

폴리에틸렌옥사이드가 PLA/PBAT 블렌드 물성에 미치는 영향

장현호¹ · 권상우¹ · 엄유준² · 유승우² · 박수일^{1*}

¹연세대학교 패키징학과

²경기도경제과학진흥원

Effects of PEO Additions on the Mechanical and Thermal Properties of PLA/PBAT Blends

Hyunho Jang¹, Sangwoo Kwon¹, Yoojun Eom², Seungwoo Yoo², and Su-il Park^{1*}

¹Department of Packaging, Yonsei University, 1 Yonseidae-gil, Wonju, Gangwon-do, 26493, Republic of Korea

²Gyeonggi Business & Science Accelerator, 107, Gwanggyo-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, Republic of Korea

Abstract The blends of Poly(lactic acid) (PLA) and Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) have been recognized as a replacement for commodity plastic films and bags in biodegradable packaging industries. The purpose of this study is to identify changes in the thermal and mechanical properties of PLA/PBAT blends with the addition of poly(ethylene oxide)(PEO). PLA (80%) and PBAT (20%) were melt mixed with 0 to 10 phr of PEO and processed using a hot press. The addition of PEO into PLA/PBAT increased the elongation at break and improved thermal stability. With PEO addition, two melting temperature (T_m) peaks of PLA/PBAT merged into one peak showing improved miscibility. The result of this study showed that the addition of PEO increased the ductility and thermal stability of PLA/PBAT blends.

Keywords Polyethylene oxide, Poly lactic acid, Biodegradable plastic, PLA/PBAT Blends

서론

플라스틱 사용이 본격화된 1950년대 이후 생산된 플라스틱 중 59% 정도가 투기 및 매립 등의 이유로 환경에 버려지고 있다¹⁾. 이렇게 버려진 플라스틱은 대부분 난분해성을 가지고 있는 석유계 플라스틱으로서 생태계에 축적되어 다양한 환경문제를 야기시키고 있다²⁾. 최근 석유계 플라스틱으로 인한 환경 이슈와 더불어 석유자원의 고갈에 따른 문제해결을 위해 지속가능한 순환경제(circular economy) 체제 구축을 위한 전세계적인 노력이 이루어지고 있다. 순환경제 체제도입을 위한 석유계 플라스틱 생산을 감축하기 위한 대안 중 하나로써 재생 가능한 소재에서 유래한 바이오 플라스틱(bioplastic)이 주목받고 있으며 다양한 연구 개발

이 활발히 진행되고 있다³⁾. 그 중 생분해성 플라스틱(biodegradable plastic)은 자연계에서 분해될 수 있는 명확한 환경적 이점으로 인해 수요가 증가하고 있다⁴⁾.

폴리유산(poly(lactic acid), PLA)은 높은 인장강도, 투명도, 무독성 및 생체적합성을 가지고 있어 의료 및 포장 분야 등에 널리 사용되고 있는 대표적인 생분해성 플라스틱 소재이다⁵⁾. 하지만 낮은 열안전성과 10% 미만의 파단연신을 및 취성으로 인해 연포장분야 등에 적용을 확대하기에 한계가 있다^{6,7)}. 이러한 PLA의 단점을 극복하기 위해 폴리부틸렌 아디페이트-코-테레프탈레이트(poly(butylene adipate-co-terephthalate), PBAT)⁸⁾, 폴리부틸렌 석시네이트(Poly(butylene succinate), PBS)⁹⁾, 폴리부틸렌 석시네이트-코-아디페이트(poly(butylene succinate-co-adipate), PBSA)¹⁰⁾ 및 폴리카프로락톤(polycaprolactone, PCL)¹¹⁾과 같은 연성 생분해성 고분자와의 용융 블렌딩 및 공중합체 통해 연성을 증가시키거나, 폴리에틸렌글리콜(poly(ethylene glycol), PEG)과 같은 가소제를 첨가하여 물성을 증진시키는 연구가 이루어지고 있다.

*Corresponding Author : Su-il Park

Department of Packaging, Yonsei University, 1 Yonseidae-gil, Wonju, Gangwon-do, 26493, Republic of Korea
Tel : +82-33-760-2370, Fax : +82-33-760-2760
E-mail : parks@yonsei.ac.kr

PBAT는 필름 압출용으로 설계된 높은 연신성과 낮은 유리전이 온도를 가지는 석유계 지방족-방향족 코 폴리머로서 LDPE와 유사한 특성을 가지며 완전히 생분해되는 장점을 가지고 있다¹²⁾. 이러한 특성으로 인해 PLA의 취성 보완 및 생분해성을 위한 용융 블렌딩 소재로서 주목받아 왔다¹³⁾. 하지만 PBAT와 PLA의 낮은 계면접착력으로 인해 상분리가 발생하여 PLA/PBAT 블렌드의 혼화성이 낮아지게 되며, 결과적으로 기계적 특성 저하를 야기시킨다^{12,13)}. 또한, PBAT 혹은 PLA 함량이 30wt%이상으로 구성될 시, 혼화성이 급격하게 저하된다고 보고 되었다¹³⁾. 이러한 이유로 인해 연성이 필요한 포장재, 봉투와 같은 제품들은 PBAT를 메인으로 PLA의 함량은 20wt%를 넘지 못하고 있어 인장강도가 낮다는 단점이 있다. 이러한 PLA/PBAT 블렌드의 낮은 혼화성을 개선시킬 수 있는 상용화제에 대한 연구가 보고되고 있다¹²⁻¹⁵⁾.

PEG는 연성과 친수성을 가지고 있는 반결정성 폴리에테르계 화합물로서 PLA의 취성을 보완하기 위한 고분자 가소제로서 적용 연구가 이루어졌다. Wang(2012)과 Li(2015)는 서로 다른 분자량(M_w 2000~20,000)의 PEG를 PLA와 용융블렌딩하여 분자량의 증가에 따라 파단연신율과 인장강도가 증가함을 확인하였으며, PLA와 PEG 중합체 사이의 부분적인 혼화성을 보고했다^{16,17)}. 또한 Moustafa (2016)는 PEG가 PBAT와의 혼화성이 있을 뿐 아니라 다른 고분자와 PBAT 간의 상호작용을 증진시켜 블렌드의 혼화성을 높인다고 하였다¹⁸⁾. 하지만 Fang(2014)은 PEG의 분자량이 낮을 수록 고분자 매트릭스 내에서 PEG의 용출(migration)이 증가하며, 고분자량의 PEG의 적용을 통해 이를 보완할 수 있다고 보고하였다¹⁹⁾. 폴리에틸렌옥사이드(poly(ethylene oxide), PEO)는 분자량 100,000이상의 PEG를 지칭하며, PLA의 상용화제로서의 연구가 이루어졌다²⁰⁾. Nijenhuis(1996)은 PLA와 PEO(20wt%이상, M_w 4,000,000)의 블렌딩을 통해 제한적인 파단연신율 증가를 확인하였다²¹⁾. 상용화제의 분자량과 농도가 증가할수록 고분자 매트릭스에서 용출되기 쉽기 때문에 제한적인 효과를 얻게 된다. 따라서 상용화제의 적절한 분자량 및 농도의 최적화 연구가 필요하다. 이전 연구를 통해 PLA의 가소제로서 중간 분자량의 PEO(M_w 100,000)가 고분자량의 PEO(M_w 1,000,000~4,000,000)에 비해 적은 함량으로 동일한 파단연신율 증가 효과를 나타냄을 확인하였다²²⁾. 본 연구에서는 PLA/PBAT 블렌드의 PEO 첨가에 따른 혼화성을 증진 및 물성개선 정도를 확인하였다.

재료 및 방법

1. 재료

본 실험에서 PLA는 Nature Works LLC(USA)사의 4032D를 사용하였으며, PLA의 기본 물성은 평균 분자량

(M_w) 190,000 g/mol, 밀도 1.3 g/cm³, 용융흐름지수(MFI) 7.6 g/10 min, 유리전이 온도(T_g) 59°C, 녹는점(T_m)170°C이다.

PBAT의 경우 안코바이오플라스틱스(Korea)사의 PBG7070 등급을 사용하였다. PBAT의 기본 물성은 평균 분자량(M_w) 162,000 g/mol, 밀도 1.2 g/cm³, 녹는점(T_m)125°C이다.

PEO는 Alfa Aesar(USA)사의 제품을 사용하였으며, PEO의 평균 분자량은(M_w)은 100,000 g/mol이고 녹는점(T_m)은 65°C이다.

2. 제조 방법

제조 전, 물성 저하 방지를 위하여 PLA, PBAT 레진과 PEO 분말은 건조기에서 55°C 온도에서 24시간 이상 각각 건조하였다. 전처리가 진행된 PLA, PBAT 및 PEO를 니더기(TO-200, TEST ONE, Korea) 장비를 이용하여 200°C의 온도에서 10 rpm으로 3~5분 조건 하에서 컴파운딩을 진행하였다. 컴파운딩 통해 얻은 샘플은 저속분쇄기(CTSC-01-02, CRUTEK, Korea)를 이용하여 분쇄하여 필름제조에 사용하였다.

컴파운딩을 완료한 샘플을 핫프레스(상판, 하판: 190~205°C)를 이용하여 필름형태로 제조하였다. 또한 제조된 필름은 실험 전 thermos-hydrostat(HST-105MG, HANMAEK ST CO, Korea)를 이용하여 25°C, RH 50%에서 18시간 이상 보관 후 사용하였다. PLA/PBAT/PEO 블렌드의 샘플명 및 함량을 Table 1에 나타내었다.

3. 실험 방법

3.1. 기계적 특성 측정

PLA/PBAT/PEO 블렌드 필름의 인장강도와 파단연신율은 ISO 527-3:1995 규격에 따라 만능재료시험기(QM100T, QMESYS, Korea)로 측정하였다. 로드셀(Load cell)은 25 kN을 사용하였고, 그립 사이의 간격은 85 mm이다. 시편은 길이 115 mm, 너비 10 mm의 아령(Dog-bone)형태의 시편을 시편절단기를 이용하여 20개 이상 제작하여 측정하였다. 아웃라이어(Outlier) 데이터를 제외하고 평균과 표준편차 값을 계산하였다.

Table 1. Formulation of PLA/PBAT/PEO composites

Sample NO.	Composition(%)		Content of PEO(phr)
	PLA	PBAT	
PEO-0	80	20	0
PEO-2	80	20	2
PEO-4	80	20	4
PEO-6	80	20	6
PEO-8	80	20	8
PEO-10	80	20	10

3.2. 시차주사열량계(Differential Scanning Calorimeter, DSC) 측정

PLA/PBAT/PEO 블렌드의 열적 거동을 분석하기 위해 시차주사열량계(DSC)(Q-20, TA instrument, USA)를 사용하였다. 각 샘플은 4~6 mg씩 채취하여 알루미늄팬에 밀봉하였다. 측정하기 전 용융점까지 열을 주어 열이력을 제거하고, 두 번째 가열 스캔은 20°C/min의 가열 속도로 -30~200°C에서의 열적 특성을 측정하였다.

3.3. 열 중량분석(Thermogravimetric Analysis, TGA) 측정

약 10 mg의 시료를 열 중량분석기(TGA)(TGA 4000, PerkinElmer, USA)를 이용하여 질소 환경에서 20°C/min의 속도로 30~800°C까지 가열하였다. TG 곡선으로부터 샘플의 중량 손실 및 분해 온도를 결정하였다. 분해 온도(Degradation Temperature, T_d)는 가장 많은 중량 감소율을 나타내는 온도로 결정하였다.

3.4. 화학적 구조 분석(FT-IR, $^1\text{H-NMR}$)

PLA/PBAT/PEO 블렌드 필름의 화학적 구조를 조사하기 위해 적외선분광 흡수기(Fourier Transform Infrared Spectroscopy, PerkinElmer, USA)를 이용하여 4000~400 cm^{-1} 파장범위의 FT-IR을 분석하였고, 핵자기 공명 분광기 600 MHz($^1\text{H-NMR}$)(Nuclear Magnetic Resonance 600, Bruker, German)를 사용하여 $^1\text{H-NMR}$ 을 분석하였다.

결과 및 고찰

1. PLA/PBAT/PEO 블렌드 필름의 기계적 특성

Fig. 1은 PEO 함량에 따른 PLA/PBAT/PEO 블렌드의 인장강도 그래프이며, PEO의 함량이 증가할수록 소폭 감소하는 것을 확인할 수 있다. PEO 함량이 없는 PEO-0 샘플의 인장강도는 37.8 N/mm²에서 샘플 각각 37.08 N/mm² (PEO-2), 35.28 N/mm² (PEO-4), 34.28 N/mm² (PEO-6), 28.98 N/mm² (PEO-8) 및 27.68 N/mm² (PEO-10)로 감소하였다. Fig. 2는 PLA/PBAT/PEO 블렌드의 파단연신율을 나타내는 그래프이며, PEO-2 샘플을 제외하고 PEO 함량에 따른 파단연신율 증가를 확인할 수 있다. PEO 함량이 없는 PEO-0 샘플의 파단연신율은 7.4%에서 각각 46.8% (PEO-2), 7.6% (PEO-4), 47.0% (PEO-6), 146.6% (PEO-8) 및 325.3% (PEO-10)로서, PEO-10 샘플은 PEO를 첨가하지 않은 블렌드에 비해 43.7배 높은 파단연신율을 나타내었다. 15wt% 농도의 PEO의 첨가가 PLA의 파단연신율을 4배 증가 시켜 준다고 보고한 Nigenhuis(1996)연구²¹⁾ 보다 낮은 농도에서 더 높은 연신율의 효과를 확인하였다. PEO-4 샘플은 PEO를 첨가하지 않은 블렌드 보다 낮은 물성을 나타낸 반면, PEO-2 샘플의 경우 다른 샘플들에 비해 인

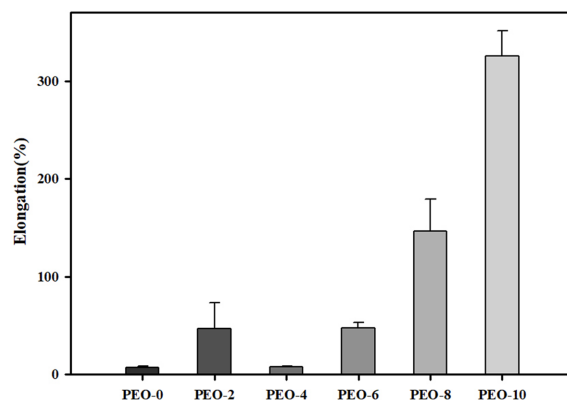


Fig. 1. Tensile strength of PLA/PBAT/PEO blend films.

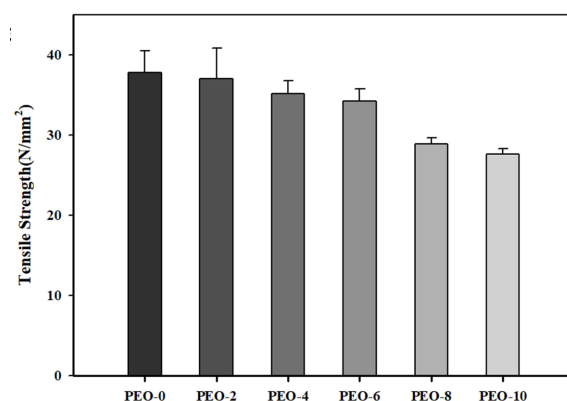


Fig. 2. Elongation at break of PLA/PBAT/PEO blend films.

장강도 감소폭 대비 가장 높은 파단연신율 증가를 나타내었다.

2. PLA/PBAT/PEO 블렌드 필름의 열적 특성

2.1. 시차주사열량(DSC) 분석

Fig. 3은 PLA/PBAT/PEO 블렌드의 두 번째 가열곡선을 나타낸 것이며, 각각의 열특성을 나타내는 온도는 Table 2에 나열하였다. 분석결과 PLA/PBAT 블렌드에 PEO를 첨가할 경우 T_m , T_g 및 T_c 모두 하락하는 경향을 확인할 수 있었다. T_m 의 경우 PEO의 첨가로 인해 2개로 나타났던 PLA/PBAT 블렌드의 T_m 이 하나의 피크로 합쳐지는 것을 확인하였다. 이는 PEO 첨가에 의해 상분리된 PLA/PBAT 블렌드 혼화성이 증대된 것으로 유추된다. T_c 의 경우 PEO 농도 증가에 따른 감소폭이 가장 크게 나타났으며, 상분리된 PBAT가 PLA의 핵생성 저하를 야기시킴에 따른 것으로 판단된다. T_g 의 경우 또한 PEO 농도 증가에 따라 감소하였다. 비상용성 폴리머의 경우 두개의 T_g 를 나타내는 반면, 상용성 폴리머 블렌드는 계면접착력 증가로 인한 계면 근처의 분자사슬간 자유 체적 변화로 인해 낮은 T_g 의 온도상승 및 블렌드 단위체가 가지고 있는 고유 T_g 간의 차이를

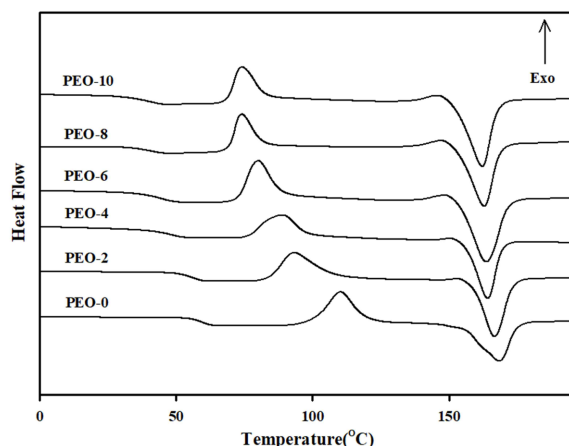


Fig. 3. DSC Analysis of PLA/PBAT/PEO blend films.

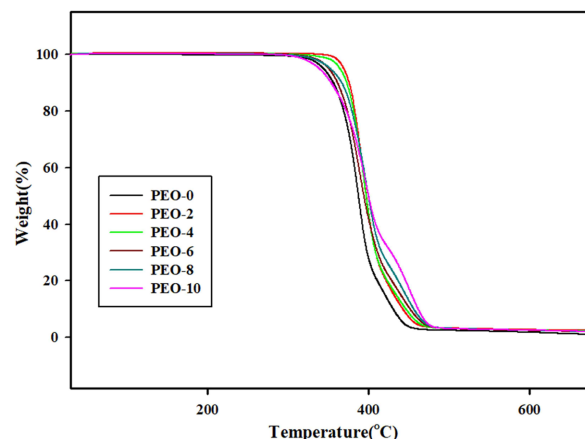


Fig. 4. Thermogravimetric curves of PLA/PBAT/PEO blend films.

Table 2. Thermal properties of PLA/PBAT/PEO blends films

Sample No.	$T_m(^{\circ}\text{C})$		$T_g(^{\circ}\text{C})$	$T_c(^{\circ}\text{C})$	$T_d \text{ max}(^{\circ}\text{C})$
PLA	169.3		64.7	113.2	360.37
PBAT	124.7		-31.8		395.04
PEO	64.0				421.61
PEO-0	160.41	168.27	59.77	110.05	388.31
PEO-2		166.71	56.35	93.07	393.74
PEO-4		164.18	49.21	88.51	394.47
PEO-6		163.71	45.8	79.94	396.82
PEO-8		162.96	42.18	74.4	400.15
PEO-10		162.18	41.41	74.14	409.34

감소시킨다²³⁾. PEO 첨가에 따른 T_g 의 감소는 PEO가 PLA/PBAT 블렌드의 혼화성을 증대시켜, PBAT의 낮은 유리전이온도의 영향을 증대시켰을 뿐 아니라, PEO 첨가에 따른 PLA의 T_g 감소를 보고한 Qiu(2013)의 연구결과를 비추어 보아 PEO로 인한 영향도 작용하였음을 유추 할 수 있다²³⁾.

2.2. 열 중량분석(TGA) 분석

Fig. 4는 PLA/PBAT/PEO 블렌드 필름의 열분해 거동을 나타낸 것이며, Table 2에 열분해 온도(T_d)를 나타내었다. PLA/PBAT/PEO를 블렌딩 할 경우 T95%(중량이 95% 감소하였을 때 온도)는 433.83°C (PEO-0), 458.16°C (PEO-2), 463.53°C (PEO-4), 467.62°C (PEO-6), 468.66°C (PEO-8), 473.87°C (PEO-10)로 PEO 농도가 증가할수록 상승하였다. 이는 Eom(2019)의 연구결과를 통해 PEO의 열 안정성이 PLA 및 PBAT 에 비해 우수하다는 점을 비추어 보아, PLA/PBAT/PEO 블렌드 필름의 열안정성은 PEO 함량의 증가에 따라 서서히 증가한다고 볼 수 있다²²⁾.

3. 화학적 구조 분석(FT-IR, $^1\text{H-NMR}$)

용융블렌딩을 통해 제조한 PLA/PBAT/PEO 블렌드의 화학적 구조를 $^1\text{H-NMR}$ 을 이용하여 분석하였으며, Fig. 6에 나타냈었다. PBAT는 테레프탈산(terephthalic acid, TPA) 및 아디프산(adipic acid, AA)과 부탄디올(butanediol, BDO) 용해 중축합을 통해 합성되는 고분자로서 에스터결합과 인접한 메틸렌기($-\text{COOCH}_2-$)의 수소 피크 위치 이동이 BDO와 결합한 단위체에 따라 각각 다르게 나타난다. 4.1-4.45 ppm(a-d)에 걸쳐 4개의 PBAT의 수소 피크 위치 이동이 관찰되며, Li(2018)가 보고한 PBAT의 분석 결과와 일치한다²⁴⁾. 이전 연구와 같이 4.15 ppm(e)부근의 PLA 내 메틸기($-\text{CH}_3$)의 수소 피크 위치 이동과 PEO를 첨가함에 따라 PLA/PBAT 블렌드에서 발견되지 않은 PEO 내 메틸기($-\text{CH}_2-$)의 특징적인 수소 피크 위치 이동을 3.68 ppm(f) 부근에서 확인함에 따라 PLA/PBAT/PEO 블렌드 샘플 내

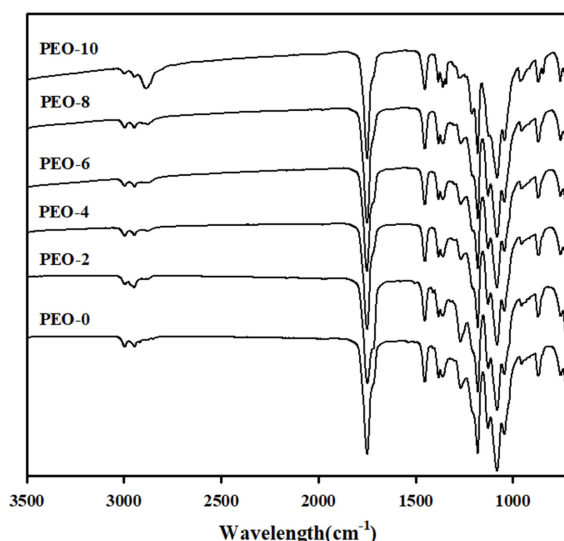


Fig. 5. FTIR spectra of PLA/PBAT/PEO blend films.

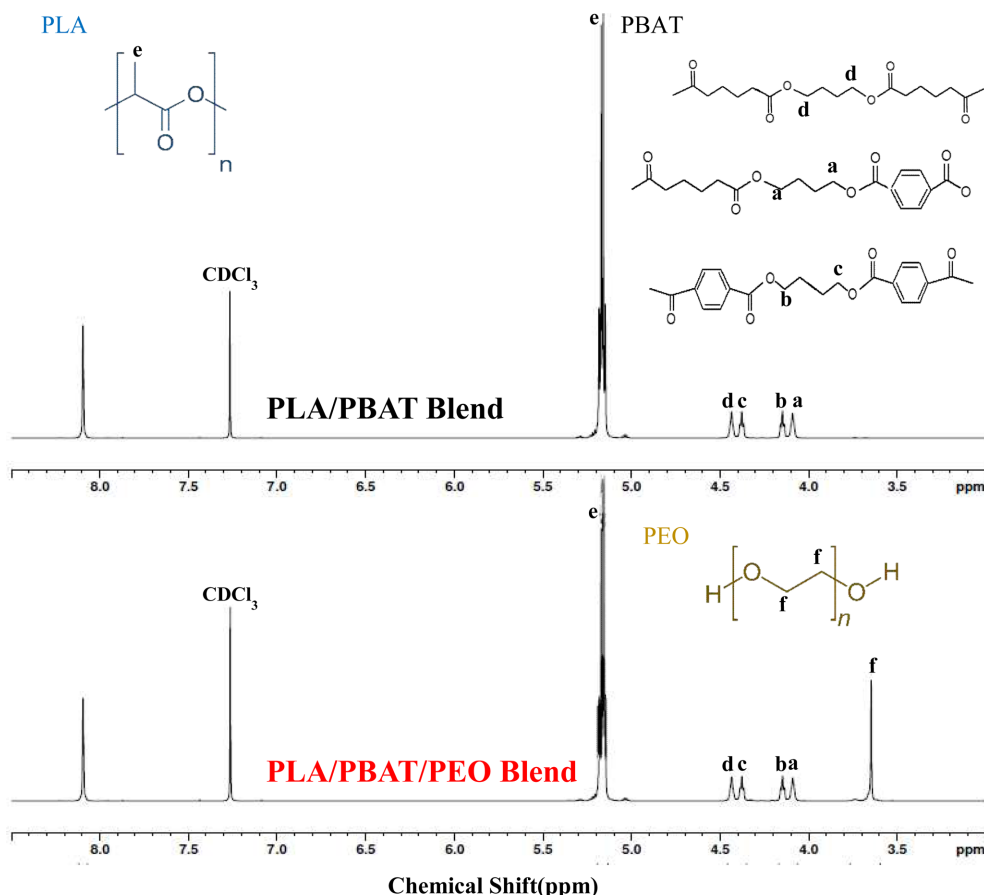


Fig. 6. ^1H -NMR spectra of PLA/PBAT blend and PLA/PBAT/PEO blend.

PEO가 혼화 되어있음을 확인하였다^{5,23}). PEO 내 메틴기의 수소 피크 적분 값이 PEO 농도에 따라 일정하게 증가하였으나, PLA 및 PBAT의 특징적인 수소 피크 적분 값의 차이는 확인하지 못하였다. 이는 PLA/PBAT 블렌드 매트릭스 내에 PEO가 용출되지 않고 계면에 위치하고 있음을 나타냄과 동시에 PLA/PBAT/PEO 블렌드 내 새로운 화학결합이 발생하지 않은 것을 보여준다. 또한 FT-IR의 분석 결과 역시 PLA/PBAT/PEO 블렌드 내 신규 화학결합이 발생하지 않은 것을 보여준다. FT-IR 분석결과는 Fig. 5에 나타내었으며, PEO 농도가 증가할수록 PEO 내 메틴기의 C-H 신축 진동 주파수($2900\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$)의 피크만 증가함을 확인하였다. 해당 결과로부터 PEO 4% 농도 수준의 PLA/PBAT/PEO 블렌드에서 파단연신율의 감소는 블렌드 내 화학결합 및 PEO 용출에 의한 것이 아니며, 해당 농도의 PEO의 첨가는 PEO간의 응집력으로 인해 PLA/PBAT 매트릭스 내 분산성이 저해됨에 따라 발생한 것으로 사료된다. 또한 고농도(8%농도 이상)의 PEO 첨가에 따른 파단연신율의 급격한 증대는 응집되는 PEO의 양보다 분산되는 양이 증대됨에 따라 발생한 것으로 유추된다.

요 약

PEO 첨가에 따른 PLA/PBAT 블렌드 필름의 물성개선 효과를 확인하였다. PEO 농도에 따른 영향을 확인하기 위하여 기계적특성, 열적특성 및 화학적 특성을 조사하였다. PEO 농도가 증가함에 따라 PLA/PBAT/PEO 블렌드 필름의 인장강도는 소폭 감소하지만 열안정성은 증가하였다. PEO 2% 첨가군은 다른 샘플들에 비해 인장강도 감소폭 대비 높은 파단연신율(46.8%) 개선 효과를 보였다. 반면, PEO 4% 수준에서 PEO 무첨가와 유사한 파단연신율과 인장강도의 저하가 발생하였다. 열특성 분석을 통해 PLA/PBAT 블렌드 내 낮은 혼화성으로 발생한 두개의 T_m 피크가 PEO 첨가로 상용성이 증가하여 피크가 하나로 합쳐지는 것을 확인하였다. 또한, ^1H -NMR 분석을 통해 블렌드 내의 PEO의 농도가 증가함을 확인하였다. 향후, PEO 농도가 증가함에 따라 감소된 인장강도 유지와 파단연신율을 확보하기 위한 PEO의 분산성 향상에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 수출전략기술개발사업의 지원(과제번호 : 117040-3)을 받아 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Geyer, R., Jambeck, J.R., and Law, K.L. 2017. Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci. Adv.* 3 (7): 25-29.
- Rillig, M.C. 2012. Microplastic in terrestrial ecosystems and the soil? *Environ. Sci. Technol.* 46 (12): 6453-6454.
- Rasal, R.M., and Hirt, D.E. 2009. Micropatterning of covalently attached biotin on poly(lactic acid) film surfaces. *Macromol. Biosci.* 9 (10): 989-996.
- Leja, K., Lewandowicz, G., Hsu, S.H., Hung, K.C., Chen, C.W., Müller, R., Elvers, D., Song, C.H., Steinbüchel, A., Leker, J., et al. 2020. Bioplastics market data update. *Polymers (Basel)*. 9 (1): 1-14.
- Li, R., Wu, L., and Li, B.G. 2018. Poly (L-lactide)/PEG-mb-PBAT blends with highly improved toughness and balanced performance. *Eur. Polym. J.* 100 (January): 178-186.
- Tien, N.D., and Sakurai, S. 2017. Hierarchical structures in poly(lactic acid)/poly(ethylene glycol) blends. *Eur. Polym. J.* 89 (February): 381-398.
- Auras, R., Harte, B., and Selke, S. 2004. An overview of polylactides as packaging materials. *Macromol. Biosci.* 4 (9): 835-864.
- Mohapatra, A.K., Mohanty, S., and Nayak, S.K. 2014. Study of Thermo-Mechanical and Morphological Behaviour of Biodegradable PLA/PBAT/Layered Silicate Blend Nanocomposites. *J. Polym. Environ.* 22 (3): 398-408.
- Odent, J., Raquez, J.M., Duquesne, E., and Dubois, P. 2012. Random aliphatic copolyesters as new biodegradable impact modifiers for polylactide materials. *Eur. Polym. J.* 48 (2): 331-340.
- Murariu, M., Da Silva Ferreira, A., Alexandre, M., and Dubois, P. 2008. Polylactide (PLA) designed with desired end-use properties: 1. PLA compositions with low molecular weight ester-like plasticizers and related performances. *Polym. Adv. Technol.* 19 (6): 636-646.
- Hoidy, W.H., Al-Mulla, E.A.J., and Al-Janabi, K.W. 2010. Mechanical and Thermal Properties of PLLA/PCL Modified Clay Nanocomposites. *J. Polym. Environ.* 18 (4): 608-616.
- Ding, Y., Feng, W., Huang, D., Lu, B., Wang, P., Wang, G., and Ji, J. 2019. Compatibilization of immiscible PLA-based biodegradable polymer blends using amphiphilic di-block copolymers. *Eur. Polym. J.* 118 (April): 45-52.
- Ding, Y., Feng, W., Lu, B., Wang, P., Wang, G., and Ji, J. 2018. PLA-PEG-PLA tri-block copolymers: Effective compatibilizers for promotion of the interfacial structure and mechanical properties of PLA/PBAT blends. *Polymer (Guildf)*. 146 179-187.
- Kilic, N.T., Can, B.N., Kodal, M., and Ozkoc, G. 2019. Compatibilization of PLA/PBAT blends by using Epoxy-POSS. *J. Appl. Polym. Sci.* 136 (12): 1-18.
- Al-Itry, R., Lamnawar, K., and Maazouz, A. 2012. Improvement of thermal stability, rheological and mechanical properties of PLA, PBAT and their blends by reactive extrusion with functionalized epoxy. *Polym. Degrad. Stab.* 97 (10): 1898-1914.
- Li, F.J., Zhang, S.D., Liang, J.Z., and Wang, J.Z. 2015. Effect of polyethylene glycol on the crystallization and impact properties of polylactide-based blends. *Polym. Adv. Technol.* 26 (5): 465-475.
- Wang, J., Zhai, W., and Zheng, W. 2012. Poly(Ethylene Glycol) Grafted Starch Introducing a Novel Interphase in Poly(Lactic Acid)/Poly(Ethylene Glycol)/Starch Ternary Composites. *J. Polym. Environ.* 20 (2): 528-539.
- Moustafa, H., Guizani, C., and Dufresne, A. 2017. Sustainable biodegradable coffee grounds filler and its effect on the hydrophobicity, mechanical and thermal properties of biodegradable PBAT composites. *J. Appl. Polym. Sci.* 134 (8): 1-11.
- Fang, H., Jiang, F., Wu, Q., Ding, Y., and Wang, Z. 2014. Supertough polylactide materials prepared through in situ reactive blending with PEG-based diacrylate monomer. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 6 (16): 13552-13563.
- Gaikwad, A.N., Wood, E.R., Ngai, T., and Lodge, T.P. 2008. Two calorimetric glass transitions in miscible blends containing poly(ethylene oxide). *Macromolecules* 41 (7): 2502-2508.
- Nijenhuis, A.J., Colstee, E., Grijpma, D.W., and Pennings, A.J. 1996. High molecular weight poly(l-lactide) and poly(ethylene oxide) blends: thermal characterization and physical properties. *Polymer (Guildf)*. 37 (26): 5849-5857.
- Eom, Y., Choi, B., and Park, S. il 2019. A Study on Mechanical and Thermal Properties of PLA/PEO Blends. *J. Polym. Environ.* 27 (2): 256-262.
- Qiu, J., Xing, C., Cao, X., Wang, H., Wang, L., Zhao, L., and Li, Y. 2013. Miscibility and double glass transition temperature depression of poly(L-lactic acid) (PLLA)/poly(oxyethylene) (POM) blends. *Macromolecules* 46 (14): 5806-5814.
- Heald, C.R., Stolnik, S., Kujawinski, K.S., De Matteis, C., Garnett, M.C., Illum, L., Davis, S.S., Purkiss, S.C., Barlow, R.J., and Gellert, P.R. 2002. Poly(lactic acid)-poly(ethylene oxide) (PLA-PEG) nanoparticles: NMR studies of the central solidlike PLA core and the liquid PEG corona. *Langmuir* 18 (9): 3669-3675.

투고: 2020.08.14 / 심사완료: 2020.08.24 / 게재확정: 2020.08.24