



## Research Article

# Development and application of poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite film with copper oxide nanoparticles for prevention of greening in potatoes

## 감자의 녹변 방지를 위한 산화구리 나노입자를 첨가한 poly(butylene adipate-co-terephthalate) 복합 필름의 개발 및 적용

Chanhyeong Kim, Jae-Young Her\*

김찬형 · 허재영\*

Department of Food Engineering, Mokpo National University, Muan 58554, Korea

목포대학교 식품공학과



OPEN ACCESS

**Citation:** Kim C, Her JY.  
Development and application of  
poly(butylene adipate-co-  
terephthalate) composite film  
with copper oxide nanoparticles  
for prevention of greening in  
potatoes. Food Sci. Preserv.,  
32(5), 870-883 (2025)

**Received:** May 22, 2025

**Revised:** June 26, 2025

**Accepted:** June 30, 2025

**\*Corresponding author**

Jae-Young Her

Tel: +82-61-450-2421

E-mail: jyher@mnu.ac.kr

Copyright © 2025 The Korean  
Society of Food Preservation.  
This is an Open Access article  
distributed under the terms of the  
Creative Commons Attribution  
Non-Commercial License  
(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits  
unrestricted non-commercial use,  
distribution, and reproduction in  
any medium, provided the  
original work is properly cited.

**Abstract** In this study, an eco-friendly packaging film was developed to inhibit light-induced greening in potatoes by incorporating various organic and inorganic fillers, such as copper oxide nanoparticles (CuONPs), zinc oxide nanoparticles, zinc basic salts, microcrystalline cellulose, nanocrystalline cellulose, and calcium-iron layered double hydroxides, into poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) via solvent casting. Among these fillers, the PBAT film with CuONPs exhibited the lowest UV-visible light transmittance, especially at 450 nm, and was selected for further study. Three potato cultivars commonly distributed for processing in Korea (*Superior*, *Duback*, and *Eunsun*) were packaged with the CuONPs composite films. Neat PBAT film, commercial HDPE film, and unpackaged samples were used as controls. After 6 days of fluorescent light exposure, the CuONPs composite film significantly reduced color change ( $\Delta E=7$ ) in *Duback* and *Eunsun*, indicating effective greening inhibition. SEM and XRD analyses confirmed uniform CuONPs dispersion without altering PBAT crystallinity. FT-IR spectra revealed no chemical interaction, indicating physical incorporation. Mechanical testing showed no significant difference in tensile strength, elongation, or elastic modulus compared to neat PBAT, with tensile strength values comparable to those of commercial LDPE. The CuONPs composite film also exhibited favorable water vapor permeability ( $5.83 \times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{m/m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$ ), supporting its potential as a functional packaging material for light-sensitive produce like potatoes.

**Keywords** poly(butylene adipate-co-terephthalate), copper oxide nanoparticles, potato tuber greening, composite films

## 1. 서론

감자(*Solanum tuberosum* L.)는 쌀, 밀, 옥수수에 이어 세계에서 네 번째로 많이 생산되는 작물로, 연간 약 3억 5천만 톤이 전 세계에서 재배된다. 한국에서는 1976년 미국에서 도입된 식용 품종 ‘수미’를 시작으로 감자 재배가 본격화되었으며, 1990년대 이후에는 국내에서 개발한 품종들이 점차 보급되기 시작하였다(Choi 등, 2008). 감자는 탄수화물 외에도 단백질과 비타민을 함유한 영양가 높은 식품으로, 다양한 생리활성 기능을 지녀 전 세계적으로 광범위하게 소비되며 다양한 요리 재료로 활용되고 있다(Bang 등, 2020). 그러나 감자는 빛에 노출될 경우 녹변 현상이 발생해 상품성이

크게 저하된다. 이 현상은 감자 껍질의 엽록소와 보조 색소가 반응한 결과이며, 품종에 따라 그 정도가 달라질 수 있다 (Grunenfelder 등, 2006). 이는 감자 품종의 엽록소 축적이 독립적일 수 있으며 서로 다른 유전적 메커니즘에 의해 조절될 수 있다 (Reeves 등, 1988). 녹변은 외관상의 변화뿐 아니라 독성 문제도 수반하는데, 감자의 괴경에는 글리코알칼로이드 (glycoalkaloids, TGAs)라 불리는  $\alpha$ -솔라닌과  $\alpha$ -차코닌이 포함되어 있으며, 이 두 성분은 전체 TGAs의 약 95%를 차지한다. 감자가 빛에 장시간 노출되면 이러한 독소의 농도가 증가하여 감자에 쓴맛을 유발하고, 심할 경우 인체에 구토, 현기증, 호흡 곤란 등의 증상을 유발할 수 있다 (Grunenfelder 등, 2006; Machado 등, 2007). 상업용 감자 품종의 TGAs 함량은 보통 200 mg/kg 이하로 관리되며, 이는 인체 섭취를 위한 안전 기준에 해당한다 (Machado 등, 2007). 감자의 쓴맛은 신선한 감자 100 g당 TGAs 함량이 15 mg을 초과할 때 나타나며, 미국 FDA (U.S. Food and Drug Administration)는 신제품에 대해 100 g당 20 mg을 상한선으로 설정하였다 (Grunenfelder 등, 2006). TGAs 함량은 품종과 환경적 요인 (빛, 상처, 보관 온도 등)에 따라 크게 달라질 수 있다. 따라서 감자를 보관하거나 유통할 때는 빛을 차단할 수 있는 적절한 포장에 필요하며, 이를 통해 독소 증가와 품질 저하를 예방할 수 있다 (Bang 등, 2020).

현대 식품 포장재로 널리 사용되는 플라스틱은 가벼움, 투명성, 유연성, 내구성과 같은 장점으로 인해 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다 (Ali 등, 2021; Rodrigues 등, 2019). 그러나 플라스틱은 생분해성이 낮아 폐기물 축적과 같은 심각한 환경 문제를 유발하며, 특히 미세플라스틱 문제는 전 세계적으로 주목받고 있다 (Flury와 Narayan, 2021; Sridhar 등, 2022). 플라스틱 오염은 농장, 해양, 극지방 등 지구 전역에서 관찰되며, 완전히 분해되는 데 수십 년에서 수백 년이 소요된다 (Ali 등, 2021; MacLeod 등, 2021). 이러한 문제를 해결하기 위해 생분해성 플라스틱이 환경 친화적인 대안으로 주목받고 있으며, 관련 연구도 활발히 진행되고 있다 (Lambert와 Wagner, 2017; Narayan, 1993; Sudesh와 Iwata, 2008). 대표적인 생분해성 플라스틱인 poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)와 poly(lactic acid) (PLA)는 친환경성, 우수한 가공성, 기계적 물성으로 인해 포장 산업에서 중요한 소재로 활용되고 있다 (Wang 등, 2016). 특히 PLA는 옥수수 전분과 같은 재생 가능한 자원으로부터 생산이 가능하며, 높은 기계적 강도, 광학적 투명성, 열가소성 특성을 지닌다 (Shankar와 Rhim, 2019). 그러나 낮은 유리 전이 온도와 열 안정성, 높은 탄성계수 등의 한계로 인해 적용 범위가 제한된다 (Wang 등, 2016). 반면, PBAT는 석유 기반 소재이지만 완전한 생분해가 가능하며, 우수한 열가소성, 낮은 수증기 투과도, 뛰어난 유연성과 가공성을 바탕으로 농업용 멀칭 필름 및 식품 포장재에 적합한 소재로 평가받고 있다 (Dammak 등, 2020; Jian 등, 2020; Shankar와 Rhim, 2016).

최근에는 생분해성을 유지하면서도 필름의 물성을 향상시키고 제조 비용을 절감하기 위해 다양한 필러를 첨가한 복합 필름에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다 (Atef 등, 2014; Botta 등, 2021; Ferreira 등, 2019; Pinheiro 등, 2017). 이러한 복합 필름은 필러와 고분자 간 상호작용을 통해 견고한 3차원 네트워크 구조를 형성하여 우수한 물리적 특성을 발현한다 (Ferreira 등, 2019). 사용되는 필러는 유기물과 무기물로 구분되며, 유기 필러로는 미세결정 셀룰로오스 (microcrystalline cellulose, MCC)와 나노결정 셀룰로오스 (nanocrystalline cellulose, NCC)가 있으며, PBAT 필름에 첨가할 경우 기계적 특성을 효과적으로 향상시킨다 (Botta 등, 2021; Pinheiro 등, 2017). 특히 NCC는 높은 표면적, 독특한 구조, 낮은 밀도, 우수한 기계적 강도를 제공하여 PBAT의 성능을 보완할 수 있다 (Atef 등, 2014). 무기 필러로는 산화구리 (CuONPs), 산화아연 (ZnONPs), 염기성 아연염 (zinc basic salt, ZBS), 갈슘-철 층상 이중 수산화물 (CaFe-LDHs) 등이 있으며, 이들 금속 나노입자는 제약, 바이오의학, 화장품, 식품 포장 등 다양한 산업 분야에서 그 유용성이 입증되어 왔다 (Shankar와 Rhim, 2017). 특히 CuONPs와 ZnONPs를 포함한 생분해성 복합 필름은 그람 음성 및 양성 병원성 박테리아에 대해 강력한 항균 활성을 나타내는 것으로 보고되었다. 이처럼 다양한 필러를 첨가한 복합 필름은 기계적 강도, 열적 안정성, 항균성 등의 물성을 향상시키는 데 기여하지만, 식품 포장에 실제로 적용된 사례는 아직 제한적인 상황이다 (Hasanin과 Youssef, 2022; Hasheminya 등, 2018; Shankar와 Rhim, 2019).

본 연구의 목적은 감자의 빛에 의한 녹변 (greening) 현상을 효과적으로 억제할 수 있는 친환경 포장재를 개발하는 것이다. 이를 위해 생분해성 소재인 PBAT에 다양한 유기 및 무기 필러를 첨가하여 자외선 및 가시광선 차단 기능을 지닌 복합 필름을 제작하였다. 그 중에서도 광 차단 효과가 우수한 것으로 평가된 복합 필름을 중심으로 기계적 특성, 광 투과도, 결정 구조, 수증기 투과도 등을 종합적으로 분석하였으며, 실제 감자 품종에 적용하여 효과를 평가하였다. 이를 통해 해당 복합 필름의 실용 가능성과 기능성 포장재로서의 활용성을 검증하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험재료

본 연구에서는 상업용 PBAT (Ecoflex F Blend C1200, 밀도  $1.26 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )를 BASF Company (Seoul, Korea)에서 구매하여 사용하였으며, 사용 전에  $60^\circ\text{C}$ 에서 24시간 동안 건조하였다. Chloroform, copper(II) nitrate trihydrate, zinc nitrate hexahydrate, calcium chloride dihydrate, Iron(III) chloride hexahydrate, sodium hydroxide는 Daejung (Siheung, Korea)에서 구입하였고, MCC (Avicel® PH-101,  $50 \mu\text{m}$ )는 Sigma Aldrich (Missouri, USA)에서 구매하였다. 실험에 사용된 감자

는 국내에서 식가공용으로 주로 유통되는 ‘수미’, ‘두백’, ‘은선’ 품종으로, 결과의 실용성과 현장 적용 가능성을 고려하여 선정하였으며, 실험 전까지 4°C에서 저장하였다.

## 2.2. 원료별 필러의 제조

### 2.2.1. 나노결정 셀룰로오스(NCC) 제조

본 연구에서 사용된 NCC는 Alves 등(2015)의 방법을 기반으로 제조하였다. MCC 1 g을 45°C에서 10 mL의 황산(55%, v/v)과 반응시켜 30분간 가수분해하였다. 이후, 원심분리(10분, 6,000 rpm)로 침전물과 상등액을 분리하고, 중성 pH에 도달할 때까지 증류수로 세척하였다. 최종적으로 얻어진 현탁액을 동결 건조하여 NCC를 확보하였다.

### 2.2.2. 산화구리(CuONPs) 합성

CuONPs는 Shankar와 Rhim(2017)의 방법을 기반으로 합성하였다. Copper(II) nitrate trihydrate 34.96 g을 증류수 1,000 mL에 녹인 뒤, 70°C에서 30분 동안 교반하여 용해시켰다. 이후, 5 M sodium hydroxide 용액 약 60 mL를 천천히 첨가하며 pH를 6.7로 조정하고, 70°C에서 2시간 동안 가열하였다. 짙은 갈색 침전물이 형성되었으며, 이는 CuONPs의 형성을 나타낸다. 침전물은 원심분리로 회수한 뒤 증류수로 3회, 에탄올로 2회 세척 후, 70°C 드라이 오븐에서 6시간 동안 건조하였다.

### 2.2.3. 산화아연(ZnONPs) 합성

ZnONPs는 Shankar와 Rhim(2017)의 방법을 기반으로 합성하였다. Zinc nitrate hexahydrate 29.75 g을 증류수 1,000 mL에 녹여 70°C에서 30분 동안 교반하였다. 용액에 5 M Sodium hydroxide 용액을 천천히 첨가하며 pH를 8.0으로 조정하고, 70°C에서 2시간 동안 가열하였다. 형성된 흰색 침전물은 ZnONPs의 형성을 나타낸다. 침전물은 원심분리로 회수하여 증류수와 에탄올로 각각 3회 및 2회 세척한 뒤, 70°C 드라이 오븐에서 6시간 동안 건조하였다.

### 2.2.4. 염기성 아연염(ZBS) 합성

ZBS는 Ye 등(2009)의 방법을 수정하여 합성하였다. Zinc nitrate를 증류수에 녹여 70°C에서 30분 동안 교반하며 용해시켰다. 이 용액에 1 M sodium hydroxide 용액을 천천히 첨가하여 pH 7.0으로 조정하였다. 형성된 흰색 침전물은 ZBS의 형성을 나타내며, 원심분리로 회수한 뒤 증류수와 에탄올로 각각 3회 및 2회 세척하였다. 최종적으로 50°C 드라이 오븐에서 24시간 동안 건조하였다.

### 2.2.5. 칼슘-철 층상 이중 수산화물(CaFe-LDHs) 합성

CaFe-LDHs는 Taei 등(2018)의 방법을 기반으로 합성하였

다. Calcium chloride dihydrate 0.05 mol과 iron(III) chloride hexahydrate 0.02 mol을 증류수 50 mL에 녹였다. 이후 1 M sodium hydroxide 용액을 첨가하여 pH 13.0으로 조정하였다. 형성된 황색 침전물은 CaFe-LDHs의 형성을 나타내며, 침전물은 원심분리(4,000 rpm, 10분)로 회수하였다. 이후 에탄올로 3회 세척하고 50°C 드라이 오븐에서 24시간 동안 건조하였다.

## 2.3. PBAT 기반 복합 필름 제조

PBAT 복합 필름은 기존 연구(Hasanin과 Youssef, 2022; Shankar 등, 2014)를 참고하여, 폴리머 중량의 2%에 해당하는 필러를 첨가한 뒤 용매 캐스팅 방법으로 제조하였다. 4 g의 PBAT를 80 mL의 chloroform에 넣고 48시간 동안 교반하여 용해하였다. 이 용액에 각각의 필러(MCC, NCC, CuONPs, ZnONPs, ZBS, CaFe-LDHs) 0.08 g을 첨가하여 호모게나이저로 혼합하였다. 혼합된 용액은 테프론 테이프로 코팅된 24×30 cm 유리판에 캐스팅한 뒤 25°C에서 48시간 동안 건조했다. 제조된 복합 필름은 25°C 및 50% 상대습도 조건에서 항온습습기(JSTH-150CP, JSR Ltd., Seoul, Korea)에 보관하였다. 필러를 첨가하지 않은 대조군인 순수 PBAT 필름(neat PBAT 필름)은 동일한 방법으로 제조하였으며, 복합 필름은 사용된 필러에 따라 neat PBAT, PBAT/MCC, PBAT/NCC, PBAT/CuONPs, PBAT/ZnONPs, PBAT/ZBS, PBAT/CaFe로 명명하였다.

## 2.4. X-ray diffraction(XRD) 분석

제조된 필러와 필름의 XRD 분석은 다목적 X선 회절계(Empyrean, PANalytical Co., Ltd., Almelo, Netherlands)로 측정하였다. Ni로 필터링된 Cu K $\alpha$  방사선( $\lambda=1.5405$  Å)을 사용하여 20 mA와 40 kV 전압에서 진행하였으며, 2 $\theta$  각도 5-80° (스캐닝 속도 1°/min) 범위에서 측정하였다.

## 2.5. 복합 필름의 색도 및 광 투과도

복합 필름의 표면 색도는 색도계(CR-400, Konica Minolta Inc., Tokyo, Japan)를 사용해 평가하였으며, 표준판(L\*=95.76, a\*=0.38, b\*=2.94)를 대조군으로 사용하였다. 필름의 색상 매개 변수는 Hunter 색상 척도에 따라 명도(lightness, L), 녹색도(greenness, a), 황색도(yellowness, b)로 측정하였다. 총 색차( $\Delta E$ )는 아래와 같이 계산하였다:

$$\Delta E = [(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2]^{0.5}$$

여기서 복합 필름의 색상 파라미터는 L, a, b로, 표준판의 색상 파라미터는 L\*, a\*, b\*로 표현되었다.

복합 필름의 광학적 특성은 UV-vis 분광광도계(UV-3600i plus, Shimadzu Co., Tokyo, Japan)를 사용하여 측정하였다.

필름은 5 cm × 5 cm 크기의 정사각형으로 잘라 분광광도계에 장착하였으며, 200-800 nm 파장 범위에서 빛의 투과율을 측정하여 광 투과도를 평가하였다.

## 2.6. Scanning electron microscopy(SEM) 분석

제조한 복합 필름의 표면 형태는 필드 방출형 스캐닝 전자 현미경(FE-SEM, S-4800, Hitachi Co., Ltd., Matsuda, Japan)을 이용하여 관찰하였다. 관찰을 위해, 필름 샘플을 작은 직사각형 조각으로 잘라 양면 탄소 테이프로 시료 홀더에 고정한 후, 백금의 얇은 층으로 코팅하였다. 이미지는 3.0 kV의 가속 전압 하에서 3-30K의 확대율로 촬영하였다.

## 2.7. Fourier transform-infrared(FT-IR) 분석

복합 필름의 FT-IR 스펙트럼은 적외선분광광도계(Spotlight 400, Perkin Elmer Inc., Waltham, MA, USA)를 사용하여 얻었다. 필름 샘플을 직사각형 모양으로 자르고 광선 스테이지에 배치하였다. 스펙트럼은 500-4,000  $\text{cm}^{-1}$ 의 범위에서 측정되었다.

## 2.8. 복합 필름의 두께 및 기계적 특성 평가

필름 두께는 디지털 마이크로미터(MDE-25M, Mitutoyo Ltd., Kawasaki, Japan)로 0.01 mm 단위의 정확도로 측정하였다. 각 필름에서 무작위로 5개 지점을 측정하여 평균값을 구하였다. 인장 강도(tensile strength, TS), 파단 연신율(elongation at break, EB), 탄성 계수(elastic modulus, EM)는 Instron Universal Testing Machine(5565, Instron Engineering Corp., Canton, MA, USA)를 사용하여 ASTM D882-88 표준에 따라 측정하였다. 필름 샘플은 2.5 cm × 15 cm 크기로 절단하여 사용하였다.

$$TS = F/A$$

$$EB = [(E_f - E_0) / E_0] \times 100$$

여기서 F는 최대 인장력(N), A는 필름 샘플의 단면적( $\text{m}^2$ ),  $E_f$ 는 필름 샘플의 파단 연신 길이,  $E_0$ 는 필름 샘플의 초기 길이이다. EM(GPa)은 탄성 변형 영역의 응력-변형 곡선의 기울기로부터 결정되었다.

## 2.9. 복합 필름의 수증기 투과도 계수 측정

복합 필름의 수증기 투과도(water vapor permeability, WVP) 측정은 ASTM E96-95의 표준 방법을 따라 측정하였다(Shankar 등, 2014). 필름 샘플을 7.5 cm × 7.5 cm 크기의 정사각형 조각으로 자르고, 18 mL의 증류수가 들어 있는 측정 유닛(높이 2.5 cm × 직경 6.8 cm) 상단에 장착하여 밀봉하였다. 밀봉된 측정

컵은 25°C 및 50% 상대 습도로 조절된 항온항습기에 넣고 1시간 간격으로 총 8회에 걸쳐 각 컵의 무게를 측정하였다. WVP는 아래의 공식을 사용하여 계산하였다:

$$WVP = (WVTR \times L) / \Delta p$$

여기서 WVTR은 막을 통한 수증기 투과율( $\text{g}/\text{m}^2 \text{ s}$ ), L은 필름의 두께(m),  $\Delta p$ 는 필름을 통한 수증기 압력차(Pa)이다.

## 2.10. 복합 필름의 감자 녹변 억제 특성

복합 필름의 감자 녹변 억제 효과는 ‘수미’, ‘두백’, ‘은선’ 품종을 대상으로 평가하였다. 감자는 흐르는 물로 세척 후 상온에서 1시간 동안 건조하여 표면 수분을 제거하였다. 이후, PBAT 복합 필름으로 제작한 파우치(27 cm × 23 cm)에 감자를 넣고 열 밀봉하였다. 대조군으로는 포장하지 않은 감자와 시판 감자 포장재로 사용되는 투명 고밀도 폴리에틸렌(high-density polyethylene, HDPE) 필름으로 포장된 감자를 사용하였다. 모든 샘플은 23°C 및 PPFD 6.8  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  조건에서 보관하였다(Grunenfelder 등, 2006). Hunter 색상 척도를 사용해 외피를 0.5 mm 제거한 후 5개 지점에서 색상을 측정하였다. 저장 후  $\Delta E$ 는 저장 전후의 Hunter 색상 값을 기반으로 계산하였으며, 필름 색도 특성 평가에 사용된 동일한 계산식을 적용하였다. 표준판의 색상 파라미터( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ) 대신 저장 전 감자의 표면 색상을 기준으로 사용하였다.

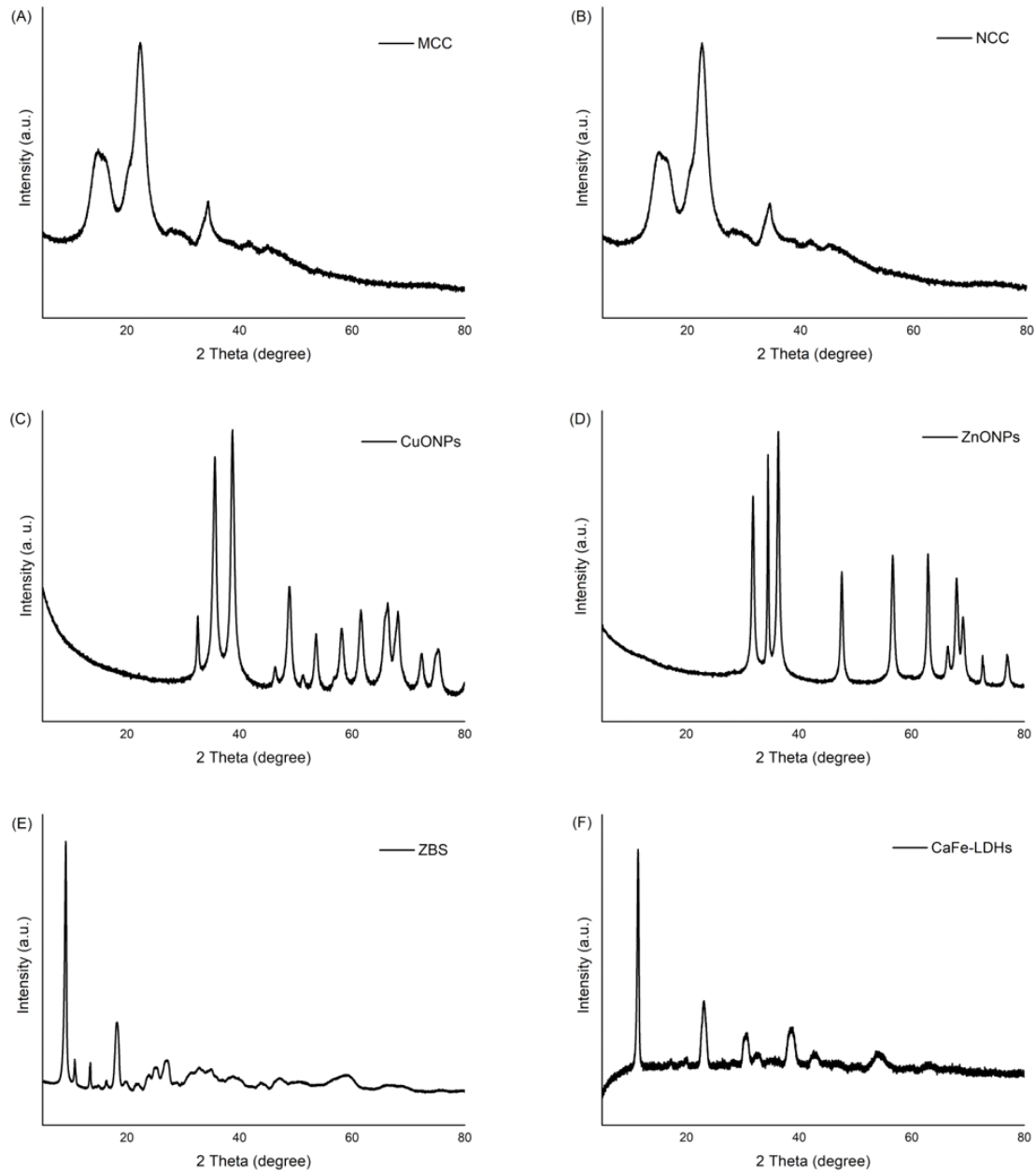
## 2.11. 통계처리

각 특성에 대한 측정실험은 3-5회 반복 수행하였으며, 결과는 평균값과 표준편차로 나타내었다. 그룹 간 유의한 차이( $p < 0.05$ )는 일원 분산 분석(One-way analysis of variance, one-way ANOVA)을 사용해 분석하였다. 사후 분석은 IBM SPSS Statistics(Ver 28.0, SPSS Institute Inc., IBM Corp., Armonk, NY, USA)를 사용하였으며 Duncan의 다중 범위 검정을 이용하여 수행되었다.

# 3. 결과 및 고찰

## 3.1. 원료별 필러의 결정구조 분석

Fig. 1에는 본 연구에서 사용된 다양한 유기 및 무기 필러의 X선 회절(XRD) 패턴을 나타내었다. 해당 분석은 필러의 결정구조 및 특성을 파악하는 데 중요한 자료로 활용되며, 필러 간 결정성 및 구조적 차이를 비교하는 데 활용된다. Fig. 1A에서 MCC는 2θ 값 15.3°, 22.3° 및 34.4°에서 특징적인 회절 피크를 나타내었으며, 이는 각각 (110), (200), (004) 결정면에 해당하고 MCC의 결정 구조와 일치하는 결과이다(Kian 등, 2018). 이



**Fig. 1.** X-ray diffraction (XRD) patterns of MCC (A), NCC (B), CuONPs (C), ZnONPs (D), ZBS (E), and CaFe-LDHs (F). MCC, microcrystalline cellulose; NCC, nanocrystalline cellulose; CuONPs, copper oxide nanoparticles; ZnONPs, zinc oxide nanoparticles; ZBS, zinc basic salt; CaFe-LDHs, calcium ferric layered double hydroxide.

러한 피크는 MCC의 준결정성 구조에서 흔히 나타나는 것으로, 상업적으로 활용되는 MCC의 결정학적 특성을 잘 반영한다.

반면, Fig. 1B에서 NCC의 XRD 패턴은  $2\theta$  값이  $15.5^\circ$ ,  $22.6^\circ$  및  $34.6^\circ$ 에서 더 날카롭고 뚜렷한 회절 피크가 관찰되었다(Kian 등, 2018). 이는 NCC가 MCC보다 우수한 결정성을 지님을 시사하며, 결정화 과정에서 보다 정교한 구조적 배열이

형성되었음을 나타낸다. 이러한 XRD 결과는 상업용 MCC로부터 NCC가 성공적으로 추출되었음을 의미하며, 나노 구조 형성을 통해 높은 표면적과 기계적 특성을 제공할 수 있음을 시사한다(Tang 등, 2014).

본 연구에서 합성한 나노 무기물 필러의 XRD 패턴은 각 필러의 결정 구조를 명확히 나타낸다. Fig. 1C에는 CuONPs의

XRD 패턴이 제시되었으며, 2 $\theta$  값 32.5°, 35.5°, 38.7°, 48.7°, 53.5°, 58.3°, 61.5°, 66.2°, 68.2°, 74.9°, 78.5°에서 특징적인 회절 피크가 관찰되었다. 이들 피크는 각각 (110), (002), (111), (202), (020), (113), (311), (004) 결정면에 해당하며, CuONPs의 결정 구조와 잘 부합한다(Ahamed 등, 2014).

Fig. 1D에 나타난 ZnONPs의 XRD 패턴에서는 2 $\theta$  값 31.5°, 34.6°, 36.4°, 47.7°, 56.78°, 66.4°, 68.1°에서 뚜렷한 회절 피크가 나타났다. 이 피크는 각각 (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) 결정면에 해당하며, ZnONPs의 결정학적 구조와 일치한다(Kanmani와 Rhim, 2014). Fig. 1E에는 ZBS의 XRD 패턴이 나타나 있으며, 2 $\theta$ =9.1°에서 강한 단일 피크가 확인되었다. 이 피크는 (003) 결정면에 해당하며, ZBS 특유의 층상 구조를 반영한다(Reda 등, 2024).

Fig. 1F에는 CaFe-LDHs의 XRD 패턴이 제시되었으며, 2 $\theta$  값 11.4°, 23.1°, 30.7°, 32.4°, 38.8°, 42.6°에서 명확한 회절 피크가 관찰되었다. 각 피크는 (003), (006), (110), (113), (116), (1010) 결정면에 해당하며, 이는 CaFe-LDHs의 전형적인 결정 구조와 부합한다(Al Jaber et al., 2019).

모든 나노 무기 필러는 성공적으로 합성되었으며, 각 필러의

XRD 분석 결과는 기존 문헌과 유사한 결정 구조를 나타내는 것으로 확인되었다. 또한, MCC로부터 추출한 NCC와 합성된 무기 필러들은 PBAT 복합 필름의 제조에 활용되었다. 이처럼 유기 및 무기 필러를 첨가하여 제조된 복합 필름의 광 투과도 특성을 평가함으로써, 필러 종류에 따른 복합 필름의 광 차단 성능 차이를 규명하였다.

### 3.2. 필러에 따른 PBAT 기반 복합 필름의 광 투과도

유기 및 무기 필러가 첨가된 PBAT 복합 필름의 광 투과도 측정 결과를 Table 1에 제시하였다. 본 연구에서는 필름의 광 투과도를 평가하기 위해 250-800 nm 범위의 파장을 50 nm 간격으로 측정하였으며, 이 범위는 자외선(UV)과 가시광선 영역을 포함하여 필름의 빛 차단 성능을 종합적으로 분석하는 데 적합하다. 이전 연구에 따르면, 감자가 자외선 및 가시광선에 노출될 때 특히 450 nm(청색광)에서 녹색이 가장 두드러지며, 420 nm(보라색) 및 530 nm(녹색)에서도 녹색이 관찰된다. 반면, 735 nm(근적외선) 영역에서는 녹색이 거의 발생하지 않는 것으로 보고되었다(Tanios 등, 2020). 이를 바탕으로 본 연구에서는 필름의 빛 차단 성능을 정량적으로 평가하였다.

**Table 1.** UV-visible and NIR light transmittance (%) of PBAT composite films

| Films <sup>1)</sup> | 250 nm                        | 300 nm                      | 350 nm                      | 400 nm                      | 450 nm                      | 500 nm                      | 550 nm                      | 600 nm                      | 650 nm                       | 700 nm                       | 750 nm                       | 800 nm                       |
|---------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Neat PBAT           | 1.30<br>±1.23 <sup>2)3)</sup> | 0.62<br>±1.10 <sup>ab</sup> | 1.65<br>±1.77 <sup>c</sup>  | 1.28<br>±1.08 <sup>cd</sup> | 1.96<br>±0.68 <sup>c</sup>  | 2.93<br>±0.97 <sup>c</sup>  | 3.78<br>±0.77 <sup>cd</sup> | 5.33<br>±0.78 <sup>cd</sup> | 6.60<br>±0.97 <sup>de</sup>  | 9.39<br>±1.60 <sup>cde</sup> | 11.27<br>±3.92 <sup>cd</sup> | 13.64<br>±3.40 <sup>cd</sup> |
| PBAT /CaFe          | 0.69<br>±0.80 <sup>b</sup>    | 0.87<br>±1.11 <sup>ab</sup> | 1.22<br>±1.73 <sup>c</sup>  | 1.17<br>±1.11 <sup>cd</sup> | 2.31<br>±0.98 <sup>c</sup>  | 3.22<br>±1.17 <sup>c</sup>  | 4.51<br>±1.46 <sup>c</sup>  | 6.26<br>±1.63 <sup>cd</sup> | 8.31<br>±2.07 <sup>cd</sup>  | 10.40<br>±2.71 <sup>cd</sup> | 14.19<br>±4.36 <sup>c</sup>  | 16.25<br>±4.22 <sup>c</sup>  |
| PBAT /ZBS           | 0.92<br>±1.01 <sup>b</sup>    | 0.67<br>±1.22 <sup>ab</sup> | 2.19<br>±2.10 <sup>c</sup>  | 1.77<br>±1.19 <sup>c</sup>  | 2.57<br>±1.68 <sup>c</sup>  | 3.38<br>±2.05 <sup>c</sup>  | 4.37<br>±2.27 <sup>c</sup>  | 5.55<br>±2.68 <sup>cd</sup> | 7.31<br>±2.98 <sup>cde</sup> | 7.86<br>±4.03 <sup>de</sup>  | 10.98<br>±5.67 <sup>cd</sup> | 12.65<br>±5.49 <sup>cd</sup> |
| PBAT /CuONPs        | 0.50<br>±0.62 <sup>b</sup>    | 0.70<br>±0.86 <sup>ab</sup> | 0.62<br>±0.93 <sup>c</sup>  | 0.34<br>±0.48 <sup>d</sup>  | 0.82<br>±0.61 <sup>d</sup>  | 1.59<br>±1.25 <sup>d</sup>  | 2.78<br>±1.72 <sup>d</sup>  | 4.57<br>±2.58 <sup>d</sup>  | 6.76<br>±3.35 <sup>de</sup>  | 9.18<br>±4.01 <sup>cde</sup> | 12.97<br>±5.69 <sup>cd</sup> | 15.87<br>±5.75 <sup>c</sup>  |
| PBAT /ZnONPs        | 0.60<br>±0.96 <sup>b</sup>    | 1.43<br>±1.63 <sup>b</sup>  | 1.30<br>±1.65 <sup>c</sup>  | 1.22<br>±1.00 <sup>cd</sup> | 1.79<br>±1.08 <sup>c</sup>  | 3.19<br>±0.92 <sup>c</sup>  | 4.42<br>±1.26 <sup>c</sup>  | 6.19<br>±1.57 <sup>cd</sup> | 8.33<br>±1.32 <sup>cd</sup>  | 10.64<br>±3.09 <sup>cd</sup> | 12.86<br>±4.59 <sup>cd</sup> | 15.26<br>±4.45 <sup>c</sup>  |
| PBAT /MCC           | 0.97<br>±1.21 <sup>b</sup>    | 0.83<br>±1.22 <sup>ab</sup> | 2.17<br>±2.06 <sup>c</sup>  | 1.57<br>±1.31 <sup>c</sup>  | 2.11<br>±1.08 <sup>c</sup>  | 2.79<br>±1.58 <sup>c</sup>  | 3.80<br>±1.61 <sup>cd</sup> | 4.70<br>±1.86 <sup>d</sup>  | 5.83<br>±2.45 <sup>c</sup>   | 7.24<br>±2.77 <sup>c</sup>   | 8.95<br>±4.92 <sup>d</sup>   | 10.52<br>±4.42 <sup>d</sup>  |
| PBAT /NCC           | 0.70<br>±0.93 <sup>b</sup>    | 0.98<br>±1.22 <sup>ab</sup> | 1.66<br>±1.94 <sup>c</sup>  | 1.65<br>±0.91 <sup>c</sup>  | 2.49<br>±0.76 <sup>c</sup>  | 3.80<br>±0.84 <sup>c</sup>  | 5.13<br>±0.95 <sup>c</sup>  | 7.11<br>±1.10 <sup>c</sup>  | 9.24<br>±1.39 <sup>c</sup>   | 10.97<br>±1.81 <sup>c</sup>  | 14.87<br>±3.39 <sup>c</sup>  | 17.14<br>±2.94 <sup>c</sup>  |
| HDPE                | 18.53<br>±1.32 <sup>a</sup>   | 20.63<br>±1.88 <sup>a</sup> | 23.16<br>±1.68 <sup>b</sup> | 24.44<br>±1.84 <sup>b</sup> | 25.74<br>±2.25 <sup>b</sup> | 27.14<br>±2.28 <sup>b</sup> | 28.40<br>±2.49 <sup>b</sup> | 29.23<br>±2.63 <sup>b</sup> | 30.45<br>±2.88 <sup>b</sup>  | 31.66<br>±2.84 <sup>b</sup>  | 37.76<br>±2.44 <sup>b</sup>  | 38.34<br>±3.28 <sup>b</sup>  |
| LDPE                | 0.33<br>±0.04 <sup>b</sup>    | 0.00<br>±0.07 <sup>c</sup>  | 69.65<br>±0.30 <sup>a</sup> | 74.49<br>±0.21 <sup>a</sup> | 77.26<br>±0.29 <sup>a</sup> | 79.27<br>±0.19 <sup>a</sup> | 80.79<br>±0.22 <sup>a</sup> | 82.24<br>±0.26 <sup>a</sup> | 83.74<br>±0.30 <sup>a</sup>  | 84.00<br>±0.29 <sup>a</sup>  | 83.22<br>±0.45 <sup>a</sup>  | 83.28<br>±0.43 <sup>a</sup>  |

<sup>1)</sup>Neat PBAT, neat poly(butylene adipate-co-terephthalate) film; PBAT/CaFe, poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite film with 0.08 g calcium ferric layered double hydroxide; PBAT/ZBS, poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite film with 0.08 g zinc basic salt; PBAT/CuONPs, poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite film with 0.08 g copper oxide nanoparticles; PBAT/ZnONPs, poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite film with 0.08 g zinc oxide nanoparticles; PBAT/MCC, poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite film with 0.08 g microcrystalline cellulose; PBAT/NCC, poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite film with 0.08 g nanocrystalline cellulose; HDPE, high-density polyethylene film; LDPE, low-density polyethylene film.

<sup>2)</sup>All values are mean±SD (n=3).

<sup>3)</sup>Values with the different superscript letters (<sup>a-c</sup>) in the same column are significantly different at p<0.05 by Duncan's multiple range test.

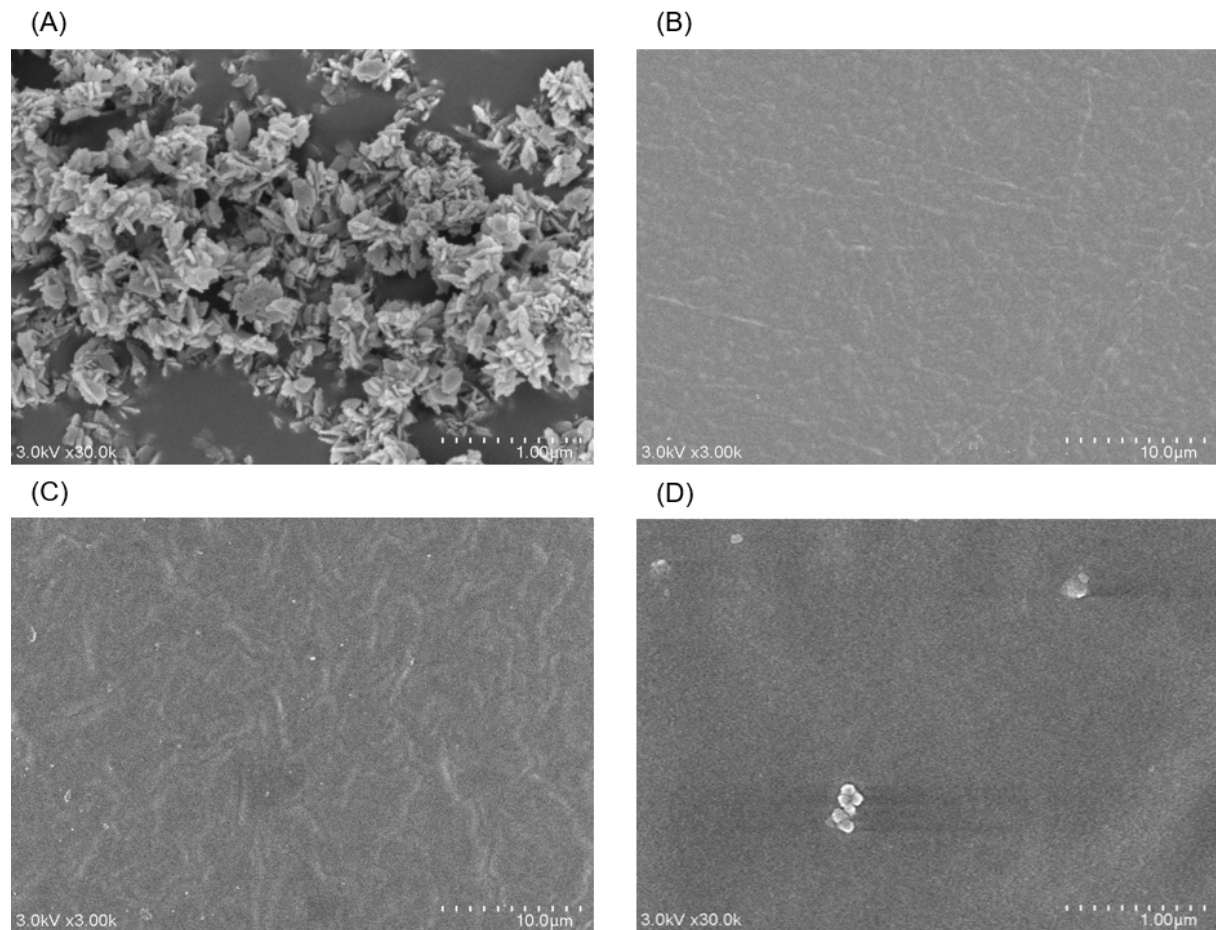
UV-visible 분광광도계를 이용한 측정 결과, 순수 PBAT 필름은 250-800 nm 파장에서 13.64%에서 1.30%까지의 광 투과도를 나타냈다. 이는 상업용 포장재로 널리 사용되는 PE 필름보다 낮은 수준이며, PBAT의 불투명 특성에 기인한 결과로 해석된다(Wang 등, 2016). 이러한 낮은 투과도는 빛 차단에 유리하며, 이는 Wang 등(2016)의 연구 결과와도 일치한다.

CaFe-LDHs, ZBS, ZnONPs, MCC, NCC를 첨가한 PBAT 복합 필름은 450 nm 파장에서 순수 PBAT 필름보다 더 높은 광 투과도를 보였다. 이는 Calderaro 등(2020)의 보고와 유사한 경향으로, 해당 필러들이 특정 파장에서의 차광 효과가 미흡하여 감자의 녹변 억제에 제한적인 역할을 할 수 있음을 시사한다.

반면, CuONPs가 첨가된 PBAT 복합 필름은 450 nm 파장에서 순수 PBAT 필름보다 유의하게 낮은 광 투과도를 보였으며( $p < 0.05$ ), 특히 600 nm 이하 전 영역에서 가장 낮은 투과도를 나타냈다. 이러한 특성은 CuO의 좁은 밴드갭(1.2-1.9 eV)에 기

인한 우수한 광 흡수 능력 때문으로 해석된다(Sahai 등, 2018). 밴드갭은 물질이 흡수할 수 있는 빛의 에너지를 결정짓는 중요한 물리적 특성으로, 밴드갭이 작을수록 더 낮은 에너지의 빛을 흡수할 수 있다. CuO는 자외선뿐만 아니라 가시광선 영역의 청색광(약 450 nm, 2.76 eV)까지도 효과적으로 흡수할 수 있는 흡광 범위를 지닌다. 실제로  $\text{Cu}_2\text{O}$  및 CuO 박막은 600 nm 이하의 가시광 전 영역에서 강한 흡수를 나타내며(Sawicka-Chudy 등, 2018), 이러한 특성은 감자의 녹변을 유발하는 450-600 nm 파장의 빛을 효과적으로 차단하는 데 기여한다.

또한 CuONPs는 비구형 형태 및 불균일한 표면 구조(Fig. 2A)를 가져 필름 내에서 다중 산란(multiple scattering)을 유도하며, 특히 자외선 및 청색광과 같은 짧은 파장의 빛은 입자의 구조적 특성에 의해 강하게 산란되어 광 투과도가 더욱 감소한다(Banaś-Gac 등, 2025). 이로 인해 CuONPs는 탁월한 광 차단 기능을 갖춘 필러로 평가되며, 이러한 경향은 Badry 등(2023)



**Fig. 2.** Scanning electron microscopy (SEM) images of the surface CuONPs (A), neat PBAT (B), PBAT/CuONPs composite film (3.00 k) (C), and PBAT/CuONPs composite film (30.0 k) (D). CuONPs, copper oxide nanoparticles; neat PBAT, neat poly(butylene adipate-co-terephthalate) film; PBAT/CuONPs composite film, poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite film with 0.08 g copper oxide nanoparticles.

의 연구에서도 확인된 바 있다. 해당 연구에서는 CuONPs를 첨가한 카복시메틸셀룰로오스 용액이 UV 차단 성능을 현저히 향상시킨 것으로 보고되었다.

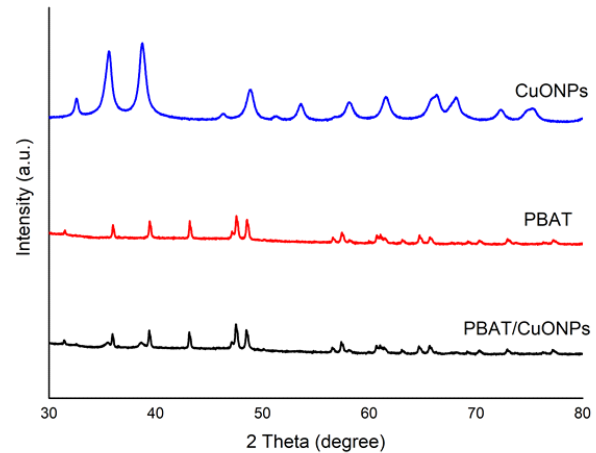
따라서 CuONPs를 포함한 PBAT 복합 필름은 감자의 녹변 억제제를 위한 기능성 포장재로서의 활용 가능성이 높다. 본 연구에서는 이러한 가능성에 근거하여 CuONPs 첨가 PBAT 복합 필름의 물성 및 광 투과 특성, 그리고 실제 감자 포장에 적용했을 때의 효과를 종합적으로 분석하였다.

### 3.3. PBAT 기반 복합 필름(PBAT/CuONPs)의 구조 및 화학적 분석

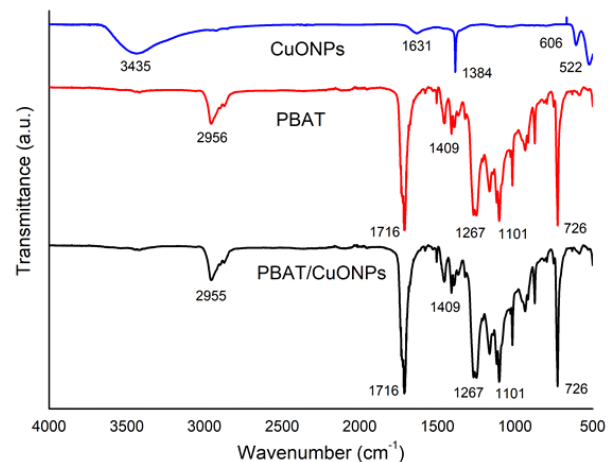
Fig. 2에는 CuONPs, 순수 PBAT 필름, 그리고 PBAT/CuONPs 복합 필름의 SEM 이미지가 제시되어 있다. SEM 이미지는 필름의 표면 구조 및 나노입자의 분산 상태를 분석하는데 유용한 정보를 제공한다. CuONPs(Fig. 2A)는 불규칙한 무정형 형태를 가지며, 입자 크기는 250-500 nm로 확인되었다. 이러한 결과는 Costa 등(2023)의 보고와 일치한다. 순수 PBAT 필름의 SEM 이미지에서는 매우 균일하고 매끄러운 표면이 관찰되었으며, 균열이나 결함은 나타나지 않았다. 반면, PBAT/CuONPs 복합 필름에서는 약간의 표면 거칠기가 관찰되었으나, CuONPs가 필름 표면에 고르게 분포된 것이 확인되었다. 이는 용매 캐스팅 방법이 CuONPs를 PBAT 매트릭스에 효과적으로 통합했음을 시사하며, 나노입자의 균일한 분산은 필름의 물리적 특성을 안정적으로 유지하는 데 기여한다.

Fig. 3에는 CuONPs, 순수 PBAT 필름, 그리고 PBAT/CuONPs 복합 필름의 XRD 패턴이 제시되어 있다. PBAT/CuONPs 복합 필름의 XRD 분석에서는 30-40° 범위에서 CuONPs의 (002), (111) 피크가 미세하게 관찰되었지만, 다른 주요 피크는 뚜렷하지 않았다. 이는 CuONPs의 첨가량이 적고, 회절 피크가 PBAT의 피크와 중첩되었기 때문으로 해석된다(Khan 등, 2020). PBAT의 주요 회절 피크가 유지된다는 점은 CuONPs 첨가가 PBAT의 결정 구조에 영향을 주지 않았음을 나타내며, 이는 CuONPs가 결정성을 변화시키지 않았음을 시사한다(Jaramillo 등, 2019). 이러한 결과는 나노입자가 물리적으로 필름에 결합되어 있으면서도 구조적 특성에는 영향을 주지 않음을 의미한다.

PBAT와 CuONPs 간의 상호작용을 확인하기 위해 FTIR 분석이 수행되었으며, 결과는 Fig. 4에 제시되었다. 순수 PBAT 필름의 경우 2,956 cm<sup>-1</sup>에서의 피크는 CH<sub>2</sub>의 비대칭 신축 진동을, 1,716 cm<sup>-1</sup> 피크는 에스터 결합의 C=O 신축 진동을 나타낸다. 또한, 1,409 cm<sup>-1</sup>에서는 trans-CH<sub>2</sub>의 굽힘 진동이, 1,267 cm<sup>-1</sup>과 1,101 cm<sup>-1</sup>에서는 C-O의 대칭 신축 진동이 관찰되었고, 726 cm<sup>-1</sup>의 피크는 CH-굽힘 진동과 관련된 흡수 피크로 확인되었다(Wang 등, 2016). PBAT/CuONPs 복합 필름의 FTIR 스



**Fig. 3.** X-ray diffraction (XRD) patterns of CuONPs, neat PBAT film, and PBAT/CuONPs composite film. CuONPs, copper oxide nanoparticles; PBAT, neat poly(butylene adipate-co-terephthalate) film; PBAT/CuONPs composite film, poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite film with 0.08 g copper oxide nanoparticles.



**Fig. 4.** Fourier transform infrared (FTIR) spectra of CuONPs, neat PBAT film, and PBAT/CuONPs composite film. CuONPs, copper oxide nanoparticles; PBAT, neat poly(butylene adipate-co-terephthalate) film; PBAT/CuONPs composite film, poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite film with 0.08 g copper oxide nanoparticles.

펙트럼에서도 동일한 주요 피크가 확인되어, CuONPs 첨가에도 불구하고 두 성분 간 화학적 상호작용이 없음을 보여준다. 이는 CuONPs가 PBAT 매트릭스 내에 화학 반응 없이 물리적으로 혼합되었음을 의미한다. 이러한 경향은 Bumbudsanpharoke 등 (2023)의 연구에서도 유사하게 보고되었으며, PBAT/TPS 필름에 CuO 2%를 첨가한 경우에도 유사한 FTIR 스펙트럼이 관찰되었다. 이는 CuONPs가 광 차단 기능을 제공하면서도 필름의

화학적 안정성을 유지할 수 있음을 시사하며, 이러한 물리적 특성은 감자 녹변 억제와 같은 기능성 포장재 응용에 적합함을 보여준다.

### 3.4. PBAT 기반 복합 필름(PBAT/CuONPs)의 기계적 특성 및 수증기 투과도(WVP)

필름 포장은 신선한 농산물의 유통에 널리 활용되며, 외부의 물리적 충격에 대한 저항성과 우수한 차단 특성을 동시에 갖추어야 그 역할을 충분히 수행할 수 있다(Qin 등, 2017). 이를 위해 포장재의 적절한 기계적 강도는 필수적이다. 필름의 기계적 특성은 필름 두께, 인장강도(TS), 파단신율(EB), 그리고 탄성 계수(EM) 등을 통해 평가할 수 있으며, PBAT/CuONPs 복합 필름에 대한 기계적 특성 평가 결과를 Table 2에 제시하였다.

순수 PBAT 필름과 PBAT/CuONPs 복합 필름의 평균 두께는 각각  $53.13 \pm 1.22 \mu\text{m}$  및  $56.40 \pm 2.43 \mu\text{m}$ 로 나타났으며, 이는 나노 무기물 필러 첨가에 따라 고형분 함량이 증가한 결과로 해석된다(Hasheminya 등, 2018). 필름의 두께는 광 차단 성능과 기계적 특성에 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소이다.

기계적 특성 평가 결과, 순수 PBAT 필름의 TS는  $12.14 \pm 0.30 \text{ MPa}$ , EB는  $375.29 \pm 2.91\%$ , EM은  $0.09 \pm 0.01 \text{ GPa}$ 로 나타났다. PBAT/CuONPs 복합 필름의 경우, TS는  $10.86 \pm 1.01 \text{ MPa}$ , EB는  $340.88 \pm 4.88\%$ , EM은  $0.08 \pm 0.00 \text{ GPa}$ 로 측정되었으며, 모든 항목에서 순수 PBAT 필름과 통계적으로 유의한 차이는 나타나지 않았다( $p > 0.05$ ). 이는 CuONPs의 첨가가 필름의 전반적인 기계적 성능을 저해하지 않음을 시사한다. 특히, PBAT/CuONPs 필름의 TS는 본 연구에서 비교 대상으로 사용한 상업용 감자 포장용 LDPE 필름과 유의한 차이를 보이지 않았다( $p > 0.05$ ). 이는 본 복합 필름이 LDPE 기반 상업 포장재를 대체할 수 있을 만큼의 기계적 적합성을 갖추고 있음을 보여준다.

포장 내부의 수분은 미생물 증식을 유발하고 필름 물성을 저하시킬 수 있으므로, WVP는 농산물 포장재의 기능성 평가에 중요한 지표로 활용된다. 높은 WVP는 포장 내부의 습도 조절

에 기여하여 식품의 품질 유지에 도움을 준다(Qin 등, 2017). 순수 PBAT 필름의 WVP는  $5.49 \times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{m/m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$ , PBAT/CuONPs 복합 필름은  $5.83 \times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{m/m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$ 로 소폭 증가하였다( $p < 0.05$ ). 이는 CuONPs가 친수성 특성을 지녀 필름 내부에서 수분과의 상호작용이 강화된 결과로 해석된다(Soleimani와 Taheri, 2017).

이와 비교하여, 상업용 HDPE 및 LDPE 필름은 일반적으로 WVP가  $1.0\text{--}2.5 \times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{m/m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$ 로 더 낮은 수치를 보이지만, 이는 내부 수분 축적을 유발하여 녹변이나 부패의 원인이 될 수 있다. 따라서 PBAT/CuONPs 복합 필름은 적절한 수증기 조절 능력을 갖추고 있어 감자와 같이 호흡 작용이 활발한 농산물 포장에 더 적합한 조건을 제공할 수 있다.

결과적으로, PBAT/CuONPs 복합 필름은 우수한 기계적 안정성과 동시에 적절한 수분 조절 능력을 겸비하고 있어, 광 차단 기능과 함께 감자의 저장성 향상에 효과적인 기능성 포장재로서의 활용 가능성이 높다.

### 3.5. PBAT 기반 복합 필름(PBAT/CuONPs)의 색상 특성

나노입자의 첨가는 필름의 색상 특성인 명도(L), 녹색도(a), 황색도(b), 그리고 색차( $\Delta E$ )에 상당한 영향을 미쳤으며, 관련 결과는 Table 3에 제시하였다. 순수 PBAT 필름의 명도(L)는  $94.61 \pm 0.19$ 로 매우 높은 수치를 나타내었으며, 이는 필름이 밝고 불투명한 흰색을 띠고 있음을 의미한다. 또한, 녹색도(a)는  $-0.75 \pm 0.02$ , 황색도(b)는  $3.64 \pm 0.07$ 로 나타나, 순수 PBAT 필름이 균일하고 밝은 색조를 유지하고 있음을 보여준다.

CuONPs가 첨가된 복합 필름은 명도(L)가  $36.89 \pm 0.63$ 으로 크게 감소하여 필름의 외관이 눈에 띄게 어두워졌다. 이는 CuONPs의 고유한 짙은 갈색 색상이 필름의 전반적인 색상에 영향을 미친 결과로 해석된다. 나노입자는 비록 입자 크기가 작더라도 광학적 특성에 큰 영향을 줄 수 있으며, 특히 색이 짙은 입자가 첨가될 경우 필름의 명도가 현저히 감소할 수 있다(Hasheminya 등, 2018). 또한, CuONPs가 첨가된 복합 필름의

**Table 2.** Thickness, tensile properties, and water vapor permeability of the neat PBAT film, PBAT composite film, and commercial potato packaging films (HDPE and LDPE)

| Films <sup>1)</sup> | Thickness ( $\mu\text{m}$ ) | Tensile strength (MPa) | Elongation at break (%) | Elastic modulus (GPa) | Water vapor permeability ( $\times 10^{-10} \text{ g} \cdot \text{m/m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}$ ) <sup>3)</sup> |
|---------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| HDPE                | $10.7 \pm 0.76^{(2)(3)}$    | $54.37 \pm 0.97^a$     | $75.00 \pm 1.21^c$      | $1.43 \pm 0.07^a$     | $1.11 \pm 0.08^c$                                                                                                        |
| LDPE                | $53.93 \pm 1.21^{ab}$       | $11.11 \pm 0.75^b$     | $478.76 \pm 40.20^a$    | $0.34 \pm 0.08^b$     | $5.57 \pm 0.13^{ab}$                                                                                                     |
| Neat PBAT           | $53.13 \pm 1.22^b$          | $12.14 \pm 0.30^b$     | $375.29 \pm 2.91^b$     | $0.09 \pm 0.01^c$     | $5.49 \pm 0.13^b$                                                                                                        |
| PBAT/CuONPs         | $56.40 \pm 2.43^a$          | $10.86 \pm 1.01^b$     | $340.88 \pm 4.88^b$     | $0.08 \pm 0.00^c$     | $5.83 \pm 0.25^a$                                                                                                        |

<sup>1)</sup>HDPE, high-density polyethylene film; LDPE, low-density polyethylene film; Neat PBAT, neat poly(butylene adipate-co-terephthalate) film; PBAT/CuONPs, poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite film with 0.08 g copper oxide nanoparticles.

<sup>2)</sup>All values are mean  $\pm$  SD (n=3).

<sup>3)</sup>Values with different superscript letters (<sup>a-c</sup>) in the same column are significantly different at  $p < 0.05$  by Duncan's multiple range test.

**Table 3.** Surface color of the neat PBAT film and PBAT composite film

| Films <sup>1)</sup> | L                           | a                       | b                       | ΔE                      |
|---------------------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Neat PBAT           | 94.61±0.19 <sup>2)a3)</sup> | -0.75±0.02 <sup>b</sup> | 3.64±0.07 <sup>b</sup>  | 0.69±0.04 <sup>b</sup>  |
| PBAT/CuONPs         | 36.89±0.63 <sup>b</sup>     | 7.41±0.32 <sup>a</sup>  | 12.64±0.98 <sup>a</sup> | 58.93±0.65 <sup>a</sup> |

<sup>1)</sup>Neat PBAT, neat poly(butylene adipate-co-terephthalate) film; PBAT/CuONPs, poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite film with 0.08 g copper oxide nanoparticles.

<sup>2)</sup>All values are mean±SD (n=3).

<sup>3)</sup>Values with different superscript letters (<sup>a,b</sup>) in the same column are significantly different at  $p<0.05$  by Duncan's multiple range test.

녹색도(a)와 황색도(b)는 각각  $7.41\pm0.32$ ,  $12.64\pm0.98$ 로, 순수 PBAT 필름에 비해 유의하게 증가하였다. 이는 CuONPs의 착색 효과로 인해 필름의 색조가 어두운 적색과 황색 계열로 변화했음을 시사한다. 이러한 색상 변화는 나노입자의 크기, 형태, 분산 상태 등에 따라 달라질 수 있으며, 필름의 시각적 특성과 소비자 인식에 큰 영향을 미칠 수 있다. CuONPs의 첨가는 ΔE 값의 증가도 초래하였다. ΔE는 색상 간의 총합적 차이를 나타내며, 값이 클수록 시각적으로 명확한 변화가 있음을 의미한다. 이는 CuONPs가 PBAT 필름의 외관을 실질적으로 변화시켰음을 보여주는 지표이다. 특히, 이러한 어두운 색상의 변화는 빛에 민감한 식품을 포장할 때 유리하게 작용할 수 있다. 어두운 색조의 포장재는 자외선 차단 효과를 높여 광노화 및 품질 저하를 방지하는 데 도움을 줄 수 있다(Kurek 등, 2021).

결론적으로, CuONPs의 첨가는 PBAT 필름의 색상 특성에 뚜렷한 변화를 유도하였으며, 이는 자외선 차단 성능 향상을 통해 빛에 민감한 식품의 저장 안정성과 유통 기한 연장에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

### 3.6. PBAT 기반 복합 필름(PBAT/CuONPs)의 감자 녹변 억제 특성

식품의 색상은 품질 평가의 중요한 지표로 작용하며, 이는 소비자의 구매 결정에 큰 영향을 미친다. 특히 색상 변화는 신선도와 밀접한 관련이 있어, 이를 정량화하기 위해 색차계(Hunter 값 및 ΔE 값)가 널리 사용된다(Dutta와 Nath, 2023; Watkins 등, 2024). 이 중 ΔE 값은 색상 변화의 정도를 수치로 나타내는 유용한 지표로, 0-2 범위는 육안 인지 불가 수준, 3-8 범위는 인지가 미약하게 가능한 수준, 8 이상은 명확한 색상 변화가 인지되는 수준으로 해석된다(Yamanel 등, 2010).

본 연구에서는 PBAT/CuONPs 복합 필름의 광 차단 효과가 감자 품종(은선, 두백, 수미)의 색상 변화에 미치는 영향을 평가하기 위해, 23°C의 형광등 아래에서 감자를 6일간 저장하며 실험을 수행하였다. 비교군으로는 포장하지 않은 감자, 상업용 감자 포장재로 사용되는 투명 HDPE 필름, 순수 PBAT 필름이 포함되었다. 저장 중 일부 그룹에서는 감자 표면에 육안으로 확인 가능한 녹변 현상이 관찰되었다.

Table 4에 제시된 결과에 따르면, 저장 전 은선(Eunsun) 품종의 L 값(명도), a 값(녹색도), b 값(황색도)은 각각 72.15, -3.70, 25.47, 두백(Duback) 품종은 71.50, -4.63, 21.53, 수미(Superior) 품종은 64.68, -1.24, 22.54를 나타내었다.

3일간 저장 후, PBAT/CuONPs 복합 필름으로 포장된 감자는 모든 품종에서 다른 포장 조건에 비해 L 값과 a 값이 유의하게 높았다( $p<0.05$ ). 특히 a 값(녹색도) 변화는 PBAT/CuONPs 필름에서 저장 전 수치와 가장 유사한 값을 유지하여, 녹변 억제 효과가 우수함을 시사하였다. ΔE 값은 은선에서 3.70, 두백에서 5.88, 수미에서 8.93으로, 모든 품종에서 비교군(ΔE: 5.02-14.55)에 비해 유의하게 낮았다( $p<0.05$ ). 특히 수미 품종은 다른 포장 조건에서 ΔE 값이 모두 12.05 이상으로 나타나, 녹변 방지를 위해 PBAT/CuONPs 필름의 적용이 더욱 필요함을 보여준다.

6일 저장 후, 은선과 두백 품종에서 PBAT/CuONPs 복합 필름 포장군은 L 및 a 값이 유의하게 높았고, b 값은 유의하게 낮았다( $p<0.05$ ). 이는 저장 전 색상값과 가장 유사한 범위를 유지한 것으로, 색상 변화가 적었음을 의미한다. ΔE 값은 은선에서 7.10, 두백에서 7.08로, 3-8 범위 내에 머물러 비교적 적은 색상 변화가 관찰되었다. 반면, 다른 포장 조건에서는 은선 품종이 8.11-11.57, 두백 품종이 14.38-15.35의 ΔE 값을 보여, 명확한 녹변 현상이 발생한 것으로 평가되었다. 그러나 수미 품종에서는 6일 저장 후 PBAT/CuONPs 필름 포장군의 ΔE 값이 13.56으로, 포장하지 않은 감자 및 HDPE 포장군과 유의한 차이를 보이지 않았다( $p>0.05$ ). 이는 저장 기간이 경과함에 따라 수미 품종이 다른 품종보다 더 빠르게 색상 변화가 진행됨을 보여주며, PBAT/CuONPs 필름의 효과가 품종에 따라 다를 수 있음을 시사한다. 결론적으로, PBAT/CuONPs 복합 필름은 특히 은선 및 두백 품종에서 녹변 방지에 효과적이며, 해당 품종의 품질 유지에 유리하게 작용할 수 있다.

감자는 빛에 노출되면 3일 이내에 엽록소가 축적되며, 이와 함께 유독성 글리코알칼로이드가 생성된다(Edwards와 Cobb, 1999). 따라서 감자의 신선도와 안전성을 유지하기 위해서는 빛 차단 성능이 우수한 포장재의 사용이 필수적이다. 본 연구 결과는 PBAT/CuONPs 복합 필름이 감자의 저장 및 유통 중

**Table 4.** Surface color of potatoes packaged with PBAT-based film and control films over 6 days

| Variety         | Day | Packaging material <sup>1)</sup> | L                            | a                          | b                        | $\Delta E$               |
|-----------------|-----|----------------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| <i>Eunsun</i>   | 0   | Without film                     | 72.15±2.23 <sup>2)ab3)</sup> | -3.70±0.83 <sup>c</sup>    | 25.47±1.24 <sup>b</sup>  |                          |
|                 | 3   | Without film                     | 69.49±3.06 <sup>bc</sup>     | -7.60±2.82 <sup>cd</sup>   | 25.52±1.79 <sup>b</sup>  | 6.19±1.59 <sup>bc</sup>  |
|                 |     | HDPE                             | 69.34±3.75 <sup>bc</sup>     | -7.73±1.65 <sup>cd</sup>   | 25.82±1.18 <sup>b</sup>  | 5.97±2.29 <sup>bc</sup>  |
|                 |     | Neat PBAT                        | 69.81±2.07 <sup>abc</sup>    | -6.98±2.49 <sup>cd</sup>   | 25.27±1.94 <sup>b</sup>  | 5.02±2.06 <sup>cd</sup>  |
|                 |     | PBAT/CuONPs                      | 72.42±1.51 <sup>a</sup>      | -5.65±1.47 <sup>de</sup>   | 23.49±1.66 <sup>c</sup>  | 3.70±0.79 <sup>d</sup>   |
|                 | 6   | Without film                     | 64.19±2.09 <sup>d</sup>      | -11.58±0.97 <sup>a</sup>   | 27.53±0.88 <sup>a</sup>  | 11.55±1.40 <sup>a</sup>  |
|                 |     | HDPE                             | 63.86±2.25 <sup>d</sup>      | -10.81±2.77 <sup>ab</sup>  | 27.61±1.87 <sup>a</sup>  | 11.57±2.56 <sup>a</sup>  |
|                 |     | Neat PBAT                        | 67.37±2.43 <sup>c</sup>      | -9.08±3.76 <sup>bc</sup>   | 25.73±2.81 <sup>b</sup>  | 8.11±3.51 <sup>b</sup>   |
|                 |     | PBAT/CuONPs                      | 67.34±4.81 <sup>c</sup>      | -6.46±2.69 <sup>d</sup>    | 24.87±1.70 <sup>bc</sup> | 7.10±3.38 <sup>bc</sup>  |
| <i>Duback</i>   | 0   | Without film                     | 71.50±2.09 <sup>a</sup>      | -4.63±0.33 <sup>f</sup>    | 21.53±1.84 <sup>d</sup>  |                          |
|                 | 3   | Without film                     | 65.84±3.26 <sup>bc</sup>     | -9.25±2.14 <sup>c</sup>    | 27.22±1.60 <sup>b</sup>  | 9.52±3.48 <sup>c</sup>   |
|                 |     | HDPE                             | 61.59±1.95 <sup>d</sup>      | -10.54±0.97 <sup>b</sup>   | 27.29±0.78 <sup>b</sup>  | 12.99±1.61 <sup>b</sup>  |
|                 |     | Neat PBAT                        | 65.21±2.51 <sup>c</sup>      | -9.07±1.39 <sup>c</sup>    | 27.07±1.05 <sup>b</sup>  | 9.59±2.66 <sup>c</sup>   |
|                 |     | PBAT/CuONPs                      | 67.67±2.72 <sup>b</sup>      | -6.63±1.24 <sup>c</sup>    | 24.96±1.01 <sup>c</sup>  | 5.88±2.32 <sup>d</sup>   |
|                 | 6   | Without film                     | 61.13±1.86 <sup>d</sup>      | -11.34±1.06 <sup>ab</sup>  | 27.92±1.11 <sup>ab</sup> | 14.38±1.13 <sup>ab</sup> |
|                 |     | HDPE                             | 60.99±1.75 <sup>d</sup>      | -11.95±1.05 <sup>a</sup>   | 29.02±0.85 <sup>a</sup>  | 14.91±1.52 <sup>ab</sup> |
|                 |     | Neat PBAT                        | 59.69±1.89 <sup>d</sup>      | -11.82±0.84 <sup>a</sup>   | 27.91±1.36 <sup>ab</sup> | 15.35±1.36 <sup>a</sup>  |
|                 |     | PBAT/CuONPs                      | 67.58±3.26 <sup>b</sup>      | -7.77±1.38 <sup>d</sup>    | 25.82±1.60 <sup>c</sup>  | 7.08±2.79 <sup>d</sup>   |
| <i>Superior</i> | 0   | Without film                     | 64.68±1.52 <sup>a</sup>      | -1.24±0.91 <sup>c</sup>    | 22.54±1.51 <sup>d</sup>  |                          |
|                 | 3   | Without film                     | 60.54±1.51 <sup>cd</sup>     | -13.48±1.01 <sup>ab</sup>  | 29.10±0.42 <sup>a</sup>  | 14.55±1.24 <sup>a</sup>  |
|                 |     | HDPE                             | 60.42±3.22 <sup>cd</sup>     | -13.14±0.73 <sup>ab</sup>  | 28.63±0.95 <sup>ab</sup> | 14.34±1.40 <sup>a</sup>  |
|                 |     | Neat PBAT                        | 64.14±1.86 <sup>ab</sup>     | -11.71±1.04 <sup>c</sup>   | 28.23±0.84 <sup>ab</sup> | 12.05±1.33 <sup>b</sup>  |
|                 |     | PBAT/CuONPs                      | 64.98±1.68 <sup>a</sup>      | -9.35±1.15 <sup>d</sup>    | 25.79±1.20 <sup>c</sup>  | 8.93±1.31 <sup>c</sup>   |
|                 | 6   | Without film                     | 58.74±2.76 <sup>d</sup>      | -12.26±0.67 <sup>bc</sup>  | 27.19±0.63 <sup>b</sup>  | 13.33±0.85 <sup>ab</sup> |
|                 |     | HDPE                             | 61.51±1.44 <sup>bc</sup>     | -12.59±0.89 <sup>abc</sup> | 28.28±0.57 <sup>ab</sup> | 13.16±0.75 <sup>ab</sup> |
|                 |     | Neat PBAT                        | 62.03±1.30 <sup>bc</sup>     | -13.88±0.47 <sup>a</sup>   | 29.18±0.48 <sup>a</sup>  | 14.56±0.34 <sup>a</sup>  |
|                 |     | PBAT/CuONPs                      | 65.76±0.42 <sup>a</sup>      | -12.85±1.25 <sup>abc</sup> | 29.45±1.03 <sup>a</sup>  | 13.56±1.57 <sup>ab</sup> |

<sup>1)</sup>Without film, non-packaging potatoes; HDPE, high-density polyethylene film; Neat PBAT, neat poly(butylene adipate-co-terephthalate) film; PBAT/CuONPs, poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite film with 0.08 g copper oxide nanoparticles.

<sup>2)</sup>All values are mean±SD (n=3).

<sup>3)</sup>Values with different superscript letters (<sup>a-f</sup>) in the same column are significantly different at p<0.05 by Duncan's multiple range test.

신선도 유지에 효과적인 포장재임을 뒷받침한다. 또한, HDPE 필름으로 포장된 감자에서는 저장 중 수증기 응축이 관찰되었으나, PBAT 필름군에서는 이러한 현상이 나타나지 않았다. 이는 PBAT 필름의 높은 WVP 덕분에 감자의 증산작용으로 생성된 수증기가 필름 외부로 원활히 배출되었기 때문으로 해석된다. 수증기 응축은 감자의 부패를 촉진하고 미생물 증식을 유발할 수 있으므로, WVP가 높은 필름은 신선 농산물 포장에 더

적합한 선택이 될 수 있다(Wang과 Rhim, 2015).

또한 PBAT/CuONPs 복합 필름에 대한 생분해성 연구는 보고된 바 없으나, Yan 등(2025)의 연구에 따르면 CuONPs가 첨가된 키토산 복합 필름은 CuONPs의 우수한 항균 특성으로 인해 순수 키토산 필름보다 분해 속도는 다소 느리지만 최종적으로는 완전히 분해되는 것으로 나타났다(Tomšič 등, 2022; Yan 등, 2025). 따라서 생분해성 고분자인 PBAT에 CuONPs를 첨

가하더라도 생분해성에는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

결과적으로, PBAT/CuONPs 복합 필름은 감자의 색상 변화 억제와 수분 조절에 효과적으로 작용하였으며, 특히 은선과 두백 품종에서 녹변 방지 효과가 통계적으로 유의하게 나타났다 ( $p<0.05$ ). 수미 품종은 단기 저장에서는 긍정적인 반응을 보였으나, 저장 기간이 길어질수록 품종 간 반응 차이가 뚜렷해지는 경향이 확인되었다. 본 필름은 CuONPs가 PBAT 내에 균일하게 분산되어 있으며, 화학적 상호작용 없이 형성된 안정된 구조와 상업용 필름과 유사한 기계적 물성을 바탕으로 실제 적용 가능성도 충분히 갖추고 있다. 이러한 결과는 본 복합 필름이 생분해성 포장재로서 감자와 같은 빛 민감 농산물의 저장성과 시각적 품질 유지에 기여할 수 있음을 시사하며, 향후 유통 환경을 반영한 장기 저장 실험과 품종별 맞춤형 포장 전략 수립이 필요하다.

#### 4. 요약

본 연구에서는 감자의 빛에 의한 녹변 현상을 억제하고 저장 중 품질 저하를 방지할 수 있는 친환경 포장재로서 PBAT 기반 복합 필름을 개발하고 그 특성을 평가하였다. 다양한 유기 및 무기 필름 중 CuONPs를 첨가한 복합 필름은 600 nm 이하 파장에서 가장 우수한 광 차단 성능을 나타내었으며, 특히 감자 녹변이 활발히 발생하는 450 nm 영역에서의 투과도를 효과적으로 감소시켰다. PBAT 매트릭스 내에 CuONPs가 균일하게 분산되어 있으며, FT-IR 및 XRD 분석 결과 화학적 상호작용 없이 안정된 구조를 형성한 것으로 나타났다. 기계적 강도는 상업용 LDPE 필름과 유의한 차이를 보이지 않아 실제 포장재로 적용 가능성이 확인되었고, WVP는 HDPE 대비 높은 값을 보여 내부 수분 응축 억제에 유리하게 작용하였다. 감자 포장 실험 결과, ‘은선’과 ‘두백’ 품종에서  $\Delta E$  값이 저장 후 7로 유지되어 녹변 억제 효과가 통계적으로 유의하게 나타났으며 ( $p<0.05$ ), ‘수미’ 품종은 단기 저장에서는 효과가 있었으나 장기 저장 시에는 품종 특성상 효과가 제한되었다. 이러한 결과는 PBAT/CuONPs 복합 필름이 광 차단성, 수분 조절 기능, 구조적 안정성을 모두 갖춘 생분해성 기능성 포장재로서 감자와 같은 빛 민감 농산물의 저장 품질 유지에 효과적으로 활용될 수 있음을 시사한다.

#### Funding

None.

#### Acknowledgements

None.

#### Conflict of interests

The authors declare no potential conflicts of interest.

#### Author contributions

Conceptualization: Her JY. Methodology: Kim C, Her JY. Formal analysis: Kim C, Her JY. Validation: Kim C, Her JY. Writing - original draft: Kim C. Writing - review & editing: Her JY.

#### Ethics approval

This article does not require IRB/IACUC approval because there are no human and animal participants.

#### ORCID

Chanhyeong Kim (First author)

<https://orcid.org/0009-0001-4921-9340>

Jae-Young Her (Corresponding author)

<https://orcid.org/0000-0002-4634-6045>

#### References

- Ahamed M, Alhadlaq HA, Khan MAM, Karuppiiah P, Al-Dhabi NA. Synthesis, characterization, and antimicrobial activity of copper oxide nanoparticles. *J Nanomater*, 2014, 637858 (2014)
- Al Jaber M, Mallet M, Greenwell HC, Abdelmoula M, Ruby C. Using Ca-Fe layered double hydroxide transformation to optimise phosphate removal from waste waters. *Appl Clay Sci*, 182, 105281 (2019)
- Ali SS, Elsamahy T, Koutra E, Kornaros M, El-Sheekh M, Abdelkarim EA, Zhu D, Sun J. Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *Sci Total Environ*, 771, 144719 (2021)
- Alves L, Medronho B, Antunes FE, Fernández-García MP, Ventura J, Araújo JP, Romano A, Lindman B. Unusual extraction and characterization of nanocrystalline cellulose from cellulose derivatives. *J Mol Liq*, 210, 106-112 (2015)
- Atef M, Rezaei M, Behrooz R. Preparation and characterization agar-based nanocomposite film reinforced by nanocrystalline cellulose. *Int J Biol Macromol*, 70, 537-544 (2014)
- Badry R, El-Nahass MM, Nada N, Elhaes H, Ibrahim MA. Structural and UV-blocking properties of carboxymethyl cellulose sodium/CuO nanocomposite films. *Sci Rep*, 13, 1123 (2023)
- Banaś-Gac J, Radecka M, Llobet E, Partyka-Jankowska E,

- Zakrzewska K. Different architectures of thin film bilayers based on  $\text{TiO}_2$  and  $\text{CuO}$  for green hydrogen generation. *Int J Hydrogen Energy*, 136, 1073-1085 (2025)
- Bang YJ, Shankar S, Rhim JW. Preparation of polypropylene/poly (butylene adipate-co-terephthalate) composite films incorporated with melanin for prevention of greening of potatoes. *Packag Technol Sci*, 33, 433-441 (2020)
- Botta L, Titone V, Mistretta MC, La Mantia FP, Modica A, Bruno M, Sottile F, Lopresti F. PBAT based composites reinforced with microcrystalline cellulose obtained from softwood almond shells. *Polymers*, 13, 2643 (2021)
- Bumbudsanpharoke N, Harnkarnsujarit N, Chongcharoenyanon B, Kwon S, Ko S. Enhanced properties of PBAT/TPS biopolymer blend with  $\text{CuO}$  nanoparticles for promising active packaging. *Food Packag Shelf Life*, 37, 101072 (2023)
- Calderaro MP, de Luca Sarantopoulos CIG, Sanchez EMS, Morales AR. PBAT/hybrid nanofillers composites—Part 1: Oxygen and water vapor permeabilities, UV barrier and mechanical properties. *J Appl Polym Sci*, 137, 49522 (2020)
- Choi HD, Lee HC, Kim SS, Kim YS, Lim HT, Ryu GH. Nutrient components and physicochemical properties of new domestic potato cultivars. *Korean J Food Sci Technol*, 40, 382-388 (2008)
- Costa KE, Silva LL, Martins MAPM, Santos JD, Zanetti M, Dalcanton F, Bugiereck AM, Colpani GL, Baretta CRDM, Fiori MA, Mello JMM. Development of biodegradable polymeric films added with  $\text{CuO}$ -NPs and evaluation of their antifungal activity. *Mater Res*, 26, e20220626 (2023)
- Dammak M, Fourati Y, Tarrés Q, Delgado-Aguilar M, Mutjé P, Boufi S. Blends of PBAT with plasticized starch for packaging applications: Mechanical properties, rheological behaviour and biodegradability. *Ind Crops Prod*, 144, 112061 (2020)
- Dutta K, Nath R. Application of colorimetry in food industries. In: *Advances in Colorimetry*, Samanta AK (Editor), IntechOpen, London, UK (2023)
- Edwards EJ, Cobb AH. The effect of prior storage on the potential of potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) to accumulate glycoalkaloids and chlorophylls during light exposure, including artificial neural network modelling. *J Sci Food Agric*, 79, 1289-1297 (1999)
- Ferreira FV, Cividanes LS, Gouveia RF, Lona LM. An overview on properties and applications of poly(butylene adipate-co-terephthalate)-PBAT based composites. *Polym Eng Sci*, 59, E7-E15 (2019)
- Flury M, Narayan R. Biodegradable plastic as an integral part of the solution to plastic waste pollution of the environment. *Curr Opin Green Sustain Chem*, 30, 100490 (2021)
- Grunenfelder L, Hiller LK, Knowles NR. Color indices for the assessment of chlorophyll development and greening of fresh market potatoes. *Postharvest Biol Technol*, 40, 73-81 (2006)
- Hasanin MS, Youssef AM. Ecofriendly bioactive film doped  $\text{CuO}$  nanoparticles based biopolymers and reinforced by enzymatically modified nanocellulose fibers for active packaging applications. *Food Packag Shelf Life*, 34, 100979 (2022)
- Hasheminya SM, Mokarram RR, Ghanbarzadeh B, Hamishekar H, Kafil HS. Physicochemical, mechanical, optical, microstructural and antimicrobial properties of novel kefir-carboxymethyl cellulose biocomposite films as influenced by copper oxide nanoparticles ( $\text{CuONPs}$ ). *Food Packag Shelf Life*, 17, 196-204 (2018)
- Jaramillo AF, Riquelme SA, Sánchez-Sanhueza G, Medina C, Solís-Pomar F, Rojas D, Montalba C, Melendrez MF, Pérez-Tijerina E. Comparative study of the antimicrobial effect of nanocomposites and composite based on poly (butylene adipate-co-terephthalate) using  $\text{Cu}$  and  $\text{Cu/Cu}_2\text{O}$  nanoparticles and  $\text{CuSO}_4$ . *Nanoscale Res Lett*, 14, 158 (2019)
- Jian J, Xiangbin Z, Xianbo H. An overview on synthesis, properties and applications of poly(butylene-adipate-co-terephthalate)-PBAT. *Adv Ind Eng Polym Res*, 3, 19-26 (2020)
- Kanmani P, Rhim JW. Properties and characterization of bionanocomposite films prepared with various biopolymers and  $\text{ZnO}$  nanoparticles. *Carbohydr Polym*, 106, 190-199 (2014)
- Khan H, Yerramilli AS, D'Oliveira A, Alford TL, Boffito DC, Patience GS. Experimental methods in chemical engineering: X-ray diffraction spectroscopy—XRD. *Can J Chem Eng*, 98, 1255-1266 (2020)
- Kian LK, Jawaaid M, Ariffin H, Karim Z. Isolation and characterization of nanocrystalline cellulose from roselle-derived microcrystalline cellulose. *Int J Biol Macromol*, 114, 54-63 (2018)
- Kurek M, Benbettaieb N, Ščetar M, Chaudy E, Repajić M, Klepac D, Valić S, Debeaufort F, Galić K. Characterization of food packaging films with blackcurrant fruit waste as a source of antioxidant and color sensing intelligent material. *Molecules*, 26, 2569 (2021)
- Lambert S, Wagner M. Environmental performance of bio-based and biodegradable plastics: The road ahead. *Chem Soc Rev*, 46, 6855-6871 (2017)
- Machado RM, Toledo MCF, Garcia LC. Effect of light and temperature on the formation of glycoalkaloids in potato tubers. *Food Control*, 18, 503-508 (2007)
- MacLeod M, Arp HPH, Tekman MB, Jahnke A. The global threat from plastic pollution. *Science*, 373, 61-65 (2021)

- Narayan R. Biodegradable plastics. In: Opportunities for innovation: Biotechnology, NIST GCR 93-633, National Institute of Standards and Technology (NIST), Maryland, USA, p 1-27 (1993)
- Pinheiro IF, Ferreira FV, Souza DHS, Gouveia RF, Lona LMF, Morales AR, Mei LHI. Mechanical, rheological and degradation properties of PBAT nanocomposites reinforced by functionalized cellulose nanocrystals. *Eur Polym J*, 97, 356-365 (2017)
- Qin Y, Li W, Liu D, Yuan M, Li L. Development of active packaging film made from poly(lactic acid) incorporated essential oil. *Prog Org Coat*, 103, 76-82 (2017)
- Reda AT, Weldemhret TG, Park JY, Lim S, Debele NT, Choi SS, Cho C, Park YT. Synthesis and characterization of zinc basic salt-loaded PVA-PEI polymeric composite for antimicrobial activity and triboelectric nanogenerator applications. *Sens Actuators A Phys*, 370, 115197 (2024)
- Reeves AF. Varietal differences in potato tuber greening. *Am Potato J*, 65, 651-658 (1988)
- Rodrigues MO, Abrantes N, Gonçalves FJM, Nogueira H, Marques JC, Gonçalves AMM. Impacts of plastic products used in daily life on the environment and human health: What is known? *Environ Toxicol Pharmacol*, 72, 103239 (2019)
- Sahai A, Goswami N, Mishra M, Gupta G. Structural, vibrational and electronic properties of CuO nanoparticles synthesized via exploding wire technique. *Ceram Int*, 44, 2478-2484 (2018)
- Sawicka-Chudy P, Sibiński M, Wysz G, Rybak-Wilusz E, Cholewa M. Numerical analysis and optimization of  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ ,  $\text{CuO}/\text{TiO}_2$ , heterojunction solar cells using SCAPS. *J Phys Conf Ser*, 1033, 012002 (2018)
- Shankar S, Rhim JW. Effect of types of zinc oxide nanoparticles on structural, mechanical and antibacterial properties of poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) composite films. *Food Packag Shelf Life*, 21, 100327 (2019)
- Shankar S, Rhim JW. Facile approach for large-scale production of metal and metal oxide nanoparticles and preparation of antibacterial cotton pads. *Carbohydr Polym*, 163, 137-145 (2017)
- Shankar S, Rhim JW. Tocopherol-mediated synthesis of silver nanoparticles and preparation of antimicrobial PBAT/silver nanoparticles composite films. *LWT-Food Sci Technol*, 72, 149-156 (2016)
- Shankar S, Teng X, Rhim JW. Properties and characterization of agar/CuNP bionanocomposite films prepared with different copper salts and reducing agents. *Carbohydr Polym*, 114, 484-492 (2014)
- Soleimani E, Taheri R. Synthesis and surface modification of CuO nanoparticles: Evaluation of dispersion and lipophilic properties. *Nano-Struct Nano-Objects*, 10, 167-175 (2017)
- Sridhar A, Kannan D, Kapoor A, Prabhakar S. Extraction and detection methods of microplastics in food and marine systems: A critical review. *Chemosphere*, 286, 131653 (2022)
- Sudesh K, Iwata T. Sustainability of biobased and biodegradable plastics. *CLEAN-Soil Air Water*, 36, 433-442 (2008)
- Taei M, Havakeshian E, Hasheminasab F. Efficient hydrogen and oxygen evolution on the AuNPs@CaFe-LDH composite in alkaline media. *J Electroanal Chem*, 808, 75-81 (2018)
- Tang Y, Yang S, Zhang N, Zhang J. Preparation and characterization of nanocrystalline cellulose via low-intensity ultrasonic-assisted sulfuric acid hydrolysis. *Cellulose*, 21, 335-346 (2014)
- Tanios S, Eyles A, Corkrey R, Tegg RS, Thangavel T, Wilson CR. Quantifying risk factors associated with light-induced potato tuber greening in retail stores. *PLoS One*, 15, e0235522 (2020)
- Tomšič B, Marković D, Janković V, Simončič B, Nikodinović-Runic J, Ilić-Tomić T, Radetić M. Biodegradation of cellulose fibers functionalized with  $\text{CuO}/\text{Cu}_2\text{O}$  nanoparticles in combination with polycarboxylic acids. *Cellulose*, 29, 287-302 (2022)
- Wang LF, Rhim JW. Preparation and application of agar/alginate/collagen ternary blend functional food packaging films. *Int J Biol Macromol*, 80, 460-468 (2015)
- Wang LF, Rhim JW, Hong SI. Preparation of poly(lactide)/poly(butylene adipate-co-terephthalate) blend films using a solvent casting method and their food packaging application. *LWT-Food Sci Technol*, 68, 454-461 (2016)
- Watkins K, Hastie M, Ha M, Hepworth G, Warner R. Machine vision requires fewer repeat measurements than colorimeters for precise seafood colour measurement. *Foods*, 13, 1110 (2024)
- Yamanel K, Caglar A, Oezcan M, Gulsah K, Bagis B. Assessment of color parameters of composite resin shade guides using digital imaging versus colorimeter. *J Esthet Restor Dent*, 22, 379-388 (2010)
- Yan T, Ren Y, Zhang R, Li K, Yang B, Tong M, He J. Biodegradable chitosan-based films decorated with biosynthetic copper oxide nanoparticle for post-harvest tomato preservation. *Int J Biol Macromol*, 295, 139595 (2025)
- Ye F, Peng Y, Chen GY, Deng B, Xu AW. Facile solution synthesis and characterization of ZnO mesocrystals and ultralong nanowires from layered basic zinc salt precursor. *J Phys Chem C*, 113, 10407-10415 (2009)