

태양광 모듈 표면 온도 제어에 따른 백시트 박리 거동

김정훈^{1,3} · 이준규¹ · 안영수¹ · 여정구¹ · 이진석^{1†} · 강기환² · 조철희^{3†}

¹한국에너지기술연구원 분리변환소재연구실,
²한국에너지기술연구원 태양광연구실, ³충남대학교 에너지과학기술대학원

Peeling Behavior of Backsheet according to Surface Temperature of Photovoltaic Module

Jeong-Hun Kim^{1,3}, Jun-Kyu Lee¹, Young-Soo Ahn¹, Jeong-Gu Yeo¹,
Jin-Seok Lee^{1†}, Gi-Hwan Kang² and Churl-Hee Cho^{3†}

¹Separation and Conversion Materials Laboratory, Korea Institute of Energy Research,
Daejeon 34129, Republic of Korea

²Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 34129, Republic of Korea

³Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea

(Received September 17, 2019 : Revised October 10, 2019 : Accepted October 15, 2019)

Abstract In this study, we investigate the relationship between the peeling behavior of the backsheet of a photovoltaic(PV) module and its surface temperature in order facilitate removal of the backsheet from the PV module. At low temperatures, the backsheet does not peel off whereas, at high temperatures, part of the backsheet remains on the surface of the PV module after the peeling process. The backsheet material remaining on the surface of the PV module is confirmed by X-ray diffraction(XRD) analysis to be poly-ethylene(PE). Differential scanning calorimetry(DSC) is also performed to investigate the interfacial characteristics of the layers of the PV module. In particular, DSC provides the melting temperature(T_m) of laminated ethylene vinyl acetate(EVA) and of the backsheet on the PV module. It is found that the backsheet does not peel off below the T_m of ethylene of EVA, while the PE layer of the backsheet remains on the surface of the PV module above the T_m of the PE. Thus, the backsheet is best removed at a temperature between the T_m of ethylene and that of PE layer.

Key words photovoltaic module, recycling, backsheet, peeling, DSC analysis.

1. 서 론

세계 태양광 시장은 매우 빠른 속도로 성장하고 있다. 2017년부터는 매년 전세계의 태양광 설치량이 약 100 GW를 상회하고 있다.¹⁾ 하지만 태양광 모듈은 수명이 존재하기 때문에 설치 이후에 발생하는 태양광 폐모듈에 대한 처리 또한 고려를 해야 한다. 2018년 IEA-PVPS 보고서에 따르면 태양광 폐모듈의 발생량은 2030년에 최대 800만톤, 2050년에는 최대 7,800만톤으로 전망된다.²⁾ 유럽연합(EU)에서는 2012년부터 waste electrical and

electronic equipment(WEEE) 지침에 태양광 모듈도 포함시켜 회수 및 재활용을 법적으로 의무화 시켰다.^{3,4)} 그래서 태양광 폐모듈 재활용과 관련한 기술적 연구가 활발히 이루어지고 있다.

일반적으로 태양광 모듈은 전면 유리를 기준으로 봉지재, 태양전지, 봉지재, 백시트 순으로 적층되어 있는 구조이다. 봉지재는 대부분 ethylene vinyl acetate(EVA)가 사용된다. 그리고 태양광 모듈에는 태양전지를 전기적으로 연결시켜주는 구리리본이 포함되어 있고, 모듈 테두리에는 알루미늄 프레임이 있으며 모듈 후면에는 정선

†Corresponding author

E-Mail : jslee@kier.re.kr (J. S. Lee, KIER)

choch@cnu.ac.kr (C. H. Cho, CNU)

© Materials Research Society of Korea, 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.

박스가 위치한다. 이러한 태양광 모듈에서 알루미늄 프레임과 정션 박스는 물리적으로 쉽게 제거가 가능하며, 이후 태양광 모듈을 재활용 하기 위해서는 EVA 제거를 통해 유리, 태양전지 등의 소재를 회수해야 한다.

태양광 모듈을 분리하는 방법으로는 열적, 화학적, 물리적인 방법이 있다. 이 중 화학적, 물리적 방법을 이용할 경우 EVA를 완벽히 제거하기 위해서는 추가적인 열적 후처리 공정이 필요하기 때문에 일반적으로 열적인 방법을 통해 EVA를 제거하는 것이 가장 효율적인 것으로 알려져 있다.^{4,6)} 하지만 열적인 방법으로 모듈을 분리할 경우 백시트를 우선적으로 제거해야 한다. 태양광 모듈의 백시트 내에는 흡수된 광의 재반사 및 자외선 차단 등의 역할을 하는 TiO_2 나노 분말이 포함되어 있는데,⁷⁾ 열적 모듈 분리 시 백시트 내에 포함되어 있는 이 TiO_2 나노 분말이 모듈 표면에 존재하여 소재회수를 위한 후속공정에 영향을 주기 때문이다. TiO_2 나노 분말이 태양전지와 섞이게 될 경우 TiO_2 나노 분말은 물리·화학적으로 매우 안정한 물질이기 때문에 후속공정에서 제어하기가 매우 어렵다.⁸⁾ 즉, 회수된 태양전지로부터 화학적 공정을 통해 실리콘, 은 등의 소재를 회수할 경우 TiO_2 는 회수 소재의 순도적인 측면에서 매우 치명적으로 작용한다. 따라서 열적인 공정을 통해 EVA를 제거하고 이후 화학적 공정을 통해 여러 소재들을 회수하는 태양광 재활용 공정에서 모듈을 분리하는 열적 공정 이전에 모듈로부터 백시트가 제거되어야만 한다.

예비실험으로 연삭, 마찰, 박리의 방법으로 백시트를 제거해 보았다. 연마재를 이용하여 백시트를 연삭시키는 방법과 알루미늄, 플라스틱 등의 미디어를 백시트에 분사하여 마찰시키는 방법으로 백시트를 제거할 경우 태양전지에 균열이 생기거나 파손되는 것을 확인하였다. 이는 태양전지가 취성이 강해서 물리적인 충격에 의해 쉽게 깨지기 때문이다.^{9,10)} 모듈에 열을 가한 후 백시트를 벗겨내는 박리의 방법으로 백시트를 제거할 경우에는 태양전지가 손상되지 않는 것을 확인하였다. 또한 최근 태양광 설치량 증가에 따른 고장 모듈 repair에 대한 관심이 커지고 있는 가운데 이러한 박리 기술은 추후 모듈 repair 기술과도 연계할 수 있을 것으로 보여진다. 고장 모듈 repair 기술과 연계 시 태양전지가 손상될 경우 repair의 의미가 퇴색된다는 점에서 태양전지가 손상되지 않는 백시트 박리 기술은 큰 강점을 가질 것이다.

본 연구에서는 태양광 모듈로부터 백시트 박리 시 백시트가 효과적으로 제거되는 최적 온도 조건을 도출하기 위해 4-Cell 모듈의 표면 온도에 따른 백시트의 박리 거동을 확인하였고 또한 백시트와 EVA 사이 계면 특성을 고찰하기 위해 모듈에 사용된 EVA와 백시트의 열적 특성을 분석하였다. 최종적으로 상용모듈인 60-Cell 모

듈에 최적 온도 조건을 적용하여 백시트의 박리거동을 확인하였다.

2. 실험 방법

강화유리/EVA(EVA, SKC, “EF2T”)/태양전지/EVA/백시트(Backsheet, SFC, “TPE-31”) 순으로 모듈을 적층한 후 lamination 공정을 통해 태양전지가 가로, 세로 2개씩 배열된 4-cell 미니 모듈을 제작하였다. 또한 제작된 미니 모듈에는 두께 3.2T, mist type의 저철분 강화유리와 3-busbar의 6인치 단결정 태양전지가 사용되었다.

모듈의 백시트 박리 실험은 공정의 재현성을 위해 입력 레시피대로 동작하는 백시트 박리 자동화 설비를 이용하였다. 백시트 박리 자동화 설비는 모듈이 장입되는 stage(구간별 heating 가능)와 백시트 박리 unit, 모듈 고정 clamp, 장비 조작 touch panel 등으로 구성되어 있으며 박리 unit의 구동에는 최대 torque가 14.3 N·m인 모터가 사용되었다. 본 설비의 모습을 Fig. 1에 나타내었다.

공정은 stage에 모듈을 장입한 후 백시트 박리 Unit을 이용하여 한 쪽 모서리로부터 시작하여 반대쪽 모서리 방향으로 백시트를 벗겨내는 방식으로 진행하였다. 모듈의 표면 온도가 약 60, 70, 80, 90, 100, 110 °C일 때 각각의 온도에서 백시트를 박리하였으며 모듈 표면의 실제 온도를 측정하여 확인하였다. 백시트 제거 설비의 경우 모듈이 장입되는 stage 내에서 구간별로 온도제어가 가능하여 앞선 실험으로부터 확인된 온도 조건을 60-Cell 모듈에 적용하였다. 4-cell 모듈과 60-cell 모듈의 백시트 박리 온도 조건을 Table 1에 나타내었고 4-cell 모듈에서의 표면 온도 측정 위치를 Fig. 2에 나타내었다.

백시트 박리 후 모듈 표면에 잔존하는 백시트 layer의 성분을 확인하기 위해 X선 회절 분석법(X-ray diffraction, XRD, DMAX 2500, Rigaku, Japan)을 사용하였고 백시

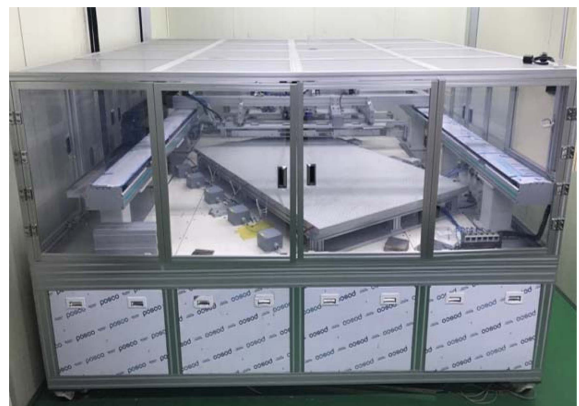
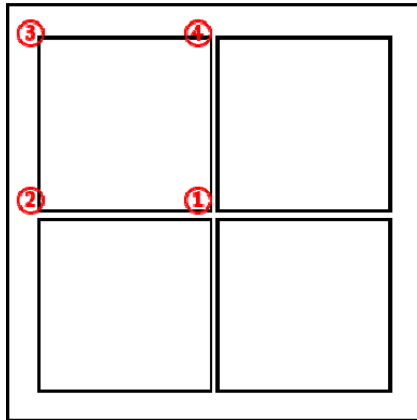


Fig. 1. Photograph of backsheet remover.

Table 1. Temperature and used sample for each peeling process.

	Temperature (°C)	Sample
(a)	60	4-Cell module
(b)	70	4-Cell module
(c)	80	4-Cell module
(d)	90	4-Cell module
(e)	100	4-Cell module, 60-Cell module
(f)	110	4-Cell module

**Fig. 2.** Measurement points of temperature on a 4-cell module.

트와 EVA 사이 계면 특성을 고찰하기 위해 시차 주사 열량측정법(differential scanning calorimetry, DSC, Q200, TA, USA)을 사용하여 EVA와 백시트에 대한 열적 특성을 분석하였다. 또한 백시트 박리 시 태양광 모듈에 미

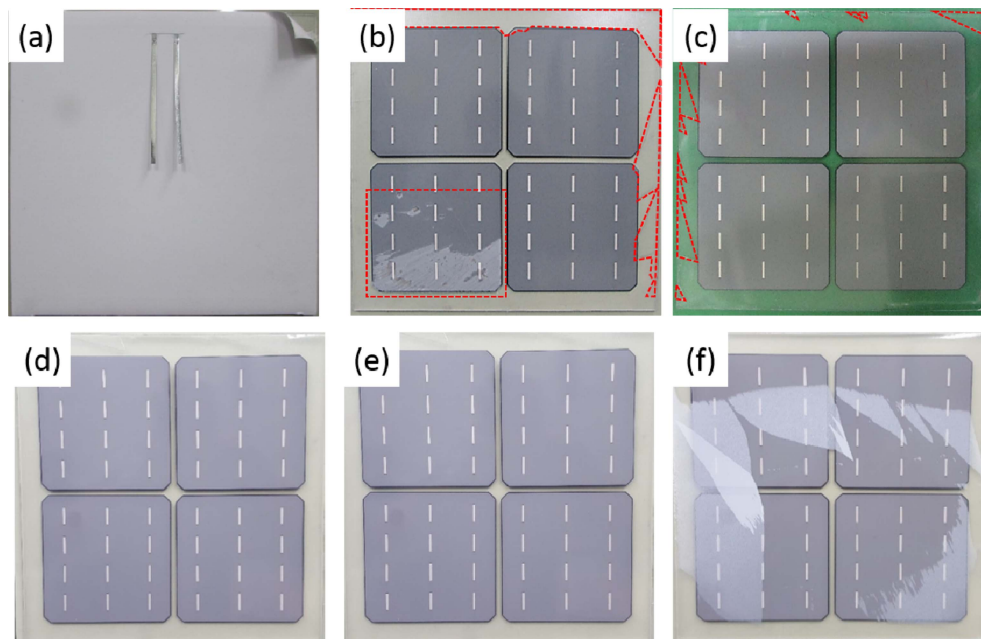
Table 2. Results of temperature measurements on a 4-cell module.

	Temperature(°C)				Average
	Point. 1	Point. 2	Point. 3	Point. 4	
(a)	60	61	54	54	57
(b)	72	72	60	63	67
(c)	80	81	72	74	77
(d)	91	91	83	84	87
(e)	100	101	91	93	96
(f)	111	112	105	106	109

치는 영향을 확인하기 위해 electroluminescence(EL) 측정을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

4-Cell 모듈의 온도에 따른 백시트 박리 거동을 확인하기 위해 모듈 표면의 실제 온도측정 결과와 온도 별 백시트 박리 결과를 각각 Table 2와 Fig. 3에 나타내었다. Table 2의 측정 결과를 통해 실제로 모듈 표면의 온도가 약 60~110 °C로 나타나는 것을 확인하였다. 모듈의 표면온도가 약 60~110 °C일 때 각각 백시트를 박리하여 모듈 표면온도에 따른 백시트의 박리 거동을 확인하였다. Fig. 3(a)의 경우 모듈의 표면온도가 약 60 °C일 때 백시트를 박리한 결과이고 백시트가 박리되지 않는 것으로 나타났다. Fig. 3(b)의 경우 모듈의 표면온도가 약 70 °C일 때 백시트를 박리한 결과이다. 백시트가 박리되

**Fig. 3.** Photograph of a module after backsheet peeling at different temperatures: (a) 60 °C, (b) 70 °C, (c) 80 °C, (d) 90 °C, (e) 100 °C, and (f) 110 °C.

면서 모듈의 전체 면적 중 약 16%의 EVA가 함께 박리되어 일부 유리와 태양전지가 드러났다. Fig. 3(c)는 모듈의 표면온도가 약 80°C일 때 백시트를 박리한 결과이며 해당 온도에서는 전체 면적 중 약 3%의 EVA가 백시트와 함께 박리되어 일부 유리가 드러났다. 본 결과를 Fig. 3(b)와 비교해 보았을 때 온도가 상승함에 따라 EVA 박리 면적이 감소하는 것을 알 수 있었다. Fig. 3(b)와 (c)에서는 EVA가 박리된 부분을 빨간색 점선으로 별도 표시하였다. Fig. 3(d)와 (e)에서는 모듈의 표면온도가 각각 약 90, 100°C일 때 백시트를 박리한 결과이고 백시트가 깔끔하게 박리되는 것으로 나타났다. Fig. 3(f)는 모듈의 표면온도가 약 110°C일 때 백시트를 박리한 결과이다. 백시트가 박리되긴 하였지만 일부 백시트 Layer가 모듈 표면에 잔존하는 것으로 나타났다.

백시트는 일반적으로 다층 layer들로 이루어져 있으며 EVA와 맞닿는 inside layer, 공기 중에 노출되는 outside layer 그리고 중앙의 core layer로 구성되어 있다.⁷⁾ Inside layer에는 polyvinyl fluoride(PVF), polyvinylidene fluoride(PVDF), polyester(PET), poly ethylene(PE), EVA 등의 소재가 사용되고 outside layer에는 PVF, PVDF 등의 소재가 사용되며 core layer는 PET가 흔히 사용된다.^{11,12)} 백시트는 각각의 layer에 사용된 소재에 따라 다양한 종류가 있으며 본 실험에 사용된 백시트는 inside layer부터 core, outside layer 순으로 PE/PET/PVDF로 이루어져 있다. Fig. 4에는 Fig. 3(f)에서의 백시트 박리 후 모듈 표면에 잔존하는 백시트 layer에 대한 XRD 분석 결과를 나타내었다. 해당 분석 결과로부터 잔존하는 백시트는 EVA와 맞닿는 백시트의 PE layer인 것을 확인하였다.^{11,12)} 온도가 비교적 높을 경우 백시트의 3개 layer 중 EVA와 맞닿는 PE layer가 백시트로부터 분리되어 모듈 표면에 잔존하는 것으로 사료된다. 또한 PE layer 내에 나노 분말의 형태로 존재하는 TiO₂도 검출되었다.¹⁴⁻¹⁶⁾

백시트가 깔끔하게 박리되는 온도 조건에 대해 고찰하기 위해 모듈 샘플로부터 EVA를 채취하여 DSC 분석을 진행하였고 이를 Fig. 5에 나타내었다. 해당 분석결과에서 각각 42.3°C와 64.4°C에서 피크 ①, ②가 나타났다. 문헌을 통해 EVA의 성분 중 Vinyl acetate의 녹는점(melting temperature, T_m)이 46°C이고 Ethylene의 T_m 이 67°C임을 확인하였다.¹⁷⁻¹⁹⁾ 따라서 피크 ①, ②는 각각 vinyl acetate와 ethylene의 T_m 인 것으로 사료된다. 모듈의 표면 온도가 vinyl acetate의 T_m 이상이고 ethylene의 T_m 이하일 때 백시트가 박리되지 않은 Fig. 2(a)의 결과를 보아 vinyl acetate와 ethylene 두 성분 모두의 T_m 이상에서, 즉 ethylene의 T_m 이상에서 백시트 박리가 가능하다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6은 모듈 샘플로부터 백시트를 채취한 후 백시트

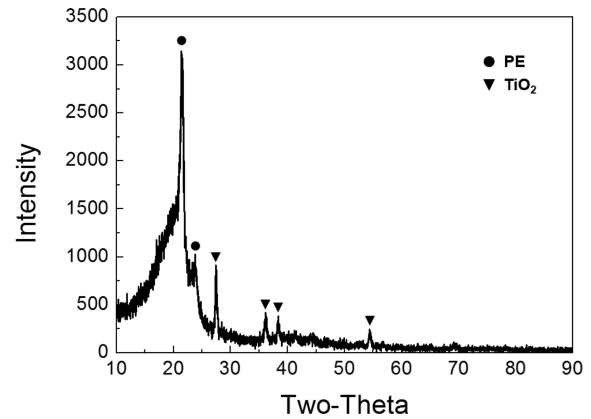


Fig. 4. XRD pattern of residual backsheet after backsheet peeling.

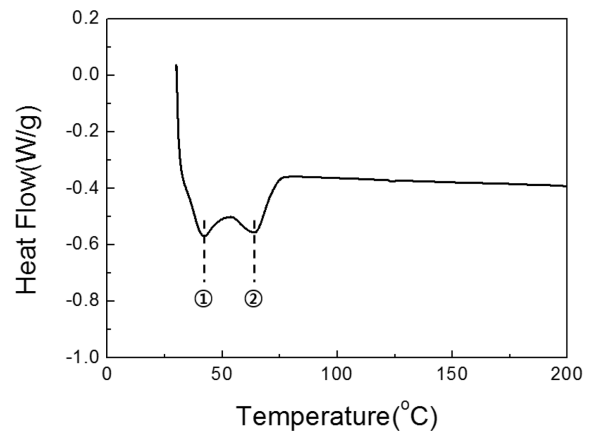


Fig. 5. DSC curve of laminated EVA.

의 layer를 분리하여 진행한 DSC 분석 결과이다. Fig. 6(a)의 경우 사용된 백시트의 layer 중 outside layer인 PVDF layer와 inside layer인 PE layer를 제거한 후 core layer인 PET layer만을 회수하여 분석을 진행한 결과이고 Fig. 6(b)의 경우에는 PVDF layer만을 제거하고 나머지 PET layer와 PE layer를 함께 분석한 결과이다. (PE layer 분석 목적이었지만 PE layer의 경우 약 40 μm 두께의 필름으로 따로 분리하여 채취하기 힘들어 PET layer를 따로 분석하고 PET layer와 함께 PE layer를 분석하였다.) Fig. 6(a), (b)에서 약 78°C에 피크 ①이 동일하게 나타났다. 문헌을 통해 PET layer의 유리 전이 온도(glass transition temperature, T_g)가 약 80°C임을 확인하였고 따라서 Fig. 6(a), (b)에서 PET layer의 T_g 로 피크 ①이 동일하게 나타난 것으로 사료된다.²⁰⁾ Fig. 6의 (a)와 (b)에서 약 134°C 부근에 동일하게 나타난 피크 ②의 경우 문헌을 통해 PET의 결정화 온도(crystallization temperature, T_c)임을 확인하였다.²¹⁾ Fig. 6(b)에서는 115°C 부근에서 피크 ③이 새롭게 관찰되었다. PET layer만을 분석한 Fig. 6(a)와 비교해 보았을 때 피크 ③은

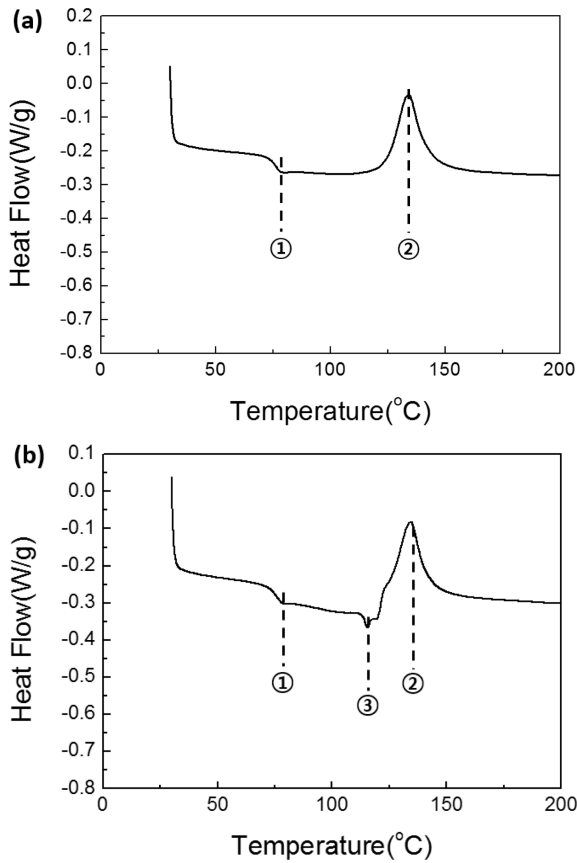


Fig. 6. DSC curve of (a) PET layer, and (b) PE/PET layer in laminated backsheet.

PE layer의 특성 피크인 것으로 판단하였고 문헌을 통해 PE layer의 T_m 이 약 113°C 인 것을 확인하였다.²²⁾ 따라서 Fig. 6(b)의 115°C 에서 나타난 피크 ③은 PE

layer의 T_m 인 것으로 판단하였다. 모듈의 표면온도가 약 110°C 일 때 백시트를 박리한 결과인 Fig. 3(f)의 결과를 보아 PE layer의 T_m 부근에서 PE layer가 백시트로부터 분리되어 모듈 표면에 잔존한 것으로 사료된다. 따라서 백시트 박리 시 PE Layer의 T_m 보다 충분히 낮은 온도에서 백시트를 박리해야 한다는 것을 알 수 있었다.

백시트가 깔끔하게 박리되었던 결과인 Fig. 3(d), (e) 중 온도가 더 높아 보다 적은 물리적 힘으로 백시트를 박리할 수 있었던 Fig. 3(e)의 결과에 해당하는 온도를 상용모듈인 60-Cell, 36-Cell 모듈, 자체 제작한 10-Cell 모듈 등 다양한 모듈에 적용하여 실험을 진행하였고 백시트가 효과적으로 박리되는 것을 확인하였다.²³⁾ 또한, 태양광 모듈에 미치는 영향을 확인하기 위해 60-Cell 모듈을 이용하여 실험 전, 후로 EL 측정을 진행하였다. 실험결과 백시트가 완전히 박리되는 것을 확인하였으며 60-Cell 모듈 EL 측정 결과를 통해 태양전지 파손과 같이 태양광 모듈에 미치는 영향은 없는 것으로 확인되었다. 60-Cell 모듈의 백시트 박리 및 EL 측정 결과를 Fig. 7에 나타내었고 표면 온도 측정 결과를 Table 3에 나타내었다.

4. 결 론

본 논문에서는 태양광 모듈로부터 백시트 박리 시 백시트가 효과적으로 제거되는 최적 온도 조건을 도출하기 위해 4-Cell 모듈의 표면 온도에 따른 백시트의 박리 거동을 확인하였고, 또한 백시트와 EVA 사이 계면 특성에 대해 고찰하기 위해 모듈에 사용된 EVA와 백시트의 열적 특성을 분석하였다. EVA와 백시트의 DSC 분

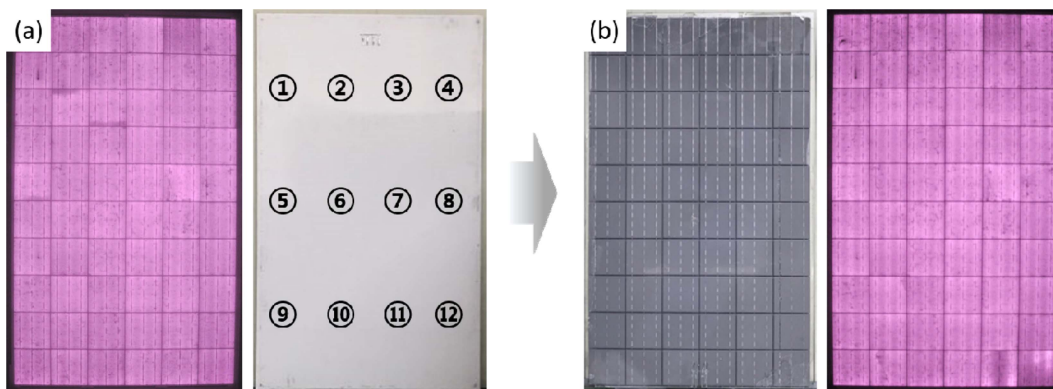


Fig. 7. (a) EL image and photograph of a module before backsheet peeling, measurement points of temperature on a 60-cell module, and (b) EL image and photograph of a module after backsheet peeling.

Table 3. Result of temperature measurement in 60-cell module.

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperature($^\circ\text{C}$)	101	103	103	104	102	103	103	100	106	105	103	102

석을 통해 EVA 내 ethylene 및 vinyl acetate의 T_m 이 각각 42 °C, 64 °C임을 확인하였고 백시트 내 PE layer의 T_m 이 115 °C임을 확인하였다. 따라서 모듈의 표면온도를 EVA의 T_m (64 °C) 이상, 백시트 내 PE layer의 T_m (115 °C) 이하로 제어하여 백시트를 박리해야 함을 알 수 있었다. 모듈의 표면 온도가 EVA의 T_m 이하 또는 유사할 경우 백시트가 박리되지 않거나 EVA가 백시트와 함께 박리되는 거동을 보였고, 백시트 내 PE layer의 T_m 이상 또는 유사할 경우 백시트의 layer 중 EVA와 맞닿는 PE layer가 백시트로부터 분리되어 모듈 표면에 잔존하는 현상을 확인하였다. 결론적으로 모듈의 백시트 박리를 위해서는 100 °C가 최적 온도임을 4-Cell 및 60-Cell 모듈의 백시트 박리 실험을 통해서 확인하였고 60-Cell 모듈 백시트 박리 전, 후 EL 측정을 통해 백시트 박리 기술의 경우 모듈 재활용 시 전처리하는 물론 repair 기술로도 충분히 활용 가능한 것을 확인하였다.

Acknowledgement

This research was financially supported by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) and Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) through the International Cooperative R&D program (No. P0005441). Further support came from the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20163010012240).

References

1. G. Masson and I. Kaizuka, Report IEA-PVPS T1-34 (2018).
2. K. Komoto and J.-S. Lee, Report IEA-PVPS T12-10 (2018).
3. European parliament, Council of the European Union, WEEE. Off. J. Eur. Union, L. **197**, 38 (2012).
4. J. S. Lee and G. H. Kang (in Korean), Mag. Korean Sol. Energy Soc., **15**, 3 (2015).
5. J.-K. Lee, J.-S. Lee, Y.-S. Ahn, G.-H. Kang, H.-E. Song, J.-I. Lee, M.-G. Kang and C.-H. Cho, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **160**, 301 (2017).
6. J.-K. Lee, J.-S. Lee, Y.-S. Ahn, G.-H. Kang, H.-E. Song, M.-G. Kang, Y.-H. Kim and C.-H. Cho, Prog. Photovoltaics, **26**, 179 (2018).
7. K. J. Geretschläger, G. M. Wallner and J. Fischer, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **144**, 451 (2016).
8. H. J. Lee, Y. G. Park, S. H. Lee and J. H. Park (in Korean), Korean Chem. Eng. Res., **56**, 156 (2018).
9. P. G. Charalambous, G. G. Maidment, S. A. Kalogirou and K. Yiakoumetti, Appl. Therm. Eng., **27**, 275 (2007).
10. M. Sander, S. Dietrich, M. Pander, M. Ebert and J. Bagdahn, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, **111**, 82 (2013).
11. B.-M. Kim, K.-S. Lee, M.-K. Kim, G.-H. Kang, H.-K. Lee and M.-J. Park (in Korean), Proc. of 2010 KSEE Summer Conference, p. 1255-1256 (2010).
12. W. J. Gambogi, J. G. Kopchick, T. C. Felder, S. W. MacMaster, A. Z. Bradley, B. Hamzavy, E. E. L. Kathmann, K. M. Stika, T. J. Trout, L. G. A. Garreaules and T. Sample, Proceedings of the 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, p. 2846-2850 (2013).
13. G. Carotenuto, S. D. Nicola, M. Palomba, D. Pullini, A. Horsewell, T. W. Hansen and L. Nicolais, Nanotechnology, **23**, 485705 (2012).
14. M. Romero Saez, L. Y. Jaramillo, R. Saravanan, N. Benito, E. Pabon, E. Mosquera and F. Gracia, Express Polym. Lett., **11**, 899 (2017).
15. M. Xie, L. Jing, J. Zhou, J. Lin and H. Fu, J. Hazard. Mater., **176**, 139 (2010).
16. D. Kim, N. Kim, W.-S. Hong, H. Kang, K. Lee and C. Oh, New Renewable Energy, **12**, 36 (2016).
17. R. Polanský, M. Pinkerová, M. Bartůňková and P. Prosr, J. Electrical Eng., **64**, 361 (2013).
18. A. Yuliestyan, A. A. Cuadri, M. García-Morales and P. Partal, Mater. Des., **96**, 180 (2016).
19. J. A. Reyes-Labarta, M. M. Olaya and A. Marcilla, Polymer, **47**, 8194 (2006).
20. B. Demirel, A. Yaraş and H. Elçiçek (in Turkish), BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi Cilt, **13**, 26 (2011).
21. D. Langevin, J. Grenet and J. M. Saiter, Eur. Polym. J., **30**, 339 (1994).
22. J. A. Reyes-Labarta, M. M. Olaya, A. Marcilla and J. Appl. Polym. Sci., **102**, 2015 (2006).
23. L. A. Quinchia, M. A. Delgado, C. Valencia, J. M. Franco and C. Gallegos, Environ. Sci. Technol., **43**, 2060 (2009).