

압출방식 3D 프린팅 적층물의 단면 형태와 적층강도와의 관계

윤해성 · 류민영[†] · 진선철*

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과, *삼양사 화학연구소
(2018년 2월 3일 접수, 2018년 3월 24일 수정, 2018년 3월 25일 채택)

Relationship between Deposition Strength and Cross-section Morphology of a Material Extrusion-type 3D Printing Manufactured Article

Hye Sung Yoon, Min-Young Lyu[†], and Sun Chul Jin*

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

*Samyang Chemical R&D Center, 730 Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34055, Korea

(Received February 3, 2018; Revised March 24, 2018; Accepted March 25, 2018)

초록: 3D 프린팅 중 재료압출방식(material extrusion type)은 사용이 간편하고 다양한 소재가 가능하며 경제적이어서 이의 활용도가 가장 높다. 본 연구에서는 재료압출방식 3D 프린팅에서 적층물 단면의 모폴로지를 관찰하고 적층강도와의 관계를 분석하였다. 사용한 재료는 ABS, PLA, 그리고 PC이며 적층온도를 달리하여 적층물 단면의 형태를 광학현미경과 주사전자현미경으로 관찰하였다. 적층물의 단면은 적층 로드와 접촉된 세로방향과 가로방향의 네크 길이, 그리고 적층로드가 채워지지 않은 에어 홀로 구성되어 있다. 적층온도와 재료의 물성에 따라 네크 길이와 에어 홀의 밀도가 다르게 관찰되었다. 에어 홀의 밀도는 PLA에서 가장 작았고, ABS에서 가장 컸다. 사용한 모든 소재에서 네크 길이와 에어 홀 밀도는 적층온도에 직접적으로 관련이 있었고, 온도가 높을수록 네크 길이가 길고 에어 홀의 밀도가 줄어들었다. 네크 길이가 길수록 에어 홀의 밀도가 작을수록 적층강도는 비례적으로 증가하였다.

Abstract: Material extrusion (ME)-type printing is the most popular among the 3D printing processes because it is easy to operate, economical, and can be performed for a variety of materials. In this study, the cross-section morphology of a ME-type 3D printing manufactured specimen was observed, and the relationship between cross-section morphology and deposition strength was analyzed. The materials used in this study were acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS), polylactic acid (PLA), and polycarbonate (PC), and the cross-section morphology for various nozzle temperatures was observed using an optical microscope and a scanning electron microscope. The cross-section morphology of a 3D printing manufactured specimen consisted of vertical and horizontal neck lengths, which were the interfaces between roads and air holes, where the roads were unoccupied regions. It was observed that the neck length and air hole density were dependent on the nozzle temperature and material property. The lowest and the highest air hole density were observed in the PLA and ABS specimen, respectively. Neck length and air hole density were directly related to nozzle temperature. A higher nozzle temperature provided a longer neck length and a lower air hole density. The deposition strength increased as the neck length increased, and the air hole density decreased.

Keywords: material extrusion-type, 3D printing, air hole density, neck length, deposition strength.

서 론

흔히 3D 프린팅이라고 불리는 적층 성형(additive manufacturing, AM)은 기존의 고전적인 절삭 가공이나 캐스팅, 플라스틱 몰딩에서는 구현할 수 없는 복잡한 형상을 하나의 공

정으로 쉽게 제작할 수 있다는 장점으로 제조산업에 큰 혁신을 불러 일으키고 있다.¹⁻³ 특히 유일한 형상과 하나의 제품만이 요구되는 분야에서는 경제적으로도 큰 장점을 가지고 있다. 이러한 장점들을 바탕으로 3D 프린팅은 단순히 제품의 형상을 확인하는 시제품을 제작하는 용도를 넘어서 의료, 우주 항공, 자동차 산업, 건축, 섬유 등 매우 다양한 분야에서 활용되고 있다.^{4,8} 그러나 제품 크기의 제한, 소재의 제한, 긴 적층시간, 그리고 표면 및 치수의 낮은 정밀도는 3D 프린팅의 큰 단점으로 지적되고 있다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
mylyu@seoultech.ac.kr, ORCID[®] 0000-0001-7554-2072
©2018 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

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.⁹ 이 중 material extrusion(ME)에 해당하는 fused deposition modeling(FDM) 방식은 열 가소성 수지를 필라멘트 형태로 제조하여 3D 프린터의 배럴에 주입한다. 주입된 필라멘트는 배럴과 노즐을 거치면서 용융되고 노즐을 통해 압출되면서 로드(road)가 한층 씩 쌓여 제품이 형성된다. 이 방식은 조작성이 간편하고 다양한 재료의 적용이 가능하며 경제적이어서 가장 대중적으로 활용되고 있다. 재료압출 방식 3D 프린팅의 연구 분야는 적층물의 적층강도, 적층물의 변형 및 휨, 치수정밀도, 표면조도 등 적층물의 품질에 관한 연구가 있다.¹⁰⁻¹⁷ 그리고 용융 필라멘트의 압출 현상, 히팅부 및 적층물의 온도 분석 등의 공정연구도 있다.¹⁸⁻²²

재료압출 방식 3D 프린팅의 조형물은 로드(road)가 한 층씩 적층해나가는 비연속적인 공정으로 사출성형 등으로 제작되는 벌크(bulk) 제품에 대비하여 낮은 강도를 보인다. 적층물의 강도에 영향을 주는 공정요소는 적층로드의 온도(노즐의 온도), 적층속도(노즐의 이동속도), 노즐의 지름, 로드 갭(road gap), 챔버온도, 베드온도 등 다양하다.²³⁻²⁵ 이러한 공정 조건에 따라 적층물 단면의 모폴로지는 다르게 나타나며 이에 따라 적층 강도가 다르게 나타난다. 고분자의 컴파운드나 블렌드에서 단면의 형태가 재료의 물성에 지대한 영향을 주는 것은 이미 다 알려져 있다.²⁶⁻³⁰ 3D 프린팅 적층물에서도 공정조건에 따른 단면의 형태를 파악하고 단면형태와 적층물의 물성과의 연계성을 찾는 것이 필요하다. Figure 1은 재료압출 방식 3D 프린팅에서 적층물의 단면을 도식적으로 보여주고

있다. 원형에 가까운 로드가 적층되면서 재료가 채워지지 않고 공간으로 남아있는 에어 홀(air hole)이 존재한다. 그리고 로드가 서로 붙어있는 네크(neck)가 존재한다. 따라서 압출방식 3D 프린팅 적층물의 형태는 에어 홀과 가로와 세로의 네크 길이, 그리고 로드의 단면 모양으로 이루어져 있다. 재료압출방식 3D 프린팅에서 공정조건에 따른 적층강도에 대한 연구는 많이 존재한다.^{10-17,25,31,32} 그러나 공정조건에 따른 적층물의 형태변화와 이에 따른 강도와의 연계성에 대한 연구는 미진한 실정이다.

본 연구에서는 압출방식 3D 프린팅에서 적층공정에 따른 적층물의 단면형태를 관찰하고 단면형태가 적층물의 강도에 미치는 영향을 분석하였다. 본 연구에서 사용한 소재는 ABS (acrylonitrile butadiene styrene), PLA(polylactic acid), 그리고 PC(polycarbonate) 등 세가지 소재이다. 이전의 연구에서 압출방식 3D 프린팅 적층에서 적층물의 강도에 가장 크게 영향을 미치는 것은 적층온도로 나타났기 때문에 적층온도를 달리하여 적층단면을 관찰하였다.^{25,32} 각 소재에 따라 적층온도를 달리 하고 적층방향에 따라 인장강도를 측정하고 단면을 관찰하였다. 단면을 관찰하기 위해서 먼저 적층시편의 단면을 생성하는 방법을 연구하였다. 이를 이용하여 적층온도에 따른 적층물의 단면 형태의 변화를 파악하고 적층강도와의 연계성을 분석하였다.

실 험

실험재료 및 시편. 본 연구에서 사용한 재료는 재료압출 방식 3D 프린팅에 사용하도록 제작된 필라멘트형태로 ABS (acrylonitrile butadiene styrene), PLA(polylactic acid), 그리고 PC(polycarbonate)이다. PC는 bio-based PC(Durabio, supplied by Mitsubishi Chemical, Japan)와 Fossil-based PC(Trirex 3027, Supplied by Samyang, S. Korea)가 블렌드된 소재로 사용된 첨가제에 따라 세 가지 즉, PC-24, PC-26, PC-27를 사용하였다. ABS와 PLA는 3D 프린팅용으로 필라멘트 형태로 제작된 소재이고, PC는 지름 1.75 mm의 필라멘트로 제작하여 재료압출방식 3D 프린팅에 적용하였다. 사용된 소재의 정보가 Table 1에 나타나있다.

재료압출방식 3D 프린팅으로 적층하여 인장시험을 수행하

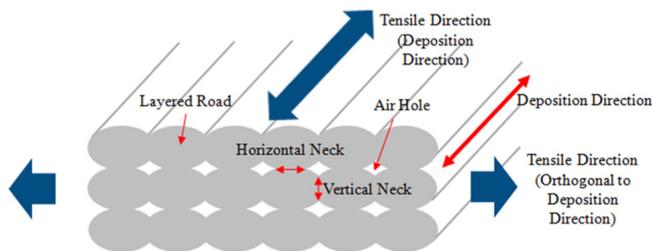


Figure 1. Schematic drawing of the cross-section of a ME-type 3D printing manufactured article.

Table 1. Information about the Material Used in this Study

Material	Grade	Supplier	Glass transition temperature (°C)	Composition
ABS	General ABS POLYLAC PA-757	CHIMEI (China)	103.58	ABS
PLA	Ingeo™ biopolymer 4032D	Natural Works (USA)	64.61	PLA
PC-24	3DP-EM3A24R15BK	Samyang Co. (S. Korea)	149.60	Fossil-PC+Bio-PC
PC-26	3DP-EM3A26R15BK	Samyang Co. (S. Korea)	145.95	Fossil-PC+Bio-PC
PC-27	3DP-EM3A27R15BK	Samyang Co. (S. Korea)	120.03	Fossil-PC+Bio-PC

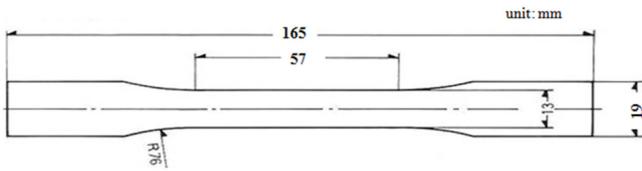


Figure 2. Dimension of the tensile specimen used in this study (ASTM D638 Type I).

고 적층단면을 관찰하기 위한 실험시편은 인장시편으로 규격 ASTM D638 Type 1을 사용하였으며 Figure 2와 같다.

실험장비. 3D 프린팅 적층강도 시편 제작을 위해 사용한 재료압출방식의 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. 3D 프린터의 운전조건이 Table 2에 나타나있다. 그리고 Table 3에 각 소재에 따른 3D 프린터의 노즐 및 베드의 설정온도를 나타내었다.

인장시험을 위한 인장시험기는 Instruments사(United Kingdom)의 EZ20을 사용하였으며, 인장속도를 20 mm/min으로 설정하였다.

Table 2. Operational Condition of ME-type 3D Printing

Item	Value
Chamber temperature	25 °C (Atmosphere)
Bed temperature	90~120 °C
Nozzle temperature	200~275 °C
Nozzle diameter	0.4 mm
Nozzle speed	80 mm/s
Layer height	0.2 mm

Table 3. Temperature Setting for ME-type 3D Printing

Material	Nozzle temperature (°C)	Bed temperature (°C)
ABS	210, 230, 250	120
PLA	200, 220, 240	90
PC-24	255, 265, 275	120
PC-26	255, 265, 275	120
PC-27	245, 260, 275	120

단면생성 및 관찰. 재료압출방식 3D 프린팅 적층물의 단면을 관찰하기 위해서는 단면을 생성해야 한다. 필라멘트를 적층하여 시편을 제작하였기 때문에 단면을 평탄하게 절단하

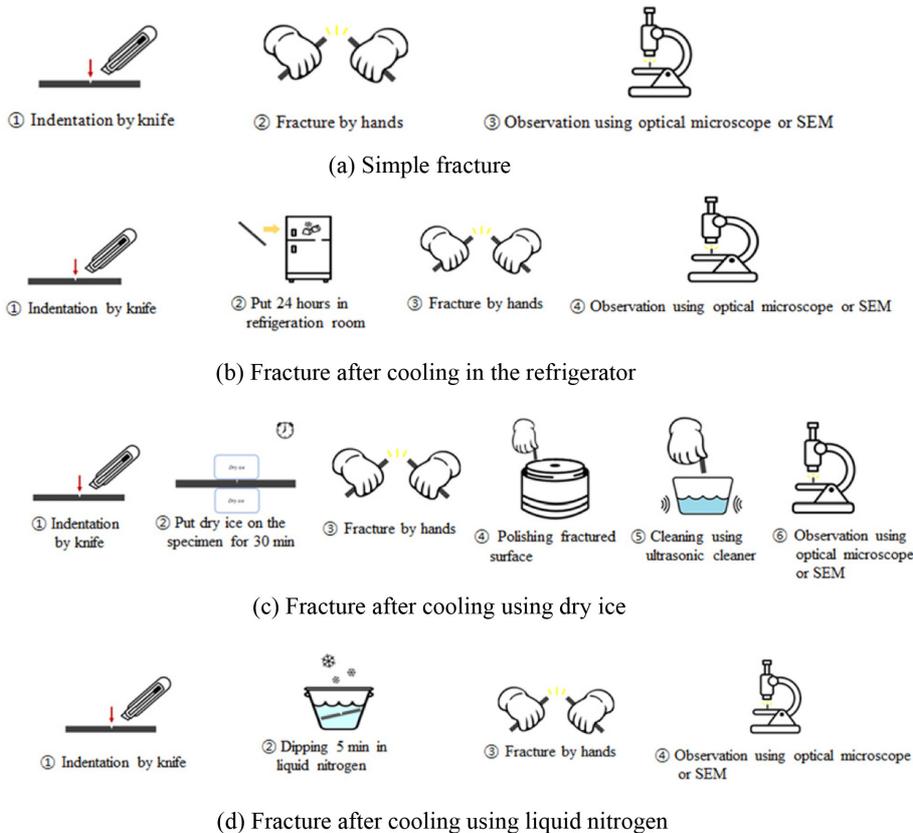


Figure 3. Various methods tried in this study for the fracturing of the specimen fabricated by ME-type 3D printing.

기는 쉽지 않았다. 따라서 본 연구에서는 적층물의 단면을 생성하기 위해 여러 가지 방법을 시도하였다. 본 연구에서 시도한 방법이 Figure 3에 도식적으로 나타나 있다.

첫 번째 방법은 단순파괴(simple fracture) 방법이다. 칼로 시편 표면을 얇게 선을 그은 후 손으로 절단하는 방법이다. 두 번째 방법은 칼로 시편 표면을 얇게 선을 그은 후 시편을 냉장고의 냉동실에 24시간 동안 냉동시킨 후에 절단하는 방법이다. 세 번째 방법은 칼로 시편 표면을 얇게 선을 그은 후 시편 위에 드라이 아이스(dry ice)를 30분 동안 올려놓은 후 절단한다. 그리고 절단 표면을 평탄하게 하기 위해 연마한 후 초음파 용액 속에서 세척하는 방법이다. 네 번째 방법은 칼로 시편 표면을 얇게 선을 그은 후 액화질소(liquid nitrogen) 속에 5분 동안 담근 후에 절단하는 방법이다. 위와 같이 네 가지 방법으로 절단된 시편은 광학현미경(optical microscope)과 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscope)으로 관찰하였다.

광학현미경은 Motic(China)사의 BA310Met를 사용하였고, SEM은 SEROM Technologies사(S. Korea)의 AIS 1800C를 사용하였다. 광학현미경이나 SEM으로 관찰된 단면 사진은 이미지 프로세스 프로그램인 Mex(2Xware사, S. Korea)를 통해 자세히 분석하였다.

결과 및 토론

단면생성 방법에 따른 단면 관찰. Figure 3의 네 가지 방법으로 각 소재별로 시편의 단면을 관찰하였다. Figure 4는 절단된 ABS 시편을 보여주고 있다. ABS 소재는 액화질소를 사용하지 않더라도 단면을 얻을 수 있어 이 방법은 생략하였다.

Figure 5는 각 절단 방법에 따른 단면사진으로 광학현미경으로 관찰된 사진이다. 적층온도에 따라 단면의 형태가 다소 차이가 있으며 단순절단 방법으로 생성된 시편에서 단면의 형태를 잘 보여주고 있다. 따라서 ABS 소재는 단순절단 방법으로 시편의 단면을 생성하여 관찰하였다.

Figure 6은 절단된 PLA 시편을 보여주고 있다. ABS 소재와 마찬가지로 액화질소를 사용하지 않더라도 단면을 얻을 수 있어 이 방법은 생략하였다.

Figure 7은 각 절단 방법에 따른 단면사진으로 광학현미경



(a) Simple fracture (b) Fracture after cooling in the refrigerator (c) Fracture after cooling using dry ice

Figure 4. Fractured ABS specimen fabricated by ME-type 3D printing at a nozzle temperature of 250 °C.

으로 관찰한 사진이다. 적층온도가 낮을 때 단면에서 에어 홀이 잘 나타남을 알 수 있고 적층온도가 높으면 단면에서 에어 홀이 작아짐을 알 수 있다. 세 가지 절단 방법 중 단순절

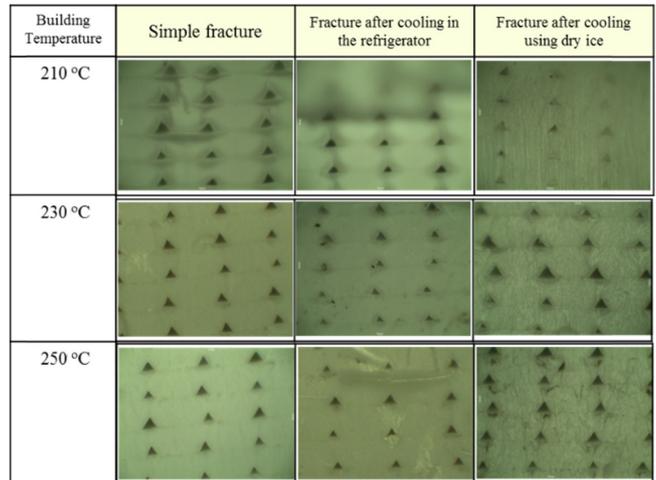


Figure 5. Optical micrograph of the fractured surface of the ABS specimen fabricated by ME-type 3D printing at various nozzle temperatures (×100).



(a) Simple fracture (b) Fracture after cooling in the refrigerator (c) Fracture after cooling using dry ice

Figure 6. Fractured PLA specimen fabricated by ME-type 3D printing at a nozzle temperature of 240 °C.

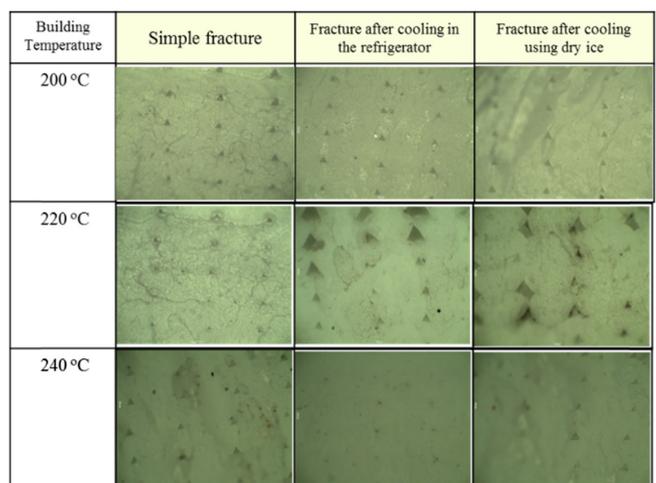


Figure 7. Optical micrograph of the fractured surface of the PLA specimen fabricated by ME-type 3D printing at various nozzle temperatures (×100).

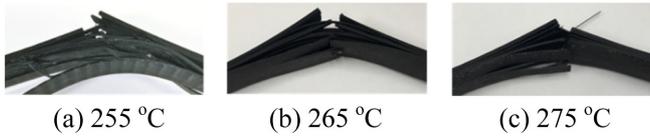


Figure 8. Fractured PC-24 specimen fabricated by ME-type 3D printing at various nozzle temperatures after cooling using liquid nitrogen.

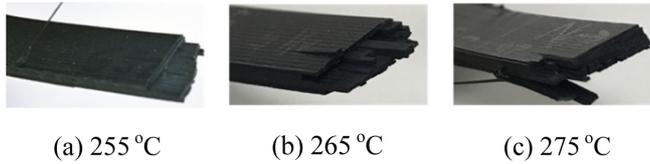
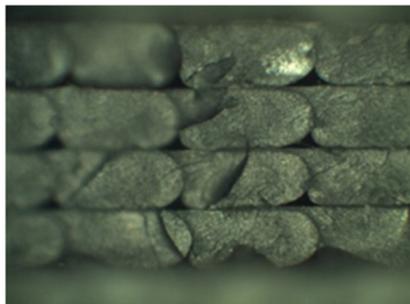


Figure 9. Fractured PC-26 specimen fabricated by ME-type 3D printing at various nozzle temperatures after cooling using liquid nitrogen.



(a) Fracture after cooling in the refrigerator



(b) Fracture after cooling using liquid nitrogen

Figure 10. Optical micrograph of the fractured surface of the PC-26 specimen fabricated by ME-type 3D printing at a nozzle temperature of 275 °C ($\times 100$).

단 방법으로 생성된 시편의 단면사진이 가장 명확하게 나타났다. 따라서 PLA소재는 단순절단 방법으로 단면을 관찰하였다.

PC-24 시편은 Figure 3에 나타난 네 가지 절단방법 중 어느 것도 평탄한 단면을 얻을 수 없었다. Figure 8은 액화질소를 이용하여 절단한 PC-24 시편을 보여주고 있다. 적층된 로

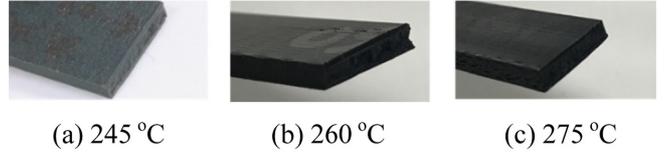


Figure 11. Fractured PC-27 specimen fabricated by ME-type 3D printing at various nozzle temperatures after cooling using liquid nitrogen.

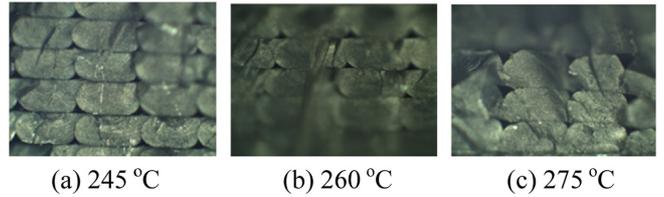


Figure 12. Optical micrograph of the fractured surface of the PC-27 specimen fabricated by ME-type 3D printing at various nozzle temperatures ($\times 100$).

드들의 경계면이 분리되면서 평탄한 단면을 얻을 수 없었다. 따라서 PC-24 소재는 단면을 촬영하여 관찰할 수 없었다.

PC-26은 시편을 냉장고의 냉동실에서 냉동 후, 그리고 시편을 액화질소에 담근 후 절단이 가능하였다. Figure 9는 액화질소에 담근 후 절단된 PC-26 시편을 보여주고 있다.

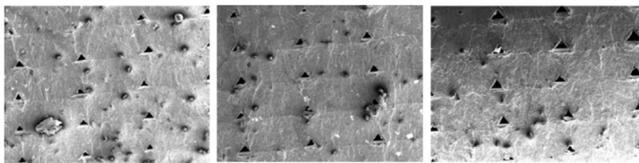
Figure 10은 절단된 PC-26시편의 단면을 광학현미경으로 관찰한 사진이다. 로드가 적층되면서 눌러서 납작한 단면모양으로 굳어진 것을 보여주고 있다. 냉동실 냉동과 액화질소로 냉동한 시편만이 절단되었으나 온도가 275 °C의 시편만이 관찰 가능한 단면을 얻을 수 있어서 PC-26은 연구하기에 적절치 않았다.

Figure 11은 액화질소에 담근 후 절단한 PC-27 시편을 보여주고 있다. PC-24와 PC-26과는 달리 세 가지 온도에서도 시편이 잘 절단되었다.

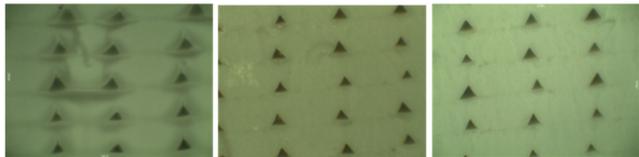
Figure 12는 절단된 시편을 광학현미경으로 관찰한 사진이다. 모든 적층온도에서 로드의 경계와 에어 홀이 잘 나타나 있다. 본 연구에서 PC 소재는 PC-24와 PC-26의 단면관찰이 어려워 PC-27만을 이용하여 관찰하기로 결정하였다. 적층시편의 단면생성은 시편을 액화질소에 담근 후 절단하여 단면을 관찰하였다.

ABS 소재의 적층단면 형태 및 적층강도. ABS 소재의 필라멘트를 이용하여 재료압출방식으로 적층한 시편의 단면을 관찰하였다. ABS 적층시편은 단순파단으로 절단하였으며 절단면을 SEM과 광학현미경을 통해 관찰하였다. Figure 13은 210, 230, 그리고 250 °C로 적층한 시편의 파단면 사진을 보여주고 있다.

SEM 사진을 보면 적층된 로드들 사이의 경계면이 나타나 있고 로드가 만나는 모서리에는 삼각형 모양의 에어 홀이 존



(a) SEM (×100) of the specimen fabricated at 210 °C, 230 °C, and 250 °C from left to right



(b) Optical micrograph (×100) of the specimen fabricated at 210 °C, 230 °C, and 250 °C from left to right

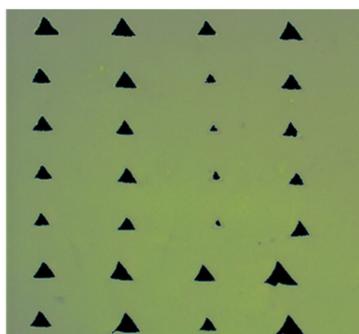
Figure 13. Comparison of the fractured surface of the ABS specimen fabricated by ME-type 3D printing.

재함을 보여주고 있다. 적층온도가 높을수록 로드들 사이의 경계면이 더 흐릿해지는 것을 볼 수 있다. 이는 적층온도가 높을수록 로드들간의 접촉이 잘되고 또한 확산(diffusion)이 잘 일어났음을 보여주고 있으며, 이에 따라 적층강도가 높아질 것으로 예측되었다. 광학현미경 사진에서는 로드간의 경계면이 SEM 사진보다는 선명하지 않지만 에어 홀의 모양은 잘 나타나 있다. SEM 사진의 경우 에어 홀이 없는 부분에서도 명암의 차이가 나서 에어 홀과 다소 구별이 되지 않는 곳 이 있다. 광학현미경으로 관찰한 사진에서 에어 홀을 좀더 명확히 구별하기 위해 이미지 프로세싱 프로그램을 이용하여 수정한 사진이 Figure 14에 나타나 있다.

광학 현미경 사진에서 명함의 차이를 더 확대하여 나타낸 것인데 에어 홀의 모양을 명확히 관찰할 수 있다. 에어 홀의

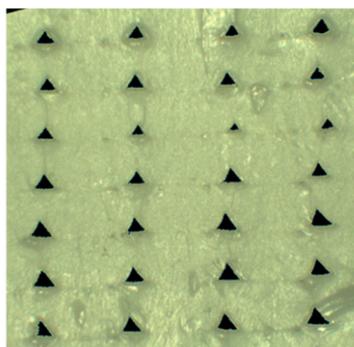
모양이 삼각형으로 나타나고 있는데 이는 로드의 아랫부분의 접촉길이는 짧고 윗부분의 접촉길이가 길어서 나타난 삼각형 모양이다. 노즐에서 용융된 소재가 로드 형태로 압출되고 이 로드가 옆으로 나란히 쌓이는데 로드 아랫부분은 이미 굳은 로드와 접촉되어 온도가 식어 있고 로드 윗부분은 온도가 아랫부분보다 높다. 그래서 로드 아랫부분은 노즐에서 나오는 로드의 형태가 그대로 굳어지고 로드 윗부분은 온도가 높은 상태에서 옆 로드와 접촉이 일어나고 확산이 잘 일어나 세로 방향으로 붙어있는 길이가 길다. 즉 세로방향의 넥크 길이를 형성한다. 적층온도(노즐온도)가 높을수록 에어 홀의 면적이 작아짐을 볼 수 있다. 에어 홀 밀도를 보면 적층온도 210, 230, 그리고 250 °C에서 각각 4.83, 3.48, 그리고 3.15%를 보이고 있다.

Figure 15는 적층단면의 형태와 적층강도와의 관계를 보여주고 있다. 적층단면의 형태와 관련된 인자는 수직과 수평의 넥크(neck)길이, 수평과 수지의 넥크 길이를 합한 전체 넥크 길이, 그리고 에어 홀의 밀도이다. 적층강도는 적층방향으로 평행하게 인장한 적층방향의 인장강도, 적층의 직각방향으로 인장한 적층 직각방향의 인장강도로 나누어 분석하였다.^{25,32} 적층방향의 인장강도는 적층온도가 높을 때 오히려 강도가 감소함을 알 수 있다. 이는 높은 온도에서 수지의 열화에 기인한 것으로 판단된다. 그러나 적층 직각방향의 인장강도는 적층온도 증가에 따라 비례적으로 증가하고 있다. 적층온도가 높을수록 로드간의 접촉면이 증가되고 확산도 증가되어 층간의 접착이 강하게 이루어졌다고 판단된다.²⁵ 수직방향의 넥크 길이는 적층온도에 비례적으로 증가함을 보이고 있으나, 수평방향의 넥크 길이는 적층온도에 의존하기는 하나 그 의존도는 높지 않았다. 그리고 에어 홀의 밀도는 적층온도가 증가할수록 감소함을 보여주고 있다. 적층물의 강도에서 적층방향의 강도는 크나 적층 직각방향의 강도가 현저하게 낮



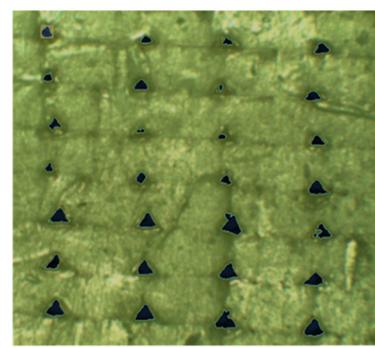
Measurement window: 1500µm × 1500µm
of object (air hole): 28
Total air hole area: 108709.29 µm²
Air hole density: 4.83 %

(a) 210 °C



Measurement window: 1500µm × 1500µm
of object (air hole): 28
Total air hole area: 78418.75 µm²
Air hole density: 3.48 %

(b) 230 °C



Measurement window: 1500µm × 1500µm
of object (air hole): 28
Total air hole area: 70909.24 µm²
Air hole density: 3.15 %

(c) 250 °C

Figure 14. Photograph of the fractured surface of the ABS specimen after image processing and the statistical data for this specimen (×100).

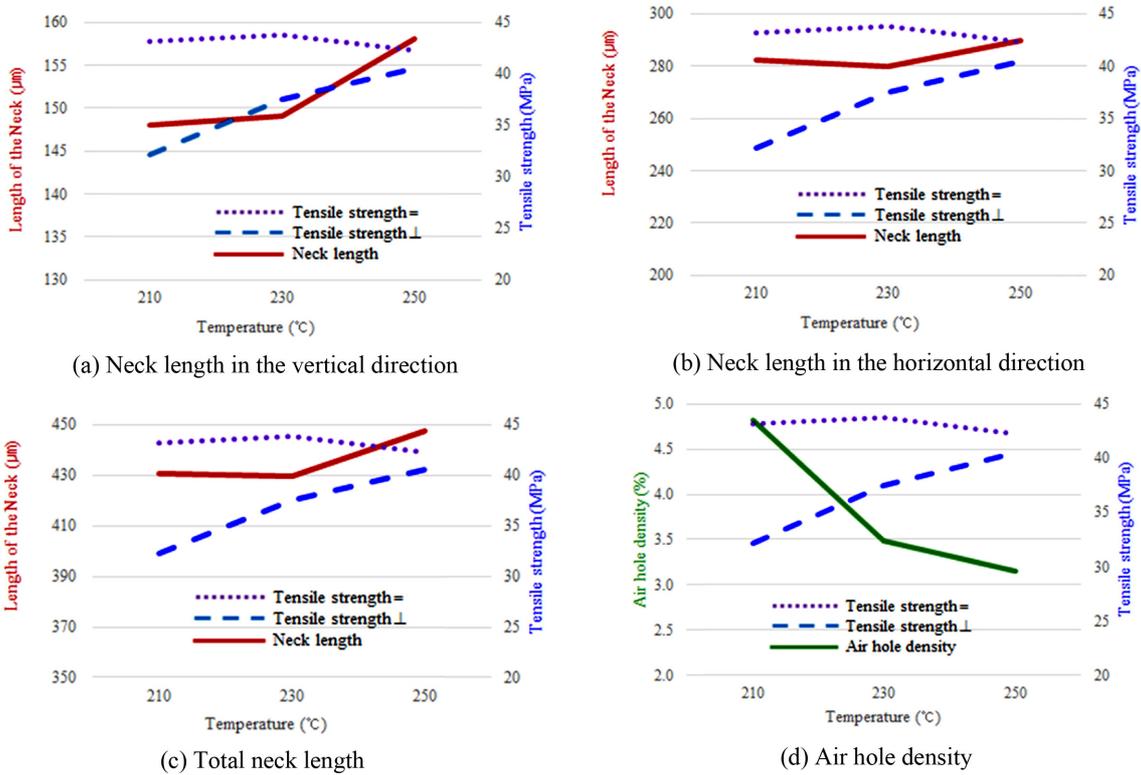


Figure 15. Relationship between deposition strength and cross-section morphology of the ABS specimen fabricated by ME-type 3D printing.

다. 따라서 적층 직각방향으로 강도를 증가시키는 것이 매우 중요하다.^{25,32} 적층 직각방향의 인장강도는 적층로드에서 수직방향의 넥 길이와 길수록, 그리고 에어 홀의 밀도가 작을수록 증가함을 알 수 있다.

PLA 소재의 적층단면 형태 및 적층강도. Figure 16은 PLA 소재로 적층한 시편의 단면사진을 보여주고 있다. 단면은 Figure 3(a)의 단순과단 방법으로 생성하였다. 모든 적층온도에서 SEM 사진보다는 광학현미경 사진에서 단면이 보다 명확하게 보이고 있으며 적층온도에 따른 단면의 형태 차이는 크지 않다.

Figure 17은 광학현미경 사진을 이미지 처리를 통해 관찰한 사진이다. 작은 에어 홀들이 잘 보여진다. 적층온도가 높을수록 에어 홀의 수와 크기가 작아짐을 알 수 있다. 이는 적층온도가 높을수록 로드간의 접착이 잘 되어 나타난 현상이다. 200 °C의 단면 사진에서 로드간 경계면이 어느 정도 관찰되는데 220와 240 °C의 단면에서는 경계면이 보이지 않고 있다. PLA 소재는 온도가 높은 경우에 로드와 접착된 후 확산이 잘 되어 로드의 경계면이 나타나지 않은 것으로 판단된다. 에어 홀 밀도는 적층온도 200 °C, 220 °C, 그리고 240 °C에서 각각 0.84, 0.82, 그리고 0.46%로 측정되었다. ABS 소재에 비해 로드간 경계가 뚜렷하지 않고 에어 홀의 밀도도 낮게 관찰되었다. 에어 홀의 크기는 단면의 아랫부분이 작고

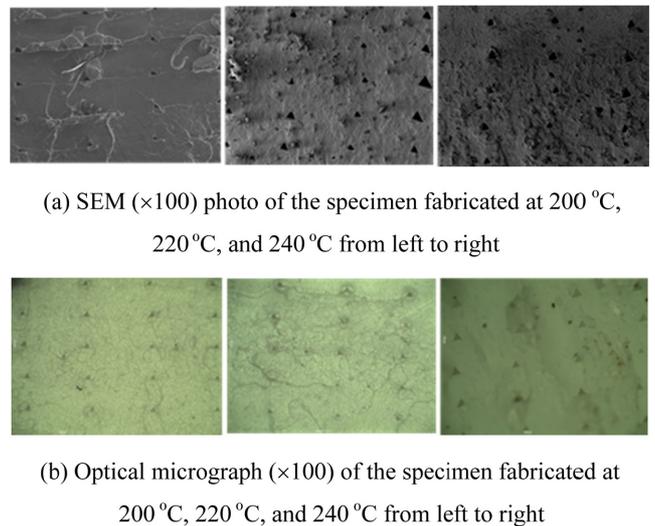


Figure 16. Comparison of the fractured surface of the PLA specimen fabricated by ME-type 3D printing (×100).

윗부분은 크게 나타났다. 적층 아랫부분은 베드의 높은 온도에 의해 적층 윗부분보다 재료의 온도가 높다. 이런 환경에서 아랫부분이 윗부분의 로드의 무게에 의해 눌러서 나타난 현상이라 판단된다.

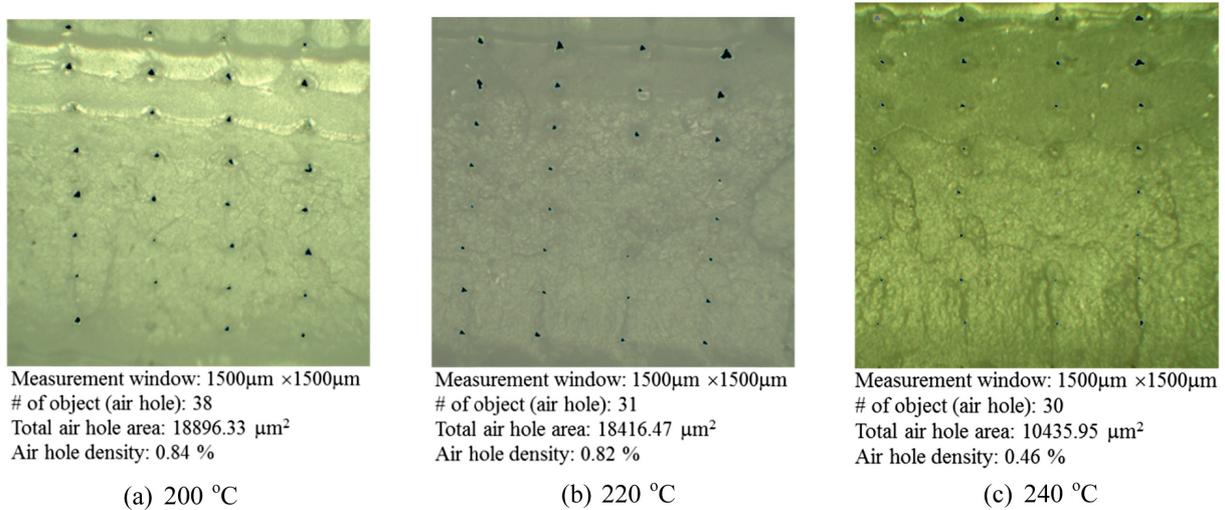


Figure 17. Photograph of the fractured surface of the PLA specimen after image processing and the statistical data of this specimen (×100).

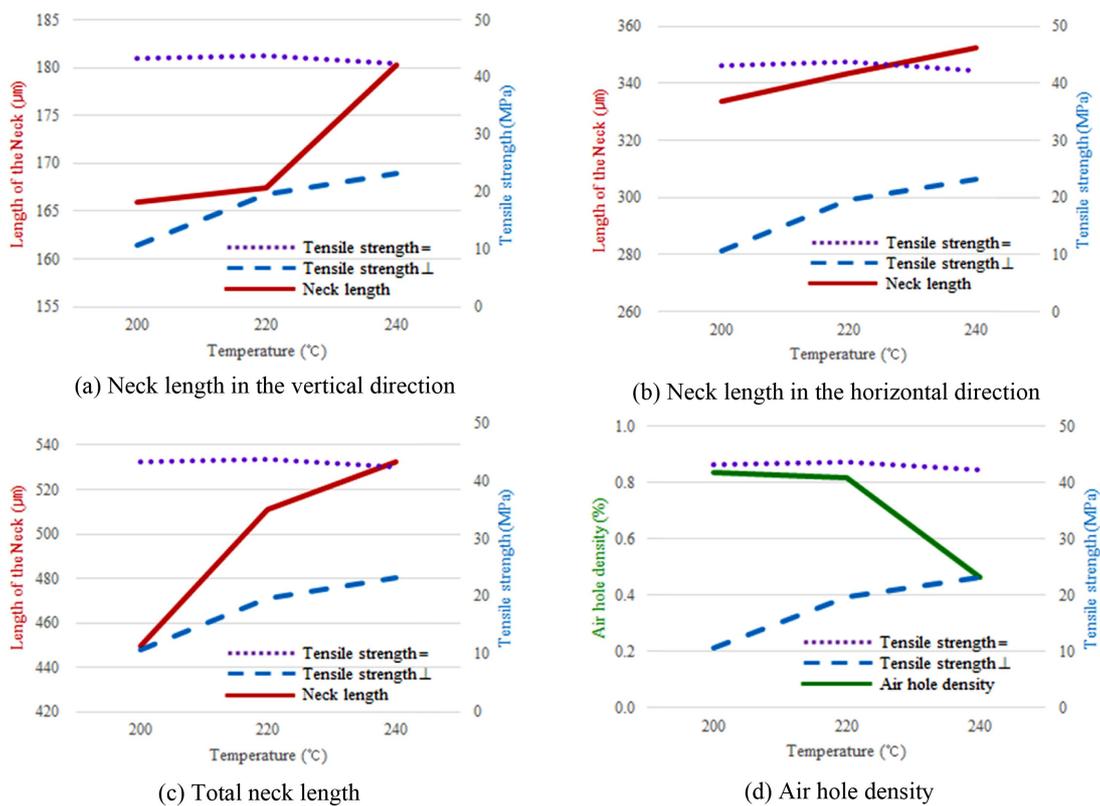
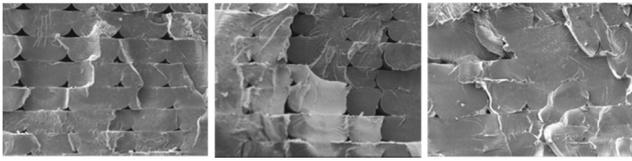


Figure 18. Relationship between deposition strength and cross-section morphology of the PLA specimen fabricated by ME-type 3D printing.

Figure 18은 적층강도와 적층단면에서 네크의 길이 그리고 에어 홀의 밀도와와의 관계를 보여주고 있다. ABS 소재와 마찬가지로 적층방향의 인장강도는 적층온도에 크게 의존하지 않으나 적층 직각방향의 인장강도는 적층온도에 비례적으로 증가하고 있다. 그리고 수직방향의 네크 길이와 수평방향의

네크 길이 모두 온도가 증가함에 따라 증가하는데 수직 방향의 네크 길이가 적층온도에 더 민감하게 나타났다. 그리고 에어 홀의 밀도는 적층온도가 증가할수록 감소하는데 높은 온도에서 크게 감소하고 있다. 적층직각 방향의 인장강도는 단면의 형태 중 수직 및 수평의 네크 길이가 증가할수록 증가



(a) SEM ($\times 100$) of the specimen fabricated at 245 °C, 260 °C, and 275 °C from left to right



(b) Optical micrograph ($\times 100$) of the specimen fabricated at 245 °C, 260 °C, and 275 °C from left to right

Figure 19. Comparison of the fractured surface of the PC-27 specimen fabricated by ME-type 3D printing ($\times 100$).

하였고, 에어 홀의 밀도가 감소할수록 증가하였다.

PC 소재의 적층단면 형태 및 적층강도. Figure 19는 PC-27 소재로 적층한 시편의 단면을 보여주고 있다. 단면의 SEM 사진을 보면 적층온도가 낮은 경우에는 적층된 로드의 경계면이 선명하게 보이나 적층온도가 높은 경우는 로드의 경계면이 뚜렷하지 않다. 그리고 낮은 적층온도에서는 에어 홀이 크게 보이나 적층온도가 높을수록 에어 홀의 크기가 줄어들 수 있다.

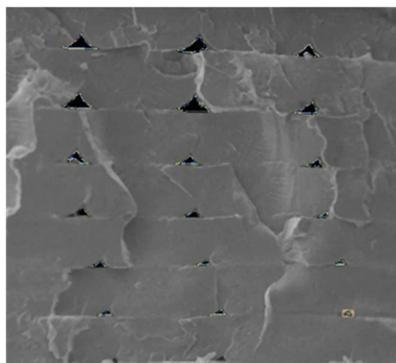
Figure 20은 단면의 형태를 자세히 파악하기 위해 SEM 사진을 이미지 처리한 사진이다. 적층단면에서 에어 홀은 적층면의 윗쪽에서 크게 분포함을 볼 수 있다. 적층 아래 부분이 베드의 높은 온도에 의해 온도가 높은 상태이다. 이 환경에

서 아랫부분이 로드의 자중에 의해 눌러서 에어 홀이 줄어드는 것으로 판단된다. 에어 홀의 밀도는 적층온도가 245, 260, 그리고 275 °C에서 각각 1.57, 0.64, 그리고 0.90%로 측정되었다. 적층온도 275 °C의 에어 홀 밀도가 260 °C보다 크게 나타났는데 이것은 275 °C 단면에서 측정단면 윗쪽에 큰 홀이 몇 개 관찰되었기 때문이다. 단면 아랫부분에는 에어 홀이 매우 작았다. 이는 적층이 균일하지 않고 편차가 생겨서 나타난 현상이라고 판단된다.

Figure 21에는 적층온도에 따른 적층강도와 적층면의 Neck 길이, 그리고 에어 홀 밀도가 나타나 있다. 적층온도 275 °C에서는 로드간 접촉면이 관찰되지 않아서 Neck 길이를 측정하지 못하였다. ABS와 PLA 소재와 마찬가지로 적층방향의 인장강도는 온도에 크게 의존하지 않는데 적층 직각방향의 인장강도는 온도에 크게 의존하고 있다. Neck 길이 역시 적층온도가 증가할수록 증가하며 이는 적층 직각방향의 인장강도를 증가시킨다. 에어 홀 밀도는 적층온도가 증가할수록 감소하나 275 °C에서 단면의 윗부분에 몇 개의 큰 에어 홀이 발생되어 예외적으로 에어 홀 밀도가 증가되었다. 이는 단면 생성시 발생되었거나 적층 시에 나타난 불량으로 사료된다. 따라서 이를 제외하고 분석하는 것이 바람직하다고 판단된다. 275 °C의 예외적인 것을 제외하면 적층 직각방향의 인장강도는 수직 및 수평방향의 Neck 길이가 길수록 그리고 에어 홀의 밀도가 감소할수록 증가하고 있다.

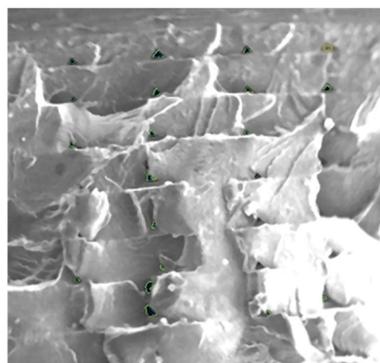
결 론

본 연구에서는 재료압출 방식 3D 프린팅 조형물에서 단면의 형태와 적층강도와의 관계를 관찰하였다. 사용한 소재는 ABS, PLA, 그리고 PC이었으며 다양한 방법으로 적층시편의



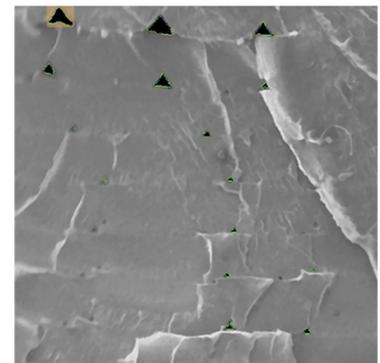
Measurement window: 1500 μ m \times 1500 μ m
of object (air hole): 18
Total air hole area: 35354.74 μ m²
Air hole density: 1.57 %

(a) 245 °C



Measurement window: 1500 μ m \times 1500 μ m
of object (air hole): 20
Total air hole area: 14484.00 μ m²
Air hole density: 0.64 %

(b) 260 °C



Measurement window: 1500 μ m \times 1500 μ m
of object (air hole): 15
Total air hole area: 20385.82 μ m²
Air hole density: 0.90 %

(c) 275 °C

Figure 20. Photograph of the fractured surface of the PC-27 specimen after image processing and the statistical data of this specimen ($\times 100$).

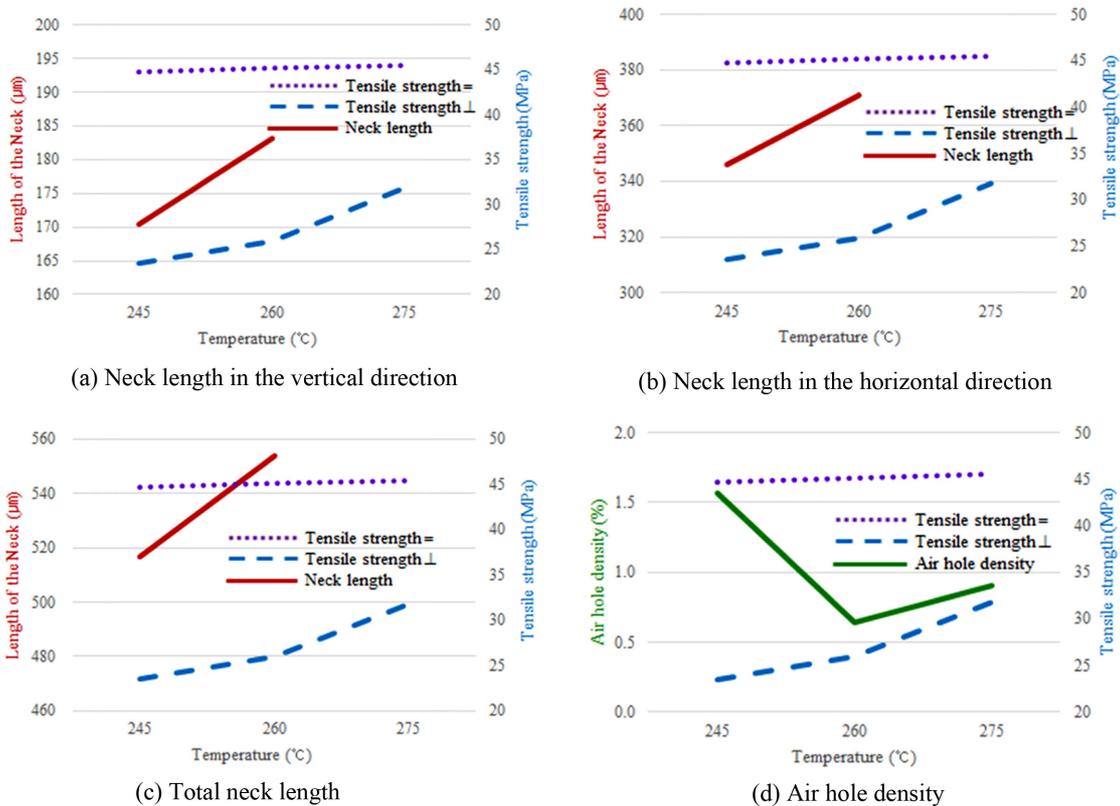


Figure 21. Relationship between deposition strength and cross-section morphology of the PC-27 specimen fabricated by ME-type 3D printing.

단면을 생성하였다.

적층시편의 단면은 SEM과 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 촬영된 단면사진은 이미지 처리 프로그램을 이용하여 에어 홀과 로드 사이의 접촉길이, 즉 넥 길이 측정하였다.

적층 직각방향의 인장강도는 적층방향의 인장강도보다 항상 낮게 측정되었다. 그리고 적층 직각방향의 인장강도는 적층물의 단면형태와 깊은 관련이 있었다. 적층 직각방향의 인장강도는 넥 길이에 의존하였으며 특히 인장방향에 수직면의 넥 길이에 더 의존하였으며 이 넥 길이가 길수록 인장강도는 증가하였다. 또한 이 수직면의 넥 길이는 적층온도가 높을수록 증가하였으며 이에 따라 적층 직각방향의 인장강도도 증가하였다. 적층시편의 단면에서 보이는 에어 홀 밀도는 적층온도가 높을수록 감소하였다. 그리고 적층 직각방향의 인장강도 역시 단면의 에어 홀 밀도가 작을수록 증가하였다.

적층단면의 형태는 소재에 따라 다르게 나타났다. 따라서 단면의 형태를 나타내는 넥길이, 로드 경계면의 형상, 에어 홀의 크기 및 밀도는 적층공정조건 뿐만 아니라 재료의 물성, 즉 열적특성과 유변물성 등에 영향을 받는 것으로 판단되며 향후 이의 연구가 필요하다.

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

참고 문헌

1. A. Gebhardt and J.-S. Hotter, *Additive Manufacturing*, Hanser, Munich, 2016.
2. S. Park, *Int. J. Adv. Culture Technol.*, **2**, 30 (2014).
3. T. Rayna and L. Striukova, *Technol. Forecast. Soc. Change*, **102**, 214 (2016).
4. S.-H. Park, J. H. Park, H. J. Lee, and N. K. Lee, *J. Kor. Soc. Prec. Eng.*, **31**, 1067 (2014).
5. Q. Gu, J. Hao, Y. Lu, L. Wang, G. G. Wallance, and Q. Zhou, *Science China*, **58**, 411 (2015).
6. J. Lee, S. Park, and W. D. Kim, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. C*, **1**, 21 (2013).
7. H.-S. Kim and I.-A. Kang, *J. Korea Fashion & Costume Design Assoc.*, **17**, 125 (2015).
8. S. Lee, *J. Korean Acad. Pediatr. Dent.*, **43**, 93 (2016).
9. ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (2013).

10. M. S. Hossain, D. Espalin, J. Ramos, M. Perez, and R. Wicker, *J. Manuf. Sci. Eng.*, **136**, 061002 (2014).
11. V. Vega, J. Clements, T. Lam, A. Abad, B. Fritz, N. Ula, and O. S. Es-Said, *J. Mater. Eng. Perform.*, **20**, 978 (2011).
12. G. D. Kim and J. Kim, *Trans. Korean Soc. Machine Tool Engineers*, **15**, 56 (2006).
13. B. V. Reddy, N. V. Reddy, and A. Ghosh, *Virtual Phys. Prototyp.*, **2**, 51 (2007).
14. O. S. ES-Said, J. Foyos, R. Noorani, M. Mendelson, R. Marloth, and B. A. Pregger, *Mater. Manuf. Process.*, **15**, 107 (2000).
15. S. H. Masood, K. Mau, and W. Q. Song, *Mater. Sci. Forum*, **654**, 2556 (2010).
16. P. Anhua, *Adv. Mater. Res.*, **538**, 1564 (2012).
17. T.-M. Wang, J.-T. Xi, and Y. Jin, *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, **33**, 1087 (2007).
18. B. N. Turner, R. Strong, and S. A. Gold, *Rapid Prototyp. J.*, **20**, 192 (2014).
19. A. Bellini, PhD Thesis, Drexel University, 2002.
20. M. Roxas, PhD Thesis, University of Toronto, 2008.
21. J. H. Park, M.-Y. Lyu, S. Y. Kwon, H. J. Noh, M. S. Koo, and S. H. Cho, *Elast. Compos.*, **51**, 301 (2016).
22. S. Kim and M.-Y. Lyu, *Elast. Compos.*, **52**, 216 (2017).
23. Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu, *Rapid Prototyp. J.*, **14**, 72 (2008).
24. S.-H. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, *Rapid Prototyp. J.*, **8**, 248 (2002).
25. S. J. Park, J. H. Park, K. H. Lee, and M.-Y. Lyu, *Polym. Korea*, **40**, 846 (2016).
26. C. C. Chen and J. L. White, *Polym. Eng. Sci.*, **33**, 923 (1993).
27. S. Wu, *Polym. Eng. Sci.*, **30**, 753 (1990).
28. R. Dell'Erba, G. Groeninckx, G. Maglio, M. Malinconico, and A. Migliozzi, *Polymer*, **42**, 7831 (2001).
29. J. Datta and M. Wloch, *Macromol. Res.*, **23**, 1117 (2015).
30. F. Sen, S. Madakbas, E. Basturk, and M. V. Kahraman, *Polym. Korea*, **41**, 1019 (2017).
31. S. J. Park, J. E. Lee, J. H. Park, M.-Y. Lyu, K. Park, M. S. Koo, S. C. Jin, K. Y. Kim, and S. Yong, *Elast. Compos.*, **52**, 99 (2017).
32. S. J. Park, J. H. Park, M.-Y. Lyu, M. S. Koo, H. J. Rho, and S. H. Cho, *Polym. Korea*, **41**, 531 (2017).