

선택적 레이저 소결 기술을 활용한 철도차량 제동밸브 바디 설계 연구

김무선

한국철도기술연구원 도시철도연구실

A study on the design process of the brake valve body of railroad vehicle by selective laser sintering

Moo-Sun Kim

Urban Railroad Research Department, Korea Railroad Research Institute

요약 본 연구에서는 현재 알루미늄 합금으로 제작되어 사용하는 철도차량의 주제동밸브 모듈 본체를 3D 프린팅 기술을 활용하여 열가소성 수지로 제작하기 위한 설계 방안 연구를 진행하였다. 일반적으로 철도차량 주제동밸브 모듈의 본체는 기계 가공 기술을 이용하여 알루미늄 블록 가공 방식으로 제작하게 된다. 이를 열가소성 플라스틱을 활용한 3D 프린팅으로 제작하는 경우 공정 특성과 제품 기능 특성을 감안한 재설계를 진행하여야 한다. 또한 3D 프린팅으로 제작시 본체 내부 유로 형상의 설계자유도가 확장되어 압력 기반 유동 효율을 향상할 수 있다. 이번 연구에서는 모듈 본체를 대표적인 3D 프린팅 기술의 하나인 선택적 레이저 소결 기술로 제작하기 위해서 고려해야 하는 설계 방안 수립을 목적으로 하여, 각 단계를 정립하였다. 각 구성 단계는 소재 특성, 표면 거칠기 특성, 유로 곡선화에 따른 유동 효율 검증 등으로 구성하였으며, 이를 기반으로 내부 유로 곡선화와 제작을 위한 재설계를 진행하였다. 최종적으로 3D 프린팅으로 제작한 주제동밸브 본체를 대상으로 성능시험을 진행하였다.

Abstract This study evaluated a production plan to make the body of the main brake valve module of a railway vehicle made of aluminum alloy with a thermoplastic resin using 3D printing technology. In general, the main body of the brake valve module of a railway vehicle was manufactured using the machining process of an aluminum block. In the case of manufacturing the body structure by 3D printing technology using thermoplastic, a redesign process should be carried out considering the mechanical properties and the surface characteristics. In addition, when 3D printing is applied to manufacturing, the design freedom of the internal flow path shape of the body is expanded so that the pressure-based flow efficiency can be improved. In this study, each stage of design was established to consider a design plan to manufacture the module body with selective laser sintering technology, which is one of the representative 3D printing technologies. Configuration steps consisted of the material characteristics, surface roughness characteristics, and flow efficiency verification according to flow path curvature. Based on this, the redesign of the internal flow path curvature for fabrication was carried out. A performance test was conducted following the production of the main body by 3D printing.

Keywords : 3D Printing, Brake Valve System, Roughness, Selective Laser Sintering, Thermoplastic

본 연구는 한국철도기술연구원 자체사업(RP22139B)의 연구비 지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Moosun Kim(Korea Railroad Research Institute)
email: mskim@krii.re.kr

Received October 17, 2022

Revised November 14, 2022

Accepted December 7, 2022

Published December 31, 2022

1. 서론

철도차량의 운행과 관련된 중요한 성능 중 하나인 제동 특성은 회생제동과 공기제동으로 구성된다. 회생제동은 전기모터의 추진력 대신 저항력을 이용하여 공기제동은 압축공기를 이용하여 차륜 담면 또는 디스크에 제동력을 전달하게 된다. 공기제동의 경우 열차 속도와 하중, 정차를 위한 필요 거리 등 여러 조건을 고려하여 제동에 필요한 적정 공기압을 가하는 방식으로 작동하며 관련된 주요 부품으로 주제동밸브 모듈이 있다. 주제동밸브 모듈은 모듈 내부에 구성된 복잡한 유동 회로의 조합으로 열차 운행 조건에 적합한 공기 압력을 출력한다. 주제동밸브 모듈제작시 밸브 본체 내부의 유동회로 구성은 전통적인 기계가공 기술을 통해 제작된다.

기계가공에 의한 제작과정은 알루미늄 블록에 드릴링을 통해 적정 위치와 직경 및 길이로 유동 채널을 가공하고, 사면에서 가공된 채널들의 연장과 연결을 통해 최종 유로형상이 완성된다. 이 때 회로 구성시 잉여홀 가공이 필요할 수 있으며, 가공이 완료된 후 잉여홀의 입구 밀폐 작업이 추가된다.

따라서 기계가공 방식으로 밸브 본체를 제작시 형상의 복잡함 때문에 제작 난이도가 높아지며, 본체 내부에서 주변 유로간 간섭을 피하기 위해 설계 제약이 따를 수 있다. 또한 사면에서 가공된 유로 연결시 연결 부위의 형태는 수직 연결이 유일하므로 내부 유동의 효율 측면에서 불리한 특성을 가진다.

앞서 살펴본 바와 같이 제동밸브 모듈 본체의 기계가공 제작시 발생할 수 있는 설계 제약과 유동 효율 측면의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 3D 프린팅 기술을 활용한 제작 방안을 고려할 수 있다.

3D 프린팅 기술은 형상설계 및 제작의 자유도가 높기 때문에 복잡한 내부구조를 가진 구조물을 제작에 유리하며, 일체형 부품 제작이 가능하므로 기존 제품 대비 개선된 성능을 확보할 수 있다. 따라서 3D 프린팅 기술을 활용한 제품 최적설계 및 제작 관련 연구 또한 3D 프린팅 기술 연구의 중요한 부분을 차지하고 있다.

관련된 연구 예로서 Lee [1]는 파워 플랜트 관련 부품을 3D 프린팅 기술로 제작하기 위한 최적 설계 연구를 진행하였다. 그리고 Yi 등[2]는 3D 프린팅 기법을 활용한 솔레노이드 밸브 설계연구를 진행하였다. 또한 Jung 등[3]은 3D 프린팅 기술을 활용한 정밀 스테이지 제작 연구를, Kim 등[4]은 슬롯-다이 코터 내부의 레저바위 형상 최적설계 및 3D 프린팅 기술을 활용한 제작방안을

연구하였으며, Ahn 등[5]은 3D 프린팅 기술의 금형 적용 관련 연구를 수행하였다.

3D 프린팅 제작 구조물은 일반적으로 프린팅 공정 조건에 따라 제품 형태의 변동 폭이 크다. 예로 프린팅 방식에 따른 제작 가능한 제품 사이즈 한계, 적층 방향에 따른 물성의 차이, 제작시간의 효율, 중공 구조물 성형시 내부 서포트의 설치 영역 등 공정 조건에 따라서 제품 설계가 달라진다. 기존 제품의 설계방식 적용시 3D 프린팅 제작이 불가능하거나 성능 효율이 저하되는 등의 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 구조물 설계시 프린팅 공정 특성에 대한 광범위한 조건을 고려해야 하는 어려움이 있다.

3D 프린팅 제작 대상물이 구조 특성이 중요한 제품인 경우, 최적 설계는 보편적인 위상최적화 기술로 접근하여 기초 설계안을 도출할 수 있다. 하지만 열 또는 유체 특성이 중요한 구조물을 대상으로 하는 설계도출기술은 부재한 상황이다.

그러므로 열 또는 유동특성과 관련한 부품을 3D 프린팅으로 제작하기 위한 최적 설계를 도출할 때, 공정 특성과 열유동 특성을 함께 고려하기 위한 체계적인 설계 접근 방안이 필요하다.

본 연구에서는 철도차량용 주제동밸브 모듈의 본체를 제작하기 위한 방안으로 3D 프린팅 기술을 적용시 공정 특성과 제품 특성을 동시에 고려하여 제품의 최적 설계를 도출할 수 있는 방안 수립에 중점을 두었다. 제작 방안의 구성 절차별로, 공정 특성을 고려한 소재 선정, 공정특성에 따른 물성 변화, 내부 유로 제작시 유동 효율에 영향을 미칠 수 있는 유로 표면 거칠기, 그리고 유동 효율을 높이기 위한 내부 유로 재설계 방안과 함께 시제품 제작과 기본 성능을 검토하였다.

2. 본론

2.1 제동밸브

이번 연구의 대상인 철도차량에 쓰이는 주제동밸브 모듈은 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 여러 부품으로 구성되어 있는 시스템이다. 주요 구성품으로는 알루미늄으로 제작된 본체에 솔레노이드 밸브들과 압력 센서 등이 부착된다. 주제동밸브 모듈의 내부는 압축공기 압력으로 약 8bar(0.81MPa)의 최대 압력이 작용하는 환경이다.

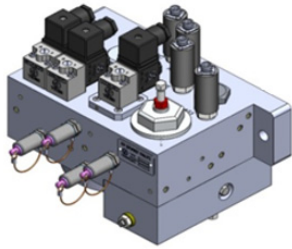


Fig. 1. Main brake valve module of railroad vehicle

주제동밸브 모듈에서 본 연구의 3D 프린팅 제작 대상 품은 알루미늄으로 제작되는 본체이다. Fig. 2에 기존 제품의 본체 내부 유로 형상을 나타내었다.

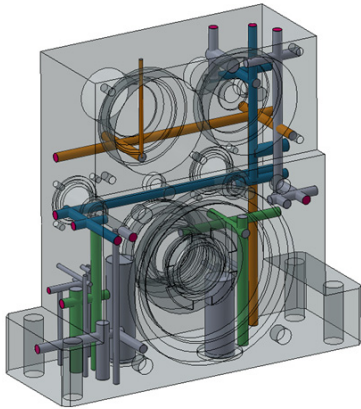


Fig. 2. Internal flow channels in module body

2.2 SLS 공정 기술

본 연구에서 활용한 3D 프린팅기술은 SLS(Selective laser sintering) 공정 기술이다. SLS 공정기술 방식은 파우더 형태인 원소재를 제작 플레이트에 적층하고 그 위에 레이저 빔을 조사하여 해당 영역의 소재를 소결하는 방식으로 진행한다. 그리고 동일 과정을 반복 진행함으로써 2차원 평면의 적층으로부터 점차적으로 3차원의 구조물을 제작하는 방식이다. Fig. 3에 해당 공정기술의 개념을 도시하였다[6]. 레이저 소결과 밀접한 관련이 있는 공정 조건으로는 레이저 파워, 레이저 스캐닝 속도, 간격 및 적층 두께를 들 수 있다.

SLS 공정에서는 2차원 구조물을 3차원으로 적층하는 기법으로 인해 기계적 물성의 방향성이 생기게 된다. 또한 배관과 같은 중공 구조물을 성형할 때 금속소재의 경우 써포트라는 잉여 구조물을 중공 구조물, 즉 홀 내부에

병행 제작하여 일체 성형시 발생할 수 있는 홀 형상의 무너짐을 방지해야 하며, 플라스틱 소재의 경우 낮은 용융 점으로 인해 소결 영역 주변의 파우더가 달라붙게 되므로 제작할 수 있는 홀 직경의 제한이 따른다. 따라서 이와 관련된 공정 특성을 감안하여 본체의 내부 유로 설계 및 제작을 진행해야 할 것이다.

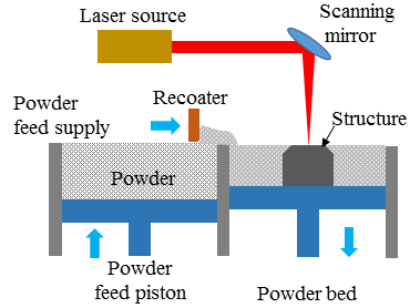


Fig. 3. Schematic diagram of SLS [6]

2.3 본체 제작 방안 수립

SLS 공정기술로 밸브 모듈 본체를 제작하기 위한 방안의 단계별 구성을 Fig. 4에 도시하였다.

첫 번째 단계는 적용 소재의 선정이다. 현재 쓰이고 있는 알루미늄 본체는 초기 알루미늄 블록에 기계가공으로 유로를 제작한 방식이기 때문에 유로 주변 영역에 구조특성 기여가 적은 잉여 중량 구조물이 존재한다. 본 연구에서는 본체의 경량화 효과를 확보할 수 있도록 엔지니어링 플라스틱 소재를 적용하였다. 이는 금속 소재 적용시 유로 직경에 따라 내부에 써포트를 제작한 후 제거해야 하는 문제점 또한 회피할 수 있는 방안이기도 하다.

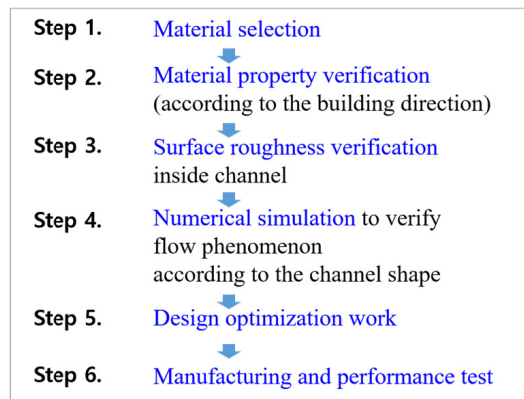


Fig. 4. Composition of the main body manufacturing plan

두 번째로 공정 특성에 따라 적용소재의 물성 변화를 시험 검증하였다. 이 경우 기본적인 공정 파라미터 조건에서 구조물의 적층 방향에 따른 물성을 평가하여 최종 제품의 적층 방향에 따른 영향을 예측하게 된다.

세 번째로는 제작되는 유로 표면 특성과 이들의 제작 특성 관련 시편 검증을 진행하였다. 압력 밸브의 내부 유로는 약 8bar 수준의 최대 압축공기 유동이 형성된다. 이 때 유로 표면 특성, 즉 거칠기는 유동 효율에 영향을 미칠 수 있으며, 또한 시간이 지나면서 표면에 미세 이물질이 누적되어 유동 흐름을 방해하게 된다.

네 번째로 유로 형태에 따라 유동 효율이 변화되는 효과를 압축 유동 해석을 통해 검증하였다. 이를 통해 기존 유로 형상과 대비하여 3D 프린팅으로 제작하는 일체형 곡선 유로 안에서 유동 효율 변화를 확인한다.

다섯 번째로 사각 블록형태의 본체 구조물에서 경량화 효과를 얻기 위해 잉여 구조물을 제거하고, 내부 직교 유로 형상을 곡선 형상으로 전환하는 설계 최적화 작업을 진행한다. 마지막으로, SLS 공정기술을 적용하여 최적설계안을 기반으로 시험용 제품을 제작하고, 주변 부속품 목과 조립한 후 실제 성능 테스트를 진행하고 효과와 문제점을 확인한다.

2.4 단계별 연구 내용

2.4.1 소재 선정 및 물성 평가

본체 내부 유로성형의 한계와 경량화를 고려하여 기존 알루미늄 합금 대신 엔지니어링 플라스틱 적용을 검토하였다.

소재 물성 특성 분석을 위해 참조한 Kim [6-8]이 진행한 시험 연구에서 대상 소재는 PA12 기반으로 EOS社에서 생산하는 PA2200 (평균 입자크기 $56 \mu\text{m}$, 밀도 0.93 g/cm^3)이며 시편 제작 장비는 EOS社의 P396 모델을 활용하였다. 소재 물성시험 종류는 적층방향(0° , 45° , 90°)에 따른 대상 소재의 인장시험[6], 굽곡시험[7], 충격시험[8]이며 참조 연구의 결과를 Fig. 5에 도시하였다.

결과에서 보이는 바와 같이, 인장강도, 굽곡강성 및 강도는 45° 적층각도 조건에서 상대적으로 낮은 값을 갖지만 그 차이가 미미하며, 인장강성과 충격강도는 적층 방향에 따른 특성변화를 뚜렷하게 확인할 수 있다. 하지만, 제동밸브 내부의 최대압력이 8bar인 것을 감안하면 적층방향에 따른 소재 물성 차이로 인한 구조 안전성은 영향이 거의 없을 것으로 판단되므로, 소재 물성에 따른 제품 제작 방향(적층방향) 고려는 생략할 수 있다.

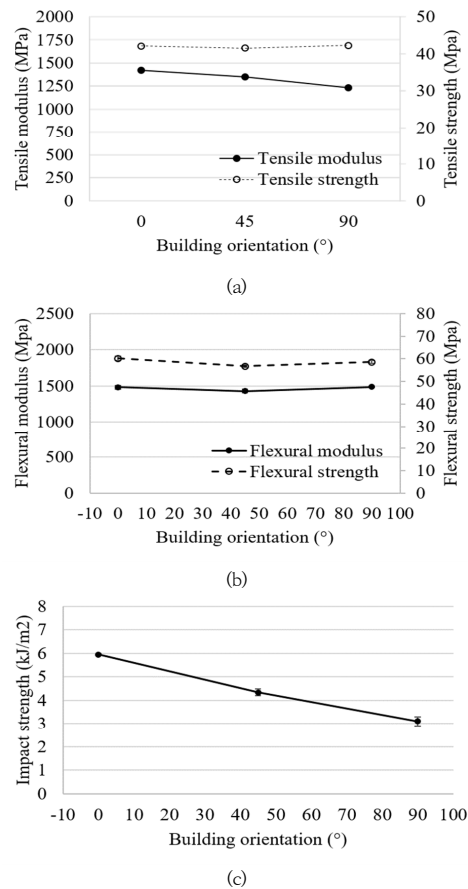


Fig. 5. Comparison of (a) tensile property[6], (b) flexural property[7] and (c) impact property[8] of PA2200 according to the building orientation

2.4.2 표면 특성 평가

다음으로는 유동 흐름에 영향을 줄 수 있는 내부 유로 표면 특성에 관한 검토를 진행하였다. 금속 소재와 달리 플라스틱 소재의 SLS 공정에서는 중공 형태의 구조물 내부에 써포트 설치가 불필요하기 때문에 써포트 제거를 위한 후공정이 필요하지 않다. 다만, 소결영역의 주변 파우더 소재가 달라붙어 표면특성에 영향을 줄 수 있다. 이에 대한 영향을 평가하기 위해 표면거칠기 분석이 필요하며, 해당 내용과 관련된 Kim[9]의 연구결과를 참조하였다. Fig. 6에 적층방향별 표면거칠기 참조 연구의 결과를 도시하였다. 방향별로 값의 차이가 있으며 약 7~12 μm 범위의 거칠기 값을 확인하였다. 기존 알루미늄 블록의 허용 표면거칠기 R_{max} 가 제품 요소별로 0.8~6.3 μm 임을 감안하면 표면 품질 개선방안이 수반되어야 할 것으로 판단된다.

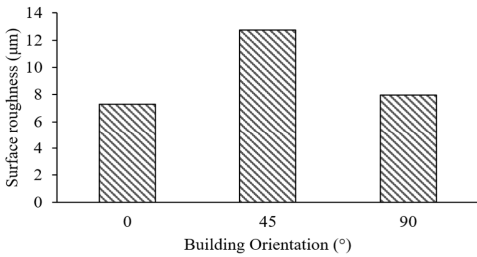


Fig. 6. Surface roughness of specimen by SLS[9]

2.4.3 수치해석을 통한 유동특성 분석

SLS 공정기술이 기존 기계가공 기술 대비 상대적인 장점으로 내부 유로 형상의 자유도를 들 수 있다. 기계가공의 직각 교차형 유로 대신 곡선형 유로 성형이 가능하며, 이에 따른 유동 효율 향상 잇점이 추가된다. 따라서 제동 밸브 모듈 내부의 유동 조건에서 유로 형상 변경으로부터 기인되는 유동특성의 변화 검토가 요구된다. 이를 위해 Kim 등[10]의 연구결과를 참조하였다.

참조 연구에서 진행한 해석 도메인은 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 꺾인 유로 중앙부분에서 곡률반지름이 0mm, 25mm, 50mm를 가지는 조건으로 구분하였으며, 해석 조건은 입력단 압력 8bar 및 출구단 압력 1bar 조건으로 일정 시간 이후 유로 벽면에 작용하는 최대 및 최저 압력의 차이를 비교하였다.

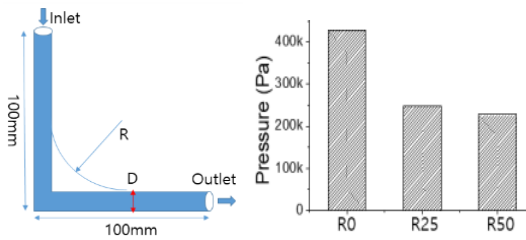


Fig. 7. Geometry of the channel domain and max-min pressure difference along the channel [10]

참조 연구 결과에서 곡률 유로 적용시 압력 변화값이 감소함을 확인할 수 있으며, 곡률반지름이 증가할수록 압력차이가 점차 감소한다. 이는 곡률반경이 커질수록 압력 분포가 균일하고 압력저하가 줄어들음을 의미한다.

2.4.4 설계 최적화

기본적인 물성 검증과 성능을 위한 유동특성 검증 후 이를 기반으로 하는 밸브 모듈 본체의 설계 최적화를 진행하였다. 설계 최적화 목적은 기존 제품의 잉여 구조물

을 제거하여 경량화 효과를 확보하고, 내부 유로 형상을 곡선화하여 유동 효율을 향상하는 것이다. 설계시 주의 사항으로 기존 주변 품목들과 체결되는 체결부의 형상은 그대로 유지하였다. 본체 최적설계의 단계별 내용은 다음과 같다.

- 1) 기존 제품의 내부 유동 회로 분석
- 2) 기존 제품 내부 유로 가공을 위해 생성한 내부 잉여물 제거
- 3) 내부 유로 주변의 잉여 구조물 영역 제거
- 4) 유동 효율 향상을 위한 유로 곡률 생성
- 5) 적정 유로 두께 설계
- 6) 최종 설계안 도출

Fig. 8에 최적설계를 위한 각 절차를 도시하였다.

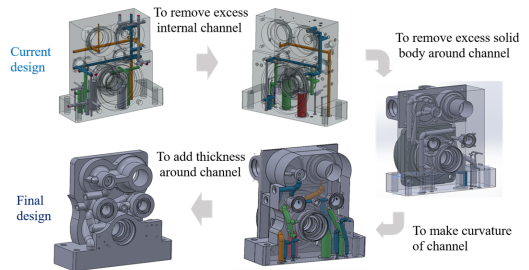


Fig. 8. Design procedure of valve module body for SLS manufacturing process

2.4.5 제작 및 성능시험

최적설계안을 기반으로 시작품을 제작하였다. 시작품은 특성 검증을 진행한 참조연구[6-10]와 동일한 소재 및 동일 기기를 활용하였다.

완성된 최종제작품과 기존 제작품을 Fig. 9에 나타내었다. 제작 시작품의 최종 중량은 주변 밸브류를 부착한 기준으로 기존 제품 중량인 14.5kg에서 7kg으로 감소하여 약 50%의 중량절감 효과를 가진다.

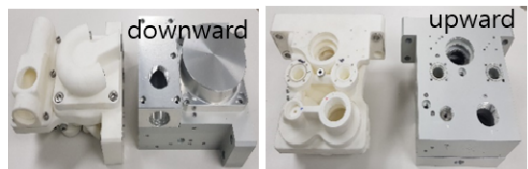


Fig. 9. Comparison of products by SLS and machining

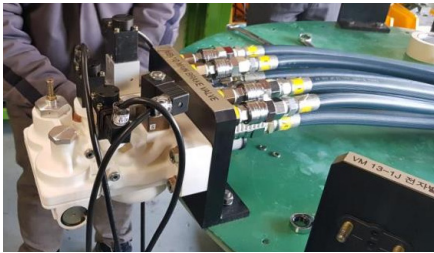


Fig. 10. Installation of valve module for performance test

3D 프린팅 시작품의 성능 평가는 Fig. 10에 보이는 바와 같이 주변 전자밸브 부품들을 체결한 상태에서 제동 압력 모사 시험기에 연결하여 진행하였다.

Table 1. Results of main performance test

Test	Tolerance	Result
Supply sensitivity	≤0.15 bar	0.01 bar (pass)
Exhaust sensitivity	≤0.10 bar	0.01 bar (pass)
Leak	≤0.10 bar for 1 min	1.5 bar (fail)

주요 측정 항목의 시험결과는 Table 1에 표기하였다. 밸브 내부 유동과 연관된 압력공급과 배기와 관련된 감도 평가에선 기준치를 만족하였으나 외부 압력 누설 항목에서는 기준치를 충족하지 못하였다. 이는 제작된 시작품과 주변 부품 체결시 치수 오차 및 불완전한 실링 상태에서부터 기인한 것으로 판단되는데, 플라스틱 소재인 본체와 금속 소재인 주변 부품의 결합부 단차가 발생한 가능성이 높다. 이와 더불어 3D 프린팅 구조물의 표면 거칠기 특성이 일반 기계가공 대비 상대적으로 저하되었기 때문에 실링 효과에 영향이 있는 것으로 추정된다. 문제해결을 위해 플라스틱과 금속 이종소재간의 체결시 실링효과를 높일 수 있는 결합 구조 적용 등 추가 방안 고려가 필요한 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 현재 철도차량의 제동 관련 부품인 주 제동밸브 모듈의 알루미늄 본체를 엔지니어링 플라스틱을 활용하여 3D 프린팅 기술인 SLS 공정기술로 제작하기 위한 방안 수립을 목표로 단계별 필요 연구내용을 정립하였다. 3D 프린팅 공정 기술 적용의 목적은 기계가공

으로 인한 금속 소재 적용으로 잉여 중량이 불가피하고 가공기술의 한계로 인해 유동 효율이 저하되는 기존 제품의 문제점을 최소화하기 위함이다. 동시에 3D 프린팅 공정 기술 적용시 공정 특성을 고려한 최선의 제작 방안이 마련되어야 한다. 본 연구에서는 기존 제품의 본체를 엔지니어링 플라스틱 활용 3D 프린팅으로 제작하기 위한 재설계를 진행하면서, 단계별 수행내용의 배경과 그 결과들을 요약하였으며, 최종 제품의 제작과 성능 시험 진행을 통한 개선점 등을 도출하였다.

먼저 3D 프린팅 공정기술 적용을 위한 밸브 모듈 바디의 재설계 절차를 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 1) 경량화 및 유로와 같은 중공구조물 제작시 내부 공간에 써포트 제작을 피할 수 있는 엔지니어링 플라스틱 소재를 선정한다
- 2) 선정 소재의 적층방향에 따른 기계적 물성을 평가하여, 제작 방향에 따른 물성 변화를 검토한다. 제작시 적층방향 선택과 압축공기의 압력에 의한 구조안전성에 문제가 없음을 확인한다.
- 3) 공정 특성 중의 하나인 파우더 소재간 응집 현상의 영향을 고려하기 위해 중공 구조물의 내부 표면 거칠기 특성을 확인한다.
- 4) 3D 프린팅 기술의 장점인 높은 설계 자유도를 활용하는 방안으로, 제동 밸브 모듈 내부의 유동 조건에서 유로 형상 변경으로부터 기인되는 유동특성의 변화를 검토한다.
- 5) 기존 제품의 잉여구조물 제거와 내부 유로 형상의 곡선화를 포함한 재설계를 진행하여 3D 프린팅 공정에 적합한 최적 형상을 도출한다.
- 6) 설계안을 기반으로 제품 제작을 진행하고 경량화 효과 확인 및 성능시험을 진행한다.

최종 제작품의 성능 시험 결과 압력 누설관련 문제점을 보였으며, 이에 대한 원인 추정과 추가 보완사항을 확인하였다.

결과적으로 본 연구의 결과물인 최종 제품이 성능 요구치를 만족하지 못하였지만, 단순한 형상 복제에 머물거나 프린팅의 장점이 고려되지 않은 현재의 3D 프린팅 활용방식에서 벗어나, 제품 특성에 따른 3D 프린팅 활용방안의 새로운 접근방법을 제시하고, 또한 그 효과를 최대화하기 위해 3D 프린팅 공정 특성을 고려한 설계 방안을 제시한 것은 향후 3D 프린팅 공정 기술 활용을 위한 설계 가이드로 활용이 가능할 것이다.

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: <http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2016.33.5.341>
- [3] 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>
- [4] 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>
- [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: <https://doi.org/10.7736/KSPE.2014.31.12.1093>
- [6] M. Kim, "Study on Tensile Properties of Polyamide 12 produced by Laser-based Additive Manufacturing Process", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 20, no. 11, pp. 217-223, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.11.217>
- [7] M. Kim, "Study on Flexural Properties of Polyamide 12 according to Temperature produced by Selective Laser Sintering", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 19, no. 11, pp. 319-325, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.11.319>
- [8] M. Kim, "Study on Impact Properties of Polyamide 12 depending on Temperature by Selective Laser Sintering Process", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 19, no. 10, pp. 132-142, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.10.136>
- [9] M. Kim, "Study on the Surface Characterization of Structure made of Polyamide 12 manufactured by Additive Manufacturing Process", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 20, no. 9, pp. 481-487, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.9.481>
- [10] S. M. Kim, M. Kim, "Numerical Study on the Super Sonic Phenomenon of Compressed Air according to the Flow Path Conditions", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, vol. 20, no. 2, pp. 470-476, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.1.470>

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 책임연구원

<관심분야>

적층기법, 최적화, 열유동 및 구조 해석