

냉각 공기 매니폴드의 위상 최적화 및 적층 제조를 통한 실험적 검증

윤민한*, 허재훈, 이정민, 이주현
한화시스템

Experimental Verification through Topology Optimization and Additive Manufacturing of Cooling Air Manifold

Min-Han Yoon*, Jae-Hun Heo, Jung-Min Lee, Ju-Hyun Lee
Hanwhasystems, Korea

요약 본 연구에서는 위상 최적화 기법과 3D 프린팅 제조방식을 이용하여 공랭식 전자장비의 매니폴드 형상을 최적화하고, 검증을 수행하였다. 매니폴드는 냉각 공기가 인입되어 분기되는 구성품으로 장비의 유동 경로의 압력강하 중 상당한 비중을 차지하고 있어 매니폴드 형상 최적화는 장비의 유동 성능개선 및 냉각구조의 제원 및 비용 감소에 도움이 된다. 먼저 압력 강하량을 목적함수로 설정하고, 멀티채널 냉각핀에서의 유량 균형을 구속조건으로 한 위상 최적화 수치 해석을 수행하여, 기존 기하학적 형상보다 압력 강하량이 개선된 매니폴드 형상을 도출하였으며, 재료 압출 방식의 3D 프린팅을 이용하여 엔지니어링 플라스틱으로 매니폴드를 제작, 압력 강하량 측정 시험을 수행하였다. 그 결과 기존의 기하학적 형상 변수의 사례 연구를 통하여 도출한 매니폴드보다 위상 최적화를 통해 도출한 형상은 28% 이상의 압력 강하량 개선 효과를 보여주었다. 본 연구에서 제시한 위상 최적화 개발 작업 흐름은 향후 위상 최적화 기법을 이용한 다양한 구조의 제품 최적화에 활용될 수 있다.

Abstract In this study, the manifold shape of air-cooled electronic equipment was optimized and verified using topology optimization techniques and 3D printing manufacturing methods. The manifold is a component through which cooling air enters and branches out, and accounts for a significant portion of the pressure drop in the flow path of the equipment. Therefore, optimizing the shape of the manifold helps improve the flow performance of the equipment and reduces the specifications and costs of the cooling structure. First, the pressure drop was set as the objective function, and topology optimization numerical analysis was performed with the flow balance in the multi-channel cooling fin as a constraint and a manifold shape with improved pressure drop compared to the existing geometric shape. A manifold was manufactured from engineering plastic using material extrusion 3D printing, and a pressure drop measurement test was performed. As a result, the shape derived through topology optimization showed a pressure drop improvement effect of more than 28% compared to the manifold derived through a case study of existing geometric shape variables. The topology optimization development workflow presented in this study can be used to optimize products with various structures using topology optimization techniques.

Keywords : Topology Optimization, Additive Manufacture, Pressure Drop, Air Cooling, Manifolds

*Corresponding Author : Min-Han Yoon(Hanwhasystems, Korea)

email: minhan.yoon@hanwha.com

Received March 22, 2024

Revised April 17, 2024

Accepted June 7, 2024

Published June 30, 2024

1. 서론

고성능 전자장비의 발전으로 인한 레이더, 항공전자장비, 모바일, 사격통제장비 등에는 고성능, CPU, GPU, SoC 등과 같은 고집적, 고열유속 전자부품 적용이 확대되었으며, 이를 안정적으로 냉각하고, 수명을 보장하기 위한 냉각기술의 중요성이 증가하고 있다[1].

시스템 발열량 증가는 냉각구조의 체적 증가 및 비용 상승의 요인이 되고 있지만, 항공 플랫폼이나 소형 플랫폼에서는 소형화, 경량화 또한 시스템의 중요한 요구사항으로 주어진 조건에서의 제원, 비용, 성능 간의 Trade-off 설계 및 최적화를 위한 노력이 계속되고 있다.

액체나 기체의 대류 열전달을 이용한 단상 냉각구조는 1980년 이전부터 널리 연구되어 온 기술로, 민수 분야를 포함한 방산 전자분야 전반에 다양하고 폭넓게 적용되고 있다. 이중 기체를 이용한 공랭 방식은 액냉방식보다 제거할 수 있는 열유속의 측면에서 분명 성능적 한계가 있지만, 상대적으로 전체 냉각 시스템구조가 간단하고, 경량화, 소형화, 비용 측면에서 매력적인 솔루션으로 항공 전자 장비, 레이더 신호처리 장치 등에 이전부터 적용되어 왔으며, 최근에는 AESA 레이더까지 적용이 확대되고 있는 추세이다.

공랭식 구조의 유동 경로는 압력강하와 열성능을 결정하는 중요한 요소중 하나로 연구자들은 공기 인입구에서 설계 유량을 분배하고, 압력강하를 최소화하며, 냉각 채널의 형상을 최적화하기 위한 연구[2]를 많이 수행해 왔다. 이중 기계 가공성을 고려한 형상 매개 변수에 대한 Case study를 통한 형상 최적화 방법[3]은 가장 보편적인 방법 중 하나가 되었다.

하지만 최근 3D 프린팅 제조 기술의 발전[4]으로 인하여, 설계 자유도가 높아졌으며, 이전 기계가공 방식으로 구현하기 어려웠던 복잡한 형상 및 구조까지 구현이 가능하게 되었다. 이러한 제조 기술 발전은 열유동 구조의 유동 및 냉각구조를 스마트하고 효율적으로 개선할 수 있는 연구의 확장성을 제공하였고, 위상 최적화 접근법은 열유동 성능을 개선하기 위한 유용한 방식 중 하나로 관심을 받고 있다.

위상 최적화[5]는 사용자가 정의한 목적함수에 대해 설계 공간 내의 재료 분포를 최적화하는 수학적 설계알고리즘으로, 기존의 고전적인 디자인 방법으로는 고안하기 어렵거나 불가능한 설계를 수행할 수 있다. 위상 최적화 기법은 구조 최적화 문제부터 먼저 적용되었으나[6], 최근에는 열유체 영역을 비롯한 다양한 엔지니어링 분야

로 확산되고 있고, 이를 위한 설계 소프트웨어도 발전되고 있는 추세이다.

Zeng et al[7]은 two-layer에 대한 2D 수치 모델을 개발하고 위상 최적화를 사용하여 공랭식 애플리케이션용 방열판 최적화에 관한 연구를 수행하였으며, Martinez - maradiaga et al.[8]은 상업용 태블릿의 열관리를 위한 자연대류 방열판을 설계하기 위해 위상 최적화 기법을 사용하였다. 하지만 아직까지 구조 최적화에 비하여 열유동 최적화를 위한 위상 최적화 기법 적용에 대한 연구 결과 및 적용사례는 많지 않으며, 특히 실제 수치적 분석과 실험적 비교 검토를 통해 증명한 문헌은 더욱 찾기가 쉽지 않다.

최근 항공 탑재 장비 발열증가 및 경량화 요구로 공랭식 전자장비의 냉각에서의 유동 분배를 위한 매니폴드와 열교환을 위한 냉각 채널에서의 압력강하 최소화와 열전달 성능개선이 중요해졌지만, 기존의 매개 형상 변수의 기하학적 변수 최적화만으로는 냉각성능 개선의 어려움이 있으며, 다양한 기법 적용의 연구가 필요하게 되었다.

이에 본 연구에서는 향후 무인기, 유인기를 비롯하여 지상, 해상 시스템에 탑재되는 공랭식 전자장비에 적용할 목적으로 공랭식 냉각장치의 유량 분배 기능을 담당하는 매니폴드에서의 압력강하 개선을 위한 형상 설계에 위상 최적화 기법을 적용하여 위상 최적화 적용의 효과를 검증하고, 위상 최적화의 이점 및 work-flow를 고찰하고자 하였다.

본 연구를 통해 제시하고자 하는 세부적인 연구목표는 다음과 같다.

- 1) 열유체 개발의 위상 최적화 work-flow를 제시하고 고찰한다.
- 2) 강제 공랭식 전자장비 매니폴드에 대한 위상 최적화 기법을 적용한 수치적 분석을 수행하고, 기존 기하학적 형상과의 비교 분석을 수행한다.
- 3) 3D 프린팅을 이용하여 매니폴드를 제작하고, 압력강하 시험을 통해 위상 최적화 기법 적용의 효과를 검증한다.

2. 본론

2.1 연구 대상

Fig. 1은 본 연구의 대상 모델의 구조 및 냉각방식을 나타낸 것이다. 전체 크기는 274.8 mm x 205.7 mm x 180.2 mm이며, 멀티채널 방열판과 하우징으로 구성

된 영역과 냉각 공기가 공급되어 좌우로 분기되는 매니폴드 영역으로 구성되어 있다. 플랫폼에서 공급된 냉각 공기는 후면에 위치한 인입구를 통해 인입되어, 매니폴드를 지나 좌우로 분기되고, 멀티채널 방열핀을 지나 전면으로 토출된다. 각 멀티채널 방열핀은 71개의 좁은 직사각형 채널로 구성되어 있고, 각 채널의 단면은 높이 1 mm, 폭 16 mm 이다. 멀티채널 방열핀은 AL6061소재로 기계가공을 통해 제작하였고, 하우징과 매니폴드는 ABS-M30소재를 사용하여 3D 프린팅을 하였다.

본 연구에서는 매니폴드 영역만을 대상으로 위상 최적화를 적용하고, 대상 모델의 매니폴드는 위상 최적화를 적용하기 전 기존 전자장비에 적용된 형상으로 본 연구의 기준 모델(BM:Baseline Model, 이하 BM)이 된다.

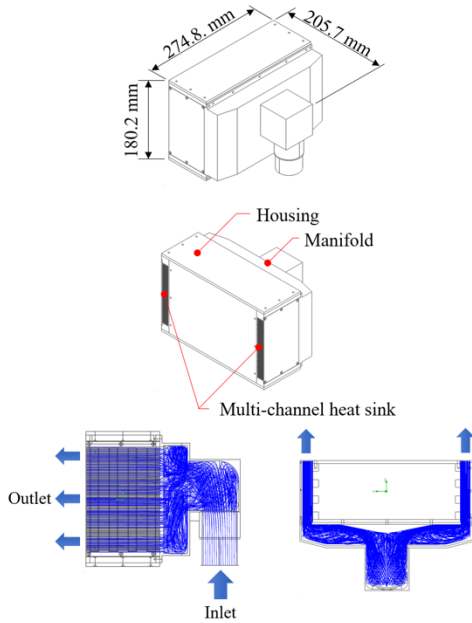


Fig. 1. Structure and cooling air path of the research object

2.2 연구 방법

Fig. 2는 Ghosh[9]가 제시한 방법을 참조하여, 본 연구에 적용한 work-flow로 먼저 위상 최적화를 수행하여 Draft 형상을 도출하고, Surface repair 작업을 통해 결과물의 형상을 정리한 후, CFD Case study 통해 공급 조건에 따른 압력 강하량 성능을 비교하였다.

이후 위상 최적화로 도출한 매니폴드(TM:Topology optimization Model, 이하 TM)와 비교군인 BM을 3D 프린팅을 통해 제작하고 압력 강하량 측정 시험을 수행

하여, CFD Case study 결과와 시험 결과를 비교하였다.

유량 공급 조건에 따른 압력 강하량 성능의 영향성 분석을 위해 향후 적용 무기체계의 공기 공급 조건을 고려하여 Table. 1과 같이 0.018 ~ 0.062 kg/s 의 질량유량 공급 범위를 설정하였다.

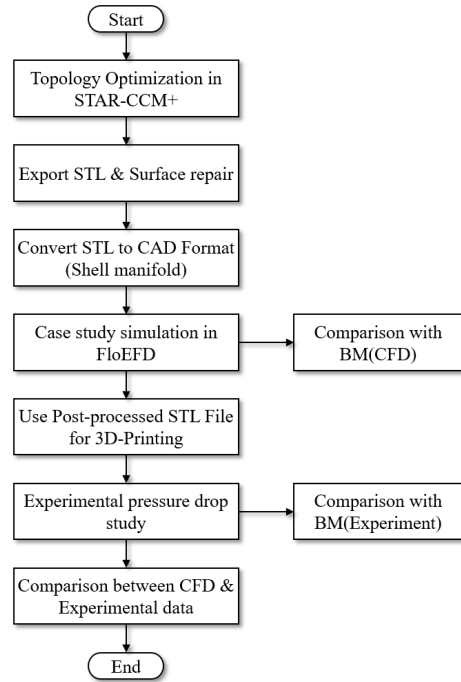


Fig. 2. Work flow for manifold shape topology optimization

Table 1. Heat Value and cooling air supply conditions

Item		Value
Boundary Conditions	Inlet Temp.	20 °C
	Inlet mass flow rate	0.018 kg/s
		0.026 kg/s
		0.035 kg/s
		0.044 kg/s
		0.053 kg/s
	0.062 kg/s	

2.3 CFD 시뮬레이션

위상 최적화 수치해석은 Siemens社의 STAR-CCM+(ver 2210) Topology optimization solver와 Adjoint solver를 이용하여 수행하였으며, 유동 공급조건에 따른 분석은 Siemens社의 FloEFD(ver 2205)를 사용하였다.

수치해석에 적용된 지배방정식은 연속방정식, 운동량 보존방정식이며, Eq. (1)-(2)로 표현된다.

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도, u 는 속도, μ 는 동점성계수, p 는 압력이 된다.

배관 내의 압력 강하량은 Eq. (3)으로 표현된다.

$$\Delta P \approx f \frac{L}{D} \frac{\rho u^2}{2} \quad (3)$$

여기서 ΔP 는 압력강하, f 는 관 마찰손실계수, L 은 관의 길이이며, D 는 수력학적 직경을 의미한다.

Fig. 3의 푸른색 영역은 위상 최적화를 통해 형상이 변경되는 영역인 Design space를 나타낸 것인데, 기존 BM에서 지정한 기하학적 체적 범위를 벗어나지 않도록 설정하였다.

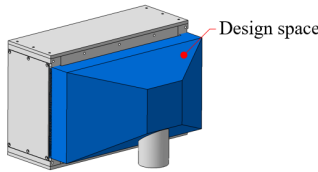


Fig. 3. Contour of topology optimization design space

위상 최적화 해석 시 경계조건은 Table. 1에서 가장 낮은 유량 값인 0.018 kg/s를 입구 질량유량으로 하고, 출구 조건은 대기압 조건으로 설정하였다. 위상 최적화의 목적함수는 압력 강하량이며, 구속조건으로 좌·우측의 동등한 질량유량 분배가 되도록 좌우 전면 출구 측 질량유량을 입력 유량의 절반인 0.009 kg/s로 각각 설정하였다.

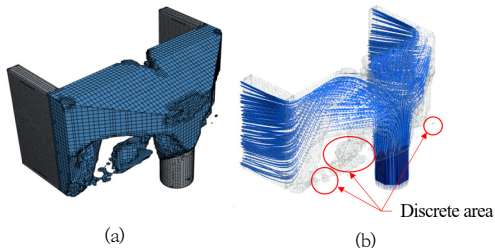


Fig. 4. Topology optimization Post process
(a) Initial topology optimization (b) Discrete area removal

상술한 과정을 거쳐 구한 위상 최적화 초기 결과 형상은 Fig. 4 (a)와 같이 Mesh 형상에 따라 계단 형태의 각진 형상으로, 일부는 유동 영역에서 배제된 이산영역이

발생하였다. 유동 손실 및 압력강하 최소화를 위하여 STAR-CCM+의 Surface repair tool의 Smooth 기능을 이용하여 위상 최적화 초기 결과 형상의 각진 형상을 매끄러운 표면으로 수정하였고, Fig. 4(b)에 표현된 유동 흐름이 거의 발생하지 않고, 유동 채널에서 배제된 이산 영역은 제거하였다.

수정된 형상을 유동 채널에 대한 체적으로만 구성된 STL 파일로 추출한 후 이를 CAD Format 형태로 변환하고 Dassault Systemes社의 CATIA V5의 Offset 기능을 이용하여 3 mm 두께를 가진 외부 형상을 모델링하였다. 형상 모델 과정에서 일부 Surface는 Curvature가 계산되지 않아 Offset이 원활하게 수행되지 않는 문제점이 있었으나, Altair 社의 Inspire를 이용하여 연속적인 곡률을 가지는 5,000개의 Poly -NURBS Surface로 재구성하여 해결하였다.

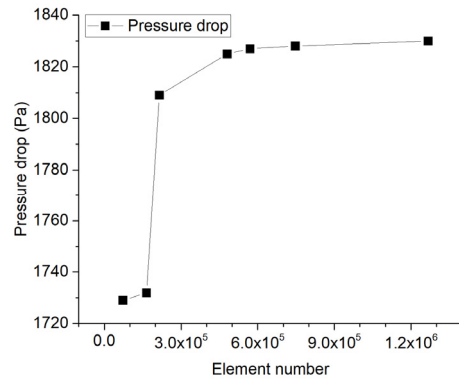


Fig. 5. Result of mesh sensitivity simulation

Case study의 수치 해석모델은 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였으며, Table. 1의 공기 공급 조건을 입력조건으로 하고, 해석영역은 내부 유동 해석으로 설정하였다. Mesh의 민감도 확인을 위하여 Table. 1의 경계조건 중에서 가장 높은 유량 조건인 0.062 kg/s의 질량유량을 입력조건으로 BM의 정상상태 유동 해석을 수행하여, 압력 강하량의 수렴성을 확인하였다. Fig. 5는 메시 수에 따른 압력 강하량의 수렴성을 나타낸 것으로 최소 570,209개에서 수렴되었고, 본 연구에서는 1,266,925개로 정하였다.

유동 해석모델은 Fig. 6과 같고, Mesh의 격자는 경계층 근처에서 조밀하게 구성하였다. 내부 유동 체적은 BM이 0.00167 m³, TM이 0.00155 m³으로 TM의 내부 유동 체적이 BM보다 7.52% 감소하였는데, 이는 위상 최적화 과정에서 불필요한 유동 영역이 삭제된 결과로 분석된다.

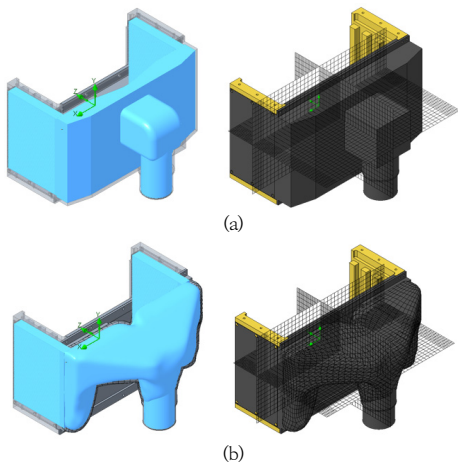


Fig. 6. Fluid volume and grid system of analysis model
(a) BM (b) TM

Fig. 7은 질량유량 0.062 kg/s일 때 BM과 TM의 유동 패턴을 나타낸 것이다. Fig. 7(a)의 BM 유동 패턴에서는 재순환 영역이 뚜렷하게 나타나는 데 비해 Fig. 7(b) TM 유동 패턴에서는 유동 재순환 영역이 상당히 감소한 것을 확인할 수 있다.

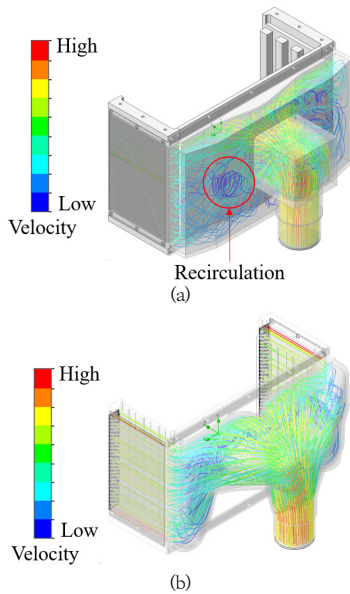


Fig. 7. Flow trajectory CFD analysis result (Inlet:0.062 kg/s)
(a) BM (b) TM

Fig. 8은 공급 유량에 따른 BM과 TM의 압력 강하량의 수치해석 결과를 비교한 그래프인데, 압력강하량은 공급 유량이 증가함에 따라 지수적으로 증가하였으며, 공급 유량 범위에서 TM의 압력 강하량이 BM의 압력 강하량 보다 16.67 ~ 28.01% 감소하였다. Fig. 7과 Fig. 8의 결과를 종합하면, 위상 최적화를 통해 유동패턴이 개선되고, 압력 강하량이 감소하였으며, 그 효과는 공급 유량이 증가할수록 크다는 것을 확인할 수 있었다.

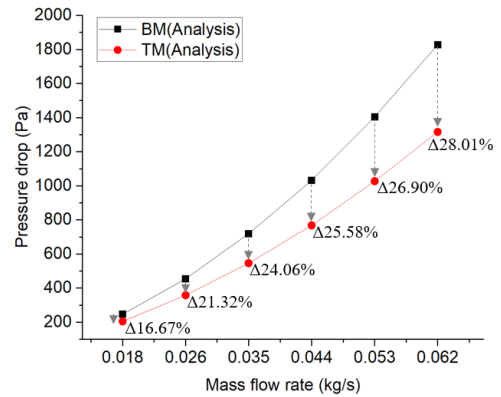


Fig. 8. Pressure drop according to mass flow rate (Analysis)

2.4 적층 제조를 통한 제작 및 시험검증

TM은 곡률이 다소 포함된 복잡한 형상 구조로 기존 기계 가공방식으로 제작하기에 어려움이 있기 때문에 공정을 이용하여 제작하였다. BM 또한 제조방식에 의한 표면 조도 등의 차이를 최소화하기 위해 TM과 동일한 공정을 통해 제작하였다. 출력에 사용된 장비는 FDM 방식의 Stratasys社의 F770이며, 제작을 위한 3D 데이터의 무결성을 검사하고 적층되는 Layer 두께와 적층 방향, 내부 채움의 형태, 서포트의 배치를 설정하기 위해 Stratasys社의 GrabCAD Print를 활용하였다. 시 발생하는 계단 현상을 최소화하고 매끄러운 표면을 얻기 위해 각 Layer 두께는 출력장비에서 제작 가능한 최소 설정값인 0.25 mm으로 제작하였고, 내부 형상은 유동의 누설 방지를 위하여 솔리드 형태의 채우기 방식을 동일하게 적용하였다.

Fig. 9는 적층 제조를 위한 전처리 과정과 제작 완료된 BM, TM의 형상을 나타낸 것이다.

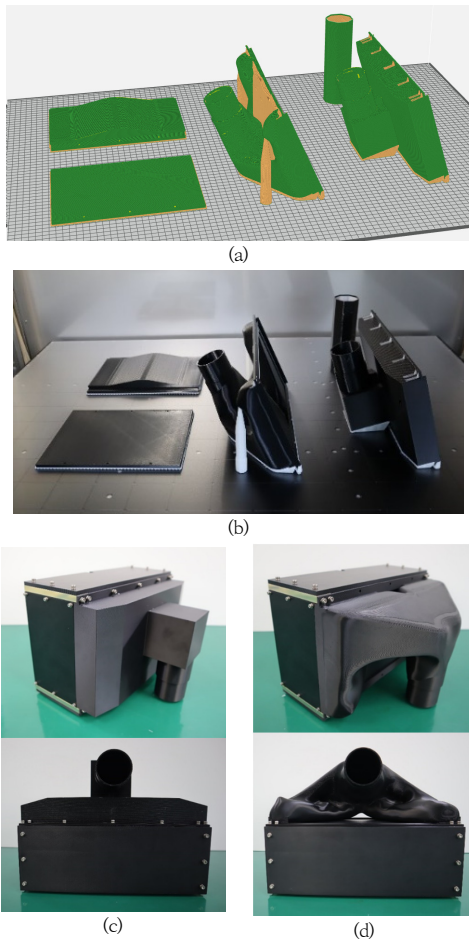


Fig. 9. 3D printing process & results
 (a) Pre-process in GrabCAD (b) printed product
 (c) BM(assembled with housing)
 (d) TM(assembled with housing)

BM은 기존 기계가공으로 다수의 구성품을 제작 조립하는 형상을 3D 프린팅으로 단일 구성품으로 제작하였으며, TM 중량은 596.6 g으로 BM 중량인 826.5 g보다 28% 감소하였다.

2.5 압력 강하량 측정 시험

압력 강하량은 Fig. 10(a)와 같이 MIL-STD-2218 [10]에 제시된 방법을 이용하여 시험하였다. 플랫폼에서 공급되는 냉각 공기를 모사하기 위해 블로워를 사용하였으며, 냉각 공기가 공급되는 블로워부터 측정 지점까지는 직경의 8배 이상, 측정 지점부터 시험대상물과의 연결 지점까지는 덕트 직경의 4배 이상으로 덕트 내 균일한 유동을 확보하고자 하였다.

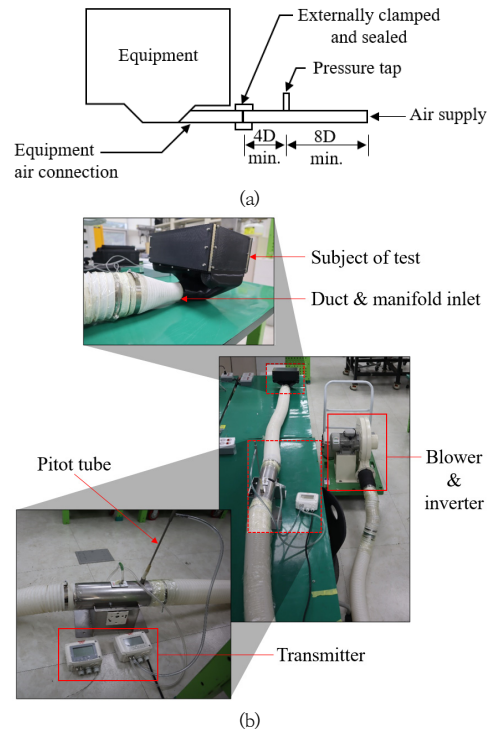


Fig. 10. Schematic & configuration of pressure drop test
 (a) Schematic diagram of test (b) Configuration of test

Fig. 10(b)는 본 연구의 압력 강하량 측정 시험의 구성을 나타낸 것으로 시험실의 온도는 공조 장치를 이용하여 20 ± 1 °C로 제어하였다. 냉각 공기는 경진 블로어사의 ATT-034-010(HP) 블로어와 현대일렉트릭사의 N700E 인버터의 주파수 조절을 통하여 필요한 공급 유량을 설정하였다. 냉각 공기의 공급온도에 따른 밀도를 기준으로 질량유량을 체적유량으로 계산하였고, 체적 유량계를 이용하여 시험조건에 맞는 유량이 공급되는지 확인한 후, 압력을 측정하였다. 측정에는 KIMO사의 AFNOR NF 피토관과 KIMO사의 CP 210 Transmitter가 사용되었다. 압력 강하량은 동일한 유량을 공급하는 조건에서 장비가 포함되었을 때와 장비가 포함되지 않았을 때의 압력을 측정하여 두 값의 차이를 계산하여 확인하였다.

유량 공급 조건에 따른 압력 강하량 실험 결과는 Fig. 11과 같다. 시험 결과를 통해 0.018 ~ 0.062 kg/s의 질량유량 조건에서 TM이 BM보다 16.80 ~ 28.07%의 압력강하 성능개선이 있었고, BM과 TM의 압력 강하량은 질량유량이 증가함에 따라 지수적으로 증가하는 경향을 시험을 통해 확인하였다.

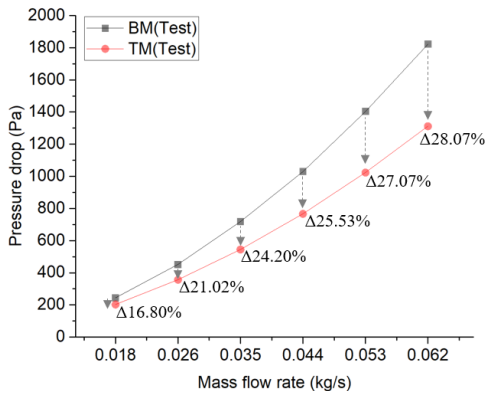


Fig. 11. Pressure drop according to flow rate (experiment)

2.6 해석 및 시험결과 비교

Fig. 12는 수치해석과 시험 결과를 비교 분석한 것이다. 질량유량 공급조건을 선형적으로 변경할 때 압력 강하량은 지수적으로 증가하는 경향을 보였고, 위상 최적화를 통해 구한 매니폴드 형상인 TM의 압력 강하량 성능의 개선이 있었다. 각 모델에서 수치해석과 시험의 결과 값이 1% 이하의 차이를 나타내어 분석 결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

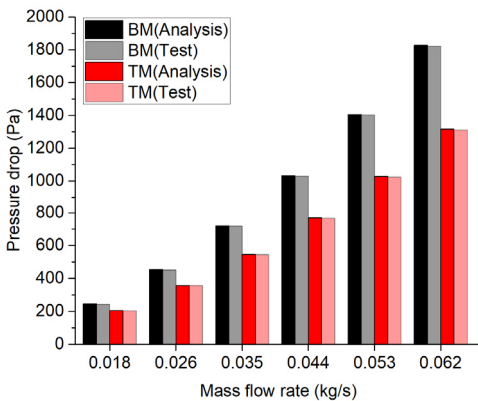


Fig. 12. Comparison between CFD & experiment data

3. 결론

본 연구에서는 위상 최적화를 활용하여 압력 강하량을 최소화하는 공랭식 전자장비 냉각 시스템의 매니폴드 형상을 구현하고, 수치해석/제작/시험을 통해 성능을 분석

및 검증하였다.

위상 최적화를 통해 구현된 형상(TM)은 압력 강하량 측정 시험에서 기존 형상(BM)에 비해 16.80 ~ 28.07%의 압력 강하량 개선효과를 보여주었다. 이는 대상 플랫폼의 환경제어 시스템에 요구되는 냉각 공기 공급압력을 최소화할 것으로 기대된다.

본 연구에서 제시한 압력 강하량 최소화를 목적으로 한 유동 체적의 위상 최적화 방법은 적층 제조 기술의 발전과 함께 향후 전자장비의 열관리 성능을 개선시키는데 매우 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

본 연구에서는 압력 강하량 개선만을 목적으로 유동패턴과 압력 강하량을 검토하였기에 향후 연구에서 대상 장비의 발열 모사를 통해 열성능 영향성 분석이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

References

- [1] C.C. Wang, "A quick overview of compact air-cooled heat sinks applicable for electronic cooling—recent progress.", *Inventions* 2, no.1, Feb, 2017, DOI: <https://doi.org/10.3390/inventions2010005>
- [2] J.H. Lee, S.J. Yoon, J.M. Lee, J.H. Heo, "A Study on the Optimization of Air-Cooled Flow Channels Shape for Cooling of Antenna Array-Type High-Power Module", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.24, No.8, pp.598-606, Aug. 2023, DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.8.598>
- [3] K. Gocmen, H.S. Soyhan, "An intake manifold geometry for enhancement of pressure drop in a diesel engine." *Fuel*, Volume 261, 116193, Feb, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116193>
- [4] K.S. Prakash, "Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview.", *Materials Today: Proceedings*, Volume 5, Issue 2, Part 1, Pages 3873-3882, Jan, 2018, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.642>
- [5] O. Sigmund, K. Maute, "Topology optimization approaches: A comparative review.", *Structural and multidisciplinary optimization*, 48, no.6, 1031-1055, Dec, 2013, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00158-013-0978-6>
- [6] O. Sigmund, "Design of multiphysics actuators using topology optimization-Part I: One-material structures" *Computer methods in applied mechanics and engineering*, Vol.190, 49-50, pp.6577-6604, Oct. 2001, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0045-7825\(01\)00251-1](https://doi.org/10.1016/S0045-7825(01)00251-1)
- [7] S. Zeng, B. Kanargi, P.S. Lee, "Experimental and numerical investigation of a mini channel forced air heat sink designed by topology optimization.", *International Journal of Heat and Mass Transfer*,

Vol.121, . pp663-679,Jun. 2018,

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.039>

- [8] D. Martínez-Maradiaga, A. Damonte, A. Manzo, J.H.K. Haertel, K. Engelbrecht, "Design and testing of topology optimized heat sinks for a tablet." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.142, 118429., Oct. 2019,
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.07.079>
- [9] S. Ghosh, R. Wardell, S. Mondal, E. Fernandez, A. Ray, J. Kapat, "Topology Optimization and Experimental Validation of an Additively Manufactured U-Bend Channel." *ASME. J. Fluids Eng.* Vol.144(7): 071206, Feb. 2022,
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4052928>
- [10] MIL-STD_2218, MILITARY STANDARD: THERMAL DESIGN, ANALYSIS, AND TEST PROCEDURES FOR AIRBORNE ELECTRONIC EQUIPMENT (20 MAY 1922)

윤민한(Min-Han Yoon)

[정회원]



- 2014년 2월 : 한서대학교 항공기계공학과 (공학사)
- 2014년 2월 ~ 2021년 2월 : (주)에이엠시스템 구조설계팀 과장
- 2021년 3월 ~ 현재 : 한화시스템 기계설계팀 선임연구원

<관심분야>

기계/재료, 국방과학

허재훈(Jae-Hun Heo)

[정회원]



- 2003년 2월 : 아주대학교 기계공학과 (기계공학사/전자공학사)
- 2022년 2월 : 성균관대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2002년 11월 ~ 현재 : 한화시스템 기계설계팀 수석연구원

<관심분야>

기계/재료, 국방과학

이정민(Jung-Min Lee)

[정회원]



- 2014년 2월 : 전북대학교 기계시스템공학부 (기계공학사)
- 2016년 2월 : 성균관대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2016년 1월 ~ 7월 : SK하이닉스 장비기술팀 선임연구원
- 2016년 7월 ~ 현재 : 한화시스템 기계설계팀 전문연구원

<관심분야>

기계/재료, 국방과학

이주현(Ju-Hyun Lee)

[정회원]



- 2016년 2월 : 한양대학교 기계공학부 (기계공학사)
- 2015년 12월 ~ 현재 : 한화시스템 기계설계팀 선임연구원

<관심분야>

기계/재료, 국방과학