식품공학 학사학위논문

감자의 녹변방지를 위한 생분해성 필름개발

국립목포대학교 공과대학

식품공학과

정 대 원

이 하 준

이 현 민

문 민 욱

지도교수: 허 재 영

2025년 2월

감자의 녹변방지를 위한
생분해성 필름개발

이 논문을 식품공학 학사학위 논문으로 제출함

국립목포대학교 공과대학

식품공학과

정 대 원

이 하 준

이 현 민

문 민 욱

지도교수 허 재 영

상기자의 식품공학 학사학위 논문을 인준함

심사위원장 마 승 진 (인)

심사위원 허 재 영 (인)

2025년 2월

목 차

국문초록

제1장 서 론 ····· 1

제2장 재료 및 방법 ····· 4

2.1. 실험재료 ····· 4

2.2. 필름제조 ····· 4

2.3. 광투과도 측정 ····· 7

2.4. 두께 및 기계적 특성 ····· 7

2.5. 수증기투과도 ····· 7

2.6. 산소투과도 ····· 8

2.7. 감자 녹변 억제 효과 분석 ····· 8

2.8. FTIR 분석 ····· 9

2.9. SEM 분석 ····· 9

2.10. XRD 분석 ····· 9

2.11. 통계처리 ····· 9

제3장 결과 및 고찰 ····· 11

3.1. 유색필름의 광투과도 측정 ····· 11

3.2. 조성 확립을 위한 기계적 특성 평가 ····· 13

3.3. 제조 필름의 광투과도 측정 ····· 15

3.4. 제조 필름 기계적 평가 ····· 17

3.5. 제조 필름의 수증기투과도 및 산소투과도 측정 ····· 19

3.6. 제조 필름의 적용성 평가 ····· 22

3.7. FT-IR 분석 ····· 26
3.8. XRD 분석 ····· 28
3.9. SEM 분석 ····· 30

제4장 결 론 ····· 32

참고문헌 ····· 33

감자의 녹변방지를 위한
생분해성 필름개발

정 대 원, 이 하 준, 이 현 민, 문 민 욱

국립목포대학교 공과대학 식품공학과

(지도교수 : 허 재 영)

(초록)

본 연구는 감자의 저장 및 유통 과정에서 발생하는 녹변 현상을 방지하기 위한 생분해성 포장재를 개발하는 데 목적이 있다. 감자는 빛에 노출될 경우 엽록소가 축적되면서 녹변 현상이 발생하며, 이는 품질 저하와 독성 물질인 glycoalkaloid 함량 증가로 이어진다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 PBAT와 PLA를 98:2 비율로 혼합하여 복합필름(PPCF)을 제조하고, 소수성 색소를 첨가하여 광 차단 특성을 강화한 PPCF(B) 필름을 개발하였다. 또한, 젤라틴에 TiO_2 기반 색소를 첨가하여 Gel(W) 필름을 제작하였으며, 이를 PPCF(B)와 적층하여 B&W 필름을 완성하였다.

개발된 필름의 물리적, 화학적 특성을 평가하기 위해 광 투과도, 기계적 특성, 수증기 및 산소 투과도, SEM, FTIR, XRD 분석을 수행하였다. PBAT:PLA 98:2 혼합 필름은 기계적 특성이 개선되었으며, PPCF(B)와 Gel(W)의 적층을 통해 높은 수증기 투과도와 낮은 산소 투과도를 확보하였다. B&W 필름은 감자의 산소 접촉을 효과적으로 차단하여 호흡으로 인한 열 발생(호흡열)을 감소시키고, 증산작용으로 발생한 수증기를 원활하게 배출할 수 있도록 하여 저장 환경을 보다 안정적으로 유지함을 보여주었다.

적용성 평가를 위해 B&W 필름을 사용하여 감자를 12일 동안 빛에 노출시킨 결과, 녹변 현상이 유의적으로 감소함을 확인하였다. 이러한 결과는 B&W 필름

이 감자의 품질 유지 및 유통 기한 연장에 효과적임을 입증하며, 빛에 민감한 다양한 식품에 적용 가능성을 제시한다. 또한, 본 연구에서 개발된 포장재는 광 차단 효과뿐 아니라 우수한 산소 차단성 및 수분 투과성을 기반으로 한 지속 가능한 포장 기술로서, 식품 포장재 분야에서 실용적 잠재력을 가진다.

제1장 서 론

감자(*Solanum tuberosum* L.)는 전 세계적으로 연간 약 2억 3천만 톤이 소비되는 비곡물 식량작물로, 쌀과 밀에 이어 세 번째로 많이 소비되는 식량원이다(1). 감자는 전분, 단백질, 미네랄, 탄수화물, 비타민 및 생리활성 화합물을 풍부하게 함유하여 건강에 유익한 다양한 특성을 제공한다(2). 특히 감자는 항산화, 항균, 항염증, 항비만, 항암 및 항당뇨병 효과를 통해 기능성 식품으로도 주목받고 있다(3). 그러나 감자는 저장 및 유통 과정에서 빛에 노출되면 amyloplast가 엽록체로 전환되면서 광합성 색소인 엽록소가 축적되어 표면이 녹색으로 변하는 녹변현상이 발생한다(4, 5). 이러한 현상은 감자의 품질과 상품성을 저하시킬 뿐만 아니라, 독성 물질인 glycoalkaloid의 함량을 증가시켜 안전성 문제를 초래할 수 있다(6). Glycoalkaloid는 감자가 빛에 노출되면 최대 2~3배 증가할 수 있으며, 이는 상업적으로 판매되는 감자의 허용 기준인 100 mg/kg 이하를 초과할 가능성이 있다(7). Glycoalkaloid를 섭취하면 구토, 복통, 두통 등의 증상이 발생할 수 있고, 과량 섭취 시 심각한 위장 및 신경계 손상을 유발할 수 있다(8). Bang 등(2020)에 따르면, polypropylene과 poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) 복합 필름에 자외선 차단 효과가 있는 melanin을 첨가하여 감자의 저장성 평가를 진행한 결과, melanin 첨가가 감자의 녹변 방지에 효과적임을 확인하였다. 이와 같이 포장재의 색상과 첨가제를 활용해 녹변을 방지하는 다양한 연구가 지속적으로 진행되고 있으며, 유색 필름의 활용 가치와 발전 가능성이 높다는 것을 시사한다(4).

플라스틱은 상품 및 식품 포장재로 광범위하게 사용되며, 저렴하고 내구성이 뛰어난 특성 덕분에 수요가 꾸준히 증가하고 있다(9). 현재 전 세계 플라스틱 생산량은 연간 약 3억 2천만 톤에 달하며, 이 중 40% 이상이 일회용 포장재로 사용되고 있다(10). 그러나 플라스틱 폐기물의 재활용률은 10% 미만에 불과하며, 50% 이상이 매립되고 나머지는 소각되거나 해양으로 유입되어 심각한 환경 문제를 초래하고 있다(9,11). 특히 플라스틱에서 방출되는 내분비 교란물질은 생태계와 인체 건강에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(12). 또한 플라스틱은 물리적 분해를 통해 미세플라스틱(5 mm 이하) 및 나노플라스틱(1 mm 미만) 크기의 입

자로 전환되며(13), 이러한 미세플라스틱은 구형, 파편, 섬유 등의 형태로 환경에 축적된다(14). 미세플라스틱 오염은 해양 생태계를 위협할 뿐만 아니라, 이를 섭취한 사람에게 신체적 손상을 초래할 가능성이 있다(15). 이러한 환경 문제를 해결하기 위해 플라스틱 대체재 개발이 활발히 진행되고 있으며, 특히 환경 친화적인 생분해성 플라스틱이 주목받고 있다(16). 플라스틱은 크게 석유 기반과 바이오 기반으로 구분된다. 석유 기반 플라스틱에는 난분해성 PET, PE, PP, PS, PA 와 생분해성 PBS, PBAT 등이 포함되며, 바이오 기반 플라스틱에는 난분해성 Bio-PE, Bio-PET 와 생분해성 PLA, PHA 등이 있다(17).

모든 석유 기반 생분해성 플라스틱 중 가장 널리 사용되는 것 중 하나는 poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)이다. 2021 년 기준, PBAT 의 글로벌 생산량은 전체 플라스틱 생산량의 19.2%를 차지하며, 연간 46 만 톤 이상이 생산되고 있다(18). PBAT 는 높은 생분해성을 주요 특성으로 하며, 토양 속에서 3 개월 이내에 90%의 생분해율을 보이는 것으로 보고된다(19). 그러나 PBAT 기반 필름은 연신율이 우수하지만 차단 특성이 기존 플라스틱에 비해 낮아 식품 포장재로의 효율적 사용을 위해 차단 특성이 높은 생분해성 플라스틱과의 혼합이 필요하다(19). PBAT 와 혼합 가능한 대표적인 생분해성 플라스틱 중 하나는 polylactic acid (PLA)로, 높은 강도와 강성, 비교적 낮은 비용 등 바람직한 특성을 가진다(20). PLA 는 옥수수 전분을 발효하여 얻은 재생 가능 자원 기반 생분해성 폴리머로 환경 친화적인 특징을 갖고 있다(21, 22). 또한 PLA 는 높은 인장강도와 PET 에 가까운 기계적 특성을 보이며, 포장재로서의 경쟁력을 갖추고 있다(23, 24). 그러나 PLA 는 유연성과 차단 특성이 부족하여 식품 포장재로 활용하기 위해서는 개선이 필요하다(23). 이러한 문제를 해결하기 위해 PLA 는 PBAT 와의 혼합을 통해 인장강도와 내구성을 동시에 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다(25, 26).

한편, 식품 포장에서 생물 기반 폴리머는 무독성이며 분해가 용이하다는 장점으로 많은 주목을 받고 있다(27). 그 중 젤라틴은 돼지와 소의 가죽, 뼈, 생선 비늘에서 추출된 수용성 단백질로, 저렴한 비용과 뛰어난 범용성을 갖춘 생분해성 폴리머이다(28). 젤라틴은 투명성, 생분해성, 필름 형성 특성이 우수하며, 낮은 산소 투과도로 인해 식품 포장재로 적합하다(29, 30). 또한 방향족 아미노산 사슬

이 자외선을 흡수하여 식품을 빛으로부터 보호하는 효과도 제공한다(31). 그러나 젤라틴 필름은 방수 특성과 기계적 강도가 낮아 포장재로의 적용에 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 젤라틴을 소수성 중합체와 적층하여 필름의 성능을 개선하는 연구가 활발히 진행되고 있다(32). Martucci 와 Ruseckaite(2010)는 젤라틴을 주성분으로 sodium montmorillonite 와 dialdehyde starch 를 활용하여 제작한 3 층 필름의 적층 구조가 기계적 특성을 크게 개선한다고 보고하였다. 이러한 연구 결과는 젤라틴을 기반으로 한 적층 필름이 식품 포장재로서 충분한 성능을 발휘할 수 있음을 시사한다(33).

본 연구에서는 감자의 저장 및 유통 과정에서 발생하는 녹변현상을 방지할 수 있는 새로운 생분해성 포장재를 개발하고자 하였다. 이를 위해 PBAT, PLA, 젤라틴 등 생분해성 폴리머를 사용하여 용매 캐스팅법으로 필름을 제조한 후, 적층 공정을 통해 포장재를 제작하였다. 제작된 생분해성 포장재의 광 투과도, 기계적 특성, 수증기 및 산소 투과도, 적용성 평가 등을 포함한 특성 분석을 진행하였다. 이 연구를 통해 감자의 상업적 가치와 안전성을 높이고, 환경친화적이며 지속 가능한 농업 및 식품 유통 체계 구축에 기여할 수 있는 포장 기술의 방향성을 제시하고자 한다.

제2장 재료 및 방법

2.1 실험 재료

본 연구에서 사용된 poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) (ecoflex®F Blend C1200, BASF Company, Germany)와 poly L-lactic acid (PLA) (Biomer® L9000; weight-average molecular weight of 200 kDa, Biomer Inc., Germany)는 각각 드라이 오븐에서 50℃로 48시간 이상 건조한 후 사용하였다. 젤라틴(beef gelatin, geltech, Korea)은 100% 우피 원료의 식품용 제품으로 구매하여 사용하였다. 용매로는 $CHCl_3$ (chloroform) (Daejung Chemicals & Metals Co., Ltd., Korea)을 사용하였다. 필름의 색상 조정을 위해 소수성 색소(캔디컬러 블랙, Chefmaster®, USA)와 친수성 색소(리퀴드 화이트 색소, Chefmaster®, USA)를 사용하였다. 소수성 색소의 성분은 팜유 80%, 식용색소 청색제2호 알루미늄레이크 12%, 적색제40호 알루미늄레이크 4%, 황색제5호 알루미늄레이크 4%로 구성되었으며, 친수성 색소의 성분은 TiO_2 20%와 글리세롤 80%로 구성되었다. 실험에 사용된 감자는 은선 품종으로, 지역 소매점(부안 로컬푸드 직매장, Korea)에서 구매하였다.

2.2 필름 제조

순수 젤라틴 필름(Gel)을 제조하기 위해 젤라틴 4 g을 증류수 150 mL에 혼합한 뒤, 자기 교반기를 사용하여 60℃에서 완전히 용해하였다. 용해된 혼합물은 실내온도 30±2℃, 습도 17±2%가 유지되는 공간에서 Teflon 코팅된 유리판 위에 균일하게 도포한 후, 48시간 동안 건조하여 제작하였다. 한편, 젤라틴 복합필름인 젤라틴 백색 필름(Gel(W))은 젤라틴 4 g과 리퀴드 화이트 색소 4 g을 증류수 150 mL에 혼합하고, 앞서와 동일한 공정을 통해 제조하였다.

순수 PBAT 필름, 순수 PLA 필름, PBAT-PLA 혼합필름(PPCF), 흑색 PBAT-PLA 복합필름(PPCF(B))은 공통적으로 chloroform 80 mL를 용매로 사용하여 제조되었다. PBAT 또는 PLA를 각각 단독으로 사용하거나, PBAT과

PLA를 98:2 비율(PBAT 3.92 g : PLA 0.08 g)과 2:98 비율(PBAT 0.08 g : PLA 3.92 g)로 혼합하여 자기 교반기를 통해 72시간 동안 용해하였다. 흑색 PBAT-PLA 복합필름(PPCF(B))은 PBAT-PLA 혼합필름에 캔디컬러 블랙 색소 4 g을 추가하여 용해하였다. 용해된 혼합물은 실내온도 30±2℃, 습도 17±2% 조건에서 Teflon 코팅된 유리판 위에 균일하게 도포한 뒤, 48시간 동안 건조하여 각 필름을 제작하였다.

제작된 젤라틴 백색 필름(Gel(W)) 위에 흑색 PBAT-PLA 복합필름(PPCF(B))을 캐스팅하여 적층 필름(B&W)을 제작하였다. 적층 과정은 실내온도 30±2℃, 습도 17±2%의 조건에서 진행되었다. 최종적으로 완성된 B&W는 항온항습기(JSTH-150CP, JSR Ltd., Korea)를 이용해 25℃ 및 50% 상대습도로 보관하였으며, 이후 실험에 사용하였다. Fig. 1에 필름 제조 공정을 모식도로 나타내었다.

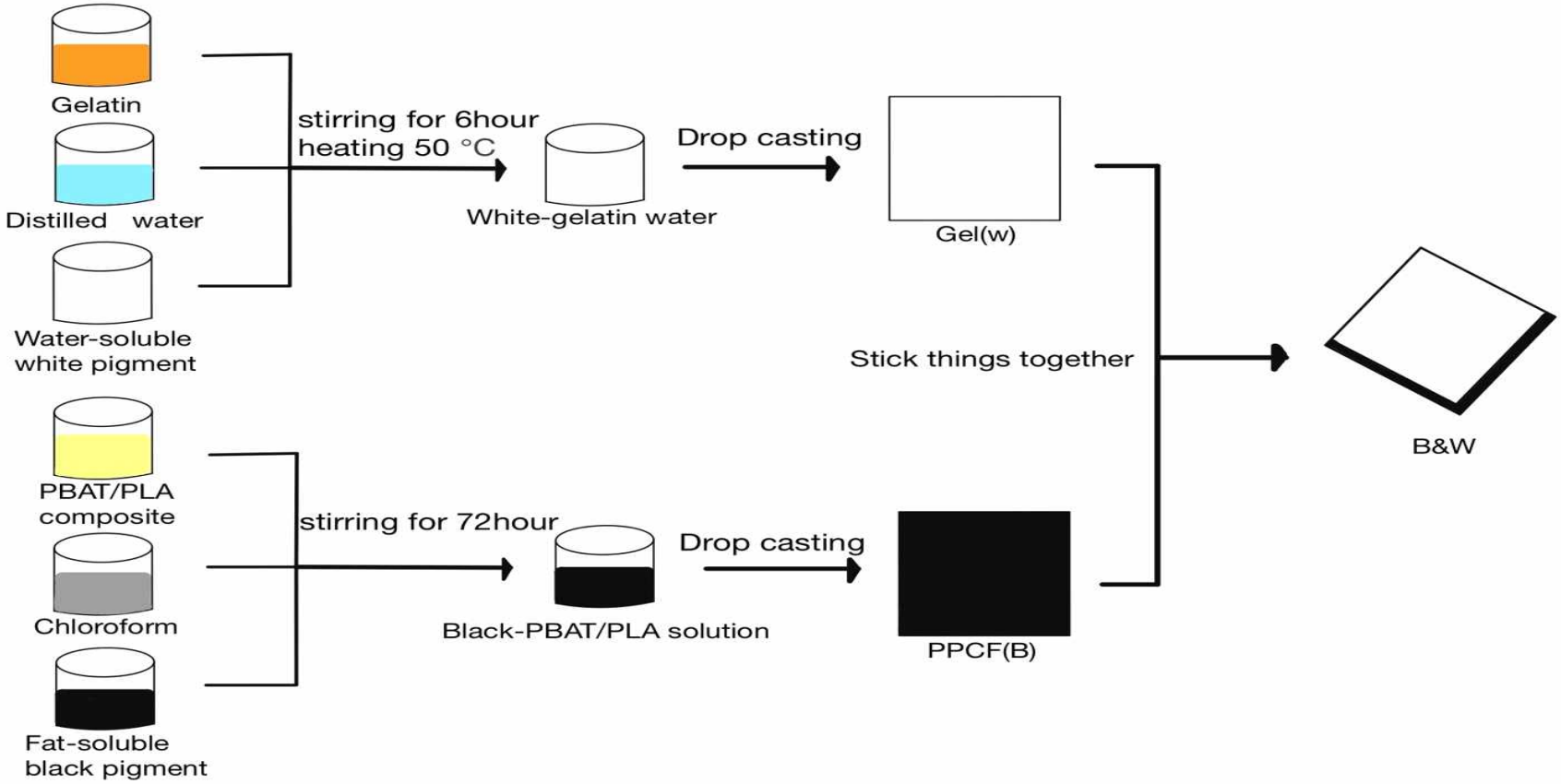


Fig 1. Schematic diagram of the laminated B&W film

2.3 광투과도 측정

각 필름의 광투과도는 UV-visible 분광광도계(UV-3600i Plus, Shimadzu Corporation, Japan)를 사용하여 측정하였다. 측정은 200 nm에서 800 nm까지의 파장 범위에서 50 nm 간격으로 수행하였으며, 필름은 3 cm × 3 cm 크기로 절단하여 분석에 사용하였다.

2.4 두께 및 기계적 특성

각 필름의 두께는 디지털 마이크로미터(MDE-25M, Mitutoyo Ltd., Japan)를 이용하여 필름의 다양한 지점에서 무작위로 5회 측정한 뒤, 평균값을 계산하여 결정하였다.

기계적 특성은 ASTM-D882 표준 시험 방법에 따라 인장강도(tensil strength, TS), 파단 연신율(elongation at break, EB), 탄성 계수(elastic modulus, EM)를 평가하였다. 필름은 2.5 cm × 15 cm 크기로 절단하였으며, 물성시험기(universal testing machine, Model 5565, instron engineering corporation, Canton, MA, USA)를 사용하였다. 시험은 500 N 용량의 로드셀을 이용하여 수행되었으며, 그립 길이와 크로스헤드 속도는 각각 50 mm와 5 mm/min로 설정하여 측정하였다.

2.5 수증기투과도

필름의 수증기 투과성(WVP)은 ASTM E96-95 표준 방법(Gennadios, Weller, & Gooding, 1994)을 따라 측정하였다. WVP를 측정하기 위해 필름은 7.5 cm × 7.5 cm 크기로 절단하여, 18 mL의 증류수를 포함한 측정 장치(2.5 cm × 6.8 cm) 상단에 장착하였다. 밀봉은 뚜껑과 투습컵 사이의 O-Ring을 이용하여 이루어졌다. 투습컵은 25℃ 및 50% 상대 습도로 제어된 항온항습기에서 8시간 동안 1시간 간격으로 측정하였다. 수증기 전달율(WVTR)은 투습컵의 중량 감소

곡선에서 계산된 기울기를 통해 산출하였으며, WVP는 다음 식으로 계산하였다:

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

여기서 T는 필름의 두께(m)이고 Δp는 필름을 투과하는 수증기 압력 차(Pa)이다.

2.6 산소투과도

필름의 기체 차단 특성은 산소 투과도기(OX-TRAN Model 2/22, Mocon, USA)를 사용하여 측정하였다. 측정은 23℃, 상대습도(RH) 0%, 및 760 mmHg 조건에서 수행되었으며, 결과는 $cm^3/(m^2 \cdot day)$ 단위로 나타내었다.

2.7 감자 녹변 억제 효과 분석

각 필름의 녹변 억제 효과를 평가하기 위해 감자의 포장 적용성을 실험하였다. 실험에 사용된 은선 품종 감자는 증류수(D.W.)로 세척한 후 물기를 완전히 제거하였다. 평가에 사용된 필름은 비닐접착기(SK-310, 삼보테크, Korea)를 사용하여 파우치 백 형태로 제작하였으며, 각 파우치에는 감자 5개를 담아 밀봉하였다. 포장된 감자는 암실에서 백열등을 이용해 밝기 6.8 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$로 설정된 환경에 노출시켰다. 대조군(control)은 포장하지 않은 감자로 설정하였으며, 양성 대조군(positive control)은 시중에서 판매되는 감자 포장재인 투명 LDPE를 사용하였다.

녹변 억제 효과는 색차 측정법을 통해 분석하였다. 포장 적용성 평가는 총 12일 동안 진행되었으며, 감자의 표면색 변화를 기준으로 녹변의 정도를 평가하였다. 표면색 변화는 색차계(CR-400 chroma meter, Konica Minolta Inc., Osaka, Japan)를 사용하였고, Hunter 색상 척도에 따라 L, a, b 값을 측정하였다. 측정은 감자의 위, 아래, 옆면의 3개 위치에서 진행되었다. ΔE(전체 색상 차이)는 다음과 같은 식을 통해 결정하였다:

$$\Delta E = [(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2]^{0.5}$$

여기서 L_1, a_1, b_1은 0일 차 감자의 표면색상 값이며, L_2, a_2, b_2는 3, 6, 9, 12일

차 감자의 표면색상 값이다.

2.8 FTIR 분석

각 필름(2.5 cm × 3 cm)은 FTIR 분석을 위해 광선 노출 표면을 직접 측정하였다. 샘플의 FTIR 분광법은 4000~500 cm^{-1} 범위에서 적외선 분광기(model frontier, Perkin Elmer, Inc., USA)를 사용하여 수행하였다.

2.9 SEM 분석

각 필름의 표면 구조는 필드 방출형 스캐닝 전자 현미경(FE-SEM, S-4800, Hitachi Co. Ltd., Japan)을 이용하여 관찰하였다. 필름 샘플은 작은 조각으로 절단한 뒤, 양면 탄소 테이프를 사용해 시료 홀더에 고정하였다. 이후, 샘플을 2분간 백금으로 코팅한 후 3.0 kV의 가속 전압 하에서 3.00K 배율로 이미지를 촬영하였다.

2.10 XRD 분석

각 필름(2 cm × 2 cm)의 XRD 패턴은 X선 회절계(D8 Discover Diffractometer, Bruker AXS, Karlsruhe, Germany)를 사용하여 분석하였다. Ni로 필터링된 Cu, Kα 방사선(λ=1.5405 Å)을 사용하였으며, 20 mA 전류와 40 kV 전압에서 측정하였다. 스텝 스캔은 25℃에서 2Θ=5°~90° 범위에서 0.02°의 간격으로 진행되었다.

2.11 통계처리

데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 각 실험을 3회 반복 측정하였으며, 측정값의 평균과 표준편차를 계산하였다. 그룹 간 유의적인 차이(P<0.05)를 확인하기 위

해 일원배치 분산분석(Analysis of Variance, ANOVA)을 실시하였다. 사후 검정은 SPSS 소프트웨어(SPSS Inc. USA)를 이용하여 Duncan의 다중 범위 테스트로 수행하였다.

제3장 결과 및 고찰

3.1 유색 필름의 광투과도 측정

본 연구에서는 UV-3600i Plus 장비를 사용하여 다양한 유색 필름(Red, Orange, Yellow, Green, Blue, Purple, Black)의 광투과도를 측정하였다. 감자는 특정 파장대의 빛에 노출될 때 녹변현상이 촉진된다는 보고가 있으며, 특히 450 nm와 650 nm의 파장대 빛에 의해 녹변이 증가하는 것으로 알려져 있다(6).

이에 본 연구에서는 감자의 녹변 방지에 효과적인 포장 필름 색상을 선정하기 위해 250 nm에서 800 nm 파장대까지의 광투과도를 50 nm 간격으로 측정하였다. 측정된 광투과도 결과는 Table 1에 정리하였으며, 이를 통해 각 유색 필름의 광투과 특성을 비교하였다.

연구 결과, 검은색 필름이 250 nm에서 800 nm 파장대에서 광투과도가 가장 낮은 것으로 확인되었다. 이는 검은색 필름이 광범위한 파장대의 빛을 효과적으로 차단하여 감자의 녹변 방지에 유리할 것으로 예상할 수 있음을 의미한다.

또한, 이러한 결과는 감자의 녹변 방지를 위한 필름 색상 선택에 중요한 기초 데이터를 제공하며, 특정 파장대에서의 광투과도 특성이 포장재 설계에 있어 핵심 요소임을 시사한다. 특히 검은색 필름의 우수한 차단 성능은 감자의 품질과 상업적 가치를 유지하는 데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1. Light transmittance (%) of colored films across different wavelengths (250-800 nm)

	250 nm	300 nm	350 nm	400 nm	450 nm	500 nm	550 nm	600 nm	650 nm	700 nm	750 nm	800 nm
Black	0.07±0.12^{f}	2.92±0.19^{h}	5.79±0.03^{g}	3.56±0.10^{h}	5.42±0.11^{h}	7.72±0.13^{f}	5.01±0.07^{g}	3.99±0.04^{h}	8.00±0.12^{h}	48.87±0.17^{g}	74.66±0.36^{d}	78.18±0.20^{e}
Red	1.68±0.10^{e}	19.39±0.38^{g}	16.16±0.32^{f}	17.05±0.45^{g}	17.88±0.42^{g}	8.25±0.33^{f}	12.95±0.39^{f}	53.54±0.21^{d}	80.62±0.15^{d}	84.11±0.29^{c}	86.18±0.12^{c}	86.77±0.16^{d}
Purple	8.44±0.24^{c}	26.49±0.39^{f}	42.62±0.40^{c}	48.88±0.40^{c}	55.70±0.43^{c}	34.37±0.28^{e}	5.49±0.48	43.06±0.26^{e}	63.72±0.31^{e}	81.03±0.44^{d}	86.99±0.18^{c}	88.52±0.20^{c}
Green	4.98±0.08^{d}	34.87±0.23^{e}	35.41±0.16^{e}	26.15±0.20^{e}	22.56±0.16^{e}	56.53±0.35^{c}	53.99±0.11^{d}	33.48±0.18^{f}	40.57±0.24^{f}	78.54±0.98^{e}	86.25±0.37^{c}	87.89±0.39^{c}
Yellow	7.79±0.14^{c}	39.91±0.13^{c}	42.11±0.17^{c}	28.92±0.19^{d}	27.80±0.18^{d}	57.33±0.19^{c}	78.14±0.14^{b}	84.89±0.10^{c}	86.47±0.14^{c}	87.17±0.08^{b}	88.30±0.10^{b}	88.53±0.07^{c}
Orange	5.10±0.21^{d}	36.84±0.41^{d}	37.51±0.38^{d}	24.16±0.38^{f}	20.40±0.33^{f}	49.43±0.67^{d}	73.57±0.24^{c}	85.72±0.59^{b}	87.46±0.34^{b}	87.78±0.40^{b}	88.72±0.45^{b}	89.76±0.28^{b}
Blue	30.08±0.86^{b}	51.48±1.36^{b}	56.03±1.18^{b}	81.94±1.46^{b}	86.53±1.42^{b}	73.87±1.26^{b}	20.06±0.66^{e}	9.21±0.37^{g}	17.29±0.58^{g}	71.75±1.14^{f}	88.34±0.71^{b}	89.48±0.54^{b}
Transparent	84.11±1.07^{a}	86.71±0.82^{a}	88.72±0.67^{a}	89.13±0.53^{a}	89.58±0.44^{a}	90.18±0.35^{a}	90.20±0.27^{a}	90.50±0.13^{a}	90.68±0.20^{a}	90.59±0.25^{a}	90.53±0.19^{a}	90.85±0.51^{a}

All values are mean±SD (n=3). Means with different superscript letters in the same column are stati stically different at $P<0.05$ by Duncan's multiple range test.

3.2 조성 확립을 위한 기계적 특성 평가

본 연구에서 제작된 필름의 인장강도, 탄성계수, 파단 연신율 결과를 Table 2에 나타내었다. 시판 감자 포장재인 LDPE 필름의 기계적 특성은 인장강도 11.11 MPa, 탄성계수 310.91 GPa, 파단 연신율 478.76%로 확인되었다.

순수 PBAT 필름의 기계적 특성은 인장강도 13.99 MPa, 탄성계수 76.05 GPa, 파단 연신율 386.69%로 나타나, 낮은 탄성계수로 인해 유연하고 부드러운 특성과 높은 파단 연신율을 통해 강인한 고분자임을 확인하였다. 반면, 순수 PLA 필름의 기계적 특성은 인장강도 33.09 MPa, 탄성계수 2028 GPa, 파단 연신율 5.13%로 나타나, 높은 탄성계수와 낮은 파단 연신율로 인해 딱딱하고 부서지기 쉬운 특성을 확인하였다.

PBAT와 PLA의 단점을 보완하기 위해 다양한 비율로 혼합 필름을 제작한 후, LDPE와의 기계적 특성을 비교하였다. PBAT:PLA(98:2) 혼합 필름의 경우, 순수 PBAT 필름에 비해 인장강도가 유의적으로 증가하였으며, 탄성계수는 유의적 차이는 없지만 소폭 증가하는 경향을 보였다. 또한, 파단 연신율이 순수 PBAT 필름보다 유의적으로 증가하여 유연성과 내구성이 개선되었음을 확인하였다.

반면, PBAT:PLA(2:98) 혼합 필름은 탄성계수가 순수 PLA 필름보다 유의적으로 증가하였으며, 이로 인해 더욱 딱딱하고 부서지기 쉬운 특성을 나타냈다. 이는 PLA의 높은 탄성계수가 혼합 필름에 미치는 영향이 크다는 것을 보여준다. 이전 연구 결과에서도 PBAT:PLA를 98:2 비율로 혼합할 경우 기계적 특성이 우수하며, 순수 PBAT 필름의 단점을 개선하는 최적의 비율임이 확인되었다(34).

PBAT:PLA(98:2) 혼합 필름은 LDPE와 비교하여 인장강도가 유의적으로 높았고, 탄성계수는 유의적 차이가 없었으며, 파단 연신율 또한 유의적으로 높게 나타났다. 결론적으로, 본 연구 결과는 LDPE를 대체할 수 있는 생분해성 필름 개발의 가능성을 제시하며, 특히 PBAT:PLA 98:2 조성이 LDPE의 대체 소재로 가장 적합하다는 것을 시사한다.

Table 2. Composition and preparation of biodegradable films.

	Tensile strength (Mpa)	Elastic modulus (Gpa)	Elongation at break (%)
LDPE (Positive control)	11.11±0.82^{d}	310.91±49.44^{c}	478.76±43.56^{ab}
Neat PBAT	13.99±2.65^{d}	76.05±3.36^{c}	386.69±180.57^{b}
PBAT98:PLA2	19.92±0.34^{c}	108.94±7.51^{c}	580.72±48.06^{a}
PBAT2:PLA98	41.48±2.91^{a}	2435.31±318.62^{a}	14.40±11.49^{c}
Neat PLA	33.09±0.22^{b}	2028±114.84^{b}	5.13±0.92^{c}

All values are mean±SD (n=3). Means with different superscript letters in the same column are stati stically different at $P<0.05$ by Duncan's multiple range test.

3.3 제조 필름의 광 투과도 측정

각 제조 필름의 광 투과도 결과는 Table 3에 나타내었다. UV-3600i Plus를 사용하여 필름의 광 투과도를 측정한 결과, PPCF, PPCF(B), Gel(W), B&W 필름은 450 nm-600 nm의 파장 범위에서 광 투과도가 유의적으로 감소하는 경향을 보였다(P<0.05).

이 결과는 필름에 첨가된 색소의 유무가 광 투과도에 미치는 영향을 명확히 보여준다. 특히, 유색 필름의 광 차단 능력이 농산물의 저장성과 상품성에 중요한 역할을 한다는 것을 시사한다. 광 차단 효과는 감자의 녹변현상을 최소화하는 데 필수적인 요소로 작용하며, 적절한 필름의 선택이 감자의 품질 유지와 유통 기한 연장에 기여할 수 있다.

Table 3. Light transmittance of biodegradable films.

	200 nm	250 nm	300 nm	350 nm	400 nm	450 nm	500 nm	550 nm	600 nm	650 nm	700 nm	750 nm	800 nm
LDPE (Positive control)	0.00± 0.00^{b}	0.11± 0.2^{c}	0.06± 0.09^{c}	72.25±1 .78^{b}	76.8± 1.62^{b}	79.41± 1.9^{b}	81.0± 1.39^{b}	82.3± 1.40^{b}	83.4± 1.45^{a}	84.2± 1.42^{a}	84.9± 1.06^{a}	84.32± 1.24^{ab}	84.6± 0.88^{ab}
Neat PBAT	0.63± 0.88^{ab}	0.19± 0.16^{c}	0.20± 0.27^{c}	0.19± 0.26^{d}	1.28± 0.14^{d}	1.73± 0.34^{d}	2.70± 0.28^{d}	4.31± 0.29^{d}	6.15± 0.44^{c}	8.46± 0.49^{c}	10.93± 0.56^{c}	14.57± 0.45^{c}	17.56± 1.11^{c}
Neat PLA	0.60± 0.49^{ab}	37.72± 2.80^{b}	54.98± 2.02^{b}	62.84± 2.28^{c}	67.53± 1.63^{c}	70.8± 1.93^{c}	73.44± 1.54^{c}	75.65± 1.52^{c}	76.85± 1.48^{b}	78.15± 1.48^{b}	79.15± 1.49^{b}	83.07± 2.34^{b}	83.56± 1.82^{b}
PPCF	0.18± 0.25^{ab}	0.00± 0.00^{c}	0.05± 0.07^{c}	0.23± 0.24^{d}	0.89± 0.11^{d}	1.22± 0.29^{d}	1.87± 0.37^{d}	2.81± 0.57^{d}	4.02± 0.84^{d}	5.54± 1.12^{d}	7.62± 1.53^{d}	9.86± 2.17^{d}	12.1± 2.48^{d}
PPCF(B)	1.26± 0.12^{a}	0.07± 0.11^{c}	0.19± 0.13^{c}	0.11± 0.2^{d}	0± 0^{d}	0.03± 0.06^{d}	0.04± 0.04^{e}	0.02± 0.03^{e}	0.05± 0.04^{e}	0.03± 0.03^{e}	0.02± 0.03^{e}	0.19± 0.33^{e}	0.40± 0.11^{e}
Gel	0.43± 0.61^{ab}	42.81± 4.57^{a}	71.30± 0.79^{a}	78.13± 0.57^{a}	81.36± 0.70^{a}	82.91± 0.93^{a}	83.90± 0.72^{a}	84.60± 0.74^{a}	85.10± 0.73^{a}	85.55± 0.72^{a}	85.83± 0.82^{a}	86.53± 0.93^{a}	86.74± 0.62^{a}
Gel(W)	0.86± 0.65^{ab}	0.00± 0.00^{c}	0.01± 0.02^{c}	0.61± 0.11^{d}	0.22± 0.17^{d}	0.12± 0.11^{d}	0.12± 0.10^{e}	0.18± 0.06^{e}	0.09± 0.13^{e}	0.09± 0.07^{e}	0.20± 0.16^{e}	0.42± 0.37^{e}	0.18± 0.23^{e}
B&W	0.34± 0.60^{ab}	0.00± 0.00^{c}	0.00± 0.00^{c}	0.16± 0.27^{d}	0.10± 0.10^{d}	0.07± 0.07^{d}	0.01± 0.01^{e}	0.03± 0.05^{e}	0.03± 0.05^{e}	0.25± 0.43^{e}	0.08± 0.14^{e}	0.23± 0.29^{e}	0.21± 0.36^{e}

All values are mean±SD (n=3). Means with different superscript letters in the same column are stati stically different at $P<0.05$ by Duncan's multiple range test.

Abbreviations: PPCF, PBAT98:PLA2; PPCF(B), PBAT98:PLA2+ Candy Color Black 4g; Gel, Gelatin film; Gel(W), Gelaitn film+ Liquid White 4g; B&W, PPCF(B)+ Gel(W).

3.4 제조 필름 기계적 평가

본 연구에서 제작된 필름의 인장강도, 탄성계수, 파단 연신율 결과를 Table 4에 정리하였다. Gel의 기계적 특성은 인장강도 90.69 MPa, 탄성계수 6346.26 GPa, 파단 연신율 1.85%로 나타났다. 이는 높은 탄성계수와 낮은 파단 연신율로 인해 경직된 특성을 나타냄을 확인하였다. 반면, 친수성 색소를 첨가한 Gel(W)는 인장강도 6.77 MPa, 탄성계수 78.6 GPa, 파단 연신율 56.81%를 나타냈다. 이는 색소 첨가를 통해 탄성계수가 감소하면서 필름이 유연하고 부드러운 특성을 가지게 되었으며, 높은 파단 연신율은 필름이 강인한 고분자 구조를 갖추었음을 보여준다.

PPCF의 기계적 특성은 인장강도 19.91 MPa, 탄성계수 108.94 GPa, 파단 연신율 580.72%로 나타나, 높은 유연성과 강인한 특성을 확인할 수 있었다. 그러나 지용성 색소를 첨가한 PPCF(B)는 인장강도 2.60 MPa, 탄성계수 43.4 GPa, 파단 연신율 41.82%로 나타났다. 이는 색소 첨가로 인해 탄성계수와 파단 연신율이 모두 감소하면서 필름이 유연하지만, 잘 부서지는 특성을 가지게 되었음을 시사한다.

B&W 필름의 기계적 특성은 인장강도 2.64 MPa, 탄성계수 21.85 GPa, 파단 연신율 128.06%로 나타났다. 이는 PPCF(B)와 Gel(W)에 비해 낮은 탄성계수를 가지면서도, 파단 연신율이 상대적으로 높아 필름의 유연성과 인장 강도가 개선되었음을 확인하였다.

결과적으로, B&W 필름은 PPCF(B)와 Gel(W) 필름을 적층함으로써 유연하고 부드러운 특성을 유지하면서도, PPCF(B)의 낮은 파단 연신율로 인해 잘 부서지는 특성을 보완할 수 있음을 시사한다. 이는 적층 공정을 통해 필름의 단점을 개선하고 기계적 성능을 최적화할 가능성을 제시한다.

Table 4. Mechanical properties of biodegradable films.

	Tensile strength (Mpa)	Elastic modulus (Gpa)	Elongation at break (%)	Thickness (μm)
PPCF	19.91±0.34^{b}	108.94±7.51^{b}	580.72±48.06^{a}	50.33±8.93^{d}
PPCF(B)	2.60±0.37^{b}	43.4±3.78^{b}	41.82±13.49^{c}	143.27±15.85^{b}
Gel	90.69±37.26^{a}	6346.26±2875.81^{a}	1.85±0.092^{c}	50.60±3.96^{d}
Gel(W)	6.77±1.90^{b}	78.6±30.13^{b}	56.81±8.78^{c}	91.47±6.38^{c}
B&W film	2.64±0.21^{b}	21.85±1.15^{b}	128.06±6.36^{b}	217.33±8.55^{a}

All values are mean±SD (n=3). Means with different superscript letters in the same column are stati stically different at $P<0.05$ by Duncan's multiple range test.

Abbreviations: PPCF, PBAT98:PLA2; PPCF(B), PBAT98:PLA2+ Candy Color Black 4g; Gel, Gelatin film; Gel(W), Gelaitn film+ Liquid White 4g; B&W, PPCF(B)+ Gel(W).

3.5 제조 필름의 수증기투과도 및 산소투과도 측정

제조된 필름의 수증기투과도(WVP) 및 산소투과도(OTR) 결과는 Table 5에 나타내었다. WVP 분석 결과, Gel과 Gel(W)의 WVP는 각각 5.27±0.40 × 10^{-10} g·m/m²·Pa·s 및 9.56±0.75 × 10^{-10} g·m/m²·Pa·s로 나타났다. 이는 친수성 색소 첨가로 인해 WVP가 약 81% 증가했음을 보여주며, 이는 통계적으로 유의미한 차이를 나타냈다(P<0.05). PPCF의 WVP는 5.20±0.89 × 10^{-10} g·m/m²·Pa·s, PPCF(B)는 14.82±0.46 × 10^{-10} g·m/m²·Pa·s로 나타나, 지용성 색소 첨가로 WVP가 약 185% 증가했음을 확인하였다(P<0.05).

B&W 필름의 WVP는 B&W(W)에서 21.33±1.78 × 10^{-10} g·m/m²·Pa·s, B&W(B)에서 25.43±1.59 × 10^{-10} g·m/m²·Pa·s로 나타났다. 이는 PPCF(B)보다 각각 약 72% 및 81% 증가했음을 의미하며, 유의적인 차이를 보였다(P<0.05). 이러한 결과는 Wu 등(2019)과 Wang 등(2022)의 연구 결과와 유사한데, 색소가 고분자 매트릭스에 응집하여 천공을 생성, WVP가 증가한다는 보고와 일치한다(35, 36).

산소투과도(OTR) 분석 결과, Gel과 Gel(W)의 OTR은 각각 0.04±0.03 cm^3/m^2·day 및 0.03±0.01 cm^3/m^2·day로, 약 25% 감소하였지만 통계적으로 유의한 차이는 없었다(P>0.05). PPCF는 5.93±0.28 cm^3/m^2·day, PPCF(B)는 94.97±3.34 cm^3/m^2·day로, PPCF(B)의 값이 PPCF 대비 약 1,501% 증가하며 유의적인 차이를 나타냈다(P<0.05).

B&W 필름의 OTR은 B&W(W)에서 0.02±0.00 cm^3/m^2·day, B&W(B)에서 0.06±0.00 cm^3/m^2·day로, neat PBAT, neat PLA, PPCF(B)와 비교했을 때 각각 약 99.97%, 99.96%, 99.98% 감소하였다(P<0.05). 이는 Ejaz 등(2018)의 보고와 유사하게, 색소가 고분자 매트릭스 내에서 불투과성 장애물로 작용하여 구멍의 수를 줄이고 산소 분자의 이동 경로를 비틀림 경로로 변화시킨 결과로 해석된다(37).

본 연구에서 제작된 필름은 높은 수분 투과도를 바탕으로 외부의 이물질이나 벌레 침투 없이 수분 배출을 가능하게 하였다. 이는 감자 포장재에서 응축수로

인한 부패나 곰팡이 발생을 방지할 수 있는 장점을 제공한다. 또한, 필름의 낮은 산소 투과도는 내부 산소 농도를 낮춤으로써 감자의 호흡률을 조절하며, MAP(Modified Atmosphere Packaging) 방식의 저장 효과를 얻을 수 있음을 시사한다(38). 이러한 결과는 감자의 보관 및 유통 과정에서 품질 유지와 상품성 향상을 위한 새로운 생분해성 포장재 개발 가능성을 제시한다.

Table 5. Water vapor permeability of PBAT composite film.

	WVP ($x10^{-10}$g · m/ m^2 · Pa · s)	OTR (cm^3/㎡·day)
LDPE	5.57±0.12^{e}	6.13±0.05^{d}
Neat PBAT	4.81±0.11^{e}	67.06±0.01^{b}
Neat PLA	5.87±0.09^{e}	55.66±4.27^{c}
PPCF	5.20±0.89^{e}	5.93±0.28^{d}
PPCF(B)	14.82±0.46^{c}	94.97±3.34^{a}
Gel	5.27±0.4^{e}	0.04±0.03^{e}
Gel(W)	9.56±0.75^{d}	0.03±0.01^{e}
B&W(W)	21.33±1.78^{b}	0.02±0.00^{e}
B&W(B)	25.43±1.59^{a}	0.06±0.00^{e}

All values are mean±SD (n=3). Means with different superscript letters in the same column are stati stically different at $P<0.05$ by Duncan's multiple range test.

Abbreviations: PPCF, PBAT98:PLA2; PPCF(B), PBAT98:PLA2+ Candy Color Black 4g; Gel, Gelatin film; Gel(W), Gelaitn film+ Liquid White 4g; B&W(W), PPCF(B)+ Gel(W) the front of the PPCF(B); B&W(B), PPCF(B)+ Gel(W) the front of the Gel(W).

3.6 제조 필름의 적용성 평가

제조 필름의 광 차단 특성 평가를 위해 은선 감자의 품종을 제조된 필름으로 포장하여 감자의 표면색 변화를 측정하였다. 은선 감자는 LDPE, PPCF(B), Gel(W), B&W로 포장되었으며, 포장되지 않은 감자는 대조군으로 사용되었다. 포장된 감자들은 형광등 아래에서 PPFD 6.8 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 광도에 노출되었으며 3일 간격으로 표면색을 측정하였으며, 12일 동안 보관되었다.

12일 후 감자의 표면색상 변화 결과는 Table 6에 나타나 있다. 12일간 형광등 아래 노출된 감자의 표면색의 변화는 포장 여부 및 필름의 종류에 따라 차이를 보였다(Fig 2). L(밝기)값은 경우 0 일차에서 포장되지 않은 감자 73.40, LDPE 68.34, PPCF(B) 72.24, Gel(W) 73.37, B&W 72.56을 나타내며, 12일동안 빛에 노출시킨 후 L(밝기)값은 포장되지 않은 감자 63.54, LDPE 62.85, PPCF(B) 70.75, Gel(W) 68.06, B&W 69.67로 L(밝기)값의 감소 억제를 확인하였으며, 유색이 첨가된 조건에서는 L(밝기)값 유의적인 차이가 없었지만 포장되지 않은 감자와 LDPE와는 유의적 밝기 차이를 보였다($P<0.05$). a(녹색도)값의 경우 0일차 포장되지 않은 감자는 -2.84, LDPE -2.21, PPCF(B) -2.74, Gel(W) -2.76, B&W -2.75를 나타내며, 12일동안 빛에 노출시킨 후 a(녹색도)값은 포장되지 않은 감자 -10.03, LDPE -10.32, PPCF(B) -2.16, Gel(W) -7.49, B&W -1.01로 a(녹색도)값 감소가 억제됨을 확인하였으며, PPCF(B)와 B&W은 유의적 차이가 없었으며 포장되지 않은 감자, LDPE 및 Gel(W)과는 유의적인 녹색도 차이를 보였다($P<0.05$). b(황색도)값은 0일차에서 포장되지 않은 감자 35.68, LDPE 38.27, PPCF(B) 36.01, Gel(W) 36.24, B&W 35.46을 나타내며, 12일동안 빛에 노출시킨 후 포장되지 않은 감자 39.55, LDPE 39.93, PPCF(B) 32.71, Gel(W) 36.67, B&W 34.02로 증가를 억제함을 확인할 수 있었으며 B&W과 PPCF(B)은 유의적인 차이가 없었으며 포장되지 않은 감자와 LDPE 및 Gel(W)과는 유의적인 차이가 있었다($P<0.05$).

ΔE값은 3일차의 감자의 표면색 차이는 모든 조건에서 유의미한 차이를 볼 수 없었다. 하지만 6일, 9일, 12일차에서는 포장되지 않은 감자와 LDPE를 B&W

각각 비교했을 때 감자의 표면색에서 유의미한 색상 차이를 보였다($P<0.05$). ΔE 값은 0, 3, 6, 9, 12 일에서 포장되지 않은 감자와 B&W을 비교했을 때 모두 유의적인 차이가 있었다($P<0.05$). 넓은 범위로는 2~10 사이의 ΔE 값은 인지 가능한 색상 차이, 10이 넘는 값은 상당한 차이(39). 식품에서는 ΔE가 3 미만이면 육안으로 확인이 제한되며, ΔE가 5 보다 높으면 차이가 매우 분명한 것으로 적층 필름이 녹변을 억제하였음(40). 3일차에서 B&W로 포장된 감자의 ΔE값은 포장되지 않은 감자보다 31.35% 낮으며, LDPE로 포장된 감자보다는 20.9%낮았다. 6일차에서는 B&W로 포장된 감자의 ΔE값은 포장되지 않은 감자보다 52.43% 낮으며, LDPE로 포장된 감자보다는 38.72% 낮았다. 9일차에서는 B&W로 포장된 감자의 ΔE값은 포장되지 않은 감자보다 56.13%낮으며, LDPE로 포장된 감자보다는 58.34% 낮았다. 12일차에서는 B&W로 포장된 감자의 ΔE값은 포장되지 않은 감자보다 62.98% 낮으며, LDPE로 포장된 감자보다 51.68% 낮았다. 빛에 노출된 감자의 Amyloplaste가 엽록체로 변화하여 엽록소가 축적되며(4), 빛에 노출되는 시간에 따라 녹변에 영향을 미친다(41). 즉, 장기간 빛의 노출로 엽록소의 축적은 감자의 표면색에서 색상차이를 나타낼 수 있으며 감자의 녹변을 최소화 하기 위해 특정 파장의 광 차단이 필수적이다.

Table 6. Surface color changes of potatoes packed with PBAT composite film over 12 days.

Day	Packaging	L(밝기)	a(녹색도)	b(황색도)	ΔE(총 색차)
0	Without Film	73.40±2.03^{a}	-2.84±0.91^{a}	35.68±2.37^{b}	-
	LDPE	68.34±1.78^{a}	-2.21±1.09^{a}	38.27±2.91^{a}	-
	PPCF(B)	72.24±2.13^{a}	-2.74±0.83^{a}	36.01±1.57^{b}	-
	Gel(W)	73.37±1.35^{a}	-2.76±0.85^{a}	36.24±2.54^{ab}	-
	B&W	72.56±2.10^{a}	-2.75±1.12^{a}	35.46±3.67^{b}	-
3	Without Film	68.59±3.50^{ab}	-4.27±2.08^{b}	34.59±2.80^{ab}	6.89±1.78^{a}
	LDPE	65.05±3.61^{b}	-4.24±3.14^{b}	36.53±2.90^{a}	5.98±2.07^{ab}
	PPCF(B)	70.39±1.42^{a}	-0.82±1^{a}	33.41±1.49^{b}	4.72±0.89^{b}
	Gel(W)	68.58±3.25^{ab}	-3.62±2.55^{b}	36.57±2.65^{a}	6.13±3.21^{ab}
	B&W	69.82±2.09^{a}	-0.05±1.20^{a}	34.59±1.95^{b}	4.73±1.82^{b}
6	Without Film	65.31±2.97^{c}	-6.48±2.03^{c}	37.53±1.43^{a}	9.48±2.71^{a}
	LDPE	61.67±3.00^{c}	-6.54±2.78^{c}	37.52±3.25^{b}	7.36±2.42^{b}
	PPCF(B)	70.86±1.96^{a}	-1.97±1.08^{a}	33.35±1.28^{bc}	5.36±2.21^{bc}
	Gel(W)	67.75±2.47^{b}	-4.71±1.71^{b}	36.41±2.35^{b}	6.75±2.08^{b}
	B&W	69.31±2.97^{ab}	-0.98±1.33^{a}	35.49±2.45^{c}	4.51±3.14^{c}
9	Without Film	70.61±3.26^{bc}	-10.84±1.92^{c}	38.48±1.48^{a}	9.62±2.76^{a}
	LDPE	60.39±2.34^{c}	-11.54±1.54^{c}	39.10±2.60^{a}	10.13±1.73^{a}
	PPCF(B)	72.67±1.98^{a}	-2.9±0.74^{a}	32.31±1.51^{c}	5.05±1.53^{bc}
	Gel(W)	72.22±1.47^{ab}	-8.08±1.83^{b}	35.83±2.94^{b}	6.35±1.90^{b}
	B&W	73.87±2.97^{a}	-3.69±1.29^{a}	33.48±2.46^{c}	4.22±2.30^{c}
12	Without Film	63.54±2.95^{c}	-10.03±2.10^{c}	39.55±2.51^{a}	13.21±2.97^{a}
	LDPE	62.85±1.51^{c}	-10.32±2.13^{c}	39.93±1.71^{a}	10.12±1.96^{b}
	PPCF(B)	70.75±1.83^{a}	-2.16±1.35^{a}	32.71±0.84^{c}	5.15±2.13^{d}
	Gel(W)	68.06±2.12^{b}	-7.49±1.81^{b}	36.67±1.93^{b}	7.64±1.98^{c}
	B&W	69.67±2.53^{ab}	-1.01±1.45^{a}	34.02±2.54^{c}	4.89±2.12^{d}

All values are mean±SD (n=3). Means with different superscript letters in the same column are stati stically different at $P<0.05$ by Duncan's multiple range test.

Abbreviations: PPCF(B), PBAT98:PLA2+ Candy Color Black 4g; Gel(W), Gelaitn film+ Liquid White 4g; B&W, PPCF(B)+ Gel(W).

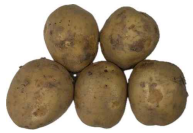
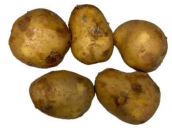
Day \ Film	Without	LDPE	PPCF(B)	Gel(W)	B&W
0					
3					
6					
9					
12					

Fig 2. Photographic changes in surface color of potatoes packed with PBAT composite film over 12 days. PPCF(B), PBAT98:PLA2+ Candy Color Black 4g; Gel(W), Gelaitn film+ Liquid White 4g; B&W, PPCF(B)+ Gel(W).

3.7 FT-IR분석

각 필름(젤라틴, PBAT 복합필름, 적층필름)의 FTIR 흡수 피크는 Fig. 3(a-c)에 나타나 있다. 3200-3300 cm^{-1} 피크는 amide A에 해당하며, 이는 OH 그룹과 관련이 있다(42). 2900-3000 cm^{-1} 피크는 CH 그룹의 신축 진동과 관련이 있으며(43), 1713 cm^{-1} 피크는 CO 그룹의 신축 진동에 기인한다(44). 1631 cm^{-1} 및 1545 cm^{-1} 피크는 각각 amide I의 C=O 신축 진동과 amide II의 N-H 굽힘 및 C-N 신축 진동과 관련이 있다(42). 또한, 1265 cm^{-1} 피크는 CO 그룹의 대칭 신축 진동을, 1018-1042 cm^{-1} 피크는 페닐 고리의 인접 수소 원자 굽힘 진동과 관련이 있다. 마지막으로, 725 cm^{-1} 피크는 벤젠 고리의 CH 평면 굽힘 진동을 나타낸다(44).

Gel, Gel(W), B&W(W)의 FTIR 스펙트럼을 비교한 결과, 패턴의 변화 없이 유사한 피크가 나타났다. 이는 색소 첨가가 이들 필름의 화학 구조에 영향을 미치지 않았음을 시사한다.

한편, PPCF, PPCF(B), B&W(B)의 FTIR 스펙트럼에서도 패턴 변화 없이 유사한 피크가 관찰되었다. 이로 인해 색소 첨가가 PBAT 기반 필름의 화학적 구조에 영향을 미치지 않았음을 확인할 수 있었다.

이러한 결과는 색소의 첨가가 필름의 화학적 안정성을 유지하면서도 기계적 및 물리적 특성을 개선할 가능성을 시사한다. 이는 필름의 응용 가능성을 확장하고, 특정 용도에 따라 물리적 성질을 조절할 수 있는 중요한 기반 데이터를 제공한다.

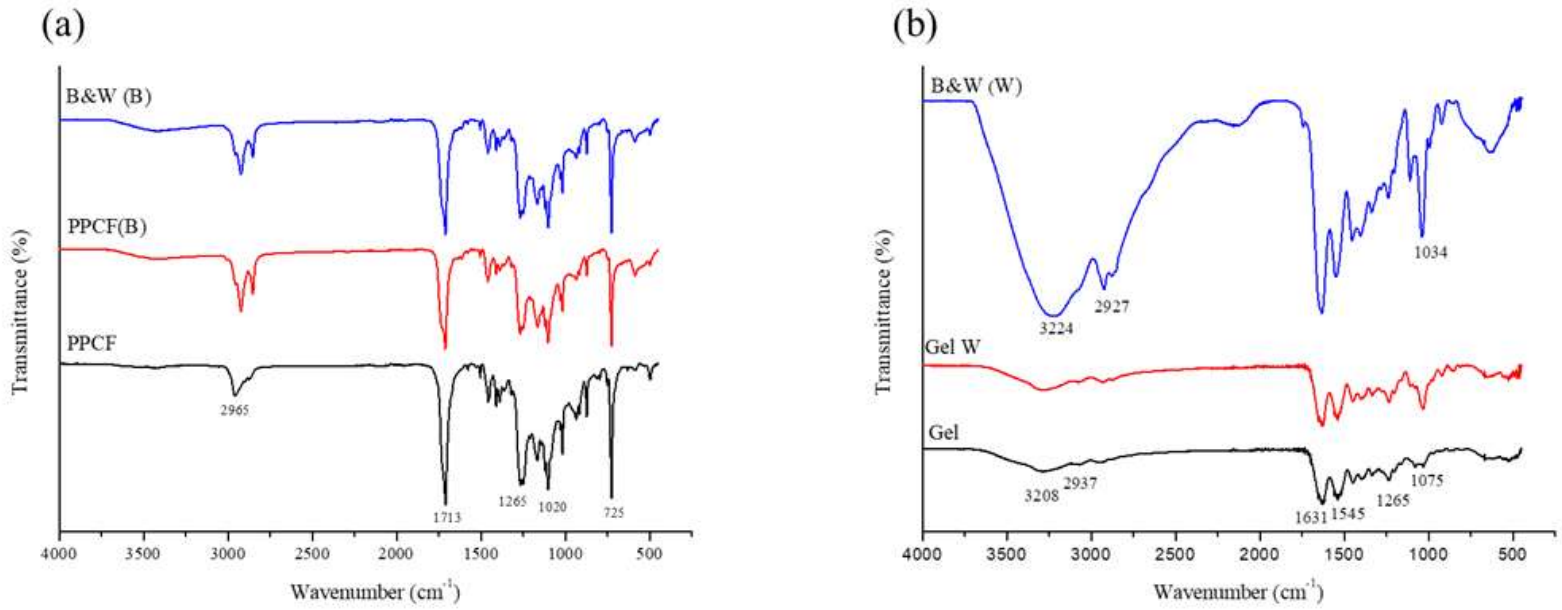


Fig 3. Fourier transform infrared (FTIR) spectra: (a) PPCF, PPCF(B), and B&W(B); (b) Gel, Gel(W), and B&W(W). PPCF, PBAT98:PLA2; PPCF(B), PBAT98:PLA2+ Candy Color Black 4g; Gel, Gelatin film; Gel(W), Gelaitn film+ Liquid White 4g; B&W(W), PPCF(B)+ Gel(W) the front of the PPCF(B); B&W(B), PPCF(B)+ Gel(W) the front of the Gel(W).

3.8 XRD분석

X선 회절계(XRD)를 사용하여 분석한 젤라틴, PBAT 복합필름, 적층필름의 결과는 Fig. 4에 나타내었다. PPCF, PPCF(B), B&W 필름의 2Θ = 29.47° 피크는 PLA에 기인한 것으로 확인되었으며(45), 2Θ = 16°, 17.4°, 23.0° 피크는 PBAT의 결정 구조를 나타낸다(46).

한편, Gel(W)와 B&W(W) 필름에서는 2Θ = 25° 피크가 관찰되었으며, 이는 첨가된 TiO_2 에 의한 피크로 확인되었다(47). 또한, B&W(B) 필름에서도 동일한 2Θ = 25° 피크가 나타났는데, 이는 X선이 필름의 표면을 통과하여 반대편 B&W(W)에 존재하는 TiO_2 와 상호작용한 결과로 예상된다.

이러한 결과는 각 필름의 화학적 안정성과 구조적 특성이 색소 첨가 및 적층 공정에 의해 크게 변하지 않았음을 보여주며, 제작된 필름이 기계적 및 물리적 특성을 유지하면서 응용 가능성을 높일 수 있음을 뒷받침한다.

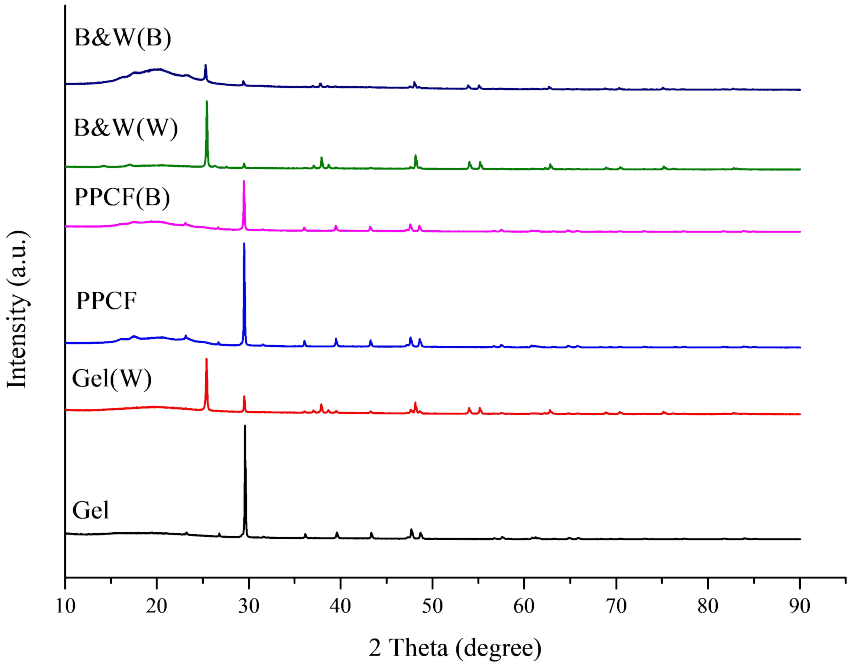


Fig 4. X-ray diffraction (XRD) patterns of Gel, Gel(W), PPCF, PPCF(B), B&W(W), and B&W(B). PPCF, PBAT98:PLA2; PPCF(B), PBAT98:PLA2+ Candy Color Black 4g; Gel, Gelatin film; Gel(W), Gelaitn film+ Liquid White 4g; B&W(W), PPCF(B)+ Gel(W) the front of the PPCF(B); B&W(B), PPCF(B)+ Gel(W) the front of the Gel(W).

3.9 SEM 분석

SEM(주사 전자 현미경)을 사용하여 관찰한 Gel, PPCF, B&W의 표면 형태는 Fig. 5에 나타내었다. PPCF의 표면에서는 PBAT에 분산된 PLA가 불투과성 장애물로 작용하여 산소 분자의 비틀림 경로를 형성하는 것으로 관찰되었다. 이는 산소 투과도를 낮추는 원인으로 예상된다.

한편, Gel(W) 및 B&W(W) 필름에서는 친수성 색소가 폴리머의 고분자 매트릭스 내에서 응집되어 균일한 미세 천공이 형성되는 것이 관찰되었다. 이러한 천공 구조는 TiO_2 의 영향으로 형성된 것으로 확인되었으며, 표면 특성 변화와 관련이 있다.

이러한 결과를 바탕으로, Gel(W) 및 B&W(W)의 높은 수증기 투과도는 표면에 형성된 천공 구조를 통한 투과 현상 때문인 것으로 예상된다. 반면, PPCF의 경우 상대적으로 균일하고 매끄러운 표면을 보여 산소 차단 특성이 우수할 수 있음을 시사한다.

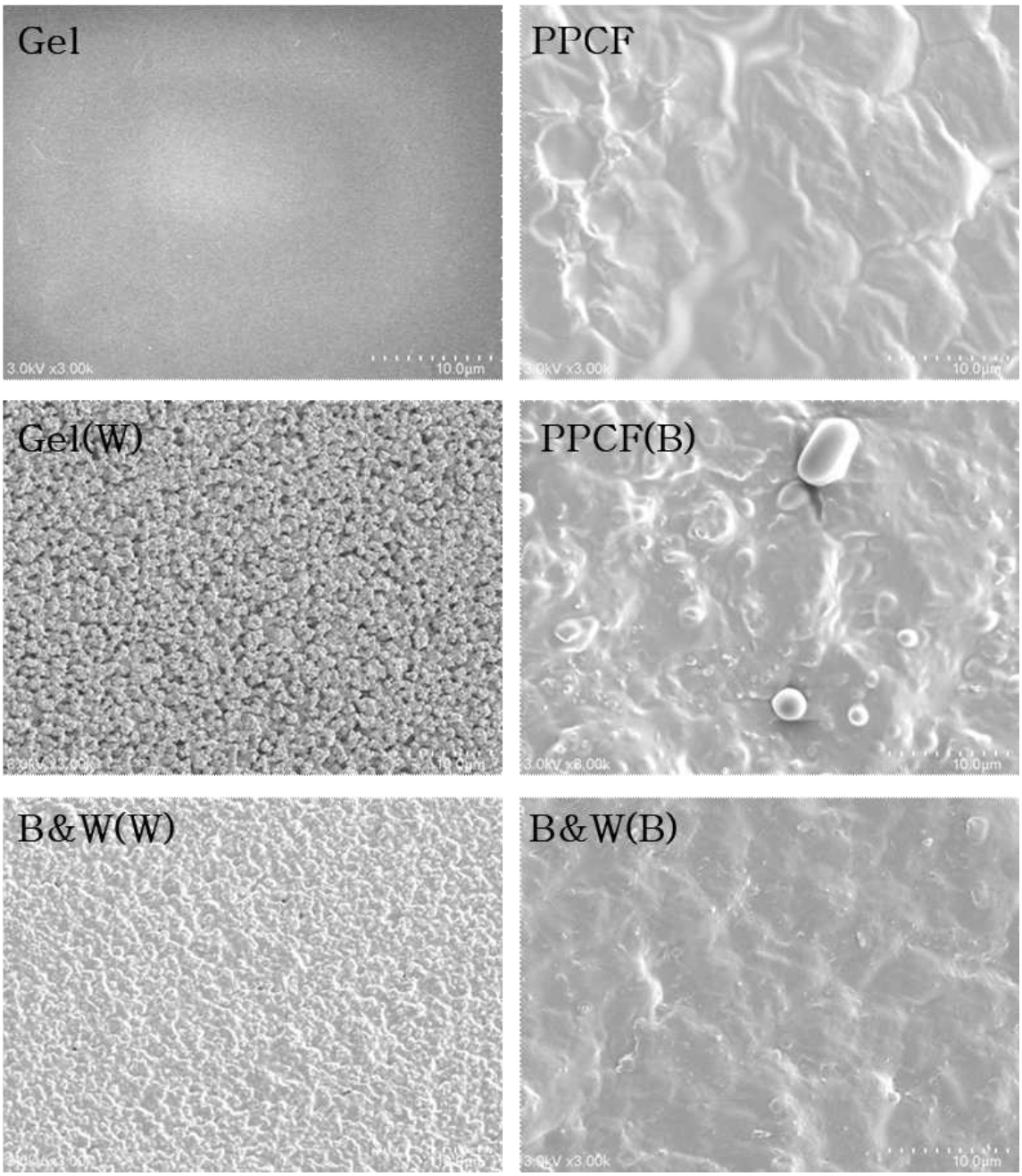


Fig 5. SEM micrographs of Gel, Gel(W), PPCF, PPCF(B), B&W(W), and B&W(B). PPCF, PBAT98:PLA2; PPCF(B), PBAT98:PLA2+ Candy Color Black 4g; Gel, Gelatin film; Gel(W), Gelaitn film+ Liquid White 4g; B&W(W), PPCF(B)+ Gel(W) the front of the PPCF(B); B&W(B), PPCF(B)+ Gel(W) the front of the Gel(W).

제4장 결 론

본 연구는 감자의 녹변 방지를 위한 생분해성 필름을 개발하는 것을 목표로 수행되었다. PBAT와 PLA 복합필름은 용매 캐스팅법을 사용하여 제조되었으며, PBAT:PLA 비율 98:2로 혼합했을 때 기계적 특성이 개선됨을 확인하였다. 또한, 소수성 색소를 첨가한 PPCF(B) 필름은 광 차단 효과를 보여주었다. 한편, Gel 필름에는 이산화티타늄(TiO_2)이 첨가된 친수성 색소를 사용하여 Gel(W) 필름을 제작하였다. 이 두 필름(PPCF(B)와 Gel(W))을 적층하여 B&W 필름을 개발하였으며, 높은 수증기투과성과 낮은 산소 투과성을 동시에 확보하였다. B&W 필름은 감자의 산소 접촉을 차단하고 내부 온도 상승으로 인한 증산작용 억제에 효과적임을 보여주었다. 특히, B&W 필름의 광 차단 효과를 평가하기 위해 감자를 12일 동안 빛에 노출 실험에서 녹변 방지에 효과가 있음을 확인하였다. 이 연구에서 개발된 포장재는 감자와 같이 빛에 민감한 식품의 품질 저하를 방지할 수 있는 광 차단 효과를 제공한다. 또한, 우수한 산소 차단성과 수분 투과성을 통해 식품의 유통 기한을 연장하는 데 기여할 수 있다. 더 나아가, 본 연구에서 제시한 포장 기술은 MAP (Modified Atmosphere Packaging)와 같은 포장 시스템에 적용될 수 있으며, 이를 통해 다양한 식품의 포장재로 활용될 잠재력을 지닌다. 결론적으로, 본 연구에서 개발된 B&W 필름은 감자의 녹변 방지를 위한 효과적인 포장재로서의 가능성을 입증하였으며, 이는 광 차단 및 기체 투과 제어가 필요한 다양한 식품 포장 기술로 확장될 수 있음을 시사한다.

참고문헌

1. Zhang H, Zhao Z, Song B, Du P, Liu X. Light-induced ultrastructure changes of amyloplasts and effect of nitrogen fertilization on greening in potato tubers (Solanum tuberosum L.). Postharvest Biology and Tec hnology 168, 111275 (2020)

2. Visvanathan, R, Jayathilake C, Chaminda Jayawardana B, Liyanage R. Health-beneficial properties of potato and compounds of interest. Journ al of the Science of Food and Agriculture 96(15), 4850-4860 (2016)

3. Xu J, Li Y, Kaur L, Singh J, Zeng F. Functional food based on Potat o. Foods, 12(11), 2145 (2023)

4. Bang YJ, Shankar S, Rhim, JW. Preparation of polypropylene/poly (bu tylene adipate-co-terephthalate) composite films incorporated with mela nin for prevention of greening of potatoes. Packaging Technology and Science 33(10), 433-441 (2020)

5. Liu S, Cheng Y, Zhao X, Wang E, Liu T, Zhang H, Botao S. The tran scription factor StMYB113 regulates light-induced greening by modulat ing steroidal glycoalkaloid biosynthesis in potatoes (Solanum tuberosu m L.). Horticulture Advances 2(1), 7 (2024)

6. Dhalsamant K, Singh CB, Lankapalli R. A review on greening and gly coalkaloids in potato tubers: potential solutions. Journal of Agricultural and Food Chemistry 70(43), 13819-13831 (2022)

7. Machado RM, Toledo MCF, Garcia LC. Effect of light and temperatur e on the formation of glycoalkaloids in potato tubers. Food Control 18 (5), 503-508 (2007)

8. Barceloux DG. Potatoes, tomatoes, and solanine toxicity (Solanum tub erosum L., Solanum lycopersicum L.). Disease-a-month 55(6), 391-40 2 (2009)

9. Barrowclough D, Birkbeck CD. Transforming the global plastics econ omy: the role of economic policies in the global governance of plastic pollution. Social Sciences 11(1), 26 (2022)

10. Wright SL, Kelly FJ. Plastic and human health: a micro issue?. Envir onmental science & technology 51(12), 6634-6647 (2017)

11. Borrelle SB, Ringma J, Law KL, Monnahan CC, Lebreton L, McGivern A, Rochman CM. Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. Science 369(6510), 1515-1518 (2020)

12. Talsness CE, Andrade AJ, Kuriyama SN, Taylor JA, Vom Saal FS. Co mponents of plastic: experimental studies in animals and relevance for human health. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biolo gical Sciences 364(1526), 2079-2096 (2009)

13. Nabi I, Li K, Cheng H, Wang T, Liu Y, Ajmal S, Zhang L. Complete

photocatalytic mineralization of microplastic on TiO2 nanoparticle film. Iscience 23(7) (2020)

14. Hale RC, Seeley ME, La Guardia MJ, Mai L, Zeng EY. A global persp ective on microplastics. Journal of Geophysical Research: Oceans, 125 (1), e2018JC014719 (2020)

15. do Sul JAI, Costa MF. The present and future of microplastic pollutio n in the marine environment. Environmental pollution 185, 352-364 (2 014)

16. Li C, Cui Q, Li Y, Zhang K, Lu X, Zhang Y. Effect of LDPE and biod egradable PBAT primary microplastics on bacterial community after fo ur months of soil incubation. Journal of hazardous materials 429, 1283 53 (2022)

17. Jariyasakoolroj P, Leelaphiwat P, Harnkarnsujarit N. Advances in res earch and development of bioplastic for food packaging. Journal of the Science of Food and Agriculture 100(14), 5032-5045 (2020)

18. Bartolucci L, Cordiner S, De Maina E, Kumar G, Mele P, Mulone V, Piechota G. Sustainable valorization of bioplastic waste: A review on e ffective recycling routes for the most widely used biopolymers. Intern ational journal of molecular sciences 24(9), 7696 (2023)

19. Roy, S, Ghosh T, Zhang W, Rhim JW. Recent progress in PBAT-base d films and food packaging applications: A mini-review. Food Chemistr y 437, 137822 (2024)

20. Qiu S, Zhou Y, Waterhouse GI, Gong R, Xie J, Zhang K, Xu J. Optimizing interfacial adhesion in PBAT/PLA nanocomposite for biodegradable packaging films. Food Chemistry 334, 127487 (2021)

21. Mirkhalaf SM, Fagerström M. The mechanical behavior of polylactic acid (PLA) films: fabrication, experiments and modelling. Mechanics of Time-Dependent Materials 25(2), 119-131 (2021)

22. Sadeghi A, Razavi SMA, Shahrampour D. Fabrication and characterization of biodegradable active films with modified morphology based on polycaprolactone-polylactic acid-green tea extract. International Journal of Biological Macromolecules 205, 341-356 (2022)

23. Jain, S, Reddy MM, Mohanty AK, Misra M, Ghosh AK. A new biodegradable flexible composite sheet from poly (lactic acid)/poly (ε-caprolactone) blends and Micro-Talc. Macromolecular materials and engineering 295(8), 750-762 (2010)

24. Gürler N, Paşa S, Temel H. Silane doped biodegradable starch-PLA bilayer films for food packaging applications: Mechanical, thermal, barrier and biodegradability properties. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers 123, 261-271 (2021)

25. Li W, Sun C, Li C, Xu Y, Tan H, Zhang Y. Preparation of effective ultraviolet shielding poly (lactic acid)/poly (butylene adipate-co-terephthalate) degradable composite film using co-precipitation and hot-pressing method. International Journal of Biological Macromolecules 191, 540-547 (2021)

26. Gao X, Xie D, Yang C. Effects of a PLA/PBAT biodegradable film mu lch as a replacement of polyethylene film and their residues on crop and soil environment. Agricultural Water Management 255, 107053 (20 21)

27. Cheng C, Chen S, Su J, Zhu M, Zhou M, Chen T, Han Y. Recent adv ances in carrageenan-based films for food packaging applications. Fro ntiers in Nutrition 9, 1004588 (2022)

28. Luo Q, Hossen MA, Zeng Y, Dai J, Li S, Qin W, Liu Y. Gelatin-based composite films and their application in food packaging: A review. Jou rnal of Food Engineering 313, 110762 (2022)

29. Riahi Z, Priyadarshi R, Rhim JW, Bagheri R. Gelatin-based functional films integrated with grapefruit seed extract and TiO2 for active food packaging applications. Food Hydrocolloids 112, 106314 (2021)

30. Leite LS, Bilatto S, Paschoalin RT, Soares AC, Moreira FK, Oliveira Jr ON, Bras J. Eco-friendly gelatin films with rosin-grafted cellulose n anocrystals for antimicrobial packaging. International Journal of Biologi cal Macromolecules 165, 2974-2983 (2020)

31. Ediyilyam S, George B, Shankar SS, Dennis TT, Wacławek S, Černík M, Padil VV. Chitosan/gelatin/silver nanoparticles composites films for biodegradable food packaging applications. Polymers 13(11), 1680 (202 1)

32. Hosseini SF, Javidi Z, Rezaei M. Efficient gas barrier properties of m ulti-layer films based on poly (lactic acid) and fish gelatin. Internation

al Journal of Biological Macromolecules 92, 1205-1214 (2016)

33. Martucci JF, Ruseckaite RA. Biodegradable three-layer film derived f rom bovine gelatin. Journal of Food Engineering 99(3), 377-383 (201 0)

34. Wang LF, Rhim JW, Hong SI. Preparation of poly (lactide)/poly (butyl ene adipate-co-terephthalate) blend films using a solvent casting meth od and their food packaging application. LWT-Food Science and Tech nology 68, 454-461 (2016)

35. Wu H, Lei Y, Zhu R, Zhao M, Lu J, Xiao D, Li S. Preparation and ch aracterization of bioactive edible packaging films based on pomelo pee l flours incorporating tea polyphenol. Food Hydrocolloids 90, 41-49 (2 019)

36. Wang L, Xu J, Zhang M, Zheng H, Li L. Preservation of soy protein-based meat analogues by using PLA/PBAT antimicrobial packaging fil m. Food Chemistry 380, 132022 (2022)

37. Ejaz M, Arfat YA, Mulla M, Ahmed J. Zinc oxide nanorods/clove esse ntial oil incorporated Type B gelatin composite films and its applicabili ty for shrimp packaging. Food Packaging and Shelf Life 15, 113-121 (2018)

38. Kader AA, Zagory D, Kerbel EL, Wang CY. Modified atmosphere pac kaging of fruits and vegetables. Critical Reviews in Food Science & N utrition 28(1), 1-30 (1989)

39. Sahu D, Jayaraman S, Neelapu BC, Flores F, Pal K. IoT-driven reflectance-based multimode colorimeter for real-time monitoring of crystallization process: a study on oleogels. Journal of Food Engineering 383, 112244 (2024)

40. Swer TL, Chauhan K, Mukhim C, Bashir K, Kumar A. Application of anthocyanins extracted from Sohiong (Prunus nepalensis L.) in food processing. Lwt, 114, 108360 (2019)

41. 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(9), e0235522 (2020)

42. Li R, Zhuang D, Feng H, Wang S, Zhu J. Novel “all-in-one” multifunctional gelatin-based film for beef freshness maintaining and monitoring. Food Chemistry 418, 136003 (2023)

43. Al-Itry R, Lamnawar K, Maazouz A. Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy. Polymer degradation and stability 97(10), 1898-1914 (2012)

44. Sritham E, Phunsombat P, Chaishome J. Tensile properties of PLA/PBAT blends and PLA fibre-reinforced PBAT composite. MATEC Web Conf 192: 03014 (2018)

45. Su L, Zou J, Dong S, Hao N, Xu H. Influence of different β-nucleation agents on poly (L-lactic acid): Structure, morphology, and dynamic mechanical behavior. RSC advances 7(87), 55364-55370 (2017)

46. Zehetmeyer G, Meira SMM, Scheibel JM, de Oliveira RVB, Brandelli A, Soares RMD. Influence of melt processing on biodegradable nisin-P BAT films intended for active food packaging applications. Journal of Applied Polymer Science 133(13) (2016)

47. Li H, Duan X, Liu G, Liu X. Photochemical synthesis and characteriz ation of Ag/TiO 2 nanotube composites. Journal of Materials Science 4 3, 1669-1676 (2008)