

3D 프린팅 노즐의 일체형 압출기 쿨링 시스템 개발손지환^a, 박현우^a, 하동우^a, 이창우^a, 김진수^a, 강성기^{a*}**Developing Integrated Compressor Cooler System of 3D Printing Nozzle**Ji-Hwan Son^a, Hyun-Woo Park^a, Dong-Woo Ha^a, Chang-U Lee^a, Jin-Su Kim^a, Seong-Ki Kang^{a*}^aComputer Aided Mechanical Design, Korea Polytechnic VII Colleges,
51-88, Oe-dongbanrim-ro, Seongsan-gu, Changwon, Gyeongnam-do, 51518, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	16	October	2016
Revised	29	December	2016
Accepted	13	January	2017

*Keywords:*3D Printer
Cooling
Flow analysis
Heat flow**ABSTRACT**

In a large 3D printer when the cooler, which cools the filament, acts in one direction, the area directly exposed to the cooling is cooled to the proper temperature. However, the cooling effect on the opposite area is relatively less. It was found in experiments that filaments with a thickness of over 2 mm exhibit the cooling problem in one directional cooling. Consequently, cooling was performed to prevent the flow-down and to produce firm support leading to an improvement in product quality in extrusion. Further, the lay-up of a 3D printer with five guides combined with a duct was achieved. Analysis showed that the improvement in the cooling effect enables stable extrusion and lay-up and thus, reduces fabrication time.

1. 서론

3D printing 기술은 설계 데이터 기반의 3차원 형상을 제작하기 위하여 CAD/CAM(computer aided design/computer aided manufacturing) System을 활용한 digital data화 된 3차원 형상을 2차원 단면으로 한 층씩 적층시켜 최종 구조물을 제작하는 제조기법이다. 최근에 활발히 연구되고 있는 3D printing 기술은 원재료의 소모가 적고 제품을 신속하게 제작할 수 있다는 장점을 가지고 있으며, 특히, 가장 보편적으로 사용되고 있는 FDM(fused deposition modeling) 방식은 일정한 온도로 가열된 노즐에 열가소성 수지 필라멘트(filament)가 이송된 후 용융 압출시키는 형태이다^[1].

일반적으로 3D printing 제품 소재로 ABS(acrylonitrile butadiene styrene)와 PLA(poly lactic acid)가 많이 사용되고 있

는데 ABS 소재의 경우에는 수축이 심하지만 구조용 부품으로 강도면에서 우수한 성질을 가지고 있으며, PLA 소재의 경우에는 열에 의한 변형이 적고 비교적 큰 출력물을 제작하기 용이한 장점을 가지고 있다. 따라서 3D printer의 출력에 있어 유리한 PLA 소재를 적용하여 냉각 쿨링 시스템에 대한 문제점을 찾아 해결하고자 하였다^[2].

현재 3D 프린터 시장은 대형 프린터의 수요가 늘어나고 있는 추세이며, 특히, 주목되는 점은 장비의 대형화와 노즐의 직경 크기 등 고려되면서 소재의 냉각성이 매우 중요시 되고 있는 실정이다.

3D 프린터가 대형으로 커질수록 소재 직경 또한 두꺼워 지게 되는데 출력되는 뜨거운 필라멘트가 제대로 냉각되지 않으면 적층 과정에서 재료의 연결성에서 끊어져 작업에 문제가 발생하게 되며, 한 층을 적층한 뒤 다음 층을 그 위에 적층하였을 때, 아래쪽 층이 단단하게 받쳐 주어야 하는데, 냉각이 잘 되지 않는 경우에 아래쪽

* Corresponding author. Tel.: +82-10-2877-6198

Fax: +82-55-260-1175

E-mail address: kskjh114@kopo.ac.kr (Seong Ki Kang).

층이 말랑말랑하거나 흘러내린 상태에서 다음 층을 적층하였을 때, 제대로 받쳐주지 못하여 품질이 저하 되는 것과 노즐이 굳어져 연속작업이 이루어지지 못할 때 작업 시간의 loss가 많이 걸리는 경우가 많다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제품 출력 시 품질향상을 위해 360°에서 동시에 냉각을 시켜주는 효율적인 쿨링 시스템을 개발하고자 하였으며, 본 연구에서 쿨링 시스템의 개발을 통해 냉각 문제가 해결된다면 장비활용의 능률성과 작업 효율성을 높일 것으로 본다³⁾.

세계경제포럼은 2014년 세계 10대 유망기술 중의 하나로 3D 프린터(3D printer)를 꼽았고, 미국의 오바마 대통령도 3D 프린터가 “제 3의 산업혁명”을 일으킬 것이라고 하였다. 세계미래학회는 3D 프린터가 생산혁명을 일으킬 것이라 예측하였고, MIT 테크놀로지 리뷰도 2014년 세상을 바꿀 10가지 기술 중 하나로 3D 프린터를 꼽았다.

앞으로 점차 건물과 같은 대형 구조물을 대형 3D printing으로 제작하는 연구가 많이 진행이 되고 있으며, 현재 University of Southern California를 중심으로 건축물 3차원 printing 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 들어 뉴욕의 D-shape enterprises사는 약 2400 평방피트의 집 및 수영장장 3차원 printing으로 제작하는 계획을 세웠고 실행 중에 있다. 또한, 중국의 WinSun decoration design engineering사는 이 기술을 이용하여 다층의 집을 건설하는 사업을 착수하고 있는 실정이다.

Fig. 1에서는 일체형 압출기의 구조를 나타내고 있는데, 원료가 동그랗게 말려있는 filament spool을 압출기로 삽입시키면 소형 평기어(spur gear) 2개가 소재를 당겨 노즐로 유도시킨다. 압출기는 노즐로 정확한 필라멘트의 양을 공급 할 수 있으며, 노즐의 문제 발생 시 기어를 역회전하여 소재를 다시 철회할 수 있는 pinch system을 사용한다.

기어에서 통과된 소재는 히터 헤드 블록(heater head block)으로 이동되며, 히터 헤드 블록의 온도는 필라멘트가 녹을 수 있는

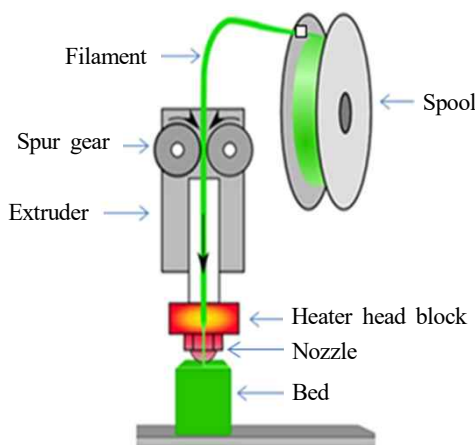


Fig. 1 Extruder structure

260°C로 가열되어 더 작은 직경의 필라멘트로 출력시키게 된다.

이 압출된 원료들을 프린터 헤드(printer head)나 베드(bed)가 X, Y, Z 축으로 정확한 지점에 위치하도록 움직이면서 설정된 양만큼 분출하여 적층하게 된다.

2. 쿨링의 초기설계

3D printer에서 실제 사용하는 샤프트 블록, 베어링, 기어, 팬 등 3D printer 출력 부분의 일체형 형상으로 제품 출력 시 품질향상을 위한 새로운 쿨링 시스템을 개발하고자 하였다.

기존의 단 방향 쿨링 방식과 다른 다 방향 쿨링 방식을 적용하는데 있어 가장 고려해야 할 부분은 먼저 노즐에서 출력되는 소재를 냉각하는 온도이다. 일반적으로 PLA 소재 출력 시 권장하는 온도는 190~210°C 정도이다⁴⁾.

본 연구의 초기단계에서는 팬(pan)과 쿨링 4개를 설치해 냉각하려 하였으나, 이 경우 쿨링 duct에서 출력되는 공기의 토출량이 과잉되어 효율성이 떨어지는 결과를 알 수 있었고, 이후 여러 논의와 실험을 통해 팬에서 출력되는 공기의 안정적인 흡입과 균형적인 출력을 위한 구조를 고안하여야 한다는 필요성을 가졌으며, 특히, 이 구조는 단 방향 쿨링과 비교했을 때 높은 효과가 있을 것으로 기대하였다.

따라서 본 연구에서 쿨링의 형상제작을 위해 2D AutoCAD 도면작업과 3D형상모델링을 CATIA, Inventor 소프트웨어를 활용하여 설계하였고, 2D 도면과 3D 형상을 구현해 부품들을 조립하여 최종 형상에 가깝게 표현하였다.

각 파트들은 부품형식으로 설계되었으며 조립 및 분해가 쉬운 구조로 제작되었다.

Fig. 2는 현재 사용되고 있는 0.6 mm 필라멘트 작업이 가능한 소형 3D 프린팅의 장치 구조를 보여주고 있다.

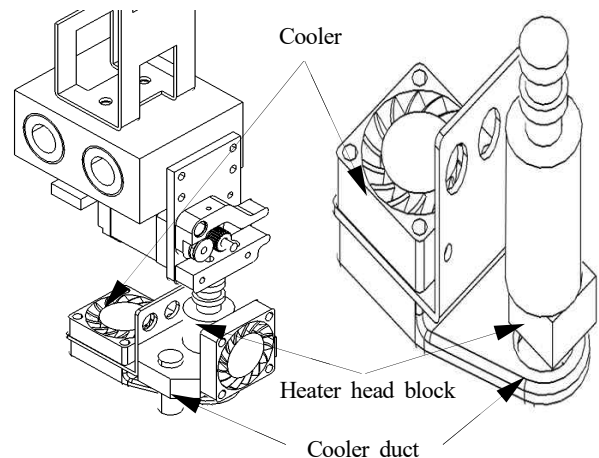


Fig. 2 Equipment structure modeling of 3D printing

3. 필라멘트(filament)의 해석

3.1 필라멘트의 열 해석

3.1.1 필라멘트 직경에 따른 열 해석 실험

여러 방향에서 출력되는 쿨링의 필요성을 확인하기 위해 필라멘트 굽기에 따른 열 수축 및 변화에 대한 해석을 진행하였다. 해석을 진행하기 위해 ANSYS(workbench 15) 소프트웨어의 CFX Tool을 사용하였으며, Table 1은 실험에 적용된 조건이며, 한 방향에서 바람을 불어 냉각하도록 하여 해석을 하였고, 해석결과에 따라 적합한 필라멘트의 굽기를 찾자 하였다.

Table 2는 해석한 결과 필라멘트의 굽기에 따른 소재의 전면과 후면의 온도 차이를 나타내고 있고, Fig. 3(a)~(d)는 필라멘트의 굽기에 따른 해석결과를 보여주고 있다.

(a)에서는 0.6 mm 굽기의 필라멘트를 조건에 따라 실험한 결과 전면에서 106°C, 후면에서 140°C로 전면과 후면의 온도차이가 34°C 차이가 있었고, 전면은 냉각이 이루어지고 있으나, 후면의 냉각이 전면보다 잘 안되었지만 직경이 작아 작업에는 크게 영향이 없는 것으로 나타났다.

1 mm 필라멘트에서는 전면에서 냉각온도는 오히려 0.6 mm 보다 전면에서 6°C, 후면은 14°C로 전면과 후면에서 냉각온도가 높게 나타났는데, 이것은 필라멘트의 굽기가 굽을수록 냉각이 잘 되지 않는다는 것을 알 수 있었고 필라멘트 2 mm, 4 mm 에서도 전면과 후면의 냉각온도 차이가 각각 66°C, 75°C로 필라멘트의 굽기가 굽을수록 한 방향에서 냉각을 할 시에 잘 이루어지지 않는 것을 알 수 있었다.

3.1.2 한 방향 쿨링 시 전면과 후면의 온도 측정

Fig. 4에서는 현재 상용화를 위해 개발된 대형 3D printer로 크

Table 1 Experimental boundary conditions for the analysis

Apply item	Condition of application			
	0.6 mm	1 mm	2 mm	4 mm
Filament size				
Filament temperature	200°C			
Cooling temperature	40°C			
Wind speed	3 m/sec			

Table 2 Temperature result according to filament size

Size	Front	Back side	Difference
	Temperature (°C)		
0.6 mm	106.0	140.0	34.0
1 mm	112.0	154.0	42.0
2 mm	113.0	179.0	66.0
4 mm	117.0	192.0	75.0

기는 가로, 세로 및 높이가 1,000×1,000×1,500 mm이며, 한 방향 쿨링이 후면에 설치 적용되었다. 필라멘트의 직경은 1 mm를 사용하여 작업시 전면(a: 쿨링 효과를 받지 않는 필라멘트)과 후면(b: 쿨링 효과를 받는 필라멘트)의 온도를 측정하였다.

Table 3은 온도측정에 사용된 비접촉식 온도 측정기의 사양을 나타내고 있으며, Table 4는 0.6 mm와 1 mm의 필라멘트의 굽기에 따른 전면과 후면의 온도를 측정된 결과 값이다. Fig. 5는 필라멘트 0.6 mm, 1 mm일 때 온도 측정된 결과를 보여주고 있으며, 쿨링을 받을 경우 필라멘트 직경이 0.6 mm일 때 전면에서는 102~103°C이며, 쿨링을 받지 않는 후면에서는 140~142°C로 전면과 후면의 온도 차이가 38~39°C 정도였다. 직경이 0.6 mm일 경우에는 크게 작업에 문제가 없는 것으로 나타났다.

필라멘트 직경 1.0 mm의 경우에는 전면에서는 108~109°C로 측정되었고, 쿨링을 받지 않는 후면에서는 154~156°C로 측정되어 전면과 후면의 온도가 46~47°C로 차이를 보여, 직경이 클수록 온도 차이가 많이 났고, 적용되는 작업에도 다소 거친면과 필라멘

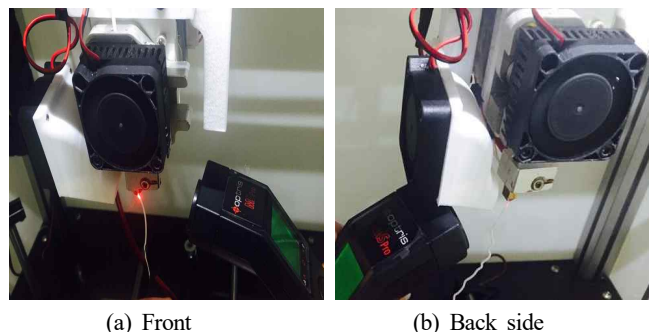
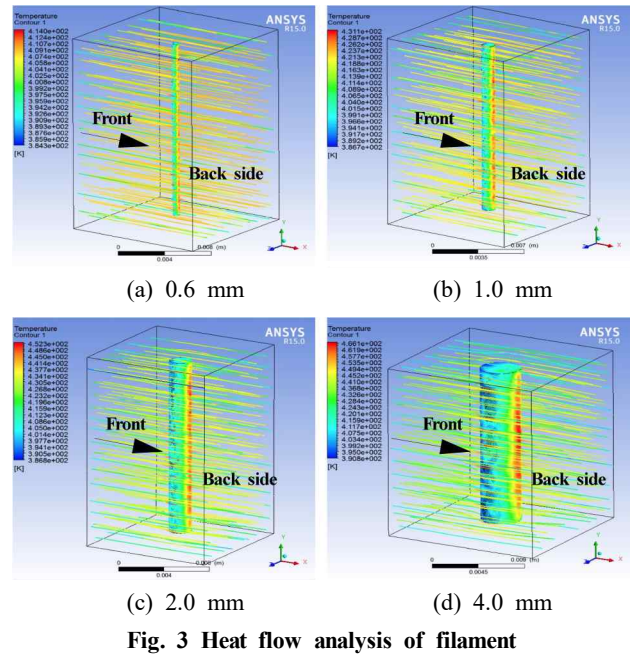


Fig. 4 Filament temperature measure of front and back side

Table 3 Specifications of the non-contact temperature measurement

Item	Performance
Temperature range	-32~760°C (-20~1440°F)
Accuracy	±1% or ±0.75°C (0~760°C) ±1°C ±0.07°C (0~32°C)
Repeatability	±0.75% or ±0.75°C (0~760°C) ±0.75°C ±0.07°C (0~32°C)
Resolution(display)	0.1°C (0.1 °F)
Response time(95%)	300 ms
Spectral range	8~14 μm
Configurations	HOLD, °C / °F, Offset
Software	Optris connect report software

Table 4 Temperature result according to filament size

Size	Front	Back side	Difference
	Temperature		
0.6 mm	102.0-103°C	140.0-142°C	38-39°C
1 mm	108-109°C	154-156.0°C	46-47°C

트의 막힘 등의 현상이 발생되었음을 확인할 수 있었다.

현재 2 mm, 4 mm는 국내에서 개발된 것이 없어 측정실험을 하지 못하였으나 향후에 장비 개발이 된다면 본 논문의 자료가 유용하게 이용될 것으로 사료된다.

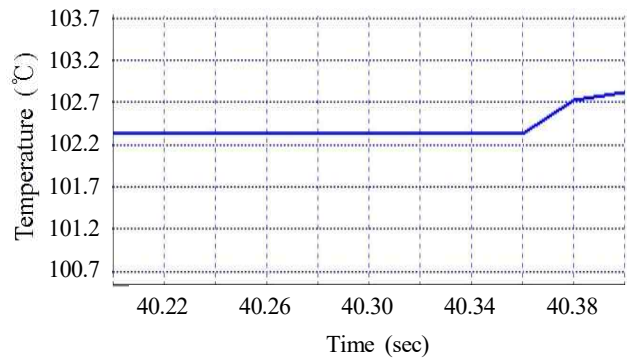
3.2 Cooler의 유체 열 해석

앞에서 해석을 통해 필라멘트 굽기가 굽을수록 쿨링의 효과가 적게 나타났고, 필라멘트 굽기가 1 mm 이하 보다 2 mm 이상에서 냉각효과가 많이 떨어짐을 확인할 수 있었다. 초기설계에서 분석된 결과에서 본 바와 같이 한 방향에서 냉각 시 필라멘트의 굽기가 굽을수록 냉각효과가 떨어진다는 점을 고려하여 유체를 한방향이 아닌 6방향으로 흘려보내는 실험을 진행하였다.

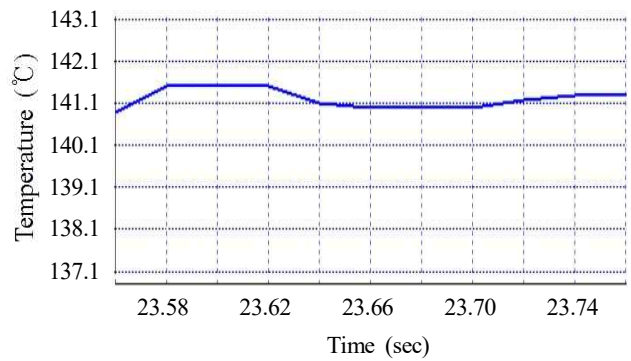
Fig. 6은 초기 설계한 구조의 해석 결과로 바닥이 납작한 덕트 구조 때문에 공기의 흐름이 원활하지 않아 냉각을 균일하게 시켜 주지 못하였다. 또한, 한 방향 쿨링 시스템의 효과와 차이가 없었다. 따라서 문제점을 해결하기 위해 Fig. 7의 미끄럼틀 형상으로 덕트를 변경하였고, 그 결과 공기의 흐름은 개선되었지만 ①, ②, ⑥번 구멍에서 공기의 출력이 집중적으로 이루어져 충돌이 일어나면서 반대방향에서 출력되는 공기를 오히려 밀어내는 현상이 발생되었다.

Fig. 8에서는 바람 충돌현상을 개선하기 위해 ①번 출력구를 막고 실험해 보았으나 Fig. 7과 비슷하게 유체의 흐름이 집중되지 않았다.

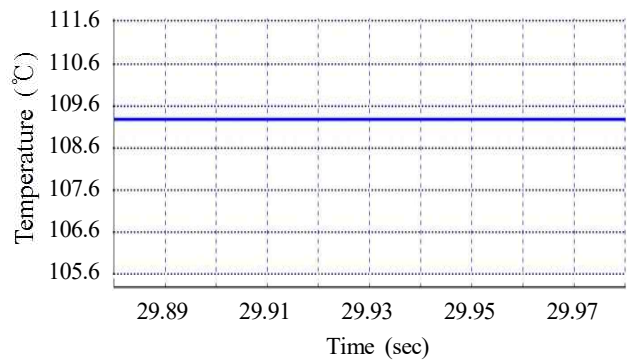
Fig. 9와 같이 기존의 6개의 출력구를 5개로 변경해보았으나 역



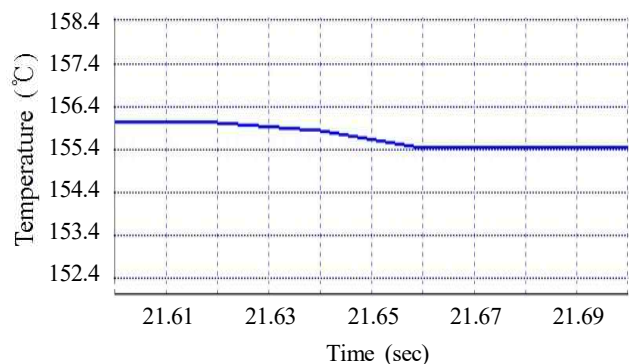
(a) Front (0.6 mm filament)



(b) Back side



(c) Front (1.0 mm filament)



(d) Back side (1.0 mm filament)

Fig. 5 Result of temperature measurement when 0.6 mm and 1 mm

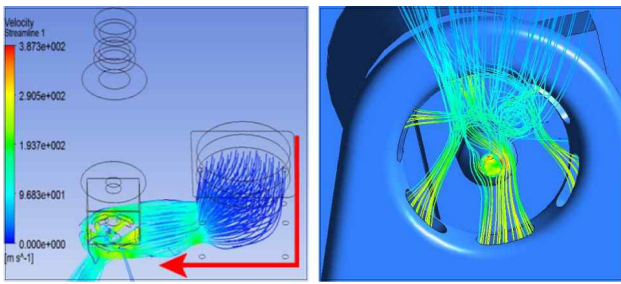


Fig. 6 Flat duct structure of initial design

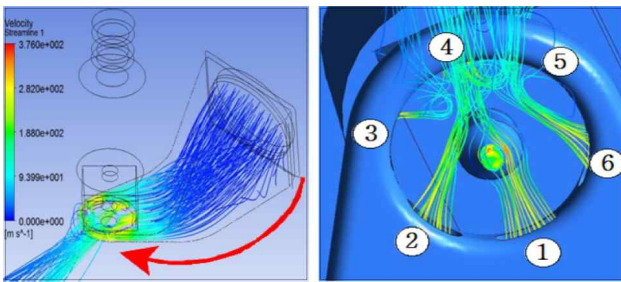


Fig. 7 Change of the duct structure to a slip shape

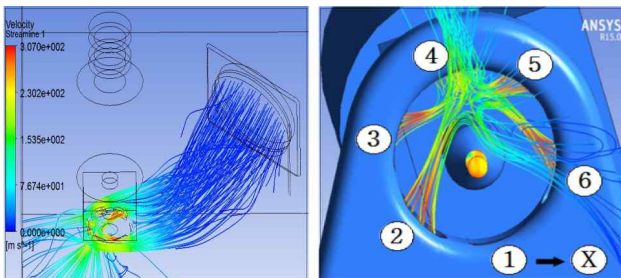


Fig. 8 Blocking a hole to change the arrangement

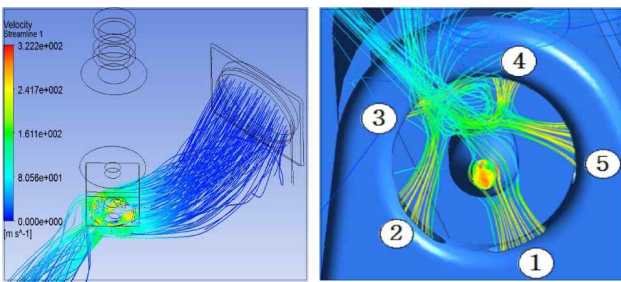


Fig. 9 After changing the output hole five

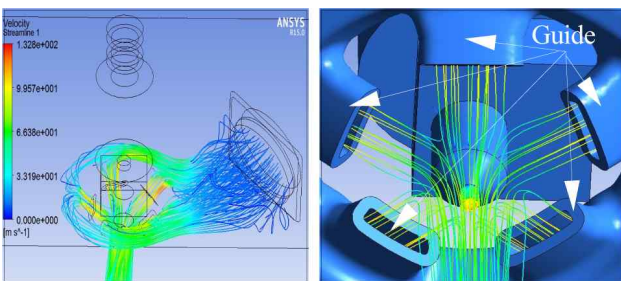


Fig. 10 Improved product with guide installation

시 출력되는 바람이 노즐 쪽으로 집중되지 않았고, 출력되는 바람의 방향을 Fig. 10과 같이 가이드를 설치함으로써 바람의 흐름이 가이드를 통해 중심으로 집중되었음을 알 수 있었고, 유량손실 또한 최소화되어 필라멘트의 표면을 균일하게 냉각시킬 수 있다는 것을 확인하였다.

4. 360° 쿨링 Duct의 설계 및 개발

4.1 360° 쿨링 설치 시 시제품 품질 비교

Fig. 11은 개발된 360°의 쿨링 duct를 설계한 2D 도면이며, Fig. 12는 3D 모델링 작업한 것이다.

기존 설계된 6개의 출력구는 공기를 안내함에 있어 균등한 출력이 나타나지 않아 냉각효율이 떨어질 수도 있다는 문제점이 있었으나 개발된 시제품은 5개의 출력구로 설계하였고, 뿐만 아니라 냉각 효과를 증대시키기 위해 출력구에 가이드를 설치하여 공기의 방향을 중심으로 균등하게 모이게 함으로써 쿨링 효과를 극대화시켜 기존의 쿨링 방식에 비하여, 제품의 질을 한층 더 향상시킬 수 있었다.

개발된 쿨링 duct 가이드를 설치함으로써 3D printer의 주요 소재인 ABS를 사용하여 직접 손쉽게 출력할 수 있는 장점과 시간적

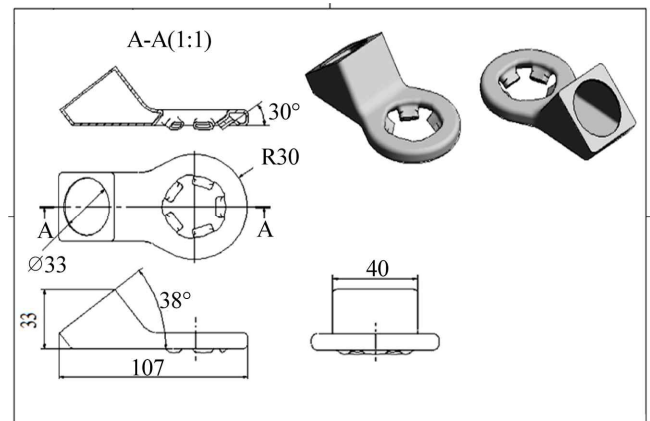


Fig. 11 2D Detail drawings of the cooler ducts

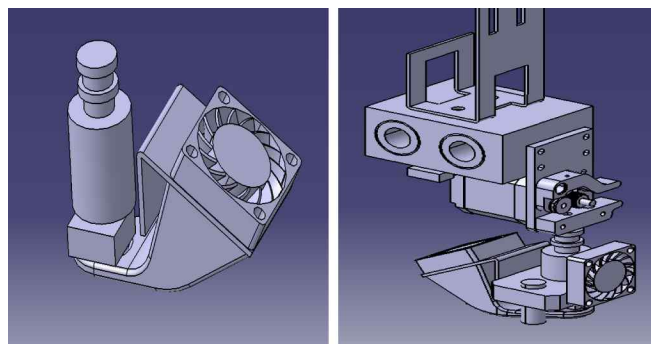


Fig. 12 Final assembly of the modified cooler duct

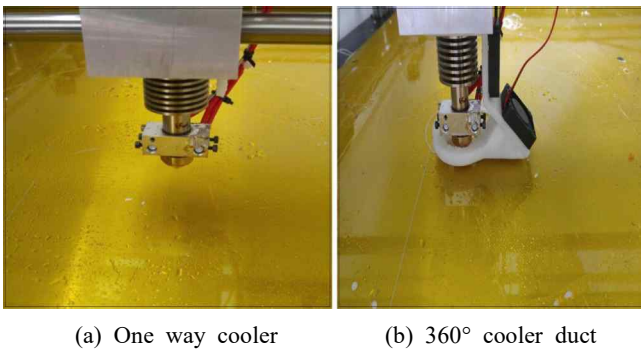


Fig. 13 Equipment comparison of existing and development



Fig. 14 3D Print comparison in one direction and 360° direction

경제성을 가질 수 있는 것으로 분석되었다. 앞으로 3D printer 시장이 확대 및 대형화됨에 따라 360° 쿨링 시스템 적용은 가능할 것으로 분석된다.

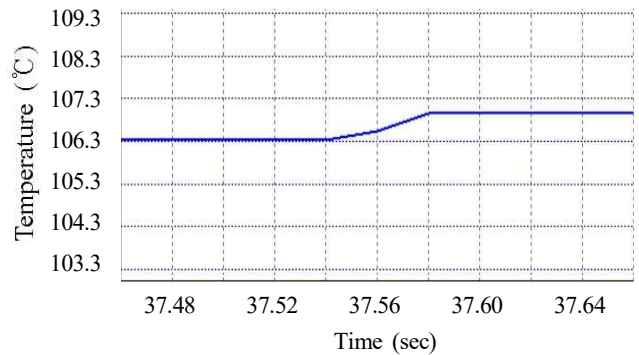
Fig. 13(a)의 경우는 기존 3D printer로 한 방향에서 냉각시키는 쿨링 장치이며, (b)는 개발 설계한 쿨링 duct의 시제품을 장착시킨 장치를 보여주고 있다. 또한, 가공실험의 결과를 분석하기 위해 Fig. 13에서 필라멘트 1 mm를 적용하여 가공 실험을 하였다. Fig. 14(a)는 기존 한 방향에서 냉각시킨 시제품이고, (b)는 개발한 쿨링 duct를 장착한 상태에서 가공된 시제품이다.

필라멘트 직경 1 mm 소재를 재료의 물성과 필라멘트 온도 200°C, 쿨링온도 40°C, 출력속도 3 m/sec, 출력모델링의 기본조건 등을 동일하게 세팅하여 한 방향 쿨링과 360° 쿨링에서 만들어진 시제품을 품질 비교하였다.

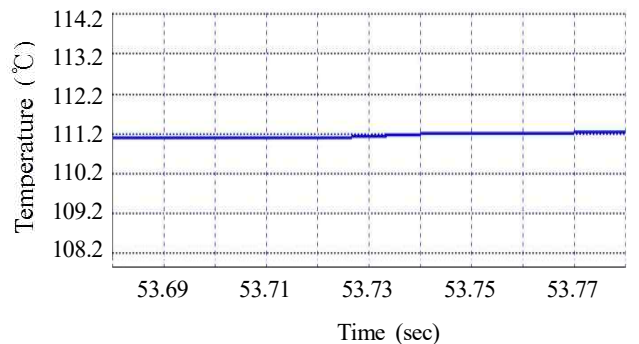
장착전인 Fig. 13(a)에서 출력된 시제품은 Fig. 14(a)에서 보는 바와 같이 제품의 뜯김 현상과 적층이 제대로 이루어지지 않아 거친 면을 가지는 것을 확인 할 수 있었으며, 반면에 Fig. 14(b)에서 쿨링을 장착하여 적층되어 만들어진 가공면은 깨끗하고 품질이 우수한 것으로 나타났고 적층과정에서 문제가 발생되지 않아 출력시간이 줄어드는 효과를 가지고 있는 것으로 분석되었다.

4.2 360° 쿨링 설치 시 필라멘트 전·후 온도 측정

Fig. 15는 개발된 360° 쿨링을 사용하여 필라멘트 1 mm를 적용



(a) Front



(b) Back side

Fig. 15 Temperature range of front and back side

할 때 시제품 제작 시 필라멘트의 전·후면 온도를 측정된 결과를 보여주고 있다.

온도를 측정된 결과 필라멘트의 전면에서는 105~107°C이며, 후면에서는 110~112°C로 측정되어 전면과 후면의 온도차이가 5°C 정도 나타났고, 전·후면 온도 차이가 거의 없어 작업이 원활하게 이루어지는 것을 볼 수 있었다.

따라서 한 방향 쿨링에서는 필라멘트의 직경이 1.0 mm 이하의 경우에는 온도의 영향을 많이 받지 않지만, 필라멘트 직경이 1.0 mm 이상일 경우에는 전·후면 온도 차이가 많이 발생되어 적층되는 작업에서도 거친면과 필라멘트의 막힘 등의 작업 지연 현상이 발생되어 제품생산에 문제가 발생하지만, 개발된 360° 쿨링을 사용할 경우 이러한 문제점이 해결되어 제품생산의 효율성과 원가절감에 기여할 것으로 분석된다.

5. 결론

현재 3D 프린터는 대형 프린터의 수요가 늘어나고 있는 추세에 맞추어 작업의 효율성과 품질의 고급화가 요구되고 있으며, 대형으로 커질수록 필라멘트 소재 직경 또한 두꺼워지게 되는데, 출력되는 필라멘트가 제대로 냉각되지 않으면 적층 과정에서 재료의 연결성이 끊어져 작업 효율성에 문제가 발생하게 됨으로 소재의 냉각방

법이 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 3D 프린터의 냉각효율을 높일 수 있는 쿨링 덕트의 설계를 열·유동해석(fluent)을 통해 분석하고, 필라멘트의 직경과 덕트의 형상을 조정하여 실험을 실시하였다.

보통의 3D 프린터는 0.4~0.8 mm의 노즐을 사용하기 때문에 필라멘트의 직경이 작아 한 방향 냉각만으로도 충분히 냉각되지만, 2 mm 이상의 경우에는 냉각이 효율적으로 이루어지지 않는다는 것을 CFX 해석을 통해 알 수 있었으며, 직경이 2 mm 이상인 필라멘트를 360°로 냉각 할 때 효율적으로 이루어짐을 알 수 있었다.

3D프린팅 작업 시 필라멘트 0.6 mm의 경우에는 전면과 후면의 온도 측정에서 38~39°C 정도 차이가 있으나 작업에는 문제가 되지 않는 것으로 나타났으며, 필라멘트의 직경이 1 mm에서는 전면과 후면의 온도 차이가 46~47°C 정도로 차이를 보였는데 이것은 열 해석에서도 알 수 있듯이 직경이 클수록 온도 차이가 많이 나는 것을 알 수 있었다.

기존 설계된 6개의 출력구는 공기를 안내함에 있어 균등한 출력이 나타나지 않아 냉각효율이 떨어질 수도 있다는 문제점이 있었으며, 이를 해결하기 위해 5개의 출력구로 수정하여 설계에 반영하였고, 뿐만 아니라 냉각효과를 증대시키기 위해 출력구에 가이드를 설치하여 공기의 방향을 중심으로 균등하게 모이게 함으로써 쿨링의 효과를 극대화 시켰다.

필라멘트 1 mm의 3D 프린팅 작업 시 한 방향 쿨링장치와 360° 쿨링장치에서 만들어진 시제품을 비교한 결과 한 방향 쿨링에서는 적층되는 작업에도 다소 거친면과 필라멘트의 마힘 등 현상이 발생되었으나, 개발된 360° 쿨링 장치를 사용하여 시제품제작 시 필라

멘트의 전·후면 온도를 측정한 결과 필라멘트의 전면에서는 105~107°C이며, 후면에서는 110~112°C로 측정되어 전면과 후면의 온도 차이가 5°C 정도로 온도 차이가 거의 없이 냉각효과를 증대시켜서 안정적인 출력 및 적층이 가능하였고, 가공시간이 절감되는 효과를 가지는 것으로 분석되었다.

후 기

이 논문은 2016년도 한국공작기계산업협회에서 시행하는 「제8회 대학생 공작기계 창의 아이디어 공모전」에 참여하여 연구된 과제이며, 또한 한국폴리텍대학 bluetooth팀에 의해 멘토기업 본 시스템즈와 프로젝트과제를 수행한 연구 결과입니다.

References

- [1] Han, C. M., Lee, B. K., 2015, Surface Characteristic in Mechanical Machining of 3D-printed ABS Part, Proceedings of the KSMPE Conference, 77.
- [2] Park, J. H., Park, S. J., Lee., K. H., Lyu, M. Y., 2015, A study on the Deposition Strength of 3D Printed Specimen by Fused Deposition Modeling Process, Fall Conferences of the KSMTE, 43.
- [3] Choi, J. W., Kim, H.C., 2015, 3D Printing Technologies-A Review, Journal of the KSMPE, 14:3 1-8.
- [4] Choi, C. Y., 2016, 3D Printer Particle Emission Characteristics Measurement, A Thesis for a Master Degree, Hanyang University, Republic of Korea, 26.