

충격강도 및 결정화 속도가 개선된 Fused Deposition Modeling 방식 3D 프린터용 Poly-L-lactic acid 기반 필라멘트

이종인, 오승주, 정지수, 황영재, 배진우, 남병욱*
한국기술교육대학교 응용화학공학과

Poly-L-lactic Acid-based Filaments for Fused Deposition Modeling Typed 3D Printer with Improved Impact Strength and Crystallization Rate

Jong In Lee, Seung-Ju Oh, Ji Su Jeong, Young Jae Hwang, Jin Woo Bae, Byeong Uk Nam*
Department of Applied Chemical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약 열가소성 플라스틱의 필라멘트를 사용하는 Fused deposition modeling (FDM) 방식의 3D 프린터는 다른 종류의 3D 프린터에 비해 저렴한 비용과 편의성 때문에 다양한 산업분야에서 사용되고 있다. Poly-L-lactic acid (PLLA)는 생분해성이 있는 친환경 바이오 플라스틱으로 변형이 거의 없으며, 높은 탄성률을 가졌기 때문에 FDM 방식 3D 프린터용 필라멘트로써 많은 관심을 받고 있다. 하지만, PLLA는 FDM 방식 3D 프린터용 필라멘트로 사용되기에는 낮은 충격강도와 느린 결정화 속도를 보인다. 본 연구에서는, PLLA의 낮은 충격강도와 느린 결정화 속도를 개선하기 위하여 PLLA에 생분해성 플라스틱이면서 충격보강제인 Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)와 핵제인 Talc를 함께 첨가하여 이축 압출기를 통해 용융 블렌드하였다. PBAT의 첨가는 PLLA의 충격강도를 33 J/m에서 54 J/m 까지 증가시켰다. 반면, PLLA/PBAT 블렌드 조성에서 Talc의 첨가는 PLLA의 충격강도를 46 J/m까지 감소시켰지만, 결정화 온도를 96.1 °C까지 증가시켰다. 특히, Talc가 3 phr 첨가된 PLLA/PBAT (80/20 wt%) 블렌드 조성은 최적의 충격강도 (48 J/m)와 결정화 온도 (94.4 °C)를 달성하였고, neat PLLA보다 우수한 충격강도 및 빠른 결정화 속도를 보였다.

Abstract Fused deposition modeling (FDM) type 3D printers, which use thermoplastic filaments, find application in a greater number of industries compared to other types of 3D printers because of their low cost and convenience. Poly-L-lactic acid (PLLA) has received considerable attention as a filament material for the FDM type 3D printer as it is an eco-friendly bioplastic that is biodegradable. Besides, it has lower shrinkage and a high modulus. However, PLLA has a low impact strength and a slow crystallization rate which makes it unsuitable for use as a filament in an FDM type 3D printer. To improve these properties, in this study, PLLA was melt-blended using a twin-screw extruder into poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) and Talc as an impact modifier and nucleating agent, respectively. The addition of PBAT increased the impact strength of the PLLA from 33 J/m to 54 J/m. However, the addition of Talc in the PLLA/PBAT blend decreased the impact strength of the PLLA from 54 J/m to 46 J/m while the crystallization temperature increased to 96.1 °C. In particular, the Talc addition of 3 phr in the PLLA/PBAT (80/20 wt%) blend achieved optimum impact strength (48 J/m) and crystallization temperature (94.4 °C), resulting in the superior impact strength and faster crystallization rate compare to neat PLLA.

Keywords : Poly-L-lactic Acid, Poly(butylene adipate-co-terephthalate), Talc, FDM Typed 3D Printer, Impact Strength, Crystallization Rate, Filament

본 연구는 2020년도 한국기술교육대학교 교육연구진흥비의 지원과 산학협력단 공용장비센터의 지원을 받아 수행되었음을 밝힙니다.

*Corresponding Author : Byeong Uk Nam(Korea University of Technology and Education)

email: bunam@koreatech.ac.kr

Received March 15, 2021

Revised May 3, 2021

Accepted July 2, 2021

Published July 31, 2021

1. 서론

Three dimensional printing (3D 프린팅) 기술은 4차 산업혁명의 핵심기술 중 하나이다. 3D 프린팅 기술에는 Selective laser sintering (SLS), Fused deposition modeling (FDM), Stereolithography (SLA), Laminated object manufacturing (LOM), Digital light processing (DLP), Photopolymer jetting technology (Polyjet) 등의 다양한 출력 방식이 존재한다[1,2]. 그 중 산업이나 가정에서 대표적으로 가장 많이 사용되고 있는 3D 프린터는 유지보수 비용 및 장비 가격이 저렴하며, 편의성이 있는 FDM 방식이다[3]. 이 방식의 3D 프린터는 열가소성 플라스틱 소재의 필라멘트를 노즐을 통해 압출하여 베드 위에 한 층씩 적층하면서 조형물을 제작한다[3-5].

FDM 방식 3D 프린터에 사용되는 필라멘트 소재에는 acrylo-butadiene-styrene (ABS), polycarbonate (PC), Poly-L-lactic acid (PLLA) 등이 있다[4]. 이 중에서 ABS와 PC는 내충격성이 우수한 장점을 지니고 있으나, 석유에서 유래되는 플라스틱이며 비생분해성이므로 환경오염에 기인할 수 있다. 따라서, 환경오염을 줄이고 자 생분해성 플라스틱을 원료로 하는 필라멘트의 사용이 확대되고 있다.

이러한 이유로 식물에서 유래되며 생분해성이 있는 PLLA는 친환경 바이오 플라스틱이면서 변형이 거의 없고 높은 탄성률을 가졌기 때문에 FDM 방식 3D 프린터용 필라멘트 소재로써 많은 관심을 받고 있다[4,6-8]. 하지만, PLLA는 이러한 장점에도 불구하고 충격강도가 낮아 완성된 조형물이 쉽게 깨지는 문제가 있다. 또한, PLLA는 느린 결정화 속도로 인해 노즐에서 나온 용융된 상태의 필라멘트가 굳을 때까지 충분한 시간이 필요하며, 이에 따라 출력 속도가 느려져 필라멘트 소재로 사용되는데 한계가 있다[9,10].

본 연구에서는, PLLA의 낮은 충격강도 및 느린 결정화 속도를 개선하기 위해 생분해성 플라스틱이면서 충격보강제 역할을 하는 Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT)와 핵제인 Talc를 PLLA와 함께 첨가하여 이축 압출기를 통해 용융 블렌드하였다. 용융 블렌드를 통해 제조된 샘플의 가공성을 확인하기 위해 Melt index (MI)를 측정하였다. 또한, 이의 충격강도를 확인하기 위해 Izod impact test를 진행하였고, 파단면의 모폴로지를 분석하기 위해 Scanning electron microscope (SEM) 이미지를 촬영하였다. 그리고 Differential scanning calorimetry (DSC) 분석을 통

해 PBAT와 Talc가 PLLA의 결정화 거동에 미치는 영향을 확인하였다.

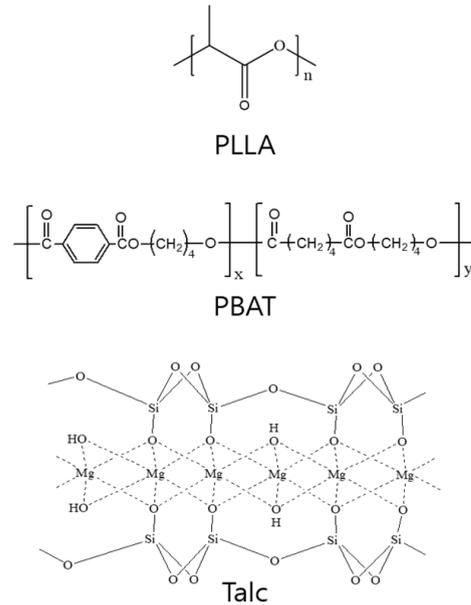


Fig. 1. Structure of the PLLA, PBAT, and Talc

2. 본론

2.1 재료

본 연구에 사용된 PLLA는 Nature Works사의 4032D (MI=3.0 g/10 min, 190 °C, 2.16 kg)를 사용하였다. PBAT는 BASF사의 BX7011 (MI=2.7~4.9 g/10 min, 190 °C, 2.16 kg)을 사용하였고, Talc는 KOCH사의 KCM-6300을 사용하였다. 이들의 구조는 Fig. 1에 나타냈다.

2.2 샘플의 조성 및 제조

PLLA, PBAT, Talc를 정해진 조성에 따라 균일하게 혼합하였다. 이후 샘플을 co-rotating 타입의 이축 압출기 (Bautek, BA19, L/D=40, 19 Φ)를 이용하여 용융 블렌드하였다. 이축 압출기의 공정스쿠루 속도는 150 rpm으로 진행하였으며, 공정온도는 160~180 °C로 설정하였다. 압출공정을 통해 제조된 샘플은 펠렛타이저 (Bautek, BA-PLT)를 통해 펠렛화하였고, 이를 60 °C 진공 건조기에서 24시간 건조하였다. 건조된 펠렛은 충격강도 측정을 위해 사출기 (Heunghwa, HVM-25VS)를 이용하여 ASTM 표준 시편으로 제작하였다.

2.3 샘플 분석

MI는 Melt indexer (Tinius Olsen, MP600)를 이용하여 ASTM D1238 규격에 따라 190 °C, 2.16 kg에서 측정하였다. 충격강도는 ASTM D256 규격에 따라 제조된 시편을 노칭 성형 후 Izod impact tester (Qmesys, QM700A)를 이용하여 7개의 샘플을 측정 후 최댓값, 최솟값을 제외한 5개의 데이터로 평균을 구하였다. 모폴로지는 액체질소를 이용해 샘플을 급냉한 후에 파단하였고, 파단면을 Au 코팅 후 SEM (Emcrafts, GENESIS-2000)을 이용하여 3000배의 배율로 촬영하였다. PLLA 블렌드 조성의 결정화 거동은 다음과 같은 방법으로 분석하였다. 약 10 mg 정도의 샘플을 DSC (PerkinElmer, DSC 4000)를 이용하여 30~200 °C 까지 1차 승온하여 기존의 열이력을 제거하였다. 이후 30 °C까지 냉각하였고, 이를 다시 200 °C까지 2차 승온하였다. 모든 과정은 질소 분위기에서 10 °C/min의 속도로 온도변화를 주었다. DSC 측정 후 PLLA의 결정화도는 2차 승온한 데이터를 바탕으로 다음의 식에 따라 계산하였다[11,12].

$$X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_c}{\Delta H_{m,100} \times W_f} \times 100 (\%) \quad (1)$$

Eq. (1)에서 ΔH_m 은 PLLA의 용융 엔탈피 (J/g)를 나타내며, ΔH_c 는 T_c (cold crystallization temperature) 구간의 엔탈피 (J/g)이다. $\Delta H_{m,100}$ 은 PLLA가 100% 결정일 때의 용융 엔탈피로 93.7 J/g이며, W_f 는 블렌드 조성에서 PLLA의 질량분율을 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 PLLA/PBAT 블렌드의 특성

3.1.1 PLLA/PBAT 블렌드의 모폴로지

PBAT 함량에 따른 PLLA 파단면의 모폴로지를 확인하기 위해 Table 1의 조성대로 샘플을 제작하였고, 이들의 모폴로지를 Fig. 2에 나타냈다. Neat PLLA는 전반적으로 매끄러운 표면 형상을 보이는 반면, PBAT가 첨가된 조성은 PBAT 입자가 PLLA 매트릭스 내에 분산되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한, PBAT의 함량이 20 wt%까지는 입자의 직경이 상대적으로 작으나, 30 wt%에서는 입자의 직경이 급격하게 커짐에 따라 상분리가 일어난 것으로 확인되었다. 이러한 결과를 통해 PBAT의

함량이 30 wt% 첨가되었을 때 PLLA로부터의 상분리가 기계적 물성을 감소시킬 것으로 예상하였다.

Table 1. Formulation of the PLLA/PBAT blends

Sample	PLLA (wt%)	PBAT (wt%)
L100	100	-
L90B10	90	10
L80B20	80	20
L70B30	70	30

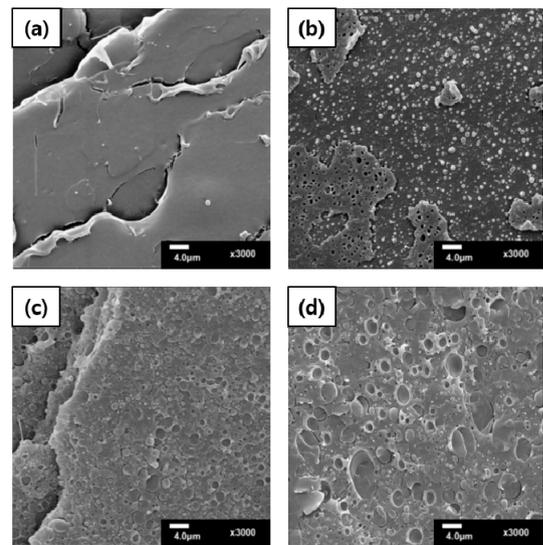


Fig. 2. SEM images of the (a) L100; (b) L90B10; (c) L80B20; (d) L70B30

3.1.2 PLLA/PBAT 블렌드의 가공성 및 충격강도

Fig. 3은 PBAT 함량에 따른 PLLA의 MI 결과를 나타낸다. Neat PLLA의 MI는 3.2 g/10 min으로 가장 낮았으며, PBAT의 함량이 증가함에 따라 PLLA의 MI도 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 PBAT가 윤활제 역할을 하였기 때문에 PLLA의 흐름성이 증가한 결과이다 [7]. 일반적으로 FDM 방식 3D 프린터용 필라멘트는 MI가 10 g/10 min (190 °C, 2.16 kg) 이상일 때 사용이 어려운 것으로 알려져 있다[13]. 따라서, PBAT의 함량이 30 wt% 첨가된 L70B30 조성의 MI는 기준치보다 높아 FDM 방식 3D 프린터용 필라멘트 소재로써 부적합한 것으로 보인다.

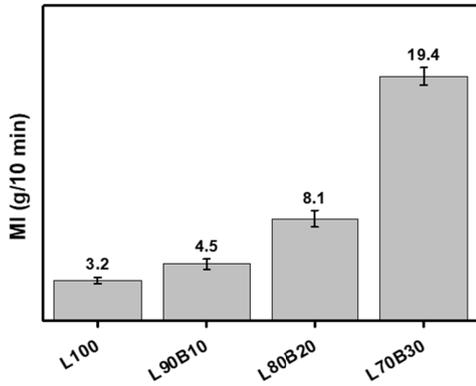


Fig. 3. MI results of the PLLA/PBAT blends

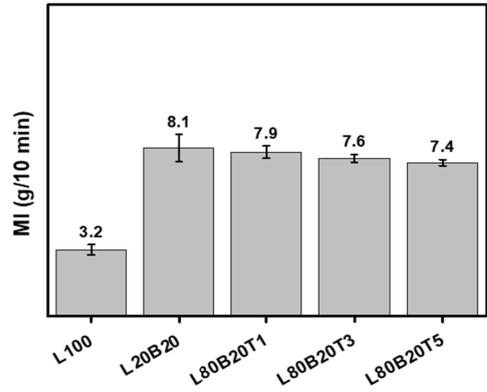


Fig. 5. Effect of Talc content on the MI of the PLLA/PBAT blends

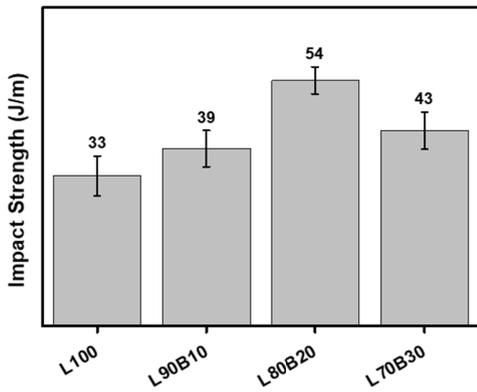


Fig. 4. Izod impact strength results of the PLLA/PBAT blends

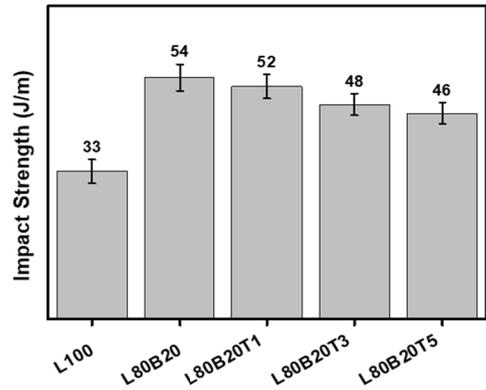


Fig. 6. Effect of Talc content on the Izod impact strength of the PLLA/PBAT blends

Table 2. Formulation of the PLLA/PBAT blends including Talc

Sample	PLLA (wt%)	PBAT (wt%)	Talc (phr)
L80B20T1	80	20	1
L80B20T3	80	20	3
L80B20T5	80	20	5

Fig. 4는 PBAT 함량에 따른 PLLA의 충격강도 결과를 나타낸다. 충격보강제인 PBAT의 함량이 20 wt%까지는 PLLA의 충격강도가 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 하지만, PBAT의 함량이 30 wt%가 첨가되었을 때는 충격강도가 오히려 감소하였다. 이는 PBAT 함량이 많아짐에 따라 입자의 직경이 커지게 되어 나타난 결과로 판단된다[11]. 이러한 결과는 Fig. 2의 PLLA 파단면 모폴로지에서 PBAT 함량이 30 wt% 첨가되었을 때 상분리가 일어난 결과와 일치함을 알 수 있었

다. PLLA의 SEM, MI, 충격강도 분석결과를 통해 PBAT 함량이 20 wt%인 L80B20 조성이 가공성과 충격강도 측면에서 FDM 방식 3D 프린터용 필라멘트 소재로서 가장 적합한 것으로 판단되었다. 따라서, Table 2의 조성대로 L80B20 조성에 Talc를 다양한 함량으로 첨가하여 Talc 함량에 따른 PLLA의 가공성, 충격강도, 그리고 결정화 거동에 대해 분석하였다.

3.2 PLLA/PBAT/Talc 블렌드의 특성

3.2.1 PLLA/PBAT/Talc 블렌드의 가공성 및 충격강도

Fig. 5는 L80B20 조성에 다양한 함량의 Talc가 첨가되었을 때의 MI 결과를 나타낸 그래프이다. Talc의 함량이 증가함에 따라 PLLA/PBAT 블렌드 조성의 MI는 지속적으로 감소하였다. 이는 rigid한 Talc가 PLLA의 흐름성을 감소시켰기 때문이다[14]. 하지만, Talc가 첨가된 모든 조성의 MI

는 10 g/10 min 이하이기 때문에 FDM 방식 3D 프린터용 필라멘트로써 적합한 것으로 보인다.

Fig. 6은 L80B20 조성에 다양한 함량의 Talc가 첨가되었을 때의 충격강도 결과를 나타낸 그래프이다. Talc가 첨가되지 않은 L80B20 조성은 neat PLLA와 비교하여 충격강도가 약 60% 상승한 반면, Talc의 함량이 증가함에 따라 PLLA/PBAT 블렌드 조성의 충격강도는 지속적으로 감소하였다. 이는 Talc의 첨가가 PLLA의 연성(ductility)을 감소시켰기 때문이다[15].

3.2.2 PLLA/PBAT/Talc 블렌드의 결정화 거동

Fig. 7은 L80B20 조성에 다양한 함량의 Talc가 첨가되었을 때의 결정화 거동을 나타낸 그래프로 각각 냉각 과정과 2차 승온 과정의 데이터를 사용하였다. 이에 대한 T_{cc} (cold crystallization temperature, 저온 결정화 온도), T_c (crystallization temperature, 결정화 온도), T_m (melting temperature, 용융 온도)를 Table 3에 나타냈다. Fig. 7(a)를 보면, Talc가 첨가되지 않은 B100, L100, L80B20 조성은 냉각 과정에서 뚜렷한 결정화 거동이 보이지 않았다[12,14,16]. 반면, Talc가 첨가된 모든 조성은 냉각 과정에서 뚜렷한 결정화 거동이 관측되었고, Talc의 함량이 증가함에 따라 더 높은 온도에서 결정화가 이루어졌으며, 결정화 peak의 높이가 증가하였다. 이는 Talc가 핵제 역할을 함에 따라 PLLA의 결정 형성에 영향을 주었고, 핵의 밀도를 상승시켰기 때문이다[14]. 이러한 이유로 냉각 과정에서 확인하기 어려웠던 neat PLLA의 결정화 온도는 Talc가 첨가되기 전보다 낮을 것으로 판단된다. Talc 첨가 이후 결정화 온도의 증가는 냉각 과정 시에 더 높은 온도에서 결정화가 시작되므로 neat PLLA보다 더 빨리 결정화가 이루어질 수 있음을 의미한다. 따라서, PLLA 블렌드 조성에서 Talc의 첨가는 PLLA의 결정화 속도를 더 빠르게 하며 FDM 방식 3D 프린터의 출력 속도를 개선하여 생산량을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 7(b)를 보면, PLLA에 PBAT만 첨가된 L80B20 조성의 T_{cc} 는 neat PLLA에 비해 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이는 PBAT가 PLLA의 결정화 능력을 향상시켰기 때문이다[7,17]. 또한, Talc가 첨가된 모든 조성의 T_{cc} 는 관측되지 않았는데, 이것은 냉각 과정에서 결정이 많이 형성되어 사슬의 유동성을 감소시켰기 때문으로 보인다[12,14]. 그리고 Talc의 함량이 증가할수록 명백한 두 개의 T_m peak를 보였다. 이는 Talc가 불균일한 핵생성을 함에 따라 영향을 받은 것으로 보인다[14].

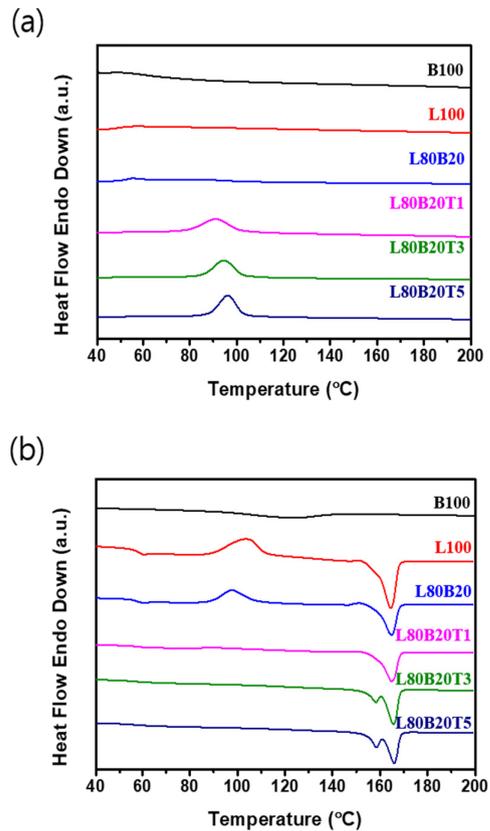


Fig. 7. Effect of Talc content on the crystallization behavior of the PLLA/PBAT blends. (a) Cooling thermograms; (b) Heating thermograms

Table 3. T_{cc} , T_m , T_c of PLLA, PLLA/PBAT blend, PLLA/PBAT/Talc blends

Sample	T_{cc} (°C)	T_m (°C)	T_c (°C)
L100	104.8	166.5	-
L80B20	97.6	164.8	-
L80B20T1	-	165.0	90.7
L80B20T3	-	165.6	94.4
L80B20T5	-	166.0	96.1

Fig. 8은 Eq. (1)에 따라 계산한 PLLA 블렌드 조성의 결정화도를 나타낸다. Talc가 첨가되지 않은 L100과 L80B20 조성은 상대적으로 낮은 결정화도를 보인다. 반면, Talc가 첨가된 모든 조성은 30%에 가까운 결정화도를 보이며, Talc의 함량이 증가함에 따라 PLLA의 결정화도가 지속적으로 증가하였다. 이는 앞에서 언급하였듯이 Talc가 핵의 밀도를 증가시켜 나타난 결과이다. 또한, PLLA는 결정화도가 증가함에 따라 충격강도가 감소하는

경향을 보이는 것으로 알려져 있다[18]. 본 연구결과에서도 마찬가지로 Talc의 첨가로 인해 결정화도가 증가함에 따라 PLLA/PBAT 블렌드 조성의 충격강도가 지속적으로 감소하는 경향과 일치하였다.

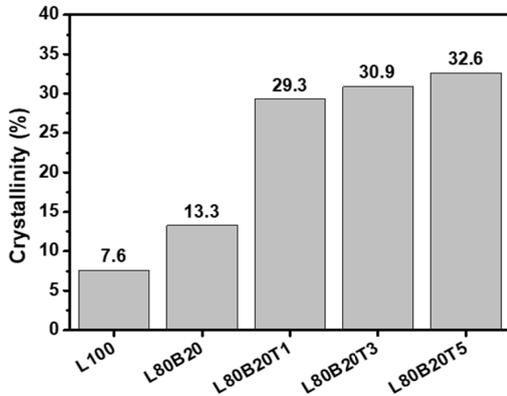


Fig. 8. Effect of Talc content on the crystallinity of the PLLA/PBAT blends

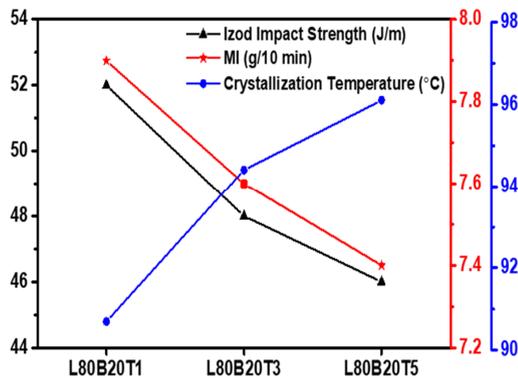


Fig. 9. Correlation of Izod impact strength, MI, crystallization temperature of PLLA/PBAT blends depending on the Talc content

Fig. 9는 PBAT와 Talc가 첨가된 PLLA 블렌드 조성의 충격강도, MI, 결정화 온도의 상관관계를 나타낸 그래프이다. Talc의 함량이 증가함에 따라 PLLA/PBAT 블렌드 조성의 충격강도와 MI는 감소하지만, 결정화 온도가 증가하는 경향을 보였다. 특히, 적절한 충격강도, MI, 결정화 온도를 보인 L80B20T3 조성은 neat PLLA 보다 충격강도가 45% 증가한 동시에 94.4 °C의 높은 온도에서 결정화되어 결정화 속도가 개선된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과들을 통해 열가소성 고분자를 열로 녹여서 한 층씩 쌓아올리는 FDM 방식의 3D 프린터

용 필라멘트로서 L80B20T3 조성이 가장 적합한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 FDM 방식 3D 프린터용 필라멘트 소재로 사용되는 생분해성 플라스틱인 PLLA의 낮은 충격강도와 느린 결정화 속도를 개선하기 위해 PBAT와 Talc를 첨가하여 이축 압출기를 통해 용융 블렌드하였다. PLLA에 PBAT를 첨가함으로써 PLLA의 충격강도는 최대 54 J/m까지 증가하다가 감소하였다. 이는 SEM 분석을 통해 PBAT 함량이 많아짐에 따라 입자의 직경도 커지고, 이에 따라 상분리가 일어났기 때문임을 확인할 수 있었다. PLLA/PBAT 블렌드 조성에서 Talc가 첨가되었을 때는 충격강도가 소폭 감소하였지만, 결정화 온도가 96.1 °C까지 증가하였다. 이것은 핵제 역할을 하는 Talc가 PLLA의 결정 형성 능력에 영향을 미쳤기 때문이다. 특히, L80B20T3 조성은 FDM 방식 3D 프린터 출력에 적절한 MI를 보이면서 neat PLLA 대비 충격강도가 45% 증가한 48 J/m와 94.4 °C의 높은 결정화 온도를 보였다. 따라서, 충격강도와 결정화 속도를 함께 개선한 L80B20T3 조성이 열을 이용하여 적층하는 FDM 방식의 3D 프린터용 필라멘트 소재로서 가장 적합한 것으로 판단할 수 있었다.

References

- [1] S. Kim, H. Seong, Y. Her, J. Chun, "A study of the development and improvement of fashion products using a FDM type 3D printer", *Fashion and Textiles*, Vol.6, No.9, pp.1-24, Jan. 2019. DOI : <https://doi.org/10.1186/s40691-018-0162-0>
- [2] M. S. Young, "Types and Applications of 3D Printers", *Polymer Science and Technology*, Vol.26, NO.5, pp.404-409, Oct. 2015.
- [3] K. Noh, H. Seo, T. Kim, Y. Lee, "Development of a G-Code Generator for Color Gradation Generations in a Mixing Chamber FDM 3D Printers", *Korean Journal of Computational Design and Engineering*, Vol.22, No.1, pp.10-17, Mar. 2017. DOI: <https://doi.org/10.7315/CDE.2017.010>
- [4] S. J. Park, J. E. Lee, J. H. Park, M. Y. Lyu, K. Park, M. S. Koo, Y. Son, "FDM 3D Printing of Environmental Friendly and High Strength Bio-based PC Filaments for Baby Toys", *Elastomers and Composites*, Vol.52,

- No.2, pp. 99-104, Jun. 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7473/EC.2017.52.2.99>
- [5] Y. Han, J. Kim, "Study on Peel Strength Measurement of 3D Printing Composite Fabric by Using FDM", *Journal of fashion business*, Vol.23, No.2, pp.77-88, May. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.12940/jfb.2019.23.2.77>
- [6] J. Ryu, S. Choi, E. Ahn, E. Seo, S. Park, T. Eom, J. M. Lee, "Effects of MFC Dispersionability on the Physical and Thermal Properties of Filaments in the Production of 3D Printing Filament", *Journal of Korea TAPPI*, Vol.51, No.1, pp.54-63, Feb. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.7584/JKTAPPI.2019.02.51.1.54>
- [7] L. Jiang, M. P. Wolcott, J. Zhang, "Study of biodegradable polylactide/poly (butylene adipate-co-terephthalate) blends", *Biomacromolecules*, Vol.7, No.1, pp.199-207, Nov. 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1021/bm050581q>
- [8] K. S. Kang, B. S. Kim, W. Y. Jang, B. Y. Shin, "Morphology, Thermal and Mechanical Properties of Poly(lactic acid)/Poly(butylene adipate-co-terephthalate)/CMPS Blends", *Poymer (Korea)*, Vol.33, No.2, pp.164-168, Mar. 2009.
- [9] Y. Liao, C. Liu, B. Coppola, G. Barra, L. D. Maio, L. Incarnato, K. Lafdi, "Effect of Porosity and Crystallinity on 3D Printed PLA Properties", *Polymers*, Vol.11, No.9, pp.1487-1500 Jan. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11091487>
- [10] J. C. Camargo, A. R. Machado, E. C. Almeida, E. F. F. M. S. Silva, "Mechanical properties of PLA-graphene filament for FDM 3D printing", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.103, No.5, pp.2423-2443, Apr. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03532-5>
- [11] O. Çoban, M. Ö. Bora, T. Kutluk, G. Özkoç, "Mechanical and thermal properties of volcanic particle filled PLA/PBAT composites", *Polymer Composites*, Vol. 39, No. S3, pp.E1500-E1511, Jun. 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1002/pc.24393>
- [12] D. Battegazzore, S. Bocchini, A. Frache, "Crystallization kinetics of poly (lactic acid)-talc composites", *Express Polymer Letters*, Vol.5, No.10, pp.849-858, Oct. 2011.
DOI: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2011.84>
- [13] E. O. Cisneros-López, A. K. Pal, A. U. Rodriguez, F. Wu, M. Misra, D. F. Mielewski, A. Kiziltas, A. K. Mohanty, "Recycled poly(lactic acid)-based 3D printed sustainable biocomposites: a comparative study with injection molding", *Materials Today Sustainability*, Vol.7-8, Mar. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2019.100027>
- [14] S. Jain, M. Misra, A. K. Mohanty, A. Ghosh, "Thermal, Mechanical and Rheological Behavior of Poly(lactic acid)/Talc Composites", *Journal of Polymers and the Environment*, Vol.20, No.4, pp.1027-1037, Jul. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0500-z>
- [15] D. Jeong, B. Nam, M. Jang, C. Hong, "Study on PLLA Alloys with Impact Modifier and Talc", *Elastomers and Composites*, Vol.45, No.2, pp.129-136, Jun. 2010.
- [16] W. Yu, X. Wang, E. Ferraris, J. Zhang, "Melt crystallization of PLA/Talc in fused filament fabrication", *Materials and Design*, Vol.182, Nov. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108013>
- [17] E. Quero, A. J. Müller, F. Signori, M. Coltelli, S. Bronco, "Isothermal Cold-Crystallization of PLA/PBAT Blends With and Without the Addition of Acetyl Tributyl Citrate", *Macromolecular Chemistry and Physics*, Vol.213, No.1, pp.36-48, Jan. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1002/macp.201100437>
- [18] H. Simmons, P. Tiwary, J. E. Colwell, M. Kontopoulou, "Improvements in the crystallinity and mechanical properties of PLA by nucleation and annealing", *Polymer Degradation and Stability*, Vol.166, pp.248-257, Aug. 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.06.001>

이 종 인(Jong In Lee)

[준회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 석사과정

<관심분야>

고분자 가공 및 합성, 친환경 소재

오 승 주(Seung-Ju Oh)

[준회원]



- 2020년 2월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 석사과정

<관심분야>

차세대 스트레처블 디스플레이소재, 카메라 렌즈소재, 고신축/고유연 에너지하베스팅소재

정 지 수(Ji Su Jeong)

[준회원]



- 2017년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 학사과정

<관심분야>
친환경 소재

황 영 재(Young Jae Hwang)

[준회원]



- 2016년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 학사과정

<관심분야>
산업안전, 기기분석

배 진 우(Jin Woo Bae)

[정회원]



- 2004년 8월 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 서울대학교 화학생물공학부(공학박사)
- 2012년 3월 ~ 2013년 9월 : 삼성 디스플레이 책임연구원

- 2013년 10월 ~ 2016년 2월 : 경희대학교 연구교수
- 2016년 3월 ~ 2019년 8월 : University of California, Berkeley 박사후연구원
- 2019년 9월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 교수

<관심분야>
고분자 센서, 액츄에이터, 연료전지 및 에너지하베스팅

남 병 옥(Byeong Uk Nam)

[정회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 공업화학 (공학사)
- 1989년 2월 : 서울대학교 공업화학 (공학석사)
- 1993년 8월 : 서울대학교 공업화학 고분자재료 (공학박사)

- 1993년 9월 ~ 2002년 2월 : SK innovation 대덕 R&D 센터 고분자 연구소 수석연구원
- 2008년 8월 ~ 2009년 8월 : 미국 RPI공대 화학과 방문 교수
- 2002년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 응용화학공학과 교수

<관심분야>
고분자 복합재료, 친환경 고분자 소재