

건물일체형 태양광 모듈의 난연 특성 강화를 위한 난연 봉지재 특성 연구

김수환¹ · 탁성주² · 박계원³ · 박중성^{4†}

¹경상국립대학교 미래융합기술연구소, 학술연구교수

²포항산업과학연구원, 수석연구원

³방재시험연구원, 수석연구원

⁴경상국립대학교 에너지공학과&미래융합기술연구원, 교수

A Study on the Properties of Encapsulants to Enhance the Flame Retardant Properties of BIPV Modules

Kim Suhwan¹ · Tark Sung Ju² · Park Kyewon³ · Park Jongsung^{4†}

¹Research Professor, Future Convergence Technology Research Institute, Gyeongsang National University

²Principal Researcher, Research Institute of Industrial Science&Technology

³Principal Researcher, Fire Insurers Laboratories of Korea

⁴Professor, Department of Energy Engineering & Future Convergence Technology Research Institute, Gyeongsang National University

†Corresponding author: j.park@gnu.ac.kr

Abstract

This study examined the flame-retardant properties of several encapsulant types that could replace existing ethylene vinyl acetate to improve the fire safety of Building Integrated Photovoltaic modules when used as exterior building material. For the study, six types of films (flame-retardant polyethylene terephthalate, polyether ether ketone, flame-retardant polyethylene naphthalate, polyimide, polyethylene, and thermoplastic polyurethane) were prepared, and various analyses were performed to determine the fire stability of each film. Thermogravimetric Analyzer results showed that polyimide and polyether ether ketone films had the best thermal stability. Upon measuring the light transmittance, polyimide and polyethylene demonstrated >90% light transmittance. The water vapor transmission rate value for the 50 μm -thick polyimide was 270 $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$. Polyimide film did not ignite during the cone calorimeter measurement; instead, only film shrinkage was observed. Collectively, polyimide showed the best thermal stability and module application characteristics among all six types of films.

Keywords: 건물일체형태양광시스템(BIPV), 봉지재(Encapsulant), 난연(Flame retardant), 태양광 모듈(PV module)



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.43, No.6, pp.133-140, December 2023
<https://doi.org/10.7836/kses.2023.43.6.133>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 13 November 2023

Revised: 20 November 2023

Accepted: 21 November 2023

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

기호 및 약어 설명

BIPV	: 건물일체형태양광시스템
G2B	: glass to backsheet 태양광 모듈
G2G	: glass to glass 태양광 모듈
EVA	: Ethylene Vinyl Acetate
PET	: polyethylene terephthalate
PEEK	: Polyether ether ketone
PEN	: Polyethylene Naphthalate
PI	: Polyimide
PE	: Polyethylene
TPU	: Thermoplastic Polyurethane
TGA	: Thermogravimetric Analyzers
WVTR	: Water Vapor Transmission Rate

1. 서론

전세계적으로 탄소저감을 통한 기후변화 대응의 노력으로 기존 화석연료에서 재생에너지로의 에너지 전환이 이루어지고 있다. 국내에서도 탄소중립을 위해 재생에너지의 확대보급이 지속적으로 이루어지고 있으며, 여러 재생에너지원 중 태양광(PV, Photovoltaic)에 많은 관심을 기울이고 있다¹⁻³⁾. 태양광 발전은 햇빛의 에너지를 전기에너지로 변환시켜 발전을 하는 시스템으로 다양한 장소에 설치되어 활용되고 있다. 하지만, 국내의 경우 제한된 국토의 면적으로 태양광 발전을 위한 공간 확보에 어려움이 있다. 따라서 이를 극복하기 위하여, 영농형 태양광⁴⁾, 수상 태양광⁵⁾, 염전형 태양광^{6,7)}, 건물일체형 태양광⁸⁻¹⁰⁾ 등 입지 다변화에 대한 많은 노력을 기울이고 있다. 그 중 건물일체형(BIPV, Building Integrated Photovoltaic)은 제한된 국토면적과 도시화가 잘 진행되어 있는 우리나라 상황에 적합한 태양광 발전시스템이다. BIPV는 태양광 모듈과 건물 외장재 역할을 함께하는 건축물 구성요소로, 빌딩 관련 기능을 유지하는 BIPV 시스템을 구성하는 최소 단위이다. 또한, 정부의 재생에너지 3020 이행계획과 2025년부터 예정된 민간건축물의 제로에너지 건축 의무화에 대비하여, 아파트 등 고층건물에 적용되는 BIPV 시스템의 개발, 관련 산업 생태계의 구축과 강화 필요하다. BIPV 시스템의 확대보급을 위해서는 아파트와 같은 도심 내 고층건물 설치시 심미성, 화재 안전성, 유지보수 용이성 등이 요구됨에 따라 관련 기술개발이 시급한 실정이다. 최근 BIPV 모듈이 건축물의 외장재로 인식되고 있으며, 이에 따라 건물 화재시 BIPV 모듈도 다른 건물 외장재와 유사한 수준의 난연 또는 준불연 특성이 요구되고 있다. BIPV 모듈을 포함하는 일반적인 태양광 모듈의 구조는 G2B (glass to backsheet) 또는 G2G (glass to glass)이며, 모듈 구성요소 중 화재에 가장 취약한 부분은 폴리머 재료인 EVA (Ethylene Vinyl Acetate)와 back sheet이다. EVA의 경우 melting

point가 낮아 (< 120°C) 화재발생이 착화가 되기 쉬우며¹¹⁾, 연소시 가스발생에 따른 weight loss가 큰 편이다¹²⁾. Back sheet의 경우 G2G 모듈 제작시 포함되지 않으므로 우선적으로 EVA의 대체재에 관한 연구가 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 건축물 외장재로서 역할을 위한 BIPV 모듈의 화재 안정성 향상을 위하여 기존의 EVA 대체가 가능한 다양한 종류의 봉지재의 난연특성에 대한 연구를 수행하였다. 연구를 위해서 총 6종의 필름(난연PET, PEEK, 난연PEN, PI, PE, TPU)을 준비하였으며, 각 필름의 화재 안정성 검토를 위해 다양한 분석을 수행하였다. 또한, 실제 태양광 모듈의 봉지재로 적용이 가능한지 광투과율, lamination 특성 및 투습률을 측정하였다. 결과적으로 6종의 필름 중 PI 필름이 화재 안정성 및 모듈 적용성에서 가장 우수한 성능을 보여주었다.

2. 실험

봉지재의 난연특성 및 BIPV 모듈 적용 가능성을 확인하기 위하여 총 6가지의 필름을 준비하였다. 각 봉지재의 특성은 기본적인 특성은 Table 1에 나타나 있다. 해당 필름들은 현재 상업적으로 판매되는 필름들이다.

Table 1 Information of films for potential BIPV module encapsulants

	Flame-retardant PET	PEEK	Flame-retardant PEN	PI	PE	TPU
Chemical Fomular	C ₁₀ H ₈ O ₄	C ₁₉ H ₁₂ O ₃	C ₁₄ H ₁₀ O ₄	C ₃₅ H ₂₈ N ₂ O ₇	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈ N ₂ O
Density (g/cm ³ @20°C)	1.38	1.32	1.36	0.005 ~ 1.95	0.88 ~ 0.96	0.65 ~ 1.44
Melting point (°C)	> 250	343	262 ~ 275	247 ~ 388	115 ~ 135	71 ~ 221
Thickness (µm)	25	125	125	50	100	25
Tensile strength (MPa) @ 23°C	146.02	784.56	310	231	45 - 55	52.4 - 79.3
*Machine direction						

각 필름들의 난연 특성을 평가하기 위하여 TGA (Thermogravimetric Analyzers, TGA N-1000, SCINCO)를 측정하였으며, 측정조건은 N₂ 분위기, 20 ~ 900°C 온도범위 및 10°C/min의 heating rate로 진행하였다. 또한, 해당 필름들은 BIPV 모듈의 광손실(optical loss)를 최소화해야 하므로 필름의 광투과도(optical transmittance)를 UV-Vis spectroscopy (UV-2600i, Shimadzu)의 적분구(integrating sphere)를 이용하여 측정하였다. 태양광 모듈 봉지재가 갖춰야 할 특성 중 하나인 투습률(WVTR, Water Vapor Transmission Rate)을 측정하기 위하여 필름의 WVTR (PERMATRAN-W Model 3/33, MOCON)을 측정하였다. 필름의 유리와의 접합특성을 평가하기 위하여 laminator를 이용하여 다양한 온도에서 lamination을 진행한 후 접착성능을 확인하였다. 또한, 유리와의 접합된 필름의 열방출률, 연기발생률, 착화시간 및 온도 등을 측정하기 위하여 Cone Calorimeter (KS F ISO 5660-1 Cone Calorimeter, FESTECC)를 측정하였다. Cone Calorimeter 측정용 샘플은 2장의 10 cm × 10 cm 크기와 3 mm 두께의 저철분 강화유리 사이에 2장의 필름을 접합하여 유리/필름/필름/

유리 구조로 lamination을 진행하여 준비하였다.

3. 결과 및 고찰

TGA 분석은 시료를 가열함으로써 얻어지는 온도-무게 변화량 측정함으로써 시료의 열안정성(thermal stability) 및 난연성(flame retardancy) 분석이 가능하다. 이에 따라, 본 연구를 위해 준비한 6종류의 필름에 대한 BIPV의 봉지재로 적용 가능성을 분석하였다. 추가적인 비교를 위하여 본 연구실에서 보유하고 있는 BOPET 및 불투명 PI도 함께 측정하였다. Fig. 1(a)는 6종의 필름 및 추가 2종의 필름(Fig. 1(a)에 PI(B)는 불투명 PI이며, PI(T)는 투명 PI를 의미)에 대한 TGA 분석결과를 보여주고 있으며, 자세한 실험결과는 Table 2에 나타나 있다.

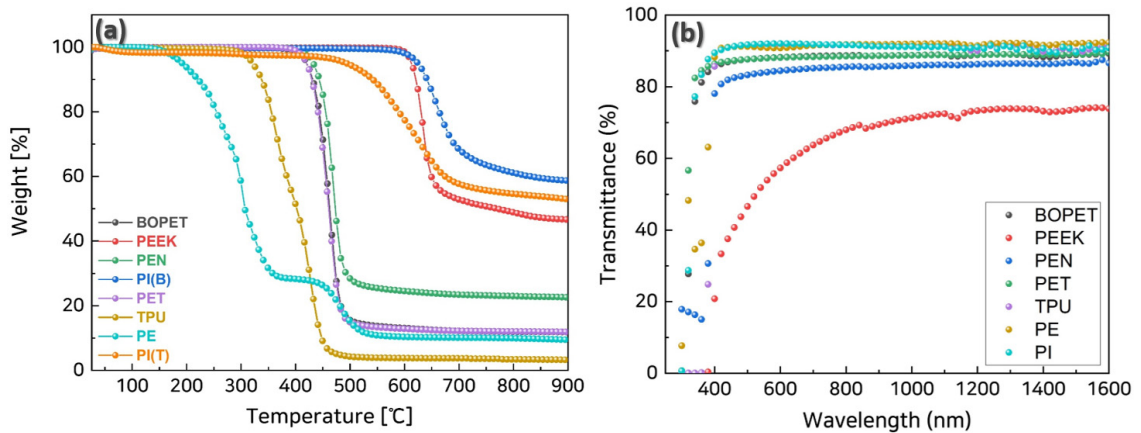


Fig. 1 (a) TGA and (b) UV-Vis measurement results of the potential BIPV module encapsulants

Table 2 TGA results of potential BIPV module encapsulants

	Flame-retardant PET	PEEK	Flame-retardantPEN	PI	PE	TPU	EVA ⁽¹²⁾
Temperature (°C)	374.5 ~ 535.2	576.8 ~ 695.6	387.2 ~ 558.4	391 ~ 784.7	112.9 ~ 553.6	264.4 ~ 509.7	255 ~ 550
Weight loss (%)	88.326	47.173	76.036	42.792	82.436	93.007	99

Fig. 1(a) 및 Table 2에서 볼 수 있듯이 6종의 필름 중 PI가 900°C에서 가장 낮은 weight loss 비율인 약 42.8%를 보여주었으며, weight loss가 이루어지는 온도 범위가 391 ~ 784.7°C로 가장 높은 것을 확인할 수 있었다. PEEK 필름의 경우 약 47.2%의 weight loss를 보여주었으나, 무게의 변화가 이루어지는 온도 범위는 576.8 ~ 695.6°C로 다른 필름보다 높은 것을 확인할 수 있었다. 그 외의 PET, PEN, PE 및 TPU 필름들은 앞의 2종류 필름보다 낮은 온도에서 무게 변화가 시작되며, weight loss도 76 ~ 93 %로 매우 높은 weight loss를 보여주었다.

본 연구팀의 이전 연구에서, 상용모듈에 적용되는 EVA 및 back sheet의 TGA결과를 보면 약 255 ~ 550°C에서 무게변화가 이루어지며, weight loss는 EVA는 약 99%, back sheet는 약 93%로 확인하였다¹²⁾. 또한, EVA 및 back sheet의 경우 polymer이므로 무게변화의 대부분은 가스형태로 분출되어 이루어지며, 본 연구에 사용된 6가지 필름도 동일한 현상으로 무게 감소가 일어나는 것으로 판단된다. 이에 따라, 난연성이 강화된 BIPV 모듈의 봉지재로 사용하기 위해서는 높은 온도에서 무게변화가 적은 필름이 유리할 것으로 판단된다.

태양광 모듈에 적용되는 봉지재는 강화유리와 태양전지 사이에 위치하고 있으며, 태양전지의 출력에 영향을 주는 광손실을 최소화하기 위하여 높은 투과도를 가져야 한다. 이에 따라, 총 6종의 필름에 대한 투과도를 측정하였으며, Fig. 1(b)는 6종의 필름의 광투과도를 보여주고 있다. 해당 그림에서 볼 수 있듯이, 투명 PI(T)와 PE 필름이 가장 높은 투과도인 91%의 투과도를 보여주었다. TGA에서 가장 좋은 결과를 보여주었던 PEEK 필름의 경우 가시광선영역에서 40 ~ 70%의 투과도를 보여주었으며, 적외선 영역에서 70% 이상의 투과도를 보여주었다. 이러한 낮은 투과도로 인하여 PEEK 경우 봉지재로 적용하기에는 부적절한 것으로 판단된다. 투명 PI(T) 필름의 경우 TGA 및 투과도 측정에서 모두 좋은 결과를 보여주었다.

다음으로는 봉지재 후보군들 중에서 가장 투과도가 높은 PE, PET, PI, TPU를 선별하여 투습도 측정을 수행하였다. 타 필름과 비교를 하기 위하여 EVA와 PDMS의 투습도를 다른 논문으로부터 참고하여 4종의 필름과 함께 Fig. 2에 표시하였다^{13,14)}. 일반적으로 많이 사용되는 고분자 봉지재들의 WVTR은 두께에 따라서 다소 차이가 있겠으나, 대체로 약 $10^0 \sim 10^2$ g/m²/day 수준으로 wearable 전자 소자에 적합한 수준을 나타내는 것을 알 수 있다. 투습도 측면에서는 PET가 가장 우수한 특성을 나타내었고, PE, TPU, PI 순으로 투습도가 증가함을 알 수 있다. 현재 태양전지에 가장 널리 사용되고 있는 EVA의 WVTR은 약 50 g/m²/day¹³⁾ 정도이나, PI는 약 270 g/m²/day로 기존의 EVA보다 높은 WVTR을 보여주었다. 하지만, 본 연구에서 사용된 PI 경우 두께가 50 μ m로 참고문헌의 EVA 두께인 200 μ m보다 매우 얇음을 알 수 있다. 따라서, BIPV 적용을 위하여 좀 더 높은 수준의 WVTR이 요구된다면 두께가 두꺼운 PI를 적용한다면 EVA와 유사한 WVTR 수치를 보일 것으로 예상하며, 태양광 모듈의 봉지재 활용에 문제가 없을 것으로 판단된다.

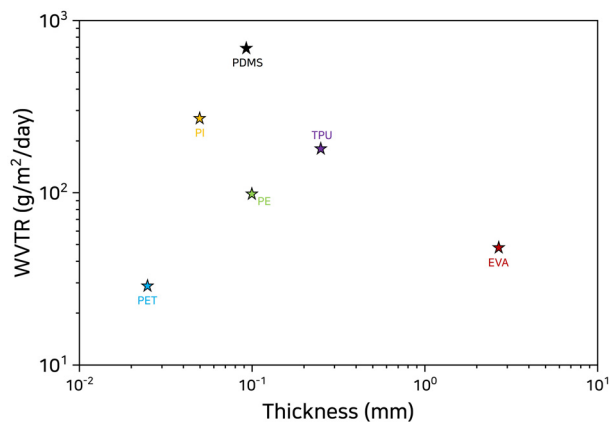


Fig. 2 WVTR measurement results of the potential BIPV module encapsulants^{13,14)}

마지막으로 연소 성능 시험을 위해서 콘 칼로리미터 실험을 진행하였다. 콘 칼로리미터 시험을 위해서는 10 cm × 10 cm 크기의 유리 사이에 봉지재를 넣어, 온도와 압력을 가해 시료를 제작하게 된다. 투습률을 측정할 총 4개의 시료들 중에서, PET의 경우 유리 사이에 넣어서 열로 압착을 해도 유리 사이에서 접합이 되지 않았다. TPU, PE의 경우 일반적인 lamination 공정 온도인 170°C에서 압착이 잘 이루어졌으며, PI의 경우에는 300°C 온도의 조건에서 압착을 진행하여 콘 칼로리미터 실험을 위한 샘플 제작을 완료하였다.

콘 칼로리미터 실험 결과, TPU와 PE 샘플은 약 100, 200초에서 용융이 시작되어, 277초, 291초에 모서리 부분에서부터 착화가 시작되었다. 착화 이후에 연소가 진행되어 Fig. 3(c) ~ (d)에 나타난 것과 같이 시료가 연소된 것을 확인하였다. 하지만 PI 샘플의 경우에는 전체 테스트 시간 동안 착화가 되지 않았으며 필름이 수축하는 현상만 관측되었다. TPU, PE 샘플의 경우에는 시료의 질량이 다소 감소한 반면, PI의 경우에는 착화가 되지 않아 시료의 질량 변화도 가장 적은 것을 알 수 있었다(Table 3). Fig. 3(a)에 나타난 그림은 시간에 따른 각 시료들의 열 방출률을 나타낸 그래프이다. PI의 경우, 착화가 되지 않아서 열 방출률이 가장 낮으며, PE, TPU 순으로 높은 것을 확인할 수 있다.

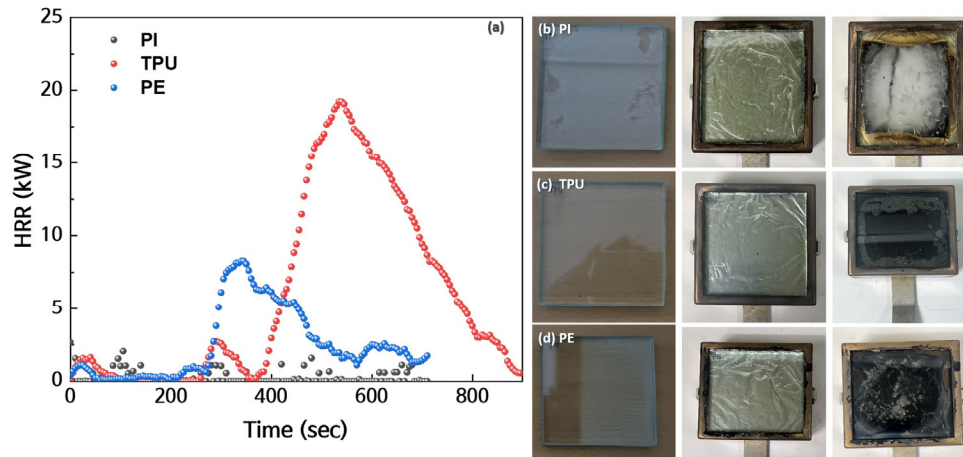


Fig. 3 (a) cone calorimeter results and samples (as prepared, mounted for the measurement and after measurement, from left to right) for cone calorimeter measurement (b) PI, (c) TPU and (d) PE

Table 3 Summary of cone calorimeter measurement results

Specimen	T-ig (SEC)	Peak HRR (kW)	THR(MW) (0 ~ 1000 sec)	Mass change (gram)		Observation
				before	after	
TPU	277 ~ 304 / 450 ~	21.7	5.2	245.6	240.9	1) 100 s : melting starts 2) 200 s : melted entirely 3) 277 s : edge ignited, intermittent frame
PE	291~540	10.5	1.8	240.7	237.6	1) 200 s : melting 2) 291 s : edge ignited, intermittent frame
PI	-	-	-	243.1	242.3	1) ~850 s : no ignition observed 2) film shrinkage observed

건축물 난연성능에 대한 시험방법은 국토교통부 ‘건축물 마감재료의 난연성능 및 화재 확산 방지구조 기준’에 의거 KS F ISO 5660-1 등을 따르며, 건축재료의 난연 등급은 아래와 같은 기준으로 요약할 수 있다. 10분간 총방출열량이 8 MJ/m^2 이하이며, 10분간 최대 열방출률이 10초 이상 연속으로 200 kW/m^2 를 초과하지 않으면 준불연 성능, 5분간 총방출열량이 8 MJ/m^2 이하이며, 5분간 최대 열 방출률이 10초 이상 연속으로 200 kW/m^2 를 초과하지 않으면 난연 성능으로 구분한다. 이때, 두 성능 기준 모두 가열 후 ‘시험체를 관통하는 균열, 구멍 및 용융 등이 없어야 함’이라는 조건이 추가된다. 본 실험에서의 봉지재 3종의 시험 결과, 열방출률의 관점에서 3종 모두 준불연성능에 준하는 성능을 나타내지만, 모든 시편에서 용융, 수축 등의 변형이 관찰되어, 실제로 건축 재료 시험 기준으로는 충족되지 못한다고 할 수 있다(더불어, 난연, 준불연재료의 지위를 득하기 위해서는 KS F 2271의 가스유해성에 의한 시험기준을 별도로 통과해야하나 본 연구에서는 분석범위에서 제외함).

4. 결론

본 논문에서는 BIPV 모듈의 건물외장재로서 갖추어야 할 난연특성 향상을 위하여 모듈의 구성요소 중 화재에 가장 취약한 봉지재를 화재 안정성을 갖춘 봉지재로 대체하기 위하여 6종의 필름에 대한 특성 분석을 수행하였다. TGA 결과에서는 PI 및 PEEK 필름이 가장 우수한 열적 안정성을 보여주었으며, 다른 4종의 필름은 낮은 melting온도와 높은 weight loss로 보여주었다. 광투과율 측정에서는 PI와 PE가 90% 이상의 광투과율을 보여주었으나 열적 안정성이 우수했던 PEEK는 가시광선 영역에서 40 ~ 70%의 낮은 투과도를 보여주었다. WVTR 측정에서는 PET가 가장 우수한 특성을 나타내었고, PE, TPU, PI 순으로 투습도가 증가함을 알 수 있다. PI 경우 $5 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 의 WVTR 값을 보여주었으며, 이는 기존의 EVA와 유사한 수치이다. Cone calorimeter 측정결과, PI 샘플의 경우에는 전체 시간 동안 착화가 되지 않았으며 필름이 수축하는 현상만 관측되었다. 따라서, 총 6종류의 필름 중 PI가 가장 우수한 열적 안정성과 모듈 적용 특성을 보여주었다. 본 연구에서는 한정된 횟수와 시편 범위에 대한 분석 및 검증이 이뤄졌기에 향후 더 많은 통계적 유의성을 확보할 수 있도록 케이스를 증가시킬 예정이다, 실물규모 화재시험에도 적용하여 PI의 실화재 종합성능을 검증할 후속연구를 계획하고 있다. 그럼에도 불구하고 BIPV 모듈의 난연 성능향상을 위해 기존의 EVA를 PI로 대체할 수 있는 가능성이 높은 것으로 판단되며, 대면적 BIPV 모듈 개발에서는 PI의 높은 melting point로 인해 lamination 공정의 최적화가 필요할 것으로 판단된다.

후기

본 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.20223030010250, “강화된 내화성능 확보를 위한 건물형 태양광모듈 제품(시스템) 표준모델 개발 및 성능평가”).

REFERENCES

1. Kim, K. J., Lee, H., and Koo, Y., Research on Local Acceptance Cost of Renewable Energy in South Korea: A Case Study of Photovoltaic and Wind Power Projects, *Energy Policy*, Vol. 144, 111684, 2020.
2. Kim, C., A Review of the Deployment Programs, Impact, and Barriers of Renewable Energy Policies in Korea, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 144, 110870, 2021.
3. Jeong, K., An, J., Hong, T., Lee, J., and Jeong, Y., Life-cycle Economic Assessment for Establishing the Optimal Government Solar Subsidy Program in South Korea, *Energ. Build.*, Vol. 272, 112342, 2022.
4. Jo, G., Yu, J., Park, J. J., Yang, N. R., Lim, C. H., and Park, T. S., A Study on Economic Analysis of Independent Pillar Type Agrophotovoltaic and High Value-Added Crop Cultivation, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 43, No. 1, pp. 13-22, 2023.
5. Gorjian, S., Sharon, H., Ebadi, H., Kant, K., Scavo, F. B., and Tina, G. M., Recent Technical Advancements, Economics and Environmental Impacts of Floating Photovoltaic Solar Energy Conversion Systems, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 278, 124285, 2021.
6. Kim, B., Lee, S. M., Kang, S. H., Jeong, M. S., Gim, G. H., Park, J., and Lim, C., Aquavoltaic System for Harvesting Salt and Electricity at the Salt Farm Floor: Concept and Field Test, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 204, 110234, 2020.
7. Kim, B., Lee, S. M., Kang, S. H., Jeong, M. S., Gim, G. H., Park, J., and Lim, C., Aquavoltaic System for Harvesting Salt and Electricity at the Salt Farm Floor: Concept and Field Test, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 204, 110234, 2020.
8. Kuhn, T. E., Erban, C., Heinrich, M., Eisenlohr, J., Ensslen, F., and Neuhaus, D. H., Review of Technological Design Options for Building Integrated Photovoltaics (BIPV), *Energy and Buildings*, Vol. 231, 110381, 2021.
9. Lee, H. M., Yoon, J. H., Kim, H. I., and Lee, G. H., Performance Assessment of Sputter-Coating-Colored BIPV Modules Through Field Test, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 40, No. 5, pp. 1-12, 2020.
10. Cho, S. and Chang, H., A Study on the Aesthetic BIPV Module with High-efficiency Technology Applied, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 41, No. 6, pp. 97-107, 2021.
11. Choi, S. S. and Chung, Y. Y., Simple Analytical Method for Determination of Microstructures of Poly (Ethylene-co-vinyl Acetate) Using the Melting Points, *Polymer Testing*, Vol. 90, 106706, 2020.
12. Park, J., Kim, W., Cho, N., Lee, H., and Park, N., An Eco-friendly Method for Reclaimed Silicon Wafers from a Photovoltaic Module: From Separation to Cell Fabrication, *Green Chemistry*, Vol. 18, No. 6, pp. 1706-1714, 2016.
13. Hsu, H. Y., Hsieh, H. H., Tuan, H. Y., and Hwang, J. L., Oxidized Low Density Polyethylene: A Potential Cost-effective, Stable, and Recyclable Polymeric Encapsulant for Photovoltaic Modules, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 94, No. 6, pp. 955-959, 2010.
14. Kang, D., Matsuki, S., and Tai, Y. C., Study of the Hybrid Parylene/PDMS Material, In 2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), IEEE, pp. 397-400, January 2015.