



금속 적층 제조 기반 격자 구조를 적용한 유도 미사일 조종 날개의 경량화 설계

Lightweight Design of a Guided Missile Control Fin Using Metal Additive Manufacturing-based Lattice Structures

이초빈¹, 전예성², 박재민³, 정진호³, 신규태³, 손현진⁴, 이동완⁵, 박지민⁶, 김현찬^{1, #}, 권순조^{7, #}
Cho Bin Lee¹, Ye Sung Jeon², Jae Min Park³, Jin Ho Jeong³, Kyu Tae Shin³, Hyeon Jin Son⁴,
Dong Wan Lee⁵, Ji Min Park⁶, Hyun Chan Kim^{1, #}, and Soon Jo Kwon^{7, #}

¹ 국립금오공과대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

² 국립금오공과대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology)

³ LIG 디펜스&에어로스페이스 (LIG Defense & Aerospace)

⁴ 한국생산기술연구원 (Korea Institute of Industrial Technology)

⁵ (주)메탈쓰리디 (Metal3D Co., Ltd.)

⁶ 하비스탕스(주) (Harvestance Co., Ltd.)

⁷ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan National University)

Corresponding Author / E-mail: hyunckim@kumoh.ac.kr, TEL: +82-54-478-7383 ORCID: 0000-0002-4596-3009

E-mail: soonjo.kwon@pusan.ac.kr, TEL: +82-51-510-2319 ORCID: 0000-0003-1578-9262

KEYWORDS: Metal additive manufacturing (금속 적층 제조), Design for additive manufacturing (적층 제조 고려 설계), Lattice structure (격자 구조), Guided missile control fin (유도 미사일 조종 날개)

The control fin is a key component in a guided missile's propulsion system, stabilizing the missile's attitude and maintaining its flight trajectory under high-speed conditions. Such components demand high mechanical strength and thermal stability. However, traditional control fin designs have primarily focused on external geometry, overlooking opportunities to enhance performance through internal structural design. To address this limitation, this study proposes a design approach that integrates lattice structures within the control fin using metal additive manufacturing. A body-centered cubic (BCC) lattice was selected, with strut diameter and unit cell aspect ratio defined as the primary design variables. Finite element analysis in Abaqus was used to evaluate structural behavior, analyzing stress and displacement distributions based on variations in these lattice parameters. Manufacturability and lightweight characteristics were also assessed. Results indicate that increasing the strut diameter improves structural stability, with stress predominantly concentrated near lattice joints. Building on these findings, a non-uniform lattice design, derived from the uniform lattice analysis, was applied, demonstrating improved stress distribution and overall structural performance. This approach shows that lattice-based internal structures, enabled by metal additive manufacturing, can significantly enhance the structural performance of guided missile control fins while achieving substantial weight reduction.

Manuscript received: March 12, 2026 / Revised: April 13, 2026 / Accepted: April 19, 2026
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2025

1. 서론

유도 미사일에서 조종 날개는 비행 중 미사일의 자세와 방향을 안정적으로 제어하여 목표 궤적을 유지하는 핵심 제어 장치이다.

특히 고속 비행 환경에서 조종 날개는 공력 하중과 관성 하중을 동시에 받기 때문에 충분한 기계적 강도와 구조적 안정성이 요구된다. 또한 비행 성능 향상과 사거리 증대를 위해 미사일 시스템 전반에 걸친 경량화는 필수적인 설계 요구 조건으로 자리

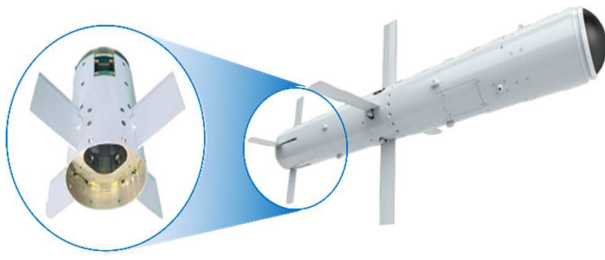


Fig. 1 Control fin of a guided missile

잡고 있다. Fig. 1은 유도 미사일에 적용되는 조종 날개의 형상을 나타낸다.

기존 유도 미사일 조종 날개는 주로 절삭 가공과 같은 전통적인 제조 공정을 기반으로 제작되어 왔으며, 이로 인해 내부 구조를 적극적으로 활용한 경량화 설계에는 한계가 존재하였다. 대부분의 설계는 외형 형상과 두께 조절에 국한되어 내부 구조를 활용한 질량 저감 및 성능 향상에 제약이 있었다. 내부를 솔리드 구조로 유지하는 설계 방식은 구조적 안정성은 확보할 수 있으나, 하중 전달에 기여하지 않는 불필요한 재료 사용으로 인해 질량 증가를 초래하는 문제가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 대안으로 최근 적층 제조(Additive Manufacturing, AM) 기술이 주목받고 있다.

적층 제조 환경에서 적용되는 DfAM (Design for Additive Manufacturing)은 적층 공정의 특성과 제약을 설계 단계에서 반영함으로써 복잡한 내부 형상 구현과 설계 자유도의 극대화를 가능하게 한다. DfAM 기반 설계에서는 외형 중심의 기존 설계 방식에서 벗어나 내부 구조를 포함한 형상 전체를 설계 변수로 활용할 수 있으며, 이를 통해 하중 전달에 효과적인 형상을 구현하고 구조 성능에 기여하지 않는 재료를 제거함으로써 경량화를 달성할 수 있다. 또한 재료의 배치와 분포를 정밀하게 제어함으로써 구조 성능을 유지하면서도 재료 사용 효율을 향상시킬 수 있어, DfAM은 고강도·경량 구조 구현을 위한 효과적인 설계 방법론으로 평가되고 있다.

본 연구에서는 금속 적층 제조 환경을 고려한 DfAM 기반 설계 접근을 적용하여 유도 미사일 조종날개 내부에 격자 구조를 도입하고 주요 격자 설계 변수에 따른 경량화 효과와 안정성을 분석하고자 한다. 이를 위해 격자 단위 셀 형상과 스트럿 직경을 설계 변수로 설정하고, 구조 해석을 통해 응력 및 변위 특성을 비교·분석함으로써 경량화와 구조 성능 간의 상관관계를 규명한다. 나아가 본 연구는 미사일 조종날개에 적용 가능한 격자 기반 내부 구조 설계 방향을 제시하는 것을 목표로 한다.

2. 관련 연구

2.1 격자 구조 형상 및 기계적 특성

본 절에서는 적층 제조 기반 격자구조물의 기계적 특성에 관한 선행연구를 고찰한다. 단위셀 형상, 스트럿 기하학적 특성 및

접합부 형상이 격자구조체의 압축 강도, 항복 거동 및 응력 분포에 미치는 영향을 중심으로, 실험 및 유한요소해석을 통해 정량적으로 분석한 연구들을 정리한다.

김지윤(2022)[1]은 적층 제조 기반 격자 구조물의 설계 기법 정립을 위해 단위셀 형상, 공정변수, 구조 해석 기법을 주요 요소로 설정하고, 대표체적요소(Representative Volume Element, RVE)를 기반으로 한 균질화 기법을 적용하였다. RVE는 복잡한 내부 구조를 갖는 재료 또는 격자 구조에서 전체를 대표할 수 있는 최소 단위 영역으로, 이를 통해 전체 구조의 평균적인 유효 물성(탄성계수, 포아송비 등)을 계산할 수 있다. 이러한 접근은 반복적인 격자 구조 전체를 직접 해석하는 대신 계산 효율을 크게 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 해당 연구에서는 RVE 기반 유효 물성을 유한요소해석 및 압축 시험 결과와 비교·검증함으로써 격자 구조의 거동을 효율적으로 해석할 수 있는 방법론을 제안하였다. 그러나 해당 연구는 주로 압축 하중 조건에 초점을 두고 있어 다양한 하중 조건 및 국부 파손 거동을 정밀하게 반영하는 데에는 한계가 있다. 박광민(2023)[2]은 스트럿 접합부에서 발생하는 응력 집중 문제를 해결하기 위해 엣지리스(Edgeless) 설계 개념을 도입하였다. 엣지리스 구조는 스트럿 접합부의 날카로운 모서리를 제거하고 곡면 기반으로 연결하여 기하학적 불연속을 최소화하는 설계 방식으로, 필렛 및 멀티파이프 기법을 통해 구현된다. 이를 통해 노드 부근의 응력 집중을 완화하고 응력을 보다 균일하게 분포시켜 구조적 안정성을 향상시키는 효과를 보였다. 그러나 기존 연구들은 주로 단순 하중 조건에서의 기계적 거동 분석에 초점을 두고 있으며, 공력 하중이 작용하는 항공우주 구조물에 대한 적용 및 설계 기준은 제한적으로 다루어졌다. 이에 본 연구에서는 이러한 설계 개념을 기반으로 공력 하중 환경을 고려한 격자 구조 설계를 수행하고, 구조 성능과 경량화를 동시에 만족하는 설계 전략을 제시한다.

2.2 격자 구조 설계

본 절에서는 격자 구조를 실제 공학 구조물에 적용하기 위한 설계 전략과 방법론에 관한 선행연구를 고찰한다. 금속 적층 제조 공정의 제조 제약을 고려한 격자 구조 설계 방식과 더불어, 유한요소해석 기반의 설계-해석-최적화 통합 프레임워크를 중심으로 관련 연구를 정리한다.

Wang et al. (2019) [3]은 미사일 구조물의 설계, 해석 및 최적화를 통합적으로 수행하기 위한 구조 설계 방법론을 제안하였다. 해당 연구에서는 Class-shape Transformation (CST) 기반 파라미터화를 적용하여 미사일 형상을 정의하였으며, 클래스 함수로 기본 형상 유형을 설정하고 형상 함수로 세부 곡률을 조절함으로써 적은 수의 변수로 복잡한 형상을 표현하였다. 이를 3차원 구조 모델로 확장하여 유한요소해석을 수행하고, Augmented Fourier Series 기반 대리모델을 활용하여 해석 비용을 절감하였다. 또한 질량 최소화과 응력 제한을 동시에 만족하는 구조 최적화를 수행함으로써 설계-해석-최적화 과정을 통합하였다. 그러나 CST는 2차원 형상 파라미터화에 강점을 가지므

로 복잡한 3차원 형상 적용 시 파라미터 증가 및 형상 표현의 한계가 존재할 수 있으며, 대리모델 또한 비선형 및 복잡한 구조 응답에 대한 정확도 한계가 있다. 더불어 다중 성능 요구 조건 및 다학제 연성 효과를 고려한 설계 접근은 제한적으로 다루어졌다. Diegel et al. (2020)[4]은 금속 적층 제조에서 격자 구조 설계 및 적용을 위한 실무적 지침을 제시하였다. 해당 연구에서는 격자 구조 적용 방식을 전체 격자화, 내부 충전형, 고체-격자 분리형, 그리고 FEA 기반 가변 격자 설계로 구분하였다. 또한 스트럿 직경이 제조성과 기계적 성능에 중요한 영향을 미치며, 실제 공정에서는 약 0.5-1.0 mm 범위가 현실적인 설계 기준으로 제시되었다. 더불어 최소 두께 및 스트럿 간 간격은 약 0.4 mm 이상이 요구되며, Self-supporting 구조 설계를 통해 서포트 없이 출력 가능한 형상을 구현하는 것이 중요함을 강조하였다. 특히 오버행 각도 및 수평 홀 형상과 같은 공정 제약 조건을 고려한 설계의 필요성을 제시하였으며, 격자 구조의 기계적 성능과 출력 안정성 간의 상충 관계를 고려한 통합적 설계 접근의 중요성을 강조하였다.

따라서 본 연구는 금속 적층 제조 공정의 제조 제약을 고려하여, 부품을 고체 영역과 격자 영역으로 분리 적용하는 구조 설계를 1차 목표로 설정하고, 유한요소해석(FEA) 기반의 가변 격자 구조 설계를 통해 구조 성능을 향상시키는 것을 2차 목표로 한다. 이때 실제 Metal 3D 프린팅 공정에서 요구되는 오버행 각도 및 수평 홀 직경과 같은 제조 가능 조건을 설계에 반영하여, 구조적 성능과 출력 안정성을 동시에 만족하는 격자 구조 설계를 수행하고자 한다.

2.3 BCC 격자 구조의 응력 거동

격자구조체에서는 스트럿이 만나는 조인트(Node) 부근에서 국부적인 응력 집중이 발생하며, 이는 초기 항복이나 좌굴과 같은 구조적 불안정의 주요 원인으로 지적되어 왔다. 이러한 문제를 완화하기 위해 조인트 형상 및 스트럿 기하를 개선하는 다양한 연구들이 수행되어 왔다.

Wang et al.(2023)[5]은 스트럿 접합부에서 발생하는 응력 집중을 완화하기 위해 필렛을 적용하고, 스트럿 단면을 위치에 따라 변화시키는 Graded Geometry 기반 설계 방법을 제안하였다. 해당 연구에서는 항복과 좌굴을 동시에 고려한 다중 제약 기반 최적화 프레임워크를 구축하고, 필렛 반경과 스트럿 반경 간의 관계를 설계 변수로 정의하였다. 이를 통해 격자 구조에서 발생하는 복합적인 파손 메커니즘을 고려한 설계가 가능함을 보였다. 해석 결과, 필렛이 적용된 구조는 노드 부근의 응력 집중이 완화되고 하중 전달 경로가 보다 연속적으로 형성되면서 구조 강성이 증가하는 경향을 보였다. 또한 필렛 반경 증가에 따라 최대 응력이 감소하여 구조적 안전성이 향상됨을 확인하였다. 이러한 결과는 항복과 좌굴을 동시에 고려한 형상 설계가 격자 구조의 기계적 성능 향상에 효과적임을 보여준다. 또한 Bai et al.(2019)[6]은 체심입방(body-centered Cubic, BCC) 격자 구조에서 스트럿이 교차하는 노드 부근의 날카로운 기하학적 불연속이

응력 집중의 주요 원인임을 지적하였다. 특히 단면이 급격히 변화하는 노드 영역에서는 응력 삼축성이 증가하여 국부적인 응력 집중과 초기 파손이 발생하는 것으로 보고하였다. 이를 개선하기 위해 스트럿 단면을 위치에 따라 변화시키는 Graded Body-centered Cubic (GBCC) 구조를 제안하였으며, 중앙부는 상대적으로 얇게, 노드 접합부는 두껍게 설계하여 하중 전달 경로를 보다 연속적으로 형성하도록 하였다. 이러한 설계를 통해 노드 부근의 응력 집중이 완화되고, 응력이 스트럿 전체로 보다 균일하게 분포되는 효과를 확인하였다. 그 결과 동일한 상대밀도 조건에서 GBCC 구조는 기존 BCC 구조 대비 초기 강성과 파손 강도가 유의미하게 향상되었으며, 특히 노드 영역에서의 최대 응력이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 스트럿 형상 변화를 통해 기하학적 불연속을 완화하는 설계 접근이 격자 구조의 구조적 성능 개선에 효과적임을 보여준다. 이러한 선행 연구들은 공통적으로 노드 형상 개선과 스트럿 기하 설계가 격자구조체의 응력 완화 및 기계적 성능 향상에 핵심적인 역할을 한다는 점을 보여준다. 특히 필렛 적용, 노드 곡면화, 스트럿 두께 분포 조절과 같은 기하학적 설계 기법이 응력 집중 완화에 효과적임을 확인하였다.

2.4 PBF 기반 격자 구조 제조 특성

레이저 분말 베드 융합(Laser Powder Bed Fusion, L-PBF)은 복잡한 내부 형상을 갖는 격자 구조를 정밀하게 제작할 수 있는 적층 제조 기술로, 생체 의료용 임플란트 및 항공우주 부품 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 특히 Ti-6Al-4V(Ti64) 합금은 우수한 강도 대비 경량 특성과 생체 적합성을 바탕으로 L-PBF 기반 격자 구조 소재로 다수의 연구에서 채택되고 있다.

Riva et al. (2021)[7]은 L-PBF 공정을 통해 제작된 금속 격자 구조의 기계적 특성과 평가 방법을 종합적으로 고찰하였다. 해당 연구에서는 단위 셀 형상, 상대 밀도, 공정 조건 및 시험 방식이 기계적 특성에 미치는 영향을 중심으로 기존 연구들을 체계적으로 정리하였다. 특히 BCC 구조를 포함한 스트럿 기반 격자 구조가 대표적인 모델로 활용되며, 다양한 금속 소재에 대해 압축 시험을 중심으로 기계적 거동이 광범위하게 연구되어 왔음을 제시하였다. 또한 격자 구조의 기계적 특성이 단위 셀 형상과 상대 밀도뿐만 아니라 스트럿 직경, 배열 방향, 공정 변수 및 후처리 조건에 의해 영향을 받음을 강조하였다. 더불어 Maxwell Number를 기반으로 변형 메커니즘을 구분하고, BCC 구조가 조건에 따라 Bending-dominated 또는 Stretch-dominated 거동을 나타낼 수 있음을 설명하였다. 나아가 격자 구조 성능이 기하학적 설계 변수와 제조 공정 변수의 상호작용에 의해 결정되며, 최근에는 인장, 굽힘 및 피로 특성까지 연구 범위가 확장되고 있음을 보고하였다. Arputharaj 등(2025)[8]은 연속과 L-PBF 공정을 이용하여 제작된 Ti-6Al-4V BCC 격자 구조의 압축 기계적 거동을 분석하였다. 해당 연구에서는 단위 셀 크기(1-3 mm)와 스트럿 직경(0.3-1.2 mm)을 주요 변수로 설정하여 상대 밀도를 약 10%에서 77%까지 변화시킨 격자 시편을 제작하고,

as-built 및 열처리 상태에서의 기계적 특성을 비교하였다. 그 결과, 동일한 상대 밀도 조건에서도 기하학적 변수 조합에 따라 응력 분포 및 좌굴 거동이 상이하게 나타남을 확인하였다. 또한 45° 전단 파괴 및 층별 변형과 같은 특징적인 변형 모드를 관찰하여 격자 구조의 파괴 거동을 분석하였다. 이러한 결과는 격자 구조의 기계적 특성이 기하학적 변수뿐만 아니라 공정 조건에 의해 형성되는 미세조직과도 밀접하게 연관되어 있음을 보여준다. 최정호(2025)[9]는 선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting, SLM) 공정을 이용하여 제작된 격자 구조물의 압축 강도에 미치는 적층 방향 및 지지 구조의 영향을 실험적으로 분석하였다. AISi10Mg 소재를 사용하여 수평 적층(0°), 45° 기울기 적층, 그리고 지지 구조 적용 여부에 따른 시편을 제작하였으며, 만능재료시험기(UTM)를 이용한 압축 시험과 디지털 영상 상관법(Digital Image Correlation, DIC)을 활용한 변형 측정을 통해 압축 거동을 정량적으로 평가하였다. 특히, 적층 방향에 따른 하중 전달 방식과 변형 모드의 차이를 분석하고, 지지 구조 유무가 치수 정확도 및 기계적 성능에 미치는 영향을 비교함으로써, SLM 공정에서 발생하는 기계적 이방성과 구조적 거동의 변화를 체계적으로 규명하였다. 그러나 해당 연구는 주로 압축 특성에 초점을 두고 있으며, 공력 하중이 작용하는 구조 적용에 대한 고려는 제한적이다.

3. 제안하는 방법

본 장에서는 유도 미사일 조종 날개의 경량화와 구조적 안정성을 동시에 만족시키기 위한 격자 구조 기반 설계 및 해석 프레임워크를 제안한다. 제안된 방법은 균일 격자 설계를 출발점으로 구조 해석을 수행하고, 해석 결과를 기반으로 최적 격자를 선정한 후 비균일 격자 설계로 확장하는 단계적 절차로 구성된다. 또한 응력 집중 완화를 위한 추가 설계 옵션과 적층 제조 공정을 고려한 시뮬레이션을 통해 실제 제조 가능성과 구조적 신뢰성을 함께 검토한다.

3.1 균일 격자 설계 변수 정의

3.1.1 격자 형상 및 설계 변수 정의

균일 격자 구조 설계를 위해 BCC 격자 구조를 기본 단위셀로 선정하였다. BCC 격자는 구조가 단순하여 설계 변수 정의가 명확하고, 하중 전달 경로가 비교적 균일하게 형성되는 특성을 가진다.

또한 스트럿 기반 구조로 구성되어 고온 환경에서도 기계적 강도 유지에 유리하며, 적층 제조 공정에서 우수한 조형성을 확보할 수 있는 장점이 있다.

BCC 격자 구조의 설계 변수로는 스트럿 직경, 단위셀 크기, 단위셀 중첩비를 주요 변수로 설정하였다. 스트럿 직경과 단위셀 크기는 격자 구조의 상대 밀도 및 강성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 변수이며, 단위셀 중첩비는 하중 방향에 따른 이방

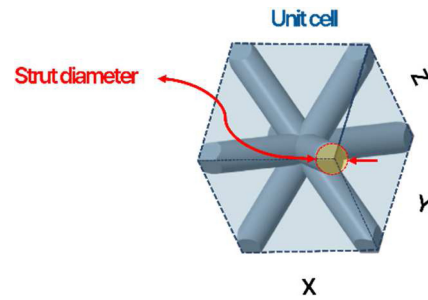


Fig. 2 BCC lattice structure and design variables of the unit cell

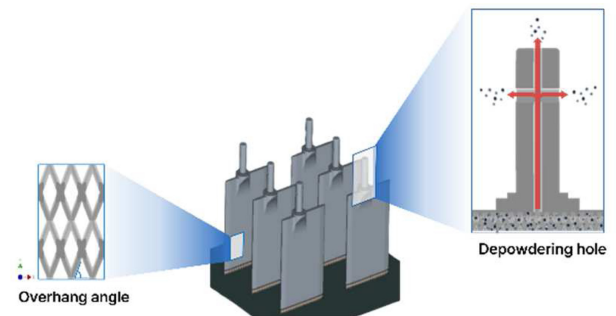


Fig. 3 Schematic illustration of design constraints for the lattice structure considering additive manufacturing

성 거동을 제어하기 위한 변수로 고려하였다. 본 연구에서는 이러한 설계 변수를 조합적으로 적용하여 격자 구조의 기계적 특성과 설계 자유도를 체계적으로 분석하였다. 본 연구에서 적용한 BCC 격자의 기본 단위셀 형상 및 설계 변수의 정의는 Fig. 2에 나타내었다.

3.1.2 제조성을 고려한 설계 조건

격자 구조는 적층 제조 공정을 통해 제작되므로 설계 단계에서 제조성을 고려한 제약 조건을 함께 반영하였다. 본 연구에서는 공정 안정성과 조형 품질을 확보하기 위해 스트럿 직경을 0.5 mm 이상 1.0 mm 이하로 제한하였다. 스트럿 직경이 0.5 mm 미만일 경우 조형 중 단선이나 형상 붕괴가 발생할 가능성이 있으며, 1.0 mm를 초과할 경우 경량화 효과가 감소할 수 있으므로 해당 범위를 설계 변수의 허용 구간으로 설정하였다. 또한 서포트 구조의 생성을 최소화하기 위해 오버행 각도를 50° 이상으로 제한하였다. 이를 통해 서포트 제거에 따른 후처리 공정을 배제하고, 표면 품질 저하 가능성을 줄일 수 있도록 설계하였다. 한편, 적층 제조 공정 이후 분말 제거 공정을 고려하여 디파우더링을 위한 내부 공간을 확보하였다. 격자 내부에 충분한 분말 배출 경로를 마련함으로써 잔류 분말로 인한 질량 증가 및 구조적 불균형을 방지하고, 후처리 공정의 용이성을 확보하였다. 이와 같은 제조성 고려 설계 조건의 개념도는 Fig. 3에 나타내었다.

3.1.3 격자 배치 방식

격자 구조는 조종 날개의 외형 형상을 유지한 상태에서 내부를 채우는 방식으로 적용하였다. 이를 통해 외부 공력 형상에는

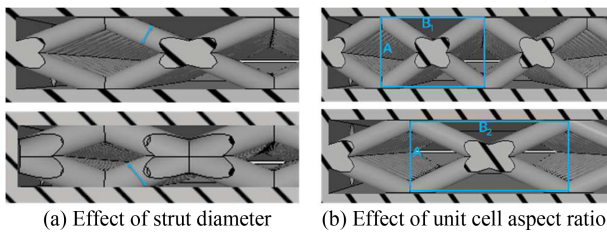


Fig. 4 Comparison of lattice structure geometries with varying design variables

영향을 주지 않으면서 내부 구조의 경량화를 달성하고, 하중 전달 경로를 내부 격자 구조로 분산시킬 수 있도록 설계하였다. 균일 격자 구조는 전체 영역에 동일한 설계 변수를 적용하여 해석 기준 모델로 활용하였다.

또한 제조 공정 및 구조적 연속성을 고려하여 격자 구조의 조인트 시작 위치와 단위셀 시작 기준을 명확히 정의하였다. 격자 구조의 조인트는 외곽 셀과 내부 격자가 자연스럽게 연결되도록 배치하여 국부적인 응력 집중을 방지하고, 적층 제조 과정에서 형상 불연속으로 인한 결함 발생 가능성을 최소화하였다.

단위셀은 일정한 기준 평면을 기준으로 반복적으로 배치되도록 설정하여 격자 배열의 규칙성을 확보하였으며, 이를 통해 구조 해석 시 하중 전달 특성을 일관되게 비교할 수 있도록 하였다. 이러한 단위셀 시작 기준 설정은 모델링 과정에서의 기하학적 불확실성을 줄이고, 균일 격자와 비균일 격자 설계 간의 정량적 비교를 가능하게 한다. Fig. 4(a)는 스트럿 직경 변화에 따른 형상 차이를 비교하여 나타낸 것이며, Fig. 4(b)는 단위셀 중 형비 변화에 따른 형상 차이를 비교하여 나타낸 것이다.

3.2 비균일 격자 설계

균일 격자 구조는 설계 및 해석이 단순하다는 장점이 있으나, 실제 구조물에서는 하중 분포가 위치에 따라 불균일하게 나타난다. 이로 인해 일부 영역에서는 구조적 여유가 과도하게 확보되는 반면, 다른 영역에서는 국부적인 응력 집중이 발생할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 한계를 보완하기 위해 균일 격자 구조 해석 결과를 기준으로 활용한 비균일 격자 설계 전략을 적용하였다. 균일 격자 해석을 통해 상대적으로 응력이 크게 발생하는 취약 영역과 응력이 낮은 구조적 여유가 충분한 영역을 구분한 후, 취약 영역에는 격자 밀도를 증가시켜 구조적 안정성을 보완하고, 여유 영역에는 격자 밀도를 감소시켜 경량화를 진행하였다.

이 과정에서 응력이 크게 발생하는 영역에는 스트럿 직경을 증가시키고, 응력이 낮은 영역에는 스트럿 직경을 감소시켜 전체 구조 성능은 유지하면서 질량을 감소시키는 것을 목표로 하였다. 이를 통해 균일 격자 대비 불필요한 강성을 제거하고, 하중 분포에 부합하는 효율적인 배치를 구현함으로써 경량화와 구조 안정성을 동시에 확보하고자 하였다. 이와 같은 균일 격자 해석 결과 기반 비균일 격자 설계 개념도는 Fig. 5에 나타내었다.

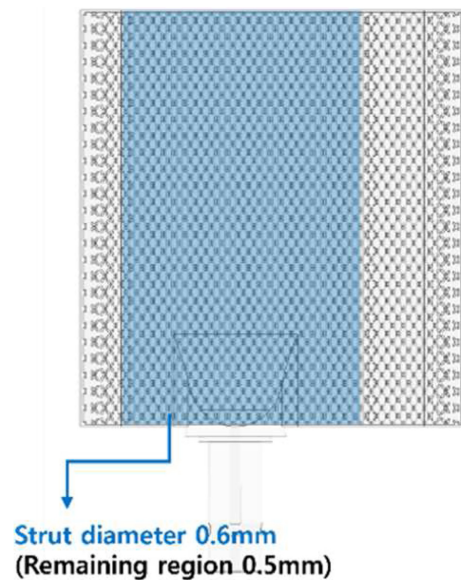


Fig. 5 Non-uniform lattice design

3.3 적층 제조 시뮬레이션

본 연구에서는 설계된 격자 구조의 실제 제조 가능성을 검증하기 위해 적층 제조 공정 시뮬레이션을 수행하였다. 해당 시뮬레이션은 적층 방향, 서포트 구조, 출력 조건 변화에 따른 조형 안정성 및 형상 변형 거동을 분석하기 위한 목적으로 진행하였다.

적층 방향에 따른 조형 특성의 차이를 분석하기 위해 X, Y, Z의 세 가지 적층 방향을 기준으로 시뮬레이션을 수행하였다. 각 적층 방향에 대해 동일한 격자 구조 모델과 공정 조건을 적용하여, 적층 과정 중 발생하는 형상 편차 및 변형 거동을 비교할 수 있도록 설정하였다. 시뮬레이션에 적용된 재료는 적층 제조 공정에서 널리 사용되는 Ti-6Al-4V 분말(TiAlV4 powder)로 설정하였으며, 이를 통해 실제 공정 환경을 반영한 분석을 수행하였다.

또한 서포트 구조에 따른 조형 안정성의 영향을 분석하기 위해 기존 서포트 구조와 보강된 서포트 구조를 각각 적용한 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 통해 서포트 형상 변화가 적층 과정 중 응력 분포 및 변형 거동에 미치는 영향을 비교·분석하였다. 아울러 동일한 격자 구조 모델을 단일로 출력하는 경우와 다수의 모델을 동시에 출력하는 경우를 구분하여 시뮬레이션을 수행함으로써, 출력 개수 변화에 따른 조형 안정성 및 형상 일관성의 차이를 분석하였다.

4. 구조 해석

본 장에서는 공력 해석을 통해 도출된 면압 분포를 하중 조건으로 적용하여 수행한 구조 해석 결과를 제시한다. 유동 해석을 통해 계산된 압력 분포는 조종 날개 외표면에 면하중 형태로 매핑되어 구조 해석에 적용하였으며 이를 통해 실제 비행

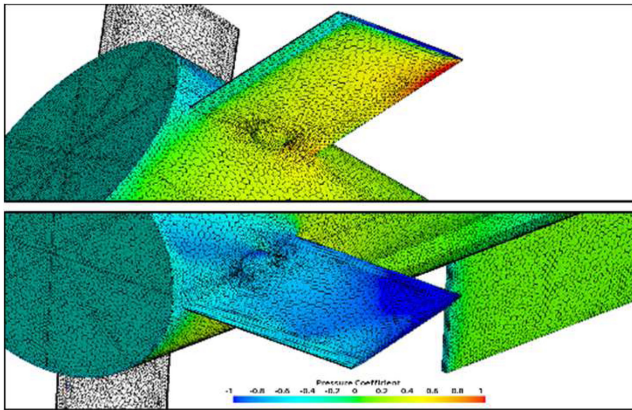


Fig. 6 Flow analysis results

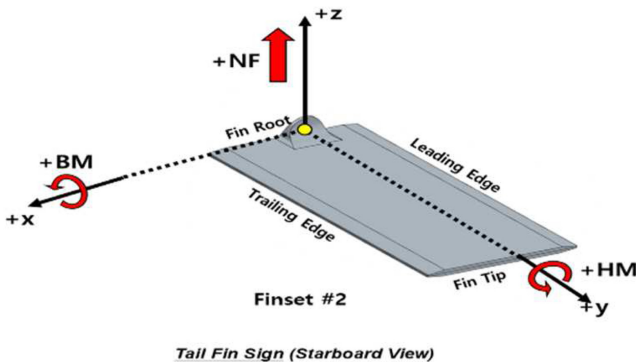


Fig. 7 Definition of the coordinate system

조건에서 발생하는 공력 하중을 고려하였다. 유동 해석을 통해 도출된 압력 분포는 Fig. 6에 나타내었다.

구조 해석에 사용된 좌표계는 조종 날개 폭 방향을 X축, 날개 길이 방향을 Y축, 두께 방향을 Z축으로 정의하였다. 하중 및 모멘트의 방향성 또한 해당 좌표계를 기준으로 정의하였으며, 날개 루트(Fin Root)를 기준점으로 정상력(Normal Force), 굽힘 모멘트(Bending Moment), 힌지 모멘트(Hinge Moment)를 적용하였다. 좌표축 정의 및 하중 방향은 Fig. 7에 도시하였다.

격자 구조 적용 효과를 정량적으로 평가하기 위해 격자가 적용되지 않은 솔리드 모델을 기준으로, 균일 격자 구조와 비균일 격자 구조의 구조 거동을 순차적으로 비교·분석하였다. 이를 통해 격자 구조 적용에 따른 구조 성능 변화와 경량화 효과를 종합적으로 평가한다.

4.1 균일 격자 구조 해석 결과

4.1.1 스트럿 직경에 따른 구조 거동

단위셀 중형비를 1 : 2.75로 고정된 상태에서 스트럿 직경을 0.5부터 1.0 mm까지 변화시키며 균일 격자 구조에 대한 구조 해석을 수행하였다. 모든 해석 조건에는 동일한 Ti-6Al-4V 재료 물성과 동일한 하중 및 경계 조건을 적용하였다. Table 1은

Table 1 Analysis results with respect to strut diameter

	Solid	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Maximum Stress [MPa]	1.1	5.0	4.1	4.8	3.1	3.0	2.3
Maximum displacement [nm]	168.5	78.5	78.5	80.2	78.6	80.7	86.0
Mass [g]	106.4	62.0	65.5	69.4	73.5	77.6	81.8

스트럿 직경에 따른 격자 구조의 해석 결과를 정리한 것이다.

해석 결과, 스트럿 직경이 증가함에 따라 최대 변위는 전반적으로 감소하는 경향을 보였으나, 구조 질량은 증가하였다. 반대로 스트럿 직경이 감소할수록 구조 질량은 크게 감소하였으나, 일부 조건에서는 최대 응력이 증가하는 경향이 나타났다. 특히 스트럿 직경 0.6 mm 조건에서는 솔리드 모델 대비 약 38.4%의 질량 감소와 함께 최대 변위가 약 53.4% 감소하여, 구조 안정성과 경량화 측면에서 비교적 균형 잡힌 성능을 보였다. 한편, 스트럿 직경 변화에 따른 최대 응력은 일반적인 경향과 달리 0.6 mm 전후 구간에서 변곡이 나타나는 것을 확인하였다. 이는 스트럿 직경 증가에 따라 격자 구조의 기하학적 형상이 연속적으로 변화하는 것이 아니라, 특정 직경 조건(0.7과 0.8 mm)에서 일부 격자 연결부 형상이 달라지기 때문으로 판단된다. 이러한 국부적인 형상 변화는 스트럿 간 연결부의 접촉 상태 및 하중 전달 경로에 영향을 미치며, 이에 따라 국부적인 응력 재분배가 발생하는 것으로 해석된다. Fig. 8은 스트럿 직경 변화에 따른 격자 구조의 형상 변화를 나타내며, 직경 증가에 따라 스트럿 간 연결부 형상이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 최대 응력은 주로 격자 조인트 부근에서 발생하였으며, 이는 스트럿 교차로 인한 기하학적 불연속에 기인한 것으로 판단된다.

4.1.2 단위셀 중형비에 따른 구조 거동

스트럿 직경을 0.6 mm로 고정된 상태에서 단위셀 중형비(A : B)를 변화시키며 균일 격자 구조의 구조 거동을 분석하였다. 제조성을 고려하여 Y축 방향 길이가 X축 및 Z축보다 길도록 단위셀을 설계하였다. Table 2는 단위셀 중형비 변화에 따른 격자 구조의 해석 결과를 정리한 것이다.

해석 결과, 단위셀 중형비가 증가함에 따라 구조 질량은 감소하는 경향을 보였으나, 최대 응력과 최대 변위는 증가하는 것을 확인하였다.

중형비 1 : 1.87 조건에서는 솔리드 모델 대비 약 37.2%의 질량 감소와 함께 최대 변위가 약 52.1% 감소하여, 안정성과 경량화를 동시에 만족하는 조건으로 판단되었다. 반면 중형비가 과도하게 증가할 경우 변위 증가로 인해 구조 안정성이 저하되는 것을 확인하였다.

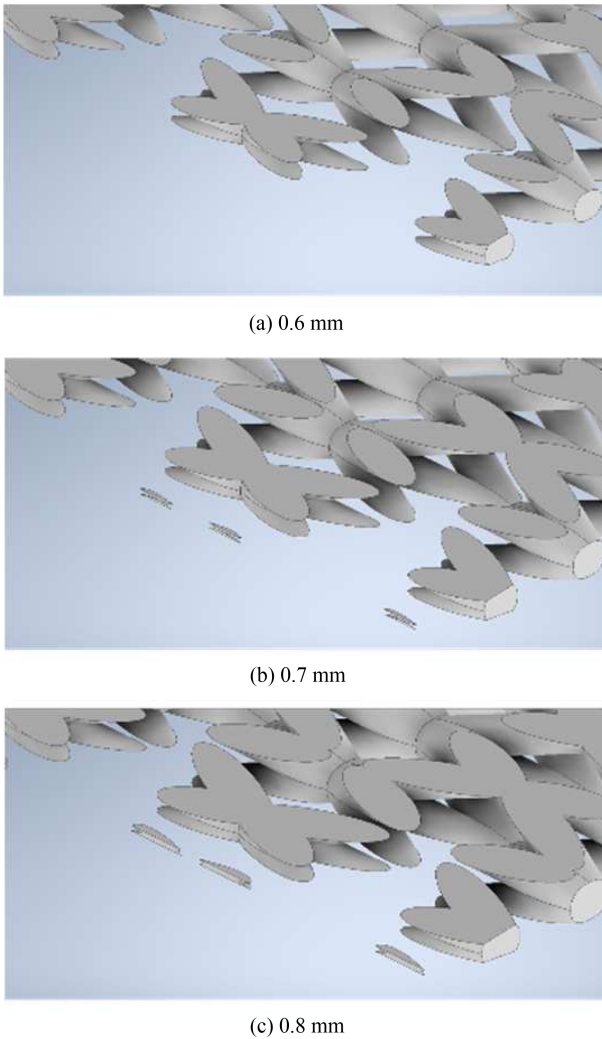


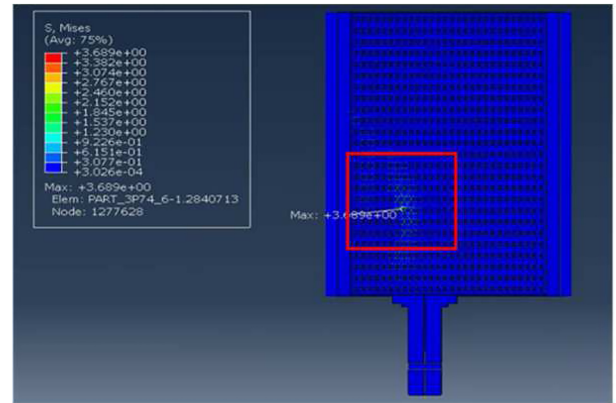
Fig. 8 Geometry variation of lattice structure according to strut diameter

Table 2 Analysis results with respect to unit cell aspect ratio

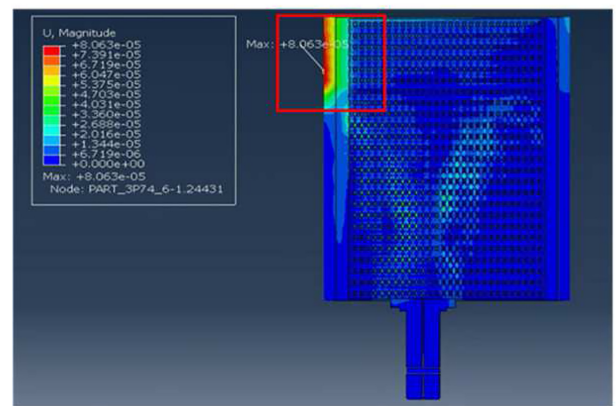
	Solid	1 : 1.87	1 : 2.125	1 : 2.75	1 : 425
Maximum stress' [MPa]	1.1	3.7	3.8	4.1	4.1
Maximum displacement [nm]	168.5	80.6	80.6	78.5	93.4
Mass [g]	106.4	66.9	66.3	65.5	64.8

4.1.3 최적 균일 격자 구조 선정

스트럿 직경 및 단위셀 종횡비에 따른 구조 해석 결과를 종합적으로 고려하여, 스트럿 직경 0.6 mm, 단위셀 종횡비 1 : 1.87 조건을 최적의 균일 격자 구조로 선정하였다. 최적 조건은 각 설계 변수에 대한 해석 결과를 기반으로 정량적 성능 지표를 종합적으로 비교하여 선정하였다. 본 연구에는 솔리드 모델 대비 질량 감소율과 변위 감소율을 주요 평가 기준으로 설정하였으며, 해당 조건에서 질량은 약 37.2%, 최대 변위는 약 52.1%



(a) Location of maximum stress in the uniform lattice



(b) Location of maximum displacement in the uniform lattice

Fig. 9 Locations of maximum stress and maximum displacement in the optimal uniform lattice structure

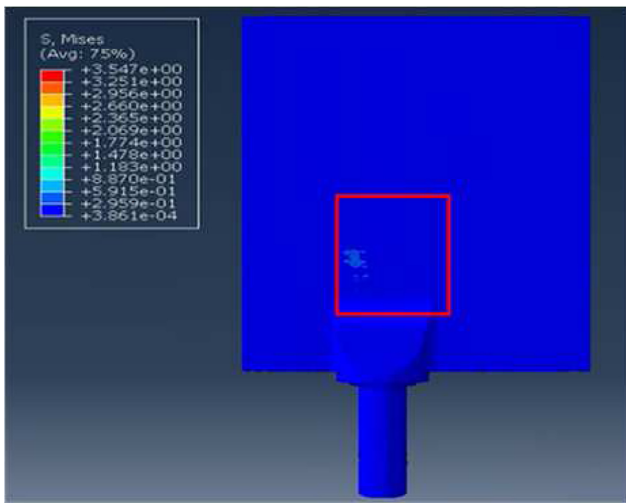
감소하는 결과를 보였다. 이를 통해 두 설계 변수의 조합이 구조 성능과 경량화 효과를 동시에 만족하는 최적 조건으로 판단하였다.

해당 조건에서 최대 응력은 주로 격자 조인트 부근에서 발생하였으며, 최대 변위는 날개 리딩 엣지 부근에서 발생하는 것으로 나타났다. 최적 균일 격자 구조에서의 최대 응력 발생 위치 및 최대 변위 발생 위치는 Fig. 9에 나타내었다.

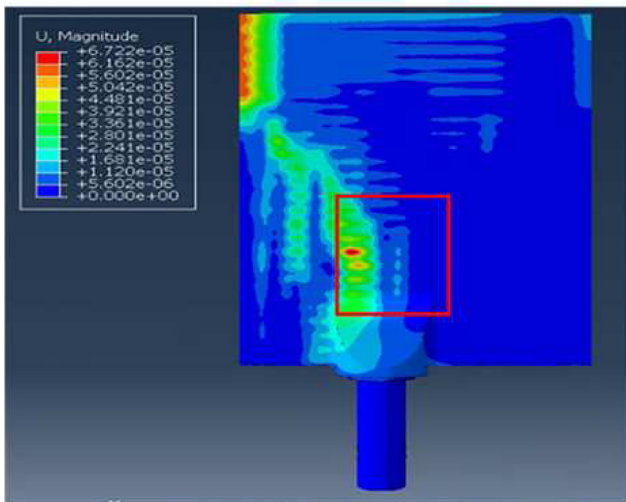
4.2 비균일 격자 구조 해석 결과

선정된 최적 균일 격자 구조를 기준으로, 구조 해석 결과를 바탕으로 한 비균일 격자 설계를 적용하였다. 응력 집중이 발생하는 영역에는 스트럿 직경 0.6 mm를 유지하고, 구조적 여유가 충분한 영역에는 스트럿 직경 0.5 mm를 적용하여 추가적인 경량화를 진행하였다.

비균일 격자 구조에 대한 구조 해석 결과, 최대 응력은 균일 격자 구조 대비 약 3.69에서 3.55 MPa로 감소하였으며, 최대 변위 또한 80.6에서 67.2 nm로 감소하는 것으로 나타났다. 동시에 구조 질량은 약 1.6% 추가 감소하여, 구조 성능 향상과 경량화를 동시에 달성할 수 있음을 확인하였다.



(a) Location of maximum stress in the non-uniform lattice



(b) Location of maximum displacement in the non-uniform lattice

Fig. 10 Locations of maximum stress and maximum displacement in the non-uniform lattice structure

최대 응력 및 변위 발생 위치는 균일 격자 구조와 유사하게 나타났으나, 응력 분포는 보다 완만하게 분산되는 경향을 보였다. 이는 균일 격자 해석 결과를 기반으로 취약 영역을 보완하고, 강인한 영역을 경량화한 비균일 격자 설계 전략의 유효성을 검증하였다. 비균일 격자 구조에서의 응력 및 변위 분포 결과는 Fig. 10에 나타내었다.

5. 적층 시뮬레이션

본 장에서는 4장에서 도출된 격자 구조 설계 결과의 실제 제조 가능성을 검증하기 위해 수행한 적층 제조 공정 시뮬레이션 결과를 제시한다. 적층 방향, 서포트 구조, 출력 개수에 따른 조형 안정성 및 형상 정밀도를 비교·분석하여, 최종 적층 조건의 타당성을 평가한다.

5.1 적층 방향에 따른 조형 안정성 분석

격자 구조가 적용된 조종 날개 모델에 대해 X, Y, Z의 세 가지 적층 방향을 기준으로 적층 시뮬레이션을 수행하였다. 모든 시뮬레이션에는 동일한 재료 조건(Ti-6Al-4V powder)과 공정 조건을 적용하여 적층 방향에 따른 영향을 비교하였다.

시뮬레이션 결과, 적층 방향에 따라 표면 변형 및 형상 일치도에서 차이가 발생하였다. X축 적층의 경우 최대 표면 편차는 약 0.1 mm로 비교적 작게 나타났으나, 형상 일치도는 약 85.9% 수준으로 확인되었다. Z축 적층의 경우 최대 표면 편차가 약 0.6 mm로 크게 발생하였고, 형상 일치도 또한 약 67%로 가장 낮은 값을 보였다.

반면 Y축 적층 조건에서는 최대 표면 편차가 약 0.1 mm로 안정적인 수준을 유지하면서, 실제 모델과의 형상 일치도가 약 96.7%로 가장 높게 나타났다. 이를 통해 Y축 방향 적층이 형상 정밀도 측면에서 가장 우수한 결과를 보이는 것으로 판단하였다. 다만, Y축 적층의 경우 다른 방향 대비 적층 시간이 다소 증가하는 경향을 보였으나, 형상 정확도 확보 측면에서 이를 감수할 수 있는 수준으로 판단하였다. 적층 방향에 따른 표면 변형 및 형상 정합성 분포는 Fig. 11에 나타내었으며, 정량적 비교 결과는 Table 3에 정리하였다.

5.2 서포트 구조 개선에 따른 조형 안정성 분석

적층 과정 중 발생하는 응력 집중과 변형을 완화하기 위해 기존 서포트 구조와 보강된 서포트 구조를 적용한 적층 시뮬레이션을 수행하였다. 서포트 보강은 적층 중 구조 지지 안정성을 향상시켜 조형 변형을 억제하고, 결과적으로 형상 정밀도를 개선하기 위한 목적으로 적용되었다.

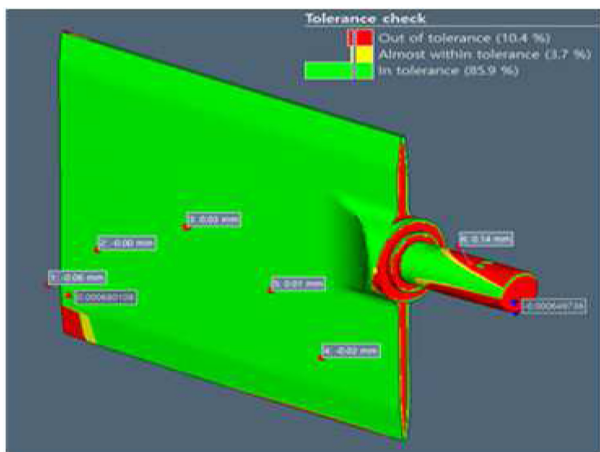
시뮬레이션 결과, 기존 서포트 구조에서는 최대 응력이 약 1,334.89 MPa, 최대 변위가 약 0.38 mm로 나타났다. 반면 서포트 보강 구조를 적용한 경우 최대 응력은 약 1,180.52 MPa로 약 11.6% 감소하였으며, 최대 변위는 약 0.19 mm로 약 50% 감소하는 것으로 확인되었다. 이는 Table 4에 정리되었다.

형상 공차 검사 결과, 서포트 보강 구조를 적용한 경우 출력물의 변형이 억제되면서 형상 안정성이 향상되었고, 이에 따라 형상 정밀도가 보다 안정적으로 확보됨을 확인하였다. 이는 서포트 구조 개선이 적층 중 발생하는 응력 및 변형을 완화함으로써 출력물의 형상 정확도 향상에 기여함을 의미한다.

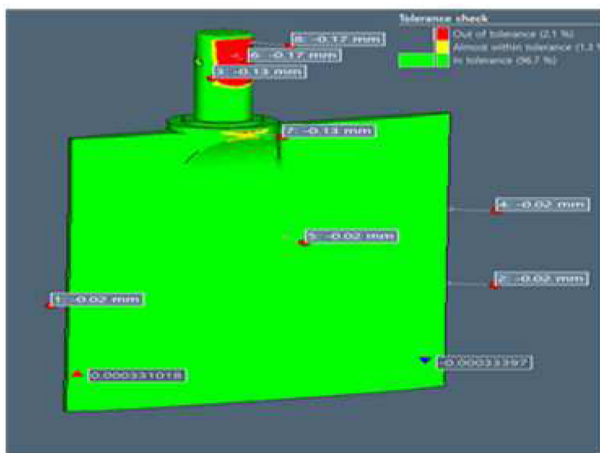
5.3 출력 조건에 따른 조형 안정성 분석

동일한 격자 구조 모델을 단일로 출력하는 경우와 10개 모델을 동시에 출력하는 경우를 비교하여, 출력 개수 변화가 조형 안정성에 미치는 영향을 분석하였다.

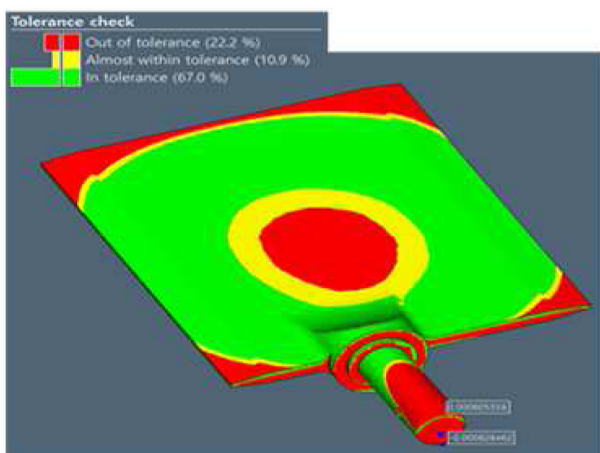
시뮬레이션 결과, 단일 출력 조건에서 최대 응력은 약 1,180.52 MPa, 최대 변위는 약 0.19 mm로 나타났다. 반면 다중 출력 조건에서는 최대 응력이 약 1,279.57 MPa로 약 8.4% 증가하였으며, 최대 변위 또한 약 0.29 mm로 약 52.6% 증가하는 경향을 보였다. 형상 공차 검사 결과에서는 단일 출력 대비 약 0.7% 증가한 97.6%의 형상 일치도를 나타냈다. Fig. 12는 단일



(a) X-axis build orientation



(b) Y-axis build orientation



(c) Z-axis build orientation

Fig. 11 Additive manufacturing simulation results with respect to build direction

출력 조건과 다중 출력 조건에서의 적층 제조 공정 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

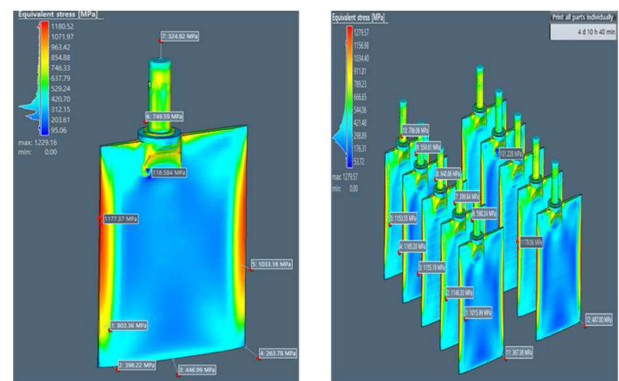
다중 출력 조건에서 일부 날개 가장자리 영역에서 국부적인 변형 증가가 관찰되었으나, 전체적인 조형 안정성 및 형상

Table 3 Simulation results according to build orientation

	X-axis	Y-axis	Z-axis
Maximum surface deviation [mm]	0.1	0.1	0.6
Shape similarity [%]	85.9	96.7	67.0
Processing time	6 h 56 m 57 s	10 h 35 m 46 s	5 h 25 m 23 s

Table 4 Comparison of stability with improved support structures

	Original support	Improved support
Maximum stress [MPa]	1,334.9	1,180.5
Maximum displacement [mm]	0.4	0.2
Dimensional accuracy [%]	96.9	96.9



(a) Single-build model

(b) Multi-build model

Fig. 12 Stability analysis results according to build quantity conditions

정밀도는 단일 출력 조건과 유사한 수준을 유지하는 것으로 분석되었다. 이를 통해 다중 출력 조건에서도 제한한 격자 구조 및 적층 조건이 적용 가능함을 확인하였다.

5.4 제작

본 연구에서는 제한한 격자 구조 설계를 기반으로 Ti-6Al-4V 소재의 격자 구조 시편을 적층 제조 공정을 통해 제작하였다. 제작된 시편은 서포트 제거 및 후처리 공정을 거쳐 최종 형상을 확보하였으며, 이를 통해 설계 단계에서 고려한 제조성 제약 조건의 타당성을 검증하였다. 제작 및 후처리된 격자 구조 시편의 형상은 Fig. 13에 나타내었다. 또한, 동일 설계를 적용하여 제작된 Ti-6Al-4V 시편에 대해 인장 시험, 경도 시험, 염수분무시험, 침수 정합성 검사 및 변형 유무 검사를 수행하였다. 그 결과, 인장강도 약 1,178 MPa, 항복강도 약 1,019 MPa, 연신율 약 15%, 경도 약 38 HRC 수준의 기계적 특성을 확인하였다. 더불어 염수분무 시험에서 부식 발생이 관찰되지 않았으며, 기공률은 약 0.2% 수준으로 나타나 낮은 결함 분포를 보였다. 이러한 결과를 통해 제한한 설계 및 해석 결과가 구조적 건전성, 환경 내구성 및 제조 정밀도 측면에서 실제 적용 가능성을 충분히 확보하고 있음을 정량적으로 입증하였다.

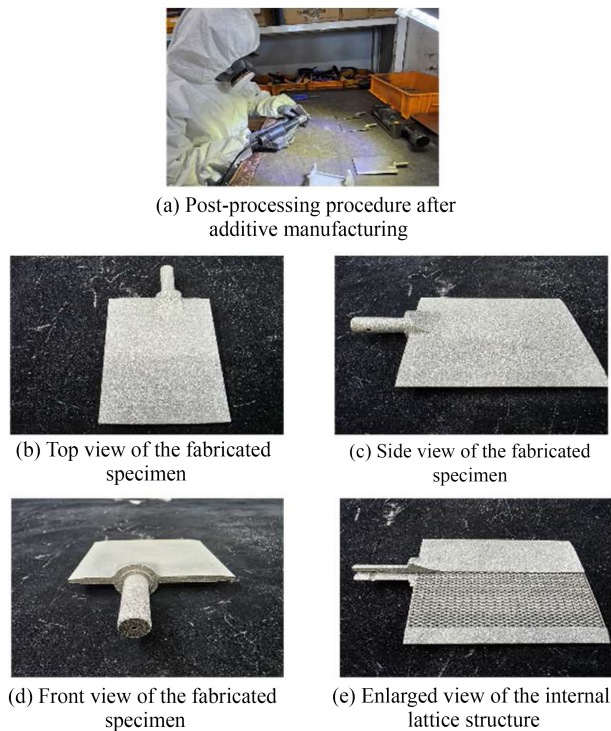


Fig. 13 External appearance and internal structure of the control fin specimen fabricated by additive manufacturing and post-processing based on the proposed lattice design

6. 결론

본 연구에서는 금속 적층 제조 환경을 고려한 격자 구조 기반 설계 접근을 통해 유도 미사일 조종 날개의 경량화와 구조적 안정성 향상을 동시에 달성할 수 있는 설계 프레임워크를 제안하였다. BCC 격자를 기반으로 스트럿 직경과 단위셀 종횡비를 주요 설계 변수로 설정하고, 공력 해석 결과를 하중 조건으로 적용한 구조 해석을 통해 격자 구조 적용에 따른 구조 거동을 체계적으로 분석하였다. 또한 균일 격자 해석 결과를 기반으로 비균일 격자 설계로 확장하여 하중 분포에 부합하는 재료 배치를 구현하였으며 적층 제조 공정 시뮬레이션을 연계함으로써 설계 단계에서 실제 제조 가능성까지 함께 검토하였다. 나아가 제안한 격자 구조 설계를 적용한 시편을 제작하고 다양한 시험 성적서를 확보함으로써 제안 기법의 실효성을 검증하였다.

본 연구의 주요 기여는 다음과 같다. 조종 날개 구조를 대상으로 균일 격자 및 비균일 격자 설계 변수를 정의하고, 구조 해석을 통해 격자 구조 적용에 따른 안정성과 경량화 효과를 정량적으로 분석하였다. 스트럿 직경과 단위셀 종횡비를 핵심 설계 변수로 설정하여, 격자 구조 설계 시 구조 성능과 질량 저감 사이의 상충 관계를 명확히 제시하였다. 균일 격자 구조의 경우, 스트럿 직경 0.6 mm, 단위셀 종횡비 1 : 1.87 조건에서 솔리드 모델 대비 질량은 약 37.2% 감소하고, 최대 변위는 약 52.1% 감소하여 경량화와 구조 안정성을 동시에 고려한 설계 기준을

도출하였다. 또한 비균일 격자 설계를 적용한 경우, 균일 격자 대비 최대 응력은 약 3.8%, 최대 변위는 약 36% 감소하는 동시에 질량은 추가적으로 약 1.6% 감소하여, 동일 질량 조건에서 구조 성능을 개선하거나 구조 성능을 유지하면서 추가적인 경량화를 달성할 수 있음을 확인하였다. 최종적으로, 본 연구에서 제안한 비균일 격자 구조는 솔리드 모델 대비 최대 변위 약 60.1% 감소와 질량 약 38.2% 감소를 달성하여, 경량화와 구조 안정성을 동시에 만족하는 설계가 가능함을 정량적으로 입증하였다. 이는 격자 구조 설계가 질량 저감을 넘어 구조 성능 개선까지 동시에 달성할 수 있는 효과적인 접근임을 보여준다. 더 나아가 구조 해석 결과에 국한하지 않고 적층 제조 공정 시뮬레이션을 연계하여 적층 방향, 서포트 구조, 출력 조건에 따른 조형 안정성과 형상 정밀도를 함께 검토함으로써, 격자 구조 설계의 실제 적용 가능성을 제조 관점에서 검증하였다. 또한 제안된 격자 구조 설계를 적용하여 제작된 Ti-6Al-4V 소재 시편에 대해 인장 시험, 경도 시험, 염수분무시험, 치수 정합성 검사 및 변형 유무 검사를 포함한 다양한 시험 성적서를 확보하여, 제안한 설계 및 해석 결과가 구조적 건전성, 환경 내구성 및 제조 정밀도 측면에서 실제 적용 가능성을 충분히 확보하고 있음을 확인하였다.

한편, 본 연구는 공력 해석 결과를 하중 조건으로 적용한 정적 구조 해석을 기반으로 수행되었으며, 비행 중 발생할 수 있는 동적 하중이나 피로 하중은 고려되지 않았다는 한계를 가진다. 또한 적층 제조 공정에 대한 검증은 시뮬레이션 결과를 중심으로 수행되었으며, 실제 적층 공정을 통한 시편 제작 후 공정 변형 및 내부 결함에 대한 정량적 비교 분석은 충분히 이루어지지 못하였다. 더불어 격자 구조 설계는 BCC 격자 형상에 한정되어 수행되었기 때문에, 제안한 설계 전략의 일반화에는 일정한 제약이 존재한다.

향후 연구에서는 열-구조 연성 해석을 포함한 적층 제조 공정 시뮬레이션을 통해 적층 과정에서 발생하는 열 잔류응력과 변형을 보다 정밀하게 예측할 필요가 있다. 또한 실제 적층 제조 실험을 수행하여 구조 해석 및 공정 시뮬레이션 결과를 검증하고, 실험 결과와의 비교를 통해 제안한 격자 설계 전략의 신뢰성을 강화할 필요가 있다. 특히, 제작된 시편에 대한 압축강도 및 항복응력과 같은 정량적 기계적 성능을 측정하고, 이를 시뮬레이션 결과와 비교·분석함으로써 해석 기반 설계 기법의 예측 정확도를 검증할 필요가 있다. 이를 통해 설계-해석-제작 간의 연계성을 확보하고, 제안한 방법론의 실효성을 보다 명확히 입증할 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 14는 nTop의 Field-driven Design 개념을 적용하여 해석 기반 응력장을 격자 스트럿 직경, 밀도와 같은 설계 변수에 연계한 개념적 예시를 나타낸다. 향후 연구에서는 응력장뿐 아니라 변형장, 온도장 등 다양한 물리 필드를 격자 스트럿 직경, 상대 밀도 등의 설계 변수와 직접적으로 매핑함으로써 구조 응답에 따라 공간적으로 비균일한 격자 구조를 자동 생성하는 설계 확장이 가능할 것으로 기대된다. 이를 통해 BCC 격자뿐 아니라

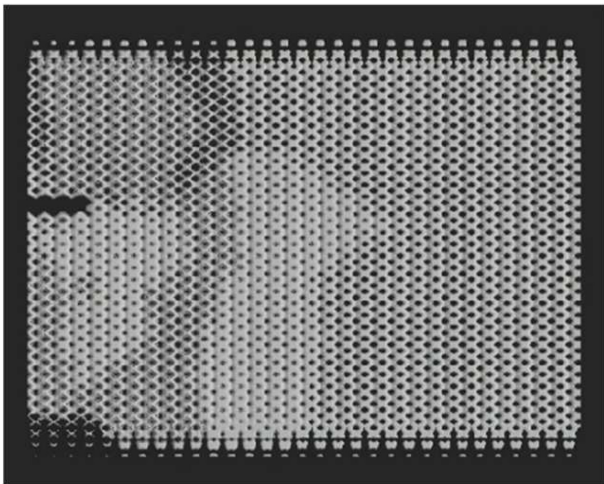


Fig. 14 Field-driven lattice design example using nTop

TPMS 기반 격자 및 다양한 주기 격자 구조에 대해 구조 성능과 제조성 차이를 정량적으로 비교·분석하고, 제안한 설계 프레임 워크의 적용 범위를 더욱 확장할 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 국방기술진흥연구소에서 지원하는 「방산특화개발 연구소 구축 및 운영」(과제번호: DC2023SD) 사업의 연구 수행 결과물입니다.

REFERENCES

- Kim, J. Y., (2022), A study on the design of lattice structures by additive manufacturing, M.S. Thesis, Inha University.
- Park, K. M., (2023), Additive manufactured lattice structures under compression: study of unit cell types, cell arrangements and edgeless, M.S. Thesis, Seoul National University of Science and Technology.
- Wang, X., Yang, J., Guo, J., Guo, J., (2019), A General Integrated Method for Design Analysis and Optimization of Missile Structure, Algorithms, 12(12), 257.
- Diegel, O., Nordin, A., Motte, D., (2020), A practical guide to design for additive manufacturing, Springer Nature Singapore.
- Wang, X., Zhu, L., Sun, L., Li, N., (2021), Optimization of graded filleted lattice structures subject to yield and buckling constraints, Materials & Design, 206, 109746.
- Bai, L., Yi, C., Chen, X., Sun, Y., Zhang, J., (2019), Effective design of the graded strut of BCC lattice structure for improving mechanical properties, Materials, 12(13), 2192.
- Riva, L., Ginestra, P. S., Ceretti, E., (2021), Mechanical characterization and properties of laser-based powder bed-fused lattice structures: a review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 113(3), 649-671.
- Arputharaj, J. D., Nafisi, S., Ghomashchi, R., (2025), Compression behaviour of L-PBF-manufactured Ti-6Al-4V BCC lattices, Metals, 15(2), 220.
- Choi, J. H., (2025), An Experimental Study on the Compressive Strength of Lattice Structures according to Additive Manufacturing Orientations, Journal of the Korean Society of Mechanical Technology, 27(3), 390-393.



Cho Bin Lee

B.S. candidate in the School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. Her research interests are additive manufacturing and structural analysis.
E-mail: chqls0515@kumoh.ac.kr



Ye Seong Jeon

M. S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. Her research interests are machine vision and additive manufacturing.
E-mail: gysu4757@kumoh.ac.kr



Jae Min Park

received the B.S. degree in mechanical engineering from Pusan National University, Pusan, Korea, in 2008. He is currently a chief research engineer of LIG Defense & Aerospace. His research interest is precision engineering for defense area.
E-mail: jaeminpark@ligdna.com



Jin Ho Jeong

received the B.S. degree in mechanical engineering from Donga University, Pusan, Korea, in 2021. He is currently a research engineer of LIG Defense & Aerospace. His research interest is precision engineering for defense area.
E-mail: jinho.jeong1@ligdna.com

**Kyu Tae Shin**

received the B.S. degree in mechanical engineering from Yeungnam University, Daegu, Korea, in 2020. He is currently a research engineer of LIG Defense & Aerospace. His research interest is precision engineering for defense area.

E-mail: kyutae.shin@ligdna.com

**Hyeon Jin Son**

Principal Researcher at the Korea Institute of Industrial Technology. His research interest is 3D printing technology.

E-mail: shj8106@kitech.re.kr

**Dong Wan Lee**

Principal Researcher at Metal3D Co., Ltd. His research interests are materials engineering, additive manufacturing, and advanced materials for extreme environments.

E-mail: dwlee@metal3d.co.kr

**Ji Min Park**

received the M.Eng. degree in Mechanical Engineering from the Graduate School of Engineering of Yonsei University, Seoul, Korea, in 2023. She is currently a senior engineer of Harvestance Co., Ltd. Her research interests are computational design and design for additive manufacturing.

E-mail: jm.park@harvestance.com

**Hyun Chan Kim**

Assistant Professor in the School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interests are process design for additive manufacturing and nanocomposites.

E-mail: hyunckim@kumoh.ac.kr

**Soon Jo Kwon**

Assistant Professor in the School of Mechanical Engineering, Pusan National University. His research interests are design for additive manufacturing and AI-based engineering design.

E-mail: soonjo.kwon@pusan.ac.kr