

## 0D, 2D, 3D 차원별 페로브스카이트 연구 동향

조영채, 윤동환, 정윤희, 신광용, 신혜선, 김기환 

경상국립대학교 나노신소재융합공학과

**초록:** 페로브스카이트는  $ABX_3$  화학식을 가지는 팔면체 구조로, 주로 유-무기 혼성 구조물이며 차원별로 크게 0D 나노크리스탈, quasi-2D, 3D 벌크 세 가지 종류로 나눌 수 있다. 페로브스카이트는 높은 광전 효율, 높은 발광 효율, 높은 색순도, 긴 전하 이동 거리 등의 장점으로 인해 활발한 연구가 진행되고 있으며 그 결과로 발광 소자, 태양전지, 센서 등 차세대 광전자 소재로 주목받고 있다. 본 논문에서는 차원별 페로브스카이트와 각각의 합성 방법 및 연구 동향을 설명하면서 광전자 소재로 응용 가능한 페로브스카이트에 대한 통찰력을 제공하고 이를 통해 차세대 광전자 소재 연구의 발전이 기대된다.

**키워드:** 페로브스카이트, 나노크리스탈, Quasi-2D, 벌크

### Research Trends by Dimension in 0D, 2D, and 3D Perovskites

Youngchae Cho, Donghwan Yun, Yunhye Jeong, Gwangyong Shin, Hyesun Shin, and Gi-Hwan Kim

Department of Materials Engineering and Convergence Technology, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

(Received October 17, 2024; Revised November 5, 2024; Accepted November 8, 2024)

**Abstract:** Perovskite, which follows the chemical formula  $ABX_3$  and exhibits an octahedral structure, is primarily a hybrid of organic and inorganic materials. It can be broadly categorized into three types based on dimensionality: 0D nanocrystals, quasi-2D, and 3D bulk structures. As a result, it is gaining attention as a next-generation optoelectronic material for applications in light-emitting devices, solar cells, and sensors. This paper provides insights into dimension of perovskites, their respective synthesis methods, and current research trends, thereby offering prospects for advancements in the study of next-generation optoelectronic materials.

**Keywords:** Perovskite, Nanocrystal, Quasi-2D, Bulk

### 1. 서문

■ 최근 디스플레이 기술의 발전, 특히 가상 현실(VR)과 증강 현실(AR)과 같은 분야에서 고해상도 마이크로 디스플레이의 수요가 증가하고 있다. 이러한 수요를 충족시키기 위해서는 픽셀 해상도를 높이고 더 선명한 이미지를

를 구현할 수 있는 새로운 소재가 필요하다. 이런 배경에서 차세대 디스플레이 소재로 주목받고 있는 것이 페로브스카이트이다 [1].

■ 페로브스카이트는 높은 양자 효율, 긴 전하 이동 거리, 조정 가능한 밴드갭과 같은 독특한 광전자적 특성으로 인해 차세대 발광 소자, 태양전지 등의 응용에 유망한 소재로 주목받고 있다 [2]. 그러나 청색광의 양자 효율은 여전히 적색과 녹색에 비해 낮은 수준에 머물러 있어, 이를 개선하는 것이 디스플레이와 태양전지의 효율을 극대화하는 데 중요한 과제로 남아 있다 [3].

✉ Gi-Hwan Kim; [ghkim@gnu.ac.kr](mailto:ghkim@gnu.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.

- 페로브스카이트는  $ABX_3$  화학식의 팔면체 구조로 구성되어 있으며 A 자리에  $MA^+$ ,  $FA^+$ ,  $Cs^+$ 와 같은 1가 양이온이 위치하고, B 자리에는  $Pb^{2+}$  금속 2가 양이온이 사용되며, X 자리에는  $Cl^-$ ,  $Br^-$ ,  $I^-$  등 할라이드 음이온으로 구성된다 [4]. 할로젠 원소를 변경하여 조성 비율을 조절하기 쉬우며 그에 따라 밴드갭을 바꿀 수 있어 광학적 특성이 달라지게 되므로 이를 금속 할라이드 페로브스카이트라고 부르기도 한다 [5].
- 페로브스카이트는 리간드 유무, 구성요소에 따라 결정이 배열되어 있는 형태가 달라지게 되어 차원별로 크게 세 가지로 구분할 수 있는데, 그 종류는 0D 나노크리스탈 페로브스카이트, quasi-2D 페로브스카이트, 3D 벌크 페로브스카이트이다 [6].
- 페로브스카이트의 구조의 안정성을 평가하는 지표로 공차 계수가 있는데 이는 결정 배열에 영향을 미치는 요소이다. 공차 계수는 이상적인 페로브스카이트 결정 구조에서 벗어나는 정도를 수치화한 값이며 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$t = (r_A + r_B) / \sqrt{2}(r_B + r_X) \quad (1)$$

$r_A$ ,  $r_B$ ,  $r_X$ 는 A, B, X 자리에 위치하는 원자의 이온 반지름을 의미하고 각각의 값을 식에 대입하여 계산한다. 일반적으로 0.8~1.0의 값일 때 페로브스카이트 구조가 안정적으로 형성되며, 1에 가까울수록 안정성이 증가하는 구조이다. 공차 계수는 페로브스카이트 결정 구조에 영향을 주므로 소재의 밴드갭이나 전하 이동도가 변화될 수 있어 구조적 안정성뿐만 아니라 광학적, 전기적 특성에도 영향을 미친다 [7-9].

- 본 논문에서는 차원별 페로브스카이트의 구조적 특성과 합성 방법, 그리고 각각의 응용 가능성에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 차원별 페로브스카이트

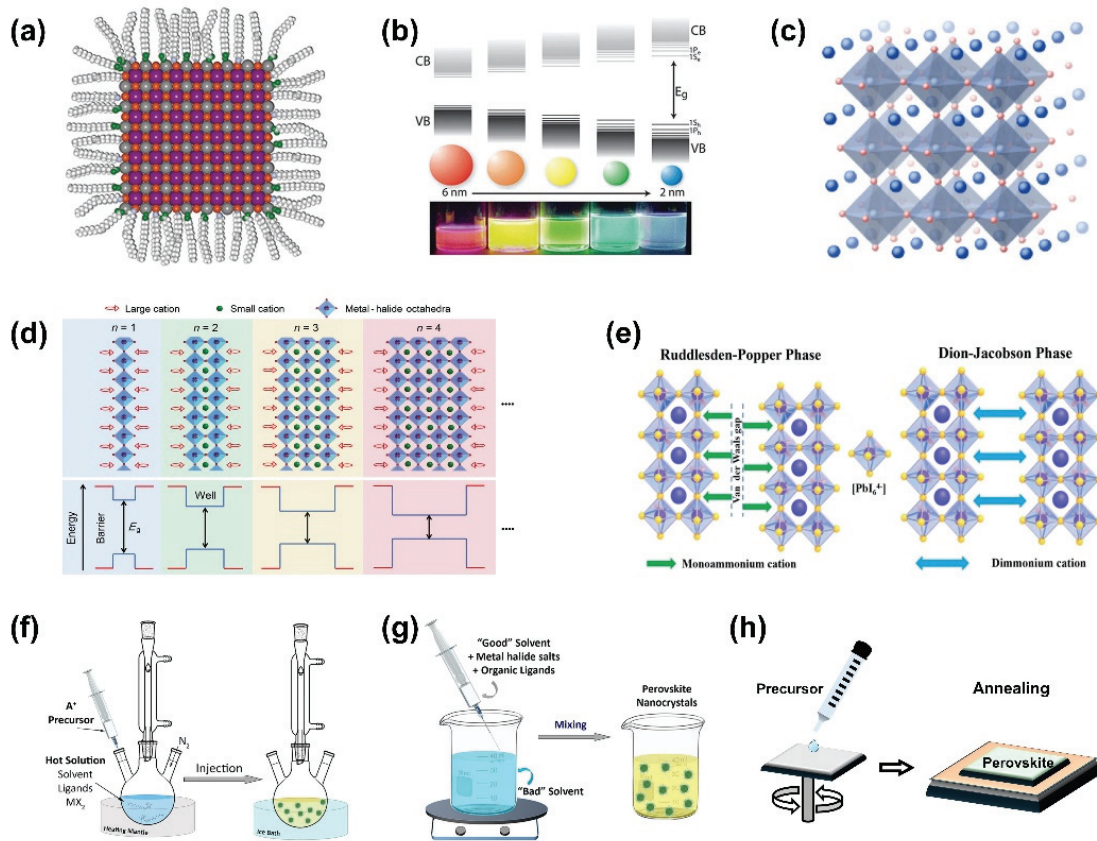
### 2.1 0D 나노크리스탈 페로브스카이트

- 0D 나노크리스탈 페로브스카이트는 나노미터 크기의 입자로 구성되며, 팔면체 결정 구조를 중심으로 긴 알킬 리간드가 결합된 형태를 가지고 있다 [그림 1(a)]. 이 구조는 리간드를 통해 표면 패시베이션이 가능하며, 그로 인해 비방사 재결합을 감소시켜 발광 효율을 증가시킬 수 있고 다양한 리간드를 사용하여 안정성을 높일 수 있다 [10].

- 나노크리스탈의 크기가 전자와 정공의 거리인 보어 반지름보다 작아지면 양자 구속 효과가 발생하며, 이로 인해 에너지가 불연속적으로 변하고 발광 스펙트럼이 좁아지게 된다. 이러한 특성 덕분에 0D 나노크리스탈 페로브스카이트는 발광 다이오드에서 고순도의 색 재현력을 제공하여, 보다 선명한 디스플레이 구현에 유리하다. 특히, 발광 스펙트럼의 좁은 반치폭은 발광 효율을 높이며, 고해상도 디스플레이에 적용할 수 있는 잠재력을 가진다 [11,12].
- 차원별 페로브스카이트의 반치폭을 비교해 보면 상대적으로 0D 나노크리스탈이 가장 작은 반치폭을 가지는데 그 이유는 다음과 같다. 앞서 언급한 양자 구속 효과가 발생하면 에너지가 불연속적이게 되면서 에너지 준위가 더 명확하게 분리되고 이때 들뜬 에너지 준위에서 바닥 상태의 에너지 준위로 방출되는 에너지 개수가 감소하는데 이것이 발광 스펙트럼이 좁아지게 되는 이유이다. 또 다른 이유는 나노크리스탈의 입자 크기 분포가 균일해서 상대적으로 비슷한 에너지 준위를 가지게 되므로 발광 스펙트럼이 좁아지게 된다 [13-15].

### 2.2 Quasi-2D 페로브스카이트

- Quasi-2D 페로브스카이트는  $ABX_3$  구조에서 A 자리에 큰 유기 양이온이 배치되어 무기층과 유기층이 교대로 배열되는 층상 구조를 형성한다. 이 구조는 3D 구조에 비해 구조적 안정성이 높고, 외부 환경으로부터 보호를 받기 때문에 물질의 수명이 길어진다. 특히 quasi-2D 페로브스카이트는 밴드갭이 큰 물질 사이에 밴드갭이 작은 물질이 위치한 양자 우물 구조를 형성하여, 전자와 정공의 재결합을 촉진하고 비방사성 재결합을 줄여 발광 효율을 크게 향상시킨다 [그림 1(d)]. 이러한 특성으로 인해 quasi-2D 페로브스카이트는 고효율의 발광 소재로 각광받고 있으며, 청색 발광 다이오드나 태양전지 같은 다양한 광전자 소자에 응용될 수 있다 [16-18].
- Quasi-2D의 화학식은  $A_2A'_{n-1}B_nX_{3n+1}$  (A: 큰 유기 양이온, A': 작은 유기 양이온, B: 금속 양이온, X: 할라이드 음이온)으로 나타낼 수 있으며, A의 종류에 따라 Ruddlesden-Popper (RP) 타입과 Dion-Jacobson (DJ) 타입으로 분류할 수 있다. 큰 유기 양이온의 말단기 한쪽에만 아민기가 존재하면 RP 타입이고 양쪽에 아민기가 존재하면 DJ 타입이 된다 [그림 1(e)]. 이러한 차이점으로 인해 RP 타입은 무기층 사이에 두 개의 유기층이 생성되고, DJ 타입은 무기층 사이에 하나의 유기



**Fig. 1.** (a) Schematic of nanocrystal perovskite, (b) quantum confinement effect of quantum dot, (c) schematic of 3D bulk perovskite, (d) schematic of quasi-2D perovskite and quantum well structure, and (e) two types of quasi-2D perovskite. Schematic of perovskite synthesis (f) hot-injection method, (g) LARP method, and (h) spin-coating method.

층만 생성되므로 구조적 차이가 발생한다 [19,20].

- RP 타입은 두 개의 유기층으로 인해 무기층 사이의 거리가 상대적으로 멀기 때문에 전자와 정공이 무기층 내에서 결합이 더 잘되고 반데르발스 상호작용으로 결합되어 있는 두 개의 유기층으로 인해 구조적으로 유연한 반면에 DJ 타입은 무기층과 유기층 사이의 강한 이온 결합으로 인해 구조적으로 안정하지만 전자, 정공의 이동을 방해할 수 있는 단점이 있으므로 RP 타입이 발광 소재로서 더 적합하다 [19,20].

### 2.3 3D 벌크 페로브스카이트

- 3D 벌크 페로브스카이트는  $ABX_3$  구조가 연속적으로 배열된 형태로, 전자와 정공의 이동 경로가 길어 전하 이동도가 매우 높다. 이로 인해 전자와 정공이 소자의 전극에 도달하기 전 재결합될 확률이 줄어들어, 태양전지에서 전하 수집 효율을 높이는 데 기여한다. 또한, 발

광 다이오드에서는 전자와 정공이 이동하는 거리가 길어져 발광 효율이 증가하며, 고휘도의 발광 소자를 구현할 수 있게 된다. 3D 벌크 페로브스카이트는 저온 용액 공정이 가능하다는 장점도 있어 제조가 비교적 간단하며, 상용화에 유리한 기술로 평가받고 있다 [21,22].

- 하지만 0D 나노크리스탈, quasi-2D 페로브스카이트와 달리 유기 리간드가 존재하지 않아서 산소 및 수분과 같은 외부 환경에 대해 패시베이션을 하지 못하므로 안정성이 감소하는 단점이 있다 [23].

### 3. 페로브스카이트 합성 방법

- 0D 나노크리스탈 페로브스카이트 합성 방법은 크게 두 가지로 나누어진다. 하나는 hot-injection method이고 다른 하나는 ligand-assisted reprecipitation (LARP)이다. Hot-injection 방법은 고온, 고압, 질소기류

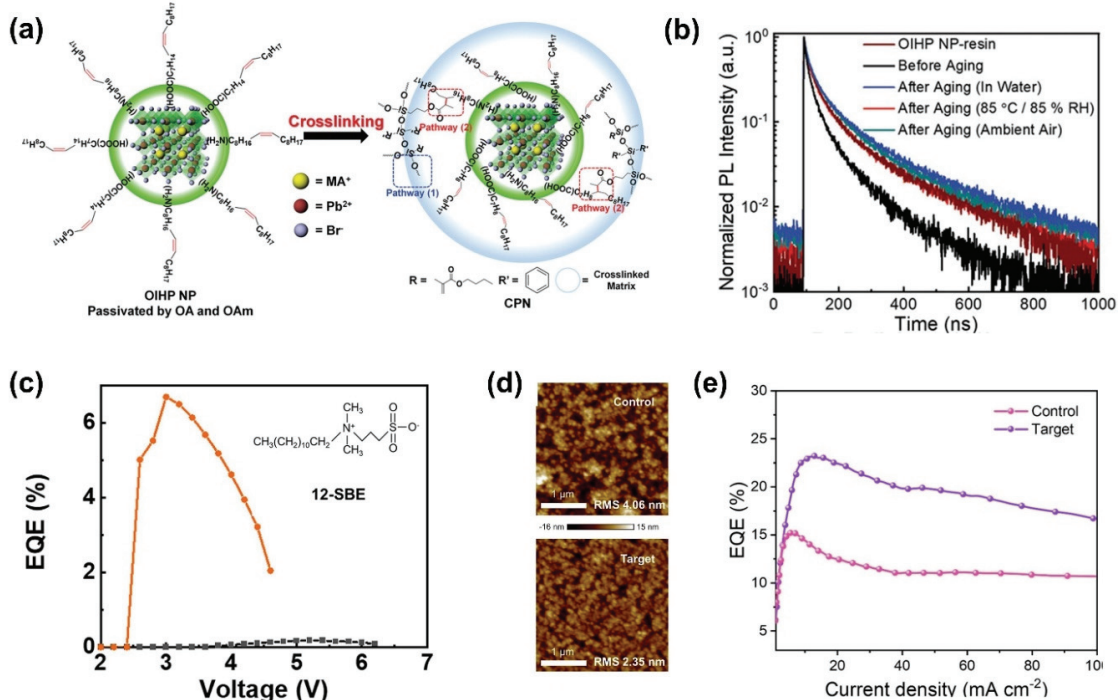
의 환경에서 전구체를 반응시켜 결정을 합성하는 방법이다 [그림 1(f)]. 나노크리스탈의 크기와 형태를 조절할 수 있고 고순도의 결정을 얻을 수 있는 장점이 있지만, 고온 환경을 만들어야 하고 공정이 복잡한 단점이 있다 [24,25]. LARP 방법은 저온에서 전구체 용액을 혼합하여 나노크리스탈을 합성하는 방법이다 [그림 1(g)]. 상온, 상압에서 합성이 가능하므로 공정이 간단하고 빠른 합성이 가능한 장점이 있지만, 결정의 크기와 형태를 조절하는 데 어려움이 있는 단점이 있다 [24,26].

- Quasi-2D 페로브스카이트와 3D 벌크 페로브스카이트는 주로 스핀 코팅 방법으로 합성한다. 스핀 코팅 방법은 전구체 용액을 유리기판 위에 떨어뜨린 후 스핀 코팅하여 얇은 페로브스카이트 박막을 얻어내는 방법이다 [그림 1(h)]. 회전속도와 용액의 양 조절이 가능하기에 박막 두께 제어가 용이하고, 고속 회전으로 인해 균일성이 좋은 박막을 얻을 수 있으며, 저온 공정이며 빠르고 간편하게 박막 제조가 가능하여 공정이 간단한 장점이 있다. 하지만 대면적 기판에는 적용이 어렵고, 공기나 불순물이 포함될 수 있으며, 공정 중 용액이 기판 밖으로 튀어나가므로 재료 낭비가 발생하는 단점이 있다 [27,28].

## 4. 차원별 페로브스카이트 연구 동향

### 4.1 0D 나노크리스탈 페로브스카이트

- 0D 나노크리스탈 페로브스카이트는 quasi-2D, 3D 벌크 페로브스카이트보다 비교적 높은 안정성을 나타내어 상업적 응용에 유리하다. 하지만 나노크리스탈 페로브스카이트도 수분 및 산소 등 외부환경에 의해 소자 열화가 일어난다. 따라서 리간드의 패시베이션 효과에 따라 소자 안정성 및 효율에 큰 영향이 있으므로 리간드의 종류에 따른 연구가 활발하게 진행되고 있다 [29].
- Lee T. W. 그룹에서는 나노결정 표면에 PNC-고분자 복합체를 합성하는 방법을 사용하여 안정적인 페로브스카이트 나노 입자를 만들었다. (3-methacryloxypropyl) trimethoxysilane (MPTS), diphenyl-silanediol (DPSD)과 같은 실록산 리간드를 도입해 화학적으로 재결합하여 페로브스카이트 결정 분해를 방지했고, 그에 따라 산소와 수분 등 외부환경이 침투하는 것을 방지하여 극한 환경에서 장기간 안정성을 나타냈다 [그림 2(a), (b)] [30].



**Fig. 2.** (a) Schematic illustration crosslinked perovskite nanoparticle, (b) PL decay dynamics of OIHP NP-resin, (c) EQE-voltage graph of OAM PNCs and 12-SBE PNCs, (d) AFM images of PNC films, and (e) EQE-current density graph of LEDs.

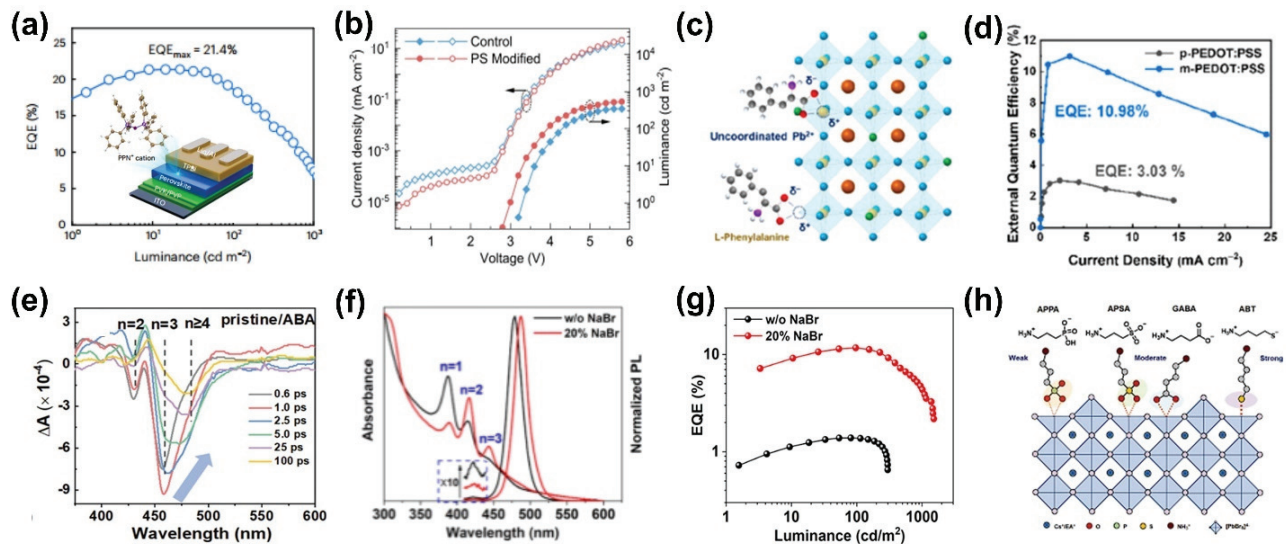
- Song M. H. 그룹에서는 CsPbBr<sub>3</sub>의 리간드로 3-(dodecyldimethyl-ammonio)propane-1-sulfonate (12-SBE)를 사용하여 100%에 가까운 광발광 효율을 기록했고, 6.7%의 외부 양자 효율과 기존 리간드 oleylamine (OAM) LED보다 2배 향상된 광 발광 수명의 결과를 낸 연구를 진행했다 [그림 2(c)] [31].
- Lu Zhang 연구 그룹에서는 guanidine thiocyanate, sodium thiocyanate를 사용하여 CsPbI<sub>3</sub> 페로브스카이트 나노 크리스탈을 합성했고 그 결과로 페로브스카이트의 defect이 passivation 되어 defect-free 박막을 얻을 수 있었고 그에 따른 효율 증가도 확인했다 [그림 2(d), (e)] [32].

### 4.2 Quasi-2D 페로브스카이트

- Quasi-2D는 구조적 장점으로 인해 청색 페로브스카이트 LED에 적용한 연구가 활발히 진행되고 있고 유기 양이온 종류를 변경하거나 전자, 정공 수송층에 첨가제를 도입하여 발광 효율을 증가시킨 많은 연구가 보고되고 있고 그에 따른 최근 연구 동향을 조사해 보고 주요 인자들을 표로 정리했다 (표 1).
- Shuai Yuan 연구 그룹은 Bis(triphenyl-phosphine)iminium chloride (PPNCI)를 유기 양이온으로 사용하여 큰 n 상 위주의 페로브스카이트를 제작하는 연구를 보고했다. PPNCI이 분자 간 수소 결합으로 인해 유기

**Table 1.** Recent research results of blue quasi-2D perovskite LEDs.

Large organic cation	EL peak [nm]		EQE [%]			Luminance [cd/m <sup>2</sup> ]			Year	Reference	
F-PEABr, PPNCI	464	474	483	7.3	13.2	21.4	6	2	20	2024	[33]
F-PEABr, FABr	478		17.32			547			2024	[34]	
PEABr, L-phenylalanine	480		10.98			548			2022	[35]	
PEABr, ABA	486		10.11			513			2021	[36]	
PEABr, NaBr	488		11.7			1,510			2020	[37]	
PEABr, GABA	490		15.6			2,150			2023	[38]	



**Fig. 3.** (a) Device architecture of the blue perovskite LED and EQE-luminance characteristics of PeLEDs. (b) J-V-L plots of PS modified PeLEDs. (c) Schematic illustration of coordination bonding between L-phenylalanine and a quasi-2D perovskite. (d) EQE-J curves graph of PeLEDs. (e) Transient absorption (TA) spectroscopy of the perovskite films. (f) Rearrangement of phase distribution in quasi-2D perovskites absorption and PL spectra. (g) EQE-Luminance curves of perovskite LEDs without and with 20% NaBr. (h) Schematic diagram of the coordination between zwitterions and perovskites.

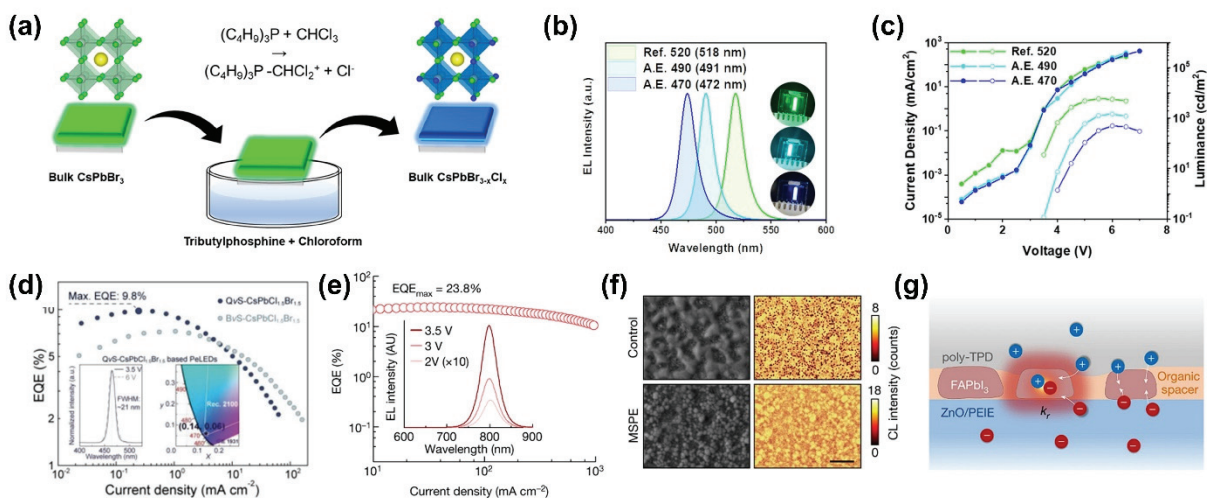
- 스페이스의 차단 효과를 약화시켜 페로브스카이트 결정 성장을 도와주고 표면 패시베이션 역할을 하면서 비방사 재결합을 감소시키는 결과를 냈다. 이를 통해 이전에 보고된 청색광 외부 양자 효율 중 가장 높은 21.4% (483 nm)의 효율을 기록했고, 짙은 청색광에서도 좋은 외부 양자 효율 13.2% (474 nm), 7.3% (464 nm)을 나타냈다 [그림 3(a)] [33].
- Xingyu Gao 연구 그룹에서는 정공수송층에 potassium sulfamate (PS) 도입을 통해 페로브스카이트 결정 성장에 미치는 결함을 제어하고 그 결과로 비방사성 재결합을 감소시켜 478 nm에서 최대 외부 양자 효율 17.32%를 기록했다 [그림 3(b)] [34].
  - Kim J. Y. 연구 그룹에서는 정공주입층에 L-phenylalanine을 첨가하여 기존의 정공수송층 물질인 PEDOT:PSS와 ITO 기판과의 화학적 반응을 억제하여 엑시톤 소광을 보완하는 연구를 진행했다. L-phenylalanine은 유기 양이온 Phenethyl ammonium bromide (PEABr)과 유사한 구조를 가지고 있으므로 2D 페로브스카이트 상 성장을 촉진시켜 3.6배 향상된 최대 10.98%의 외부 양자 효율을 기록했다 [그림 3(c), (d)] [35].
  - C. H. Choy 연구 그룹에서는 quasi-2D 페로브스카이트에 aminoethylbenzoic acid (ABA) 양이온을 도입하여 아미노와 카복실기의 기능을 통해 페로브스카이트 층 사이에 에너지 전달을 효율적으로 향상시킨 연구이

다. ABA가 페로브스카이트 박막 내의 트랩을 패시베이션하고 비방사 재결합을 감소시켜 외부 양자 효율과 안정성을 높인 결과를 얻었다 [그림 3(e)] [36].

- Guichuan Xing 연구 그룹에서는 3D 벌크 페로브스카이트에 phenethylammonium bromide (PEABr)를 도입하여 Quasi-2D 페로브스카이트를 생성하고 sodium bromide (NaBr)를 첨가하여 저차원 상을 조절했다. n=1상을 감소하고 n=2, 3, 4상을 증가시켜 상 분포를 변화시켰고 그 결과로 488 nm에서 최대 11.7%의 EQE에 도달했다 [그림 3(f), (g)] [37].
- Shaocheng Liu 연구 그룹에서는 aminopropylsulfonic acid (APSA), aminobutyric acid (GABA)와 같은 zwitterions을 사용하여 낮은 n 위주로 상을 조절해 에너지 전달을 향상시켰고 결함을 패시베이션하여 처음보다 향상된 최대 15.6%의 외부 양자 효율을 얻었다 [그림 3(h)] [38].

### 4.3 3D 벌크 페로브스카이트

- 3D 벌크 페로브스카이트는 페로브스카이트의  $ABX_3$  구조가 연속적으로 배열되어 있는 형태이므로 전자, 정공의 이동도가 높아 확산 거리 긴 장점이 있으므로 LED 뿐만 아니라 태양전지 연구에도 활발히 적용하고 있다.
- Kim G. H. 연구 그룹에서는 벌크 페로브스카이트의 청색 발광을 위해 할라이드 음이온 교환 기술을 적용한 연



**Fig. 4.** (a) Scheme of the anion exchange method for blue-emitting bulk perovskite films. (b) Electroluminescence spectra of PeLEDs. (c)  $J$ - $V$ - $L$  plot of bulk PeLEDs based on reference and anion-exchanged films. (d) EQE-Current density characteristics, EL spectrum and corresponding CIE coordinates. (e) EQE-Current density characteristics of the best PeLEDs device. (f) SEM images of control and MSPE films. (g) Schematic illustration of the MSPE-based perovskite grains with charge transport layers in a full device.

구를 진행했다. 처음 녹색 빛(518 nm)을 발광하는 CsPbBr<sub>3</sub>에서 할라이드 음이온 교환을 통해 청색 빛(472 nm)을 발광하는 CsPbBr<sub>3-x</sub>Cl<sub>x</sub>를 제작했고, 490 nm에서 1,468 cd/m<sup>-2</sup>, 470 nm에서 494 cd/m<sup>-2</sup>의 휘도를 기록했다 [그림 4(a)~(c)] [39].

- Mingjian Yuan 연구 그룹은 기판 위 합성(synthesis-on-substrate, SoS) 방법을 통해 CsPbBr<sub>1.5</sub>Cl<sub>1.5</sub> 구조를 가진 청색 발광 소자를 제작했고 464 nm에서 9.8%의 외부 양자 효율을 달성했다. 또한, 576 nm에서 12.7%의 외부 양자 효율을 나타낸 황색 페로브스카이트 CsPbBr<sub>1.5</sub>I<sub>1.5</sub>로 발광 소자를 제작하여 할라이드의 종류에 따라 다양한 페로브스카이트 발광 소자 제작이 가능함을 확인했다 [그림 4(d)] [40].
- N. C. Greenham 연구 그룹은 FAPbI<sub>3</sub>에 새로운 분자 2-[4-(methylsulfonyl)phenyl]ethanamine(MSPE)을 도입하여 근적외선 영역에서 고회도, 고효율 페로브스카이트를 제작했다. MSPE는 페로브스카이트의 결정성을 향상시켜 비방사 결합이 감소했고, 페로브스카이트 입자 사이에 MSPE 입자가 자가 조립되면서 전하 수송층 계면에서의 발광 소멸을 억제했다. 그 결과로 20% 이상의 외부 양자 효율을 기록했고 이에 따라 레이저로의 활용도 기대한다고 보고했다 [그림 4(e)~(g)] [41].

## 5. 결론

- 본 논문에서는 0D 나노크리스탈, quasi-2D, 3D 벌크 페로브스카이트의 구조적 특성과 합성 방법, 그리고 각각의 연구 동향을 살펴보았다. 페로브스카이트는 높은 양자 효율, 긴 전하 이동 거리, 그리고 조정 가능한 밴드갭과 같은 뛰어난 특성 덕분에 차세대 광전자 소재로서의 가능성이 충분하다.
- 연구 동향에서 소개한 바와 같이, 최근 청색광 페로브스카이트의 효율 증가에 관한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구들은 청색광의 발광 효율을 크게 향상시키는 다양한 접근법을 제시하고 있으며 그 결과로 적색 및 녹색 페로브스카이트와 견줄 만한 효율을 달성할 가능성이 있다는 것을 보여준다.
- 그러나 상용화되기 위해서는 안정성 문제와 특정 성분의 유해성 문제를 해결할 필요가 있다. 향후 연구는 이러한 문제를 해결하고, 더욱 안정적이고 효율적인 소자를 개발하는 데 중점을 두어야 할 것이다. 이를 통해 페로브스카이트 소재는 다양한 응용 분야에서 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

## ORCID

Gi-Hwan Kim

<https://orcid.org/0000-0001-7115-2552>

## REFERENCES

- [1] Y. Motoyama, K. Sugiyama, H. Tanaka, H. Tsuchioka, K. Matsusaki, and H. Fukumoto, *J. Soc. Inf. Disp.*, **27**, 354 (2019). doi: <https://doi.org/10.1002/jsid.784>
- [2] F. A. Roghabadi, N. Ahmadi, V. Ahmadi, A. Di Carlo, K. O. Aghmiuni, A. S. Tehrani, F. S. Ghoreishi, M. Payandeh, and N.M.R. Fumani, *Sol. Energy*, **173**, 407 (2018). doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.07.058>
- [3] A. Perumal, S. Shendre, M. Li, Y.K.E. Tay, V. K. Sharma, S. Chen, Z. Wei, Q. Liu, Y. Gao, P.J.S. Buenconsejo, S. T. Tan, C. L. Gan, Q. Xiong, T. C. Sum, and H. V. Demir, *Sci. Rep.*, **6**, 36733 (2016). doi: <https://doi.org/10.1038/srep36733>
- [4] Z. Xiao, Z. Song, and Y. Yan, *Adv. Mater.*, **31**, 1803792 (2019). doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201803792>
- [5] S. D. Stranks and H. J. Snaith, *Nat. Nanotechnol.*, **10**, 391 (2015). doi: <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.90>
- [6] X. Li, S. Aftab, S. Hussain, F. Kabir, A.M.A. Henaish, A. G. Al-Sehemi, M. R. Pallavolu, and G. Koyyada, *J. Mater. Chem. A*, **12**, 4421 (2024). doi: <https://doi.org/10.1039/D3TA06953B>
- [7] C. J. Bartel, C. Sutton, B. R. Goldsmith, R. Ouyang, C. B. Musgrave, L. M. Ghiringhelli, and M. Scheffler, *Sci. Adv.*, **5**, eaav0693 (2019). doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aav0693>
- [8] S. C. Tidrow, *Ferroelectrics*, **470**, 13 (2014). doi: <https://doi.org/10.1080/00150193.2014.922372>
- [9] G. Kieslich, S. Sun, and A. K. Cheetham, *Chem. Sci.*, **6**, 3430 (2015). doi: <https://doi.org/10.1039/C5SC00961H>
- [10] X. Yang, Z. Chu, J. Meng, Z. Yin, X. Zhang, J. Deng, and J. You, *J. Phys. Chem. Lett.*, **10**, 2892 (2019). doi: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.jpcclett.9b00910>
- [11] C. de Mello Donegá, *Chem. Soc. Rev.*, **40**, 1512 (2011). doi: <https://doi.org/10.1039/C0CS00055H>
- [12] J. H. Park, A. Y. Lee, J. C. Yu, Y. S. Nam, Y. Choi, J. Park, and M. H. Song, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 8428 (2019). doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.8b20808>
- [13] S. Sun, M. Lu, X. Gao, Z. Shi, X. Bai, W. W. Yu, and Y. Zhang, *Adv. Sci.*, **8**, 2102689 (2021). doi: <https://doi.org/10.1002/advs.202102689>
- [14] F. Yan, J. Xing, G. Xing, L. Quan, S. T. Tan, J. Zhao, R. Su, L. Zhang, S. Chen, Y. Zhao, A. Huan, E. H. Sargent, Q. Xiong, and H. V. Demir, *Nano Lett.*, **18**, 3157 (2018). doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.8b00789>
- [15] G. Shin, D. Yun, Y. Ha, Y. Jeong, Y. Cho, S. Baek, H. Shin, V. V. Sharma, and G. H. Kim *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **25**,

- 40 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1007/s42341-023-00499-9>
- [16] L. Cheng, T. Jiang, Y. Cao, C. Yi, N. Wang, W. Huang, and J. Wang, *Adv. Mater.*, **32**, 1904163 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201904163>
- [17] X. Yang, Z. Chu, J. Meng, Z. Yin, X. Zhang, J. Deng, and J. You, *J. Phys. Chem. Lett.*, **10**, 2892 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.9b00910>
- [18] K. Wang, Z. Y. Lin, Z. Zhang, L. Jin, K. Ma, A. H. Coffey, H. R. Atapattu, Y. Gao, J. Y. Park, Z. Wei, B. P. Finkenauer, C. Zhu, X. Meng, S. N. Chowdhury, Z. Chen, T. Terlier, T. H. Do, Y. Yao, K. R. Graham, A. Boltasseva, T. F. Guo, L. Huang, H. Gao, B. M. Savoie, and L. Dou, *Nat. Commun.*, **14**, 397 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-023-36118-7>
- [19] R. Liu, X. Hu, M. Xu, H. Ren, and H. Yu, *ChemSusChem*, **16**, e202300736 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/cssc.202300736>
- [20] P. Fu, Y. Liu, S. Yu, H. Yin, B. Yang, S. Ahmad, X. Guo, and C. Li, *Nano Energy*, **88**, 106249 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106249>
- [21] P. Zhu and J. Zhu, *InfoMat*, **2**, 341 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1002/inf2.12086>
- [22] Z. Yang, Z. Yu, H. Wei, X. Xiao, Z. Ni, B. Chen, Y. Deng, S. N. Habisreutinger, X. Chen, K. Wang, J. Zhao, P. N. Rudd, J. J. Berry, M. C. Beard, and J. Huang, *Nat. Commun.*, **10**, 4498 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12513-x>
- [23] M. Kim, G. H. Kim, T. K. Lee, I. W. Choi, H. W. Choi, Y. Jo, J. Yoon, J. W. Kim, J. Lee, D. Huh, H. Lee, S. K. Kwak, J. Y. Kim, and D. S. Kim, *Joule*, **3**, 2179 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.06.014>
- [24] J. Shamsi, A. S. Urban, M. Imran, L. De Trizio, and L. Manna, *Chem. Rev.*, **119**, 3296 (2019).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00644>
- [25] X. Li, K. Zhang, J. Li, J. Chen, Y. Wu, K. Liu, J. Song, and H. Zeng, *Advanced Materials Interfaces*, **5**, 1800010 (2018).  
doi: <https://doi.org/10.1002/admi.201800010>
- [26] I. Lignos, S. Stavrakis, G. Nedelcu, L. Protesescu, A. J. de Mello, and M. V. Kovalenko, *Nano Lett.*, **16**, 1869. (2016).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.5b04981>
- [27] S. Pratap, F. Babbe, N. S. Barchi, Z. Yuan, T. Luong, Z. Haber, T. B. Song, J. L. Slack, C. V. Stan, N. Tamura, C. M. Sutter-Fella, and P. Müller-Buschbaum, *Nat. Commun.*, **12**, 5624 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25898-5>
- [28] J. Zheng, M. Zhang, C.F.J. Lau, X. Deng, J. Kim, Q. Ma, C. Chen, M. A. Green, S. Huang, and A.W.Y. Ho-Baillie, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **168**, 165 (2017).  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.04.029>
- [29] L. Protesescu, S. Yakunin, M. I. Bodnarchuk, F. Krieg, R. Caputo, C. H. Hendon, R. X. Yang, A. Walsh, and M. V. Kovalenko, *Nano Lett.*, **15**, 3692 (2015).  
doi: <https://doi.org/10.1021/nl5048779>
- [30] J. Jang, Y. H. Kim, S. Park, D. Yoo, H. Cho, J. Jang, H. B. Jeong, H. Lee, J. M. Yuk, C. B. Park, D. Y. Jeon, Y. H. Kim, B. S. Bae, and T. W. Lee, *Adv. Mater.*, **33**, 2005255 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202005255>
- [31] A. Y. Lee, J. Kim, D. Lee, and M. H. Song, *ACS Appl. Electron. Mater.*, **5**, 5325 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsaelm.2c01781>
- [32] P. Lu, A. Liu, M. Lu, F. Zhang, S. Sun, M. Liu, Z. Wu, X. Wang, W. Dong, F. Qin, Y. Gao, X. Bai, and Y. Zhang, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **63**, e202317376 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1002/anie.202317376>
- [33] S. Yuan, L. Dai, Y. Sun, F. Auras, Y. H. Zhou, R. Z. An, Y. Liu, C. Ding, C. Cassidy, X. Tang, S. C. Dong, H. B. Kang, K. Chen, X. Liu, Z. F. Ye, Y. Zhao, C. Adachi, L. S. Liao, N. C. Greenham, Y. Qi, S. D. Stranks, L. S. Cui, and R. H. Friend, *Nat. Photonics*, **18**, 425 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41566-024-01382-6>
- [34] Y. Yu, B. F. Wang, Y. Shen, Z. H. Su, K. Zhang, H. Ren, Y. F. Zhang, X. Gao, J. X. Tang, and Y. Q. Li, *Angew. Chem*, **136**, e202319730 (2024).  
doi: <https://doi.org/10.1002/ange.202319730>
- [35] Y. S. Shin, C. B. Park, A. Adhikari, Y. J. Yoon, H. W. Cho, J. G. Son, J. Seo, T. Song, W. Lee, J. Yeop, J. W. Kim, M. Gong, B. Walker, O. H. Kwon, G. H. Kim, and J. Y. Kim, *ACS Energy Lett.*, **7**, 3345 (2022).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.2c01785>
- [36] Z. Ren, J. Yu, Z. Qin, J. Wang, J. Sun, C.C.S. Chan, S. Ding, K. Wang, R. Chen, K. S. Wong, X. Lu, W. J. Yin, and W.C.H. Choy, *Adv. Mater.*, **33**, 2005570 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202005570>
- [37] P. Pang, G. Jin, C. Liang, B. Wang, W. Xiang, D. Zhang, J. Xu, W. Hong, Z. Xiao, L. Wang, G. Xing, J. Chen, and D. Ma, *ACS Nano*, **14**, 11420 (2020).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c03765>
- [38] S. Liu, Z. Guo, X. Wu, X. Liu, Z. Huang, L. Li, J. Zhang, H. Zhou, L. D. Sun, and C. H. Yan, *Adv. Mater.*, **35**, 2208078 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202208078>
- [39] Y. J. Yoon, Y. S. Shin, H. Jang, J. G. Son, J. W. Kim, C. B. Park, D. Yuk, J. Seo, G. H. Kim, and J. Y. Kim, *Nano Lett.*, **21**, 3473 (2021).  
doi: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.1c00124>
- [40] Y. Jiang, K. Wei, C. Sun, Y. Feng, L. Zhang, M. Cui, S. Li, W. D. Li, J. T. Kim, C. Qin, and M. Yuan, *Adv. Mater.*, **35**, 2304094 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1002/adma.202304094>
- [41] Y. Sun, L. Ge, L. Dai, C. Cho, J. F. Orri, K. Ji, S. J. Zelewski, Y. Liu, A. J. Mirabelli, Y. Zhang, J. Y. Huang, Y. Wang, K. Gong, M. C. Lai, L. Zhang, D. Yang, J. Lin, E. M. Tennyson, C. Ducati, S. D. Stranks, L. S. Cui, and N. C. Greenham, *Nature*, **615**, 830 (2023).  
doi: <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05792-4>