

# 플렉시블 유기 및 무기 다중 수분차단층을 적용한 태양전지 모듈의 신뢰성 연구

김제하 

청주대학교 에너지융합공학과

## A Study on the Reliability of Photovoltaic Modules Fabricated with Flexible Organic and Inorganic Multi-Layered Moisture Barrier

Jeha Kim

Department of Energy Convergence Engineering, Cheongju University, Cheongju 27739, Korea

(Received June 16, 2025; Revised July 4, 2025; Accepted July 7, 2025)

**Abstract:** To ensure the long-term reliability of flexible photovoltaic (FPV) modules, it is crucial to develop an effective moisture barrier layer that prevents the infiltration of moisture and oxygen. We developed such a layer composed of parylene (700 nm) and AlOx (70 nm), optimizing its material properties, moisture-blocking performance, and processing conditions. The barrier layer applied to the Ethylene Tetrafluoroethylene (ETFE) substrate demonstrated a water vapor transmission rate (WVTR) of  $6.33 \times 10^{-2}$  g/m<sup>2</sup>/day and an average visible light transmittance (AVT) of 85.3% over the 380-780 nm wavelength range. For the FPV module with this barrier, Damp/Heat (DH) reliability testing was conducted at 85°C and 85% relative humidity for up to 1,000 hours. During testing, the power conversion efficiency (PCE) decreased slightly from 25.4% (0 hr) to 24.7% (1,000 hr), reflecting a minimal reduction of only 0.7%. The primary cause of degradation was identified as a -4% relative change in short-circuit current density ( $J_{sc}$ ) before and after DH testing. Consequently, the ETFE/parylene/AlOx multilayer moisture barrier proved highly effective in ensuring the long-term reliability of solar modules.

**Keywords:** Flexible photovoltaic modules, Moisture barrier, Parylene-AlOx, Water vapor transmission rate, Damp/heat test, Reliability

### 1. 서론

유연 태양광(flexible photovoltaic, FPV) 기술은 건물 일체형(building integrated photovoltaic, BIPV) 및 제품 일체형 태양광(product integrated photovoltaic, PIPV) [1-7]과 같은 다양한 응용 분야에서 활용되고 있다.

유연 박막 태양 전지는 높은 비전력(kW/kg)과 기계적 견고성을 제공하며, 롤투롤(roll-to-roll) 공정이 적용할 수 있어서 생산 비용이 낮다 [8]. 또한 응용제품의 다양한 모양과 크기(예: 직물, 타일, 텐트 등)에 쉽게 적용할 수 있다 [2,7].

그렇지만 PV 모듈과 달리 유리를 사용하지 않기 때문에 FPV 모듈은 외부의 수분차단을 위한 낮은 투습도(water vapor transmission rate, WVTR)를 갖는 차폐층과 내습성이 우수한 패키징 소재의 이용이 필수적이다 [9]. 일반적으로 옥외 장기 신뢰성을 위한 실용 PV 모듈에 요구되

✉ Jeha Kim; [jeha@cju.ac.kr](mailto:jeha@cju.ac.kr)

Copyright ©2025 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.

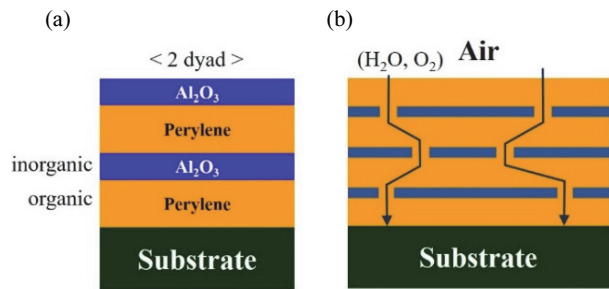
는 투습도는 약  $10^{-4}$  g/m<sup>2</sup>/day 또는 낮은 값이 요구되고 있다 [10,11]. 최근에는 수분에 취약한 페로브스카이트 PV 모듈에서 수분 차단층을 적용함으로써 장기 신뢰성을 확보한 여러 연구들이 보고되었다 [12,13]. 특히, 습기와 산소 침투를 방지할 목적으로 유기-무기 복합 다중층(dyad)이 매우 효과적인 것으로 알려져 있다 [14-16]. 이는 무기 박막층의 장벽 특성이 유기층의 특성과 결합되어 표면 지형을 평탄화하고, 결합 또는 핀홀(pin-hole)을 분리하며, 결합된 무기층의 균열을 방지하기 때문인 것으로 알려지고 있다 [17]. 또한, 무기막과 유기막을 통합함으로써 습기와 산소의 침투 경로가 확장되어 확산이 제한되고 경로 시간 지연이 현저히 증가하는 것으로 보고되었다 [18].

효과적인 유기-무기 수분차단층의 적용에 있어서 무기 박막층은 자체 결합이 적고 조밀한 구조를 갖는 것이 필요한데 ALD (atomic layer deposition) 또는 스퍼터링법이 널리 이용되고 있다. AlO<sub>x</sub> 박막은 우수한 물성으로 인하여 가장 널리 활용되고 있다. 한편, 수분 차단 용 유기막 재료는 parylene-C 고분자가 전자, 계측, 항공우주, 의료 및 엔지니어링 산업에서 장치, 부품 및 표면 보호를 위한 최고의 코팅 솔루션으로 알려져 있다 [19-21].

본 연구에서는 AlO<sub>x</sub> 무기막, 또는 parylene 유기막을 결합한 유기-무기 복합 dyad를 제작하고, 이 시료들의 WVTR, 표면 거칠기, 그리고 가시광 투과율 등의 물성을 조사하였다. 그리고 ETFE (ethylene tetrafluoroethylene) 기판의 유-무기 복합 dyad 수분차단층과 유연 플랫폼에 실장된 GaAs 태양전지를 결합한 FPV 모듈을 제작하였다. 이 FPV 모듈은 고온 고습조건에서 0-1,000 hr DH 시험을 수행하여 시간에 따른 태양전지 변수들의 변화를 조사하고 dyad 수분차단층의 효과를 평가하였다.

## 2. 실험 방법

그림 1(a)는 유기(parylene-C)/무기(AlO<sub>x</sub>) 2-dyad 수분 차단층을 보인다. 이와 같은 다중층(dyad) 구조는 그림 1(b)에 보인 것처럼 불순물 침투 경로를 무기 및 유기층을 따라 길어지게 함으로써 확산을 제한하고 가스와 수증기의 지연 시간을 현저히 증가시킨다 [18]. 본 연구에서는 PV 모듈의 신뢰성 확보를 위하여 다양한 폴리머 재료를 이용하였다. 표 1은 PV 모듈 공정에 사용되는 폴리머 재료의 WVTR과 CTE (coefficient of thermal expansion)를 요약하였다. 유연 기판 소재로서 광학적, 기계적 특성 및 폴리머 수분차단 특성이 우수한 ETFE, PEN (polyethylene naphthalate)와 PET (polyethylene terephthalate)를 사용하였다. 폴리머 기판은 봉지재인 EVA (ethylene-vinyl acetate) 및 POE (polyolefin elastomer)와의 접착성 향상을 위하여 한 면이 플라즈마 처리된 것을 사용하였



**Fig. 1.** Schematic of moisture barriers in organic/inorganic materials: (a) a 2-dyad structure and (b) a model of moisture ingress through dyads. The polymer film substrates used are ETFE and PEN.

**Table 1.** List of polymers for flexible PV module encapsulation with their WVTR and CTE values.

Polymers	WVTR (g/m <sup>2</sup> /day) <sup>a</sup> (thickness in μm)	CTE (× 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> ) <sup>b</sup>	Application	Reference
ETFE	1.5 (100)	90-170	Substrate	[22]
PEN	6.7 (25)	20-21	Substrate	[23]
PET	18 (25)	20-80	Substrate	[22]
	3.9-17 (100)	60-80		[24]
EVA	16.7 (380)	160-200	Encapsulant	[24]
POE	4.11 (500)	36-110	Encapsulant	[25]
PIB	< 0.1	120	Edge sealant	[26]
Butyl rubber	< 0.1	80-192	Edge sealant	[26]

<sup>a</sup> Measured at 38°C, 100% RH, <sup>b</sup> CTE, coefficient of thermal expansion

다. 유기-무기 dyad 수분차단층은 그림 1(a)에서처럼 유기막(parylene)과 무기막( $\text{AlO}_x$ )으로 구성된 이중막으로 구성하였다. 제작된  $\text{AlO}_x$  무기막과 1-dyad의 parylene 막의 두께 변화와 2-dyad 수분차단층의 구조에 따른 WVTR 값의 변화를 조사하였다.

## 2.1 무기 수분차단층

$\text{AlO}_x$  무기막은 6" thermal ALD (atomic layer deposition; iSAC Co. Ltd., iOV m100)를 이용하여 증착 하였다 [27-29]. 기판은 표 1에 보이듯이 수분 차단 특성이 우수한 ETFE (75  $\mu\text{m}$ ), PEN (125  $\mu\text{m}$ ), PET (125  $\mu\text{m}$ )을 사용하였으며 넓이는 100 mm  $\times$  100 mm였다. 폴리머 기판은 별도의 세정 없이 보호막을 제거한 다음 ALD 성장 챔버에 투입하였다. 전구체는 trimethyl aluminum (TMA; iChems Co., Korea)을 사용하였다. Ar (99.99%)을 유속 (flow rate) 50 sccm으로 운송 가스로 사용하였고 성장 챔버의 압력을 300 mTorr로 유지하였다. 반응 산화제로서  $\text{H}_2\text{O}$ 와  $\text{O}_3$  가스를 사용하였다. 한 사이클의 공정은 TMA pulse (1.5s) - Ar purge (3s) -  $\text{O}_3$  (3s) pulse - Ar purge (5s)로 구성하였다.  $\text{AlO}_x$ 의 성장온도와 성막 속도는 각각 100°C와 0.06 nm/cycle였다 [29]. 최소 WVTR을 갖는  $\text{AlO}_x$  무기막 두께를 선정하기 위해, PEN 기판 위에 0-100 nm 범위에서 여러 두께의 시료를 제작하였다. 일반적으로  $\text{AlO}_x$  층이 두꺼워질수록 수분 차단 능력은 향상된다. 그러나 ALD의 특성상 성막 속도가 길어지기 때문에 (4-5 hr/100 nm) 박막 두께, 물성 그리고 성막 시간에 대한 최적 공정조건을 결정하였다.

## 2.2 유기 수분차단층

유기 수분차단층으로 parylene-C를 사용하였다. 이 폴리머는 우수한 전기적, 화학적, 기계적 특성을 보유하여 전자 부품 보호, 바이오 소재 등으로 널리 활용될 뿐 아니라 습기 및 가스 차단 특성이 뛰어나고 높은 열 안정성 때문에 고온 환경에서 안정적인 코팅막을 형성할 수 있다 [19-21]. 즉, parylene-C 막은 낮은 소수성(WVTR = 0.08  $\text{g}/\text{m}^2/\text{day}$ )으로 수분 침투를 효과적으로 차단하고, 또한 작은 Young's Modulus (4 GPa)로 인하여 봉지화된 Flex PV 모듈의 신뢰성과 유연성을 유지시킬 수 있어 다중 수분차단층 소재로서 매우 적합하다 [30].

유기층의 성막은 화학기상성막(chemical vapor deposition, CVD) 기반의 코팅 시스템(NRPC-500, NURITECH Co.)을 이용하였다. 성막 공정은 챔버 내에 분말 dimer (di-para-xylene)를 투입하여 증기로 승화시키고, 이로부터 고온에서 monomer (para-xylene)로 전환한 다음, monomer 가스를 응축시켜 고분자 폴리머(para-xylene) 필름을 생성하게 된다. 증착은 0.01 Torr 이하의 챔버 압력에서 진행하였으며, 670°C의 furnace 온도와 125°C의 증기 온도에서 성막 하였다. 동일한 배치(batch) 성막 공정에서 100 mm  $\times$  100 mm 크기의 3장의 기판(분석용, 모듈용)을 제작하였으며, 각 배치 공정에서 막의 두께는 500 nm, 700 nm, 1,000 nm였다.

## 2.3 유기-무기 수분차단층

Parylene 유기막과  $\text{AlO}_x$  무기막을 교대로 쌓아 유기-무기 다중층(multi-layer) 1-dyad를 구성하였으며, 두 번의 유기-무기 다중층의 반복으로 2-dyad를 제작하였다 (그림 1(a)).  $\text{AlO}_x$  무기막의 두께를 고정한 dyad에서 parylene 유기막 두께(500 nm, 700 nm, 1,000 nm)에 따른 최소의 WVTR값을 조사하였다.

FPV 모듈 구성에 있어 수분 차단층은 태양광이 입사하는 전면에 놓이며 front cover sheet 및 back sheet로서 사용하였다. 태양전지의 광전변환효율(PCE)을 극대화하기 위하여 가시광( $\lambda = 380-780$  nm) 영역에서 입사광의 투과율을 최대화해야 한다. 이때, 전면의 다중구조 막에서 AVT (average visible transmittance)가 85% 이상을 확보하는 것이 이상적이다.

## 2.4 FPV 모듈 공정

ETFE 기판 위에 형성한 dyad 수분차단층을 이용하여 FPV 모듈을 제작하였다. 그림 2는 FPV 모듈의 적층 구도를 보인다. 4 개(2 직렬, 2 병렬)의 GaAs III-V 태양 전지 (10 mm  $\times$  10 mm) (AZUR SPACE Solar Power GmbH)가 Cu(25  $\mu\text{m}$ )-폴리이미드(50  $\mu\text{m}$ )-Cu PCB (printed circuit board) 플랫폼(55 mm  $\times$  75 mm) 위에 실장하였으며, 그 위, 아래 면에 POE 봉지재를 위치한 다음, dyad 수분차단층이 PV 소자 플랫폼 쪽으로 향하도록 배치하였다. 다음으로 ETFE/dyad-to-ETFE/dyad 봉지 공정은 3 단계로 진행하였다. 진공(300s), 압축(15s), 그리고 온도 136°C, 710s 동안 가교(cross-linking) 열처리를 수행하였다.

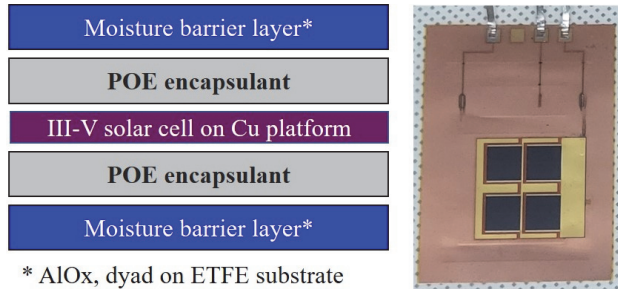


Fig. 2. Schematic of the layout of a flexible photovoltaic module (photo: completed PV module).

### 2.5 측정 방법

무기 박막의 두께와 굴절률은 두께 정밀도 0.001 nm를 갖는 엘립소미터(Film sense, FS-1, v.1.69)로 측정하였다. 633 nm의 단일 파장의 레이저 광을 입사각 65°에서의 측정하여 기본 굴절률을 측정하였다. 유기-무기 dyad 수분차단층의 단면은 FIB-SEM (Helios 600i, FEI Co.)을 이용하여 관측하였다. 3차원 모폴로지는 AFM (atomic force microscope; XE-100, Park Systems)을 사용하였다. 무기막 및 유기-무기 dyad 수분 차단층의 광 투과율은 UV-Vis Spectrometer (UV-2600, Shimadzu)를 사용하여 300-1,400 nm 파장에서 측정하였다. 유연기판 위에 제작한 각 수분차단층 (100 × 100 mm<sup>2</sup>)의 WVTR은 Technolox사의 Deltaperm 장비를 사용하여 40°C, 상대습도 90% RH 조건에서 측정하였다. 수분차단층을 이용한 FPV 모듈의 장기 신뢰성 평가는 솔라시뮬레이터(9404 63A-1000, Newport Co.)와 온습도 시험기(C340, WEISSTECHNIK)를 이용하여 환경온도 85°C와 상대습도 85% RH에서 KSIEC 61646 표준조건에 준하여 최장 1,000 시간 동안 시험하였다.

## 3. 결과 및 분석

### 3.1 유기 및 무기막의 수분 차단 특성

그림 3은 PEN, PET, ETFE 유연기판 위에 성장한 AlO<sub>x</sub> 무기막의 두께에 따른 측정된 WVTR를 종합한 그래프이다. 일반적으로 WVTR은 시료 막 두께에 비례하여 감소한다. PEN(125 μm)/AlO<sub>x</sub> 무기막의 WVTR은 그 두께가 증가함에 따라 감소하였으며, 70 nm에서 1.0 × 10<sup>-2</sup> g/m<sup>2</sup>/day로 정체되는 경향을 보였다. 두께가 100 nm로

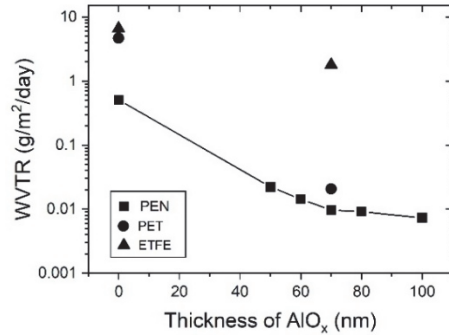


Fig. 3. WVTR vs. AlO<sub>x</sub> thickness on various polymer substrates.

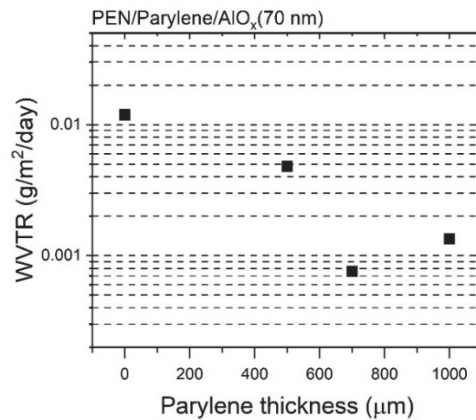
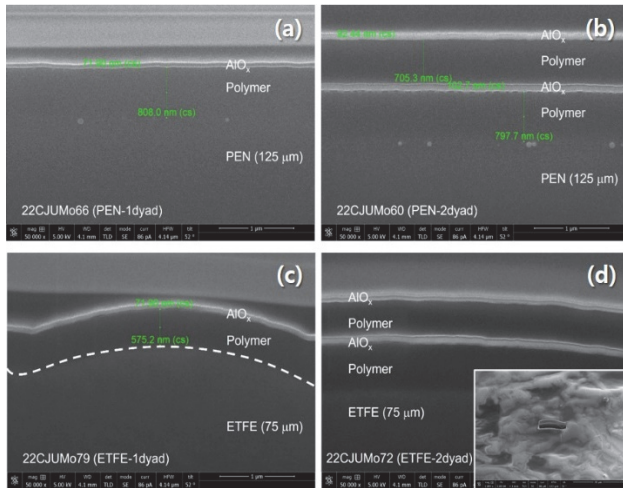


Fig. 4. WVTR vs. parylene thickness in a parylene (x nm)/AlO<sub>x</sub> (70 nm).

증가하게 되면 WVTR은 0.73 × 10<sup>-2</sup> g/m<sup>2</sup>/day으로 약간 향상되지만, 100 nm의 성막 시간이 4-5 시간으로 길어지는 것을 고려할 때 비실용적이다. PET (125 μm)/AlO<sub>x</sub> 무기막(70 nm)에서도 WVTR은 유사한 값을 보였다. 한편, ETFE (75 μm)/AlO<sub>x</sub> 무기막(70 nm)의 WVTR은 PET 또는 PEN에서 보다 약 10배 열등하게 나타났다. 이와 같은 결과는 폴리머 소재기판 자체의 수분차단특성 차이(표 1)와 ETFE의 월등히 얇은 두께(75 μm)에서 비롯된 것으로 분석된다. 이와 같은 결과로부터 최적의 AlO<sub>x</sub> 두께를 70 nm으로 설정하고 dyad 제작에 사용하였다.

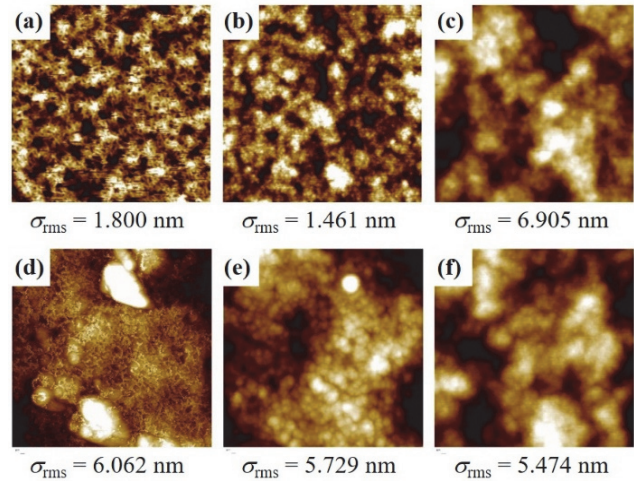
유사한 방법으로 AlO<sub>x</sub> (70 nm)을 갖는 유/무기 dyad에서 parylene 유기막의 두께를 변화함으로써 최적의 성막 조건을 결정하였다. 그림 4는 PEN/parylene(xnm)/AlO<sub>x</sub> (70 nm)인 dyad 층의 parylene 두께에 따른 WVTR 변화 그래프이다. Parylene의 두께가 500 nm에서 700 nm로 변화할 때, dyad의 WVTR은 급격한 감소를 보였다. 이로부터 parylene (x = 700 nm)/AlO<sub>x</sub> (70 nm)을 최적 dyad 수분차단층으로 결정하였다.



**Fig. 5.** FIB-SEM images of cross-sectional dyad barriers on polymer substrates: (a) and (b) for PEN, and (c) and (d) for ETFE.

그림 5는 FIB-SEM으로 관측된 parylene과  $\text{AlO}_x$ 으로 구성된 dyad의 단면사진을 보이고 있다. Parylene 층과 유연기판(PEN)은 760–810 nm의 두께로 측정되었으며,  $\text{AlO}_x$  층은 65–71 nm의 두께로 측정되었다. 이와 같은 결과는 유사 CVD 법에 의한 parylene 성막 공정을 고려할 때 10% 미만의 두께 막의 형성은 매우 양호한 것으로 평가된다. 한편, ETFE/dyad 수분차단층의 WVTR은  $6.33 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2/\text{day}$ 로 측정되었다.

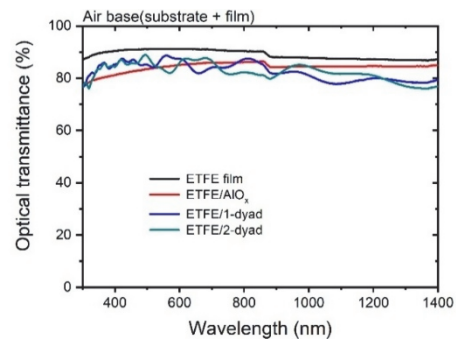
그림 6은 AFM으로 측정된 ETFE/ $\text{AlO}_x$  무기막과 ETFE/1-dyad 수분차단층의 3차원 표면 토폴로지를 보인다. 이 결과로부터  $1.0 \mu\text{m}^2$  넓이에서 RMS (root-mean-square) 표면 거칠기( $\sigma_{\text{rms}}$ )를 측정하였다. 그림 6(a)의 PEN 기판과 그림 6(b)의 PEN/ $\text{AlO}_x$  (70 nm) 무기막의 표면 토폴로지 차이는 크지 않았으나  $\text{AlO}_x$  (70 nm) 무기막은 표면의 미세 거칠기를 평탄하게 하는 효과가 관측되었다.  $\sigma_{\text{rms}}$ 는 1.800 nm에서 1.461 nm로 약간 향상되지만 유기막을 결합한 PEN/1-dyad 시료의  $\sigma_{\text{rms}}$ 는 6.905 nm로 비교적 큰 값으로 측정되었다. 이는 그림 6(a)의 PEN 표면의 미세구조가 dyad를 구성하는 두꺼운(700 nm) 유기막에 의하여 부드러운 곡면으로 변화하지만 125°C의 성막 과정을 거치면서 표면 전체의 굴곡이 커지기 때문인 것으로 해석된다. 한편, 그림 6(d), (e), (f)의 ETFE 표면에 성장한 시료는 얇은 기판 두께(75  $\mu\text{m}$ )로 인하여 유기막의 고온 공정과 관계없이 모든 시료에서 굴곡진 모습이 관찰되었다. 따라서 수분차단층의  $\sigma_{\text{rms}}$ 는 각각 6.062 nm, 5.729 nm, 그리고 5.474 nm로 점진적으로 개선되었다.



**Fig. 6.** Topographical morphology of moisture barriers: (a) and (d) for bare film, (b) and (e) for a single  $\text{AlO}_x$  layer, and (c) and (f) for a 1-dyad structure. (a)–(c) on PEN film and (d)–(f) on ETFE film.

### 3.2 광투과율 특성

그림 2에서처럼 입사광에 가장 먼저 놓이는 다층막 수분차단층은 높은 가시광 투과율 유지가 후면의 태양전지 셀들의 높은 효율을 갖게 하는데 매우 중요하다. 그림 7은 ETFE 기판 위에 제작한 여러 수분차단층(bare film,  $\text{AlO}_x$  (70 nm), 1-dyad 및 2-dyad)의 입사광 파장( $\lambda$ )에 따른 광투과율 거동을 보인다. 그림 1(a)에서처럼 입사광은 ETFE 기판, 유기막 및 무기막을 교대로 투과하여 하부에 위치한 태양전지에 도달한다. 이 다층 구조는 태양 전지 모듈 등에 사용되는 무반사 코팅(anti-reflection coating, ARC) 원리처럼 입사광의 반사율을 줄여 광투과율을 증가시키게 된다. 표 2는 ETFE 기판 위에 제작한 여러 수분차단층의 가



**Fig. 7.** Optical transmission spectra of moisture barriers on ETFE substrates.

**Table 2.** Average visible transmittance (%) for ETFE based moisture barrier.

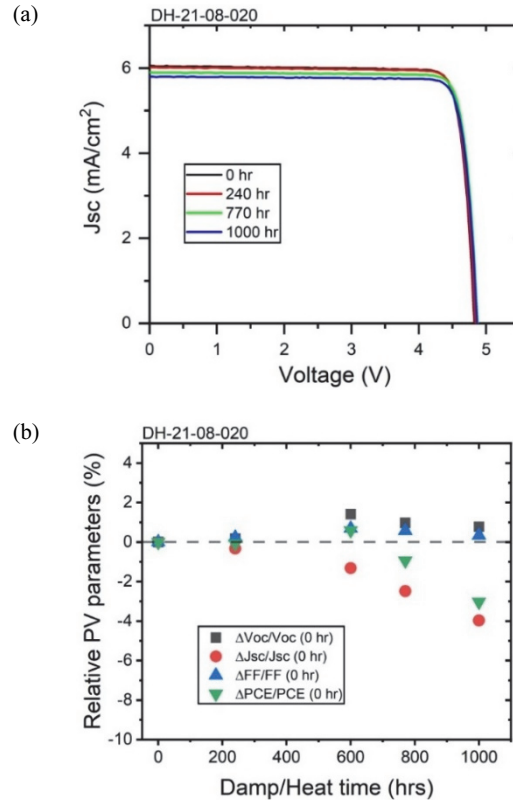
ETFE substrate	Bare film	AlO <sub>x</sub> (70 nm)	1-dyad	2-dyad
AVT (380-780 nm)	90.9	84.3	85.3	85.3

시광 파장대역( $\lambda = 380-780 \text{ nm}$ )에서 측정된 AVT를 요약한 것이다. AlO<sub>x</sub> (70 nm) 무기막에서 AVT가 5.5% 감소되었지만 1-dyad 및 2-dyad 수분차단층에서는 Fabry-Perot 공진에 의한 파장에 따른 투과율 변동 현상이 발생하였지만 AVT는 85.3%로 AlO<sub>x</sub> 무기막만을 증착했을 때보다 향상된 것으로 나타났다. 즉, 유/무기 수분차단층 적용으로 인한 광 투과 손실은 없는 것으로 확인되었다.

### 3.3 FPV 모듈의 장기 신뢰성

그림 8은 KSIEC 61646 표준조건에 준하여 수행한 DH 시험 중 0 hr, 240 hr, 770 hr, 1,000 hr 시간에 관측한 (a) FPV 모듈의 I-V 곡선 변화와 (b) 각 PV 변수들의 0 hr 결과 대비 각 시간에서 측정된 열화율 변화에 관한 그래프이다. DH 시험 전에 측정된 FPV 모듈의 PV 변수들은 다음과 같다: 개방전압( $V_{oc}$ ) = 4.83 V, 단락전류밀도( $J_{sc}$ ) = 6.04 mA/cm<sup>2</sup>, 채움인자(fill factor, FF) = 89.1%, 그리고 광전변환효율(PCE) = 25.42%. 그림 8로부터 DH 시험 시간이 늘어남에 따라  $J_{sc}$ 의 값이 서서히 감소하는 것을 I-V 곡선으로부터 확인할 수 있었으며, 1,000 hr 후  $\Delta J_{sc}/J_{sc}$  (0 hr) (심볼 ●)의 감소는 약 4% 였다.  $V_{oc}$ 의 변화폭은 작지만 오히려 약간 증가하는 경향을 보였다.  $\Delta V_{oc}/V_{oc}$  (0 hr) (심볼 ■)는 600 hr 후, +1%의 상승을 보였으나 DH 시간이 더 늘어나면서 1.0% 이하의 값으로 포화되었다. FF의 경우  $V_{oc}$ 와 유사한 거동을 보였다. 그러나  $\Delta FF/FF$  (0 hr) (심볼 ▲)의 변화폭은  $\Delta V_{oc}/V_{oc}$  (0 hr) 보다도 적게 나타났다. FPV 모듈의 PCE는 25.4% (0 hr)에서 24.7% (1,000 hr)로  $\Delta PCE/PCE$  (0 hr) (심볼 ▼)가 약 3.0% 소폭 감소하였다. 결론적으로 ETFE/dyad를 수분차단층으로 적용한 FPV 모듈은 1,000 hr의 장기 신뢰성을 확보하는 것으로 평가되었다.

그렇지만 1,000 hr의 85°C 고온과 85% RH 고습 조건에서 ETFE/dyad 수분차단층이 외부의 습기가 시간이 지남에 따라 내부로 침투하는 것으로 나타났다. 그림 9는 DH 시험동안 태양전지 셀 주변의 변색을 보이는 사진들이다.



**Fig. 8.** Progress of solar parameters in a flexible PV module during a damp/heat test: (a) I-V curves and (b) relative change of parameters over time.

그림 2의 모듈 구조에 의하면 공기 중의 수분은 수분차단층의 수직방향으로는 침투 방지에 효과적이지만 측면으로부터의 침투가 많이 발생하는 것으로 분석되었다. 즉, 개방된 측면으로부터 침투한 수분에 의하여 FPV 모듈에 심각한 손상이 발생하였다고 평가된다. 즉 이와 같은 수분의 측면 침투를 방지하기 위하여 내습성이 뛰어난 뿐만 아니라 접착력이 우수하고 진공 밀봉(vacuum sealing)이 가능한 buthyl rubber 또는 PIB (polyisobutylene) 폴리머 (표 1)의 측면 적용이 유연 FPV 모듈의 신뢰성 향상에 크게 기여할 것으로 판단된다 [31]. 그럼에도 불구하고 본 연구의 FPV 모듈이 1,000 hr 이후에도 3% 이하의 작은 효율 감소를 보인 것은 GaAs 태양전지 셀 자체의 내습성의 덕분도 있다고 평가된다.

결과적으로 parylene/AlO<sub>x</sub> 층으로 구성된 유/무기 dyad 수분차단층은 태양전지 실장 소재로 적합하며 대면적, 저가화가 가능하여 다양한 장기 신뢰성이 필요한 유연 태양전지 모듈 공정에 사용할 수 있을 것이다.

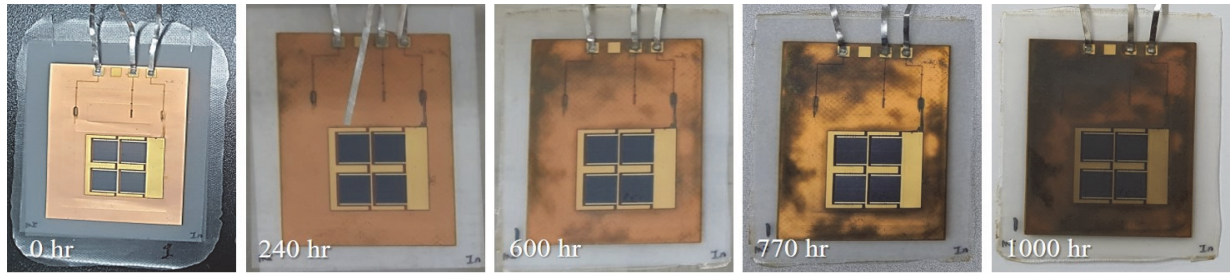


Fig. 9. Development of surface damage of flexible PV module during damp/heat test.

#### 4. 결론

본 연구에서 FPV 모듈 신뢰성 향상을 위한 수분차단층의 효과에 대하여 연구하였다. 두께에 따른  $\text{AlO}_x$  무기막과 유기-무기 다중층 dyad를 이용한 WVTR 분석에서 parylene 유기막과  $\text{AlO}_x$  무기막의 두께는 각각 700 nm와 70 nm에서 최적 공정조건으로 결정되었다. ETFE/dyad에서  $\text{WVTR} = 6.33 \times 10^{-2} \text{ g/m}^2/\text{day}$ 의 수분차단 특성을 얻었으며 380–780 nm 광파장대역에서 AVT는 85.3%로 측정되었다. ETFE/dyad 수분차단층을 적용한 FPV 모듈은 85°C와 상대습도 85% RH에서 1,000시간 동안 DH 시험 후 PCE가 25.4% (0 hr)에서 24.7% (1,000 hr)로 0.7% 감소하였다. 이러한 감소의 주원인으로는  $\Delta J_{\text{sc}}/J_{\text{sc}}$  (0 hr)의 4% 감소에 있었다. 한편,  $V_{\text{oc}}$ 와 FF는 비교적 열화에 무관한 것으로 나타났다. 결론적으로 ETFE/parylene (700 nm)/ $\text{AlO}_x$  (70 nm)로 구성된 다중 수분차단층은 FPV 모듈 구성에 있어 수분차단 효과가 매우 우수한 것으로 평가되었다.

#### ORCID

Jeha Kim

<https://orcid.org/0000-0001-9022-2384>

#### REFERENCES

- [1] M. E. Shayan, G. Najafi, B. Ghobadian, S. Gorjian, M. Mazlan, M. Samami, and A. Shabanzadeh, *Sustainability*, **14**, 3566 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.3390/su14063566>
- [2] T. F. Santos, B. R. Carvalho, E. V. Santos, R. F. P. Pereira, D. F. S. Souza, and J. H. O. Nascimento, *Sustain. Energ. Fuels*, **9**, 2591 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1039/D4SE01537A>
- [3] Y. Jiang and Y. Qi, *Mater. Chem. Front.*, **5**, 4833 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1039/D1QM00279A>
- [4] B. Commault, T. Duigou, V. Maneval, J. Gaume, F. Chabuel, and E. Voroshazi, *Appl. Sci.*, **11**, 11598 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.3390/app112411598>
- [5] H. Samadi, G. Ala, V. L. Brano, P. Romano, and F. Viola, *World Electr. Veh. J.*, **14**, 154 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.3390/wevj14060154>
- [6] F. Di Giacomo, A. Fakharuddin, R. Jose, and T. M. Brown, *Energy Environ. Sci.*, **9**, 3007 (2016).  
doi: <https://doi.org/10.1039/C6EE01137C>
- [7] S. Kim, H. V. Quy, and C. W. Bark, *Mater. Today Energy*, **19**, 100583 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2020.100583>
- [8] X. Li, P. Li, Z. Wu, D. Luo, H. Y. Yu, and Z. H. Lu, *Mater. Rep. Energy*, **1**, 100001 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matre.2020.09.001>
- [9] M. Babin, G. C. Eder, Y. Voronko, and G. Oreski, *J. Appl. Polym. Sci.*, **141**, e5573 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1002/app.55733>
- [10] P. C. With, U. Helmstedt, and L. Prager, *Front. Mater.*, **7**, 200 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.00200>
- [11] O. K. Segbefia, A. G. Imenes, and T. O. Sætre, *Sol. Energy*, **224**, 889 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.055>
- [12] A. Mavlonov, Y. Hishikawa, Y. Kawano, T. Negami, A. Hayakawa, S. Tsujimura, T. Okumura, and T. Minemoto, *Sol. Energy*, **286**, 113174 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.113174>
- [13] K. T. Tanko, Z. Tian, S. Raga, H. Xie, E. A. Katz, and M. Lira-Cantu, *MRS Bull.*, **50**, 512 (2025).  
doi: <https://doi.org/10.1557/s43577-025-00863-5>
- [14] B. J. Kim, D. Han, S. Yoo, and S. G. Im, *Korean J. Chem. Eng.*, **34**, 892 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s11814-016-0303-3>
- [15] J. Wang, D. J. Gardner, N. M. Stark, D. W. Bousfield, M. Tajvidi, and Z. Cai, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **6**, 49 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03523>
- [16] E. Y. Choi, J. H. Kim, B. J. Kim, J. H. Jang, J. Kim, and N. Park, *RSC Adv.*, **9**, 11737 (2019).

- doi: <https://doi.org/10.1039/c9ra01107b>
- [17] L. J. Sutherland, H. C. Weerasinghe, and G. P. Simon, *Adv. Energy Mater.*, **11**, 2101383 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.202101383>
- [18] K. H. Yoon, H. S. Kim, K. S. Han, S. H. Kim, Y. E. K. Lee, N. K. Shrestha, S. Y. Song, and M. M. Sung, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**, 5399 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b15404>
- [19] J. G. Gluschke, F. Richter, and A. P. Micolich, *Rev. Sci. Instrum.*, **90**, 083901 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1063/1.5099293>
- [20] C. Bellmann, N. Beshchasna, J. Uhlemann, and K. J. Wolter, *Proc. 32nd Int. Spring Seminar on Electronics Technology*, (Brno, Czech Republic, 2009), 1.  
doi: <https://doi.org/10.1109/ISSE.2009.5206975>
- [21] Y. Sakakihara, K. Watatani, K. Terao, F. Shimokawa, and H. Takao, *Proc. 2019 IEEE SENSORS*, (Montreal, QC, Canada, 2019), 1.  
doi: <https://doi.org/10.1109/SENSORS43011.2019.8956814>
- [22] <https://www.professionalplastics.com/professionalplastics/> Accessed 11 June (2025).
- [23] <https://www.goodfellow.com/global/en-gb/polymer> Accessed 02 June (2025).
- [24] <https://omnexus.specialchem.com/polymer-property> Accessed 02 June (2025).
- [25] [https://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer\\_datasheet.cfm?MajorID=TPE&MinorID=2](https://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.cfm?MajorID=TPE&MinorID=2) Accessed 30 May (2025).
- [26] <https://polymers.netzsch.com/Materials/Details> Accessed 30 May (2025).
- [27] U. Farva and J. Kim, *Mater. Chem. Phys.*, **267**, 124584 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124584>
- [28] H. W. Lee, S. Kim, J. Kim, and E. Kim, *J. Kor. Phys. Soc.*, **82**, 280 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s40042-022-00672-y>
- [29] J. Kim, *Appl. Sci. Conver. Technol.*, **33**, 45 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.5757/ASCT.2024.33.2.45>
- [30] S. A. Gevorgyan, A. J. Medford, E. Bundgaard, S. B. Sapkota, H. F. Schleiermacher, B. Zimmermann, U. Würfel, A. Chafiq, M. Lira-Cantu, T. Swonke, M. Wagner, C. J. Brabec, O. Hailant, E. Voroshazi, T. Aernouts, R. Steim, J. A. Hauch, A. Elschner, M. Pannone, M. Xiao, and F. C. Krebs, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **95**, 1398 (2011).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.010>
- [31] M. D. Kempe, D. L. Nobles, L. Postak, and J. A. Calderon, *Prog. Photovolt.*, **26**, 93 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1002/pip.2947>