

• 특집 • 적층 제조 특화 설계기술

열간 단조금형 이형제 분사용 매니폴드 적층 제조 설계 및 평가

Additive Manufacturing of a Release Agent Injection Manifold for Hot Forging

이학성¹, 정민교², 김은아¹, 원순호³, 천도욱⁴, 하태호^{2, #}
Hak-Sung Lee¹, Min-Kyo Jung², Eun-ah Kim¹, Soonho Won³, Do Wock Chun⁴, and Taeho Ha^{2, #}

¹ 한국재료연구원 3D프린팅재료연구실 (Department of 3D Printing Materials, Power Research Division, Korea Institute of Materials Science)
² 한국기계연구원 3D프린팅장비연구실 (Department of 3D Printing, Advanced Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials)
³ 한국재료연구원 재료특성평가실 (Department of Materials Testing and Evaluation, Korea Institute of Materials Science)
⁴ 세원금속(주) 부설연구소 (Research Center, Sewon Metal Co., Ltd.)
Corresponding Author / E-mail: taehoha@kimm.re.kr, TEL: +82-42-868-7946
ORCID: 0000-0001-9957-3826

KEYWORDS: Additive manufacturing (적층 제조), Design for additive manufacturing (적층 제조 특화 설계), Manifold (매니폴드), Release agent (이형제), Computational fluid dynamics (전산 유체 역학), Adjoint variable methods (설계 민감도 해석)

In this study, design for additive manufacturing (DfAM) of release agent injection manifold for hot forging has been performed to achieve weight reduction and flow path optimization. The weight reduction of 53.5% was achieved, thereby enabling the application of stainless steel 316L, which has high strength and corrosion resistance. Lightweight manifolds using Al-Mg-10Si and SUS316L materials were fabricated by PBF-type metal 3D printer. The feasibility test showed that mold life was improved by 14% by solving residual release agent problem. In addition, the flow path optimization results suggested that the flow standard deviation of each outlet dropped sharply from 264 to 75 cm³/s. This approach demonstrated that DfAM for release agent manifold could be applied to increase mold life and improve product quality and productivity for hot forging.

Manuscript received: July 5, 2021 / Revised: August 8, 2021 / Accepted: August 9, 2021

1. 서론

열간 단조 공정은 고온의 소재를 소성 가공을 통해서 제품을 생산하는 기술로 자동차, 조선해양 분야 등 다양한 산업분야의 기반기술로, 금형 냉각을 통한 사이클 타임 단축, 공정 부품의 용이한 분리, 금형 수명 향상을 위해 이형제 분사 공정이 일반적으로 적용된다.

기존의 수작업으로는 원하는 부분에 동시·균일 도포가 불가능하며, 재현성 문제도 존재하여 균일한 품질 확보가 곤란한 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해 다수개의 이형제 분사구를 가지는 이형제 분사용 매니폴드를 이용한 자동화 공정이 적용되고

있다. 그러나, 기존의 절삭가공으로 제작된 매니폴드는 각각의 유입구(Inlet), 출구(Outlet)를 사이를 드릴 가공으로 연결하는 방식으로 균일한 이형제 토출을 위한 유로 형성이 곤란하며, 유로 직교 연결 부위 등에 남아있던 잔여 이형제가 공정 중 낙하하여 제품 성형 불량 및 금형의 수명 단축을 유발한다. 또한, 드릴 가공 시 유로 간의 간섭을 회피하기 위해서는 충분한 체적이 필요하게 되며 이는 매니폴드 중량 증가로 이어져 좁은 공간에서 동작해야 하는 소형 핸들링 로봇의 가반 하중을 초과하는 경우가 발생하여 기계적 물성이 저하되는데 불구하고, 경량화를 목적으로 AI 계열 소재를 적용하는 경우가 있었다.

경량화된 다품종 소량 생산제품을 위하여 최근 적층 제조 기술이

확산 적용되고 있다.¹ 하지만, 이를 위한 충분한 설계 도구 및 시뮬레이션 기법의 개발은 부족한 상태이며, 제품에 맞추어 특화기술의 형태로 개발할 필요가 있다.² 다수의 적층 제조 특화 설계(Design for Additive Manufacturing, DfAM) 논문이 나왔지만, 디자인 자체 기술에 대해서 언급한 것은 일부에 불과했다.³⁻¹⁶ 또한, 외벽의 두께나 제거용 홀의 크기 등 소재별 디자인 룰에 대한 연구도 수행되었으나,¹⁷⁻²³ 실제 제품 제작 및 적용연구사례는 많지 않은 상황이다.

본 연구에서는 적층 제조 특화 설계를 적용하여 열간 단조형 금형에 사용되는 이형제 도포용 매니폴드의 경량화, 유로 최적화 설계 및 실제 제품 제작을 진행하였다. 실제 적층 공정을 고려하여 구조물의 지지 가능 여부, 내부 분말 제거 용이성 등을 고려하여 경량화 설계를 하였으며, 전산 유체 역학 기반의 민감도 최적화 기술을 이용하여 매니폴드 출구의 토출 유량 증대 및 토출 유량의 균일도 확보를 위한 유로 최적화 설계를 수행하였다.²⁴⁻²⁷

도출된 설계를 기준으로 PBF (Powder Bed Fusion) 방식 3D 프린팅 장비를 이용하여 Al-Mg-10Si, SUS 316L 소재로 실제 이형제용 매니폴드 제품의 경량화 적층 제조 및 X-Ray CT를 이용한 비파괴 검사를 수행하였다. 적층 제조로 제작된 경량 이형제 매니폴드의 실제 현장 적용테스트를 통해 유용성을 확인하였다.

2. 적층 제조 특화 경량화 매니폴드 설계

2.1 매니폴드 경량화 설계

현장(세원금속)에서 사용되는 이형제 분사용 매니폴드 핸들링 로봇의 가반 하중이 5 kg로 하중 조건을 맞추기 위하여 고온 내부식성이 상대적으로 떨어지는 AI 계열 소재에 기존의 절삭 가공 방식을 적용한 매니폴드를 사용하고 있었다.

먼저 기존 제품 대비 경량화 성능 비교를 위하여 외관 및 기본 유로는 동일하게 유지하되, 잔류 이형제 발생을 방지 목적으로 유로 직교부에 곡면설계를 적용하였다. 유입구 연결부 및 노즐 장착부 강화, 내부 분말제거 용이성, 상단에 위치한 구조물의 지지 여부 등을 고려하여 경량화 설계를 진행하였다.

적층 제조 특화 설계를 위해서 Autodesk사의 Netfabb Premium Version을 활용하였으며, 설계 방법에 대해서는 Fig. 1에 작업 순서를 기반으로 표시하였다. 최초 모델로부터 체결 부위의 강화, 분말 제거용 홀 설계, 격자 구조 설계를 통하여 최종적인 모델을 얻게 된다.

전술한 바와 같이 로봇의 가반 하중을 고려하여 매니폴드의 중량은 5 kg 이하여야 하며, 외벽 등을 형성하기 위하여 최소 1.5 mm 이상의 두께가 필요하게 된다. 서포트를 형성하지 않고, 상판을 조형하기 위해서 오버행이 45° 이상으로 되어있는 X자 형태의 격자 구조를 채택하였다. Fig. 2는 격자 구조의 체적비와 외벽 및 유로 형성을 위한 최소 두께에 따른 매니폴드의 중량으로, 내압 조건을 고려하여 외벽을 2 mm 두께로 설정하고, 격자

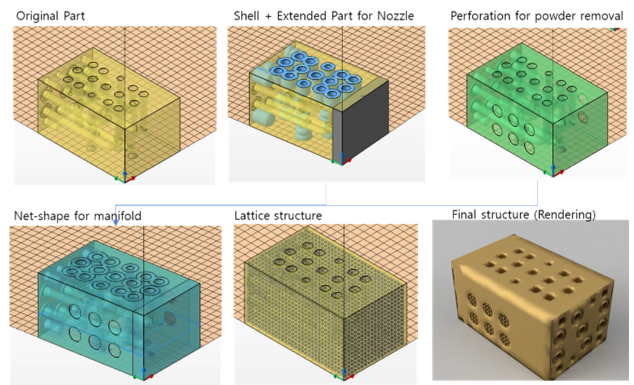


Fig. 1 Design for additive manufacturing of release agent manifold

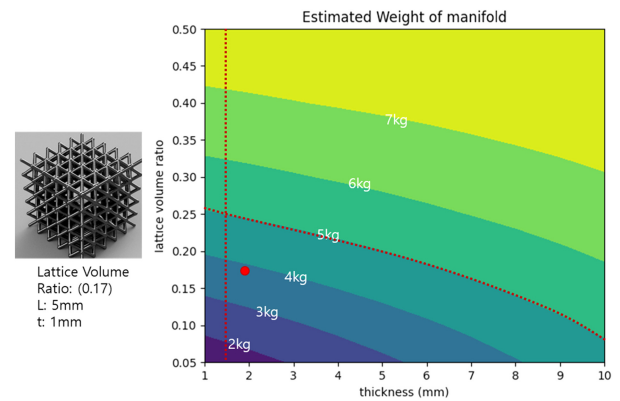


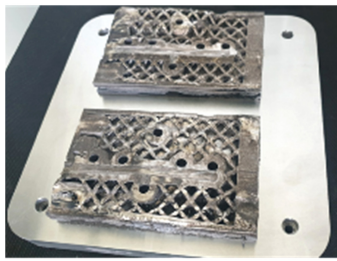
Fig. 2 Estimated weight of the designed manifold as a function of wall thickness and lattice volume ratio

Table 1 The volume and weight for original manifold and designed one with Al-base and Fe-base powders

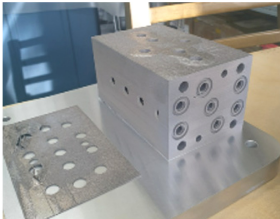
	Volume [cm ³]	Weight [kg]
Original design manifold	1,081.6	2.91 (Al), 8.58 (SUS316L)
DfAM manifold	500.5	1.35 (Al-Mg-10Si), (SUS316L)

구조 체적비 18%를 가지는 격자 두께 1 mm의 X자 형태를 5 mm 간격으로 설계하였다.

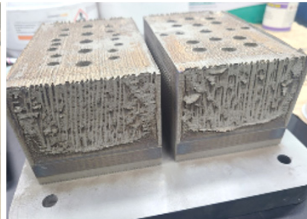
Table 1에 기존 제품과 적층 소재에 따른 DfAM 매니폴드 중량을 비교하였다. AI 소재 적용 시 적층 제조 특화 설계를 통해서 기존 2.91에서 1.35 kg로 약 53.6% 경량화가 가능함을 확인하였으며, 기존에는 하중 제한으로 채용하지 못했던 고온 내부식성 특성을 가지는 SUS316L 소재 매니폴드의 경우도 3.98 kg으로 설계기준을 만족함을 확인할 수 있었다. 이와 같이 고온 내부식성이 높은 소재 적용을 통하여 동작가능온도를 높임으로써 이형제 매니폴드 냉각을 위한 유휴 시간을 줄이고, 내부식성 및 강도를 향상시켜 이형제 분사용 매니폴드 수명의 개선 효과를 기대할 수 있다.



(a) Detachment of main part due to thermal stress



(b) Weak binding between part and build plate

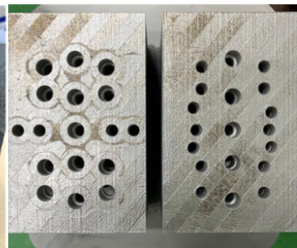


(c) Poor surface quality due to improper laser parameter

Fig. 3 Additive manufacturing failure of manifolds



(a) Al-Mg-10Si



(b) SUS316L

Fig. 4 Additive manufacturing of manifolds

2.2 경량화 매니폴드 적층 제조

설계한 경량화 매니폴드를 PBF 방식 3D 프린터(Concept Laser 사, M1/M2 장비)를 이용하여 각각 Al-Mg-10Si, SUS316L 소재를 이용하여 제작하였다.

이중 Al-Mg-10Si 소재 제작에서 발생한 주요한 결함을 Fig. 3에 예시하였다. Al 소재 적층 시 열응력으로 적층 기관과 분리되는 경우(Fig. 3(a)), 빌드 플레이트와 매니폴드의 접합력이 부족하여 제작되지 않은 경우(Fig. 3(b)), 공정 조건 오류로 인한 표면 결함(Fig. 3(c)) 등이 발생하였다. 이를 해결하기 위하여 설계 및 공정 조건 개선을 수행하였다. 적층 제조물과 적층 기관 사이에 육각 형태의 베이스 플레이트를 삽입함으로써 열 변형으로 인한 박리 현상을 억제할 수 있었으며, 유로 주변의 서포트를 강화시켜 표면 결함을 방지하였다. 또한, Concept Laser M2 장비의 QM Powder 카메라로 수집되는 적층 이미지로부터 결함을 검출하는 Python 기반의 소프트웨어를 개발하여 공정 모니터링을 통하여 제품 품질 확보를 하였다. Fig. 4에 최종 이형제 도포용 경량화 매니폴드를 나타내었다. 제작된 매니폴드의 중량은 각각 1.29 kg (Al-Mg-10Si), 3.94 kg (SUS316L)으로 설계값에 매우 근사한 결과를 얻을 수 있었다.

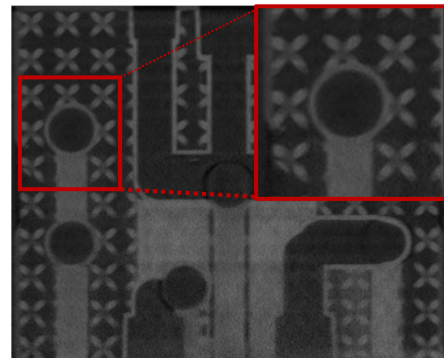


Fig. 5 X-ray tomography image for manifold (Al-Mg-10Si)



(a) Manifold test



(b) Installation of manifold

Fig. 6 On-site test of additive manufacturing manifold

2.3 경량화 매니폴드 평가

먼저 경량화 적층 제조 매니폴드의 결함 분석을 위하여 X-Ray CT (Nikon사)를 이용한 Al-Mg-10Si 소재 적층 매니폴드의 비파괴 검사 이미지를 Fig. 5에 예시하였다. Fig. 5와 같이 적층 제조 특화 설계를 통해 제한한 매니폴드의 내부 격자 구조 및 유로가 결함없이 양호하게 형성되어 있음을 확인할 수 있었다.

Fig. 6과 같이 양산 현장 적용 테스트의 수행 결과, 두 제품 모두 유로의 연결 부위 곡면설계로 기존 유로에서 문제가 되었던 잔류 이형제 문제가 개선되어 금형수명이 기존 대비 14% 정도 향상되었음을 확인하였다. 반복적인 이형제 토출로 인한 압력 변화 및 고온 환경에 노출되어 인장 강도가 하락하여 이형제 내부 유로의 누수, 결함 발생하는 경우가 보고되고 있어 고온 내부식성이 뛰어난 SUS316L 소재로 제조한 매니폴드가 안정성 면에서 적절한 것으로 판단된다.

3. 적층 제조 특화 매니폴드 유로 형상 최적화 설계

3.1 이형제 분사용 매니폴드의 유동 특성 분석

절삭가공을 고려하여 설계된 기존 이형제 분사용 매니폴드의 유동 특성 분석을 위해 범용 해석 프로그램인 OpenFOAM v1912의 CFD_Incompressible Flow Solver를 사용하여 전산 유체 해석을 진행하였다. Table 2와 같이 실제 현장에서 사용중인 이형제 물성을 적용하였으며, Fig. 7에 기존 매니폴드 모델을, Fig. 8에 결과 파악을 위해 각 입출구별로 부여한 색인을 나타내었다. Figs. 8(a)와 8(b)에 각 입구별 색인과 상부에 위치한 각

Table 2 Definitions of fluid channel

Fluid channel	Inlet index	Outlet index
Channel 1	I1	U11, U31
Channel 2	I2	U12, U22, U32
Channel 3	I3	U13, U14, U24, U34
Channel 4	I4	U21, U23, U25, U33, U43, U53
Channel 5	I5	U15, U35
Channel 6	I6	B11, B22, B23, B31
Channel 7	I7	B21, B24

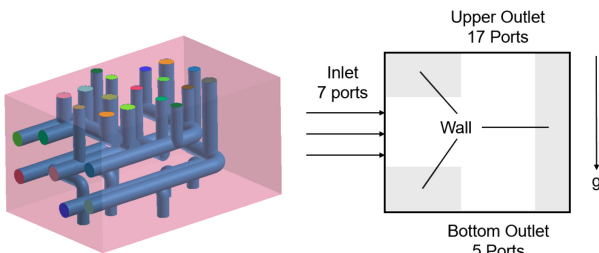


Fig. 7 Schematic figure of conventional manifold model

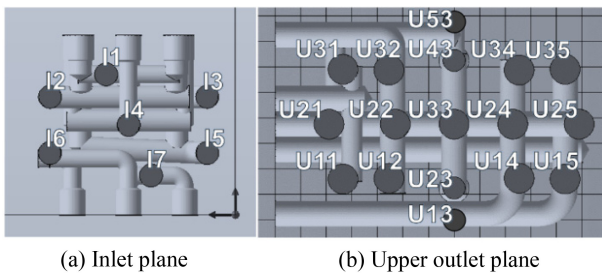


Fig. 8 Index of inlets and outlets in model manifold

출구별 색인을 도시하였다. 또한 Table 3과 같이 해석 모델의 유로 및 유로 내 입출구에 대하여 정의하여 결과 도출에 사용하였다. 실제 사용 조건에 따라 입구 전 영역에 500 kPa의 압력을 적용하였으며, 출구 압력을 0 Pa으로 설정하여 각 유로별 유량 및 유로 내 압력에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 9에 생성된 유한요소모델을 도시하였으며 해당 모델의 요소 크기는 0.2 mm로 설정하였고, 총 818,690개의 격자로 구성되었다.

Fig. 10에서 기존 매니폴드상 유로에 대한 유동해석 결과를 나타내었다. Fig. 10(a)는 채널별 압력을 나타내며 채널 2를 제외한 6개의 유로에서 300 kPa 이상의 압력 강하값을 나타내었다. 7개의 유로 중 채널 4의 유로 내 형성 압력이 약 44 kPa으로, 설정 압력 대비 456 kPa의 가장 큰 압력 강하가 발생됨을 알 수 있었다. Fig. 10(b)는 압력 강하가 최댓값을 가지는 채널 4상의 6개 출구에 대한 유량 해석 결과를 나타낸다. 출구별 유량의 경우 출구 U25에서 최댓값(954 cm³/s)을 나타내었고, 출구 U43에서 최솟값(190 cm³/s)을 나타내었다. 채널 4상의 6개의 출구 유량의 평균은 약 387이며, 표준편차는 264 cm³/s로 확인되어 출구별

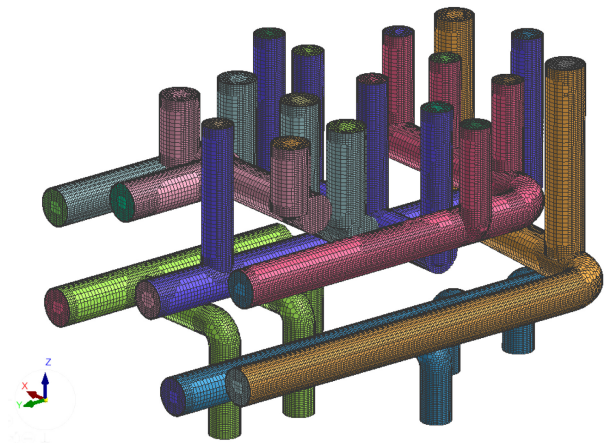
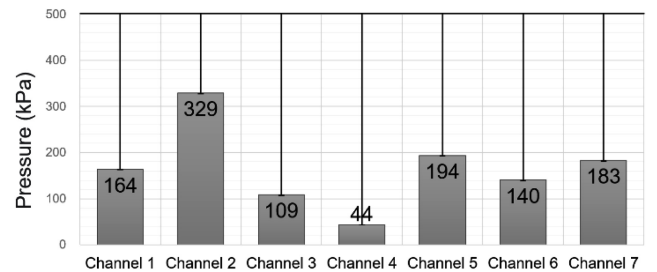
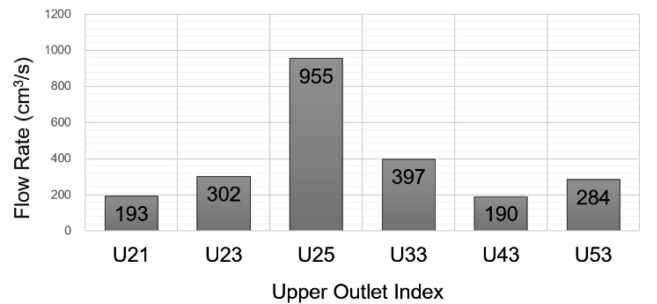


Fig. 9 Finite element model for conventional manifold model



(a) Internal pressure by channel



(b) Flow rate by outlet on channel 4

Fig. 10 Result for CFD on conventional manifold model

유량의 편차가 극심한 것으로 나타났다.

상기 기존 매니폴드 모델의 유동 해석 결과와 같이 다중 유로에서의 출구별 유량의 편차가 극심한 유동 양상은 균일한 이형제 도포가 중요한 이형제 분사용 매니폴드에 적용될 경우 도포 성능 조절이 용이하지 않으므로 적합하지 않다. 따라서 이러한 유량의 불균일성을 해결하기 위하여 기존 모델의 입출구를 재정한 후, 각 유로 내 압력 강하 감소 및 유량 균일화를 목적으로 유로 형상 최적화 기법 중 하나인 민감도 해석(Adjoint Method)을 적용하여 최적 유동 영역 도출을 진행하였다

3.2 적층 제조 특화 매니폴드 유로 형상 최적화 설계

다중 채널의 유로에 대하여 유로 최적화 형상 도출을 위해

Table 3 Redefinition of in-out ports

Inlet index	Outlet index	
	Conventional arrays	Arrays for DfAM
I1	U11, U31	U13, U23, U43, U53
I2	U12, U22, U32	U11, U12, U14, U15
I3	U13, U14, U24, U34	U31, U32, U34, U35
I4	U21, U23, U25, U33, U43, U53	U21, U25, U33
I5	U15, U35	U22, U24
I6	B11, B23, B24	B11, B22, B23, B31
I7	B21, B22, B31	B21, B24

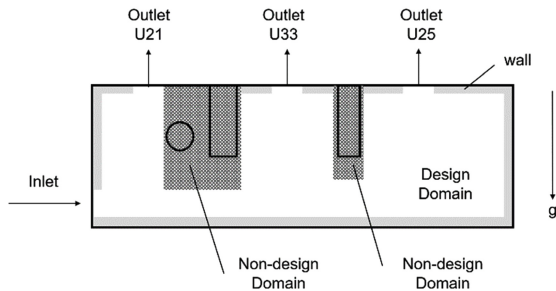


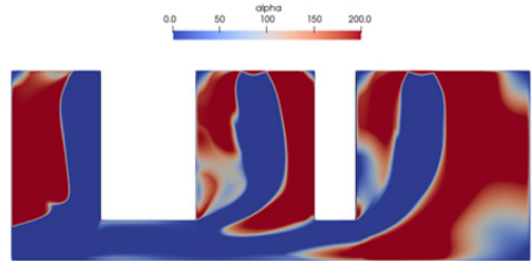
Fig. 11 Domain definitions

민감도 해석을 진행할 경우, 특정 중요도를 기준으로 지정한 순서에 따라 각각의 채널에 대한 해석이 필요하다. 특정 순번을 가진 채널의 해석은 초기 비설계 영역(Non-Design Domain)으로 지정한 영역과 해당 순번 이전에 진행한 유로 최적화 해석에서 도출된 형상이 비설계 영역이 되므로, 후순위 유로의 최적화 해석의 경우 설계 영역(Design Domain)이 이전 순번의 유로 해석과 비교하여 줄어들게 된다. 이에 따라 도출된 다중 채널의 최적 유로 형상들이 각각 동일한 유동 특성을 나타내지 않는 경우가 있으며, 이형태 분사용 매니폴드의 경우 상기한 현상이 발생하였을 때 좌우 대칭 대상물의 도포 양상이 불균일하게 나타나게 된다. 이러한 현상을 방지하기 위해 기존 입출구 배치를 대상물에 맞춰 좌우 대칭된 출구를 가지는 형상으로 재배치하여 유량이 균일하게 토출될 수 있도록 하였다.

재배치된 유로의 목록을 Table 3에 정리하였다. 이 중 가장 극심한 압력 강하가 나타났던 채널 4를 선정하여 압력 강하 감소 및 유량 균일화를 목적으로 민감도 해석을 진행하였다. 기존 채널과의 간섭을 피하기 위해 Fig. 11과 같이 비설계 영역을 설정하였다.

민감도 범위는 최종 모델의 원활한 형상 처리를 위해 0-200으로 설정하였고, 해석은 범용 해석 S/W인 OpenFOAM v1912의 Adjoint Shape Optimization Foam Solver를 사용하였다.

채널 4에 대한 민감도 해석 결과를 Fig. 12에 나타내었다. Figs. 12(a)에서 해석 모델의 압력 강하에 대한 민감도 분포 해석 결과를 나타내었으며, 해석 결과를 바탕으로 민감도 중 0-50의 범위를 최적 유동 영역으로 설정하고, 이를 통해 유로 모델

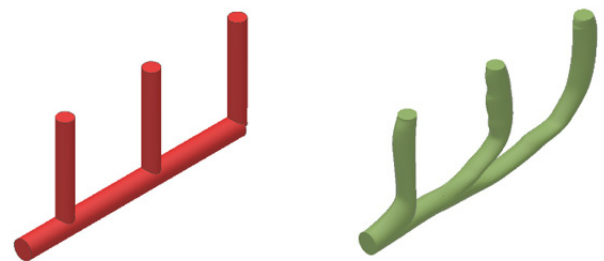


(a) Sensitivity field of target channel



(b) Cut off fluid domain by sensitivity set

Fig. 12 Result for adjoint shape optimization



(a) Reference model

(b) Optimized model

Fig. 13 3D visualization of reference and optimized model

링을 생성한 결과를 12(b)에 나타내었다.

상술한 입출구 재배치를 통해 채널의 출구 개수의 변동이 있으므로, 정확한 검증을 위해 Fig. 13과 같이 기존 유로에서 동일한 출구를 가지는 비교군을 추출하고, 도출된 최적화 모델과의 유동 특성 비교를 시행하였다. 유체의 물성 및 경계 조건은 기존 매니폴드 모델과 동일하게 설정하였다.

해석을 통해 도출된 참고 모델과 최적화 모델의 유로 압력 형성 특성을 Figs. 14(a)와 14(b)에 나타내었다. 최적화 모델의 경우 참고 모델과 비교하여 유로 전범위에서 고른 압력이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 유로 내 형성 압력의 경우도 참고 모델에서 94, 최적화 모델의 경우 325 kPa를 형성하여 최적화 모델이 참고 모델과 비교하여 유로 내 압력 강하가 231 kPa가량 작은 것으로 확인되었다. Fig. 14(c)에 참고 모델과 최적화 모델의 출구별 유량 양상을 나타내었으며, 각 출구별 유량 평균이 최적화 모델에서 359 cm³/s 더 높은 것을 확인하였다. 출구별 유량에 대한 표준편차에서도 참고 모델에서 236, 최적화 모델에서 75 cm³/s로, 최적화 모델에서 참고 모델 대비 각 출구별 유량균일도가 높은 것을 확인할 수 있었다.

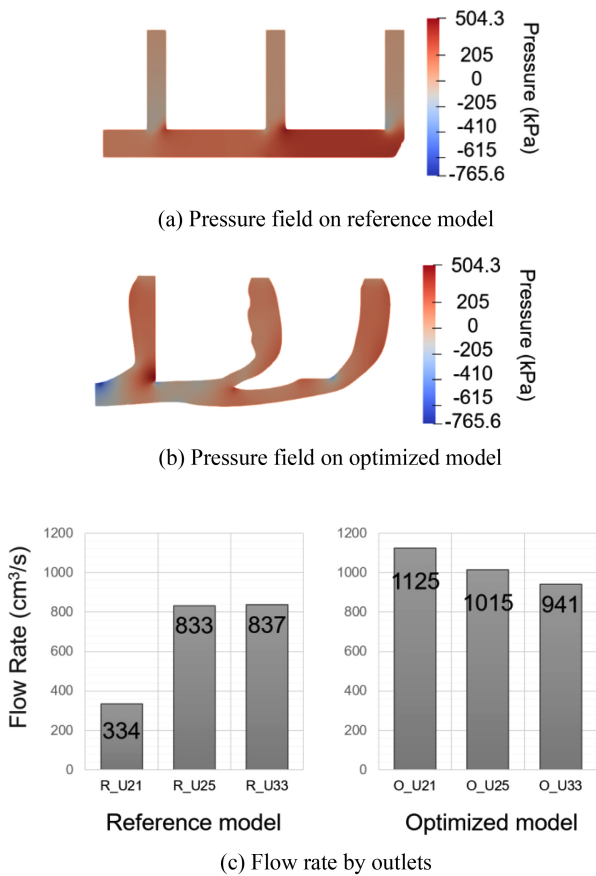


Fig. 14 Results for CFD on verification models

상기 결과를 통해 형상 구현의 자유도가 높은 적층 가공을 고려하여 유로 형상 민감도 해석을 통해 도출한 최적화 유로가 기존 절삭가공 기반의 단순 형상의 유로 대비 낮은 압력 강하, 높은 유량을 가지는 것을 확인하였으며, 이를 통해 이형제 분사용 매니폴드에 적합한 출구별 유량의 균일도 확보가 가능할 것으로 판단한다.

4. 결론

본 연구에서는 적층 제조 특화 설계기법을 이용하여 금형 이형제 도포용 매니폴드의 경량화 설계, 유로최적화 설계와 PBF 방식 3D 프린터를 이용한 실제 매니폴드를 제작하여 현장 적용 테스트를 수행하였다. 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 경량화의 경우, 오버행이 45° 이상으로 되어있는 X자 형태의 격자 구조를 도입하여 기존 매니폴드 대비 53.6% 경량화를 달성하였다(기존과 유사한 AI계열 소재 사용 시).

(2) PBF 방식 3D 프린터를 이용하여 설계한 경량화 매니폴드를 각각 Al-Mg-10Si, SUS316L 소재를 이용하여 공정 최적화, 공정모니터링 및 X-Ray CT 결합 검사 공정을 통해 매니폴드의

경량화 제작이 가능하였다.

(3) 기존에는 중량 문제로 채용하지 못하였던 고온 내부식성이 뛰어난 SUS316L 소재로 제조한 매니폴드의 경우에도, 경량화를 통해 제한 가반 하중 5 kg 미만으로 제작이 가능하였으며, 제작된 경량화 매니폴드 현장 적용 테스트 결과, 잔류 이형제 문제가 개선되어 안정적인 제품 생산이 가능함을 확인하였다.

(4) 유로 형상 최적화의 경우, 기존 매니폴드 모델 대비 최적화 모델에서 231 kPa가량 높은 내부압력을 형성하여 압력 강하의 감소가 가능함을 확인하였다. 또한 기존 매니폴드 채널 4에서 출구별 유량의 표준편차가 236 cm³/s로 큰 차이를 보였으나, 입출구 재배치 및 민감도 해석을 통한 유로최적화 결과 유량 표준편차가 75 cm³/s로 현저하게 낮아져 민감도 해석을 통해 압력 강하 감소를 통한 토출 유량 증대 및 토출 유량 균일도의 확보가 가능함을 확인하였다.

본 연구 결과로부터 적층 제조 특화 설계를 통하여 기존 기계가공 방법으로 불가능하였던 이형제 도포용 매니폴드의 경량화, 유로 형상 최적화가 가능하였다. 적층 제조 매니폴드를 채용한 실제 양산 테스트 결과, 사용 금형의 수명이 약 14% 증가함을 확인하였다. 고온 내부식성이 뛰어난 소재 채용으로 매니폴드의 수명 향상이 가능하며, 높은 동작가능온도 하에서 운용 가능하게 되어 매니폴드 냉각을 위한 유희 시간을 줄일 수 있으며 입출구 재배치 및 전체 유로의 최적화된 매니폴드를 사용함으로써 금형수명 향상으로 생산성 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국재료연구원(Nos. PNK7940, PNK7800), 한국기계연구원(No. NK230I)의 지원을 받아 수행한 연구의 결과입니다.

REFERENCES

1. Wohlers, T., Campbell, I., Diegel, O., and Kowen, J., "Wohlers Report: Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report," Wohlers Associates, Inc., 2019.
2. Simpson, T. W., "Trade-Offs with AM," Modern Machine Shop Magazine, 2017.
3. Gao, W., Zhang, Y., Ramanujan, D., Ramani, K., Chen, Y., et al., "The Status, Challenges, and Future of Additive Manufacturing in Engineering," Computer-Aided Design, Vol. 69, pp. 65-89, 2015.
4. Yang, S. and Zhao, Y. F., "Additive Manufacturing-Enabled Design Theory and Methodology: A Critical Review," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,

- Vol. 80, No. 1, pp. 327-342, 2015.
5. Kumke, M., Watschke, H., and Vietor, T., "A New Methodological Framework for Design for Additive Manufacturing," *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 11, No. 1, pp. 3-19, 2016.
 6. Rosen, D. W., "Research Supporting Principles for Design for Additive Manufacturing: This Paper Provides a Comprehensive Review on Current Design Principles and Strategies for AM," *Virtual and Physical Prototyping*, Vol. 9, No. 4, pp. 225-232, 2014.
 7. Thompson, M. K., Moroni, G., Vaneker, T., Fadel, G., Campbell, R. I., et al., "Design for Additive Manufacturing: Trends, Opportunities, Considerations, and Constraints," *CIRP Annals*, Vol. 65, No. 2, pp. 737-760, 2016.
 8. Guessasma, S., Zhang, W., Zhu, J., Belhabib, S., and Nouri, H., "Challenges of Additive Manufacturing Technologies from an Optimisation Perspective," *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, Vol. 6, No. 9, pp. 2015.
 9. Leutenecker-Twelsiek, B., Klahn, C., and Meboldt, M., "Considering Part Orientation in Design for Additive Manufacturing," *Procedia CIRP*, Vol. 50, pp. 408-413, 2016.
 10. Yang, S., Tang, Y., and Zhao, Y. F., "A New Part Consolidation Method to Embrace the Design Freedom of Additive Manufacturing," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 20, pp. 444-449, 2015.
 11. ISO/ASTM 52910, "Additive Manufacturing-Design-Requirements, Guidelines and Recommendations," 2018.
 12. Friesike, S., Flath, C. M., Wirth, M., and Thiesse, F., "Creativity and Productivity in Product Design for Additive Manufacturing: Mechanisms and Platform Outcomes of Remixing," *Journal of Operations Management*, Vol. 65, No. 8, pp. 735-752, 2019.
 13. Perez, K. B., Lauff, C. A., Camburn, B. A., and Wood, K. L., "Design Innovation with Additive Manufacturing: A Methodology," *Proc. of the International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pp. 1-11, 2019.
 14. Wiberg, A., Persson, J., and Ölvander, J., "Design for Additive Manufacturing-A Review of Available Design Methods and Software," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 25, No. 6, pp. 1080-1094, 2019.
 15. Oh, E. J., Lee, J. H., Kim, J. E., and Park, K., "Lightweight Design of a Sledge Frame for Para Ice Hockey Using Design for Additive Manufacturing," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 37, No. 6, pp. 407-414, 2020.
 16. Park, J. H., Goo, B., and Park, K., "Topology Optimization and Additive Manufacturing of Customized Sports Item considering Orthotropic Anisotropy," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 20, No. 8, pp. 1443-1450, 2019.
 17. Zhang, Y., Bernard, A., Gupta, R. K., and Harik, R., "Feature Based Building Orientation Optimization for Additive Manufacturing," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 22, No. 2, pp. 358-376, 2016.
 18. Meisel, N. and Williams, C., "An Investigation of Key Design for Additive Manufacturing Constraints in Multimaterial Three-Dimensional Printing," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 137, No. 11, pp. 111-406, 2015.
 19. Samperi, M. T., "Development of Design Guidelines for Metal Additive Manufacturing and Process Selection," M.Sc. Thesis, The Pennsylvania State University, 2014.
 20. Gausemeier, J., Echterhoff, N., and Wall, M., "Thinking Ahead the Future of Additive Manufacturing-Innovation Roadmapping of Required Advancements," *DMRC Study Paderborn*, 2013.
 21. Tang, Y. and Zhao, Y. F., "A Survey of the Design Methods for Additive Manufacturing to Improve Functional Performance," *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 22, No. 3, pp. 569-590, 2016.
 22. Seabra, M., Azevedo, J., Araújo, A., Reis, L., Pinto, E., et al., "Selective Laser Melting (SLM) and Topology Optimization for Lighter Aerospace Componentes," *Procedia Structural Integrity*, Vol. 1, pp. 289-296, 2016.
 23. Diegel, O., Schutte, J., Ferreira, A., and Chan, Y. L., "Design for Additive Manufacturing Process for a Lightweight Hydraulic Manifold," *Additive Manufacturing*, Vol. 36, Paper No. 101446, 2020.
 24. Pingen, G., Evgrafov, A., and Maute, K., "Adjoint Parameter Sensitivity Analysis for the Hydrodynamic Lattice Boltzmann Method with Applications to Design Optimization," *Computers & Fluids*, Vol. 38, No. 4, pp. 910-923, 2009.
 25. Papoutsis-Kiachagias, E. M. and Giannakoglou, K. C., "Continuous Adjoint Methods for Turbulent Flows, Applied to Shape and Topology Optimization: Industrial Applications," *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 23, No. 2, pp. 255-299, 2016.
 26. Dilgen, C. B., Dilgen, S. B., Fuhrman, D. R., Sigmund, O., and Lazarov, B. S., "Topology Optimization of Turbulent Flows," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 331, pp. 363-393, 2018.
 27. Dugast, F., Favennec, Y., Josset, C., Fan, Y., and Luo, L., "Topology Optimization of Thermal Fluid Flows with an Adjoint Lattice Boltzmann Method," *Journal of Computational Physics*, Vol. 365, pp. 376-404, 2018.



Hak-Sung Lee

Senior Researcher in the Department of 3D Printing Materials, Korea Institute of Materials Science (KIMS). His current research interest is design for additive manufacturing with software engineering.
E-mail: hslee@kims.re.kr



Taeho Ha

Principal Researcher in the Department of 3D Printing, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM). His research area includes 3D printing process and equipment development.
E-mail: taehoha@kimm.re.kr



Min-Kyo Jung

Researcher in the Department of 3D Printing, Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM). His current research interest is design for additive manufacturing by using FEM.
E-mail: mkjung@kimm.re.kr



Eun-ah Kim

Researcher in the Department of 3D Printing Materials, Korea Institute of Materials Science (KIMS). Her research interest is additive manufacturing using 3D imaging analysis system.
E-mail: kea0420@kims.re.kr



Soonho Won

Principal Researcher in the Department of Corporation Support, Korea Institute of Materials Science (KIMS). His current research interest is evaluation for additive manufacturing with nondestructive method.
E-mail: wsh@kims.re.kr



Do Wock Chun

Head in R&D Center, Sewon Metal Co., Ltd.. His research interest is optimization of forging process. Also, he is interested in analyzing the causes of damage to materials.
E-mail: rnd@sewonmt.com