

논문 2025-4-16 <http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2025.12.16>

# 티에노[3,2-*b*]티오펜을 활용한 새로운 홀전달체의 설계 및 합성

백상현\*†

Molecular Design and Synthesis of New Hole Transporting Materials Based on Thieno[3,2-*b*]thiophene Derivatives

Young-Mo Kim\*†

## 요약

페로브스카이트 태양전지(PSCs)는 높은 효율과 낮은 비용이라는 장점에도 불구하고, 장기 안정성을 확보하기 위해 효과적인 수분 패시베이션이 요구된다. 현재 널리 사용되는 Spiro-OMeTAD는 낮은 정공 이동도와 열악한 안정성이라는 단점을 가지고 있는데, 이를 극복하기 위해 더 나은 대안이 필요하다. 따라서 PSC의 장기 안정성을 달성하기 위해서는 더욱 안정적인 정공 수송 물질(HTM)의 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 티에노티오펜(thienothiophene) 중심 분자에 TPA 단위와 hexyl기를 도입하여 새로운 HTM인 PEH-26을 합성했다. 도입된 핵심 그룹은 HTM 표면의 소수성을 증가시켜 수분으로부터 페로브스카이트 층을 효과적으로 패시베이션 할 수 있다. 이러한 결과는 PEH-26이 향상된 장기 안정성을 제공하는 유망한 정공 수송 물질임을 시사한다.

## Abstract

Despite the advantages of high efficiency and low cost, Perovskite solar cells (PSCs) require effective moisture passivation for long-term stability. While widely used, Spiro-OMeTAD suffers from low mobility and poor stability, necessitating better alternatives. Thus, the development of more stable HTMs is essential for achieving long-term stability in PSCs. In this work, we synthesized a new HTM, PEH-26, based on a thienothiophene core functionalized with TPA units and hexyl groups. Incorporated hexyl groups increase the hydrophobicity of the HTM surface, enabling effective passivation of the perovskite layer against moisture. These results suggest that PEH-26 is a promising hole-transporting material with enhanced long-term stability.

한글키워드 : 페로브스카이트 태양전지, 홀전달체, 유기합성, 티에노티오펜 유도체, 열적 안정성

keywords : Perovskite solar cell, Hole transporting materials, Organic Synthesis, Thienothiophene derivatives, Thermal stability

\* 상명대학교 화학에너지 공학

† 교신 저자: 백상현(email: sanghyun.paek@smu.ac.kr)

접수일자: 2025.12.02. 심사완료: 2025.12.12.  
제재 확정: 2025.12.20.

기후 변화와 탄소중립을 위한 에너지 전환

## 1. 서론

전 세계적인 과제로 대두되면서, 고효율·저비용·친환경적인 차세대 태양전지 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. 기존의 실리콘 기반 태양전지는 상용화에 성공하여 발전 단가를 획기적으로 낮췄지만, 결정질 실리콘의 이론적 한계 효율(Shockley - Queisser 한계)에 근접함에 따라 새로운 광전 변환 구조에 대한 수요가 커지고 있다. 이에 따라 박막형 태양전지(thin-film solar cells), 염료감응 태양전지(dye-sensitized solar cells), 유기 태양전지(organic photovoltaics)[2] 등 다양한 접근 방식이 시도 되어 왔으며, 그중에서도 유·무기 하이브리드 페로브스카이트 태양 전지(perovskite solar cells, PSCs)는 비교적 짧은 연구 기간 내에 비약적인 효율 향상을 이루어내며 차세대 태양전지 분야의 중심으로 자리 잡았다. 페로브스카이트 태양전지는 2012년 10%[3] 이하였던 광전 변환 효율이 10년 사이 26%[4]를 넘어서며, 기존 결정질 실리콘 소자와 유사한 수준의 효율에 도달하였다. 특히 광 흡수 물질(perovskite absorber)은 넓은 파장 범위에서 우수한 광 흡수 성능을 보이며[5], 높은 전하 이동도 및 긴 확산 거리[6], 적은 비복사 재결합 손실[7] 등의 특성을 나타낸다. 또한 용액공정 기반의 저온 제조가 가능하여 공정 비용[8] 절감 측면에서도 강점을 가진다. 이러한 장점을 덕분에 페로브스카이트 태양전지는 단독 셀뿐 아니라, 텐덤 태양전지(예: 페로브스카이트 - 실리콘 이중 접합 구조)에도 적용되어 광전자 소자 분야에서 큰 주목을 받고 있다[9]. 다만, 고효율과는 별개로 소자의 장기 구동 안정성, 특히 열·습도·산소 환경에 대한 내성 부족은 여전히 해결이 필요한 중요한 과제로 남아 있다[10].

이를 해결하기 위해 현재 페로브스카이트 소자의 각 층, 특히 계면 안정성에 밀접하게 관련된 전하 수송 층(charge transport layer)의 물질 설계와 구조적 보완이 필수적이라는 인식이 확대

되고 있다[11]. 그중에서도 정공 전달 물질(hole transport materials, HTM)은 광 흡수층에서 생성된 정공을 선택적으로 추출 및 수송하는 전자적 기능뿐만 아니라, 페로브스카이트 상단을 보호하는 방습·산소 차단 물리적 캡핑층으로서도 작동한다. 따라서 HTM은 소자의 초기 효율뿐만 아니라, 장기적인 열적·환경적 안정성에 직결되는 핵심 소재로 평가되며, 기능성·내구성·공정성·비용 등의 다양한 조건을 동시에 만족하는 HTM의 개발이 페로브스카이트 상용화를 위한 중요한 요소로 여겨지고 있다.

현재 널리 사용되고 있는 유기 HTM은 Spiro-OMeTAD[12]로 높은 초기 효율을 가지지만, 가격이 비싸고 낮은 홀 이동도를 갖는 단점을 가지고 있다. 낮은 홀 이동도를 보완하기 위해 Li-TFSI나, tBP와 같은 도편트를 첨가하는데 이러한 도편트들 또한 태양전지 열화의 원인이 되며[13] 이를 대체할 새로운 HTM 개발이 진행되고 있다.

2020년 Grimsdale-Mhaisalkar 연구진이 개발한 H101은 3,4-에틸렌다이옥시티오펜(EDOT)을 코어로 하는 HTM으로, 도핑이 없는 상태에서 13.8%의 광전변환효율을 기록하였지만, 73°C의 낮은 유리 전이 온도 ( $T_g$ )를 가져 열적 안정성이 좋지 못했다[14]. 안정성 문제를 해결하고자, 분자 치환기 도입을 통한 결정화 제어 전략이 주목받았다. 2024년 Ahmed 연구진은 thieno-[3,2-*b*]thiophene 코어에 알킬 치환기를 도입하여 박막 내 결정 성장을 억제하고 안정성을 향상시킬 수 있음을 보고하였다[15]. 평면성이 높은 thieno[3,2-*b*]thiophene 기반 분자에 알킬 사슬을 붙이면 분자 간 결합력인  $\pi$ - $\pi$  스태킹이 줄어들게 될 뿐만 아니라 홀 전달체의 용해도도 향상되어 소자 제작에 용이하다. 게다가 알킬기의 도입은 균일한 비정질 박막이 형성되어 장기 구동 시 안정성을 향상시킬 수 있다.

아래의 스킴에서 보듯이, 본 연구에서는 분자 간의 결합을 감소시키고 안정성 문제를 극복하기 위해 thieno[3,2-b]thiophene에 3, 6번에 hexyl기 를 치환하여 중간체를 합성하였고 양쪽에는 전자 주개 그룹인 dimethoxy기 치환된 트라이페닐아민을 도입하여 새로운 HTM으로 PEH-26을 합성하였다. PEH-26은 페로브스카이트 광 흡수층과의 밴드 정렬을 확보함과 동시에 혼실 그룹으로 인한 추가적인 반데르발스 상호작용을 유도함으로써 안정성을 향상시키면서, 결정화와 수분 침투를 억제하여 초기 효율을 유지할 수 있는 HTM을 개발하였다.

## 2. 실험 및 분석장비

### 2.1 물질 합성 및 NMR 분석

콘텐서가 장착된 250 mL 2구 등근 바다 플라스 크에 합성된 Compound 1 (1 g, 2.1 mmol), Compound 2 (2.31 g, 5.4 mmol), 촉매량의  $\text{Pd}(\text{PPh}_3)_4$  (0.17 g, 0.15 mmol) 그리고 탄산칼륨 (1.48 g, 10.7 mmol)을 넣고 질소 가스 하의 안정한 상태를 준비한다. 이후 DMF와 중류수를 50 mL 2:1 v/v %로 넣고 반응 혼합물을 하루 동안 가열 환류한다. 반응 혼합물을 실온으로 냉각하고 용매를 증발시킨 후, EA 유기용매로 유기물을 추출하여 솔벤트를 제거하고, 추출된 생성물을 칼럼 크로마토그래피 (실리카겔, 전개액 : 에틸아세테이트 / 헥산 = 1 : 7)로 정제하여 0.82 g 의 최종 생성물을 얻었다.  $^1\text{H}$  NMR (300 MHz,  $\text{CD}_2\text{Cl}_2$ )  $\delta$  7.27 (d, 4H, 3  $J$  = 4.5 Hz, Ar), 7.09 (d, 8H, 3  $J$  = 4.5 Hz, Ar), 6.91 (d, 4H, 3  $J$  = 4.35 Hz, Ar), 6.86 (d, 8H, 3  $J$  = 4.5 Hz, Ar), 3.79 (s, 12H, OMe), 2.76 (t, 4H, 3  $J$  = 7.8 Hz OCH<sub>2</sub>), 1.73(m, 4H, CH<sub>2</sub>), 1.37~1.24(m, 12H, CH<sub>2</sub>), 0.86 (t, 6H, CH<sub>3</sub>) MS: m/z 915.3 [M<sup>+</sup>].

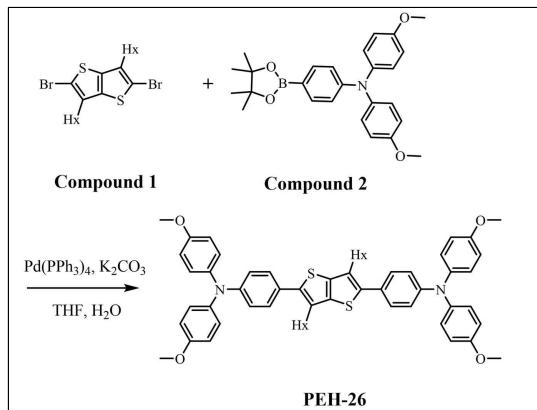


그림 1. PEH-26 HTM 합성 및 구조  
Fig. 1. PEH-26 HTM structure and synthesis

## 2.2 광학 분석 장비

태양전지 성능 측정은 Ivium 소프트웨어가 포함된 Peccell의 PEC-L01을 사용하여 50 mV  $\text{s}^{-1}$  의 스캔 속도로 표준 모사 AM 1.5G 조사 조건 하에서 분석하였다. 외부양자효율 (External Quantum Efficiency, EQE)은 HS Technologies의 PEIPCE 상용 시스템을 사용하여 측정하였다. 모든 셀은 0.09  $\text{cm}^2$ 의 활성 면적으로 측정하였다. 자외선-가시광선 스펙트럼 (UV-VIS)은 CARY 5000으로 200~800 nm의 파장 범위에서 분석하였다. 광발광 (Photoluminescence, PL) 스펙트럼은 형광 분광계 FL 6500을 통해 500~800 nm의 파장 범위에서 측정하였다. 열중량 분석 (Thermogravimetric Analysis, TGA)은 TGA Q50을 활용하였다. 단면 주사 전자 현미경(SEM) 이미지는 JEOL의 JSM 5600LV에서 측정하였다.

## 3. HTM 광학 분석 및 광전기적 특성 분석

### 3.1 HTM의 광학 및 열 특성

합성된 PEH-26의 광학적 특성을 살펴보기 위해서 광 흡수 (UV-vis absorption spectrum), 방

출 (Photoluminescence spectrum) 및 CV (Cyclic voltammetry)를 측정하여 그림 2에 나타내었다. PEH-26의 흡수 및 방출 스펙트럼을 그림 2. a)에 나타내었다. 흡수 스펙트럼은 실선으로, 방출 스펙트럼은 점선으로 나타내었다. 단파장 250 ~ 300 nm 부근에서 흡수하는 것은 분자의  $\pi-\pi^*$  전이에서 기인한 것이고, 흡수 스펙트럼의 가장 높은 값을 나타내는 366 nm에서는 n- $\pi^*$  전이에 의한 결과이며 해당 지점에서 몰흡광 계수는 80,500 ( $M^{-1}cm^{-1}$ ) 값을 갖는다. Hexyl 기의 도입으로 기존의 thienothiophene 보다 40nm 정도 청색 변이한 값을 보인다. 이는 분자간의 결합이 hexyl기에 의해 감소됨을 시사하며 나아가 분자의 용해도가 증가할 것으로 유추할 수 있다. PEH-26의 방출되는 빛은 약 475 nm에서 관찰되었다. 흡수와 방출 스펙트럼의 교차점에서 PEH-26의 밴드갭 2.884 eV의 값을 계산하였다.

분자의 에너지 레벨을 측정하기 위하여 CV를 측정하였다. Ag/Ag<sup>+</sup> (3.5 M) 기준전극, 글래시 카본 작업 전극, Pt 와이어를 상대전극으로 구성된 삼전극계에서 진행되었다. 전해액으로는 0.1M Tetrabutylammonium Hexafluorophosph-ate를 디클로로메탄에 녹여서 사용하였다. 내부 표준으로 폐로센, ferrocene을 사용하여 Normal hydrogen electrode (NHE)로 보정한 후 전공 기준으로 계산하였다. PEH-26의 HOMO (The High Occupied Molecular Orbital)는 CV의

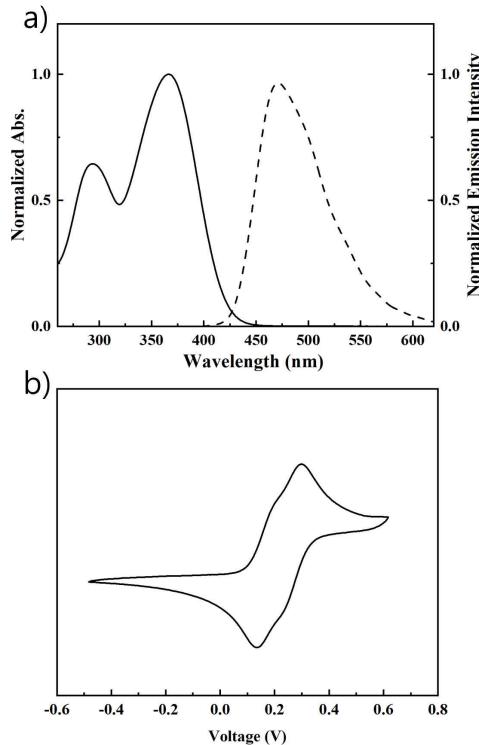


그림 2. a) PEH-26의 흡수, 방출 스펙트럼,  
b) PEH-26의 CV 측정

Fig. 2. a) Absorption and emission spectra of PEH-26, b) CV measurements of PEH-26

redox 전압으로 계산되었으며 -5.298 eV로 나타났다. 밴드갭을 이용하여 PEH-26의 HOMO를 넣어 LUMO (The Lowest Occupied Molecular Orbital)의 값을 계산하였고 그 값은 -2.414 eV이다.

<표 1. HTM의 광학적 특성 분석>  
<Table 1. Optical Properties of PEH-26>

홀 전달체	$\lambda_{\text{abs}}$ [nm] ( $[M^{-1}cm^{-1}]$ )	$\lambda_{\text{em}}$ [nm]	$E_{0-0}^{\text{a)}$ [eV]	$E_{\text{ox}}^{\text{b)}$ [V]	$E_{\text{HOMO}}^{\text{c)}$ [eV]	$E_{\text{LUMO}}^{\text{d)}$ [eV]
PEH-26	366 (80551)	474.5	2.884	0.2175	-5.298	-2.414

a)  $E_{0-0}$ 은 THF 용매에서 흡수, 방출 스펙트럼의 교차점을 활용; b) CV측정은 스캔 비율이 50 mV s<sup>-1</sup>(vs Fc/Fc<sup>+</sup>)을 사용하여 계산; c)  $E_{\text{HOMO}}$ 는 CV의 산화 준위를 계산하여 폐로센을 기준으로 변경하여 NHE 전위 변환 ( $Fc/Fc^{++}$  0.64 versus NHE + 4.44 versus vacuum); d)  $E_{\text{LUMO}}$ 는 밴드갭과  $E_{\text{HOMO}}$ 의 차이를 계산.

위의 과정을 활용하여 그림 3.a) 에너지 다이어그램을 도식하였다. 이는 기존의 상용화 되어 있는 Spiro-OMeTAD 보다 낮은 HOMO 레벨을 가지며 페로브스카이트의 가전자대 (Valence band, VB)와 근접하게 되어 홀의 이동이 보다 향상될 수 있으리라 기대된다.

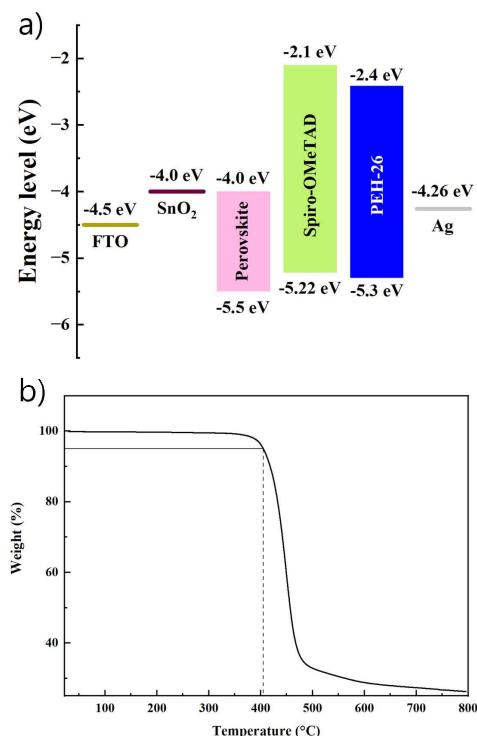


그림 3. a) PEH-26을 활용한 소자 에너지 다이어그램. b) PEH-26의 열중량분석  
Fig. 3. a) Device energy diagram using PEH-26;  
b) Thermogravimetric analysis of PEH-26

페로브스카이트 태양전지를 구성하는 재료는 제조 과정에서 고온의 어닐링 공정을 거치기 때문에 높은 열적 안정성이 요구된다. 구체적인 열적 안정성을 측정하기 위해 TGA 분석을 수행하였다. TGA 분석은 초기 시료의 질량에서 질량 퍼센트가 95 %가 되는 지점 (Thermal Decomposition Temperature,  $T_d$ )을 기준으로 분석하였다. 분석 결과 PEH-26은 약 400 °C가 넘는 온도

에서 열 분해가 시작되었다. 이는 해당 HTM이 소자 제작 공정에서 열분해가 발생하지 않고, 태양광으로부터 전기를 생산하는 과정에서도 안정함을 시사한다.

### 3.2 소자 표면 및 계면 분석

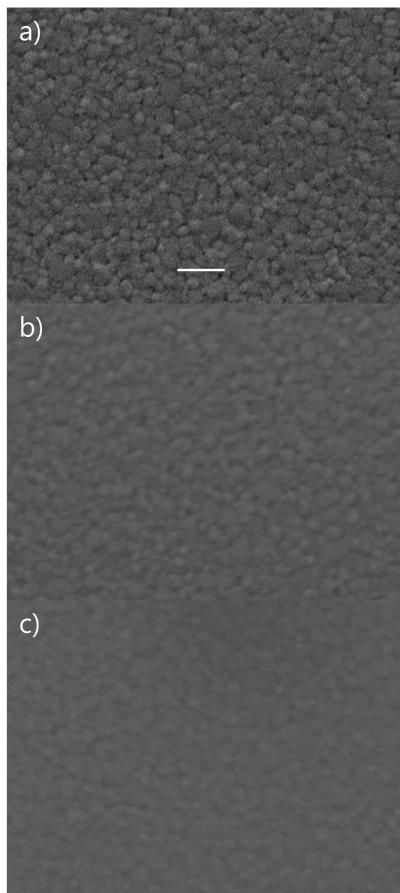
페로브스카이트 광 활성층 위에 HTM을 증착했을 때 어떤 형태학적 차이가 있는지 비교하기 위해 상면부 전자 주사 현미경 (Scanning Electron Microscopy, SEM) 분석을 진행하였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이, 상면부 SEM 분석 결과 PEH-26, Spiro-OMeTAD 모두 Perovskite 박막과 비교했을 때 perovskite 결정립의 경계가 명확하지 않게 나오는 걸로 보아 두 HTM 모두 박막이 균일하고 얇게 증착되었다.

HTM을 증착한 박막의 소수성을 평가하기 위해 접촉각 측정을 수행하였으며 그림 5에 나타내었다. HTM 없는 페로브스카이트 필름은 최대 56.85°의 각도가 측정되었고, Spiro-OMeTAD가 증착된 필름은 최대 86.08°에서 측정되었다. 합성된 PEH-26에서 최대 93.05°가 측정되었다.

PEH-26을 HTM으로 활용하였을 때 가장 우수한 소수성을 보였다. 이를 통해 공기 중 산소 및 수분으로부터 소자의 안정성을 확보가 가능하며 이는 공정에서 PEH-26의 안정성 향상을 통한 사용화와 밀접한 관련이 있다.

### 3.3 HTM의 광전기적 특성 분석

HTM의 정공 추출 및 수송 능력을 측정하기 위해 PL Quenching 실험을 진행하였다. 측정을 위한 소자는 FTO/SnO<sub>2</sub>/Perovskite/HTM의 구조로 구성된 소자를 활용하였다. 이는 광흡수층이 빛을 흡수했을 때 생성된 캐리어가 내부에서 재결합하여 발광하는 과정에 기인한다. 실험 결과, HTM이 없는 경우에 방출되는 피크는 매우 크게 관찰된 반면, PEH-26을 도입한 소자의 경우 PL

그림 4. SEM 이미지. (scale bar = 5  $\mu\text{m}$ )

a) Perovskite, b) Spiro-OMeTAD, c) PEH-26  
Fig. 4. SEM images. (Scale bar = 5  $\mu\text{m}$ )  
a) Perovskite, b) Spiro-OMeTAD, c) PEH-26

강도가 현저히 감소함을 확인할 수 있었다. 이를 바탕으로 소광 효율을 산출한 결과, Spiro-OMeTAD는 83.05 %, PEH-26은 81.55 %의 효율을 기록하였다. PEH-26을 적용한 소자에서 홀의 이동이 재결합 과정보다 월등히 빠르게 발생함을 시사한다. 결과적으로 기존의 Spiro와 유사한 PL 강도가 측정됨에 따라 PEH-26이 이미 상용화된 고효율 소재와 유사한 홀 추출 및 수송 능력을 확보했음을 입증한다.

PEH-26의 소자 구동 성능을 평가하기 위해 FTO/SnO<sub>2</sub>/(FAPbI<sub>3</sub>)<sub>0.95</sub>(MAPbBr<sub>3</sub>)<sub>0.05</sub>/PEH-26/A

g 구조의 태양전지를 제작하였으며 광전 변환 효율 결과는 그림 6 b)에 나타내었다. 비록 현재 상용화된 고효율 소자 대비 다소 낮은 수치이나, HTM과 페로브스카이트 계면 간의 밴드 정렬이 최적화되지 않은 점에서 기인한 것으로 분석된다. 그러나 밴드갭 조절이 용이하다는 페로브스카이트 소재 고유의 특성을 고려하면, 향후 조성 제어를 통해 소자의 효율이 향상될 잠재력을 가졌음을 알 수 있다. Spiro-OMeTAD는 높은 효율을 보이지만, 낮은 정공 이동도로 인한 도판트 사용이 필수적이며 이는 소자의 장기 안정성을 저해한다. 또한 복잡한 합성 공정으로 인한 높은 가격이 상용화의 걸림돌로 지적되고 있다. 반면 PEH-26은 보다 단순한 합성 경로로 인한 저단가 생산이 가능하다는 장점을 가진다. 따라서 향후 계면 엔지니어링을 통해 효율을 보완한다면, PEH-26은 PSC의 상용화 및 대면적화 단계에서 경제적이고 안정적인 홀 수송 소재로 자리매김할 것으로 기대된다.

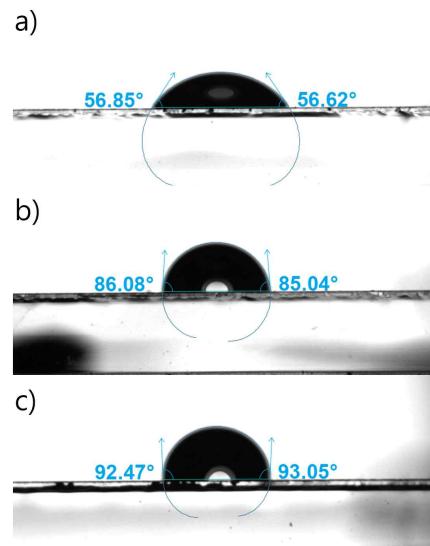


그림 5. 접촉각 (Contact angle, CA) 측정.  
a) Perovskite, b) Spiro-OMeTAD, c) PEH-26  
Fig. 5. Contact angle (CA) measurements.  
a) Perovskite, b) Spiro-OMeTAD, c) PEH-26

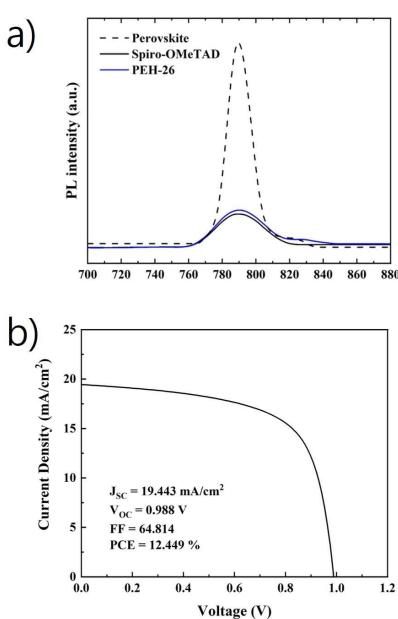


그림 6. a) PEH-26의 PL quenching 측정  
b) PEH-26의 광전변환 효율  
Fig. 6. a) PL quenching measurements,  
b) Photovoltaic Performance of PEH-26

#### 4. 결 론

본 연구에서는 간단하면서도 저비용의 합성 공정을 통해 높은 수율로 합성이 가능한 HTM을 새롭게 설계 및 합성하였다. 페로브스카이트 태양 전지가 가진 다양한 장점에도 수분 및 장기 안정성 확보는 여전히 해결해야 할 핵심 과제이다. 본 연구에서 제시한 PEH-26은 thieno[3,2-*b*]-thiophene 중심 분자에 hexyl기를 도입함으로써 밴드갭, HOMO 에너지 레벨을 조절하였다. PEH-26은 높은 열 안정성과 홀 추출 및 전달 특성을 보이며, 높은 접촉각을 가져 외부 환경으로부터 소자를 보호할 수 있다. 따라서 분자 설계 및 합성을 통한 새로운 홀 전달 물질의 제시한 이 연구가 높은 안정성을 가진 유기 홀 전달 물질의 개발을 위한 발판을 마련하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] B. P. Singh, S. K. Goyal, P. Kumar, "Solar PV cell materials and technologies: Analyzing the recent developments", *Materials Today: Proceedings*, 43, pp.2843 - 2849, 2021, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.003>
- [2] J. Y. Kim, J.-W. Lee, H. S. Jung, H. Shin, N.-G. Park, "High-Efficiency Perovskite Solar Cells", *Chemical Reviews*, 120(15), pp.7867 - 7918, 2020, DOI: [10.1021/acs.chemrev.0c00107](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c00107)
- [3] H.-S. Kim, C.-R. Lee, J.-H. Im, K.-B. Lee, T. Moehl, A. Marchioro, S.-J. Moon, R. Humphry-Baker, J.-H. Yum, J. E. Moser, M. Grätzel, N.-G. Park, "Lead Iodide Perovskite Sensitized All-Solid-State Submicron Thin Film Mesoscopic Solar Cell with Efficiency Exceeding 9%", *Scientific Reports*, 2(1), p.591, 2012, DOI: [10.1038/srep00591](https://doi.org/10.1038/srep00591)
- [4] D. Gao, B. Li, X. Sun, Q. Liu, C. Zhang, L. Qian, Z. Yu, X. Li, X. Wu, B. Liu, N. Wang, F. Vanin, X. Xia, J. Gong, N. Li, X. C. Zeng, Z. a. Li, Z. Zhu, "High-efficiency perovskite solar cells enabled by suppressing intermolecular aggregation in hole-selective contacts", *Nature Photonics*, 19(10), pp.1070 - 1077, 2025, DOI: [10.1038/s41566-025-01725-x](https://doi.org/10.1038/s41566-025-01725-x)
- [5] B. Du, W. Yang, Q. Jiang, H. Shan, D. Luo, B. Li, W. Tang, F. Lin, B. Shen, Q. Gong, X. Zhu, R. Zhu, Z. Fang, "Plasmonic-Functionalized Broadband Perovskite Photodetector", *Advanced Optical Materials*, 6(8), p.1701271, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1002/adom.201701271>
- [6] T. M. Brenner, D. A. Egger, L. Kronik, G. Hodes, D. Cahen, "Hybrid organic-inorganic perovskites: low-cost semiconductors with intriguing charge-transport properties", *Nature Reviews Materials*, 1(1), p.15007, 2016,

- DOI: 10.1038/natrevmats.2015.7
- [7] M. B. Johnston,L. M. Herz, "Hybrid Perovskites for Photovoltaics: Charge–Carrier Recombination, Diffusion, and Radiative Efficiencies", *Accounts of Chemical Research*, 49(1), pp.146 - 154, 2016, DOI: 10.1021/acs.accounts.5b00411
- [8] Z. Song, C. L. McElvany, A. B. Phillips, I. Celik, P. W. Krantz, S. C. Watthage, G. K. Liyanage, D. Apul,M. J. Heben, "A technoeconomic analysis of perovskite solar module manufacturing with low-cost materials and techniques", *Energy & Environmental Science*, 10(6), pp.1297 - 1305, 2017, DOI: 10.1039/C7EE00757D
- [9] J. Lim, N.-G. Park, S. Il Seok,M. Saliba, "All-perovskite tandem solar cells: from fundamentals to technological progress", *Energy & Environmental Science*, 17(13), pp.4390 - 4425, 2024, DOI: 10.1039/D3EE03638C
- [10] G. Wu, R. Liang, M. Ge, G. Sun, Y. Zhang,G. Xing, "Surface Passivation Using 2D Perovskites toward Efficient and Stable Perovskite Solar Cells", *Advanced Materials*, 34(8), p.2105635, 2022, DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.202105635>
- [11] J. Chen,N.-G. Park, "Inorganic Hole Transporting Materials for Stable and High Efficiency Perovskite Solar Cells", *The Journal of Physical Chemistry C*, 122(25), pp.14039 - 14063, 2018, DOI: 10.1021/acs.jpcc.8b01177
- [12] Z. Hawash, L. K. Ono,Y. Qi, "Recent Advances in Spiro-MeOTAD Hole Transport Material and Its Applications in Organic - Inorganic Halide Perovskite Solar Cells", *Advanced Materials Interfaces*, 5(1), p.1700623, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1002/admi.201700623>
- [13] Y. S. Shin, J. W. Song, D. G. Lee, J. Lee, J. Seo, J. Roe, G. Y. Shin, D. Kim, J. Yeop, D. Lee, M. Kim, Y. Jo, H. Jang, J. G. Son, W. Lee, J. Son, S. Park, S. Cho, T. J. Shin, G.-H. Kim, J. Y. Kim, T. K. Lee, M. Grätzel,D. S. Kim, "De-doping engineering for efficient and heat-stable perovskite solar cells", *Joule*, 9(1), p.101779, 2025, DOI: 10.1016/j.joule.2024.10.011
- [14] M. Steponaitis, M.-G. La-Placa, İ. C. Kaya, G. Bubniene, V. Jankauskas, M. Daskeviciene, M. Sessolo, T. Malinauskas, H. J. Bolink,V. Getautis, "Enamine-based hole transporting materials for vacuum-deposited perovskite solar cells", *Sustainable Energy & Fuels*, 4(10), pp.5017 - 5023, 2020, DOI: 10.1039/D0SE00728E
- [15] H. Liu, Y. Gao, Y. Xin, H. Zhang, Y. Zou, X. Dong, Y. Lu, Q. Fu,Y. Liu, "Molecular packing regulation of dopant-free hole transport polymers for efficient perovskite solar cells", *Giant*, 19, p.100302, 2024, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.giant.2024.100302>

## 저자소개



백상현(Sanghyun Paek)

2007.2 고려대학교 화학과 졸업  
 2009.2 고려대학교 소재화학 석사  
 2013.2 고려대학교 태양전지소재 박사  
 2014.9-2020.2 EPFL 박사후 연구원  
 2020.3-현재 : 상명대학교 교수  
 <주관심분야> 에너지, 폐로브스카이트 태양전지, 유기합성 재료