

레이저 3D 프린팅 기법으로 제작한 열교환기 성능시험 분석 연구

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구팀

Experimental analysis of heat exchanger performance produced by laser 3D printing technique

Moosun Kim

Urban Transit Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 3D 프린팅은 고분자, 세라믹, 금속 등 다양한 소재를 대상으로 복합적인 형상을 한 번의 공정으로 제작할 수 있는 적층 기반 제작 기술이다. 최근의 3D 프린팅 기술은 프린팅 속도의 향상과 적용 가능 소재의 지속적인 개발에 의해 양산형 제품 생산이 가능한 수준으로 발전하였다. 본 연구에서는 레이저를 활용한 3D 프린팅 기술을 적용하여 철도 차량용 공기 압축기에 쓰이는 열교환기 제작을 진행하였다. 먼저 3D 프린팅에 적합한 형상으로 경량화 및 컴팩트화를 주안점으로 열교환기의 최적 설계를 진행하였다. 그로부터 도출된 설계안을 기반으로 SLM 기법을 적용하여 AlSi10Mg 합금 소재로 열교환기 시작품을 제작하였다. 다음으로, 제작된 시작품을 기존 공기 압축기에 부착하여, 압축공기의 열교환 성능을 시험하였다. 3D 프린팅 시작품의 시험 결과는 기존 열교환기 대비하여 저압부와 고압부에서 열교환 성능은 각각 약 80% 및 85% 수준을 보였다. 하지만 외부 냉각공기 조건을 기존 열교환기와 유사한 조건으로 가정하였을 때 ϵ -NTU 법을 활용하여 계산한 열전달량은 기존 열교환기 대비하여 유사한 성능을 보여 주었다. 결과적으로, 3D 프린팅 제작 열교환기의 성능 효과 및 경량화 등의 장점을 확인할 수 있었다.

Abstract 3D printing is an additive manufacturing technology that can produce complex shapes in a single process for a range of materials, such as polymers, ceramics, and metals. Recent 3D printing technology has developed to a level that enables the mass-production through an improvement of the printing speed and the continuous development of applicable materials. In this study, 3D printing technology using a laser was applied to manufacture a heat exchanger for an air compressor in a railway vehicle. First, the optimal design of the heat exchanger was carried out by focusing on weight reduction and compactness as a shape suitable for 3D printing. Based on the design derived, heat exchanger prototypes were made of AlSi10Mg alloy material by applying the SLM technique. Moreover, the manufactured prototypes were attached to an existing air compressor, and the heat exchange performance of the compressed air was tested. The test results of the 3D printed prototypes showed a heat exchange performance of approximately 80% and 85% at low and high-pressure, respectively, compared to the existing heat exchanger. From the ϵ -NTU method results with an external cooling air condition similar to that of the existing heat exchanger, the calculated heat transfer amount of 3D printed parts showed similar performance compared to the existing heat exchanger. As a result, the 3D printed heat exchanger is lightweight with good performance.

Keywords : Additive Manufacturing, Aluminium Alloy, ϵ -NTU, Heat Exchanger, SLM

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2018R1D1A1B07044505)

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

email: mskim@krii.re.kr

Received May 22, 2020

Revised June 16, 2020

Accepted July 3, 2020

Published July 31, 2020

1. 서론

3D 프린팅 기술은 여러 종류의 소재를 대상으로 자유도가 높은 설계를 구현하면서 한번의 공정으로 목표 구조물을 제작할 수 있는 최신 제작공정 기술이다. 초기의 3D 프린팅 기술은 주로 모형 제작 등에 쓰였으나, 소재 및 공정기술의 발전으로 양산형 제품 제작에 적용되는 등 그 활용도를 확대하고 있다.

3D 프린팅 기술 원리는 성형 소재를 얇은 층으로 적층하고 그 위에 또 다른 층을 적층하는 과정을 반복함으로써 최종 3차원 구조물을 제작하는 방법이며 적층 소재의 용융을 위한 에너지원 종류와 적용 소재 종류에 따라 3D 프린팅 기술 종류를 세부적으로 구분할 수 있다. 대표적인 3D 프린팅 기술로, 필라멘트 형태의 고분자 소재를 인제션 헤드를 통해 용융 압출하여 적층하는 형태의 FDM (Fused Deposition Modeling) 방식이 있으며, 또 다른 대표적인 예로 고분자 및 금속 등의 소재 파우더가 도포되어 있는 베드 위에 레이저를 조사함으로써 해당 영역에 멜팅풀을 형성하여 아래 층 구조물에 용착하는 방식의 SLM (Selective Laser Melting) 방식이 있다.

이 중 SLM 기술은 레이저 열원에 의해 성형 층간 용융이 생성되어 층간 물성이 우수하여, 양산 제품 제작에 활용되고 있다.

SLM 기술 관련하여 주로 진행되고 있는 연구 내용은 공정 특성과 이에 따른 물성 변화 등에 관한 내용이다. Read 등[1]은 알루미늄 합금 파우더에 레이저 조사 조건의 상호작용에 관한 연구를 진행하였으며, Simchi 등[2]은 레이저의 에너지 밀도와 소결 밀도와와의 상관관계를 연구하였다. 그리고 Dewindar 등[3] 및 Su 등[4]은 소재 파우더 베드를 스캐닝하는 레이저 스캐닝 패턴에 관한 특성을 연구하였으며, Aboulkhair 등[5]은 이런 스캔 방식이 구조물의 다공성에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 Strumza 등[6]은 SLM 기술로부터 열물성치의 이방성에 관한 연구를, Prashanth 등[7]은 후처리에 따른 물성 변화를 연구하였다.

앞서 언급한 바와 같이, 현재까지 진행된 SLM 기술 관련 연구는 공정 특성 연구가 대부분이며, SLM 기술을 활용하여 제작하는 부품 성능 연구는 드물게 진행되고 있다.

따라서 본 연구에서는, 기존 SLM 기법 연구에서 많이 다루어지지 않은 실제 제품 개발을 목표로 하여, 철도차량용 공기 압축기의 주요 구성품인 열교환기를 대상으로 SLM 기법 제작에 맞게 재설계 및 제작 후 성능 시험을

진행하였고 그 효과를 분석하였다.

2. 본론

2.1 열교환기

이번 연구에서 SLM 기법 적용 제작 대상은 철도차량용 공기압축기에 쓰이는 열교환기이다. 철도차량 공기압축기는 차량 제동장치와 차량 높낮이를 제어하는 공기 스프링에 쓰이는 압축공기를 공급하며, 공기압축기에서 공급되는 고온고압 공기를 저온고압으로 변환하기 위해 열교환기를 사용한다. 현재 적용되고 있는 단단식 공기압축기를 Fig.1에 표시하였으며 여기에 적용되는 열교환기는 핀-튜브 형태의 2단 열교환기이다.

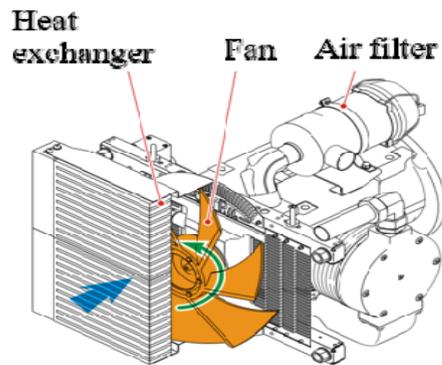


Fig. 1. Air compressor for railroad vehicle [8]

일반적으로 핀-튜브 타입 열교환기는 다수의 핀과 튜브를 브레이징 공법으로 접합하고 본체에 용접하여 제작된다. 철도차량의 공기압축기에 부착되는 열교환기는 공기압축기 내 피스톤의 진동과 내부 고압유동으로 인해 균열 등의 내구성 문제가 발생하기 쉽다. 또한 필요한 열교환 성능을 얻기 위해 일정 수준의 크기 이상이어야 하므로, 냉각팬의 크기 및 공기 압축기와 연결되는 배관 시스템 확대로 중량이 증가한다.

따라서 3D 프린팅의 장점인 형상 설계의 자유도 증가를 활용하여 열교환기의 효율을 향상할 수 있도록 최적 설계를 진행하면 크기와 중량 절감이 가능하다.

2.2 제품 설계 및 제작

핀-튜브 타입 열교환기는 제작의 수월성을 위해 사각 단면의 튜브와 평판 형태의 핀 조합으로 제작된다. 이는

제작 측면에서 유리한 기본 형상이지만, 열교환 효율을 향상할 수 있는 최적 형상으로 개선할 수 있도록 최적 설계를 진행하여야 한다.

또한 3D 프린팅 기술을 적용하여 제품을 제작하는 경우, 제품 크기가 3D 프린터의 유효 범위를 넘지 않아야 한다. 일반적으로 레이저를 이용한 SLM 장비는 제작 공간의 제약이 있어, 제품 설계시 이를 고려하여 진행하여야 한다.

본 연구에서는 제품 제작을 위해 활용한 EOS社의 금속 3D 프린터인 M290 사양을 참조하여 설계 영역 범위를 우선 정의하였다.

그리고 열교환기의 최적 설계는 압축공기의 내부 유동과 외부 냉각공기 유동 간의 열교환 효율을 최대화하며 동시에 제품 크기 축소 및 경량화를 구현하여 공기압축기 전체 시스템의 컴팩트화를 목적으로 하였다. 열교환기의 최적 설계 접근 방안과 제작 방안은 이전 연구[9]를 참조하였다.

열교환 효율과 비례관계인 열전달 계수를 향상하는 기본적인 방법으로, 튜브 내의 유동 특성을 상대적으로 열전달 효과가 높은 강제 대류로 전환하고, 외부 유동과의 접촉 면적을 넓히는 방안을 적용하였다. 이를 위해, 튜브 내부 벽면에는 난류 발생을 위한 리브 형태의 터블레이터[10]를 설계하였고, 튜브 외부에는 외부 유동과의 접촉 면적을 넓힐 수 있는 웨이브 형태의 핀[11]을 장착하였다. 각 구조물의 형상 개념을 Fig. 2에 나타내었다.

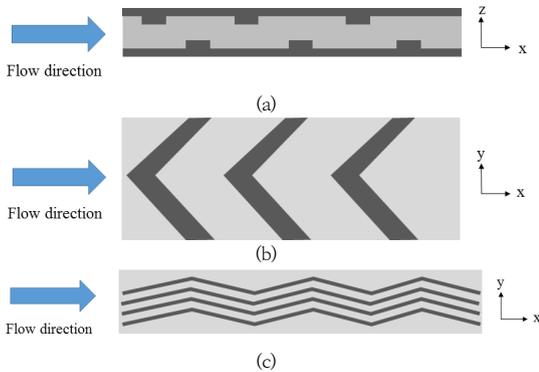


Fig. 2. Schematic diagram of (a) side cross section and (b) upper cross section of rib-turbulator inside tube and (c) wavy fin out of tube [9]

튜브와 터블레이터의 크기 및 개수의 상세 설계를 정의하기 위해 ϵ -NTU 기법을 적용하여 여러 설계 조건에서의 열전달량과 압력 강하를 계산하였으며, 그로

부터 최적 설계 조건을 선정하였다[12]. 이 경우 압력강하 크기는 목표 압력의 약 0.1% 수준으로 영향이 작음을 수치해석상으로 확인하였다.

열교환기의 최적 설계 사양은 튜브 내부 중공 높이는 2mm이며 10개 채널로 구성하였다. 또한 터블레이터는 중공 높이의 1/10로 정의하였다.

웨이브 형상 핀은 Jungi 등[11]의 연구를 토대로 하여 1mm의 두께와 3mm 간격 및 14mm의 높이로 정의하였다. 최종 열교환기의 전체 설계영역은 위 조건의 구조물 형상을 기본 조건으로 한 해석으로부터 160mmx180mmx90mm로 정의하였다.

최적 설계의 구체적 사양이 정의된 열교환기는 앞서 언급한 금속 3D 프린터로 제작하였다.

적용 소재는 열교환기의 특성을 고려하여 AlSi10Mg 파우더를 사용하였으며, SLM 공정으로 제작시 구조물의 지지 및 열변형 가능성을 제거하기 위한 써포트 설치를 최소화하기 위해, 열교환기의 제작 방향을 특정하였다. 즉, 열교환기의 튜브와 같은 중공 구조물을 제작할 때 SLM 기법의 특성으로 인한 형상 변형 방지를 위해 중공 구조물 내부에 써포트 설치가 필수인데, 이는 제작 완료 후 물리적인 방법으로 제거하여야 한다. 하지만 형상이 복잡한 구조물인 경우 내부 써포트의 제거가 어렵기 때문에 제품 제작시 방향을 특정하여 써포트 설치를 최소화하여야 한다. 본 연구에서는 핀-튜브 배열 면이 SLM 적층면과 평행하도록 하여, 내부 써포트 삭제가 가능하였다. SLM 기법으로 제작한 열교환기를 Fig. 3에 나타내었다.

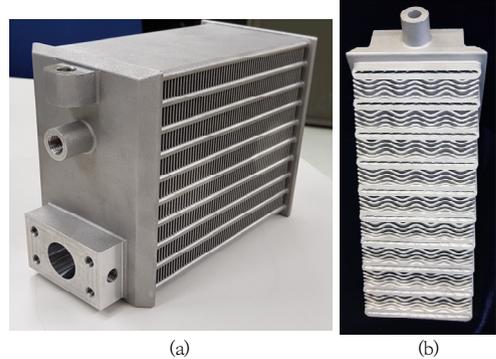


Fig. 3. (a) Final product manufactured by SLM and (b) section of product

2.3 성능 시험

3D 프린팅으로 제작한 열교환기의 성능 분석을 위해 기존 열교환기의 성능 시험 및 개발 열교환기의 성능 시험을 진행하였다.

먼저 기존 및 3D 프린팅 열교환기의 사양을 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Specifications of current and 3D printed heat exchangers

	Current HE	3D printed HE
Material	Aluminum	AlSi10Mg
Size (including 1 st & 2 nd)	570mm x 420mm x 63mm	160mm x 360mm x 90mm
Weight (including 1 st & 2 nd)	13kg	7.6kg

열교환기의 성능시험은 현재 차량에 적용되고 있는 공기 압축기 및 냉각 팬에 연결하여 진행하였다. Fig. 4에서 나타낸 바와 같이 냉각 공기의 외부 유동 속도는 pitot tube(Furness, FCO65-E225)와 차압계(Testo 480)를 이용하여 열교환기 영역에서 균일 간격의 포인트에서 측정하였으며, 압축공기 온도는 2단 공기압축기에 설치되는 저압 열교환기 및 고압 열교환기 각각의 입구와 출구에 연결되는 배관 측면에 열전대를 부착하여 측정하였다.

그 외 시험조건으로 공기압축기에서 생성되는 내부 공기의 압력과 유량은 9bar 및 1700Nl/min 이다.

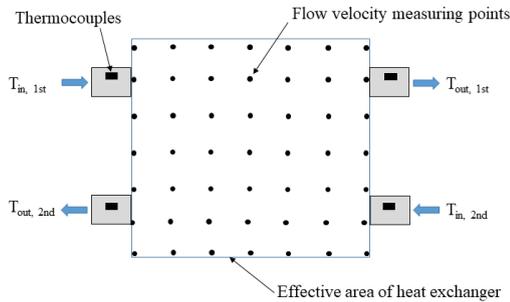


Fig. 4. Schematic to measure flow velocity and compressed air temperature

Fig. 5와 6에서 기존 열교환기 및 3D 프린팅 열교환기를 대상으로 각각 49개 및 25개의 포인트에서 측정된 냉각 공기의 외부 유동 속도장을 표시하였다.

측정 유동장으로부터 얻은 외부 냉각공기의 평균 유속 및 유량은 기존열교환기의 경우 8.88m/s 및 0.4827kg/s 이며 3D 프린팅 열교환기는 3.33m/s 와 0.03416kg/s를 보였다.

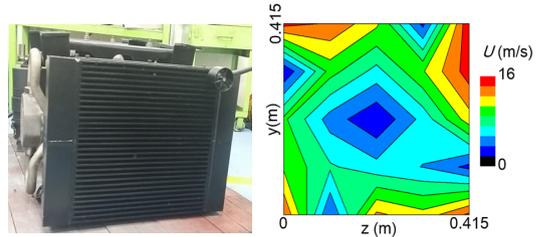


Fig. 5. Experiment of the current heat exchanger and external flow velocity field

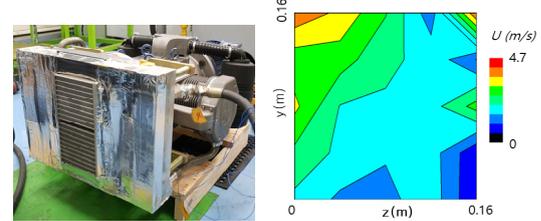


Fig. 6. Experiment of 3D printed heat exchanger and external flow velocity field

3. 결과 및 고찰

기존 열교환기와 3D 프린팅 열교환기를 사용하는 각각의 경우에 대해 측정 위치별 압축공기의 온도 결과를 Table 2에 정리하였다.

Table 2. Temperature results of current and 3D printed heat exchangers

	Current HE	3D printed HE
Inlet temperature of 1 st HE	465.3K	457.9K
Outlet temperature of 1 st HE	337.5K	356.3K
Inlet temperature of 2 nd HE	481.7K	477.5K
Outlet temperature of 2 nd HE	327.1K	345.1K
External air temperature	293.2K	303K

온도는 공기압축기 1단에서 토출된 압축공기가 1단 열교환기에 투입될 때와 통과한 후의 온도 및 공기압축기 2단을 거쳐 2단 열교환기에 투입될 때와 토출될 때의 온도로 구분하였다.

Fig. 7에 시간에 따른 3D 프린팅 열교환기의 위치별 온도 변화를 나타내었다.

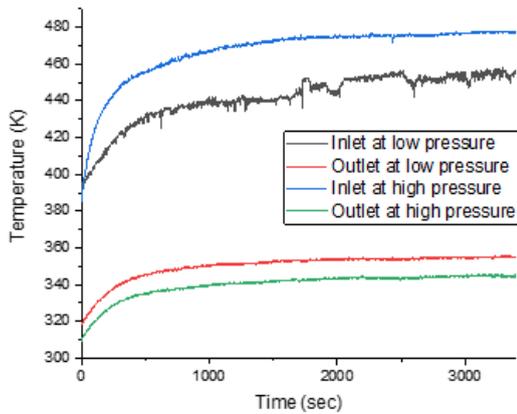


Fig. 7. Temperature results of 3D printed heat exchanger

먼저 1단 저압 (3bar) 압축공기의 열교환 성능을 살펴 보면 기존 열교환기는 입력 온도 465.3K 에서 출력온도 337.5K로 약 127.8K의 온도 저감효과를 보였으며 개발 열교환기는 457.9K에서 356.3K로 101.6K의 저감효과를 보였다.

다음으로 2단 고압 (9bar) 압축공기의 열교환 성능에서는 기존 열교환기는 입력온도 481.7K에서 327.1K로 약 154.6K의 온도 저감효과를, 개발 열교환기는 477.5K에서 345.1K로 약 132.4K 저감효과를 보였다.

1단과 2단 모두 3D 프린팅 열교환기의 온도 저감 결과는 기존 열교환기 대비하여 약 80% 및 85%의 성능을 보였다. 기존품보다 낮은 개발품의 온도 저감 효과는 열교환기 최적 설계시, 외부 냉각공기의 유속과 유량 조건을 기존 열교환기 환경과 동일하게 가정하여 설계를 진행하였기 때문이다.

이는 냉각공기를 생성하는 팬이 기존 열교환기 크기 기준으로 설계되어 있어서 기존 품목보다 작은 크기를 가지는 3D 프린팅 열교환기에는 적은 유량의 냉각 공기가 흐르기 때문이다.

더불어 냉각공기의 유속 분포를 보면 외부 영역으로 갈수록 유속은 강해지는 반면, 팬의 중앙부에서는 유속이 약해지는데, 3D 프린팅 열교환기는 상대적으로 유속이 약한 팬 중심에 위치하고 있다.

결과적으로 기존 열교환기 성능 시험시 얻어진 유속과 유량 대비하여 실제 3D 프린팅 열교환기 성능 시험에서는 유속과 유량이 62% 및 92% 감소하였다.

이와 더불어, 열교환 성능 차이의 또 다른 원인으로 제품 구성 소재의 열물성 차이를 고려할 수 있다. 3D 프린팅 열교환기에 쓰이는 AlSi10Mg는 175W/m·K의 열전

도도를 가지는데 반해, 기존 열교환기는 약 200W/m·K 수준의 알루미늄 합금을 사용하기 때문에 이로 인한 열교환 성능 차이를 예상할 수 있다.

만약 기존 열교환기와 동일한 조건의 외부 냉각공기 유동을 생성하는 경우를 가정하였을 때, 3D 프린팅 열교환기의 성능 변화를 예측하고자 ϵ -NTU 법을 활용하였다.

ϵ -NTU 법을 적용하는 경우 계산 격자점의 관계식은 다음과 같다[12]. 이번 연구의 열교환기는 고온 유체 및 냉각유체가 unmixed cross flow 형태로 만나기 때문에 ϵ 은 식(2)와 같이 정의할 수 있다.

$$T_{i+1} = T_i - \epsilon(T_i - T_{INF}) \quad (1)$$

$$\epsilon = 1 - \exp\left[\frac{NTU^{0.22}}{C_r} \left\{ \exp[-C_r \cdot NTU^{0.78}] - 1 \right\}\right] \quad (2)$$

$$NTU = hD_h/k \quad (3)$$

여기서 ϵ 은 열교환기 유용도를 의미하며, NTU는 전달단 위수, C_r 은 열용량비를, h 는 열전달계수, D_h 는 수력직경, k 는 열전도도를 각각 의미한다. T_i 는 각 격자점에서 의 온도이다.

온도 계산을 위한 격자점은 유속 측정점과 측정점들간의 중간 위치에 설정하였으며, NTU 계산은 cross flow 일 때 각 열교환기 형상에 따른 열전달계수, 각 열교환기 내부 튜브의 수력직경 및 소재별 열전도도를 적용하였다. 고온 압축공기의 입구 온도는 Table 2에 나타난 시험 입구 온도를 적용하였다.

ϵ -NTU 법을 활용하여, 시험을 진행한 동일 조건에서 기존 열교환기의 열전달량 해석값과 3D 프린팅 열교환기 해석값을 구하였고 기존품과 동일한 외부 냉각공기의 유동 조건을 가정하여 3D 프린팅 열교환기의 열전달량 해석값을 구하였다.

Table 3에 각 결과값을 비교하였다.

기존 열교환기의 열전달량 시험 결과는 5377.4W인 반면, ϵ -NTU법을 활용하여 예측한 결과값은 6130.3W로 약 14%의 오차를 확인하였다. 3D 프린팅 열교환기의 경우 시험결과는 4711.6W이며 ϵ -NTU법 적용시 결과는 4623.0W로 약 1.9%의 오차를 보여 상당히 근접한 결과를 보였다. 이를 감안하여, 원래 설계조건인 기존 열교환기의 외부유속조건을 가정하여 3D 프린팅 열교환기의 성능을 ϵ -NTU 법으로 예측한 결과 6196.9W로 기존 열교환기의 실제 열전달 성능보다 향상되었다.

Table 3. Heat transfer results of test and ϵ -NTU of current and 3D printed heat exchangers

Case	heat transfer
Test result of current HE	5377.4W
ϵ -NTU result of current HE	6130.3W
Test result of 3D printed HE	4711.6W
ϵ -NTU result of 3D printed HE	4623.0W
ϵ -NTU result of 3D printed HE with new external flow condition	6196.9W

따라서, 외부 유동조건이 기존 열교환기의 경우와 동일하게 구성된다면, 3D 프린팅 열교환기는 기존 열교환기 이상의 열전달 효율을 가질 것으로 판단한다.

4. 결론

본 연구에서는 철도 차량용 공기압축기에 적용되는 열교환기를 대상으로 3D 프린팅 제작을 위한 최적설계와 이를 기반으로 SLM 기법으로 제품을 제작하였고, 실제 공기압축기에 장착 및 성능시험을 진행함으로써 기존 제품 대비 열전달 성능을 분석하였다. 성능 분석 결과는 다음과 같다.

- 1) 3D 프린팅 열교환기의 열전달 효율을 시험한 결과, 저압 및 고압 압축 공기에서 기존 열교환기 대비 온도 기준으로 약 80% 및 85%의 성능을 보였다.
- 2) 성능 차이는 외부 냉각공기의 유동 특성에 따라 유속이 상대적으로 낮은 팬 중심부에 열교환기가 위치함으로써 전체 열전달량이 낮아진 것으로 판단된다.
- 3) 동일한 외부 유동 조건을 가정하여, ϵ -NTU 법으로 열전달 성능을 계산한 결과, 3D 프린팅으로 제작한 열교환기의 시험값과 예측값이 근접하였으며, 또한 결과로부터 기존 열교환기 이상의 열전달 성능을 보임을 알 수 있다.

이상과 같이 3D 프린팅으로 제작한 열교환기가 실제 제품 활용도 관점에서 충분한 성능을 가짐을 확인하였으며, 더불어 기존 열교환기 제작방식을 대체하면서 크기 및 중량을 최소화할 수 있는 부가적인 장점을 가질 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] N.Read, W.Wang, K.Essa, M.Attallah, "Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: process optimisation and mechanical properties development", *Materials & Design*, vol.65, pp.417-424, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.044>
- [2] A.Simchi, H.Pohl, "Effect of laser sintering processing parameters on the microstructure and densification of iron powder", *Materials Science and Engineering: A*, vol.359, pp.119-128, 2003.
DOI: [https://doi.org/10.1016/s0921-5093\(03\)00341-1](https://doi.org/10.1016/s0921-5093(03)00341-1)
- [3] M.Dewidar, K.Dalgarno, C.Wright, "Processing conditions and mechanical properties of high-speed steel parts fabricated using direct selective laser sintering", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol.217, pp.1651-1662, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1243/095440503772680587>
- [4] W.Su, P.Erasenthiran, P.Dickens, "Investigation of fully dense laser sintering of tool steel powder using a pulsed Nd:YAG laser", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol.217, pp.127-138, 2003.
DOI: <https://doi.org/10.1243/095440603762554677>
- [5] N.Aboulkhair, N.Everitt, I.Ashcroft, C.Tuck, "Reducing porosity in AlSi10Mg parts processed by selective laser melting", *Additive Manufacturing*, vol.1-4, pp.77-86, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2014.08.001>
- [6] E.Strumza, O.Yeheskel, S.Hayun, "The effect of texture on the anisotropy of thermophysical properties of additively manufactured AlSi10Mg", *Additive Manufacturing*, vol.29, pp.1-8, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.06.013>
- [7] K.G.Prashanth, S.Scudino, H.J.Klauss, K.B.Surreddi, L.Lober, Z.Wang, A.K.Chaubey, U.Kuhn, J.Eckert, "Microstructure and mechanical properties of Al-12Si produced by selective laser melting: Effect of heat treatment", *Materials Science & Engineering A*, vol.590, pp.153-160, 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2013.10.023>
- [8] Operating instructions of ALMiG compressor WP2N85T, ALMiG Kompressoren GmbH, 2014
- [9] M. Kim, "Design and Manufacturing Technology of Heat Exchanger in Air Compressor for Railroad Vehicle by 3D Printing Process", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 18, no.11, pp.802-809, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.11.802>
- [10] 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)

- [11] 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>
- [12] J.Ahn, M.Kim, S.Jang, "Heat Transfer Analysis of a Heat Exchanger for an Air-Compressor of a Railway Vehicle Based on Cooling Air Flow Measurement", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, vol.29, no.9, pp.447-454. DOI: <https://doi.org/10.6110/KJACR.2017.29.9.447>

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>

적층기법, 최적화, 열유동 및 구조 해석