

# 태양광 모듈용 봉지재 종류에 따른 자외선 광열화 연구

어승아 · 정낙현 · 김주희 · 이찬용 · 이재형\*  
전자전기컴퓨터공학과, 성균관대학교, 수원, 16419

## Research on Ultraviolet Light Degradation According to Types of Encapsulants for PV Modules

Seungah Ur · RakHyun Jeong · JuHwi Kim · Chanyong Lee · Lee Jaehyeong\*

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

Received November 22, 2023; Accepted December 8, 2023

**ABSTRACT:** Pressure to reduce costs in the current solar market is driving the development and implementation of new module designs and prompting the use of new materials and components. In order to utilize the variability of each material that makes up the module, it is essential to understand the basic characteristics of the material. In this article, we evaluate light degradation after UV irradiation as an encapsulation material. Measure and analyze the results of various characteristic tests for discoloration, optical and electrical property degradation before and after UV accelerated testing. To evaluate weathering stability, UV tests were performed comparing existing EVA and UVT-EVA, POE and improved low-cost POE. Even in the weather resistance test with a total UV exposure of 60 kW/m<sup>2</sup>, the properties of the encapsulants were mostly stable. EVA and POE-based encapsulants showed slight differences, and these slight differences are believed to pose a threat to long-term stability. This study is a basic analysis of encapsulation research for PV modules and will be helpful in understanding future development and encapsulant properties.

**Key words:** Photovoltaic modules, Encapsulant, UV irradiation, Polymer degradation

### Subscript

EVA : Ethylen Vinyl Acetate

POE : Polyolefin Elastomer

PV : Photovoltaics

EL : Electro luminescence

### 1. 서론

지난 10년 동안 전 세계 태양광 모듈의 전력 생산 능력이 크게 증가하여 그에 따라 태양광 모듈 가격이 크게 하락했다. 현재 태양광 시장의 비용 절감에 대한 압박은 새로운 모듈 설계의 개발 및 구현을 촉진하고 있으며, 새로운 재료 및 부품의 개발을 촉진하고 있다<sup>1)</sup>. 이와 관련하여 전통적인 재료나 디자인을 대체하는 색다른 재료나 디자인의 많은 혁신적인 연구가 필요하다. 하지만 1970년대 후반과 1980년대 초반에 개발된 현대 결정질 실리콘

태양광 모듈의 기존 구조는 크게 변하지 않았다. 2020년 표준 태양광 모듈은 일반적으로 폴리머(봉지 재료)로 캡슐화되고 전면이 유리로 덮인 상호 연결된 태양전지와 장기간 노출을 견딜 수 있도록 설계된 폴리머 백시트로 구성되어 있다<sup>2)</sup>. 대부분의 모듈은 모듈 장착을 위한 구조적 프레임을 포함하여 제공하도록 구성되어 있다<sup>3)</sup>. 대부분의 태양광 모듈은 다소 표준화된 구성을 따르지만 구성 되는 부분마다 다양한 소재 선택과 디자인이 가능하다. 이러한 가변성을 활용하려면 소재의 기본 특성을 잘 이해하는 것이 필수적이다. 태양광 모듈의 가장 핵심적인 목적은 가능한 한 많은 태양 복사 조도를 전기로 변환하는 것이다. 이를 위해서는 재료가 태양광 전지에 햇빛을 효율적으로 침투할 수 있어야 하며, 광학 및 전기 부분 소재들은 화학적, 열적, 기계적 스트레스 요인으로부터 장기적인 신뢰성이 확보되어야 한다<sup>4)</sup>. 건물형 태양광 모듈은 에너지 생산도 중요하지만 그 이상으로 심미적 특성을 우선시된다. 무게는 옥상 장착형 태양광 모듈의 제한 요소가 될 수 있으므로 초박형 유리 및 유리섬유 강화 복합 구조와 같은 개념을 갖춘 경량 모듈에 대한 탐구도 이루어지고 있다<sup>5)</sup>. 곡선형 모듈이 필요한 차량 일체형 태양광 모듈에는 소재 혁신이 필요하며 태양광 소재의 혁신 프로세스는 태양

\*Corresponding author: jaehyeong@skku.edu

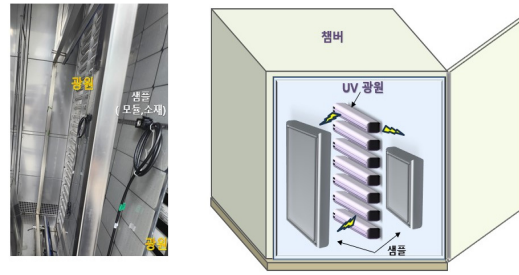
광 모듈 내의 복잡한 상호 작용으로 인해 더욱 어려워진 상태다. 여기서 중요한 측면 중 하나는 전통적으로 EVA (에틸렌 비닐 아세테이트)인 봉지재 소재들이다. EVA는 수년간 신뢰성을 위해 많은 연구가 진행되어 왔지만, 고온으로 인한 아세트산 생성, 광 분해 과정 등의 다양한 단점을 갖고 있다. 폴리올레핀과 같은 신소재는 이러한 문제를 해결하는 것을 목표로 하고 있다<sup>6)</sup>. EVA를 포함한 폴리머의 UV 안정성은 UV 흡수제의 추가를 통해 지난 10년 동안 크게 향상되었다<sup>7)</sup>. 현재 EVA는 UV 안정성 확보를 통해 주요 봉지재 재료로 계속 사용되고 있다. 다양한 연구에 따르면 질화 규소에 의한 부동태화는 UV 노출 시 손상되어 태양 전지의 성능에 영향을 미칠 수 있는 것으로 연구되어지기도 했다<sup>8)</sup>.

이 연구에서는 가혹적인 조건에서 (누적 노출량  $60 \text{ kW/m}^2$ ) UV 조사를 진행한 후에 변색, 광학적 및 열적 특성 저하를 포함한 다양한 특성을 다른 봉지재 소재들과 비교하였다. 모듈 사용 수명 연장에 대한 요구가 점차 높아짐에 따라 최근 개정된 IEC 61730-2 Edition 3.0:2023-09에 의거하여 자외선조사량  $60 \text{ kW/m}^2$  까지 시험하였다. 이 논문에서 태양전지 모듈의 장기적인 신뢰성을 확보하기 위하여 태양광 모듈을 구성하는 중요한 소재인 봉지재의 내구성을 저하시키는 요인 중 한가지인 자외선 조사량에 따른 봉지재의 변화를 측정하였으며, 이에 따른 모듈 출력 저하 가능성에 대해 분석 및 논의 해 보았다. 유라백스트 태양광 모듈의 라미네이트에 대한 UV 가속 테스트에서는 기존 EVA에 비해 POE와 본 연구에서 개발한 저가형 POE의 안정성이 뛰어난 것으로 나타났다. 라만 분광법 및 전기발광 이미징을 포함한 다양한 분석을 통하여 봉지재 소재 간의 열화 거동 차이를 확인했다. 이 연구에서 태양광 모듈 봉지재에서 EVA의 대안으로 새로 개발된 여러 봉지재들에 대한 자외선 내구성에 대해 고찰한다. 근래 태양광 모듈용 EVA 소재의 가격대 형성은 2021년 CNY  $12.1/\text{m}^2$ 로 원료 가격 상승에 따라 약 30% 증가하였으나 POE 봉지재는 2020년 CNY  $13.3/\text{m}^2$ 에서 2022년 CNY  $13.7/\text{m}^2$ 로 소폭 증가하였다. 이 연구에서 개발된 저가형 POE 봉지재 대면적 공정 기술 개발을 통해 현재 EVA 봉지재 대비 같은 면적당 150% 이하의 가격으로써 경제성이 확보 되었다. 이 연구는 새로운 봉지재 소재의 도입이나 기존 소재의 개선에 대한 연구 및 평가에 중요하며 봉지재 소재는 모듈 내의 태양전지 및 구성 요소를 환경으로부터 보호하고 모듈의 성능을 오랜기간 유지하는데 핵심적인 부분으로써 추후 태양광 모듈 구성을 위한 기초 연구가 될 수 있을 것이다<sup>9)</sup>.

## 2. 실험 방법

### 2.1 자외선 조사 시험

고분자 소재인 봉지재들의 자외선 조사량에 따른 특성을 분석하고, 모듈 출력에 미치는 영향을 분석하기 위하여 서로 다



**Scheme 1.** Schematic diagram of ultraviolet irradiation experiment

른 봉지재를 사용하여 단결정 태양전지 모듈 4 종류를 준비하였다. 전면커버는 투명 필름인 Ethylene tetrafluoroethylene copolymer (ETFE)를 사용하였으며, 봉지재로는 ethylene vinyl acetate (EVA) / UVT-EVA / Polyolepin (POE) / 개발한 저가형 POE를 각각 사용하였다. 이를 이용하여 ETFE/봉지재/태양전지/봉지재/back sheet의 순서로 적층 후 라미네이션 공정을 이용하여 모듈을 제작하였다. 라미네이션 공정은  $140^\circ\text{C}$ 에서 660초 동안 진행하였다. 이러한 모듈을 이용하여 자외선 조사 실험은 자외선(UV) 시험에서 정하는 조사방식을 기준으로 충북 테크노파크에서 진행을 하였고, 자외선 시험장비의 경우 국내 제작업체를 통해 제작된 장비이다. 자외선 조사 시험을 위한 봉지재들 간의 특성과 비교를 하기 위해서 소재와 모듈을 총 노출 조사량  $60 \text{ kW/m}^2$ 에서 시험을 진행하였고 ASTM G154 규격에 따라 진행하였다. 또한 자외선 조사 기간은 자외선 광량이 약  $150 \text{ Wh/m}^2$  수준으로 약 17일이 소요되었다. 실험의 장치의 개략도와 실제 모습이 Scheme 1에 나와있다.

### 2.2 소재 특성 및 모듈 출력 측정

푸리에 변환 적외선(FT-IR) 분광법은 Bruker optics, vertex 70 (미국 매사추세츠주 빌레리카)을 사용하여 수행했다. 스펙트럼은  $4000 \sim 300 \text{ cm}^{-1}$ 의 스펙트럼 범위에서 다이아몬드 감쇠총반사 장치를 사용하여 기록되었다. FT-IR 측정용 샘플은 라미네이트 되지 않은 소재 자체를 분석하는 데에 사용되었다. 봉지재들의 UV 조사 전/후의 샘플을 감쇠전반사(ATR) 모드를 통하여 측정하였다. 이는 소재 자체의 진동모드 변화를 통해 소재의 분자구조 변화를 추적하기 위하여 수행하였다. 물질의 투과 스펙트럼은 UV-Vis 스펙트로마터(UV-3600 Plus UV-Vis-NIR 분광광도계, Shimadzu Corporation, 일본 교토)를 사용하여 측정했다. 공초점 라만 분광기(러시아 젤레노그라드 소재 NT-MDT 사, NTEGRA Spectra) 측정에서는 532 nm 파장 레이저를 선택 편광해서 진행하였다. 모든 실험에 사용된 대물렌즈는 0.7 NA, 100배율(일본 미투토요)이 사용됐다. 라만 산란 신호는  $-75^\circ\text{C}$ 로 냉각된 CCD (Andor, 영국)와 1800개 홈/mm의 격자를 가진 분광계를 통해 500 nm로 연소된 분광기를 통해 얻었다. 라만 분광기 측정용 봉지재 샘플은 라미네이트된 GtoG 샘플 제작을 통하여 측정되었다. 라만 분광법은 라미네이트된 소재의 진동모

드 변화를 통해 내부 분자구조의 변화를 특정하기 위해 측정하였다. 모든 UV 조사 테스트는 충북테크노파크 UV조사 테스트 장치에서 수행되었다. 태양광 모듈의 출력 시험은 Denken사 DKSMT-1520SUL 장비를 사용하여 충북 테크노파크에서 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

일반적으로 산업용 태양광 모듈 생산에는 두 개의 밀봉재 층이 사용된다. 첫 번째 층은 유리와 태양전지 사이에 위치하고 두 번째는 태양전지와 백시트 사이에 위치한다. 첫 번째 것은 태양전지와 접촉해야 하며 400 nm보다 긴 파장에서 최소 90%의 반구형 투과율( $\tau$ )이 확보 되어야 한다. Figure 1과 2에서는 봉지재 샘플의 UV 노출 전과 후의 파장에 따른 단일층 라미네이트의 광

투과도와 반사율이 비교되어 있다.

봉지재 재료의 경우 일반적으로 300 nm-400 nm 사이에서 투과율이 10% 미만인 UV 차단 파장이 있으며 200 nm에서도 75% 이상으로 올라가는 경향을 보인다. POE 계열의 샘플 라미네이트된 POE 계열의 샘플들 모두 400-900 nm 파장 범위에서 UV 차단 파장(225 nm), 투과율 및 반사율에서 거의 동일한 스펙트럼이 나타났다. 또한 라미네이트된 EVA계열 샘플들의 투과율에서는 거의 변화가 없었지만 반사율 UV 영역에서 열화로 인한 반사율 증가 경향이 보였다. 전체적인 봉지재들 간의 투과 반사 스펙트럼 모양에서는 큰 차이를 나타내지 않았고 EVA계열 샘플의 반사율 차이만이 유일했다. 제제에 첨가된 UV 흡수제나 열화에서 기인된 변화일 것이라 추측된다. UV 흡수제의 손실로 인해 UV 방사선은 캡슐화 폴리머에 의해 흡수되고 이로 인해 EVA에서 다중 탈아세틸화 및 폴리엔 형성 공정이 발생하여 EVA의 변색이 빨라지고 투과율이 감소한다.<sup>11)</sup> 변색을 확인하기 위해 라미네이션 후, UV 노출 전, 후의 색차를 측정하였다. 우선, 각 샘플들을 육안으로 관찰 하였을 때 모든 샘플이 큰 변화는 관찰되지 않았으나 UV 노출 전과 노출 후 측정된 값의 차이 공식 (1)과 같이 계산 하고 샘플마다의 색차 값을 도출하였다.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \tag{1}$$

색차계로 측정된 데이터는 Table 1에 나타나 있다. 소재 각각의 상, 중, 하단의 3포인트를 색차계로 측정 하고 계산한 결과 봉지재들의 변색 정도는 모두 육안으로 측정 될만한 큰 수치의 변화를 보이지는 않았다. 하지만 그중 저가형 POE의 평균 변색 정도가 가장 낮게 측정되었으며 이는 다중 폴리엔 형성으로 이어지는 다중 탈아세틸화를 통한 형광단 생성으로 인해 발생한다고 알려져 있다<sup>12)</sup>. 초기 봉지재 변색은 육안이나 육안으로는 판별하기 어려우나 형광영상 또는 색차계를 통해서 검출 하는 것이 일반적이다. 절대적인 수치로는 유의미한 결과는 아니지만 이 변색 차이는 더욱 더 가혹한 조건이나 장기신뢰성 부분에서 차이를 나타낼 수 있는 요인이 될 수 있다.<sup>12)</sup>

봉지재의 일반적인 라만 스펙트럼은 분해되지 않은 샘플의 샤프하고 높은 인텐시티의 진동 피크가 나타나게 된다. Figure 3을 보면, 이러한 봉지재들의 중요 피크들인 1071v (CC), 1128 (v(CC)), 1294 (t(CH)), 1439 (d(CH)), 1721 (v(CO)), 2838 (vCH<sup>2</sup>) 및 2895 cm<sup>-1</sup> (v(CH3))에서 유사한 각각의 강한 진동 모드들이 기인된 피크들이 나타난다<sup>13)</sup>. EVA가 분해되면 1724 cm<sup>-1</sup>에서 강한 피크가 증가하는 것으로 나타난다(CO 진동 신축 모드). 그림에서도 보이듯이 EVA 계열의 샘플에서는 여기에 해당 되는 피크들이 증가하는 경향을 보였다. 이는 Norrish-I & Norrish를 통해 EVA에서 폴리엔(CC) 및  $\alpha, \beta$ -불포화 카르보닐기((CO), (CeO))와 같은 형광단이 생성되기 때문이다. -II(다중 탈아세틸화) 반응, UV 및 상승된 온도에서 고분자 사슬 절단 메커니즘이

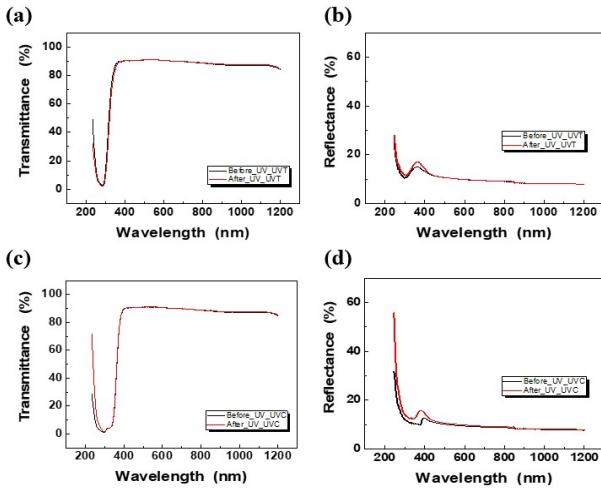


Fig. 1. Transmittance and reflectance spectra of encapsulant (a,b-UVT c,d-EVA)

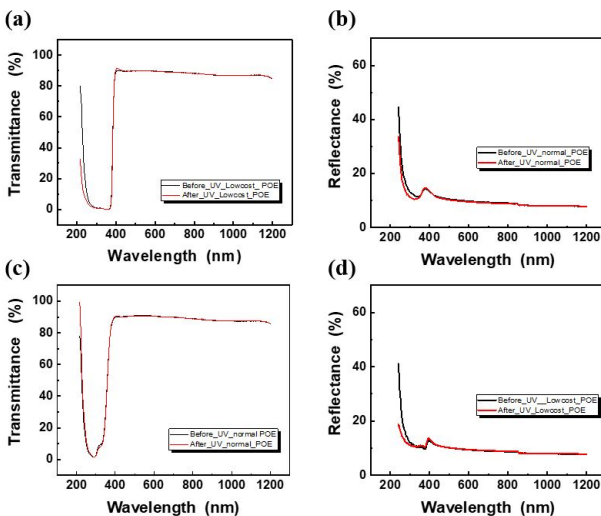
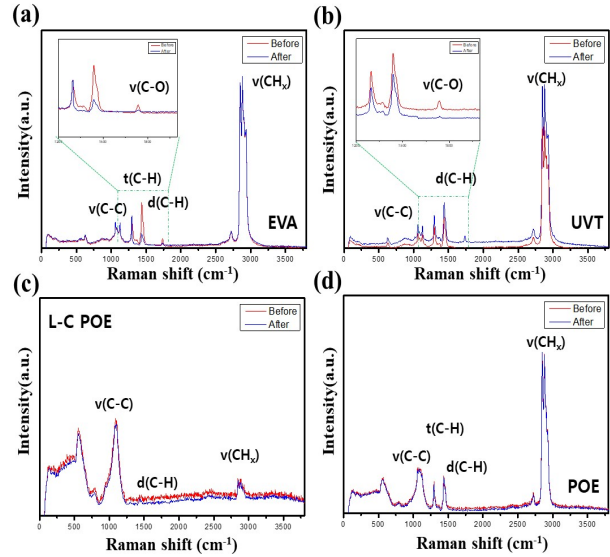


Fig. 2. Transmittance and reflectance spectra of encapsulant (a,b-low cost POE c,d-POE)

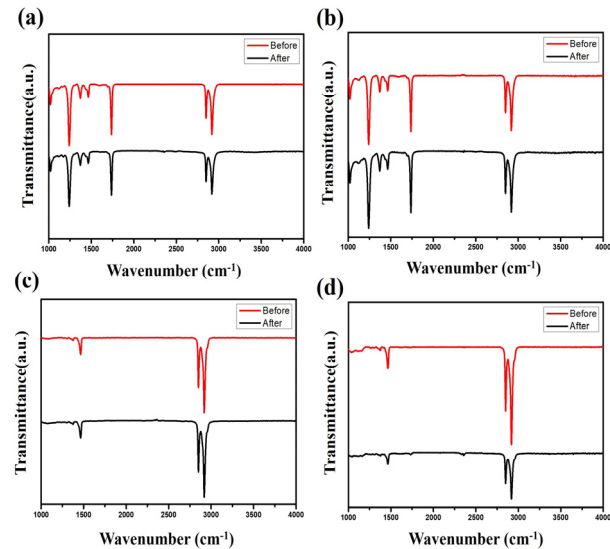
**Table 1.** Module color difference value before and after UV irradiation

			Before	After	$\Delta$	$\Delta E$
EVA	Point 1	L*	78.85	78.05	0.8	1.5
		a*	-1.09	-0.99	0.1	
		b*	0.98	2.24	1.26	
	Point 2	L*	78.43	81.81	3.38	3.71
		a*	-0.9	-1.18	0.28	
		b*	1.06	2.57	1.51	
Point 3	L*	79.47	81.54	2.07	2.78	
	a*	-0.97	-1.4	0.43		
	b*	1	2.8	1.8		
UVT	Point1	L*	68.74	70.9	2.16	2.19
		a*	-0.71	-0.72	0.01	
		b*	1.11	1.46	0.35	
	Point2	L*	62.7	62.61	0.09	1.61
		a*	-0.69	-0.76	0.07	
		b*	0.79	2.4	1.61	
Point3	L*	65.42	66.1	0.68	1.25	
	a*	-0.79	-0.58	0.21		
	b*	0.99	2.02	1.03		
Low POE	Point1	L*	69.16	69.44	0.28	0.46
		a*	-0.64	-0.29	0.35	
		b*	1.59	1.43	0.16	
	Point2	L*	69.67	67.37	2.3	2.3
		a*	-0.6	-0.5	0.1	
		b*	1.57	1.65	0.08	
Point3	L*	67.9	68.01	0.11	0.21	
	a*	-0.46	-0.37	0.09		
	b*	1.6	1.45	0.15		
POE	Point1	L*	64.68	70.23	5.55	5.6
		a*	-0.66	-0.68	0.02	
		b*	1.23	1.97	0.74	
	Point2	L*	65.79	75.31	9.52	9.53
		a*	-0.79	-0.78	0.01	
		b*	1.29	1.78	0.49	
Point3	L*	69.39	69.85	0.46	1.27	
	a*	-0.85	0.01	0.84		
	b*	1.14	1.22	0.84		

가능하다. EVA계열 샘플들에서 형광단이 생성되는 이유는 안정제 또는 첨가제의 손실, VA 단위의 손실 및 주쇄 절단 때문이다. EVA는 UV 조사를 통해 Norrish-I, II, III 반응들을 통해 케톤, 아세트산(탈아세틸화), 알데히드 및 기타 가스(CO 및 CO<sub>2</sub>)로 분해되며 여기에는 CO 진동 스트레칭이 있다<sup>14)</sup>. CO 신축 진동 모드에 해당하는 피크는 1724 cm<sup>-1</sup>에서 관찰된다. 동시에, 폴리머 주쇄 절단으로 인해 CH(2853 cm<sup>-1</sup>의 CH<sub>2</sub> 및 2895 cm<sup>-1</sup>의 CH<sub>3</sub>) 진동 영역(빨간색 원으로 표시) 근처에 또 다른 형광 배경이 나타난다<sup>15)</sup>. POE 계열에는 이러한 형광 피크를 유발하



**Fig. 3.** Raman spectrum of laminated encapsulant (a-EVA, b-UVT, c-low cost POE d-POE)



**Fig. 4.** Fourier transform infrared spectrum of encapsulant before lamination (a-EVA, b-UVT, c-low cost POE d-POE)

는 화학적 결합의 근거가 없기 때문에 UV 가속 테스트 후에도 비슷한 라만 스펙트럼을 보여 EVA 샘플들보다 안정적인 경향을 띠었다.

또한 봉지재 소재들의 라미네이션 전의 샘플들에 대한 광열화는 FT-IR을 통해서 확인되었다<sup>16)</sup>. Figure 4에서 볼수 있듯이, 라미네이션 되지 않는 봉지재들의 UV 조사 전 후의 샘플들에서 주목할만한 변화가 나타나지 않았다. 보통 FT-IR에서도 케톤 형성과 이로 인한 NorrishIII 광분해 반응에서 아세트알데히드 진화 과정들을 스펙트럼에서 추적 할 수 있으나 누적 조사량 60 kW/m<sup>2</sup>의 조건에서는 별다른 변화를 보이지 않았다. 주요 포인트들은 카보닐 형성에 기인되는 1163 cm<sup>-1</sup> 부근 피크들이나 1160 cm<sup>-1</sup>의 체인 끊김에서 얻어지는 지방족 에스테르로 늘어



나는 영향 등이 FT-IR 스펙트럼으로 인해 입증될 수 있으나 라미네이션 전의 소재에서는 UV 안정성이 더욱 뛰어난 것으로 나타났다<sup>17)</sup>.

또한 해당 봉지재들로 모듈을 제작하고 EL과 출력을 측정하였다. Figure 5에 나와 있듯이, UV조사 전과 후의 EL 이미지상의 차이는 거의 나타나지 않았다. 태양전지 모듈의 최대출력결정 시험은 각 모듈에 대해 1,000 W/m<sup>2</sup>의 조사량과 25°C의 조건에서 KS C IEC60904-9에 따른 A 등급의 솔라 시뮬레이터에서 시험이 수행되었으며, 시험 전후의 측정값은 Table 2에 정리하였다. 최대출력결정 시험에서는 각 시료의 최대 출력값의 신뢰도를 높이기 위하여, 총 5회 반복 측정하여 평균값을 적용하였다. 자외선 조사시험 전후의 최대 출력값을 비교한 결과, 봉지재 재료마다의 큰 출력 하락은 나타나지 않아 자외선 누적 조사량 60 kW/m<sup>2</sup>에서의 UV 광열화에 대한 내구성을 갖춰졌음을 보여줬다. 하지만 소재로서 라만 분광법 및 퓨리에 변환 분석을 통한 미시적인 관점에서 관찰하였을 때 EVA 소재 내부의 카르복실산의 형성이 확인된 것으로 보아 더욱 높은 가혹 조건에서 나 장기

적인 시간에 노출에서 변색을 동반한 퍼포먼스 저하가 우려될 수 있는 잠재성을 지녔다고 추측해 볼 수 있다. 반면 POE 소재는 이러한 잠재적인 위험요소가 발견되지 않았으며 이는 장기적으로 봤을 때 출력 안정성 면에서 차이를 보일 것이라 생각된다<sup>18)</sup>. 또한, 경제성까지 고려한 저가형 POE에 경우 광열화 내구성 테스트에서 투과율 및 소재 자체의 거동 분석에서도 일반 POE와 큰 차이를 보이지 않아 태양광 모듈 봉지재로서 EVA를 대체할 수 있는 잠재력을 지녔다고 볼 수 있다.

### 4. 결론

본 연구에서는 태양광 모듈 용 봉지재들인 EVA 계, POE 계 소재들의 자외선 조사 안정성에 대하여 연구하였다. 해당 실험은 가혹한 조건인 2주간 누적 조사량 60 kW/m<sup>2</sup>의 자외선을 근거리에서 노출시켜 진행하였다. 그 후 색차계를 이용한 기본적인 변색 부분부터 라만 분광법, FT-IR 등을 통한 미시적 관점까지 측정하였으며 최종적으로 출력 저하 또한 측정하였다. 광발전 모듈 성능 규격인 국내 태양전지 모듈의 자외선조사시험의 품질 기준인 IEC 61730-2 Edition에 자외선조사량인 전/후면 각 60 kWh/m<sup>2</sup>에서도 유의미한 출력감소는 보이지 않았다. 현재 상용화 되어 있는 봉지재들은 이와 같은 가혹적인 자외선조사 환경 하에서 거시적인 부분에서는 큰 변화를 보이지는 않았으나 EVA계 소재 구성성분의 변질이 다소 관찰 되는데, 이 부분이 장기적인 신뢰성에서 잠재적인 위험요소가 될 것으로 판단되었다. 이러한 측정들에서 POE계의 소재가 장기신뢰성 부분에서 이점이 있으며, 또한 경제적으로도 유리할 수 있는 개발된 저가형 POE 소재가 가장 유망함을 확인할 수 있었다. 또한 모듈 구성에서 각각 소재의 개발들이 빠르게 이루어지고 있음에 따라, 개발 소재들의 물리, 화학적인 거동 또한 발빠르고 꾸준히 연구되어야 태양광 모듈 전체의 신뢰성 부분에서도 빠르게 발전할 수 있을 것으로 판단된다.

### 후 기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 ‘태양광 설치단가와 LOCE 경쟁력 확보를 위한 700W+ 고효율 모듈 개발 및 양산성 검증’(과제번호: 2022303001 0180)의 일환으로 수행되었습니다.

### References

1. Kerttu Aitola, Gabriela Gava Sonai, Magnus Markkanen, Joice Jaqueline Kaschuk, Xuelan Hou, Kati Miettunen, Peter D. Lund, “Encapsulation of commercial and emerging solar cells with focus on perovskite solar cells,” Solar Energy 237,

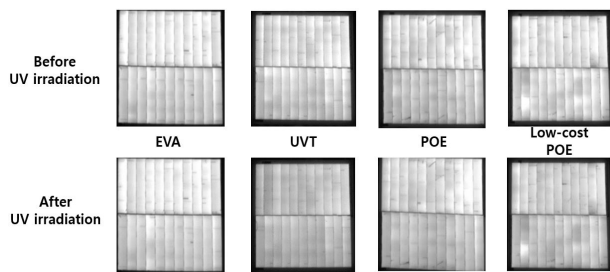


Fig. 5. EL image of PV module according to encapsulant (before/after UV irradiation)

Table 2. Summary of electrical parameters of PV modules by encapsulant (before/after UV irradiation)

	EVA			UVT		
	Before	After	loss%	Before	After	loss%
Pm [W]	22.961	22.743	0.95	21.794	21.771	0.11%
Isc [A]	1.9214	1.9144	0.36	1.8270	1.8263	0.04%
Voc [V]	15.126	15.119	0.05	14.948	15.018	-0.47%
Vpm [V]	12.454	12.462	-0.07	12.327	12.395	-0.55%
Ipmp [A]	1.843	1.8249	1.02	1.7679	1.7564	0.66%
FF [%]	79.003	78.578	0.54	79.795	79.372	0.53%
Eff [%]	22.340	22.128	0.95	21.204	21.182	0.11%
	Low-cost POE			Normal POE		
	Before	After	loss%	Before	After	loss%
Pm [W]	21.411	21.209	0.95%	21.728	21.769	-0.19%
Isc [A]	1.8108	1.8013	0.52%	1.8251	1.8164	0.48%
Voc [V]	15.056	15.073	-0.11%	15.071	15.147	-0.51%
Vpm [V]	12.368	12.332	0.29%	12.331	12.389	-0.47%
Ipmp [A]	1.7311	1.7197	0.67%	1.7620	1.7570	0.28%
FF [%]	78.534	78.112	0.54%	78.993	79.12	-0.16%
Eff [%]	20.832	20.635	0.95%	21.140	21.180	-0.19%

- 264-283 (2022).
2. Birinchi Bora, Supriya Rai, Arup Dhar, Chandan Banerjee "Effect of UV irradiation on PV modules and their simulation in newly designed site-specific accelerated ageing tests," *Solar Energy* 253, 309-320 (2023).
  3. Kanako Yamada, Shogo Kumagai, Toshikazu Shiratori, Tomohito Kameda, Yuko Saito, Atsushi Watanabe, Chuichi Watanabe, Norio Teramae, Toshiaki Yoshioka, "Combined UV-irradiation and pyrolysis-GC/MS approach for evaluating the deterioration behavior of ethylene vinyl acetate," *Polymer Degradation and Stability* 190, 109623 (2021).
  4. Muhammad Farooq Azam, Nadia Shahzad, Arslan Rafique, Mudassar Ayub, Hassan Abdullah Khalid, Adeel Waqas, "Accelerated UV stress testing and characterization of PV-modules: Reliability analysis using different encapsulants and glass sheets," *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 56, 103119 (2023).
  5. A. Jentsch, K.-J. Eichhorn, B. Voit, "Influence of typical stabilizers on the aging behavior of EVA foils for photovoltaic applications during artificial UV-weathering," *Polymer Testing* 44, 242-247 (2015).
  6. Sashivnay Kumar Gaddam, Ramyakrishna Pothu, Rajender Boddula, "Advanced polymer encapsulates for photovoltaic devices - A review," *Journal of Materiomics* 7, 920-928 (2021).
  7. Malte R. Vogt et al., "Optical constants of UV transparent EVA and the impact on the PV module output power under realistic irradiation," *Energy Procedia* 92, 523-530 (2016).
  8. Guy Beaucarne, Anne Dupont, Dhanya Puthenmadom, Nick Shephard, Tony Sample, "Material study of photovoltaic modules with silicone encapsulation after long-term outdoor exposure," *Solar Energy Materials and Solar Cells* 230, 111298 (2021).
  9. Kazuko Matsui, Akihiko Hosaka, Atsushi Watanabe, Norio Teramae, Hajime Ohtani, "Development of a multi-sample micro UV irradiator for accelerated deterioration of polymers," *Polymer Testing* 56, 54-57 (2016).
  10. Tushar M. Shimpi, Christina Moffett, Walajabad S. Sampath, Kurt L. Barth, "Materials selection investigation for thin film photovoltaic module encapsulation," *Solar Energy* 187, 226-232 (2019).
  11. Robert Witteck1, Boris Veith-Wolf, Henning Schulte-Huxel, Arnaud Morlier, Malte R. Vogt, Marc Köntges and Rolf Brendel, "UV-induced degradation of PERC solar modules with UV-transparent encapsulation materials," *Progress in Photovoltaics* 25, 409-416 (2017).
  12. Baloji Adothu, Parth Bhatt, Sarita Zele, Jeroen Oderkerk, Francis Reny Costa, Sudhanshu Mallick, "Investigation of newly developed thermoplastic polyolefin encapsulant principle properties for the c-Si PV module application," *Materials Chemistry and Physics* 243, 122660 (2020).
  13. Baloji Adothu, Parth Bhatt, Shashwata Chattopadhyay, Sarita Zele, Jeroen Oderkerk, H.P. Sagar, Francis Reny Costa, Sudhanshu Mallick, "Newly developed thermoplastic polyolefin encapsulant-A potential candidate for crystalline silicon photovoltaic modules encapsulation," *Solar Energy* 194, 581-588 (2019).
  14. Baloji Adothu, Francis Reny Costa, Sudhanshu Mallick, "Damp heat resilient thermoplastic polyolefin encapsulant for photovoltaic module encapsulation," *Solar Energy Materials and Solar Cells* 224, 111024 (2021).
  15. C. Peike, T. Kaltenbach, K.-A. Weiß, M. Koehl, "Non-destructive degradation analysis of encapsulants in PV modules by Raman Spectroscopy," *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95, 1686-1693 (2011).
  16. Baloji Adothu, Francis Reny Costa, Sudhanshu Mallick, "UV resilient thermoplastic polyolefin encapsulant for photovoltaic module encapsulation," *Polymer Degradation and Stability* 201, 109972 (2022).
  17. Jing Jin, Shuangjun Chen, Jun Zhang, "UV aging behaviour of ethylene-vinyl acetate copolymers (EVA) with different vinyl acetate contents," *Polymer Degradation and Stability* 95, 725-732 (2010).
  18. Gorka Imbuluzqueta, Naiara Yurrita, Jon Aizpurua, Francisco J. Cano, Oihana Zubillaga, "Composite material with enhanced ultraviolet performance stability for photovoltaic modules," *Solar Energy Materials and Solar Cells* 200, 109947 (2019).