

3D 프린팅 적용 철도차량용 공기압축기의 열교환기 설계 및 제작 기술 연구

김무선

한국철도기술연구원 광역도시철도융합연구소

Design and Manufacturing Technology of Heat Exchanger in Air Compressor for Railroad Vehicle by 3D Printing Process

Moosun Kim

Metropolitan Transit Convergence Research Division, Korea Railroad Research Institute

요약 3D 프린팅 제조 기술은 폴리머 및 금속 소재를 구조물 형상으로 적층하여 제품을 제작하는 성형기술로서, 설계 자유도가 높고 기능성을 요구하는 부품 제작에 유리하다. 또한 다품종 소량 생산 특성으로, 향후 철도 차량 부품 제작에 적합한 기술이다. 3D 프린팅 기술의 장점을 충분히 활용하기 위해서는 제품 설계시 공정 특성 고려가 필수이다. 이번 연구에서는 철도차량용 공기압축기의 열교환기를 대상으로, 3D 프린팅 기법 적용을 통한 제작을 위해, 성능과 공정조건을 고려한 제품의 재설계 및 제작 기술을 연구하였다. 먼저 열교환기의 성능을 높이기 위한 설계 컨셉을 정의하고 기존 열교환기의 시험을 통해 성능 분석 후, 이를 만족하기 위한 컨셉 설계 범위를 지정하였다. 또한 금속 3D 프린팅의 제작 한계 및 제작 시간, 특성 등을 고려하여, 상세 설계에 관한 수정을 진행하였다. 도출된 최종 설계안을 토대로, 알루미늄 소재를 사용하여 3D 프린팅 공정을 통해 제품을 제작하고 치수 정밀도를 만족함을 확인하였다. 최종 중량은 기존 제품 대비 41%의 중량 절감 효과를 보였다. 본 연구를 통해, 3D 프린팅 기술 활용을 위한 제품 설계 과정을 정립함으로써, 향후 3D 프린팅 기술 적용시 효율적인 설계가 가능할 것이다.

Abstract 3D printing technology is a manufacturing process for products, in which polymer and metal materials are laminated to form structures. It is advantageous for manufacturing parts requiring a high degree of design freedom and functionality. In addition, it would be a suitable technology for the production of parts for railway vehicles in the future, due to the need to produce parts in small quantities. In order to fully exploit the advantages of 3D printing technology, it is necessary to consider the process characteristics during the design of the product. In this study, the redesign and manufacturing technology of the product considering the performance and process conditions were studied for the heat exchanger in the air compressor of railway vehicles, as a trial application of the 3D printing technique. First of all, the design concept to improve the performance of the heat exchanger was defined, and the design range was specified to satisfy the performance of the present heat exchanger analyzed experimentally. Then, the detailed design was revised considering the characteristics of the metal 3D printing process, such as the manufacturing restrictions and production time. Based on the final design, the product was fabricated by the 3D printing process using aluminum material, and it was confirmed that the dimensional accuracy was satisfied. The weight of the final product was reduced by 41% compared with the existing products. The results of this study will make it possible to develop an efficient product design process for 3D printing technology.

Keywords : 3D Printing, Air compressor, Heat exchanger, Railway vehicle, Redesign

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었음

*Corresponding Author : Moosun Kim(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5546 email: mskim@krrri.re.kr

Received September 29, 2017

Revised October 18, 2017

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

1. 서론

3D 프린팅 기술(적층 제작 기술, Additive Manufacturing process)은 개발 초기엔 주로 제품 모형 제작 등에 적용되었으나, 현재는 기술발전에 의해 실제 제품 제작에 쓰이는 등 그 활용범위가 확대되고 있다. 3D 프린팅 기술 원리는 기본적으로 제작하고자 하는 구조물의 형태를 따라 폴리머 또는 금속 등 적용 소재의 반복된 적층 공정과 경화 또는 소결 공정 등을 통해 제작을 완료하게 된다. 3D 프린팅 기술의 장점은 제품 제작시 기존 제작 방식에서 벗어나, 빠른 시간 안에 제품 형상을 구현할 수 있고, 기능성이 필요한 부품의 복합 형상을 복잡한 공정 없이 제작할 수 있으며, 제작시 필요한 공정 절차를 줄일 수 있는 잇점들이 있다. 또한 설계 자유도가 향상되어, 성능 및 효율이 높은 설계가 가능하며, 동시에 경량화 등의 효과를 가질 수 있다. 이러한 장점은 공정 기술뿐만 아니라, 설계 및 해석 소프트웨어의 기술 발전에 힘입은 바가 크다고 할 수 있다.

하지만, 3D 프린팅 기술의 다양한 장점에도 불구하고, 현재 기술 수준으로 활용 범위에 있어 한계점도 분명하다. 폴리머 기반 소재는 엔지니어링 플라스틱 적용과 더불어 제작 기술에서 많은 발전이 있는 반면, 금속 소재 적용은 아직까지 제작 조건 선정에 제약이 많다. 따라서 금속 소재의 3D 프린팅 적용 제품 설계시 공정 조건 등을 고려하여 최적 설계를 진행해야 한다.

현재까지 3D 프린팅 기법을 활용한 제품 개발 관련하여 최적 설계 기법 및 제작 기술 중심으로 많은 연구들이 수행되었다. 먼저, 제품 최적 설계에 관한 연구로, Lee[1]는 발전소 부품을 대상으로 구조최적 설계 및 3D 프린팅 제조 공정기술에 관한 연구를 수행하였으며 Yi[2]는 3D 프린팅 기법을 활용한 솔레노이드 밸브 설계연구를 진행하였다. 제작 기술 관련 연구로, Kim[3]은 3D 프린팅-캐스팅 복합공정에 관한 연구를 진행하고 관련 장비를 개발하였다. Jung[4]은 정밀 스테이지를 3D 프린팅 기법으로 제작하는 연구를, Ahn[5]은 3D 프린팅 기술의 금형 적용 기술 관련 연구를, 그리고 Jo[6]는 LCD와 UV-LED를 활용한 3D 프린팅 기법에 관한 연구를 수행하였다. 또한 Kim[7]은 DMT기술을 활용한 핵연료 제조에 관한 연구를 수행하였으며 Kim[8]은 PDMS와 3D 프린팅 기술을 활용하여 슬롯-다이 코터에 관한 연구를 수행하였다. 다양한 분야의 연구 예로는 Jung[9]

은 건축분야에서 3D 프린팅 기술의 활용 방식에 관한 연구를 수행하였고, Jung[10]은 3D 프린팅으로 제작된 금속 코어와 치과용 도제간의 결합력에 관한 연구를 수행하였다.

위에서 언급한 연구의 대부분은, 설계 기법 또는 제작 기법 등 독립된 분야의 기술을 중심으로 연구를 수행하였다. 하지만 금속 3D 프린팅 기술과 같이 설계 사양에 공정 조건의 고려 여부가 중요한 경우, 설계와 제작 공정을 독립적으로 고려하기보다, 공정 조건을 함께 고려한 설계 방식의 연구가 금속 3D 프린팅 기술의 적용 효과를 향상할 수 있는 주요 방안이 될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 철도 차량 부품 중 열교환기를 대상으로, 부품 성능 향상과 경량화를 목표로, 금속 3D 프린팅 기법의 제작 특성을 고려한 최적 설계를 진행하였다. 이러한 과정에 있어, 제품 컨셉 설계안을 정의함과 동시에, 3D 프린팅으로 제작시 제작시간과 써포트 설치를 최소화 할 수 있도록 공정 조건을 고려한 설계안의 수정을 진행했으며, 실제 제품을 제작하여, 설계안의 타당성을 검증하였다.

2. 부품 및 공정 특성

2.1 철도차량용 열교환기 특성

이번 연구의 개발 대상은 철도차량에 쓰이는 공기압축기에서 발생한 고온 압축공기를 냉각하기 위한 열교환기이다. 공기압축기는 철도차량의 공기 제동 및 공압식 출입문의 동력으로 쓰이는 등 중요한 역할을 수행한다. 여기에 쓰이는 열교환기는 압축공기의 저장 효율을 높인다. Fig.1은 다단식 공기 압축기 시스템을 보여주며, 2단으로 구성된 열교환기는 핀-튜브 형태를 가진다.

기존 방식으로 제조되는 열교환기는 핀-튜브를 브레이징 공법으로 접합 및 용접방식을 적용한다. 공기 압축기에 부착된 후, 압축을 위한 모터의 회전운동으로 지속적인 진동환경에 놓이게 되며, 고압의 내부 환경 때문에, 운영 중에 본체에서 균열이 발생하여 압축공기의 누설이 발생하는 등의 문제가 있다.

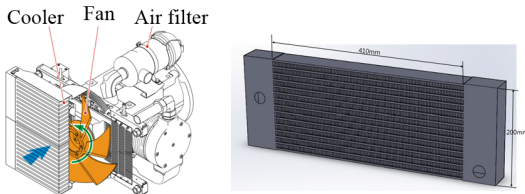


Fig. 1. Air compressor and heat exchanger

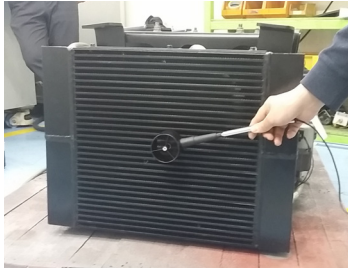


Fig. 2. Test for cooling air speed

또한 열교환 성능 요인 때문에 핀-튜브의 개수 및 크기가 일정 수준 이상이어야 하며, 그로 인해 냉각팬의 크기도 커지게 되며, 본체와 연결하는 압축공기 배관 시스템도 증량을 더하게 된다. 따라서 열교환기의 최적설계를 통해 효율을 향상할 수 있다면, 시스템의 전체적인 중량 절감이 가능하며, 냉각 팬 가동을 위한 모터 부하도 줄일 수 있는 잇점이 있다.

현 사양 제품의 성능 평가를 위한 시험 결과는 1단 열교환기는 3bar의 압력 환경에서 192℃로 입력된 압축공기가 64℃의 토출 온도를 가지며, 2단 열교환기는 9bar의 압력에서 208℃ 입력 온도와 53℃의 토출 온도를 보인다. 외부 냉각팬에 의한 냉각공기의 풍속은 Pitot tube (Furness, FCO65-E225)를 이용하여 측정된 후 Pitot tube의 차압을 2Pa의 정확도를 갖는 차압계(Testo 480)로 측정된 결과, 평균 8.8m/sec 값을 가진다.(Fig.2) 이 중 작동 환경이 더 불리한 2단 열교환기를 대상으로 재설계를 진행하였다.

2.2 3D 프린팅 기술 특성

금속소재를 기반으로 하는 3D 프린팅 주요 기법으로는 SLS(Selective Laser Sintering)와 DMD (Direct Metal Deposition)방식을 들 수 있다.[7] 두 기술 모두 금속 분말을 이용하여 3차원 형상을 제작하는데, SLS는 파우더 베드 형태로서, 리코터라는 도구를 활용하여 파우더를 공급시스템에서 이동하여, 소결 베드위에

적층하게 된다. 그 후 레이저빔이 조사되어 구조물이 위치할 부분의 파우더를 소결하는 방식으로 제품을 제작하는 방식이다.

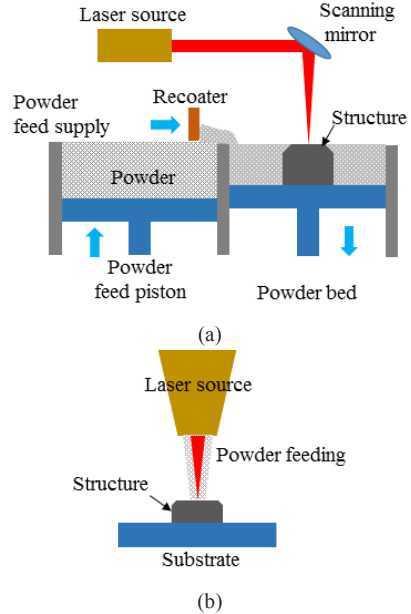


Fig. 3. Schematic diagram of (a)SLS (b) DMD

DMD는 금속 파우더를 적층 면에 분사하면서 동시에 레이저빔의 조사를 통하여 금속 파우더의 용융 및 고착 원리를 활용한 기법이다. SLS방식은 설계 자유도가 높은 장점이 있으며, DMD 방식은 완전 용융을 통한 조직의 치밀도 등을 장점으로 들 수 있다.(Fig.3)

이 중 설계자유도가 우수한 SLS방식의 주요 특성을 살펴보면, 에너지 밀도는 레이저 파워, 스캐닝 속도, 스캐닝 거리 및 층 두께에 직접적으로 영향을 받는다. 이들 변수간의 적절한 조합을 통해, 최종 구조물의 물성과 제작 시간 등을 선정할 수 있다.

그 외 주요한 공정 특성 사항으로는 써포트(support) 제작과 구조물 적층 방향 및 위치선정에 관한 고려가 필수이다. 써포트는 기본적으로 구조물의 안정적인 적층을 위해 필요한 부가물이다. 구조물은 고밀도의 파우더 상에서 제작이 되는데, 파우더의 지지력과 열전달 등의 특성이 낮아, 적층시 써포트 제작을 통해 하중지지 및 열전달 등의 효과를 향상할 수 있다. 또한 리코터가 지날 때 발생할 수 있는 구조물과의 충돌로부터 구조물을 보호하는 역할도 수행한다.(Fig. 4 (a))

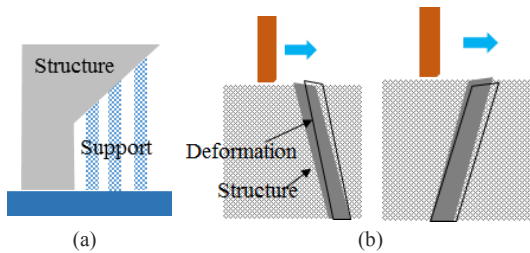


Fig. 4. (a) Definition of support and (b) structure deformation after collision with recoater

다음으로 구조물 적층 방향과 위치선정에 관한 고려 필요성은 리코터의 작동 특성으로부터 발생한다. 리코터는 적층 면 위에 새로운 파우더 층을 형성하는 역할을 수행하는데, 층의 두께가 일반적으로 수십 μm 에 불과하여, 리코터의 정밀한 높이 조절이 요구된다. 만약 레이저 소결시 용융 부위에 예기치 않은 파우더의 점착에 의하여 리코터의 이동시 층돌이 발생하는 경우, 이는 적층 구조물의 안정성을 저하하게 된다. 따라서 리코터와 적층 구조물의 충돌을 고려하여 가능한 한 리코터의 진행 방향에서 구조물의 단면 중 예리한 도출부와의 우선 접촉을 피할 수 있도록 제품의 적층 제작 방향을 선정하는 것이 중요하다.(Fig. 4) 또한 원형 단면을 갖는 홀 가공의 경우, 적층 방향에 따라 일정 직경 이상에서는 홀 내부 씨포트 삽입이 불가피하다. 내부 씨포트는 후가공으로 처리가 어렵고, 내부에서 발생하는 유동 특성에 영향을 미치므로 가능한 씨포트가 필요 없는 설계로 변경하거나 적층 방향을 조절하여야 한다.

3. 최적 설계

3.1 설계 개념 정의

열교환기 재설계는 압축공기와 외부 냉각공기와의 열교환 효율을 최대한 높여 제품 크기를 축소하고, 동시에 경량화를 구현하여, 시스템을 컴팩트화 하는데 그 목적을 둔다. 열교환 효율은 열전달 계수와 비례관계에 있다. 현재 적용되고 있는 열교환기 타입은 평면형 핀과 사각 튜브 형상 조합의 핀-튜브 타입인데, 본 연구에서는, 열전달 계수를 향상하는 방법으로 튜브 내의 유동 특성을 열전달 효과가 높은 강제 대류 효과를 갖도록 조절하는 방안과, 동시에 열교환기와 외부 유동과의 접촉 면적을 넓히는 방안으로 접근하고자 한다. Olsson[11]은 튜브

내의 유동에서 다양한 형상 특성의 터블레이터(turbulator)에 관한 열전달 효과를 연구하였다. 터블레이터는 유동 벽면에 리브 형상으로 장착되는 구조물로 유동에 와류를 형성함으로써, 열전달 계수를 높이는 효과를 가져 온다. 그러나 터블레이터 설치시 관 내부에 수백 μm 높이로 제작되기 때문에 기존 생산 방식으로 제작하는데 어려움이 따른다. 터블레이터 구조물 형상은 Fig. 5에 나타내었다. 다음으로 외부 유동과 열교환기의 접촉 면적을 넓히기 위한 방안으로 wavy fin 개념을 검토하였다. Junqi[12]는 wavy fin의 다양한 형상 특성에 따른 열전달 효과를 연구하였다. Fig. 6에 wavy fin의 구조물 형상을 나타내었다.

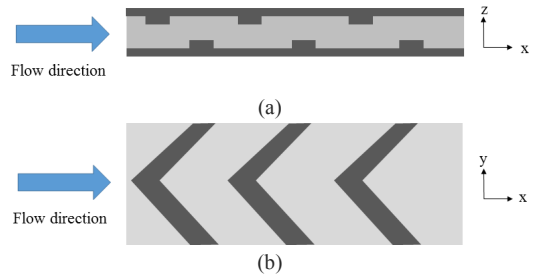


Fig. 5. Schematic diagram of rib-turbulator at (a) side cross section and (b) upper cross section of tube inside



Fig. 6. Schematic diagram of wavy fin on tube

3.2 상세 설계

앞 절에서 정의한 터블레이터와 wavy fin의 개념을 기반으로 금속 3D 프린팅 기기에서 제작 가능하도록 열교환 특성이 주요한 핀-튜브 영역의 배열 및 크기를 중점적으로 고려하였다. 금속 프린팅 기기는 EOS社의 M290 사양을 조건으로 하였다. 이론적인 제작 가능 사이즈는 $250 \times 250 \times 325(\text{mm})$ 이나, 안정적인 제작이 가능하도록 제작 최대 가능 사이즈를 $240 \times 240 \times 300(\text{mm})$ 으로 제한하였다. 다음으로 핀-튜브의 배열 개수를 선정하기 위해 기존 핀-튜브 형태 열교환기를 대상으로 튜브의 중공 높이 및 개수에 따른 Reynolds 수와 Nusselt 수의 계산으로부터 열전달계수를 예측하고, 이 값을 바탕으로 ϵ -NTU 기법을 활용하여 열전달량을 계산하고, 튜브 내

부의 friction factor 정의로부터 압력 강하를 계산하였다.[12] Fig.7에 결과값을 도시하였다.

Fig.7에서 알 수 있듯이, 튜브의 높이가 작을수록 열전달효과는 좋아지지만 압력강하량은 커지게 된다. 채널 개수에 따라서는 열전달 효과는 10개에서 가장 크고 압력강하는 20개에서 가장 작다. 이로부터 압력강하량과 열전달 효과 모두를 고려하여, 압력강하량이 상대적으로 작으면서 열전달 효과가 높은 2mm 높이 10개의 채널로 배열을 정하였다.

채널의 중공 높이가 정의되면 터블레이터의 상세 형상을 정의할 수 있다. 실험결과로부터 터블레이터의 높이는 중공 높이의 약 1/10로, 터블레이터 사이 간격은 4.8mm로 정의할 수 있었다.[11] 두께는 3D프린팅의 안정적인 제작이 가능한 1mm로 선정하였다. 다음으로 wavy fin의 형상을 선정하기 위해 Junqi[12]의 연구를 토대로 크기를 정의하였다.

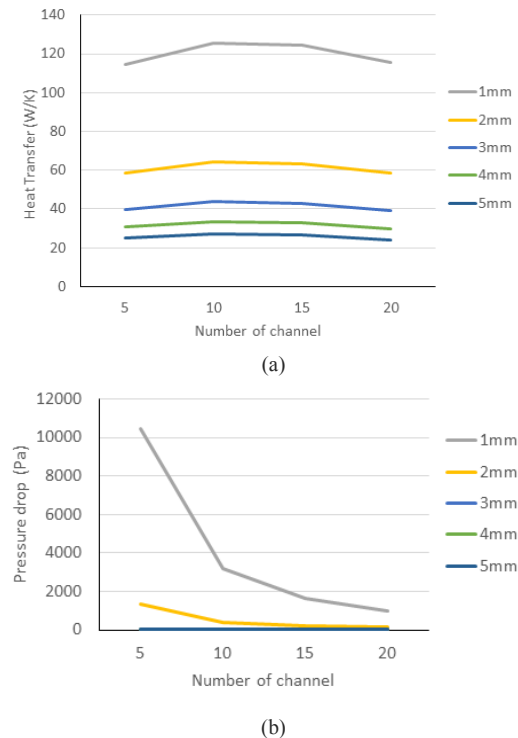


Fig. 7. (a) Heat transfer and (b) Pressure drop according to the height and number of channel

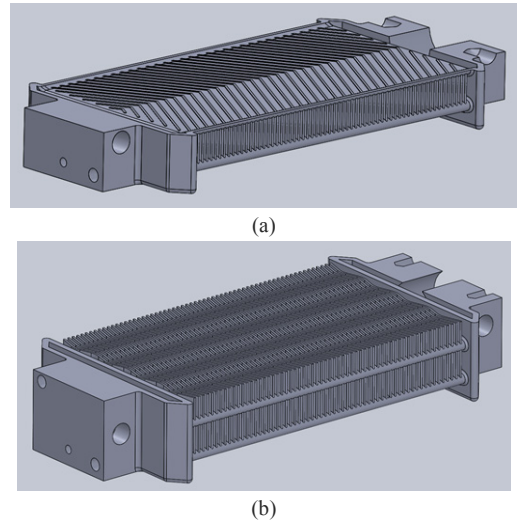


Fig. 8. Cross section of (a) tube inside and (b) fins

앞서 언급한 바와 같이 3D 프린팅 제작 특성으로부터 Fin의 두께는 1mm로 지정하였으며, ϵ -NTU 기법을 활용하여 핀간의 간격은 3mm, 높이는 14mm로 선정하였다. 핀-튜브 배열 및 크기로부터 기존 제품의 열전달 효과(입구 온도 208℃, 출구 온도 53℃)와 근접한 결과를 보이는 핀-튜브 전체 영역은 열전달 수치 해석을 기반으로 한 계산 결과로부터 얻어진 160×180×90(mm)로서 3D 프린팅의 안정적인 제작 범위에 위치한다. 튜브 내부 단면과 핀의 단면을 Fig. 8에 나타내었다.

3D 프린팅 기법으로 튜브의 적층 제작시 튜브 단면이 중공 형태이기 때문에 형상 조건에 따라서 써포트의 내부 삽입이 필요할 수 있다. Fig. 9 (c)에서 보는 바와 같이 튜브 배열 면이 적층면과 평행에 가까울 경우 튜브 끝단의 설계 처리에 따라 내부 써포트 삽입이 생략될 수 있다. 따라서 본 설계에서는 튜브 면에서 접선의 각도가 45도 이하인 구간을 최소화 하여 써포트 제작을 억제할 수 있었다. 이 경우, 튜브 내부 벽면에 설치되는 터블레이터의 제작 또한 별도의 지지대 없이 가능하다. Wavy fin의 경우 면과의 모든 접선이 적층면과 45도 이상이므로 써포트가 불필요하며, 튜브 배열이 일정한 간격을 유지할 수 있도록 하는 지지대 역할의 동시 수행이 가능하다. 따라서 열교환기 중 열교환 효율에 직접 영향이 크면서 가장 복잡한 형상인 핀-튜브 형상 제작을 위해서는 핀-튜브 배열 면이 적층면과 평행이 되도록 제작하는 게 합리적이다. 다음으로 핀-튜브 배열 끝단을 하나의 통로로 연결하면서 본체의 배관부와 체결되는 체결부의 설계

는 중공 형태를 감안하여 내부 씨포트가 필요하지 않도록 하기 위해, 끝면의 탭 각도가 45도 이상을 유지하도록 설계하였다. 본체 및 센서 등이 연결되는 부분은 타 부품의 수정없이 사용할 수 있도록 기존 부품의 체결부 형상을 그대로 적용하였다.

4. 제품 제작 및 검증

4.1 3D 프린팅 기술 적용 제품 제작

앞 절에서 정의한 열교환기의 상세 설계를 기반으로, EOS社의 금속 3D 프린터인 M290을 활용하여 제품을 제작하였다.

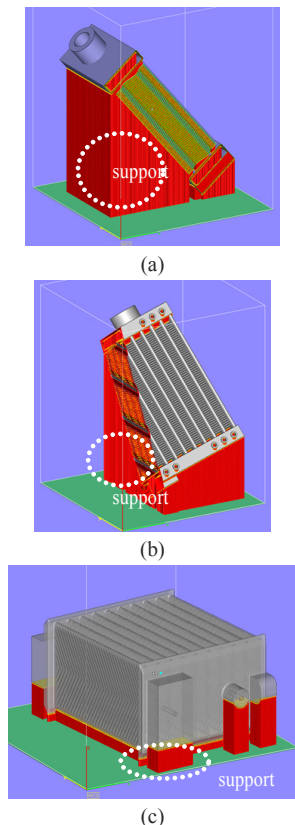


Fig. 9. Support installation of various stacking orientation for 3D printing process

소재는 EOS社의 알루미늄 (AlSi10Mg) 파우더를 사용하였다. 제작을 위한 공정 조건은 Table 1과 같다. 제작순서는 Fig. 10에 나타내었다.

Table 1. 3D printing process conditions

parameter	value
Layer thickness	30 μ m
Laser power	350W
Laser scan speed	1897mm/s
Lase distance	0.12mm

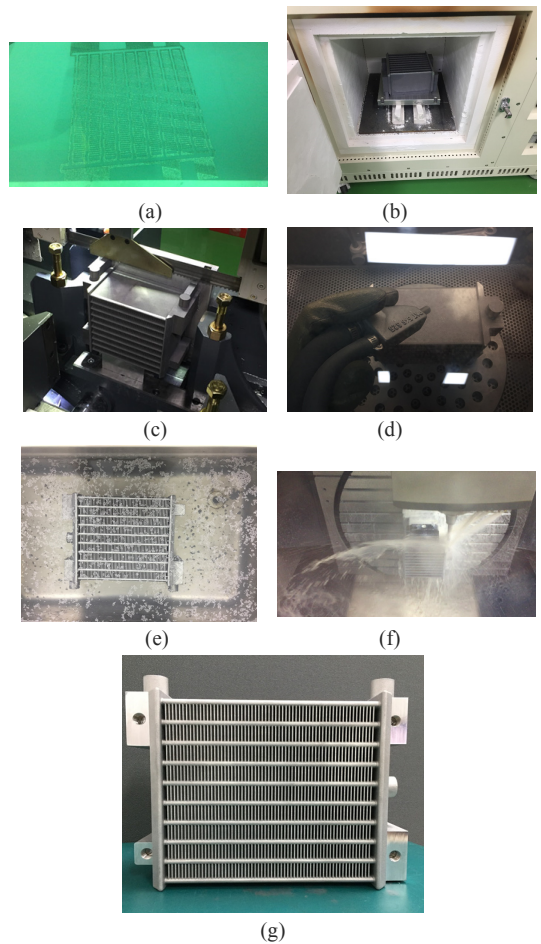


Fig. 10. Sequence of process (a) laser printing (b) heat treatment (c)cutting (d) shot peening (e) cleaning (f) NC process and (g) final product

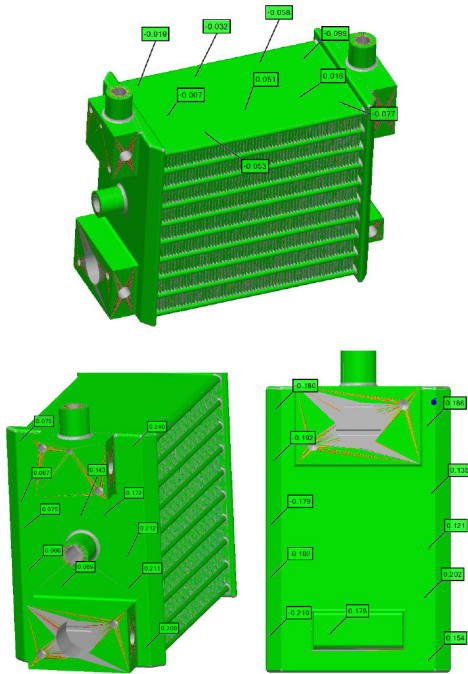


Fig. 11. Dimension accuracy results by 3D scanning

4.2 제작품 검증

제품의 주요 부위(튜브 외 평면부, 열교환기 체결부 축면부 등)에 관한 치수 정밀도를 3D 스캔(Mitutoyo CRYSTA-APEX EX 1200R, 측정 최소 단위 0.0001mm)을 활용하여 분석하였으며 제품 중량을 측정하였다(CAS PB series, 측정 최소 단위 5g).

치수 정밀도는 Fig.11과 같이 -0.21~0.24mm의 오차 범위 내에 있으며, 기존제품의 치수 오차범위인 ± 0.2 mm에 근접한 정밀도를 보임을 확인하였다. 3D 프린팅의 공정 특성상 치수 오차는 필연적인 결과이므로, 체결부와 같은 곳은 후가공을 통한 정밀도 향상 작업을 별도로 진행하였다.

그 결과 최종 제품의 중량은 약 3.8 kg으로 기존 열교환기 6.5kg 대비 약 41%의 중량 절감 효과를 가진다.

5. 결론

본 연구에서는 철도 차량용 공기압축기의 열교환기를 대상으로 열교환 효율 향상과 중량 절감을 목표로, 금속 3D 프린팅 기법의 특성을 고려하여 제품 설계 및 3D 프

린팅 기법으로 제품을 제작하였다. 3D 프린팅 기법의 장점을 활용하면서 효율 향상을 위한 설계 및 제작 과정을 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 기존 열교환기 대비 열교환 효율을 높이는 방안으로, 성능 요구사항 정의 및 튜브 내 터블레이터 삽입과 wavy fin 형상 적용을 고려한 열교환기의 개념 설계를 정의하였다.
- 2) 금속 3D 프린팅 기법을 제작에 적용하기 위해, 프린팅기의 제작 사이즈로부터 제품 설계 한계치를 정의하였고, 적층 특성을 고려한 상세 설계를 실시하여 관내 써포트 설치의 필요성을 제거할 수 있었다.
- 3) 최종 설계 사양을 기반으로 알루미늄 파우더를 적용하여, 3D 프린팅 기법으로 제품을 제작하였다.
- 4) 3D 스캐닝 방식으로 확인한 완성품의 치수 정밀도는 부분별로 -0.21~0.24mm의 범위임을 확인하였고, 최종 제품의 중량은 3.8kg으로 기존 제품 대비 41%의 중량 절감 효과를 확인하였다.

이와 같이 3D 프린팅 기법을 활용하여 제품을 제작시에는 프린팅 특성과 제품의 성능 특성 모두를 고려한 설계 방안 수립이 3D 프린팅의 장점을 최대한 활용할 수 있다. 이번 연구에서 열교환기 제작을 위해 접근한 설계 절차는, 향후 타부품을 3D 프린팅 기법으로 제작시 제작 공정과 부품 성능을 동시에 고려할 수 있는 최적설계 가이드로 활용이 가능할 것이다. 향후 연구로는, 3D 프린팅 제작 제품 대상으로 열교환 성능시험을 진행할 예정이다.

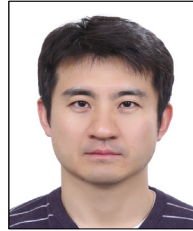
References

- [1] H. J. Lee, "Structure Optimization and 3D Printing Manufacture Technology of Pull Cord Switch Components Applied to Power Plant Coal Yard", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 17, no. 10, pp. 319-330, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.10.319>
- [2] H. W. Yi, Y. M. Lee, B. S. Shin, T. G. Lee, M. C. Kang, "Prototype Manufacturing Using 3D Printing and Characteristics of Flow and Dynamics for High Temperature Solenoid", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 33, no. 5, pp. 341-348, 2016. DOI: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2016.33.5.341>

- [3] M. S. Kim, S. H. Song, H. I. Kim, S. H. Ahn, "Hybrid 3D Printing and Casting Manufacturing Process for Fabrication of Smart Soft Composite Actuators", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 33, no. 1, pp. 77-83, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2016.33.1.77>
- [4] H. J. Jung, J. H. Kim, "Fabrication of Piezo-Driven Micropositioning Stage using 3D Printer", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 31, no. 3, pp. 277-283, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2014.31.3.277>
- [5] D. G. Ahn, S. H. Kim, H. J. Lee, "A Preliminary Study on the Application of Three-Dimensional (3D) Printing Technologies to Hot Bulk Forming Processes - Example of Preform Design and Investigation of Hot-working Tool Steel Deposited Surface", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 31, no. 12, pp. 1093-1100, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2014.31.12.1093>
- [6] K. H. Jo, H. S. Jang, Y. M. Ha, S. H. Lee, "Development of High-Performance, Low-Cost 3D Printer Using LCD and UV-LED", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 32, no. 10, pp. 917-923, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2015.32.10.917>
- [7] H. C. Kim, H. G. Kim, Y. S. Yang, "Development of Innovative Light Water Reactor Nuclear Fuel Using 3D Printing Technology", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 279-286.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2016.33.4.279>
- [8] S. Kim, C. Lee, "A Study on the Fabrication of Slot-Die Coater Based on Polydimethylsiloxane Using Three-Dimensional Printing Technique", *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 34, no. 8, pp. 539-543, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2017.34.8.539>
- [9] S. J. Jung, T. H. Lee, "Study of Trends in The Architecture and The Economic Efficiency of 3D Printing Technology", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 15, no. 10, pp. 6336-6343, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.10.6336>
- [10] J. K. Jung, S. O. Lee, K. B. Kim, "Evaluation of shear bond strength between metal core fabricated by 3D printing and dental porcelain", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 16, no. 4, pp. 2585-2592, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.4.2585>
- [11] C. O. Olsson, B. Sunden, "Experimental study of flow and heat transfer in rib-roughened rectangular channels", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 16, pp. 349-365, 1998.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0894-1777\(97\)10034-6](https://doi.org/10.1016/S0894-1777(97)10034-6)
- [12] D. Junqi, C. Jiangping, C. Zhijiu, Z. Yimin, Z. Wenfeng, "Heat transfer and pressure drop correlations for the wavy fin and flat tube heat exchangers", *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 2066-2073, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.11.012>

김 무 선(Moosun Kim)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학석사)
- 2008년 2월 : 서울대학교 공과대학 기계항공공학부(공학박사)
- 2008년 7월 ~ 2012년 8월 : 현대자동차 남양연구소 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

최적화, 열유동 및 구조 해석