

PTFE 함량에 따른 에어로졸 증착 공정으로 제작된 CsPbBr₃/Al₂O₃ 복합 필름의 구조적 및 Photoluminescence 특성 평가

안원일¹, 김석훈¹, 김성훈² , 오종민¹ 

¹ 광운대학교 전자재료공학과

² 동의대학교 Brain Busan 21 Plus 센터

Evaluation of Structural Properties and Photoluminescence Properties of CsPbBr₃/Al₂O₃ Films According to PTFE Content via Aerosol Deposition Process

Won-Il Ahn¹, Seok-Hun Kim¹, Sunghoon Kim², and Jong-Min Oh¹

¹ Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University, Seoul 01897, Korea

² Center for Brain Busan 21 Plus Program, Dong-Eui University, Busan 47340, Korea

(Received July 25, 2025; Revised August 8, 2025; Accepted August 11, 2025)

Abstract: Metal halide perovskites (MHPs) have attracted attention as new display materials due to their excellent optical properties, but their application is limited by the complexity of conventional synthesis methods and the film formation processes. As an alternative, color conversion film fabricated via the aerosol deposition (AD) process using CsPbBr₃/Al₂O₃ powder, a ceramic matrix-based MHP composite, has expanded the practical utility of MHPs by simplifying both the synthesis and film formation steps. Nevertheless, the hammering effect that occurs during the AD process can damage the MHP crystal structure, leading to degradation of its optical properties. Therefore, in this study, to overcome the problem of optical degradation, we compared the structural and photoluminescence (PL) properties of films fabricated by adding polytetrafluoroethylene (PTFE), a material with a buffering effect, to the CsPbBr₃/Al₂O₃ starting powder at mass ratios of 0, 0.1, 0.5, 1, and 2 wt% to mitigate the hammering effect. The film containing 1 wt% PTFE exhibited the highest PL performance, achieving a luminous efficiency of 52.1 lm/W. This improvement is attributed to PTFE providing an optimal buffering effect without forming aggregates on the film surface. These results further enhance the applicability of AD-based color conversion films and are expected to contribute to the development of high-resolution display technologies.

Keywords: CsPbBr₃/Al₂O₃, Aerosol deposition, Polytetrafluoroethylene, Hammering effect

최근 디스플레이 관련 기술은 지속적으로 발전하고 있으며, 특히 플렉서블 디스플레이, 웨어러블 디스플레이와

같은 차세대 응용 분야에서 픽셀의 소형화를 통한 고해상도의 디스플레이 구현이 요구되고 있다 [1]. 이에 따라, 정밀한 색 표현과 높은 휘도를 구현할 수 있는 새로운 소재의 수요가 증가하고 있다. 메탈 할라이드 페로브스카이트 (metal halide perovskites, MHPs)는 높은 양자 효율과 뛰어난 색순도를 가지고 있어 미세 픽셀 구조에서도 색 재현성이 뛰어나 차세대 디스플레이 소재로 주목받고 있다.

✉ Sunghoon Kim; hoon@desu.ac.kr

Jong-Min Oh; jmOH@kw.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.

하지만, MHPs는 exciton 결합 에너지가 낮아 exciton이 전자와 정공으로 쉽게 해리되어 발광 효율이 저하되는 단점을 가지고 있다 [2]. 이러한 단점을 극복하기 위해 MHPs를 주로 Perovskite quantum dots (PeQDs) 형태로 합성하는 연구가 꾸준히 진행되고 있다. PeQDs는 hot injection, ligand-assisted reprecipitation (LARP)과 같은 방법을 통해 합성되며, 결정 표면에 유기 리간드가 결합된 구조를 갖는다 [3]. 이러한 구조의 페로브스카이트 입자는 결정 크기가 작아 exciton 결합 에너지를 증가시키며, 유기 리간드는 결정 표면을 패시베이션하여 발광 효율 저하 문제를 개선할 수 있다. 그러나, 유기 리간드는 수분, 열, 산소 등의 외부 환경에 노출될 경우 쉽게 탈리되는 단점이 있으며, 이로 인해 표면에 결합이 형성되어 발광 효율이 저하되는 문제가 발생한다. 이를 보완하기 위해 폴리머 매트릭스 기반 페로브스카이트 구조가 도입되었다. 폴리머가 PeQDs 결정 주위를 둘러싸 외부 환경과의 접촉을 차단하여 안정성을 향상시킬 수 있다. 하지만, 폴리머 소재는 고온에 취약하여 높은 온도에서 광특성이 쉽게 저하되는 한계점이 있다 [4]. 이에 따라, 폴리머 대신 열 안정성이 우수한 세라믹 소재를 활용한 세라믹 매트릭스 기반 페로브스카이트가 대안으로 제시되었다 [5]. Al₂O₃를 매트릭스로 사용하는 CsPbBr₃/Al₂O₃ 복합 분말을 제작하였으며, 고온 환경에서 광특성이 크게 저하되지 않는 우수한 열 안정성을 확인하였다 [6].

추가적으로, 폴리머 매트릭스 기반 페로브스카이트는 주로 용액 기반 공정을 통해 색변환 필름 형태로 제조되었는데, 용액 기반 공정으로 제조된 필름은 잔류 용매를 제거하기 위한 후처리가 필요해 공정의 복잡성을 증가시킨다. 또한, 후처리 이후에도 용매가 잔존할 수 있고 후처리에 의해 필름이 손상될 가능성도 존재한다 [7,8]. 이러한 단점을 개선하기 위해, 본 연구에서는 용매를 사용하지 않고 분말을 직접 증착할 수 있는 에어로졸 증착(aerosol deposition, AD) 공정에 주목하였다. AD 공정은 다양한 입자 크기 및 조성을 가진 복합 분말을 기판에 충돌시켜 성막하는 방식으로, 상온에서 증착이 가능하고 용매를 사용하지 않는다. 따라서, 기존 용액 공정과 달리 별도의 후처리 과정이 필요 없어 공정 과정에서 필름의 손상 가능성이 현저히 낮다. 이로 인해 공정 안정성이 크게 향상되며, 용액 기반 공정의 한계를 극복할 수 있는 대안이 될 수 있다고 판단하였다. 그러나, AD 공정에서는 분말이 기판에 높은 kinetic 에너지로 충돌하는 hammering effect가 발생하며, 이로 인해 MHPs 결정이 손상되어 광특성이 저하되는 문제가 발생했다. 선행 연구에서는 hammering effect를 완화하기 위한 방안으로 CsPbBr₃/Al₂O₃ 복합 분말에

polytetrafluoroethylene (PTFE) 분말을 첨가하여 완충 효과를 주어 광특성을 개선한 바 있다 [5]. 하지만 PTFE의 완충 효과가 발생하는 메커니즘이나 필름의 구조 및 조성에 미치는 영향에 대한 분석이 미흡하며, 광특성 향상을 극대화할 수 있는 최적의 PTFE 함량 조건에 대한 논의가 부족하였다. 따라서, 본 연구에서는 이를 보다 정량적으로 분석하기 위해 PTFE 분말과 CsPbBr₃/Al₂O₃ 복합 분말의 질량비를 조절하여 CsPbBr₃/Al₂O₃-PTFE 복합 분말을 제조하고, AD 공정을 이용하여 다양한 PTFE 함량을 가진 CsPbBr₃/Al₂O₃-PTFE 복합 필름을 제작하였다. PTFE 함량에 따른 각 복합 필름의 두께, 표면 조도와 같은 구조적 특성과 광특성을 측정하고 분석하였다. 이를 통해 PTFE 함량에 변화에 따른 완충 효과를 분석하였으며, 광특성 향상을 극대화할 수 있는 최적의 PTFE 함량 조건을 도출하였다.

CsPbBr₃/Al₂O₃ 복합 분말을 합성하기 위해 CsBr (99.9%, Alfa Aesar), PbBr₂ (99%, Kojundo Korea), α -Al₂O₃ (99.8%, Showa Denko), dimethyl sulfoxide (DMSO, anhydrous 99.9%, Samchun)를 사용하였다. 화학양론적 비율로 구성된 CsBr와 PbBr₂를 교반하여 100°C로 가열된 DMSO에 완전히 용해시켰다. 이 혼합 용액에 α -Al₂O₃ 분말을 첨가한 뒤, planetary mixer를 통해 슬러리를 제조하였다. 제조된 슬러리는 DMSO가 증발하여 페이스트를 형성할 때까지 160°C에서 가열하였으며, 160°C에서 24시간 동안 추가로 가열하여 잔류 DMSO를 완전히 제거하였다. 응고된 분말은 유발(mortar)을 사용하여 10분간 분쇄하였으며, 500°C에서 1시간 동안 열처리를 수행하여 광학적 특성을 개선하였다. 이 과정을 통해 최종적으로 CsPbBr₃/Al₂O₃ 복합 분말을 얻었다. PTFE (99.5%, Daikin Industries) 분말은 CsPbBr₃/Al₂O₃ 복합 분말에 다양한 질량비(0, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0 wt%)로 첨가하였으며, 유발에서 5분간 핸드믹싱하여 균일하게 혼합하였다. CsPbBr₃/Al₂O₃-PTFE 복합 분말 및 필름의 입자 형태와 표면 형상은 주사전자현미경(FE-SEM, MIRA-3XMU, TESCAN)을 통해 관찰하였다. 복합 필름의 결정학적 특성은 Cu K α 방사선($\lambda = 0.15418$ nm)을 사용한 X-선 회절분석기(XRD, X'PERT-PRO, Panalytical)를 통해 10~80°의 2-theta 범위에서 측정하였다. 필름 두께와 표면 조도(Ra) 값은 surface profiler XP-1을 통해 측정하였다. 광특성은 photoluminescence (PL) 특성을 확인하였으며, Jasco FP-8100를 통해 측정하였다. AD 공정 장비의 주요 구성 요소는 에어로졸 챔버, 데포지션 챔버, 캐리어 가스, 노즐로 이루어져 있다. 챔버 내부는 분말의 일방적인 이동을 위해 진공 시스템을 통해 챔버 내부를 진공

상태로 유지한다. 에어로졸 챔버에 캐리어 가스를 주입하면 배치된 분말이 에어로졸화 되며, 에어로졸 챔버와 데포지션 챔버 사이의 압력 차이로 인해 에어로졸화 된 분말은 노즐을 통해 데포지션 챔버로 이동한다. 이동된 분말은 타겟 기판과 충돌하여 발생하는 hammering effect를 통해 필름을 형성한다. 타겟 기판으로는 글라스를 사용하였으며, 구조적 특성을 분석하기 위해 슬라이드 글라스 $10 \times 10 \text{ mm}^2$ 의 면적에 증착하였으며, 광학적 특성을 분석하기 위해 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 면적의 커버 글라스에 증착하였다.

그림 1은 SEM 분석을 통해 합성 전후의 분말의 형상 변화를 비교한 결과이다. 그림 1(a)는 복합 분말 합성 이전의 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 입자 형태를 보여주며, $\text{CsPbBr}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 합성 과정을 거친 후 Al_2O_3 입자 표면에 200~300 nm 크기의 CsPbBr_3 결정이 분산되어 있는 것을 그림 1(b)를 통해 확인할 수 있다. 이는 $\text{CsPbBr}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 복합 분말이 성공적으로 합성되었음을 보여준다. 그림 1(c)는 혼합 이전의 PTFE 분말의 이미지를 나타내며, 입자들이 서로 응집된 상태를 확인할 수 있다. 그림 1(d)는 $\text{CsPbBr}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 복합 분말과 핸드믹싱된 후의 $\text{CsPbBr}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ -PTFE 복합 분말의 이미지로, PTFE 분말이 고르게 분산되어 $\text{CsPbBr}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 복합 분말과 균일하게 혼합된 것을 확인할 수 있다.

우선, PTFE 함량이 필름 성막에 미치는 영향을 확인하기 위하여 동일한 실험 조건 아래 PTFE 함량만을 변수로 설정하여 성막을 진행하였으며, 그림 2(a)가 제작된 필름의 이미지를 나타낸다. 0, 0.1, 0.5, 1, 2 wt%의 PTFE가 첨가된 복합 분말로 제작된 필름은 각각 1, 4, 20, 30, 65 μm 의 두께로 성막되었음을 확인하였다. 반면, PTFE 3 wt% 필름은 표면에 압분체 형태로 형성되어 기판과의 접착력

이 적어져 작은 외력에도 쉽게 박리되는 현상을 보였다. 이는 과도한 PTFE 함량으로 인해 hammering effect가 일어나지 못할 정도로 kinetic energy가 감소된 것이 원인으로 판단된다. 또한, 각 조건에 따른 필름의 표면조도(R_a) 값을 측정하였으며, 측정된 두께를 기반으로 계산된 성막률과 함께 그림 2(b)로 나타내었다. PTFE 함량이 증가함에 따라 성막률이 점진적으로 증가하였으며, R_a 값 또한 유사한 경향이 나타난다. 이는 PTFE의 연화 특성으로 인해 함량이 증가함에 따라 완충 효과가 비례적으로 증가한 결과로 해석된다. PTFE 분말의 함량과 완충 효과의 상관관계를 면밀히 분석하기 위해서 PTFE 함량별로 제작된 필름의 결정립 크기(crystallite size)와 표면 형상을 분석하였다.

그림 3(a), (b), (c)는 각각 0.5, 1, 2 wt%의 PTFE가 첨가된 분말로 제작한 필름의 XRD 패턴을 나타낸다. 모든 필름에서 Al_2O_3 의 (012), (104), (110), (113), (024), (116), (018), (214), (300), (1010)면, CsPbBr_3 의 (110), (200)면, PTFE의 (100)면에 해당하는 회절 피크가 관찰되었으며, 이를 통해 증착에 사용된 복합 분말의 구성 물질이 필름 내

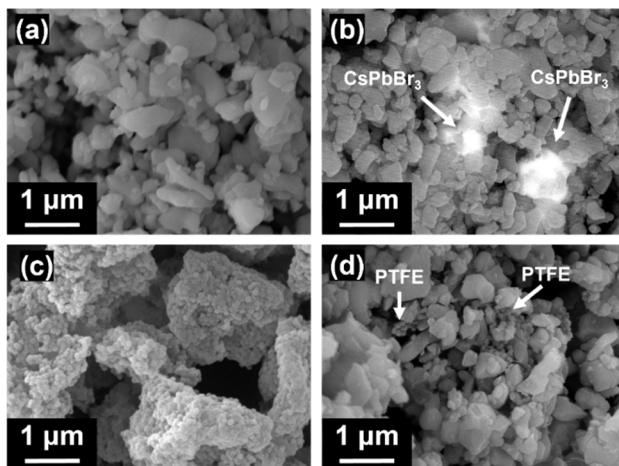


Fig. 1. SEM images of each powder: (a) $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, (b) $\text{CsPbBr}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$, (c) PTFE, and (d) $\text{CsPbBr}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ -PTFE.

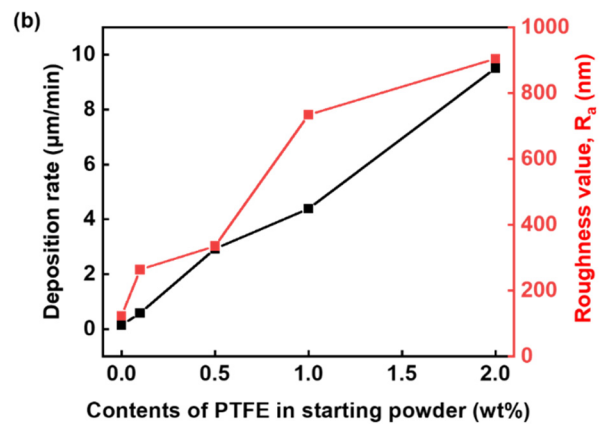
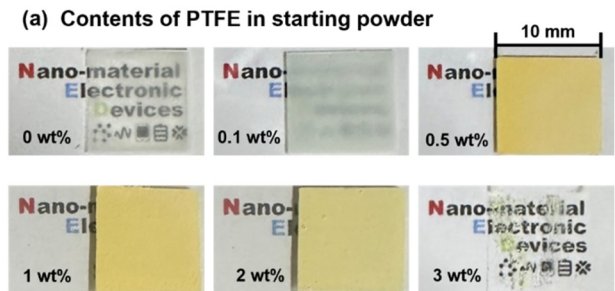


Fig. 2. (a) Optical images of CsPbBr_3 -PTFE film with different PTFE contents and (b) roughness and film formation rate of different PTFE contents.

에 포함되어 있음을 확인하였다. PTFE 함량에 따른 완충 효과 변화를 간접적으로 파악하기 위해 XRD 패턴을 기반으로 Halder-Wagner (H-W) method를 적용하여 crystallite size를 계산하였다 [9].

$$\left(\frac{\beta^*}{d^*}\right)^2 = \frac{1}{D} \cdot \frac{\beta^*}{d^{*2}} + \frac{\varepsilon^2}{4}$$

위 수식에서 β 는 피크의 반치폭(full width at half maximum, FWHM), d 는 격자면 간격에 해당한다 [9]. crystallite size 계산에는 Al_2O_3 의 (012), (104), (110), (113), (116)면에 해당하는 회절 피크를 사용하였다. 그림 3(d), (e), (f)는 계산을 통해 그려진 H-W plot이며, PTFE 0.5, 1, 2 wt% 필름의 crystallite size는 각각 20.2, 30.1,

45.9 nm로 나타났다. 이는 PTFE 함량이 증가함에 따라 crystallite size가 점차 증가함을 의미하며, PTFE의 완충 효과가 PTFE 함량 증가에 따라 향상되었음을 시사한다.

PTFE 함량 변화에 따른 필름 표면 형상 변화를 확인하기 위해 표면 SEM을 측정하였으며, 그 결과를 그림 4로 나타내었다. PTFE를 첨가하지 않은 그림 4(a)의 필름은 PTFE를 첨가하여 제작된 필름에 비해 상대적으로 표면 거칠기가 낮고 치밀하게 성막되었음을 확인하였다. 반면, PTFE 함량이 증가할수록 분말이 응집되는 부분이 많아져 표면 거칠기가 높은 경향을 나타냈다. 이는 PTFE 함량이 증가함에 따라 완충 효과가 상승한 것이 원인으로 판단된다. 표면 거칠기 상승과 함께, 그림 4(e)에서 PTFE 함량이 2 wt%인 필름 표면에는 직경 약 12 μm 의 응집체가 형성된 것이 확인되었으며 응집체 표면에 PTFE 섬유들이 관찰

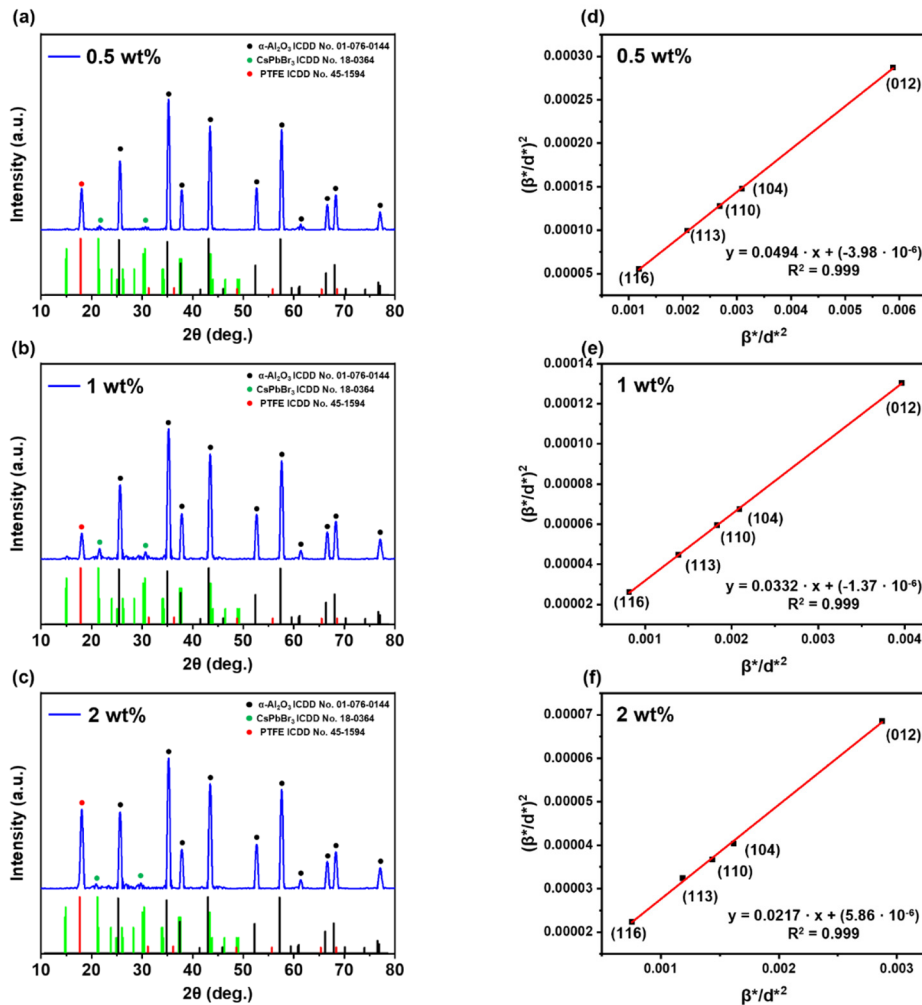


Fig. 3. XRD patterns and calculated Halder-Wagner plots from XRD data of composite films with PTFE contents of (a, d) 0.5 wt%, (b, e) 1 wt%, and (c, f) 2 wt%.

Table 1. Crystallite sizes calculated by the Halder-Wagner method for composite films with PTFE contents.

| No. | PTFE contents | Crystallite size |
|-----|---------------|------------------|
| 1 | 0.5 | 20.2 nm |
| 2 | 1 | 30.1 nm |
| 3 | 2 | 45.9 nm |

된 것으로 보아 과도한 PTFE 함량에 의해 PTFE 간의 응집 현상이 발생한 것으로 판단된다(그림 4(f)) [10].

그림 5(a), (b)는 blue light emitting diode (LED) 광원 하에 PTFE 함량에 따른 필름의 PL 특성과 발광 효율 (luminous efficiency)을 비교한 결과를 나타낸다. 필름 두께가 변수로 작용하지 않도록 성막률이 가장 낮은 0 wt% 필름을 기준으로 하여 최대로 증착 가능한 두께인 3 μm 로 설정하였다. 각 함량별 필름의 성막률 데이터를 바탕으로 증착 시간을 조절하여 모든 PTFE 함량별 필름을 두께 3 μm 로 동일하게 제작하였다. 얇은 필름 두께로 인해 일부 blue LED 광은 파장 변환 없이 그대로 투과되기도 하였다. PTFE 0.1 wt% 필름의 경우, 투과율이 가장 높았으며, 이는 PTFE 분말이 표면 및 내부 결함을 메우며 광 산란을 감소시킨 결과로 판단된다 [11]. PTFE 함량이 0, 0.1, 0.5, 1 wt%로 증가함에 따라 발광 효율은 각각 4.8, 9.2, 20.3, 52.1 lm/W로 증가하였으며, PTFE 1 wt% 필름에서 발광 효율이 가장 높게 나타났다. 그러나, PTFE 2 wt% 필름의 발광 효율은 4.2 lm/W로 급감하였으며, 빛의 투과가 거의

일어나지 않는 결과를 보였다. 이는 과도한 PTFE 함량으로 인해 형성된 PTFE 응집체가 빛의 투과 및 CsPbBr₃의 파장 변환을 방해한 결과로 해석된다. 따라서, 1 wt%의 PTFE는 응집체 형성 없이 충분한 완충 효과를 주어 PL 특성을 개선하는 최적의 함량임을 확인하였다. 이를 바탕으로 필름 두께에 따른 PL 특성 변화를 추가로 분석하였다. 증착 시간을 조절하여 20, 30, 40 μm 두께의 PTFE 1 wt% 필름을 추가로 제작하였으며, 그림 5(c), (d)는 해당 필름의 PL 특성과 발광 효율을 비교한 결과를 나타낸다. 3 μm 두께의 필름은 52.1 lm/W로 가장 높은 발광 효율을 보였으나 얇은 필름 두께로 인해 파장 변환되지 않은 빛의 투과가 가장 크게 나타났다. 20 μm 두께의 필름은 28.5 lm/W로 3 μm 두께의 필름에 비해 발광 효율이 다소 감소하였으나 파장 변환되지 않은 빛의 투과가 크게 감소하였다. 30 μm 두께의 필름은 27.5 lm/W로 20 μm 두께의 필름과 유사한 발광 효율을 보였으나, 파장 변환되지 않은 빛의 투과가 대부분 차단되었음을 확인하였다. 반면, 40 μm 두께 필름은 3.6 lm/W의 낮은 발광 효율을 보였으며, 과도한 필름 두께로 인해 빛이 투과되지 못하는 것을 확인하였다. 이 결과를 통해 파장 변환되지 않은 빛의 차단과 발광 효율의 균형을 고려할 때 최적의 필름 두께는 30 μm 임을 알 수 있다.

본 연구에서는 AD 공정을 통해 필름을 성막할 때 PTFE 함량에 따른 완충 효과의 변화를 분석하기 위해 PTFE 함량이 0, 0.1, 0.5, 1, 2 wt%인 다섯 종류의 CsPbBr₃/Al₂O₃-PTFE 복합 필름을 제작하여 구조적 특성과 PL 특성을 평가하였다. 먼저, 구조적 특성 변화를 분석한 결과는 다음과

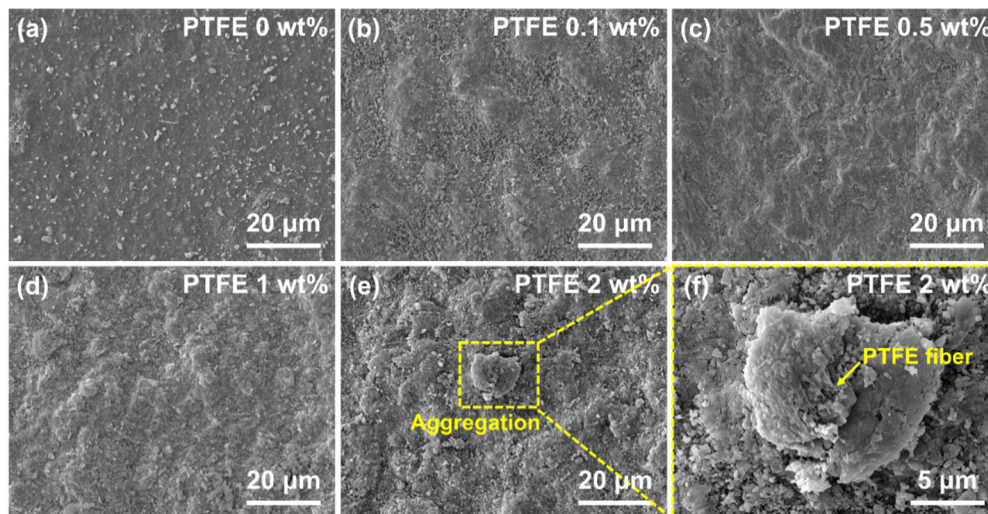


Fig. 4. The surface SEM images of composite films with different PTFE contents; (a) 0 wt%, (b) 0.1 wt%, (c) 0.5 wt%, (d) 1 wt%, (e) 2 wt%, and (f) 2 wt% scale-up.

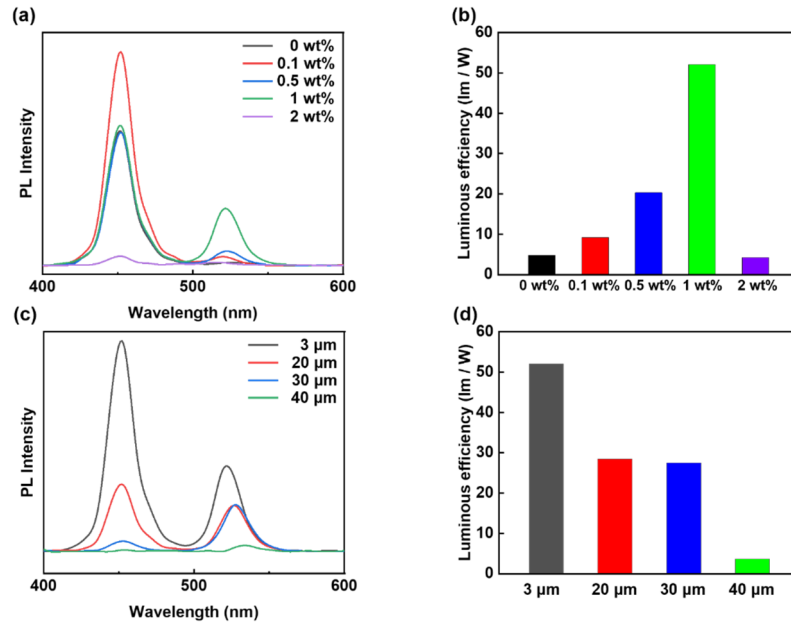


Fig. 5. PL properties and luminous efficiency of composite films via (a-b) PTFE contents and (c-d) film thickness (1 wt% of PTFE content).

같다. PTFE 함량이 증가함에 따라 필름의 성막률과 표면 거칠기가 점진적으로 증가하였으며, H-W method를 통해 계산한 0.5, 1, 2 wt%의 필름의 crystallite size는 각각 20.2, 30.1, 45.9 nm로 나타났다. 이를 통해 PTFE 함량 증가에 따라 완충 효과가 향상됨을 확인하였다. 이어서, PL 특성 변화에 대한 분석 결과는 다음과 같다. PTFE 함량 0, 0.1, 0.5, 1, 2 wt% 필름의 발광 효율은 각각 4.8, 9.2, 20.3, 52.1, 4.2 lm/W로 나타났으며, PTFE 함량이 증가할수록 MHPs의 손상이 억제되어 PL 특성이 향상되는 경향을 보였다. 그러나, PTFE 2 wt% 필름은 PTFE 간의 응집체 형성이 발생하여 오히려 PL 특성이 감소하는 결과를 나타내었다. 따라서, 본 연구에서는 PTFE 1 wt% 필름이 PTFE 간의 응집 현상 없이 MHPs의 손상을 최소화하여 가장 높은 PL 특성을 달성하였음을 확인하였다. 이러한 최적화 과정을 통해 AD 기반 색변환 필름의 발광 효율이 현저히 향상되었으며, 기존의 높은 열안정성과 후공정 불필요성이라는 장점과 함께 우수한 광특성까지 확보할 수 있음을 확인하였다. 결과적으로, 색변환 필름의 성능과 공정효율을 동시에 만족시킬 수 있음을 보여주며, 마이크로 LED와 같은 차세대 고해상도 디스플레이에 적용 가능성을 제시한다.

감사의 글

본 연구는 산업통산자원부 한국산업기술진흥원 화학물 전력반도체 전문인력양성사업(RS-2025-02214408), 기술혁신개발사업(RS-2022-00154720) 및 과학기술정보통신부 한국연구재단 기초연구사업(RS-2024-00415922, No.RS-2023-00212985) 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] L. Hu, J. Choi, S. Hwangbo, D. H. Kwon, B. Jang, S. Ji, J. H. Kim, S. K. Han, and J. H. Ahn, *npj Flexible Electron.*, **6**, 100 (2022). doi: <https://doi.org/10.1038/s41528-022-00234-z>
- [2] H. Lee, J. Park, S. Kim, S. C. Lee, Y. H. Kim, and T. W. Lee, *Adv. Mater. Technol.*, **5**, 2000091 (2020). doi: <https://doi.org/10.1002/admt.202000091>
- [3] J. Zou, M. Li, X. Zhang, and W. Zheng, *J. Appl. Phys.*, **132**, 220901 (2022). doi: <https://doi.org/10.1063/5.0126496>
- [4] Y. Wang, J. He, H. Chen, J. Chen, R. Zhu, P. Ma, A. Towers, Y. Lin, A. J. Gesquiere, S. T. Wu, and Y. Dong, *Adv. Mater.*, **28**, 10710 (2016). doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201603964>
- [5] S. Kim, M. Y. Cho, I. S. Kim, W. J. Kim, S. H. Park, S. Baek, J. M. Oh, and S. W. Kim, *Adv. Mater. Interfaces*, **6**, 1900359 (2019). doi: <https://doi.org/10.1002/admi.201900359>

ORCID

Sunghoon Kim
Jong-Min Oh

<https://orcid.org/0000-0003-2098-5962>
<https://orcid.org/0000-0001-6303-2876>

- [6] S. H. Kim, W. H. Shin, J. M. Oh, S. W. Kim, and S. Kim, *J. Ind. Eng. Chem.*, **150**, 369 (2025).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2025.02.057>
- [7] Y. Zhou, A. Najjar, J. Zhang, J. Feng, Y. Cao, Z. Li, X. Zhu, D. Yang, and S. F. Liu, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **14**, 28729 (2022).
doi: <https://doi.org/10.1021/acsami.2c02525>
- [8] D. H. Kang, S. Y. Kim, J. W. Lee, and N. G. Park, *J. Mater. Chem. A*, **9**, 3441 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1039/D0TA10581C>
- [9] D. Nath, F. Singh, and R. Das, *Mater. Chem. Phys.*, **239**, 122021 (2020).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122021>
- [10] K. J. Heo, H. J. Oh, H. Eom, Y. Kim, and J. H. Jung, *Sci. Total Environ.*, **783**, 147043 (2021).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147043>
- [11] M. Y. Cho, S. J. Park, S. M. Kim, D. W. Lee, H. K. Kim, S. M. Koo, K. S. Moon, and J. M. Oh, *Ceram. Int.*, **44**, 16548 (2018).
doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.06.076>