

3D 프린터 헤드에서 필라멘트 변형거동에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 연구

정지은*, 윤종태¹, 백서우¹, 노민성¹, 박주영², 박지원², 홍진명², 윤성희³

¹부경대학교, ²남성여자고등학교, ³경성전자고등학교
(graphic6386@naver.com*)

A Study on the Computer Simulation for Filament Deformation at exit of 3D Printer Head

Jung Ji-Eun*, Youn Jong-Tae¹, Baek Seo-Woo¹, No Min-Sung¹,
Park Ju-Yeong², Park Ji-Won², Hong Jin-Myung², Youn Sung-Hee³

¹Pukyong National University, ²Nansung Girls' High School, ³Kyeongsung Electronic High School
(graphic6386@naver.com*)

서론

현재 창조경제의 핵심기술 중의 하나인 3D 프린터는 공학, 의료, 레저 및 각종 문화 분야뿐만 아니라 건설, 식품 제조 등 많은 분야에서 그 활용범위가 점차 확대되고 있으며, 소량 다품종의 다양한 공산품의 제조기술로서 중요성이 강조되고 있다. 그러나 아직 3D 프린터는 느린 인쇄 속도 및 낮은 해상력 그리고 필라멘트 소재에 따른 열적변화 문제 등 해결할 과제가 많이 남아있다. 따라서 본 연구는 3D 프린터에서 필라멘트의 형태와 해상력을 좌우하는 가장 중요한 부분인 헤드의 출구 부분에서 필라멘트의 거동을 컴퓨터 시뮬레이션 하였다. 연구방법은 필라멘트의 열적 변화와 점탄성거동을 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 해석하였다. 사용한 소프트웨어는 ANSYS사의 Polyflow 이었으며, 이 시뮬레이션 결과들을 실험 결과와 비교하여 차후 3D 프린터의 인쇄 최적화 조건을 찾는 데 기여하고자 하였다.

이론

직경이 큰 실린더를 통과한 액체(필라멘트 재료, 고분자 물질 또는 분산 페이스트 등)가 직경이 작은 모세관을 통과하였을 때 모세관의 출구를 통해 나오는 액체는 출구의 직경보다 더 크게 부풀어져서 압출되는 현상을 다이 스웰(Die Swell)이라고 한다. 그 이유는 점탄성 물질의 경우, 탄성의 영향으로 흐름의 직각방향으로 힘이 발생하는데 모세관을 통과 할 때는 다이의 벽면에 의해 직각 방향의 힘이 발현되지 않지만, 통과한 후에는 구속이 없기 때문에 직각 방향의 힘에 의해 팽창하는 현상이 발생하게 된다.¹⁾ 팽창률은 모세관 출구의 필라멘트 두께(D_0)와 압출 후 필라멘트 두께(D)에 대한 비율인데 Laun과 Schuch는 다이의 형상에 따른 팽창률에 대해 연구하였고 그 결과 확산하는 형상의 다이는 팽창률이 감소하고 좁아지는 형상의 다이는 팽창률이 증가한다는 것을 발견하였다. Laun과 Schuch의 식은 팽창률을 B , 전단속도를 $\dot{\gamma}_w$, 지름에 대한 길이의 비율을 L/D , 온도를 T , 용융된 필라멘트가 다이를 벗어나는데 경과되는 시간은 t 라고 정의하였을 때, 식 [1]과 같다.

$$B \equiv D/D_0 = f(\dot{\gamma}_w, L/D, T, t) \dots \dots [1]$$

이 비율은 Newtonian 유체에서는 약 1.13 정도로 측정되지만 고분자 수지의 경우 2에서 3정도로 높게 나타날 수 있다. 그 이유는 고분자 수지의 다이 유동 시 생성되는 분자 배향 때문이다.²⁾

실험

본 논문에서는 3D 프린터 노즐의 구조 해석에서 실험적인 방법과 이론적인 해석을 일치시키는데 목적을 두었다. 실험적인 방법을 위해 사용한 장비는 Rokit사의 fused filament fabrication 방식의 3D 프린터 3dison plus(single)를 사용하였고, 필라멘트는 옥수수 전분을 이용하여 제조된 PLA(poly lactic acid)를 사용하였다. 그리고 유동을 쉽게 해석하기 위하여 ANSYS사의 시뮬레이션 패키지 Polyflow(Workbench Release 13.0)를 사용하였다. 3D 프린터의 작업조건은 Table 1.과 같고 필라멘트의 물성은 Table 2.와 같다. Table 3.은 시뮬레이션에서 시뮬레이션하려는 3D 프린터 모델의 기

본 물성들을 나타낸 것이다. 직경의 측정은 프린터의 출구부분에서 고속도카메라로 측정하였다.

Table 1. 3D Printer Specification

Factor	Unit	Figures	Factor	Unit	Figures
출력방식	—	FFF	적층두께 (정밀도)	mm	0.05 ~ 0.3
조형크기	ℓ	49 225mm×145mm×150mm	포지셔닝 정밀도	micron	X,Y : 11 / Z : 2.5
출력속도	mm/sec	40 ~ 200	압출온도	℃	200 ~ 300
노즐직경	mm	0.4	파일타입	—	STL, OBJ

Table 2. Physical Properties of PLA Filament

Factor	Unit	Figures	Factor	Unit	Figures
비중	g/cm ³	1.25 ~ 1.28	토출량 (melt flow rate)	g/10min,	5 ~ 15 (230℃ 기준)
유동밀도	Kg/m ³	1.08 ~ 1.12 (230℃ 기준)	인장강도	Mpa	48
Tg	℃	55 ~ 60	충격강도	J/m	0.16
Tm	℃	145 ~ 155	굴곡강도	Mpa	83
직경	mm	1.75	구성	%	PLA 99 + Titanium Diocide 0.6 + Toner 0.4

Table 3. Experimental Properties of Filaments at 3D Printer Head

Factor	Unit	Test conditions	Factor	Unit	Test conditions
점도	Poise	10, 500, 1000	토출량 (melt flow rate)	g/10min,	5 ~ 15 (230℃ 기준)
압출온도	℃	230	출력속도	mm/sec	100
노즐직경	mm	0.4	필라멘트 직경	mm	1.75

결과 및 고찰

1. 출구 부분에서 필라멘트의 직경 변화

3D프린터의 인쇄 전과 후의 필라멘트 두께 변화를 고속도카메라를 이용하여 측정한 결과가 Fig. 1.이다. 토출 전 필라멘트의 두께는 1.75mm이었고, 0.4mm의 3D 프린터 노즐을 통과한 후 필라멘트의 두께는 0.55mm로 측정되었으며 이 때 팽창률은 0.138 이었다.

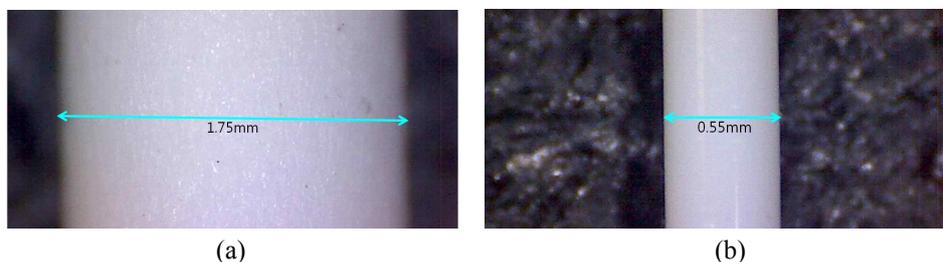


Fig. 1. The difference of filament thickness before printed (a) and after (b) in 3D printer

Fig. 2는 3D 프린터 인쇄 시 노즐입구를 200배율로 확대 촬영한 실험결과와 시뮬레이션으로 계산된 결과이다.

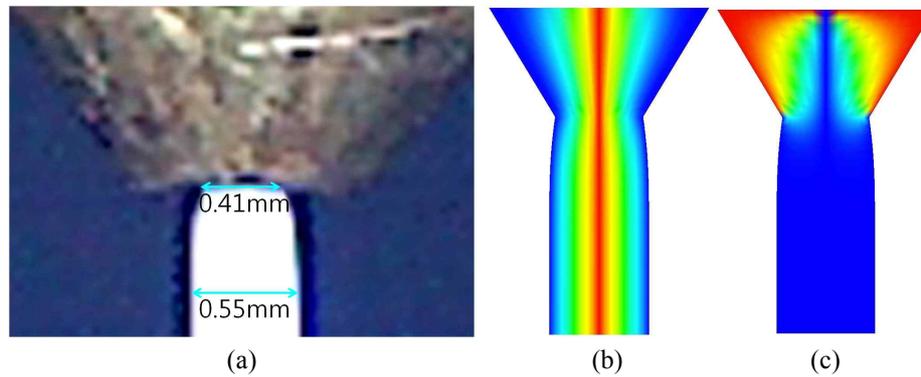


Fig. 2. Experimental result (a) and simulated results of 3D printer . (b) is simulated stream function and (c) is simulated temperature variation at the exit of 3D printer head.

Fig. 2의 (a)에서 보는 것과 같이 점탄성 물질인 필라멘트의 직경이 노즐 입구에서는 노즐 직경과 거의 일치하는 0.41mm로 측정된 반면 다이 스웰 현상으로 인쇄가 되어 나올수록 팽창되어 0.55mm까지 직경이 늘어나는 현상을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과 (b)는 필라멘트의 유선함수를 나타낸 그림이고 (c)는 필라멘트의 온도 변화를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과도 실험결과와 마찬가지로 노즐 입구에서 필라멘트가 나오면서 다이 스웰 현상이 일어나는 것을 확인하였다. 실험 결과와 시뮬레이션 결과는 거의 일치하는 것을 확인하였고, 팽창률에 영향을 미치는 수많은 요인들 중 실제 3D 프린터로 직접 적용하기 어려운 변수인 점도를 시뮬레이션을 통해 변화시켜 인쇄결과를 예측하였다.

2. 시간 및 점도에 따른 필라멘트의 시뮬레이션

1) 시간에 따른 필라멘트의 속도 변화

Table 4.는 Capillary Rheometer로 측정한 결과로서 PLA 필라멘트의 점도가 35 ~ 825 Poise인 것을 감안하여 점도를 10, 500, 1000 Poise로 각각 변화시켰을 때 필라멘트 유동 속도를 시뮬레이션한 결과이다.

Table 4. Simulated results of Filament Flow Velocity and Viscosity Changes

Results Viscosity	Simulated results				
10 Poise					
500 Poise					
1,000 Poise					

시뮬레이션 결과, 점도가 낮아질수록 팽창률이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 점탄성 물질인 필라멘트의 점도가 낮을수록 회복력이 감소하기 때문으로 해석된다.

2) 시간에 따른 필라멘트의 압력 변화

Table 5.는 역시 점도를 10, 500 그리고 1000 Poise로 변화시켰을 때 필라멘트 유동 압력(Flow

Pressure)을 시뮬레이션 한 결과이다.

Table 5. Filament Flow Pressure According to The Variation of Viscosity

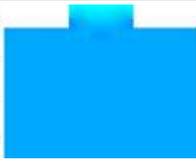
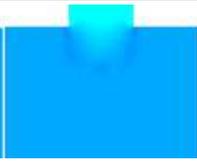
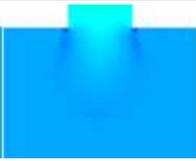
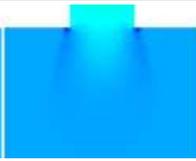
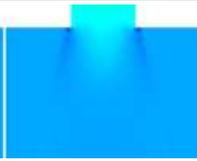
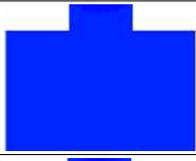
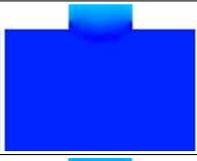
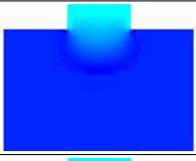
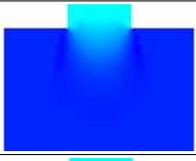
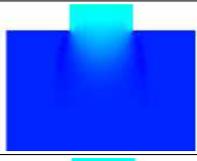
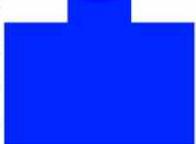
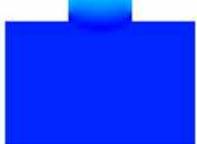
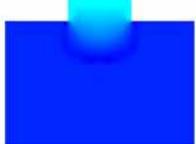
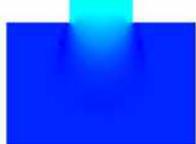
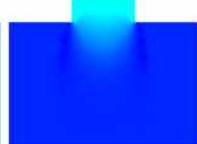
Results Viscosity	Simulated Results				
10 Poise					
500 Poise					
1,000 Poise					

Table 5에서 보는 바와 같이 점도가 높아질수록 유동 압력이 높게 적용되지만 전단속도가 낮아져서 적용범위가 좁아지는 것을 확인 할 수 있었고, 그와 반대로 점도가 낮아질수록 유동 압력이 낮게 적용되지만 적용범위가 넓어지는 것을 확인 할 수 있었다. Table 4.의 결과와 Table 5.의 결과를 토대로 필라멘트의 점도가 증가할수록 유동속도가 빨라지고 내부 응력의 증가로 인하여 유동 압력 분포는 좁아져서 팽창률이 감소하는 것을 파악할 수 있었다. 그러나 일정 점도(1,000 Poise)를 초과시켜 시뮬레이션 해본 결과, 오히려 부압력 등이 작용하여 필라멘트 토출이 이루어지지 않았다. 이는 실험 결과에서 노즐이 막히는 등의 문제를 야기 할 수 있을 것이라 생각된다.

결론

3D 프린터 헤드에서 필라멘트 변형거동에 대해 실험 및 컴퓨터 시뮬레이션을 하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 우선 시각적으로 확인 할 수 없었던 노즐에서의 고분자 수지인 PLA 필라멘트의 다이 스웰 유동 모습과 팽창률을 실험과 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인 및 비교 할 수 있었으며 실험적인 방법의 결과와 시뮬레이션의 결과가 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 이에 따라 PLA 필라멘트의 3D 프린터 헤드 노즐에서의 유동에 관한 시뮬레이션은 3D 프린터 시험인쇄 등에 이용 가능할 것으로 판단된다. 또한 점도가 증가함에 따라 회복력이 증가하여 팽창률이 감소하는 것을 확인 할 수 있었고 세 번째로는 점도가 높아질수록 유동 압력이 높게 적용되지만 전단속도가 낮아져서 적용범위가 좁아지는 것을 확인 할 수 있었다. 즉, Laun과 Schuch의 식에서 팽창률 B는 점도와 반비례하고 압력과 비례한다는 것을 확인 할 수 있었다. 본 연구결과는 3D 프린터 헤드 노즐 내부에 관한 시뮬레이션 결과들은 차후 3D 인쇄기술에 있어서, 보다 고속의 더욱 정밀한 인쇄가 가능하게하고 최적의 조건이 예측 가능하여 시간과 비용을 최소화 할 수 있는 연구에 많은 기여를 할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2015년 한국연구재단과 한국여성과학기술인지원센터의 지원을 받아 연구되었습니다.

참고문헌

1. M. Y. Lyu, *Elastomers and Composites* Vol. 46, No. 1, pp. 54-59(2011)
2. K. Wissbrun, *Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing: Theory and Applications*, pp. 332-333(2013)
3. H. J. Lehermeier and J. R. Dorgan, *Polymer Engineering and Science* Vol. 41, No. 12, pp. 2172-2184(2001)
4. S. W. Park and K. H. Gwak, *Journal of the KSME*, Vol. 395, No. 10, pp. 58-64(2013)