

Fossil PC와 Bio-based PC의 Bulk 강도, Weldline 강도, 3D 프린팅 적층물의 적층강도 비교

박성제 · 박정현 · 류민영[†] · 구명술* · 노형진* · 조성환*

서울과학기술대학교 대학원 제품설계금형공학과, *삼양사 화학연구소
(2016년 12월 8일 접수, 2017년 1월 17일 수정, 2017년 1월 17일 채택)

Comparison of Bulk Strength, Weldline Strength, and Deposition Strength of 3D Printing-manufactured Article in Fossil PCs and Bio-based PCs

Seong Je Park, Jung Hyun Park, Min-Young Lyu[†], Myung Sool Koo*, Hyung Jin Rho*, and Sung Hwan Cho*

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

*Chemical Research Center, Samyang Co., Hwoam-dong, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

(Received December 8, 2016; Revised January 17, 2017; Accepted January 17, 2017)

초록: 본 연구에서는 fossil PC와 bio-based PC를 이용하여 사출성형으로 제작한 시편에서 bulk 및 weldline 강도와 FDM 방식 3D 프린팅에서의 적층강도를 측정하고 비교하였다. Weldline 강도 시편의 경우 공정온도 증가에 따라 weldline 강도와 파단 시 연신율이 증가하였다. 3D 프린팅으로 적층된 시편의 경우 적층방향 인장 시험에서는 공정온도 증가에 따라 적층강도와 파단 시 연신율의 변화가 미미하였다. 반면, 적층 직각방향의 인장시험에서는 공정온도 증가에 따라 적층강도와 파단 시 연신율이 비례적으로 증가하였다. 3D 프린팅으로 제작한 시편에서 가장 낮은 강도를 보이는 적층 직각방향의 강도는 weldline 강도 대비 각각 62.78%와 25.81%를 보였다. 그리고 3D 프린팅 시편에서 적층방향의 강도 대비 적층 직각방향의 강도의 비는 fossil PC와 bio-based PC에서 각각 69.97%와 51.52%로 나타났다.

Abstract: The deposition strength in FDM type 3D printing-manufactured specimen and the bulk and weldline strength in a specimen prepared by injection molding using fossil PCs and bio-based PCs were measured and compared. In the injection molded specimen, weldline strength and fracture elongation increased with increasing processing temperature. As for the results of the deposition direction tensile test, deposition strength and variation for fracture elongation in the 3D printing-manufactured specimen were marginal with an increase in processing temperature. On the other hand, the orthogonal to deposition direction tensile test revealed that both deposition strength and fracture elongation were proportional to processing temperature. The ratio of weldline strength and the strength in the orthogonal to deposition direction, which presented the lowest strength value in the 3D printing-manufactured specimen, was equivalent to 62.78% and 25.81% in fossil PCs and bio-based PCs, respectively. The ratio of strength in the deposition direction and orthogonal to deposition direction in the 3D printing-manufactured specimen was 69.97% and 51.52% in fossil PCs and bio-based PCs, respectively.

Keywords: fossil PC, bio-based PC, fused deposition modeling (FDM), 3D printing, deposition strength.

서 론

석유 화학산업의 각종 유해물질 배출에 대한 부정적 이미지와 더불어 미래 사회의 석유 생산 및 수급에 대한 불확실

성으로 최근에 들어 biomass를 기반으로 한 소재의 관심 및 활용이 증가하고 있다.¹⁻⁵ 이러한 요구에 따라 2012년 Mitsubishi Chemical은 biomass를 기반으로 한 폴리카보네이트(polycarbonate, PC)를 공개하였다.⁶ 기존 석유자원 기반을 한 fossil PC는 bisphenol-A(BPA)이라 불리는 유해물질을 포함하고 있지만 이와 다르게 bio-based PC는 옥수수 전분에서 추출한 isosorbide를 기반으로 합성되어 유해물질을 포함하고 있지 않아 친환경적 소재라고 할 수 있다.⁷ 한편, 적층 성형

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr
©2017 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

(additive manufacturing, AM)이라 불리는 3D 프린팅은 기존 절삭 가공이나 몰딩에서는 구현할 수 없는 복잡한 형상의 제작이 간편하고 단기간에 제작할 수 있다는 장점으로 최근 제조산업에 큰 혁신을 불러 일으키고 있다.^{8,9} 이러한 장점을 바탕으로 3D 프린팅은 시제품 제작 용도를 넘어 의료, 우주 항공, 의류, 건축, 자동차 산업 등 매우 다양한 분야에서 활용되고 있다.¹⁰⁻¹⁵ 이러한 3D 프린팅은 제조 방식에 따라 binder jetting, directed energy deposition, material extrusion, material jetting, powder bed fusion, sheet lamination 그리고 vat photopolymerization 등으로 분류되고 있다.¹⁵⁻¹⁷ 이 중 material extrusion에 해당하는 FDM(fused deposition modeling) 방식은 필라멘트 형태의 열가소성 고분자 소재를 열로 용융시켜 노즐을 통해 압출하여 한 층씩 적층하는 방식으로 조각이 간편하고 다양한 재료의 적용이 가능하여 가장 대중적으로 활용되고 있다.¹⁷

이러한 FDM 방식 3D 프린팅의 연구 분야는 적층물의 기계적 물성, 변형, 휨, 표면조도, 치수정밀도, 용융 필라멘트의 압출 현상, 히팅부 및 적층물의 온도 해석, 그리고 노즐에서 용융 필라멘트의 분출 직경 해석 등 매우 다양하다.¹⁸⁻²⁶ FDM 방식 3D 프린팅의 조형물은 Figure 1과 같이 한 layer 씩 적층해나가는 비연속적 공정 특성으로 인하여 bulk 소재에 대비하여 낮은 강도를 보인다.²⁷ FDM 방식 3D 프린팅 조형물의 기계적 물성은 조형물의 다양한 활용을 위해서 반드시 향상되어야 할 부분이다. 3D 프린팅에서 다양한 재료와 다양한 공정 변수를 바탕으로 적층 강도 향상에 대한 연구는 현재 활발히 진행되고 있으며 적층물의 강도에 영향을 주는 요소는 적층물의 fill density, 재료의 flow rate, 적층방향 그리고 공정 온도 등이 있다.^{18-20,26,27} 따라서 이러한 변수를 바탕으로 FDM 방식 3D 프린팅에서 다양한 재료별 최대 적층강도 수준을 찾는 것은 매우 중요하다. 하지만, 이전의 연구에서는 다양한 변수에 따라 강도 향상에 대한 연구는 많이 진행되었으나 3D 프린팅 방식 조형물이 나타낼 수 있는 최대 적층강도의 기준을 제시하는 연구는 진행되어 있지 않은 상황이다. FDM 방식 3D 프린팅 조형물이 나타낼 수 있는 최대의 적층강도는 사출성형에서의 weldline 강도이다. Weldline은 Figure 2와 같이 캐비티 내에서 진행 방향이 다른 수지가 만나게 되거나 구멍이 있는 곳에서 흐름이 나눠졌다 만나서 생기는 결합이지만 사출성형 중 빠른 사출속도와 높은 온도와 압력을 받는 공정 특성으로 인하여 소재가 발휘할 수 있는 최고 수준의 접착특성을 나타낼 수 있기 때문이다.²⁸ 이러한 weldline의 강도 향상을 위해 사출성형 조건, 금형형상 그리고 다양한 재료 등을 변수로 한 연구도 많이 진행되었다.²⁸⁻³¹ 따라서 접착의 연속인 FDM 방식 3D 프린팅 조형물과 사출성형에서의 weldline 시편은 재료의 접착특성이 반영된다는 점에서 유사성이 크다.

본 연구는 fossil PC와 bio-based PC를 필라멘트로 제작하

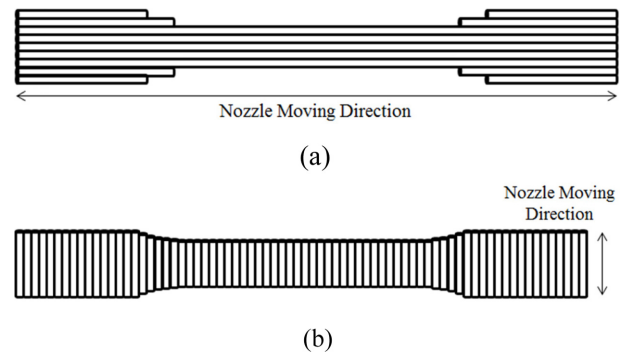


Figure 1. Tensile test specimen for (a) deposition direction; (b) orthogonal to deposition direction in FDM type 3D printing.

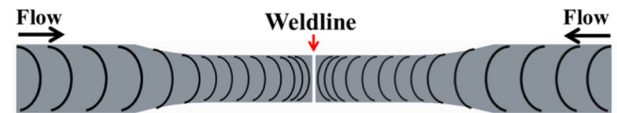


Figure 2. Formation of weldline in injection molding.

여 FDM 방식 3D 프린팅에 적용함으로써 두 소재간의 적층강도의 수준을 파악하였으며 Figure 1과 같이 두 가지의 적층방향(deposition direction and orthogonal to deposition direction)과 공정온도를 달리하여 적층강도의 수준을 파악하였다. 또한 FDM 방식 3D 프린팅의 조형물이 구현할 수 있는 최대의 적층강도 지표로 제시하기 위하여 사출성형시편의 bulk 강도, weldline 강도와 비교 검토하였다.

실 험

재료. 본 연구에서 사용한 재료는 fossil PC로 (주)삼양사의 TRIREX 3027IR과 bio-based PC로 Mitsubishi Chemical의 DURABIO D7340IR이다. 본 연구에서 사용한 fossil PC와 bio-based PC의 수 평균분자량(M_n)은 각각 21200, 11100이고 무게 평균분자량(M_w)은 각각 63800, 18200이다. 이 두 재료를 이용하여 bulk 강도, weldline 강도를 측정하였다. 그리고 지름 1.75 mm의 필라멘트를 제작하여 FDM 방식 3D 프린팅에 적용하였다.

장비. 본 연구에서 bulk 강도와 weldline 강도 시편 제작을 위한 사출기는 우진 플라이(S. Korea)의 TE110을 사용하였다. TE110의 경우 전동식 사출기로 형체력은 110 ton이고 사출용적은 88 cm³이며 스크류 직경은 32 mm이다. 3D 프린팅 적층강도 시편 제작을 위해 사용한 FDM 방식의 3D 프린터는 Rokit사(S. Korea)의 Edison Multi2이다. Multi2의 경우 듀얼 노즐이며 제작이 가능한 출력물의 최대 적층 크기는 250×145×160 mm이며 정밀도(resolution)는 x, y 방향이 11 μm, z 방향이 2.5 μm이다. 최대 사용 가능 노즐 온도는

300 °C이고 베드 온도는 120 °C이다. 인장 시험을 위한 인장 시험기로는 INSTRUMENTS사(United Kingdom)의 EZ20을 사용하였다. EZ20의 허용 하중은 20 kN이고 인장 속도는 0.001~508 mm/min이다. 또한 최소 하중 분해능은 0.0001 N 이고 로드 셀 정밀도는 0.5% 이하이다.

실험방법. Bulk, weldline 시편과 적층강도 시편 규격 모두 ASTM D638 Type 1을 사용하였으며 Figure 3과 같다. Bulk 강도 측정을 위한 시편의 사출은 시편 한 쪽에 gate를 설치하였다. Weldline 시편 제작을 위해서는 인장 시편 양쪽에 gate를 설치하여 Figure 2에 도식적으로 나타난 것처럼 시편 중앙에 weldline이 형성되도록 하였다. 또한 적층강도 시편 제작을 위하여 3차원 형상의 모델링을 STL 파일로 변환하여 Rokits사에서 제공하는 Creator K 프로그램(Skeinforge)을 이용하여 G-code를 생성하고 시편을 제작하였다.

Fossil PC와 bio-based PC를 이용한 사출성형에서 bulk 강도와 weldline 강도 시편 제작 시 설정한 사출성형 조건은 Figure 4와 같다. 또한 3D 프린팅 적층강도 시편 제작 시 설정한 공정 조건은 Table 1과 같으며 적층방향과 적층 직각방

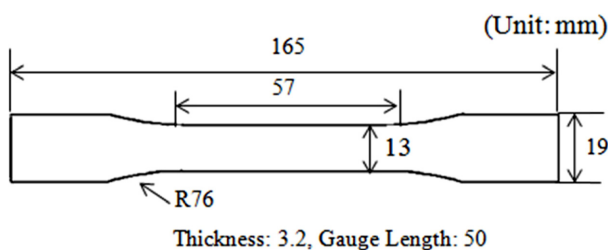


Figure 3. Tensile specimen (ASTM D638, type No.1)

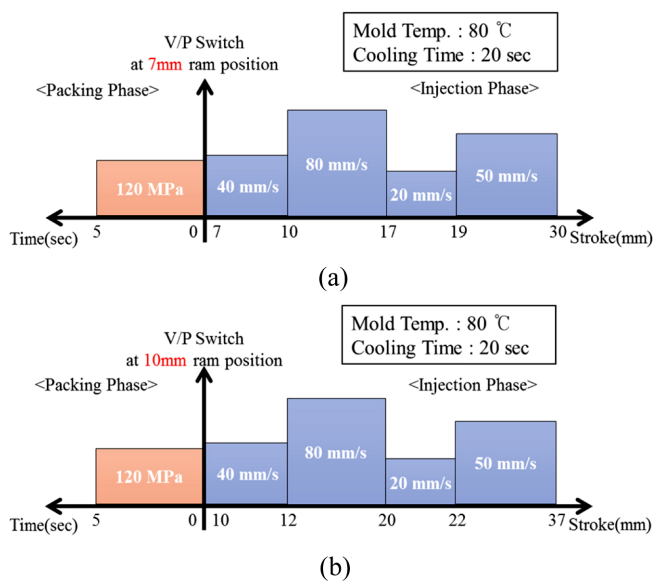


Figure 4. Operation condition for injection molding: (a) bulk strength; (b) weldline strength.

Table 1. Operation Conditions for FDM Type 3D Printing

Item	Value
Layer height (mm)	0.2
Nozzle diameter (mm)	0.4
Nozzle speed (mm/s)	80
Bed temperature (°C)	120

Table 2. Temperature Setting for Injection Molding and FDM Type 3D Printing

(unit: °C)			
Injection molding		3D Printing	
Fossil PC	Bio-based PC	Fossil PC	Bio based-PC
280	240	265	215
300	260	270	245
-	-	275	275

향의 두 가지 시편을 제작하였다. Weldline 강도 시편 및 적층강도 시편 모두 공정온도를 변수로 하여 6개씩 시편을 제작하였으며 공정 온도는 Table 2에 나타나 있다. 공정 온도는 사전 실험을 통해 각 소재에 적합한 온도로 설정하였다. 인장시험 시 인장 속도는 최대한 정적 하중을 부여하기 위하여 1 mm/min로 하여 gauge length 내의 파단을 유도하였다.

결과 및 토론

Bulk 및 Weldline 강도. Fossil PC인 TRIREX 3027IR의 경우 260 °C의 공정온도에서는 흐름성이 낮아 사출성형이 어려워 그 이상의 온도에서 실험하였다. Figure 5(a)와 (b)에 fossil PC와 bio-based PC의 bulk 시편 응력-변형률 곡선이 나타나 있다. 인장강도는 공정온도 증가에 따라 fossil PC가 56.93~56.94 MPa, bio-based PC가 67.39~67.93 MPa를 보였으며 평균 인장강도는 각각 56.94, 67.66 MPa이다. Figure 6(a)에는 fossil PC를 이용하여 280 °C 그리고 300 °C로 사출한 weldline 시편의 응력-변형률 곡선이 나타나 있다. 인장강도는 56.68~56.90 MPa이며 평균 인장강도는 56.79 MPa이다. Figure 6(b)에는 bio-based PC를 이용하여 240 °C와 260 °C에서 사출한 weldline 시편의 응력-변형률 곡선이 나타나 있다. Bio-based PC의 weldline 강도는 66.70~66.88 MPa를 보여주고 있으며 평균 인장강도는 66.79 MPa이다. Weldline 강도 실험 결과 두 소재 모두 공정 온도가 높을수록 응력과 파단시 변형률이 높게 나타났다. 높은 공정 온도에서 weldline의 접착이 향상되었음을 알 수 있다.^{28,32} 또한 bio-based PC가 fossil PC보다 bulk 강도와 weldline 강도에서 모두 높은 강도를 보였다. Fossil PC에서는 bulk 시편과 weldline 시편에서 온도가 증가할수록 강성(stiffness)이 증가하였으나 bio-based

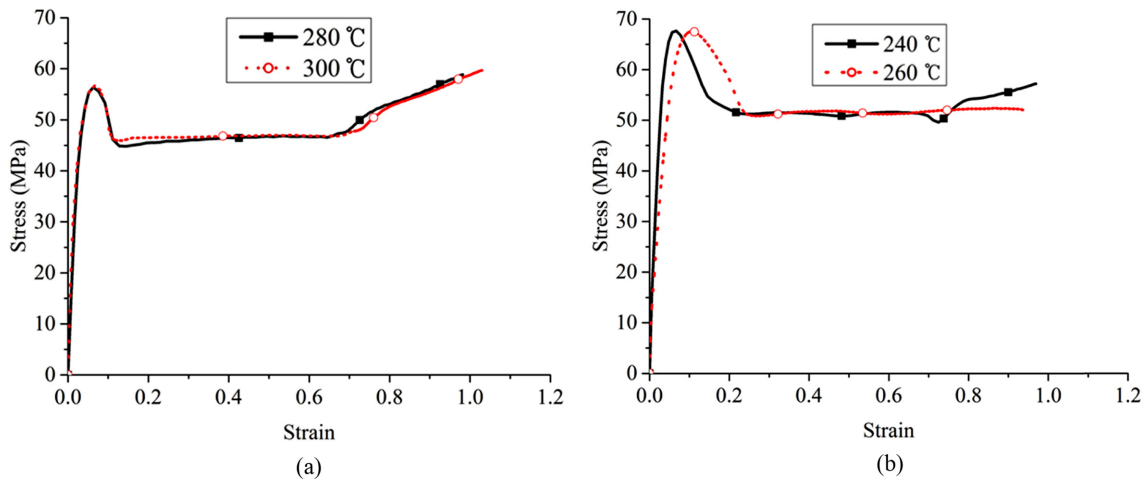


Figure 5. Tensile behaviors of (a) fossil PC; (b) bio-based PC for bulk specimen.

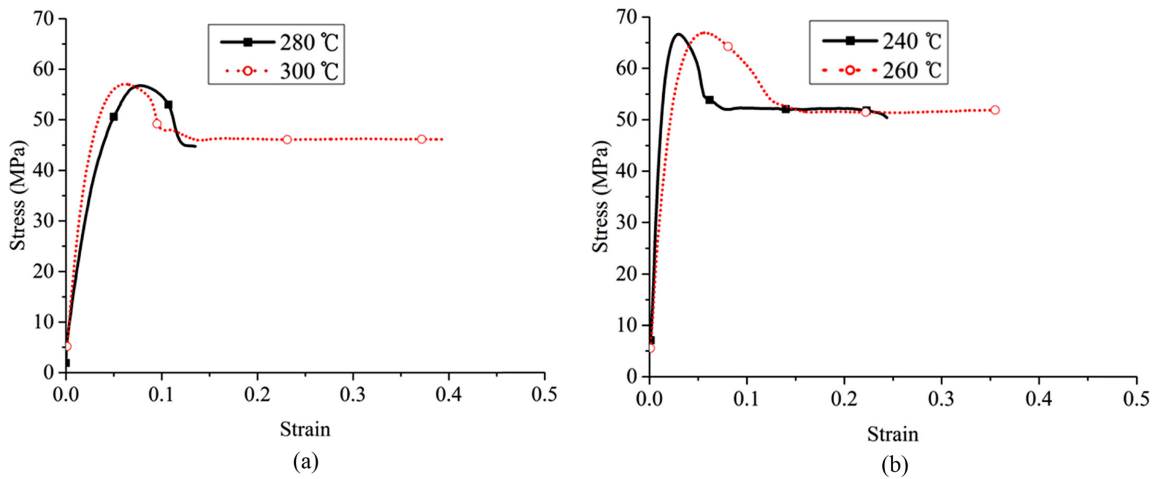


Figure 6. Tensile behaviors of (a) fossil PC; (b) bio-based PC for weldline specimen.

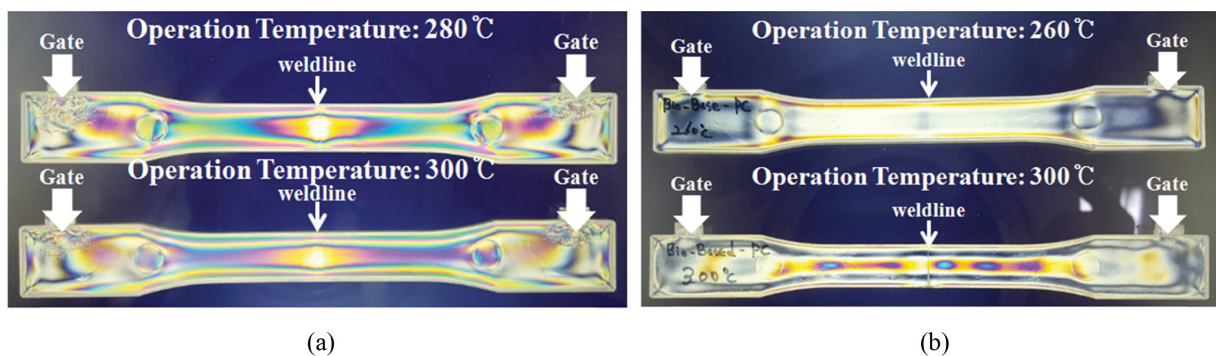


Figure 7. Birefringence patterns of (a) fossil PC; (b) bio-based PC for weldline specimen according to injection temperature.

PC에서는 온도가 높을수록 강성이 감소하였다. Bio-based PC의 경우 오히려 높은 온도에서 weldline 강도가 저하되었는데 이는 bio-based PC가 온도에 대한 저항성이 낮기 때문으로 판단된다. Figure 7(a)에는 fossil PC의 weldline 시편의 복

굴절이 나타나 있다. Weldline에서 복굴절 패턴의 불연속성이 관찰되고 있다. 이는 결국 weldline 강도가 bulk 강도에 비해 낮을 수 있음을 반증하고 있다. Figure 7(b)는 bio-based PC에서 물성이 가장 좋게 나타난 260 °C의 weldline 시편과

Table 3. Tensile Strength and Elongation at Break for Bulk Specimen Prepared by Injection Molding

(Average/Standard deviation)

Material	Molding temperature (°C)	Tensile stress (MPa)	Elongation at break (%)
Fossil PC	280	56.93/1.00	103.53/7.74
	300	56.94/0.74	104.27/3.08
Bio-based PC	240	67.93/0.46	96.49/4.02
	260	67.39/0.35	92.45/5.83

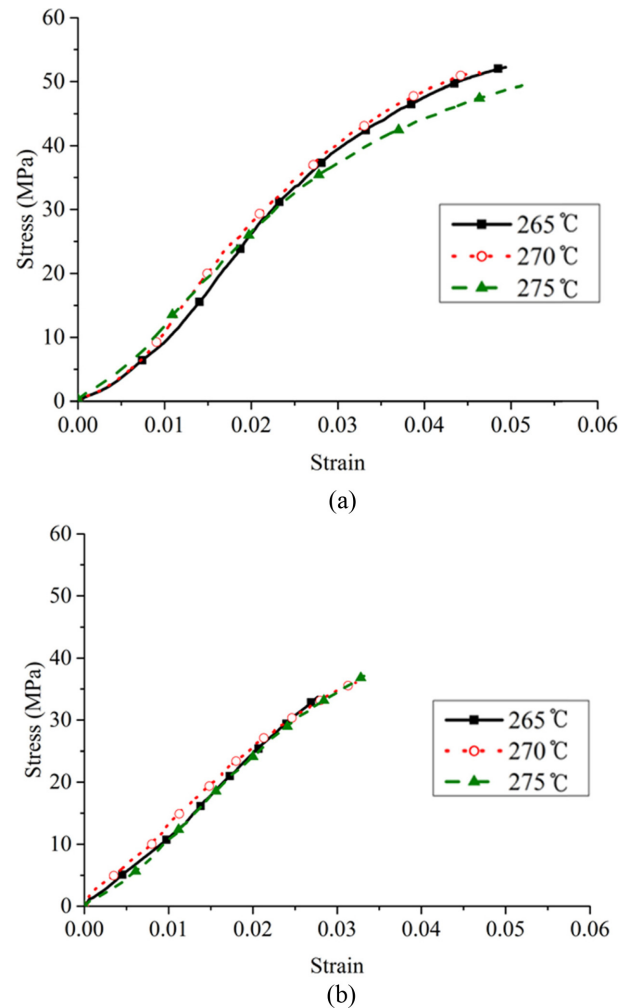
Table 4. Tensile Strength and Elongation at Break for Weldline Specimen Prepared by Injection Molding

(Average/Standard deviation)

Material	Molding temperature (°C)	Tensile stress (MPa)	Elongation at break (%)
Fossil PC	280	56.68/0.81	13.47/2.49
	300	56.90/0.67	39.49/2.49
Bio-based PC	240	66.70/0.36	24.30/1.09
	260	66.88/0.27	35.44/5.60

물성이 가장 나쁘게 나타난 300 °C의 weldline 시편의 복굴절이 나타나 있다. 300 °C에서 사출한 bio-based PC의 경우 복굴절이 균일하게 나타나지 않은 것으로 보아 물리적 상태가 균일하지 않을 것으로 예측되며 따라서 weldline 강도가 260 °C의 시편에 비해 낮게 나타난 것으로 사료된다. 각 소재별 bulk 및 weldline 강도와 파단 시 변형률을 Table 3과 Table 4에 각각 나타내었다.

3D 적층물의 적층강도. FDM 방식 3D 프린팅의 조형물은 재료의 접착 강도가 bulk 소재의 강도보다 낮으며 적층방향과 공정조건에 따라서 다르게 나타난다. 따라서 적층방향(인장 방향으로 적층, Figure 1(a))과 적층 직각방향(인장방향과 직각으로 적층, Figure 1(b))의 인장강도를 비교하기 위해 fossil PC와 bio-based PC를 적층방향과 공정온도를 달리 하여 시편을 제작하였다. 적층방향에서 265, 270 그리고 275 °C로 적층한 fossil PC 인장시편의 응력-변형률 곡선이 Figure 8(a)에 나타나 있다. 적층방향의 경우 49.22~52.26 MPa의 적층강도를 보이며 평균 적층강도는 50.95 MPa이다. 그리고 적층 직각방향으로 적층한 인장시편의 응력-변형률 곡선은 Figure 8(b)에 나타나 있으며 32.88~34.31 MPa의 적층강도를 보이고 있다. 적층 직각방향의 평균 적층강도는 33.46 MPa이다. 적층방향 대비 적층 직각방향의 적층강도를 나타내는 적층강도 비율은 69.97%를 보이고 있다. 또한 bulk 강도 대비 적층방향의 강도 비율은 89.48%를 보였으며 bulk 소재 대비 적층 직각방향의 강도 비율은 62.61%를 보였다. Weldline 강도 대비 적층방향과 적층 직각방향 강도는 각각 89.72, 62.78%를 보였다. Figure 9는 270 °C에서 적층한 fossil PC의 인장실험

**Figure 8.** Tensile behaviors of fossil PC for FDM type 3D printing-manufactured specimen: (a) deposition direction; (b) orthogonal to deposition direction.

후 파단사진을 보여주고 있다.

215, 245 그리고 275 °C에서 적층방향과 적층 직각방향으로 적층한 bio-based PC 인장시편의 응력-변형률 곡선이 Figure 10(a)와 Figure 10(b)에 각각 나타나 있다. Bio-based PC의 경우 적층방향에서 33.73~37.66 MPa의 적층강도를 보였으며 평균 적층강도는 33.46 MPa이고 적층 직각방향은 9.41~21.29 MPa의 적층강도를 보였으며 평균 적층강도는 17.24 MPa이다. Bio-based PC의 적층강도 비율은 51.52%로 나타났다. Bulk강도 대비 적층방향의 강도와 적층 직각방향의 강도 비율은 각각 49.45, 25.48%를 보이고 있으며 weldline 강도 대비 적층방향의 강도와 적층 직각방향의 강도 비율은 각각 50.10, 25.81%를 나타냈다. 적층방향의 강도에 비해 적층 직각방향의 강도는 매우 취약하게 나타났다. Figure 11은 275 °C에서 적층한 bio-based PC의 파단시편을 보여주고 있다. 두 재료 모두 파단 시 연신율은 온도가 높은 경우에 높

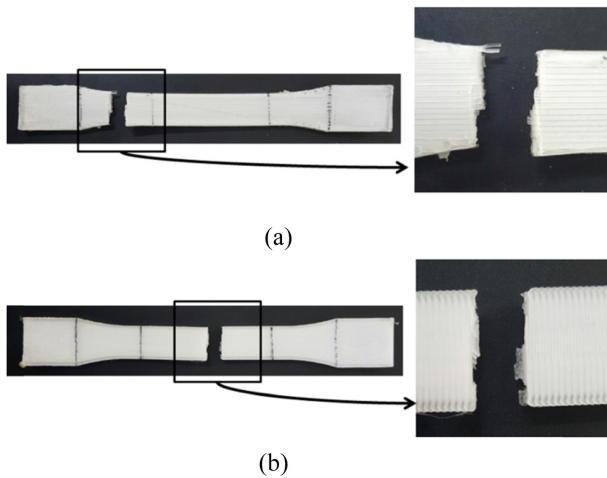


Figure 9. Photo of fractured specimen after tensile test for FDM type 3D printing-manufactured specimen using fossil PC: (a) deposition direction; (b) orthogonal to deposition direction.

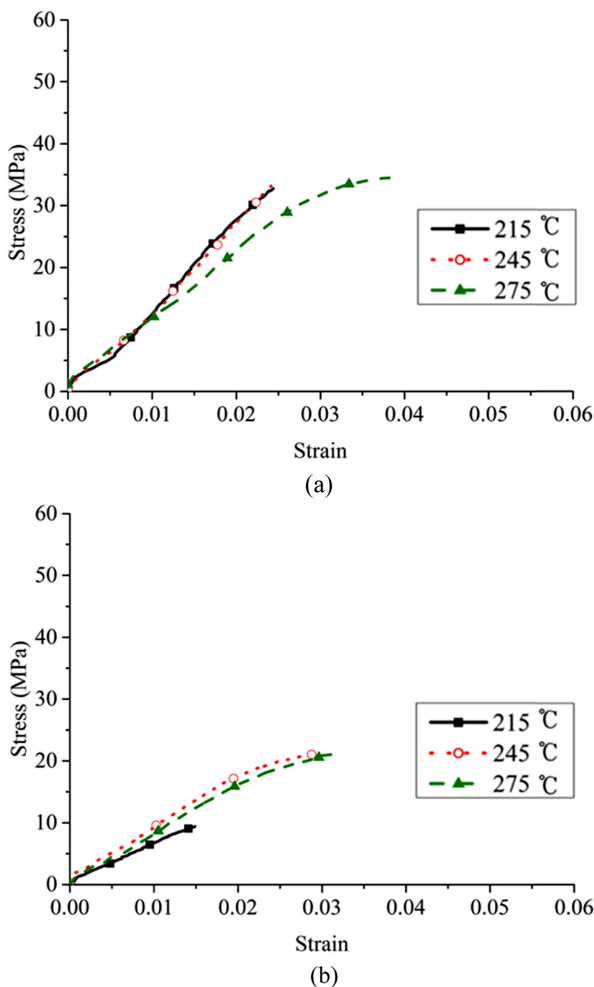


Figure 10. Tensile behaviors of bio-based PC for FDM type 3D printing-manufactured specimen: (a) deposition direction; (b) orthogonal to deposition direction.

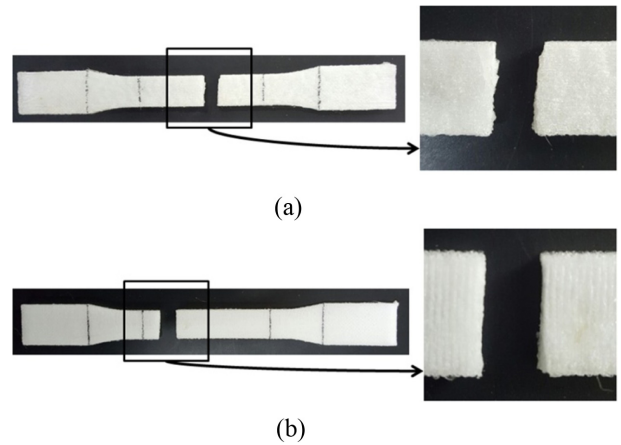


Figure 11. Photos of fractured specimen after tensile test for FDM type 3D printing-manufactured specimen using bio-based PC: (a) deposition direction; (b) orthogonal to deposition direction.

게 나타났는데 이는 적층 시 온도가 높을수록 각 층간 접착이 유리하여 연신율이 높게 나온 것으로 판단된다. 높은 공정 온도일수록 두 road가 접합되는 neck radius가 증가되어 접착 면적이 넓어질 뿐만 아니라 diffusion과 healing이 좋아지고, 고분자 사슬의 entanglement가 증가되기 때문이다.^{26,33-35} 또한 적층 직각방향으로 적층한 경우는 두 소재 모두 온도가 증가함에 따라 응력 및 변형률이 적층방향의 시편보다 더 크게 증가하였다. 이는 앞서 서술한 적층방향에서 높은 공정 온도로 적층한 인장시편의 연신율이 높은 이유와 같다. Fossil PC와 bio-based PC에서 온도가 높을수록 적층방향으로 강성이 감소하였다. 그러나 적층 직각방향으로의 강성은 온도에 따라 큰 영향이 없어 보인다. 적층강도 비율 및 bulk 소재 대비 강도를 통하여 fossil PC가 bio-based PC보다 접착이 유리한 소재임을 파악하였다. 소재별 최저 공정 온도 설정 시 3D 프린터에서 재료의 압출이 가능한 최소 온도로 설정하였다는 점과 적층방향에서 두 소재 모두 모든 온도에서 유사한 크기의 인장강도를 보였다는 점을 통하여 FDM 방식 3D 프린팅에서 bio-based PC는 fossil PC보다 processing window가 넓은 것을 확인할 수 있었다. 그리고 bio-based PC의 3D 프린팅 적용 시 매우 다양한 공정 온도에서 압출이 가능함을 실험을 통해 증명하였다. Table 5와 Table 6에는 각 소재별 적층방향에 따른 인장강도와 파단 시 변형률을 나타내었다.

Bulk 강도, Weldline 강도 그리고 적층강도 비교. Fossil PC와 bio-based PC 소재의 bulk 강도, weldline 강도 그리고 FDM 방식 3D 프린팅으로 제조된 시편의 적층강도 비교 그래프를 Figure 12(a)와 Figure 12(b)에 각각 나타내었다. Fossil PC의 경우 bulk 시편의 평균 인장강도는 56.94 MPa이고 weldline 시편의 평균 인장강도는 56.79 MPa이다. Bulk 시편 대비 weldline 시편의 인장강도는 99.74%로 나타났다. 또한 FDM 방식 3D 프린팅 시편의 적층방향의 평균 인장강도

Table 5. Tensile Strength and Elongation at Break for the Specimen of Deposition Direction in FDM Type 3D Printing
(Average/Standard deviation)

Material	Nozzle temperature (°C)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
Fossil PC	265	52.26/1.60	4.96/0.41
	270	51.38/3.24	4.76/0.89
	275	49.22/2.29	5.13/0.78
Bio-based PC	215	32.88/4.80	2.48/1.03
	245	33.20/2.56	2.36/0.35
	275	34.31/1.83	3.98/0.71

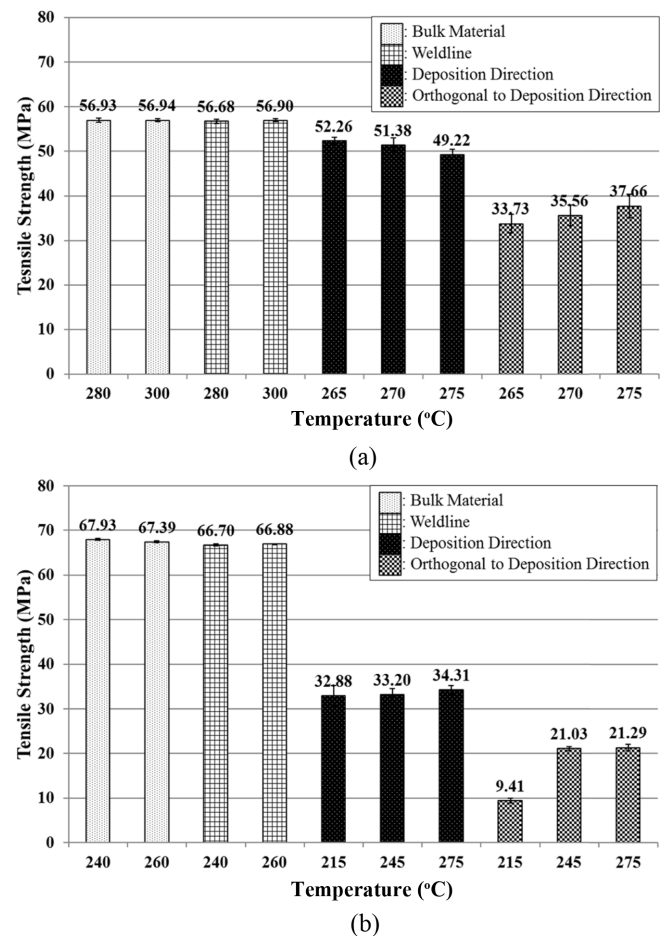
Table 6. Tensile Strength and Elongation at Break for the Specimen of Orthogonal to Deposition Direction in FDM Type 3D Printing
(Average/Standard deviation)

Material	Nozzle temperature (°C)	Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
Fossil PC	265	33.73/4.09	2.80/0.53
	270	35.56/4.51	3.22/0.67
	275	37.66/5.33	3.27/0.74
Bio-based PC	215	9.41/1.10	1.51/0.16
	245	21.03/0.81	2.83/0.21
	275	21.29/1.40	3.38/0.62

는 50.95 MPa, 적층 직각방향의 평균 인장강도는 35.65 MPa이며 적층방향에 따른 적층강도 비율 즉, 적층방향 강도 대비 적층 직각방향의 강도의 비는 69.97%를 보였다. 3D 프린팅에서 강도가 가장 낮은 적층 직각방향의 강도는 bulk 강도 대비 62.61%, weldline 강도 대비 62.78%를 보였다. Bio based PC의 경우 bulk 시편과 weldline 시편의 평균 인장강도는 각각 67.66과 66.79 MPa이며 bulk 시편 대비 weldline 시편의 인장강도는 98.71%로 나타났다. 또한 FDM 방식 3D 프린팅 시편에서 적층방향과 적층 직각방향의 평균 인장강도는 각각 33.46, 17.24 MPa이며 적층강도 비율은 51.52%로 나타났다. 3D 프린팅에서 강도가 가장 낮은 적층 직각방향의 강도는 bulk 강도 대비 25.48%, weldline 강도 대비 25.81%를 보였다. 소재의 접착 특성이 반영될 수 있는 weldline 시편과 적층 직각방향의 시편은 전체적으로 공정온도가 증가함에 따라 인장강도가 증가하였다. 특히 3D 프린팅에서 적층물의 층간 접착력을 높이기 위해서는 높은 온도를 유지해야 한다.

결론

Fossil PC와 bio-based PC를 사출성형하여 제작한 시편으로 bulk 강도와 weldline 강도를 측정하였고, 이 두 소재를

**Figure 12.** Comparison of tensile strength of bulk material, weldline strength and deposition strength: (a) fossil PC; (b) bio-based PC.

FDM 방식의 3D 프린팅에 적용하여 공정온도에 따라 적층방향과 적층 직각방향에 대하여 적층강도를 비교 분석하였다. Bulk 소재 대비 weldline 강도 비율은 fossil PC와 bio-based PC에서 각각 99.74, 98.71%를 보였다. 그리고 weldline 강도 대비 3D 프린팅의 적층방향의 강도는 fossil PC와 bio-based PC에서 각각 89.72, 50.10%를 보였으며 적층 직각방향의 강도는 각각 62.61, 25.81%를 보였다. 사출성형으로 제작된 bulk 및 weldline 강도는 fossil PC보다 bio-based PC가 높았으나 3D 프린팅에서 보이는 적층강도는 fossil PC가 높았다. Bio-based PC를 FDM 방식 3D 프린팅에 응용하기 위해서는 적층강도 향상의 연구가 필요하다.

Bulk 소재의 인장강도 대비 weldline 강도 비율은 적층강도 비율이 낼 수 있는 최대치라고 판단할 수 있으며 FDM 방식 3D 프린팅의 조형물이 구현할 수 있는 적층강도의 최대치는 weldline 강도라 판단된다. 사출성형의 weldline은 높은 압력과 온도가 동시에 작용되지만 3D 프린팅에서는 온도만이 작용되기 때문에 훨씬 작은 적층강도를 보이고 있다. 3D

프린팅 조형물의 적층강도는 온도에 따라 크게 영향을 받고 있으며 3D 프린팅 응용의 확대를 위해서는 향후 다양한 노즐의 온도와 챔버의 온도에 따른 적층강도 향상의 연구가 필요하다.

감사의 글: 본 논문은 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다(10051680, 3D 프린팅용 친환경 고강도 고분자 소재 개발).

참 고 문 헌

1. J. G. Jegal, *The Monthly Packaging World*, **178**, 48 (2008).
2. M. K. Kim, *The Monthly Packaging World*, **226**, 45 (2012).
3. J. G. Han, *The Monthly Packaging World*, **217**, 57 (2011).
4. H. Storz and K.-D. Vorlop, *Appl. Agric. Forestry Res.*, **63**, 321 (2013).
5. S. Khoramnejadian, J. J. Zavareh, and S. Khoramnejadian, *Procedia Eng.*, **21**, 489 (2011).
6. T. Setoyama, *Catal. Surv. Asia*, **18**, 183 (2014).
7. J. J. Gallagher, M. A. Hillmyer, and T. M. Reineke, *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **4**, 3379 (2016).
8. S. H. Park, *International Journal of Advanced Culture Technology*, **2**, 30 (2014).
9. T. Rayna and L. Striukova, *Technol. Forecast. Soc. Change*, **102**, 214 (2016).
10. S.-H. Park, J. H. Park, H. J. Lee, and N. K. Lee, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, **31**, 1067 (2014).
11. S. H. Lee, N. I. Kim, and J. H. Lee, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, **28**, 42 (2015).
12. Q. Gu, J. Hao, Y. Lu, L. Wang, G. G. Wallance, and Q. Zhou, *Science China*, **58**, 411 (2015).
13. J. H. Lee, S. A. Park, and W. D. Kim, *Trans. Korean. Soc. Mech. Eng. C*, **1**, 21 (2013).
14. H.-S. Kim and I.-A. Kang, *Journal of Korea Fashion and Costume Design Association*, **17**, 125 (2015).
15. S. H. Lee, *J. Korean Acad. Pediatr. Dent.*, **43**, 93 (2016).
16. ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (2013).
17. W. H. Kim, Master's Thesis, University of Korea Polytechnic, Gyeonggi (2015).
18. G. D. Kim and J. Y. Kim, *Transact. Korean Soc. Machine Tool Eng.*, **15**, 56 (2006).
19. A. K. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, *Mater. Des.*, **31**, 287 (2010).
20. S. H. Masood, K. Mau, and W. Q. Song, *Mater. Sci. Forum*, **654**, 2556 (2010).
21. A. G. Leacock, G. Cowan, M. Cosby, G. Volk, D. McCracken, and D. Brown, *Key Eng. Mater.*, **639**, 325 (2015).
22. D. K. Ahn, J.-H. Kweon, S. M. Kwon, J. I. Song, and S. H. Lee, *J. Mater. Process. Technol.*, **209**, 5593 (2009).
23. P. Anhua, *Adv. Mater. Res.*, **538**, 1564 (2012).
24. T.-M. Wang, J.-T. Xi, and Y. Jin, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, **33**, 1087 (2007).
25. H. S. Ramanath, C. K. Chua, K. F. Leong, and K. D. Shah, *J. Mater. Sci. -Mater. Med.*, **19**, 2541 (2008).
26. S. J. Park, J. H. Park, K. H. Lee, and M.-Y. Lyu, *Polym. Korea*, **40**, 1 (2016).
27. S.-H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, *Rapid Prototyping J.*, **8**, 248 (2002).
28. J. H. Mo, H. S. Hong, and M.-Y. Lyu, *Trans. Mater. Process*, **10**, 211 (2003).
29. R. Selden, *Polym. Eng. Sci.*, **37**, 205 (1997).
30. C.-H. Wu and W.-J. Liang, *Polym. Eng. Sci.*, **45**, 1021 (2005).
31. L.-S. Turg and H. Kharbas, *Polym. Eng. Sci.*, **43**, 157 (2003).
32. S. C. Lee, H. S. Kim, I. K. Hong, and Y. S. Yoon, *The Korean J. Rheol.*, **9**, 133 (1997).
33. Q. Sun, G. M. Rizvi, C.T. Bellehumeur, and P. Gu, *Rapid Prototyping J.*, **14**, 72 (2008).
34. B. V. Reddy, N. V. Reddy, and A. Ghosh, *Virtual Phys. Prototyp.*, **2**, 51 (2007).
35. C. M. Haid, Doctoral Dissertation, Massachusetts institute of Technology (2014).