 따른 POE sheet의 가교율 결과를 나타낸다. 그래프에서 보이는 바와 같이 press time이 증가할수록 POE sheet의 가교율이 향상되었으며, press time이 12분 이상일 경우

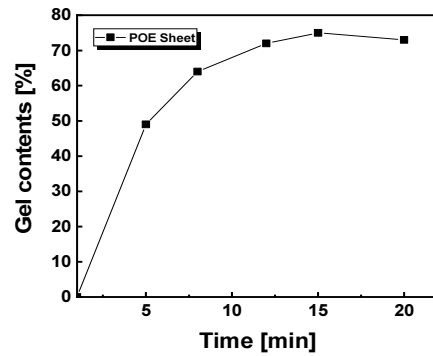


Fig. 7. Crosslinking rate vs time for POE sheet.

Table 6. Lamination process conditions for POE and EVA.

| Classification | POE | | | | | EVA |
|-------------------|--------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | POE-1 | POE-2 | POE-3 | POE-4 | POE-5 | EVA-6 |
| Vacuum time | 5 min 10 sec | | | | | |
| Press time | 5 min | 8 min | 12 min | 15 min | 20 min | 11 min |
| Crosslinking rate | <50% | 62.8% | 71.2% | 74% | 73.1% | 86.4% |
| Temperature | 150°C | | | | | |

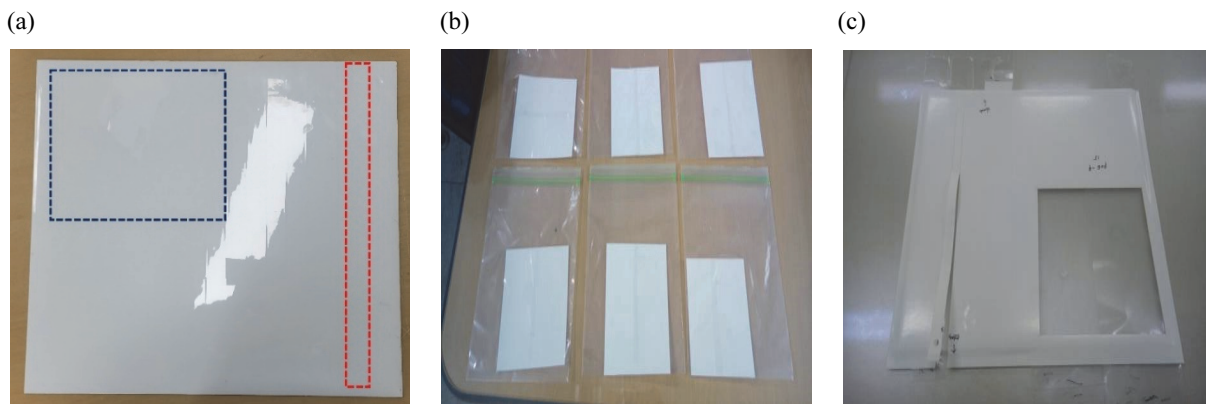


Fig. 6. (a) Variable press time samples (blue: the area of the collected sample for the crosslinking rate measurement, red: the area of the collected sample for the adhesive strength analysis), (b) POE specimens for crosslinking rate, and (c) adhesive strength analysis.

70% 이상의 가교율을 얻을 수 있었지만 15분을 정점으로 점점 감소하는 경향이 나타났다.

3.5 봉지재의 접착 강도 및 기계적 하중 시험

라미네이션 press time의 변화에 따라 POE와 전면의 커버 글래스와의 접착 강도를 조사하기 위해 접착 강도 시험을 진행하였다 [25]. 접착 강도 시험은 40초 동안 진행하였으며 표 7에서 보이는 바와 같이 시간에 따른 평균 접착 강도를 계산하였다. 측정을 위해 그림 8에 보이는 바와 같

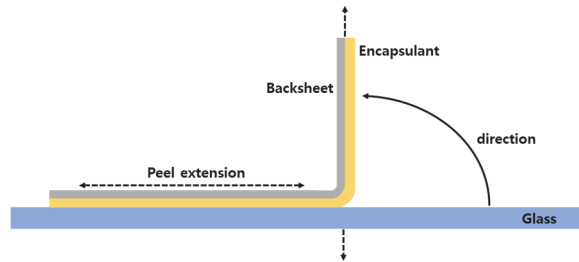


Fig. 8. 90° tensile testing.

Table 7. Adhesive strength test results according to press time and encapsulant types.

| Sample ID | Glass-POE & EVA average adhesive strength over time (N) |
|-----------|---|
| POE-1 | |
| POE-2 | |
| POE-3 | |
| POE-4 | |
| POE-5 | |
| EVA-6 | |

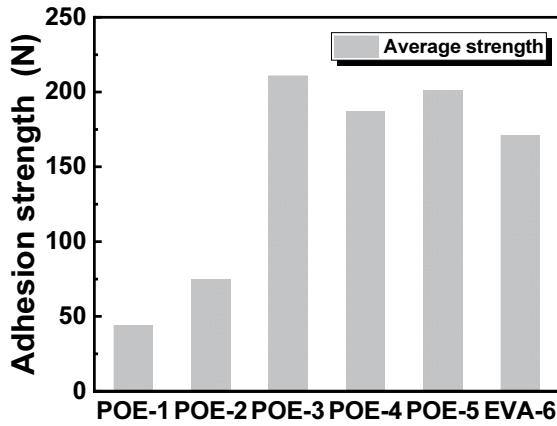


Fig. 9. Average values of the adhesive strength for different types of encapsulant (press time 5 min).

Table 8. Crosslinking rate and average adhesive strength according to press time and encapsulants.

| Sample ID | Press time (min) | Cross-linking rate (%) | Glass-POE & EVA average adhesive strength (N) |
|-----------|------------------|------------------------|---|
| POE-1 | 5 | < 50 | 44 |
| POE-2 | 8 | 62.8 | 75 |
| POE-3 | 12 | 71.2 | 211 |
| POE-4 | 15 | 74 | 187 |
| POE-5 | 20 | 73.1 | 201 |
| EVA-6 | 11 | 86.4 | 171 |

이 전면 커버 글래스를 바닥으로 향하게 하고 모듈을 고정하였으며 후면 백시트 및 봉지재가 전면 커버 글래스와 90°의 각도를 유지하도록 박리를 진행하였다.

그림 9와 표 8에서 보이는 바와 같이 press time을 5분으로 고정하여 라미네이션을 진행한 POE 샘플의 경우 44 Newton (N)의 낮은 접착 강도를 보였다. 접착 강도의 향상을 위해 press time을 증가시켜 라미네이션 실험을 진행한 결과 press time이 증가할수록 접착 강도는 증가하다가 12분에서 211 N으로 최대치를 나타내었고, 12분보다 길어질 경우 다시 하락하는 것을 확인하였다. 최적화된 EVA sheet 공정조건에서 접착 강도가 171 N이라는 점을 고려할 때, POE를 사용하면 최대 접착 강도가 EVA와 대비하여 40 N 정도 향상됨을 알 수 있었다.

실험을 통해 확보한 최적화 조건인 POE-3번 샘플과 EVA-6번 샘플의 공정조건을 이용하여 32 cell 쉐글드 모듈(97.45 cm x 81.15 cm)을 제작한 후 각 모듈의 출력값

Table 9. Average values of the 6 inch cells for EVA and POE modules.

| Parameter | Measured cells values for EVA module | Measured cells values for POE module |
|------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Cell size [cm ²] | 244.43 | 244.43 |
| P _m [W] | 4.9754 | 4.9742 |
| I _{sc} [A] | 9.4257 | 9.4165 |
| V _{oc} [V] | 0.6743 | 0.6768 |
| I _{pm} [A] | 8.8523 | 8.8277 |
| V _{pm} [V] | 0.5621 | 0.5635 |
| FF [%] | 78.2917 | 78.0506 |
| Eff [%] | 20.3479 | 20.3418 |

Table 10. Characteristics of the shingled module (32 cells) with using EVA and POE respectively.

| Classification | EVA sheet module | POE sheet module |
|----------------------|------------------|------------------|
| P _{max} (W) | 150.2 | 152.4 (+2.2) |
| Improvement rate (%) | Standard | +1.46% |

을 비교 분석하였다. EVA 모듈과 POE 모듈의 제작에 사용된 셀들은 솔라 시뮬레이터를 사용하여 측정을 진행하였으며 표 9에 보이는 바와 같이 각각의 모듈 제작에 사용된 셀들의 출력 특성은 매우 유사한 것을 알 수 있다.

표 10에 보이는 바와 같이 모듈을 구성하는 봉지재를 기존 EVA에서 POE로 대체할 경우 출력값이 2.2 W 증가로 약 1.46% 증가하였으며 봉지재의 접착력이 증가할수록 모듈의 출력 또한 증가하는 점을 알 수 있었다.

POE를 사용하여 만든 모듈의 신뢰성을 평가하기 위해 21% 단결정 cell(Mono TNM4-156 PERC, Topsky Energy, China)을 사용하여 72 cell 면적(130 cm × 159.6 cm)의 쉐글드 모듈을 제작하였으며 제작된 72 cell 모듈은 IEC 61215 기준에 따라 기계적 하중 시험 (mechanical load test)을 진행하였다. 72 cell 모듈은 8개의 string으로 구성되었으며, 각각의 string은 5분할 된 full size cell 24개를 ECA를 사용하여 직렬 연결하여 제작하였다. 라미네이션 공정조건은 앞에서 최적화된 POE의 공정조건을 사용하였으며 제작된 모듈은 EL 분석을 진행하였는데 그림 10(b)에서 보이는 바와 같이 IEC 61215의 조건으로 진행된 기계적 하중 시험에서 다수의 크랙이 발생된 것을 확인하였다.

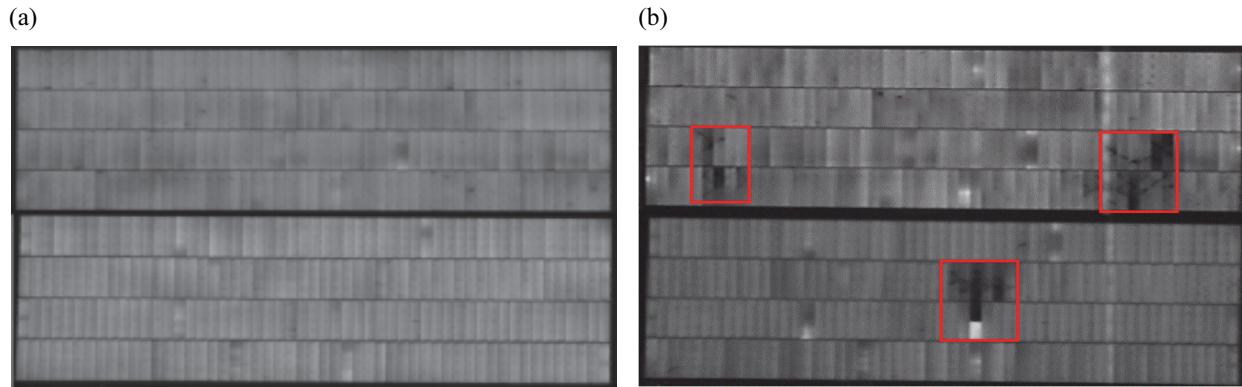


Fig. 10. EL images of (a) before mechanical load test, (b) after mechanical load test of 72 cell shingled module manufactured under optimal lamination conditions of POE sheet.

Table 11. Crosslinking rate of encapsulant according to press time during lamination process and average adhesive strength with glass.

| Encapsulant type and press time (min) | Cross-linking rate (%) | Average adhesive strength between glass and encapsulant (N) |
|---------------------------------------|------------------------|---|
| POE press time: 9 min | 64.7 | 122 |
| POE press time: 10 min | 68.4 | 169 |
| POE press time: 11 min | 70.1 | 204 |
| EVA press time: 11 min | 86.4 | 171 |

POE sheet의 경우, 가교율이 높을수록 모듈에 가해지는 충격 및 기계적 하중 발생 시 cell의 크랙 현상이 EVA sheet보다 더 발생하는 경향이 있으므로 cell에 크랙이 발생하지 않도록 POE sheet의 가교율 최적화가 필요하다.

따라서 라미네이션 공정 중 press time을 기존 12분에서 점차 줄이는 방식으로 모듈을 제작하고 가교율 및 접착강도를 측정하였다. 표 11에서 보이는 바와 같이 press time이 증가할수록 가교율과 접착강도가 증가하는 경향이 나타났으며 특히 press time이 10분인 경우 169 N의 접착강도를 보였으며 EVA sheet를 사용하여 press time을 11분 진행하여 171 N의 접착강도를 보였던 샘플과 유사한 접착강도를 갖는 것을 알 수 있었다.

라미네이션 공정의 press time을 기존 12분에서 10분으로 변경한 후 72 cell 면적의 싱글드 모듈을 제작하여 기계적 하중 시험과 전후 출력 변화를 측정하였다. 라미네이션 조건은 press time이 12분에서 10분으로 변경된 것을 제외하고는 기존과 동일하게 제작하였다. 또한 EVA sheet를 사용하여 비슷한 접착 강도를 보였던 조건으로 모듈을 제작하여 두 모듈의 기계적 하중 시험 전후 EL 및 출력값

Table 12. Analysis of mechanical load test and output power for shingled modules with an area of 72 cells.

| Classification | Initial EL image | After EL image | Initial output | After output |
|--------------------------|------------------|----------------|------------------------------|--------------|
| POE press time 10 min | | | 425.5 W | 422.3 W |
| | | | $\Delta P_{\max} = -0.752\%$ | |
| EVA press time 11 min | | | 422.8 W | 419.1 W |
| | | | $\Delta P_{\max} = -0.875\%$ | |

을 분석하였다. 표 12에 보이는 바와 같이 두 개의 모듈 모두 기계적 하중 시험 후 크랙이 거의 발생하지 않았으며, 출력은 1% 이내로 감소하였다. 다만, press time 11분의 경우, 기계적 하중 시험 이후 모듈에서 일부 크랙이 발생하여 press time을 최종 10분으로 결정하였다.

4. 결론

본 연구에서는 싱글드 기술을 적용하여 만든 모듈의 출력 개선 방법으로 EVA의 두께를 증가시키는 방법을 사용하였다. Divided cell 상부와 하부에 각각 0.6 mm 두께의 EVA를 사용했을 때 bubble이 생기지 않으면서 우수한 출력 특성을 갖는 라미네이션 공정조건을 확보하였고 gel content 측정법을 통해 EVA의 적정 가교율 범위인 80~90%에 부합하는 것을 확인하였다. 또한 POE를 사용하여 press time을 가변하며 최고의 가교율을 갖는 조건을 찾았으며, 기계적 하중 시험 분석을 통해 우수한 접착강도를 가지면서 크랙이 발생하지 않는 공정조건을 확보하였다.

ORCID

Jaehyeong Lee

<https://orcid.org/0000-0003-2918-4694>

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20213030010430).

REFERENCES

- [1] M. M. Rahman, M. Hasanuzzaman, and N. A. Rahim, *Energy Convers. Manage.*, **103**, 348 (2015) [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.067>]
- [2] M. R. Vogt, H. Holst, H. Schulte-Huxel, S. Blankemeyer, R. Witteck, D. Hinken, M. Winter, B. Min, C. Schinke, I. Ahrens, M. Köntges, K. Bothe, and R. Brendel, *Energy Procedia*, **92**, 523 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.07.136>]
- [3] N. Belhaouas, M.S.A. Cheikh, P. Agathoklis, M. R. Oularbi, B. Amrouche, K. Sedraoui, and N. Djilali, *Appl. Energy*, **187**, 326 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.1.038>]
- [4] W. Oh, J. Park, S. Dimitrijević, E. K. Kim, Y. S. Park, and J. Lee, *Sol. Energy*, **195**, 527 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.095>]
- [5] W. Oh, J. Park, C. Jeong, J. Park, J. Yi, and J. Lee, *Appl. Surf. Sci.*, **510**, 145420 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145420>]
- [6] O. Kunz, R. J. Evans, M. K. Juhl, and T. Trupke, *Sol. Energy*, **202**, 420 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.032>]
- [7] H. Jee, D. Moon, J. Song, and C. Jeong, *Curr. Photovoltaic Res.*, **6**, 119 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.21218/CPR.2018.6.4.119>]
- [8] L.E.P. Aebi, H. Y. Li, R. Théron, G. Röder, Y. Luo, T. Turlings, R.F.M. Lang, and C. Ballif, *Proc. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition/5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (Valencia, Spain, 2010)* [DOI: <https://doi.org/10.4229/25thEUPVSEC2010-4AV.3.39>]
- [9] G. Beaucarne, *Energy Procedia*, **98**, 115 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.087>]
- [10] D. Tonini, G. Cellere, M. Bertazzo, A. Fecchio, L. Cerasti, and M. Galiazzo, *Energy Procedia*, **150**, 36 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.010>]
- [11] O. Hasan and A.F.M. Arif, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **122**, 75 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.11.016>]
- [12] M.C.C. de Oliveira, A.S.A.D. Cardoso, M. M. Viana, and V.D.F.C. Lins, *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **81**, 2299 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.039>]
- [13] B. M. Kim, K. S. Lee, M. K. Kim, G. H. Kang, Y. H. Lee, and M. S. Lee, *Proc. KSES 2010 Spring Annual Conference (The Korean Solar Energy Society, Daegu, 2010)* p. 183. [DOI: <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE01561873>]
- [14] B. Adothu, P. Bhatt, S. Zele, J. Oderkerk, F. R. Costa, and S. Mallick, *Mater. Chem. Phys.*, **243**, 122660 (2020). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122660>]
- [15] M. Jaunich, M. Böhning, U. Braun, G. Teteris, and W. Stark, *Polym. Test.*, **52**, 133 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.03.013>]
- [16] C. Hirschl, L. Neumaier, S. Puchberger, W. Mühleisen, G. Oreski, G. C. Eder, R. Frank, M. Tranzitz, M. Schoppa, M. Wendt, N. Bogdanski, A. Plösch, and M. Kraft, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **143**, 494 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.07.043>]
- [17] B. Adothu, P. Bhatt, S. Chattopadhyay, S. Zele, J. Oderkerk, H. P. Sagar, F. R. Costa, and S. Mallick, *Sol. Energy*, **194**, 581 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.018>]
- [18] K. Drabczyk and P. Panek, *Mater. Sci. Eng. B*, **177**, 1378 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2012.04.009>]
- [19] H. Y. Xue, W. H. Ruan, M. Q. Zhang, and M. Z. Rong, *eXPRESS Polym. Lett.*, **8**, 116 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2014.14>]
- [20] S. E. Lee, J. H. Bae, J. W. Shin, and C. W. Jeong, *Curr. Photovoltaic Res.*, **6**, 81 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.21218/CPR.2018.6.3.081>]
- [21] J. Song, H. Jee, D. Moon, D. H. Kim, O. B. Yang, and C. Jeong, *Curr. Photovoltaic Res.*, **7**, 51 (2019). [DOI: <https://doi.org/>]

- 10.21218/CPR.2019.7.2.051]
- [22] F. A. Hassani and C. Lee, *J. Microelectromech. Syst.*, **24**, 1338 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2015.2403256>]
- [23] N. C. Park, J. S. Jeong, B. J. Kang, and D. H. Kim, *Microelectron. Reliab.*, **53**, 1818 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.07.062>]
- [24] K. C. Kang, G. H. Kang, K. S. Kim, C. S. Huh, and G. J. Yu, *Proc. KIEE Summer Conference 2008* (Trans. Korean. Inst. Elect. Eng., Pyeongchang, 2008) p. 1108. [DOI: <https://www.koreascience.or.kr/article/CFKO200803977432495.pdf>]
- [25] G. J. Jorgensen, K. M. Terwilliger, J. A. DelCueto, S. H. Glick, M. D. Kempe, J. W. Pankow, F. J. Pern, and T. J. McMahon, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **90**, 2739 (2006). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.04.003>]