



# 사출성형 및 구조해석 기반 이종소재 접합 구조의 형상 최적화

문병휴<sup>a</sup>, 김미진<sup>a</sup>, 최재혁<sup>b,\*</sup>

## Design Optimization of Dissimilar Material Joint Structures using Injection Molding and Structural Analysis

Byeonghyu Moon<sup>a</sup>, Mijin Kim<sup>a</sup>, Jae Hyuk Choi<sup>b,\*</sup><sup>a</sup> Department of Future Technology Convergence Engineering, Gwangju University<sup>b</sup> School of Mechanical & Automotive Engineering, Gwangju University

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received	16	December	2025
Revised	19	December	2025
Accepted	19	December	2025

#### Keywords:

Dissimilar material  
Geometric parameter optimization  
Topology optimization  
Lightweight design  
CAE

### ABSTRACT

Driven by increasing demands for lightweight and structurally reliable components, studies on metal-plastic dissimilar joints have intensified. This paper proposes a stepwise shape optimization method for an anchor-lock joint combining a metal-additively-manufactured insert and injection molding. Width (W), height (H), and spacing (P) were defined as the design variables, and 27 designs were generated using a design-of-experiments approach. Moldex3D simulations were conducted to evaluate the filling behavior and pressure distribution, identifying geometries with stable molding performance, whereas ANSYS mechanical analyses assessed the total deformation and equivalent stress. The resulting optimal geometry satisfied both molding and structural requirements. Topology optimization was then applied to reduce weight, and the structural performance was maintained after lightweight design, thereby improving design efficiency and enhancing industrial applicability.

## 1. 서론

최근 자동차, 항공, 전자 산업에서의 경량화 요구와 탄소 배출 규제 강화는 제품의 설계와 소재 활용 전략에 큰 변화를 일으키고 있다. 특히 전기차 시장의 급속한 확대와 지속 가능한 제조 공정의 도입은 에너지 효율 향상과 탄소 배출 저감을 동시에 달성할 수 있는 경량 구조 개발을 필수적으로 요구하고 있다<sup>[1-3]</sup>. 이러한 배경 속에서 금속과 플라스틱을 결합한 이종소재 복합 구조는 강성과 경량성을 동시에 확보할 수 있어 주목받고 있다. 금속은 높은 강도와 내구성을 제공하고, 플라스틱은 낮은 밀도와 성형성을 통해 설계 유연성을 확보할 수 있기 때문에 두 소재를 결합하면 단일 소재

로는 달성하기 어려운 성능을 구현할 수 있다<sup>[4-6]</sup>.

이종소재 접합에는 크게 기계적 접합과 화학적 접합 방식이 사용되어 왔다. 기계적 접합은 리벳이나 볼트를 활용하여 비교적 단순하게 두 소재를 결합할 수 있으나, 사전 가공이 필요하고 접합부에 추가적인 부품이 삽입되어 경량화 효과가 줄어들며 응력 집중이 발생하기 쉽다. 또한 구멍 가공으로 인한 소재 강도 저하와 피로 내구성 문제 역시 지적되고 있다<sup>[7-10]</sup>. 화학적 접합은 접착제를 사용하여 다양한 소재에 적용할 수 있다는 장점이 있으나, 접합 강도가 접착제의 품질과 조건에 크게 의존하고, 온도·습도와 같은 환경 변화에 민감하여 장기 신뢰성이 낮다. 특히 고온 환경에서는 접착력이 급격히 저하되는 한계가 보고되었다. 또한, 두 방식 모두 복잡

\* Corresponding author. Tel.: +82-62-670-2947

E-mail address: jhchoi@gwangju.ac.kr (Jae Hyuk Choi).

한 형상이나 곡면 구조에는 적용하기 어려우며, 접착제 사용이나 표면 처리와 같은 전처리 공정이 추가로 요구되고, 설계 자유도에 제약이 따른다. 이러한 이유로 기존 접합 기술만으로는 산업 현장에서 요구되는 경량성과 구조적 안정성을 동시에 확보하기 어렵다<sup>[11-14]</sup>.

기존 금속·플라스틱 접합 방식의 한계를 보완하기 위해, 선행 연구에서는 금속 표면에 미세 구조를 형성하여 사출된 수지가 구조 내부로 침투·고화되면서 기계적 맞물림에 의해 접합 강도를 확보하는 방법이 제안되어 왔다. 이러한 연구들에서는 수지의 침투 깊이와 금속·플라스틱 사이의 접촉 상태가 접합 강도에 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되어, 기계적 인터로킹을 활용한 사출 기반 접합 구조의 타당성이 실험적으로 입증되었다<sup>[15]</sup>.

이러한 기계적 인터로킹 기반 접합 연구를 바탕으로, 금속 인서트와 사출 성형을 결합한 Anchor-Lock 구조가 제안되었으며, 위상최적화를 통해 경량화와 구조적 안정성을 동시에 달성할 수 있음이 확인되었다. Anchor-Lock 구조는 금속 인서트 내부에 역구배 형상을 구현하여 사출된 플라스틱이 내부로 유입되면서 기계적 앵커링 효과를 발휘하는 방식으로, 접착제나 전처리 공정 없이도 높은 접합 강도를 확보할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 선행 연구 결과는 사출 성형 공정 내에서 접합을 동시에 구현할 수 있다는 점에서 기존 기계적·화학적 접합 방식 대비 공정 단순화와 적용 가능성을 갖는 합리적인 대안임을 시사하며, 이종소재 접합부 설계의 새로운 가능성을 제시한다<sup>[16]</sup>.

이와 같이 기존 연구에서는 Anchor-Lock 구조를 적용한 위상최적화를 통해 경량화 가능성을 입증하였으나, 연구 범위가 구조 해석과 위상최적화에 국한되어 형상 변수(W, H, P)의 영향이나 사출 성형 공정에서의 안정성은 충분히 고려되지 않았다. 실제로 금속 인서트 내부 형상은 용융 수지의 흐름과 충전 거동을 좌우하여 유동 저항과 충전 압력 분포에 직접적인 영향을 미친다. 이러한 특성으로 인해 형상 설계가 적절하지 않을 경우 사출 성형 공정에서 다양한 문제가 발생할 수 있다. 예를 들어, 언더컷 내부 형상이 과도하게 협소하거나 급격한 단면 변화를 가질 경우 유동 저항이 증가하여 미충전(short shot)이나 내부 기공 발생 가능성이 높아질 수 있으며, 사출 압력이 과도하게 증가할 경우 금형 및 인서트 주변에 국부적인 압력 집중이 발생하여 성형 안정성 및 공정 반복성이 저하될 수 있다. 또한 형상 변수는 수지의 침투 깊이와 충전율을 좌우하여 Anchor-Lock 구조에 큰 영향을 미치므로, 수지 충전이 충분하지 않을 경우 접합부에서 기계적 맞물림이 불안정하게 형성되어 접합 강도가 저하될 수 있다. 그럼에도 불구하고 기존 연구에서는 제한된 초기 형상만을 대상으로 분석이 수행되어 다양한 설계 조건에 대한 일반화 가능성이 부족하였으며, 산업적 적용을 위한 설계 지침으로 확장하기에는 한계가 있었다.

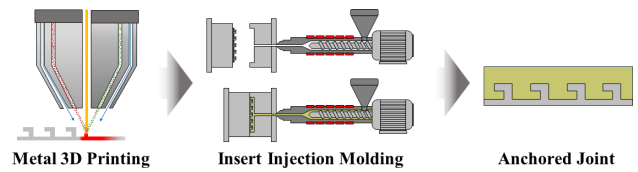


Fig. 1 Anchor-lock joining process flow

따라서 본 연구에서는 형상 변수(W, H, P)를 대상으로 실험계획법(Full Factorial Design, 27조건)을 적용하여 최적화를 수행하고, KS B ISO 14273 규격 기반 시편을 설계하였다. 사출성형 해석(Moldex3D)을 통해 사출 성형 공정에서의 충전 안정성을 정량적으로 평가하고, 구조 해석(ANSYS Mechanical)을 수행하여 각 형상 조건의 기계적 성능을 비교하였다. 마지막으로, 도출된 형상에 위상최적화를 연계하여 경량화와 구조적 안정성을 동시에 달성하고자 하였다. 본 연구는 형상 변수 최적화, 공정 안정성 평가, 구조 해석, 위상최적화를 단계적으로 통합함으로써 기존 연구의 한계를 보완하고, 실제 산업 적용 가능성을 높일 수 있는 새로운 최적화 방법론을 제안한다.

## 2. 금속 인서트 기반 접합 구조와 연구 방법

### 2.1 Anchor-Lock 구조 개요

본 연구에서는 금속과 플라스틱 간의 접합 강도를 향상시키기 위해 Anchor-Lock 구조를 적용하였다. Anchor-Lock 구조는 금속 인서트 내부에 역구배(reverse taper) 형상을 형성하여, 사출 성형 시 용융된 플라스틱이 인서트 내부로 유입되어 고화되며 구조 내부에 기계적으로 고정되는 방식이다. 이때의 형성 과정을 Fig. 1에 나타내었다. 이러한 결합 메커니즘을 통해 별도의 접착제나 표면 처리 없이도 금속과 플라스틱 계면에서 높은 접합 강도를 확보할 수 있다.

Anchor-Lock 구조의 작동 원리는 용융 수지가 인서트 내부로 유입되어 고화되는 과정에서 형상에 의해 기계적으로 고정되는 효과에 기반한다. 사출된 수지가 역구배 형상에 충전된 후 냉각되면, 수축응력과 형상 제약으로 인해 내부 공간에 견고하게 고착된다. 이때 구조 내부의 결합 효과로 인해 인서트와 플라스틱 사이에 전단력과 인장력에 대한 저항이 동시에 형성되어, 접합부의 하중 전달 성능이 향상된다.

기존의 접합 방식은 주로 기계적 체결, 접착제, 또는 표면 처리에 의존하며, 이 경우 공정이 복잡하고 추가 비용이 발생한다. 또한 표면 상태에 따라 접합 신뢰성이 크게 변하고, 형상 설계에도 제약이 따른다는 한계가 있다. 반면 Anchor-Lock 구조는 형상 설계만으로 결합을 구현할 수 있어, 공정 단순화와 비용 절감, 설계 자유도 확보 측면에서 기존 방식의 한계를 효과적으로 보완한다.

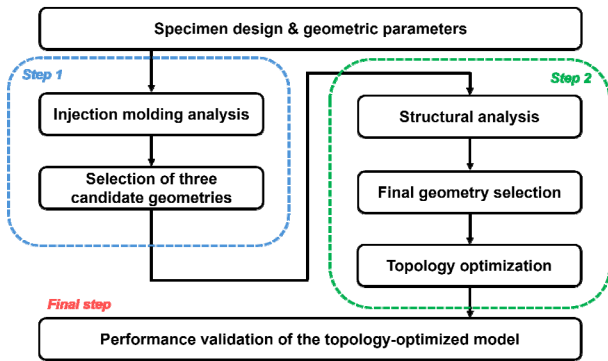


Fig. 2 Flow chart

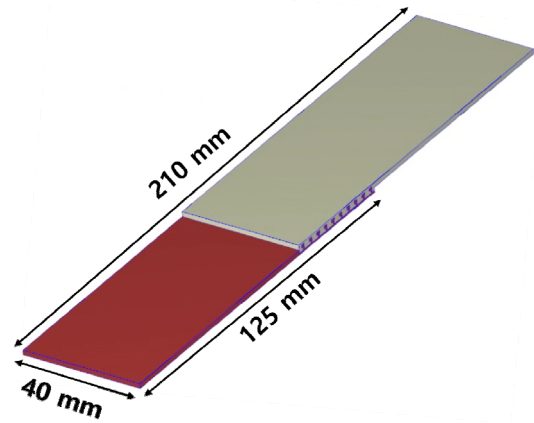


Fig. 3 KS B ISO 14273 model

본 연구에서는 Anchor-Lock 구조를 금속-플라스틱 접합부의 주요 결합 메커니즘으로 적용하였다. 인서트의 형상 변수가 사출 성형 중 유동 거동과 접합부 응력 분포에 미치는 영향을 해석적으로 검토하였으며, 사출 해석과 구조 해석을 연계하여 형상 최적화와 위상최적화를 수행하는 단계적 설계 절차를 구성하였다.

2.2 연구 흐름도

본 연구의 전체 절차는 Fig. 2에 제시한 연구 방법 흐름도와 같이, 시편 설계, 성형 및 구조 해석, 그리고 최종 검증으로 이어지는 단계적 절차로 구성된다.

먼저, 시편 설계 및 형상 변수 설정 단계에서는 앵커링 구조의 주요 설계 인자(W, H, P)를 각각 3수준으로 설정하여 총 27개 조합의 시편을 모델링하였다. 이 단계는 형상 변화가 성형성과 구조적 안정성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위한 기초 설계 과정이다.

다음으로, 사출 성형 해석 단계에서는 Moldex3D를 이용해 유동 거동, 충전 압력, 변형 분포를 해석하였다. 각 형상에 대한 압력 분포의 균일성 및 성형 안정성을 비교·평가하여, 공정 적합성과 구조 안정성을 동시에 만족하는 상위 3개 형상을 선별하였다. 구조 해석 단계에서는 ANSYS Mechanical을 활용하여 선별된 형상의 총 변형량(total deformation)과 등가응력(equivalent stress)을 산출하였다. 이를 바탕으로 구조 강성과 응력 집중 특성을 종합적으로 평가하여 최종 1개 형상을 결정하였다. 이후, 위상 최적화 단계에서는 선정된 형상을 대상으로 강성 최소화(compliance minimization)를 목적함수로 설정하고, 질량 감소율(mass fraction) 20%와 40%를 제약 조건으로 적용하였다. 이를 통해 하중 경로에 따른 재료 분포를 분석하고, 구조 효율이 극대화된 경량 구조를 도출하였다.

마지막으로, 최종 성능 검증 단계에서는 위상최적화 결과 모델에 대해 구조 해석을 재수행하여, 초기 형상 대비 변형과 응력 분포의 변화를 확인하였다.

Table 1 Analysis conditions

Material	PP (LG Chem. LupolTE-5108), Aluminum
Melt temperature	220°C
Mold temperature	30°C
Filling time	0.5 s

3. 형상 변수 기반 사출 구조 해석

3.1 사출 성형 해석을 통한 우수 형상 도출

본 연구에서는 형상 변수의 조합이 사출 성형 과정에서의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 사출 성형 해석을 수행하였다. 해석은 Moldex3D 2024를 이용하였으며, KS B ISO 14273 규격 시편을 기반으로 금속 인서트와 플라스틱이 결합된 구조를 모델링하였다. 시편 형상은 Fig. 3에 나타내었다.

해석 조건은 Table 1과 같이 설정하였다. 금속 인서트는 알루미늄 합금(aluminum), 플라스틱은 폴리프로필렌(PP, LG Chem. Lupol TE-5108)을 적용하였다. 용융 온도(melt temperature)는 220°C, 금형 온도(mold temperature)는 30°C, 충전 시간(filling time)은 0.5 s로 설정하였다. 또한, Table 2에 나타난 3인자 3수준 조합하여 총 27조건(full factorial design)을 가지고 해석을 진행하였다.

사출 성형 해석에서는 총 변형량, 등가응력 및 인서트에 작용하는 압력을 주요 평가 항목으로 설정하였다. 각 조건에 대한 해석 결과는 Fig. 4에 그래프로 제시하였다. 해석 결과, 일부 조건에서는 충전 불균일과 특정 부위의 응력 집중으로 인해 성형 안정성이 저하되는 양상이 확인되었다. 반면, 폭 2.0 mm와 높이 1.5 mm 조건을 포함한 조합에서는 충전 거동이 균일하고 성형 압력 분포도 안정적으로 유지되어, 성형성이 우수한 조건으로 평가되었다. 이와 같은 결과를 통해 우수 형상 후보 3종(W = 2 mm, H = 1.5 mm, P = 3, 3.5, 4 mm)을 도출하였으며, 해당 형상들은 Fig. 5에

**Table 2 Design factors and levels for the full factorial design**

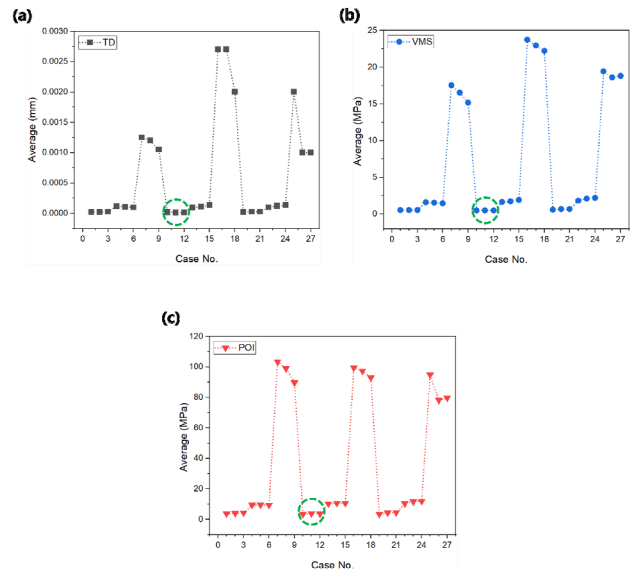
Case No.	Width (mm)	Height (mm)	Spacing (mm)
1	1.5	1.5	3
2	1.5	1.5	3.5
3	1.5	1.5	4
4	1.5	2	3
5	1.5	2	3.5
6	1.5	2	4
7	1.5	2.5	3
8	1.5	2.5	3.5
9	1.5	2.5	4
10	2	1.5	3
11	2	1.5	3.5
12	2	1.5	4
13	2	2	3
14	2	2	3.5
15	2	2	4
16	2	2.5	3
17	2	2.5	3.5
18	2	2.5	4
19	2.5	1.5	3
20	2.5	1.5	3.5
21	2.5	1.5	4
22	2.5	2	3
23	2.5	2	3.5
24	2.5	2	4
25	2.5	2.5	3
26	2.5	2.5	3.5
27	2.5	2.5	4

정리하였다. 최종 형상은 사출 성형 해석에서 성형 안정성을 확보함과 동시에 구조 해석에서 기계적 성능이 우수하게 평가되어, 본 연구의 우수 형상으로 선정되었다.

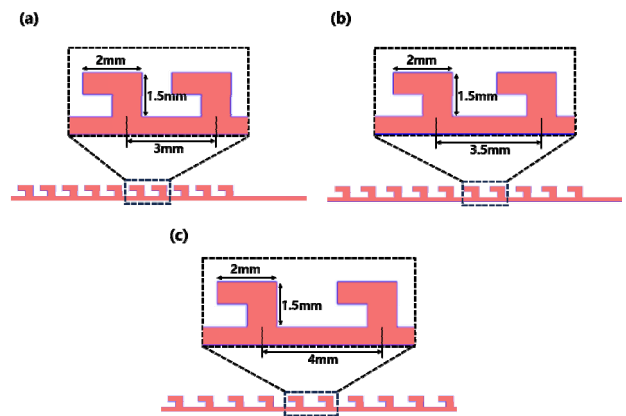
### 3.2 구조 해석을 통한 최종 형상 선정

사출 성형 해석에서 선별된 형상의 기계적 성능을 검증하기 위하여 구조 해석을 수행하였다. 구조 해석은 ANSYS Mechanical을 이용하여 진행하였으며, 시편은 선별된 형상 3종(W = 2.0 mm, H = 1.5 mm, P = 3, 3.5, 4 mm)을 기반으로 모델링하였다. 경계 조건은 실제 인장 시험과 동일하게 한쪽 끝면을 고정하고 반대쪽에 5 mm 변위를 부여하여 인장 하중이 작용하도록 설정하였으며, 이러한 경계 조건 구성은 Fig. 6에 나타내었다. 이를 통해 각 시편이 인장될 때 발생하는 총 변형량과 등가 응력을 비교하여 기계적 성능을 분석하였다.

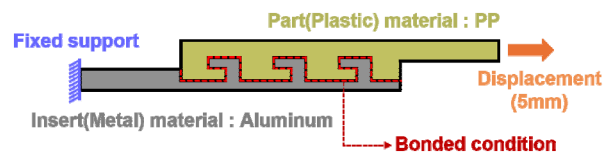
시편의 소재는 금속 인서트에는 알루미늄 합금(aluminum), 플



**Fig. 4 Simulation results: (a) total deformation, (b) equivalent stress, (c) Pressure on insert**



**Fig. 5 (a) W: 2 mm H: 1.5 mm P: 3 mm, (b) W: 2 mm H: 1.5 mm P: 3.5 mm, (c) W: 2 mm H: 1.5 mm P: 4 mm**



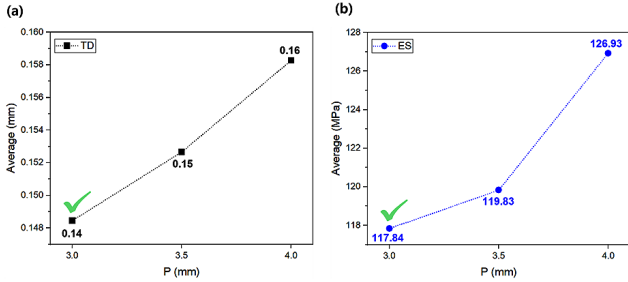
**Fig. 6 Structural analysis conditions**

라스틱 부분에는 폴리프로필렌(PP)을 사용하였다. 각 소재의 상세 물성치는 Table 3에 정리하였다.

Fig. 7에 제시된 구조 해석 결과를 보면, 간격(P)의 변화에 따라 총 변형량과 등가 응력 값이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. P = 3 mm 조건은 평균 변형량이 약 0.14 mm, 등가 응력이 약 117.84 MPa로 가장 낮게 나타나 구조적 안정성이 가장 우수하였다. 반면, P=4 mm 조건은 변형량이 0.16 mm, 등가 응력이 126.93 MPa로 가장 크게 증가하여 응력 집중과 큰 변형이 발생하

**Table 3 Properties of materials**

	Polypropylene	Aluminum
Density (kg/m <sup>3</sup> )	939.2	2770
Young's modulus (GPa)	1.5	70
Poisson's ratio	0.4	0.3
Tensile yield strength (MPa)	34.1	280
Tensile ultimate strength (MPa)	36.7	310



**Fig. 7 Structural analysis results: (a) total deformation, (b) equivalent stress**

는 불리한 조건으로 확인되었다.

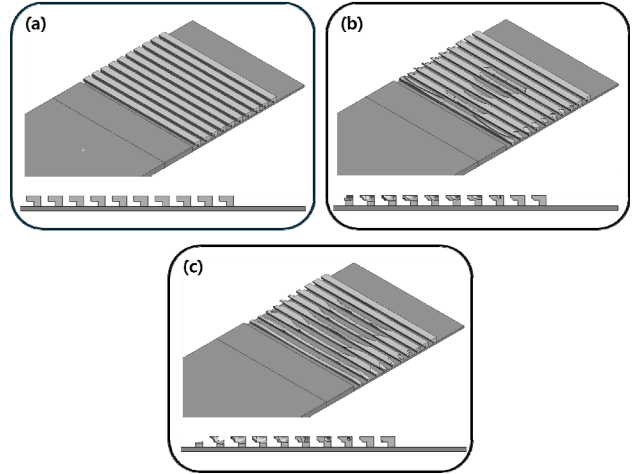
이러한 결과를 통해 간격(P)이 커질수록 변형량과 응력 집중이 증가하여 구조적 안정성이 저하됨을 알 수 있었다. 따라서 W = 2.0 mm, H = 1.5 mm, P = 3 mm 조건을 최종 형상으로 선정하였으며, 이는 사출 성형 단계에서 성형 안정성을 확보함과 동시에 구조 해석 단계에서도 우수한 기계적 성능을 유지할 수 있는 최적 조건임을 확인하였다.

## 4. 위상최적화 기반 경량화 설계

### 4.1 위상최적화 조건 및 경량화 모델 도출

사출 성형 및 구조 해석 단계를 거쳐 최종적으로 선정된 형상(W = 2.0 mm, H = 1.5 mm, P = 3 mm)을 대상으로 위상최적화를 수행하였다. 본 연구의 위상최적화는 구조 강성을 유지하면서 불필요한 재료를 제거하여 경량화를 달성하는 것을 목표로 하였으며, 앞서 수행한 구조 해석 결과를 기반으로 진행되었다. 최적화 대상 영역은 금속 인서트의 Anchor-Lock 부분으로 설정하였으며, 나머지 영역은 초기 형상을 그대로 유지하도록 설정하였다. 최적화의 목적 함수는 Compliance 최소화로 설정하였으며, 이는 구조가 하중을 받을 때 변형을 최소화하여 강성을 극대화하는 것을 의미한다. 또한 제약 조건으로는 중량 감소율을 부여하여 형상 변화와 구조적 특성을 함께 평가하였다. 수식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$compliance = \int_V f u dV + \int_S t u dS + \sum_i^n F_i u_i \quad (1)$$



**Fig. 8 (a) Original model, (b) Optimized model A (20%), (c) Optimized model B (40%)**

$u$  = Displacement field

$f$  = Distributed body force (gravity load etc.)

$F_i$  = Point load on  $i^{th}$  node

$u_i$  =  $i^{th}$  displacement degree of freedom

$t$  = Traction force

$S$  = Surface area of the continuum

$V$  = Volume of the continuum

해석 결과, 20% 질량 감소 모델에서는 불필요한 내부 재료가 선택적으로 제거되어 Anchor-Lock 구조의 중심부가 완만하게 감소하는 형태를 보였다. 40% 질량 감소 모델에서는 재료 제거 영역이 중앙부를 중심으로 확장되었으며, 이에 따라 저변형 영역의 밀도가 현저히 감소하였다. 이러한 재료 분포 변화는 Fig. 8에 나타내었다. 이는 중앙부의 구조 기여도가 낮은 부분이 우선적으로 제거된 결과로, 접합부 주변으로 하중이 집중되는 경향을 나타낸다. 또한 이러한 결과는 기존 구조 해석에서 확인된 변형 분포와 일치하였으며, 접합부 끝단의 고변형 영역을 제외한 중앙부의 저변형 영역에서 밀도가 제거된 것을 확인할 수 있었다.

### 4.2 최종 형상 성능 검증

도출된 경량화 모델의 구조적 신뢰성을 검증하기 위하여, 기존 모델과 동일한 경계 조건 및 하중 조건 하에서 구조 해석을 수행하였다. 이는 위상최적화 과정에서 제거된 재료가 전체 구조 강성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위한 것으로, 경량화에 따른 변형 거동 및 응력 분포 변화를 비교하여 구조적 안정성을 검증하고자 하였다. 검증 지표로는 총 변형량(total deformation)과 등가 응력(equivalent stress)을 비교하였다.

해석 결과, 위상최적화를 통해 질량은 기존 2.49 g에서 각각

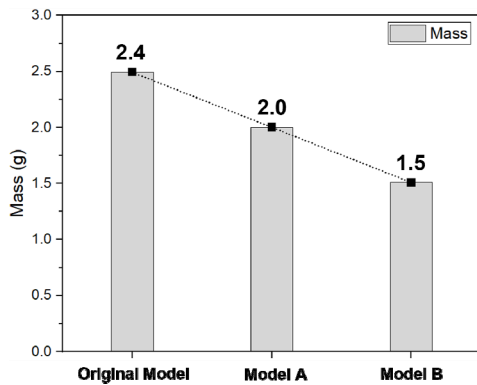


Fig. 9 Mass of the baseline and topology-optimized models

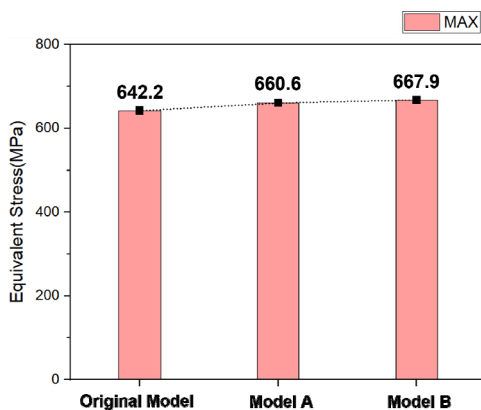


Fig. 10 Structural analysis results of topology-optimized models

20% 감소 모델(Model A)은 2.00 g(19.7% 감소), 40% 감소 모델(Model B)은 1.51 g(39.4% 감소)으로 크게 감소하였다. 이러한 중량 변화는 Fig. 9에 나타내었다. 변형량의 경우, Model A는 0.244 mm로 기본 형상 대비 0.83% 증가에 불과했으며, Model B에서도 0.245 mm로 1.24%의 소폭 증가하였다. 등가 응력 역시 전체적으로 균일한 분포를 유지하였고, 최대 응력은 기본 모델 642.22 MPa 대비 Model A 660.60 MPa, Model B 667.95 MPa로 확인되었다. 등가 응력의 비교 결과는 Fig. 10에 나타내었다.

이러한 결과는 위상최적화 과정에서 재료 제거로 인해 하중 전달 경로가 재분배되면서 국부적으로 응력이 다소 증가한 영향으로 해석되나, 증가 수준이 크지 않아 전체 구조 강성 및 안정성에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 따라서 내부의 불필요한 재료를 제거했음에도 구조적 강성이 유지되어, 위상최적화가 경량화와 구조 신뢰성을 동시에 확보할 수 있는 설계 방법임을 확인하였다.

### 5. 결론

본 연구에서는 형상 변수 설정과 사출 성형 해석 및 구조 해석을 연계하여, 강도·내구성·경량성을 동시에 확보할 수 있는 설계 방법론을 제시하였다. 이를 위해 ‘기’자 형상의 역구배 구조를 설계

하고, 사출 성형 시 플라스틱이 구조 내부로 유입되며 결합되는 방식을 적용하였다. 이러한 방식은 접합부 형상 설계의 자유도를 확대함과 동시에, 별도의 체결 부품이나 화학적 처리 없이도 안정적인 결합이 가능하다는 점에서 공정 단순화 측면의 장점을 갖는다. 또한 사출 성형 해석과 구조 해석을 연계한 단계적 최적화 절차를 적용함으로써, 실제 성형 공정 조건에서도 성형 안정성과 기계적 성능을 동시에 고려한 접합부 형상 설계를 가능하게 하였다.

사출 성형 해석을 통해 접합부의 충진 거동과 압력 분포를 분석하고 이를 바탕으로 구조적으로 안정적인 형상을 선별하였으며, 이후 구조 해석을 통해 접합부의 변형 및 응력 분포를 비교·평가함으로써 형상 변수 변화에 따른 구조 응답을 정량적으로 확인하였다. 또한 최종 선정된 형상에 위상최적화를 적용한 결과, 기계적 성능 저하 없이 최대 약 40%의 중량 감소가 가능함을 확인하였으며, 이는 하중 전달 특성을 고려한 형상 설계와 재료 분포 최적화가 경량화 과정에서도 구조적 안정성을 유지할 수 있음을 보여준다. 특히 Anchor-Lock 구조는 별도의 부품 추가 없이도 안정적인 기계적 결합이 가능하며, 실제 산업 적용 시 제작 비용 절감과 공정 효율 향상 측면에서 높은 실용성을 갖는 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 초기 설계 단계에서 고려되지 않은 형상 변수들을 반영하여 설계 변수 범위와 적용 타당성을 확대할 계획이다. 또한 KS B ISO 14273 규격에 따른 실제 인장 시험을 수행하여 해석 결과의 타당성을 실험적으로 검증하고, 다양한 금속 및 플라스틱 소재 조합과 공정 조건에 대한 적용성을 정량적으로 평가함으로써 본 연구에서 제안한 접합 구조의 산업적 활용 가능성을 확대하고자 한다.

### 후 기

이 연구는 2026년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.

### References

[1] Zhang, W., Xu, J., 2022, Advanced Lightweight Materials for Automobiles: A Review, *Materials & Design*, 221 110994, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110994>.  
 [2] Huang, Y., Gao, X., Zhang, Y., Ma, B. 2022, Laser Joining Technology of Polymer-Metal Hybrid Structures: A Review, *J. Manuf. Process.*, 79 934-961, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.05.026>.  
 [3] Candela, A., Sandrini, G., Gadola, M., Chindamo, D., Magri, P., 2024, Lightweighting in the Automotive Industry as a Measure

- for Energy Efficiency: Review of the Main Materials and Methods, *Heliyon*, 10:8 e29728, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29728>.
- [4] Canegrati, A., Bernasconi, A., Martulli, L. M., Barriga, P., Previati, G., Fiumarella, D., Scattina, A., Spini, E., Belingardi, G., Mastinu, G., 2024, Experimental Characterization of a Polymer Metal Hybrid (PMH) Automotive Structure Under Quasi-Static, Creep, and Impact Loading, *Compos. Struct.*, 330 11781, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117813>.
- [5] Vasconcelos, R. L., Oliveira, G. H. M., Amancio-Filho, S. T., Canto, L. B. 2023, Injection Overmolding of Polymer-metal Hybrid Structures: A Review, *Polym. Eng. Sci.*, 63:3 691-722, <https://doi.org/10.1002/pen.26244>.
- [6] Barakat A. A., Darras, B. M., Nazzal, M. A., Ahmed, A. A., 2023, A Comprehensive Technical Review of the Friction Stir Welding of Metal-to-Polymer Hybrid Structure, *Polymers*, 15:1 220, <https://doi.org/10.3390/polym15010220>.
- [7] Jakobsen, J., Endelt, B., Shakibapour, F., 2024, Bolted Joint Method for Composite Materials Using a Novel Fiber/Metal Patch as Hole Reinforcement—Improving Both Static and Fatigue Properties, *Composites Part B: Engineering*, 269 111105, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.111105>.
- [8] Lambiase, F., 2015, Mechanical Behaviour of Polymer–Metal Hybrid Joints Produced by Clinching Using Different Tools, *Materials & Design*, 87 606-618, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.037>.
- [9] Galińska, A., Galiński, C., 2020, Mechanical Joining of Fibre Reinforced Polymer Composites to Metals - A Review. Part II: Riveting, Clinching, Non-Adhesive Form-Locked Joints, Pin and Loop Joining, *Polymers*, 12:8 1681, <https://doi.org/10.3390/polym12081681>.
- [10] Zhou, S., Wang, Z., Zhou, J., Wu, X., 2013, Experimental and Numerical Investigation on Bolted Composite Joint Made by Vacuum Assisted Resin Injection, *Compos. Pt. B-Eng.*, 45:1 1620-1628, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.08.025>.
- [11] Ramírez, F. M. G., de Moura, M. F. S. F., Moreira, R. D. F., Silva, F. G. A., 2020, A Review on the Environmental Degradation Effects on Fatigue Behaviour of Adhesively Bonded Joints, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 43:7 1307-1326, <https://doi.org/10.1111/ffe.13239>.
- [12] Zhou, Z., Gao, X., Zhang, Y., 2022, Research Progress on Characterization and Regulation of Forming Quality in Laser Joining of Metal and Polymer, and Development Trends of Lightweight Automotive Applications, *Metals*, 12:10 1666, <https://doi.org/10.3390/met12101666>.
- [13] Maggiore, S., Banea, M. D., Stagnaro, P., Luciano, G., 2021, A Review of Structural Adhesive Joints in Hybrid Joining Processes, *Polymers*, 13:22 3961, <https://doi.org/10.3390/polym13223961>.
- [14] Paranjpe, N., Uddin, M. N., Rahman, A. S., Asmatulu, R. 2024, Effects of Surface Treatment on Adhesive Performance of Composite-to-Composite and Composite-to-Metal Joints, *Processes*, 12:12 2623, <https://doi.org/10.3390/pr12122623>.
- [15] Zhao, S., Kimura, F., Kadoya, S., Kajihara, Y., 2020, Experimental Analysis on Mechanical Interlocking of Metal–Polymer Direct Joining, *Precis. Eng.*, 61 120-125, <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.10.009>.
- [16] Moon, B., Kim, M., Choi, J. H., 2024, Topology Optimization of Dissimilar Material Joints Using Anchor-Lock Structure, *Design & Manufacturing*, 18:4 15-21, <https://doi.org/10.22847/ksdme.18.4.202412.003>.

	<p><b>Byeonghyu Moon</b> Master's candidate in the Department of Future Technology Convergence Engineering, Graduate School, Gwangju University. His research interests include the injection molding process. E-mail: <a href="mailto:byeonghyu00@gmail.com">byeonghyu00@gmail.com</a></p>
	<p><b>Mijin Kim</b> Ph.D. candidate in the Department of Future Technology Convergence Engineering, Graduate School, Gwangju University. Her research interests include injection molding and 3D printing process. E-mail: <a href="mailto:kmj5997@gmail.com">kmj5997@gmail.com</a></p>
	<p><b>Jae Hyuk Choi</b> Professor in the Department of Mechanical Convergence Engineering, Gwangju University. His research interests include optimization of injection molding process and thermoset plastic molding. E-mail: <a href="mailto:jhchoi@gwangju.ac.kr">jhchoi@gwangju.ac.kr</a></p>