

PMMA/페로브스카이트 복합체의 광학적 특성 및 안정성

남기훈* · 김민진* · 이상현*†

Optical Properties and Stability of PMMA/perovskite Composites

Gi Hun Nam*, Minjin Kim*, Sang Hyun Lee*†

ABSTRACT: In this study, CsPbBr₃ quantum dots synthesized via a hot-injection method were incorporated into polymethyl methacrylate (PMMA) matrices with different molecular weights and concentrations to form composites thin films by spin coating. The stability of these composites was evaluated under ultraviolet (UV) irradiation and thermal stress. It was found that low-molecular-weight PMMA most effectively mitigated UV-induced red shift and photoluminescence (PL) quenching. In contrast, composites with high-molecular-weight PMMA retained 73% of their initial PL intensity after thermal treatment, indicating superior thermal stability. These finding highlight the critical role of molecular weight and content of PMMA on the optical stability of CsPbBr₃ quantum dots and provide strategic insights for polymer encapsulation approaches to enhance the environmental durability of perovskite-based optoelectronic devices including display and sensors.

초 록: 본 연구에서는 고온 주입법으로 합성한 CsPbBr₃ 양자점과 서로 다른 분자량 및 함량의 PMMA와 복합화한 후, 이를 스피ن 코팅하여 박막을 제작하고 자외선 및 열 조건에서의 안정성을 평가하였다. 자외선 조사 실험에서는 저분자량 PMMA가 광발광 세기 감소와 적색 편이를 가장 효과적으로 억제하였다. 반면, 열처리 후에는 고분자량 PMMA 복합체가 PL 세기 73%를 유지해 열화를 최적으로 방지했다. 본 결과는 PMMA 분자량과 함량이 CsPbBr₃ 양자점의 자외선과 열 안정성에 미치는 영향을 규명하였으며, 디스플레이 및 센서 등 광전자소자의 응용을 위한 CsPbBr₃ 안정성 향상을 위한 고분자 캡슐화 전략에 유용한 방향성을 제시한다.

Key Words: 페로브스카이트(Perovskite), 고분자(Polymer), 복합체(Composites), 광발광(Photoluminescence), 안정성(Stability)

1. 서 론

무기 할라이드 페로브스카이트 양자점(CsPbX₃, QDs, X = Cl, Br 또는 I)은 빛광 파장 조절이 가능하며, 좁은 빛광 밴드폭(narrow emission bandwidth), 높은 광발광 양자 효율(Photoluminescence quantum yield, PLQY), 그리고 결함 내성(defect tolerance) 등의 장점을 지니고 있다. 이러한 우수한 광학적 특성으로 인해 태양전지, 빛광다이오드(Light

emitting diode, LED), 레이저 등 다양한 광전기소자 분야에서 활발히 연구되고 있다[1-4].

그러나 단일 조성의 무기 할라이드 페로브스카이트 양자점은 수분, 산소, 자외선 등 외부 환경에 취약하여 장기적인 안정성 확보에 어려움이 있으며, 이는 실제 소자 제작 시 중요한 제약 요소로 작용한다[5-8]. 이러한 한계를 극복하기 위한 다양한 방안이 제시되고 있으며, 대표적으로 리간드 개질 방법이나[9], 고분자[10,11], 실리카[12], 유기금속

Received 1 July 2025, received in revised form 1 August 2025, accepted 23 August 2025

*The School of Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea

†Corresponding author (E-mail: leeshyun@jnu.ac.kr)

화합물[13] 등을 활용한 캡슐화(encapsulation) 기술을 통해 안정성 향상이 가능하다고 보고되고 있다. 이 중 고분자 기반 캡슐화 방법은 비교적 간단한 공정과 낮은 비용이라는 장점으로 인해 널리 활용되고 있다.

캡슐화에 사용되는 고분자는 폐로브스카이트를 분산시키는 용매에 잘 용해되어야 하며, 광학적 손실을 최소화하기 위해 높은 투명성을 가져야 한다. Poly(methyl methacrylate) (PMMA)는 이러한 조건을 충족하는 대표적인 고분자로, PMMA를 이용한 캡슐화를 통해 폐로브스카이트 양자점의 안정성과 광학적 특성을 향상시킬 수 있음이 여러 연구에서 보고된 바 있다[14–16]. 그러나, 기존 연구들은 주로 단일 분자량의 PMMA를 사용하였으며, 박막 형태로 제작된 복합체에 대해서도 고분자의 분자량과 함량에 따른 체계적인 비교 연구는 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 고온 주입법을 통해 합성한 CsPbBr_3 양자점을 서로 다른 분자량의 PMMA와 혼합하여 PMMA/ CsPbBr_3 복합체를 제조하였으며, 다양한 PMMA 함량에 따른 복합체의 광학적 특성을 분석하였다. 또한, 스판 코팅 공정을 통해 제조된 박막 복합체를 이용하여 PMMA의 분자량 및 함량에 따른 열 및 자외선 안정성을 평가하였다.

2. 실험

2.1 재료

Cesium carbonate(99.99%), Lead bromide(99.99%), Oleic acid(90%), 1-Octadecene(90%), Oleylamine(70%), Toluene(99.8%), Poly(methyl methacrylate)은 Sigma Aldrich 사에서 구매하였다. PMMA는 평균 분자량 350,000(저분자량)과 996,000(고분자량)의 두 종류를 사용하였다. 모든 시약은 별도의 정제 없이 그대로 사용하였다.

2.2 폐로브스카이트 CsPbBr_3 양자점 합성

CsPbBr_3 양자점은 고온 주입법으로 합성되었다. 모든 가열 및 교반 과정은 오일 배스(Oil bath)를 사용하였다. 먼저, 세슘 전구체 용액(Cesium oleate)을 준비하기 위해 Cesium carbonate(0.250 g), Oleic acid(1 mL), 1-Octadecene(10 mL)을 50 mL 삼구 플라스크에 넣고 70°C에서 1시간 동안 진공 상태에서 교반하였다. 이후 질소 분위기에서 온도를 120°C로 올려 4시간 동안 가열한 뒤, 150°C로 1시간 더 가열하였다. 완성된 세슘 전구체는 주입전까지 105°C로 유지하였다.

다음으로, PbBr_2 전구체 용액을 준비하기 위해 Lead bromide(0.207 g)와 1-Octadecene(15 mL)을 25 mL 플라스크에 넣고, 70°C에서 1시간 동안 진공 조건에서 교반하였다. 이어서 질소 분위기에서 온도를 120°C로 높여 90분간 교반하였다. 여기에 Oleic acid(1.5 mL)와 Oleylamine(1.5 mL)을 순차적으로 빠르게 주입한 뒤, 10분간 반응시켜 PbBr_2 를 용해시켰다. 그 후 반응 온도를 150°C로 상승 후 유지하였다.

최종적으로, 준비된 105°C의 세슘 전구체 용액(1.2 mL)을 150°C의 PbBr_2 전구체 용액에 빠르게 주입하고 10초간 반응시켜 CsPbBr_3 나노 결정을 형성시킨 뒤, 급속 냉각하여 반응을 중지시켰다.

합성된 입자 중 큰 입자를 제거하기 위해 15,000 rpm에서 1시간 동안 원심 분리하였다. 상등액은 제거하고 침전물을 Toluene(20 mL)에 다시 분산시킨 후, 동일 조건으로 한 번 더 원심 분리하여 침전물을 회수하였다. 최종 침전물은 Toluene(20 mL)에 재분산하여 사용하였다.

2.3 PMMA/ CsPbBr_3 복합체 제조

서로 다른 분자량의 Poly(methyl methacrylate)(0.3 g)을 각각 Toluene(10 mL)에 넣고 60°C의 핫 플레이트에서 2시간 동안 교반하여 완전히 용해시킨다. 이를 합성된 CsPbBr_3 용액과 서로 부피 비율(volume ratio)로 완전히 혼합한다. 이후 복합체를 실리콘 기판(1.5×1.5 cm)에 스판 코팅하여 자외선 및 열 안정성 평가를 진행하였다.

2.4 PMMA/ CsPbBr_3 복합체 특성 평가

자외선 안정성 평가는 312 nm 파장의 UV 램프(30 W)로 2시간 동안 자외선을 조사한 후, 총 10시간 동안 광발광(Photoluminescence, PL) 세기 및 발광 파장 피크 위치(Emission wavelength peak position)의 변화를 측정하였다. 열 안정성 평가는 50°C의 핫 플레이트 위에서 1시간 동안 광발광 세기와 발광 파장 피크 위치의 변화를 측정하였다. 모든 안정성 평가는 상온의 대기 조건에서 수행하였다. 광학적 특성 분석은 KLAM사의 OPTIZEN POP UV-Vis spectrophotometer와 Horiba사의 iHR 320 imaging spectrometer 제품을 사용하여 측정되었다. 결정성은 PANalytical사의 EMPyrenean 장비를 이용한 X-ray diffraction(XRD)(Cu-K α , $\lambda = 1.54$ Å)하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CsPbBr_3 특성 분석

Fig. 1는 고온 주입법을 통해 합성한 CsPbBr_3 용액의 PL(left)과 UV-vis (right)에 대한 결과이다. PL의 방출 파장

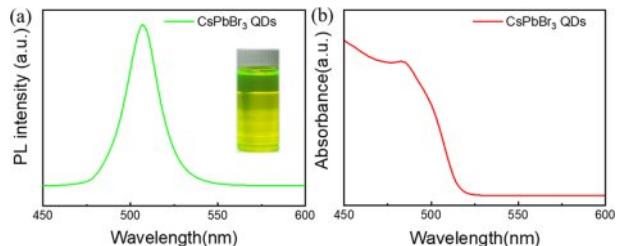


Fig. 1. (a) PL spectrum of CsPbBr_3 QDs in toluene with a photograph of the colloidal solution (inset) and (b) UV-visible absorption spectrum of the CsPbBr_3 QDs

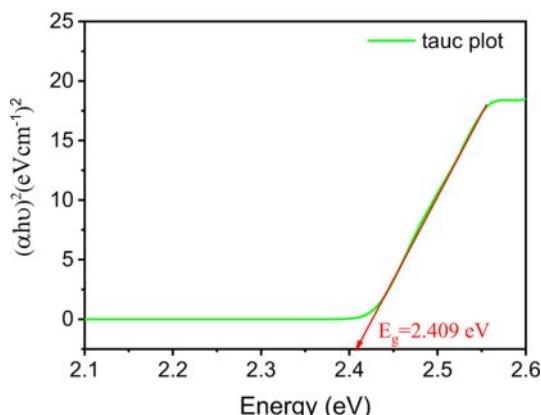


Fig. 2. Tauc plot of as-prepared CsPbBr_3 QDs

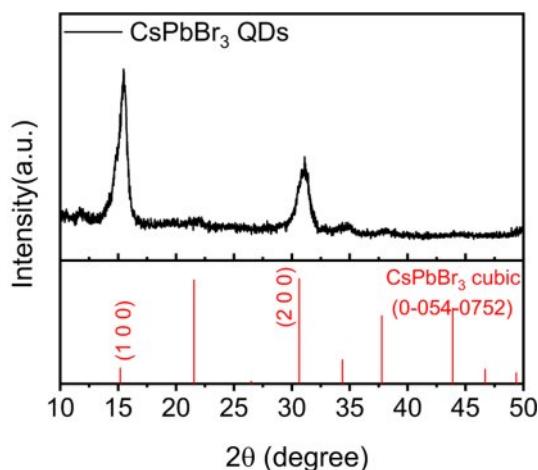


Fig. 3. XRD pattern of CsPbBr_3 compared with standard reference peaks for cubic-phase CsPbBr_3

피크(Emission wavelength peak)는 507.1 nm 이고 반치폭(Full width at half maximum, FWHM)은 104 meV 이다. FWHM이 작을수록 입자 크기가 균일하고 표면 결함이 적은 것을 의미한다. 기존 동일한 방법으로 합성한 논문의 CsPbBr_3 양자점의 값($70\text{-}120 \text{ meV}$)과 유사한 값을 갖을 확인할 수 있다[17]. UV-vis은 500 nm 이하의 파장에서 높은 흡광도를 보인다. 또한, Fig. 2의 흡광도 곡선을 이용한 tauc plot을 통해 CsPbBr_3 양자점의 밴드갭이 2.409 eV 임을 확인하였다[18].

Fig. 3는 합성한 CsPbBr_3 XRD 측정 결과이다. CsPbBr_3 나노 결정은 $2\theta = 15.2^\circ, 30.6^\circ$ 부근에서 뚜렷한 회절 피크를 보이며, 이는 각각 CsPbBr_3 결정의 (100), (200) 면에 해당한다. 이러한 결과는 합성된 CsPbBr_3 나노 결정이 전형적인 정방정계(cubic phase)의 결정구조를 가지며, 고순도의 결정상이 형성되었음을 나타낸다. 회절 패턴은 표준 JCPDS 카드(#54-0752)와 잘 일치함을 확인하였다. 또한, 회절 피크의 반치폭 값을 Scherrer 식[19]에 적용하여 계산한 결과, 평균입자크기가 (100)면에 대해서 약 9.4 nm 임을 알 수 있다.

Fig. 4의 TEM image에서도 CsPbBr_3 나노 입자들이 균일

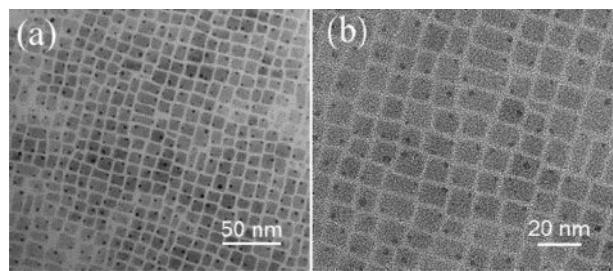


Fig. 4. (a) Low and (b) high-magnification TEM image of CsPbBr_3

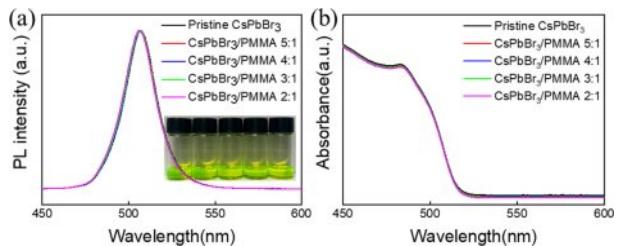


Fig. 5. (a) PL and (b) UV-vis spectra of PMMA/ CsPbBr_3 composites

한 정육면체 형태로 배열되어 있음을 확인할 수 있다. 입자들은 약 $9\text{-}10 \text{ nm}$ 크기를 가지며, 고른 분포와 함께 규칙적인 형태를 유지하고 있다. TEM을 이용해 관찰된 입자 크기는 X선 회절로 계산된 평균값과 거의 일치함을 알 수 있다. 이러한 결과는 CsPbBr_3 의 결정성 측면에서 우수하게 합성되었음을 보여준다.

3.2 PMMA/ CsPbBr_3 복합체 용액의 광학적 분석

Fig. 5는 PMMA/ CsPbBr_3 복합체의 PL과 UV-vis 분석 결과이다. 초기 합성한 CsPbBr_3 양자점과 복합체를 비교하면 PL의 경우 거의 동일한 PL 피크와 세기를 유지하고 있음을 알 수 있다(Fig. 5(a)). UV-vis 또한 초기 CsPbBr_3 양자점의 그래프와 일치하는 결과를 보여준다(Fig. 5(b)). PMMA 함량의 증가에 따라 약간의 감소는 보이지만 그 차이는 크지 않음을 확인했다. 이는 PMMA와의 복합체 형성이 CsPbBr_3 양자점의 광학적 특성에 영향을 주지 않음을 확인할 수 있다.

3.3 PMMA/ CsPbBr_3 복합체 박막의 안정성 평가

Fig. 6는 (a) 단일 CsPbBr_3 와 PMMA/ CsPbBr_3 복합체 박막 샘플에 UV 조사의 시간별 PL 측정의 결과이다. Fig. 6(b)-(e)는 저분자량 PMMA를 사용한 복합체, Fig. 6(f)-(i)는 고분자량 PMMA를 사용한 복합체의 결과이다. 이러한 시간에 따른 PL 스펙트럼의 변화로부터 Fig. 7는 각 샘플의 PL 피크 위치와 PL 세기 변화를 나타낸 그래프이다. Fig. 7(a)와 7(b)는 각각 저분자량과 고분자량 PMMA를 사용하여 함량을 달리한 샘플들에 UV 조사 시간에 따른 PL 피크의 변화를 각각 나타낸 것이다.

모든 샘플에서 공통적으로 UV 조사 시 적색 편이가 나타난다. 이는 UV 조사에 의한 표면 결함의 증가 및 리간드

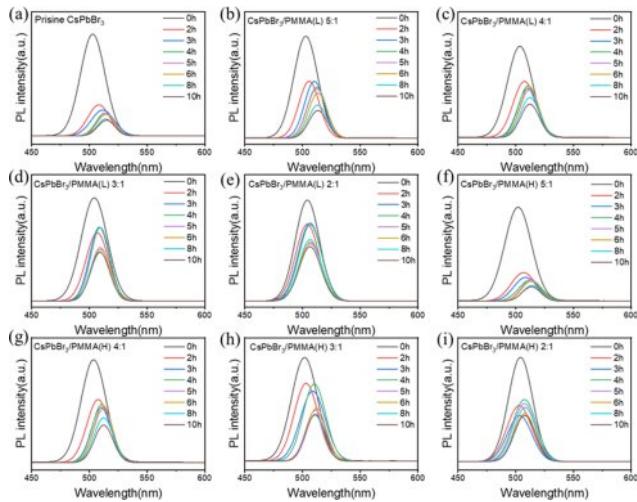


Fig. 6. PL spectra of (a) pristine CsPbBr₃ and PMMA/CsPbBr₃ composites films with varying PMMA content over UV irradiation time: (b)-(e) low molecular weight (MW), (f)-(i) high MW

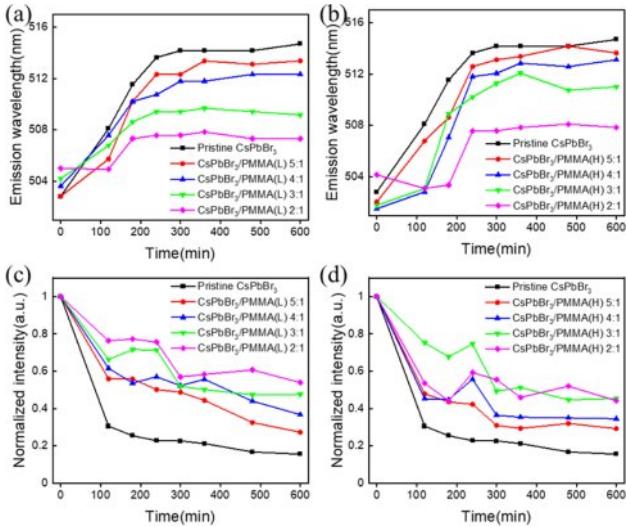


Fig. 7. PL peak position evolution under UV irradiation for PMMA/CsPbBr₃ composites films with varying PMMA content: (a) low MW and (b) high MW. Corresponding changes in PL intensity over irradiation time are shown for (c) low MW and (d) high MW PMMA composites

(ligand)의 일부가 탈착되어 CsPbBr₃ 나노 결정들의 응집에 의한 크기 증가의 영향으로 해석할 수 있다[20,21]. 초기 CsPbBr₃(검정색)에서 가장 큰 적색 편이(503 nm → 514 nm)를 보였으며 PMMA 함량이 증가할수록 감소하는 경향을 보인다. 이는 Fig. 8과 같이 CsPbBr₃ 대비 PMMA의 양이 많은 경우, PMMA가 효과적으로 나노 결정의 응집을 억제해 적색 편이 현상을 완화하는 역할을 하는 것을 나타난다[21].

Fig. 7(c)와 7(d)는 저분자량과 고분자량 PMMA를 사용하여 함량을 달리한 샘플들에 UV 조사에 따른 PL 세기의 변화를

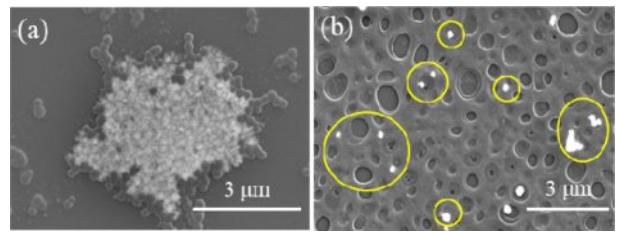


Fig. 8. SEM images of (a) pristine CsPbBr₃ and (b) PMMA/CsPbBr₃ composites after 10 h of UV irradiation

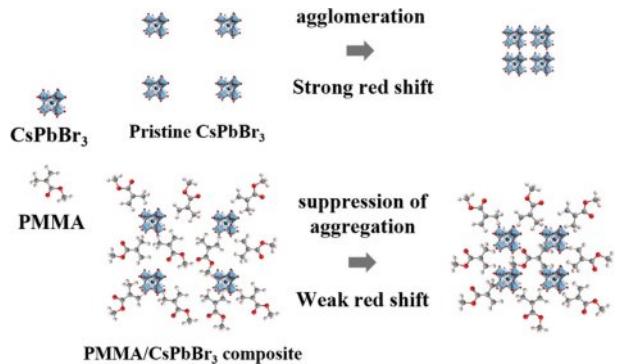


Fig. 9. Schematic of structural changes in pristine CsPbBr₃ and PMMA/CsPbBr₃ composites under UV irradiation

각각 나타낸 것이다. 모든 샘플에서 UV 조사 초기 2시간 동안 PL 세기의 급격한 감소가 나타난다. 이는 표면 리간드 탈착 및 활성 산소종에 의한 Pb → Pb²⁺ 산화로 비방사성 트랩의 증가에 의한 것이다[22]. 이러한 PL 세기 감소는 CsPbBr₃ 양자점 (검정색)에서 초기 세기의 30%로 가장 뚜렷하게 나타나며 PMMA 함량의 증가에 따라 다소 완화되는 경향을 보인다. 분자량에 따른 차이는 크지 않지만 상대적으로 고 함량의 저분자량이 초기 세기의 53.9%를 유지하는 우수한 결과를 보이는데 이는 사슬 말단 밀도가 큰 저분자량의 PMMA의 카보닐기와 CsPbBr₃ 표면의 Pb²⁺ 이온과의 배위 결합이 더 잘 형성되어 비방사성 트랩 형성이 효과적으로 억제된 것으로 추측된다[23].

Fig. 8는 합성한 CsPbBr₃와 PMMA/CsPbBr₃ 복합체를 실리콘 기판에 코팅한 후 10시간 UV 조사 후에 관찰한 박막의 형상을 보여준다. Fig. 8(a)와 같이 UV 조사에 의해 CsPbBr₃ 나노 결정들이 수 마이크로 영역으로 응집되는 것을 볼 수 있다. 반면, PMMA/CsPbBr₃ 복합체의 경우 PMMA에 의해 응집이 억제되어 개별 CsPbBr₃ 나노 입자들이 PMMA 매트릭스 내에 분산되어 있음을 확인할 수 있다(Fig. 8(b)). 또한, UV 조사 후 입자의 크기가 약 200~300 nm로 증가한 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 UV 조사에 따른 CsPbBr₃ 나노입자와 PMMA/CsPbBr₃ 복합체의 구조적 변화를 간단히 모식도를 통해 나타낸 것이다. CsPbBr₃의 경우 UV 조사에 의해 양자점들의 응집이 일어나고 이에 따라 강한 적색 편이가 나타나게

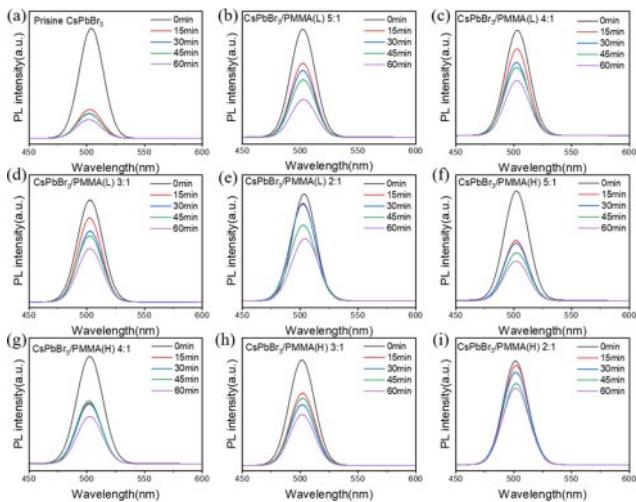


Fig. 10. PL spectra of (a) pristine CsPbBr_3 and PMMA/ CsPbBr_3 composite films with varying PMMA content under thermal treatment at 50°C: (b)–(e) Low molecular weight (MW), (f)–(i) high MW

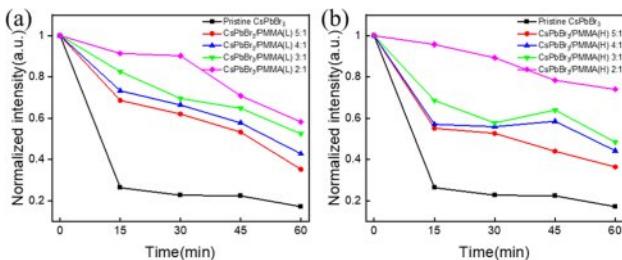


Fig. 11. PL intensity of PMMA/ CsPbBr_3 composites films with varying PMMA content under thermal treatment at 50°C: (a) low molecular weight (MW) and (b) high MW

된다. PMMA/ CsPbBr_3 복합체는 PMMA에 의해 응집이 억제되고 상대적으로 약한 적색 편이를 보인다.

Fig. 10는 단일 CsPbBr_3 (Fig. 10(a))와 PMMA/ CsPbBr_3 복합체 박막 샘플에 열을 가하여 PL 측정의 결과이다. Fig. 10(b)–(e)는 저분자량 PMMA를 사용한 복합체, Fig. 10(f)–(i)는 고분자량 PMMA를 사용한 복합체의 결과이다. 이러한 시간에 따른 PL 스펙트럼의 변화로부터 Fig. 11는 각 샘플의 PL 피크 위치와 PL 세기 변화를 정리한 그래프이다. Fig. 11(a)와 11(b)는 각각 저분자량과 고분자량 PMMA를 사용하여 함량을 달리한 샘플들에 열을 가하는 시간에 따른 PL 세기 변화를 각각 나타낸 것이다.

열에 대한 PL 피크의 변화는 뚜렷한 변화가 없어 나타내지 않았다. 모든 샘플에서 초기 15분 동안 급격한 PL 세기 감소를 보였으며, 순수한 CsPbBr_3 양자점(검정색)에서 1시간 경과 후 초기 세기의 26%로 가장 큰 감소를 보였다. CsPbBr_3 에 열이 가해지면 표면 리간드의 탈착 및 분해로 인한 표면 결합의 증가로 비방사성 재결합이 증가하여 PL 세기의 감소가 나타난다[24]. PMMA의 함량이 증가함에 따라 세기 감소는 완화되는 경향이 나타나며, 1시간 경과 후 함량이 가장 높은

고분자량의 CsPbBr_3 /PMMA 2:1(자주색)에서 초기 세기의 73%를 유지하며 가장 좋은 결과를 보여준다. 이는 사슬 길이가 긴 고분자량의 PMMA에서 사슬 얹힘 효과가 강하게 나타나 CsPbBr_3 로의 열 전달 경로를 증가시키며, 그 결과 열 전달을 억제하여 열 안정성이 증가할 수 있다[25]. 중간 범위 함량의 PMMA 복합체의 경우에 저분자량에서 세기 감소가 작은데 이는 사슬 얹힘을 형성하기에 함량이 작아 사슬 얹힘에 의한 억제 효과보다 사슬 말단 밀도가 큰 저분자량에서의 표면 패시베이션 효과로 인해 초기 PL 세기 감소가 적은 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온 주입법으로 합성한 CsPbBr_3 양자점을 분자량이 다른 PMMA 매트릭스(저분자량 및 고분자량)와 다양한 함량 비율로 복합화하여 스판 코팅 방식으로 박막을 제작하고, 광학적 특성 유지와 자외선·열 안정성을 종합적으로 평가하였다. 합성된 CsPbBr_3 양자점 및 PMMA/ CsPbBr_3 복합체는 모두 507 nm 부근의 발광 피크와 104 meV 수준의 좁은 반치폭(FWHM)을 유지하여, PMMA 결합이 원래의 광학적 특성을 유지함을 확인하였다.

자외선 조사 실험 결과, PMMA 함량이 증가할수록 PL 피크 적색 편이가 완화되었으며, 특히 저분자량 PMMA 복합체에서 10시간 후 초기 PL 세기의 최대 53.9%를 유지하였다. 이는 고농도의 저분자량 PMMA가 CsPbBr_3 표면의 리간드 탈착 및 나노 결정 응집을 효과적으로 억제함으로써 자외선에 의한 표면 결합 생성이 감소했기 때문으로 해석된다.

열처리 평가에서는 고함량의 고분자량 PMMA가 가장 높은 함량 비율(2:1)에서 초기 PL 세기의 73%를 유지하였다. 긴 사슬 구조와 높은 사슬 얹힘 밀도로 인해 열전달 경로가 증가한 결과로 보인다. 이와 같이 PMMA의 분자량 및 함량을 전략적으로 조절함으로써, CsPbBr_3 양자점의 환경 안정성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

따라서, 페로브스카이트 기반 광전소자용 복합체 설계 시, 용도에 맞춰 PMMA의 분자량과 함량을 최적화하는 것이 중요하며, 본 연구에서 제시한 결과는 디스플레이, 센서, LED 등 다양한 응용 분야에서 무기 페로브스카이트 양자점의 장기적 안정성을 확보하기 위한 고분자 캡슐화 전략 수립에 유용한 기초 자료로 활용될 수 있다.

후 기

본 연구는 전남대학교 학술연구비와 교육부의 재원으로 한국기초과학지원연구원 국가연구시설장비진흥센터의 지원을 받은 기초과학연구역량강화사업 핵심연구지원센터 조성 지원 과제에서 에너지융복합전문핵심연구지원센터를 조성하여 수행된 연구결과임(과제번호 RS-2025-02413029).

REFERENCES

1. Protesescu, L., Yakunin, S., Bodnarchuk, M. I., Krieg, F., Caputo, R., Hendon, C. H., Yang, R. X., Walsh, A., and Kovalenko, M. V., "Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites (CsPbX_3 , X = Cl, Br, and I): Novel Optoelectronic Materials Showing Bright Emission with Wide Color Gamut," *Nano Letters*, Vol. 15, No. 6, 2015, pp. 3692–3696.
2. Yakunin, S., Protesescu, L., Krieg, F., Bodnarchuk, M. I., Nedelcu, G., Humer, M., De Luca, G., Fiebig, M., Heiss, W., and Kovalenko, M. V., "Low-Threshold Amplified Spontaneous Emission and Lasing from Colloidal Nanocrystals of Cesium Lead Halide Perovskites," *Nature Communications*, Vol. 6, 2015, 8056.
3. Ramasamy, P., Lim, D.-H., Kim, B., Lee, S.-H., Lee, M.-S., and Lee, J.-S., "All-Inorganic Cesium Lead Halide Perovskite Nanocrystals for Photodetector Applications," *Chemical Communications*, Vol. 52, No. 10, 2016, pp. 2067–2070.
4. Bai, S., Yuan, Z., and Gao, F., "Colloidal Metal Halide Perovskite Nanocrystals: Synthesis, Characterization, and Applications," *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 4, No. 15, 2016, pp. 3898–3904.
5. Huang, P.-C., Yang, T.-J., Lin, C.-J., Wang, M.-Y., and Lin, W.-C., "Unraveling the Heat- and UV-Induced Degradation of Mixed Halide Perovskite Thin Films via Surface Analysis Techniques," *Langmuir*, Vol. 40, No. 23, 2024, pp. 11873–11887.
6. Philippe, B., Park, B.-W., Lindblad, R., Oscarsson, J., Ahmadi, S., Johansson, E. M. J., and Rensmo, H., "Chemical and Electronic Structure Characterization of Lead Halide Perovskites and Stability Behavior under Different Exposures—A Photoelectron Spectroscopy Investigation," *Chemistry of Materials*, Vol. 27, No. 56, 2015, pp. 1720–1731.
7. Fausia, K. H., Nharangatt, B., Vinayakan, R. N., Ramesh, A. R., Santhi, V., Dhandapani, K. R., Manoj, T. P., Chatanathodi, R., Jose, D., and Sandeep, K., "Probing the Structural Degradation of CsPbBr_3 Perovskite Nanocrystals in the Presence of H_2O and H_2S : How Weak Interactions and HSAB Matter," *ACS Omega*, Vol. 9, No. 7, 2024, pp. 8417–8424.
8. Boote, B. W., Andaraarachchi, H. P., Rosales, B. A., Blome-Fernández, R., Zhu, F., Reichert, M. D., Santra, K., Li, J., Petrich, J. W., Vela, J., and Smith, E. A., "Unveiling the Photo- and Thermal-Stability of Cesium Lead Halide Perovskite Nanocrystals," *ChemPhysChem*, Vol. 20, No. 20, 2019, pp. 2647–2656.
9. Carulli, F., Erroi, A., Bruni, F., Zaffalon, M. L., Liu, M., Pascazio, R., El Adel, A., Catalano, F., Cemmi, A., Di Sarcina, I., Rossi, F., Lazarini, L., Manno, D. E., Infante, I., Li, L., and Brovelli, S., "Surface Modified CsPbBr_3 Nanocrystals Enable Free Radical Thermal Polymerization of Efficient Ultrafast Polystyrenic Nanocomposite Scintillators," *ACS Energy Letters*, Vol. 10, No. 1, 2025, pp. 12–21.
10. Wang, Z., Fu, R., Li, F., Xie, H., He, P., Sha, Q., Tang, Z., Wang, N., and Zhong, H., "One-Step Polymeric Melt Encapsulation Method to Prepare CsPbBr_3 Perovskite Quantum Dots/Poly-methyl Methacrylate Composite with High Performance," *Advanced Functional Materials*, Vol. 31, No. 2010009, 2021.
11. Meyns, M., Perálvarez, M., Heuer-Jungemann, A., Hertog, W., Ibáñez, M., Nafria, R., Genç, A., Arbiol, J., Kovalenko, M. V., Carreras, J., Cabot, A., and Kanaras, A. G., "Polymer-Enhanced Stability of Inorganic Perovskite Nanocrystals and Their Application in Color Conversion LEDs," *ACS Applied Materials & Interfaces*, Vol. 8, No. 30, 2016, pp. 19579–19586.
12. Zhang, Q., Wang, B., Zheng, W., Kong, L., Wan, Q., Zhang, C., Li, Z., Cao, X., Liu, M., and Li, L., "Ceramic-like Stable CsPbBr_3 Nanocrystals Encapsulated in Silica Derived from Molecular Sieve Templates," *Nature Communications*, Vol. 11, 2020, 31.
13. Lian, Z.-D., Wang, B., Wu, Z.-S., Lin, H., Yan, S.-S., Li, J.-L., Zhang, K., Zeng, Q.-G., Xu, J.-C., Chen, S., Wang, S.-P., and Ng, K. W., "Highly Stable CsPbBr_3 Perovskite Nanocrystals Encapsulated in Metal–Organic Frameworks for White Light-Emitting Diodes," *ACS Applied Nano Materials*, Vol. 6, No. 3, 2023, pp. 1808–1816.
14. Qaid, S. M. H., Ghaithan, H. M., AlHarbi, K. K., Al-Asbahi, B. A., and Aldwayyan, A. S., "Enhancement of Light Amplification of CsPbBr_3 Perovskite Quantum Dot Films via Surface Encapsulation by PMMA Polymer," *Polymers*, Vol. 13, No. 15, 2021, 2574.
15. Chen, L.-C., Tien, C.-H., Tseng, Z.-L., Dong, Y.-S., and Yang, S., "Influence of PMMA on All-Inorganic Halide Perovskite CsPbBr_3 Quantum Dots Combined with Polymer Matrix," *Materials*, Vol. 12, No. 6, 2019, 985.
16. Qaid, S. M. H., Ghaithan, H. M., Al-Asbahi, B. A., and Aldwayyan, A. S., "Ultra-Stable Polycrystalline CsPbBr_3 Perovskite–Polymer Composite Thin Disk for Light-Emitting Applications," *Nanomaterials*, Vol. 10, No. 12, 2020, 2382.
17. Rainò, G., Yazdani, N., Boehme, S. C., Kober-Czerny, M., Zhu, C., Krieg, F., Rossell, M. D., Erni, R., Wood, V., Infante, I., and Kovalenko, M. V., "Ultra-Narrow Room-Temperature Emission from Single CsPbBr_3 Perovskite Quantum Dots," *Nature Communications*, Vol. 13, 2022, 2587.
18. Butkus, J., Vashishtha, P., Chen, K., Gallaher, J. K., Prasad, S. K. K., Metin, D. Z., Laufersky, G., Gaston, N., Halpert, J. E., Hodgkiss, J. M., "The Evolution of Quantum Confinement in CsPbBr_3 Perovskite Nanocrystals," *Chemistry of Materials* 2017, Vol. 29, No. 8, 2017, pp 3644–3652.
19. Langford, J. I., Wilson, A. J. C., "Scherrer after Sixty Years: A Survey and Some New Results in the Determination of Crystallite Size," *Journal of Applied Crystallography*, 1978, 11, pp. 102–113.
20. Jin, W.S., Jung J.H., "Recent Progress of ZnSe(Te) Quantum Dot and Their Application in Blue Light Emitting Diodes," *Composites Research*, Vol. 38, No. 2, 2025, pp. 57–66.
21. Zeng, X., Yu, L., Peng, K., Yu, Y., Sun, D., Miao, C., and Fu, Y., "Ultrastable FB@ CsPbBr_3 /PMMA Composites Based on In-Situ Passivation and Encapsulation for WLED Applications," *Journal of Luminescence*, Vol. 261, No. 119910, 2023, 119910.
22. Li, J., Bo, B., and Gao, X., "The Degradation of Structure and Luminescence in CsPbBr_3 Perovskite Nanocrystals under UV Light Illumination," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2036, No. 1, 2018, 030018.
23. Trutschel, M.-L., Mordvinkin, A., Furtado, F., Willner, L., and

- Saalwächter, K., "Time-Domain NMR Observation of Entangled Polymer Dynamics: Focus on All Tube-Model Regimes, Chain Center, and Matrix Effects," *Macromolecules*, Vol. 51, No. 11, 2018, pp. 4108-4117.
24. Yuan, X., Hou, X., Li, J., Qu, C., Zhang, W., Zhao, J., and Li, H., "Thermal Degradation of Luminescence in Inorganic Perovskite CsPbBr_3 Nanocrystals," *Physical Chemistry Chemical Physics*, Vol. 19, 2017, pp. 8934-8940.
25. Henry, A., *Annual Review of Heat Transfer*, Begell House, Inc., Danbury, CT, USA, 2014.