



# Cross-section Morphology and Surface Roughness of an Article Manufactured by Material Extrusion-type 3D Printing according to the Thermal Conductivity of the Material

In Young Woo, Do Yeon Kim, Hong Pil Kang, and Min-Young Lyu<sup>†</sup>

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

(Received January 10, 2020, Revised February 3, 2020, Accepted February 13, 2020)

**Abstract:** Material extrusion (ME)-type 3D printing is the most popular among the 3D printing processes. In this study, the cross-section morphologies of ME-type 3D printing manufactured specimens were observed with respect to the thermal properties of the material. The cross-section morphology of a specimen is related to the deposition strength, and the outside profile of the cross-section is related to the surface roughness. The filaments used in this study, with different thermal conductivities, were the acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS), the high impact polystyrene (HIPS), the glycol-modified polyethylene terephthalate (PETG), and the polylactic acid (PLA). The cross-sections and the surfaces of the 3D manufactured specimens were examined. In ME-type 3D printing, the filaments are extruded through a nozzle and they form a layer. These layers rapidly solidify and as a result, they become a product. The thermal conductivity of the material influences the cooling and solidification of the layers, and subsequently the cross-section morphology and the surface roughness.

**Keywords:** material extrusion-type, 3D printing, thermal conductivity, cross-section morphology, surface roughness

## Introduction

3D 프린팅은 제조 방식에 따라 크게 재료압출방식(Material Extrusion, ME Type 또는 Fused Deposition Modeling, FDM Type), 레이저 소결 방식(Selective Laser Sintering, SLS Type), 그리고 광경화 방식(Stereo Lithography Apparatus, SLA Type) 등으로 분류되고 있다.<sup>1</sup> 이 중 재료압출방식 3D 프린팅은 열 가소성 수지를 필라멘트 형태로 제조하여 3D 프린터의 배럴과 노즐에서 녹여 압출하며 적층하는 방식이다. 이 방식은 조작이 간편하고 다양한 재료의 적용이 가능하며 경제적이어서 가장 대중적으로 활용되고 있다. 다양하게 활용되는 만큼 이에 대한 연구는 다양하다.<sup>2-7</sup>

재료압출방식 3D 프린팅 공정은 슬롯코팅(Slot Coating)공정과 유사점이 많다. 슬롯코팅은 폭이 넓고 작은 틈을 갖는 다이출구를 통해 재료를 토출시키고 다이가 움직이면서 얇은 막을 코팅하는 공정이다. 따라서 코팅의 품질에 영향을 주는 물성과 압출방식 3D 프린팅의 표면정밀도에 영향을 주는 물성의 유사성을 유추할 수 있다.<sup>8-10</sup>

재료압출방식 3D 프린팅의 조형물은 적층방향에 따라 강도가 달라 적층방향과 적층직각방향의 인장강도 비를 평가한

다. 항상 적층직각방향의 강도가 낮게 측정되는데 이의 강도는 적층단면의 형상(Morphology)에 따라 다르게 나타난다. 단면의 형상을 결정짓는 인자는 적층되는 로드(Road)가 붙어있는 네킹길이(Neck Length)와 에어 홀(Air Hole)의 크기이다. 본 연구실에서는 재료압출방식 3D 프린팅의 적층공정 및 적층강도에 대한 연구를 발표하였다.<sup>5-7</sup> 또한 적층공정 조건의 변화에 따른 적층단면을 관찰하여 단면의 형상(Morphology)과 적층강도와의 관계를 규명하였다.<sup>11</sup> 그러나 단면의 형상은 단지 적층공정 조건에 따라서만 결정되는 것이 아니라 재료의 물성과도 관련이 깊다. 적층물의 표면 정밀도 역시 재료의 물성과 관련이 깊다.

본 연구는 재료압출방식 3D 프린팅 적층물의 단면관찰 연구의 연장으로 소재의 물성의 변화에 따라 나타나는 적층단면의 형상을 관찰하였다. 또한 적층물의 표면거칠기도 조사하여 표면의 정도에 영향을 주는 재료의 물성에 대해서도 논의하였다.

## Experimental

### 1. Material and specimen

본 연구에서 사용한 재료는 재료압출방식 3D 프린팅에 사

<sup>†</sup>Corresponding author E-mail: mylyu@seoultech.ac.kr

**Table 1.** Material Information Used in This Study

Material	Grade	Supplier	Glass Transition Temperature (°C)	Thermal Conductivity (W/m·K)
ABS	YS-ABS	YOUSU	105	0.33
HIPS	YS-HIPS	YOUSU	90	0.22
PETG	SKYPLETE GE100	SK Chemicals	80	0.13
PLA	BG-4800	Top Leaf Chemical Korea	60	0.24

용하도록 제작된 필라멘트형태로 ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), HIPS (High Impact Polystyrene), PETG (Glycol-modified Polyethylene Terephthalate), 그리고 PLA (Polylactic Acid)이다. PLA는 결정성 고분자이고 나머지는 비 결정성 고분자이다. 열전도도에 따른 적층단면 및 표면을 관찰하고자 다양한 열전도도를 갖는 재료를 선정하였다. 사용된 소재의 정보가 Table 1에 나타나 있다. ABS, HIPS, PETG, 그리고 PLA의 열전도도가 각각 0.33, 0.22, 0.13, 그리고 0.24 [W/m<sup>2</sup>K]이다. 열전도도는 온도에 따라 다르나 본 연구에서는 상온에서의 열전도도를 기준으로 선정하였다.<sup>12</sup>

소재의 흐름 특성을 파악하기 위해 용융지수 측정기(MI-3, GOETTERT, Germany)를 이용하여 소재의 공정온도에서 2.16 kg의 하중으로 용융지수를 측정하였다.

재료압출방식 3D프린팅으로 적층하여 적층 단면을 관찰하기 위한 실험 시편은 충격시편으로 폭과 길이가 각각 12.7 mm와 63.0 mm이고, 두께는 3.2 mm이다.

## 2. Equipment and operation

3D 프린팅 적층 강도 시편 제작을 위해 사용한 재료압출방식의 3D 프린터는 Rokit사(S. Korea)의 Edison Multi2이다. 적층 정밀도(Resolution)는 x, y 방향이 11 μm, z 방향이 2.5 μm

**Table 2.** Operational Condition of ME-Type 3D Printing

Material	Nozzle Temperature	Bede Temperature	Others
ABS	220°C	100°C	Nozzle Diameter : 0.24 mm Nozzle Speed : 80 mm/s Layer Height : 0.2 mm
	230°C		
	240°C		
HIPS	200°C		
	210°C		
	220°C		
PETG	220°C		
	230°C		
	240°C		
PLA	205°C		
	215°C		
	225°C		

이다. 각 소재에 따른 3D프린터의 운전조건이 Table 2에 나타나 있다.

적층 툴 패스(Tool Path)는 시편의 외곽의 컨투어(Contour)를 만든 후 내부를 시편의 길이 방향으로 왕복하면서 적층하였다.

## 3. Cross-section and observation

재료압출방식 3D 프린팅 적층물의 단면을 관찰하기 위해서 시편을 절단하였다. 칼로 시편 표면을 얇게 선을 그은 후 시편 위에 드라이 아이스(Dry Ice)를 30분 동안 올려놓은 후 절단하는 방법을 사용하였다. 절단된 시편의 단면은 광학현미경(Optical Microscope)으로 관찰하였다. 사용한 광학현미경은 Motic (China)사의 BA310Met이고, 촬영한 단면 사진은 이미지 프로세스 프로그램인 Mex (2Xware, S. Korea)를 통해 자세히 분석하였다.

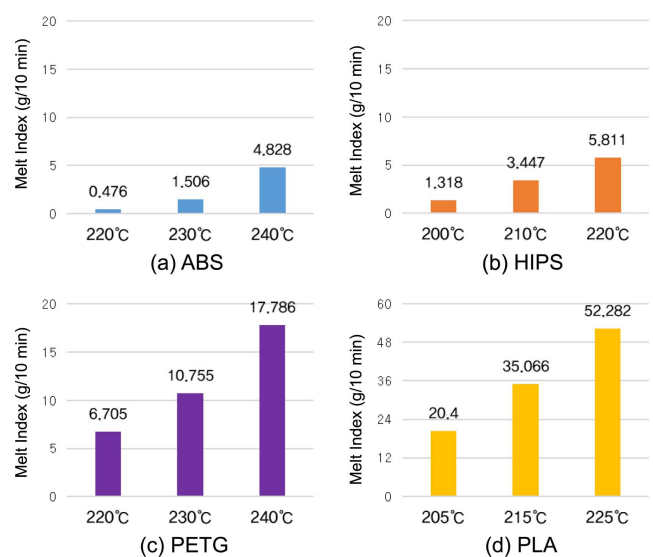
## 4. Measurement of surface roughness

재료압출방식 3D 프린팅 적층물의 표면은 비 연속적으로 나타나 매끄럽지 않고 거칠다. 표면의 거칠기를 측정하기 위해 이동식 표면거칠기 측정기(SJ-411, Mitutoyo, Japan)를 이용하여 10점 평균 거칠기(Ra)를 측정하였다.<sup>13</sup>

# Results and Discussion

## 1. Flow property of material

Figure 1에 소재의 용융지수를 나타내었다. ABS, HIPS,

**Figure 1.** Melt index for used materials.

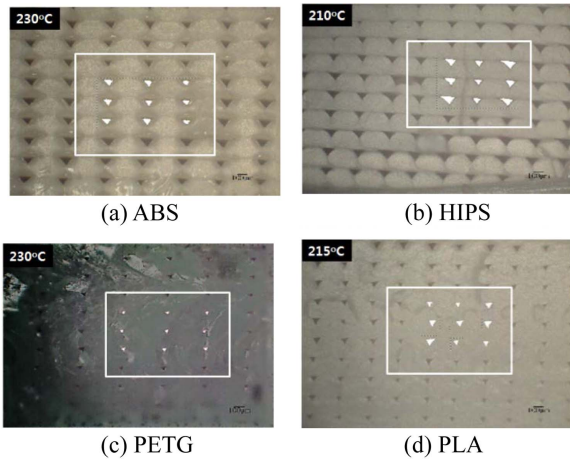


Figure 2. Photos of fractured surfaces of 3D printing manufactured specimens.

PETG, PLA의 공정온도에서 용융지수는 각각 0.476~4.828, 1.318~5.811, 6.705~17.786, 20.4~52.282를 보였다. 공정온도가 높아질수록 흐름성이 좋아지며 PLA의 흐름성이 가장 높은 것으로 나타났다.

2. Observation of cross-section of specimen

각 소재마다 3개의 적층온도에서 각각 3개의 시편을 적층하여 관찰하였다. Figure 2에는 각 소재에서 온도에 따른 적층단면 사진이 하나씩 나타나 있다. 이미지 프로세스 프로그램을 이용하여 단면이 잘 나타난 영역에서 9개의 에어 홀이 포함하도록 캡처하여 분석하였다.

Figure 3에는 사진으로 관찰된 단면을 도식적인 그림으로 나타내었다. 각 소재마다 굳어진 로드의 단면이 다르게 나타났다. 노즐에서 토출되는 로드의 단면은 원형(지름 0.4 mm)이나 노즐과 베드사이의 간격(0.2 mm)이 노즐의 지름보다 작으므로 로드는 원형을 유지하지 못하고 눌리게 된다. Figure 2과 3에 그러한 현상이 잘 나타나 있는데 소재의 열전도도에 따라 눌리는 정도가 다르게 나타났다. 열전도도가 큰 비결정수지인 ABS, HIPS와 결정성 수지인 PLA는 많이 눌리지 않고 납작한 타원형의 로드를 보이고 있다. PETG는 본 연구에

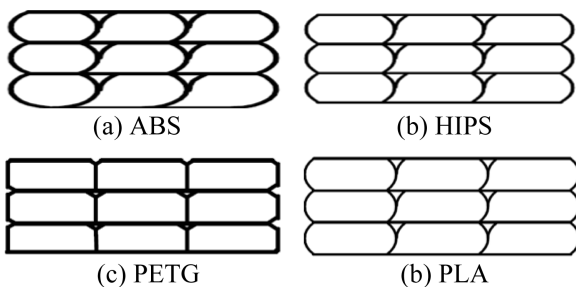


Figure 3. Schematic drawings of layered roads in the fractured surfaces manufactured by ME type 3D printing.

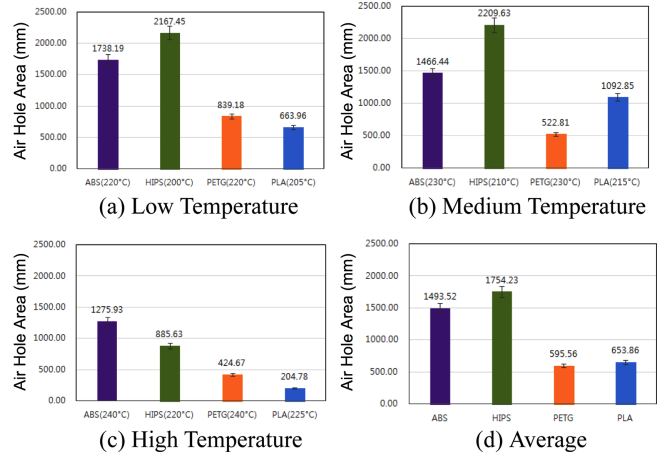


Figure 4. Comparison of air hole area in the fractured surface of 3D printing manufactured specimens.

서 사용한 소재 중 열전도도가 가장 작은 소재로 로드가 많이 눌러서 납작한 모양을 보이고 있다. 대체적으로 열전도가 큰 소재의 로드는 덜 눌러져 있는 형상이고 열전도가 작은 소재의 로드는 많이 눌러서 납작한 형상을 보이고 있다.

이미지 프로세스 프로그램을 이용하여 단면이 잘 나타난 영역에서 같은 수의 에어 홀이 포함하도록 캡처하여 에어 홀의 평균 면적을 비교하였다. 에어 홀의 평균 면적에 관한 결과가 Figure 4에 나타나 있다. 에어 홀의 면적이 크다는 것은 적층면에 소재가 채워지지 않은 면적이 크을 나타낸다.

Figure 4(a), 4(b), 4(c)는 각각 적층온도의 낮은 온도, 중간 온도, 높은 온도에서의 에어 홀의 평균 면적을 비교한 것이고, Figure 4(d)는 각 온도의 값을 평균하여 나타낸 결과이다. 각 소재마다 적층온도에 따라 나타나는 에어 홀 면적의 크기가 다소 다른 변화를 보이고 있다. 열전도도의 크기와 에어 홀의 크기가 온전히 비례적으로 나타나 있지는 않지만 열전도도가 큰 ABS와 HIPS에서 에어 홀의 면적이 크다. 그리고 열전도도가 가장 작은 PETG에서 에어 홀의 면적이 가장 작다.

열전도도가 큰 소재일수록 열의 이동이 잘되어 적층 중에 냉각이 잘 된다. 3D프린팅은 연속적으로 로드가 적층되는 공정이므로 먼저 적층된 로드는 다음에 적층되는 로드에게 눌리게 된다. 이때 아래에서 눌리는 로드가 냉각이 잘 되어 온도가 낮은 경우는 덜 눌리게 되고, 냉각이 덜 되어 온도가 높은 로드는 변형이 쉬워서 많이 눌리게 된다. 즉 열전도도가 높은 소재는 냉각이 빨라서 많이 눌리지 않아 로드의 형상이 타원형에 가깝게 유지된다. 반대로 열전도도가 낮은 소재는 냉각이 느려 온도가 높은 상태에서 다음 로드가 적층되므로 많이 눌리게 되어 로드가 납작하게 된다. 재료압출방식 3D프린팅에서 적층단면의 형상은 적층강도에 크게 영향을 미친다.<sup>5,7,11</sup> 그런데 적층 단면의 형상은 소재의 열적 특성인 열전도도에 크게 영향을 받고 있다. 열전도도가 낮은 소재가 로드끼리 눌러서 접촉이 잘 일어나 타이트한 단면을 보여주어 적층강도

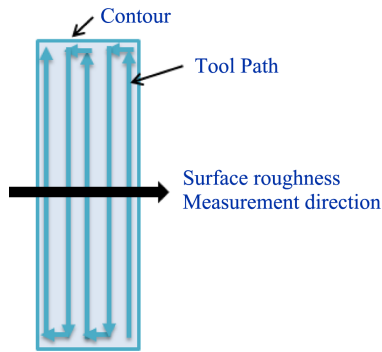


Figure 5. Measurement direction of surface roughness.

가 크를 예측 할 수 있다.<sup>7,8</sup> 에어 홀의 크기가 재료의 열전도도 값에 완전히 비례하지 않는데 이는 열전도도외에 각 로드의 적층시에 영향을 주는 소재의 접촉각과 표면장력이 영향을 주었을 것으로 판단된다.<sup>8-10</sup>

### 3. Observation of surface roughness

Figure 5는 적층시편의 표면거칠기 측정상태를 보여주고 있다. 그리고 Figure 6에는 각 소재별로 적층한 시편의 표면거칠기를 측정한 사진이 나타나 있다. Figure 7은 각 소재별 적층온도에 따른 표면거칠기 값을 보여주고 있다. 각 소재마다

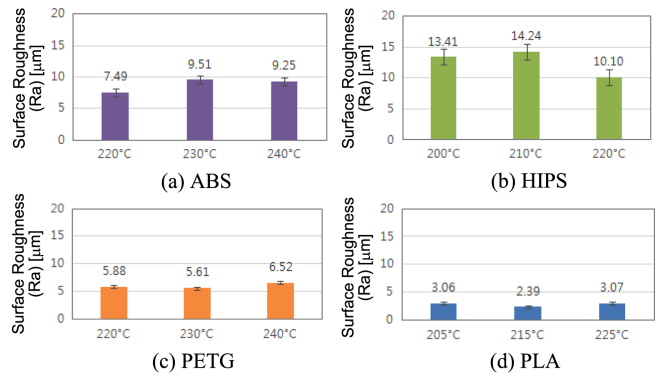


Figure 7. Comparisons of surface roughness for 3D printing temperature.

적층온도에 따라 다소 다른 표면거칠기를 보이고 있으나 그 차이는 작고 또한 특별한 경향을 보이고 있지 않다. 표면거칠기는 적층물 맨 외곽의 로드가 굳어진 형태이므로 적층챔버의 온도에 크게 의존한다고 판단된다. 본 실험에서는 챔버온도를 동일하게 상온으로 하였으므로 적층온도에 따른 경향이 없는 것으로 사료된다.

소재에 따른 표면거칠기는 확연히 다르게 나타났다. Figure 8은 각 소재별로 평균 표면거칠기를 보여주고 있다.

Figure 3의 재료에 따라 나타난 에어 홀의 크기와 유사한 경향이다. 표면거칠기도 재료의 열전도도와 관련이 있는 것을

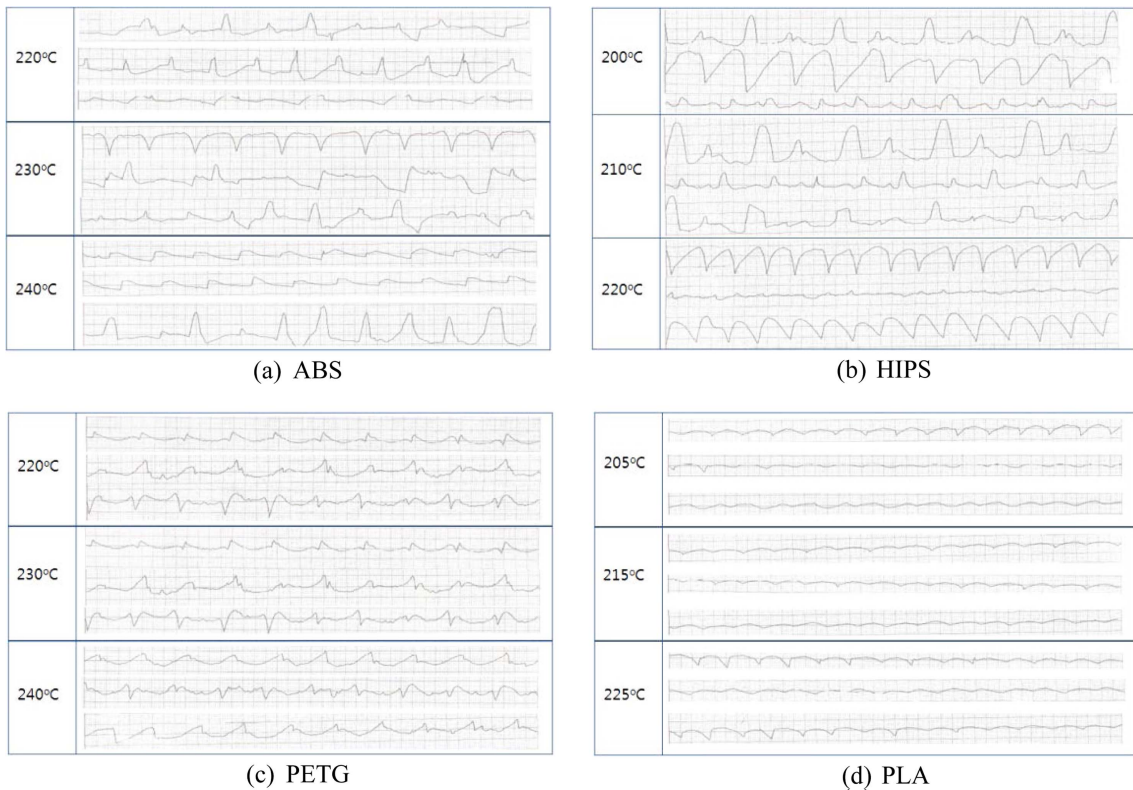


Figure 6. Photos of surface roughness curves.

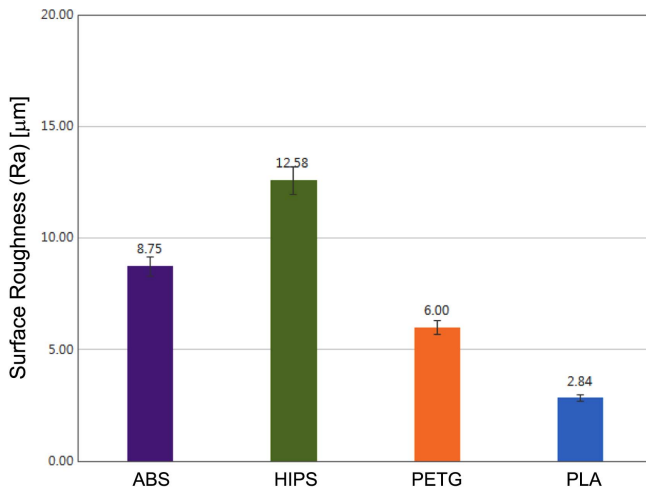


Figure 8. Comparisons of surface roughness for material.

보여준다. 냉각이 빠르면 재료가 노즐에서 토출되는 형상과 유사하게 굳어져 표면거칠기가 큰 것으로 사료된다. 표면거칠기가 온전히 재료의 열전도도 값에 비례적으로 나타나지 않는데 이는 표면거칠기에 미치는 물성이 더 있다고 판단된다.

표면거칠기는 자유표면에서 적층된 로드가 굳어지기 때문에 소재의 대기중 형상 형성에 영향을 주는 물성이 중요하다고 판단된다. 즉 표면거칠기에 영향을 주는 물성은 접촉각과 표면장력이 크게 영향을 준 것으로 판단된다. 실제로 코팅공정에서 코팅의 표면품질에 영향을 주는 물성은 접촉각과 표면장력으로 나타나고 있는데 3D프린팅의 마지막 적층층은 코팅공정과 유사성이 있으며 이는 표면거칠기로 나타나고 있다고 판단된다.<sup>8-10</sup>

## Conclusions

본 연구에서는 재료압출방식 3D프린팅에서 소재의 열전도도 차이에 따라 나타나는 적층단면의 형태를 관찰하였다. 소재의 열전도도가 클수록 적층로드의 냉각이 쉽게 일어나 노즐에서 토출된 형상에 가깝게 굳어지면서 적층되고 있다. 그러나 열전도도가 작은 소재는 냉각이 늦어서 적층된 로드가 다음에 적층되는 로드들에 눌러서 납작한 모양으로 로드가 굳어지고 있었다.

적층물의 표면거칠기는 적층 내부의 형태와 유사하게 소재의 열적특성에 영향을 받고 있었다. 재료압출방식 3D프린팅에서는 노즐에서 공기중으로 토출된 로드가 굳어지며 적층되는 현상이어서 코팅공정과 유사성이 있다. 따라서 내부의 적층단면의 형상은 열전도도의 크기에 의존하지만 소재의 접촉각과 표면장력에도 영향을 받는다고 판단된다. 특히 적층의 최 외곽을 이루는 표면은 소재의 접촉각과 표면장력에 더 큰 영향을 받을 것으로 판단된다.

## Acknowledgments

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

## References

1. ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies (2013).
2. B. N. Turner, R. Strong, and S. A. Gold, "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling", *Rapid Prototyping Journal*, **20**, 192 (2014).
3. A. Bellini, "Fused Deposition of Ceramics: A Comprehensive Experimental, Analytical and Computational Study of Material Behavior, Fabrication Process and Equipment Design", PhD Thesis, Department of Mechanical Engineering and Mechanics, Drexel University (2002).
4. M. Roxas, "Fluid Dynamics Analysis of Desktop-based Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping", PhD Thesis, University of Toronto (2008).
5. J. H. Park, M.-Y. Lyu, S. Y. Kwon, H. J. Noh, M. S. Koo, and S. H. Cho, "Temperature Analysis of Nozzle in a FDM Type 3D Printer Through Computer Simulation and Experiment", *Elast. Compos.*, **51**, 301 (2016).
6. S. Kim and M.-Y. Lyu, "Cooling and Deformation Analysis of a Layered Road in a FDM Type 3D Printing Through Thermal-structural Coupled Simulation", *Elast. Compos.*, **52**, 216 (2017).
7. S. J. Park, J. H. Park, K. H. Lee, and M.-Y. Lyu, "Deposition Strength of Specimens Manufactured Using Fused Deposition Modeling Type 3D Printer", *Polym. Korea*, **40**, 846 (2016).
8. Stephan F. Kistler and Peter M. Schweizer, "Liquid Film Coating: Scientific principles and their technological implications", Chapman & Hall, New York, 1997.
9. Donatas Satas, "Coatings Technology Handbook", Marcel Dekker, New York, 1991.
10. O. J. Romeo, W. J. Suszynski, L. E. Scriven, and M. S. Carvalho, "Low-flow limit in slot coating of dilute solutions of high molecular weight polymer", *Journal of non-Newtonian Fluid Mechanics*, **118**, 137 (2004).
11. H. S. Yoon, M.-Y. Lyu, and S. C. Jin, "Relationship between Deposition Strength and Cross-section Morphology of a Material Extrusion-type 3D Printing Manufactured Article", *Polym. Korea*, **42**, 752 (2018).
12. T. A. Osswald and G. Menges, "Materials Science of Polymers for Engineers", Hanser, New York, 1996.
13. P. Brown, "Handbook of Plastics Test Method", John Wiley & Sons, New York, 1988.