

상대 밀도에 따른 금속 적층 제조 격자 구조체의 기계적 특성

박광민^{1*}, 김정길¹, 노영숙²

¹(재)한국건설생활환경시험연구원 건설기술연구센터, ²서울과학기술대학교 건축학부 건축공학전공

Mechanical Properties of Metallic Additive Manufactured Lattice Structures according to Relative Density

Kwang-Min Park^{1*}, Jung-Gil Kim¹, Young-Sook Roh²

¹Construction Technology Research Center, Korea Conformity Laboratories

²Department of Architectural Engineering, Seoul National University of Science and Technology

요약 격자 구조체는 강도 및 강성, 초경량 및 에너지 흡수 능력 등의 우수성을 가지고 있어서 전방위 산업에서 주목을 받고 있으나, 다양한 장점에도 불구하고 복잡한 형상에 따른 제조 공정의 어려움으로, 현재까지 광범위한 상용화 및 사용은 제한되고 있다. 한편 적층 제조는 전통적인 제조 방법으로는 불가능한 복잡한 기하학적 형상 제조가 가능한 기술로써, 격자 구조체 제조를 위한 최적 기술로 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 3차원 좌표 방법으로 단위 셀을 형성하고, 단위 셀의 바운더리 박스 크기 및 스트럿 반경에 따른 상대 밀도의 관계식을 도출하였다. 본 연구에서는 Simple Cubic(SC), Body-Centered Cubic(BCC) 및 Face-Centered Cubic(FCC)을 모델링 소프트웨어를 사용하여 상대 밀도 맞춤형 구조체를 설계하였다. 본 연구에서 제안한 상대 밀도 산출식 정확도는 SC, BCC 및 FCC에서 98.3 %, 98.6 % 및 96.2%의 신뢰성을 확보하였다. 격자 구조체를 대상으로 시뮬레이션 수행 결과, 동일한 셀 배열 조건에서는 상대 밀도가 커짐에 따라 항복 하중이 커지고, 동일 배열 조건에서는 SC, BCC, FCC 순으로 압축 항복 하중이 작아지는 결과가 나타났다. 최종적으로 20 mm × 20 mm × 20 mm 크기의 구조체는 SC 단위 셀을 3×3×3 배열로 구성하는 것이 압축 하중에 대한 구조적 최적화가 가능한 것으로 나타났다.

Abstract The lattice structure is attracting attention from industry because of its excellent strength and stiffness, ultra-lightweight, and energy absorption capability. Despite these advantages, widespread commercialization is limited by the difficult manufacturing processes for complex shapes. Additive manufacturing is attracting attention as an optimal technology for manufacturing lattice structures as a technology capable of fabricating complex geometric shapes. In this study, a unit cell was formed using a three-dimensional coordinate method. The relative density relational equation according to the boundary box size and strut radius of the unit cell was derived. Simple cubic (SC), body-centered cubic (BCC), and face-centered cubic (FCC) with a controlled relative density were designed using modeling software. The accuracy of the equations for calculating the relative density proposed in this study secured 98.3%, 98.6%, and 96.2% reliability in SC, BCC, and FCC, respectively. A simulation of the lattice structure revealed an increase in compressive yield load with increasing relative density under the same cell arrangement condition. The compressive yield load decreased in the order of SC, BCC, and FCC under the same arrangement conditions. Finally, structural optimization for the compressive load of a 20 mm × 20 mm × 20 mm structure was possible by configuring the SC unit cells in a 3 × 3 × 3 array.

Keywords : Additive Manufacturing, Lattice Structure, Relative Density, Simple Cubic, Face Centered Cubic, Body Centered Cubic

본 연구는 국토교통부 국토교통기술혁신연구사업 “3D 프린터를 이용한 밀도제어형 인공경량골재 제조기술 개발(21CTAP-C157265-01)”으로 수행하였습니다. 이에 감사드립니다.

*Corresponding Author : Kwang-Min Park(Korea Conformity Laboratories)

email: kmpark@kcl.re.kr

Received March 11, 2021

Accepted June 4, 2021

Revised April 1, 2021

Published June 30, 2021

1. 서론

격자 구조체(Lattice Structures)는 단위 셀(Unit Cell)이라고 하는 3차원 개방 셀(Open-celled Unit)을 설계 공간 안에서 반복적으로 배열하고, 단위 셀간의 조인트(joint)를 스트럿(strut)으로 연결하여 생성한 구조체를 말한다[1]. 격자 구조체는 강도 및 강성, 초경량 및 에너지 흡수 능력 등의 우수성을 가지고 있어서 전방위 산업에서 주목을 받고 있다[2-4]. 그러나 격자 구조체의 다양한 장점에도 불구하고 복잡한 형상에 따른 제조 공정의 어려움으로, 현재까지 광범위한 상용화 및 사용은 제한되고 있다.

적층 제조(Additive manufacturing, 이하 AM)는 전통적인 제조 방법으로는 불가능한 복잡한 기하학적 형상 제조가 가능한 기술로써, 격자 구조체 제조를 위한 최적 기술로 주목을 받고 있다. AM 기술은 3차원 캐드(Computer-Aided Design, 이하 CAD) 모델을 한층 한층(layer by layer) 쌓아 올림으로써 기존 기술로는 제작이 불가능한 복잡한 형상을 제조할 수 있다. 최근에는 선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting, 이하 SLM) 등 금속 AM 기술의 발달로 경량의 고강성 금속 소재 기반 격자 구조체 제조에 대한 연구가 시도되고 있다[5-7].

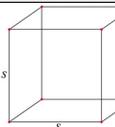
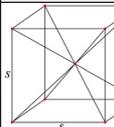
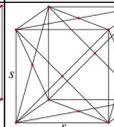
SLM 방식으로 출력한 금속 적층 제조 격자 구조체의 경량화 및 강성에 대한 연구 보고는 다음과 같다. Martin Leary et al., (2016)은 AlSi12Mg (Aluminium) 소재를 활용하여 SLM AM 기술로 격자 구조체를 출력하고, 강성 및 에너지 흡수성에 대한 연구를 보고하였다[5]. Lin Cheng et al., (2017)은 위상최적화를 통해 상대 밀도(Relative Density)에 따른 격자 구조체 최적화 및 이에 따른 강도 영향에 대한 연구를 보고하였다[6]. Oraib

Al-Ketan et al., (2018)은 Ti6Al4V(Titanium) 소재를 활용하여 SLM AM 기술로 스트럿(strut)과 시트(sheet) 타입의 단위 셀로 격자 구조체를 출력하고, 상대 밀도에 따른 압축 강도 및 변형에 대한 연구를 보고하였다[7].

기존 연구에서는 기하학적 구성 방법을 적용하여 단위 셀 및 격자 구조체를 구현하고 있으며, 단위 셀의 바운더리 박스(boundary box) 크기 및 스트럿 반경에 따른 상대 밀도의 관계식에 대해서는 보고하고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 단위 셀 형성을 위하여 3차원 좌표 방법을 제안하고자 한다. 단위 셀의 노드(node)를 3차원 좌표값으로 제시하고 해당 노드를 연결하여 스트럿을 생성하는 방법으로 3D 모델링 및 데이터 관리 편의성을 확보하고자 한다.

격자 구조체를 설계하는데 있어서 가장 큰 문제는 적절한 격자 토폴로지(topology)를 선택하는 것이다. 따라서 기계적 특성을 확보하기 위한 상대 밀도 함수로 확보하는 것은 최종 사용 특성이 개선된 제품 설계를 적용하기 위한 전제 조건이다. 따라서 본 논문에서는 격자 구조체의 상대 밀도를 제어하기 위해 상대 밀도 설계 방정식을 수식화하는 것을 시도하였다. 여기서는 상대 밀도를 제어한 단위 셀을 $1 \times 1 \times 1$, $2 \times 2 \times 2$, $3 \times 3 \times 3$ 및

Table 1. Maxwell stability(M-value) of Unit cell

	Unit cell		
	SC	BCC	FCC
Shape			
No. of joint	8	9	14
No. of strut	12	20	36
M-value	-6	-1	0

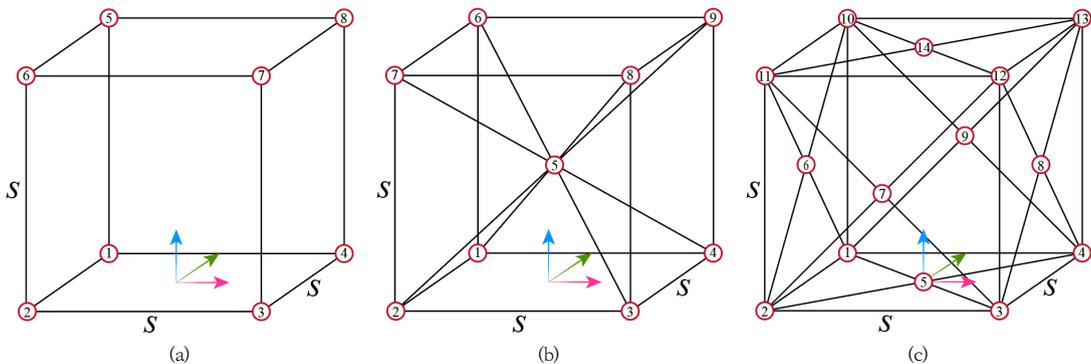


Fig. 1. Unit cells with three-dimensional coordinate method
 (a) Simple Cubic (b) Body-Centered Cubic (c) Face-Centered Cubic

Table 2. Unit cell with three-dimensional coordinate data

Simple Cubic				Body-Centered Cubic				Face-Centered Cubic			
node	X	Y	Z	node	X	Y	Z	node	X	Y	Z
1	-S/2	S/2	0	1	-S/2	S/2	0	1	-S/2	S/2	0
2	-S/2	-S/2	0	2	-S/2	-S/2	0	2	-S/2	-S/2	0
3	S/2	-S/2	0	3	S/2	-S/2	0	3	S/2	-S/2	0
4	S/2	S/2	0	4	S/2	S/2	0	4	S/2	S/2	0
5	-S/2	S/2	S	5	0	0	S/2	5	0	0	0
6	-S/2	-S/2	S	6	-S/2	S/2	S	6	-S/2	0	S/2
7	S/2	-S/2	S	7	-S/2	-S/2	S	7	0	-S/2	S/2
8	S/2	S/2	S	8	S/2	-S/2	S	8	S/2	0	S/2
				9	S/2	S/2	S	9	0	S/2	S/2
								10	-S/2	S/2	S
								11	-S/2	-S/2	S
								12	S/2	-S/2	S
								13	S/2	S/2	S
								14	0	0	S

4×4×4 배열로 구성하여 격자 구조체를 생성하여 구조적 특성을 최적화 할 수 있는 최소 단위 셀을 확인하여 대표 체적 요소(Representative Volume Element, 이하 RVE)를 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

2. 연구 개요 및 방법

2.1 단위 셀 및 격자 구조체 설계

격자 구조체는 일반적으로 단위 셀을 반복하여 구성한다. 따라서 격자 구조체 설계에는 단위 셀은 전체 격자 구조를 구성하고 특성화하는 가장 작은 요소이다. 따라서 본 연구에서는 가장 기초적인 단위 셀로써 Table 1과 같이 단순입방체(Simple Cubic, 이하 SC), 체심입방체(Body-Centered Cubic, 이하 BCC) 및 면심입방체(Face-Centered Cubic, 이하 FCC)를 선정하여 연구를 진행하였다. 격자 구조체의 거동 특성은 Eq.(1)의 Maxwell 안정성 임계지수 M (Maxwell's Stability Criterion)에 따라 굽힘 또는 인장/압축에 유리한 격자의 기초 특성을 정의한다. $M < 0$ 인 경우, 굽힘 변형이 지배적인 격자 구조체이며, $M \geq 0$ 인 경우는 인장/압축 변형이 지배적인 격자 구조체이다[8]. 적층 제조 측면에서 보면 M 이 높을수록 제작이 복잡하여 스트럿 반경 변화를 다양하게 할 수 없다.

$$M = b - 3j + 6 \quad (1)$$

여기서, M 은 Maxwell 안정성 임계지수, b 는 스트럿 수, j 는 조인트 수를 나타낸다.

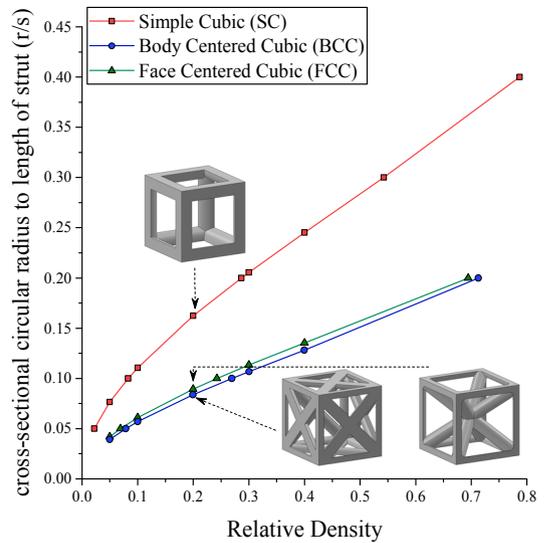


Fig. 2. Comparison of relative density according to variation of strut parameter

Table 3. Factor and level

Factor	Level
Unit cell type	SC, BCC, and FCC
Relative Density	0.05, 0.1, 0.2, 0.3, and 0.4
Lattice array	1×1×1, 2×2×2, 3×3×3, and 4×4×4
Material	Ti6Al4V (titanium)
Load type	Static analysis in compression

Fig. 1 및 Table 2에 본 연구에서 제시하고 있는 BC, BCC 및 FCC의 3차원 좌표 방법의 데이터를 표기하였

다. 여기서 S 는 바운더리 박스의 한 변 길이를 의미한다. 예를 들어 BC의 경우 노드.1~8까지 생성하고, 노드.1-2 및 1-4를 연결하여 스트럿 요소를 생성하였다.

단위 셀의 상대 밀도 γ 는 V_s/V 로 계산하였다. 여기서 V_s 는 단위 셀의 체적이고 V 는 바운더리 박스의 총 체적이다. 각 단위 셀의 체적을 수학적으로 도출하기 위해, 교차하지 않는 스트럿 체적을 도출한 후 교차점 체적을 추가하였다. 스트럿 체적은 일반적으로 원기둥 체적을 구하는 식을 바탕으로 하였고 각 교차점의 중복된 체적은 수식적으로 계산하는데 제약이 따르기 때문에 한 변이 $2r$ 인 정육면체로 가정하였다. 단, BCC 중심부에 위치한 교차점(node 5)의 중복된 체적은 세 원기둥이 직교할 때 발생하는 공통부분 체적으로 가정하였다.

Eq.(2), Eq.(3) 및 Eq.(4)에 각 단위 셀의 상대 밀도 추정식을 제시한다.

$$\gamma_{SC} = \{3\pi r^2(S-2r) + 8r^3\}/S^3 \quad (2)$$

$$\gamma_{BCC} = \{S\pi r^2(3+4\sqrt{3}) - 2\pi r^3(4\sqrt{3}+7) + 8r^3(4-\sqrt{2})\}/S^3 \quad (3)$$

$$\gamma_{FCC} = \{S\pi r^2(3+6\sqrt{2}) - 42\pi r^3 + 48r^3\}/S^3 \quad (4)$$

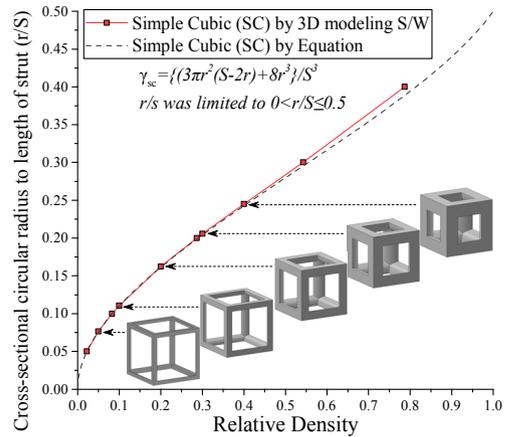
여기서, γ_{SC} 는 SC 상대 밀도 추정식, γ_{BCC} 는 BCC 상대 밀도 추정식, γ_{FCC} 는 FCC 상대 밀도 추정식, r 은 스트럿 반지름 및 S 는 스트럿 길이를 나타낸다.

상기 Eq.(2), Eq.(3) 및 Eq.(4)에서 스트럿 반지름이 증가함에 따라 추가적으로 발생할 수 있는 중복된 체적을 제외시키기 위해 SC 형상에 대한 스트럿 반지름은 $0 < r/S \leq 0.5$, BCC 및 FCC 형상에 대한 스트럿 반지름(r)은 $0 < r/S \leq 0.207$ 로 제한한다.

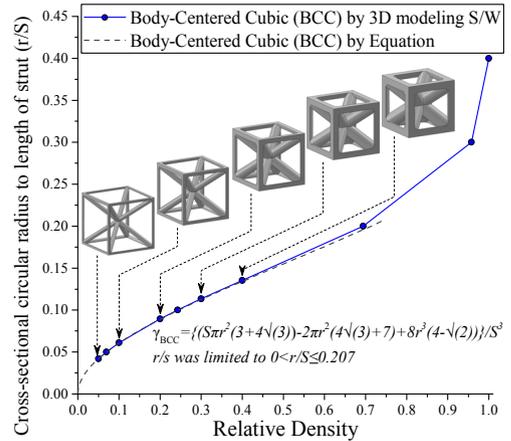
본 연구에서는 라이노 및 그래스호퍼 (rhino and grasshopper)를 사용하여 스트럿 반지름에 따른 격자 구조체를 모델링하고, X, Y, Z 축 방향으로 반복하여 격자 구조체를 형성하는 알고리즘을 개발하였다.

Fig. 2와 같이 스트럿 형상을 제어함으로써 상대 밀도 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 및 0.4의 단위 셀을 도출하였다. 동시에 스트럿 단면의 반경과 스트럿 길이의 비율 (cross-sectional circular radius to length to strut, 이하 r/S)을 0.05, 0.1 및 0.2 등의 유리수로 설정할 경우의 상대 밀도 결과도 도출하였다.

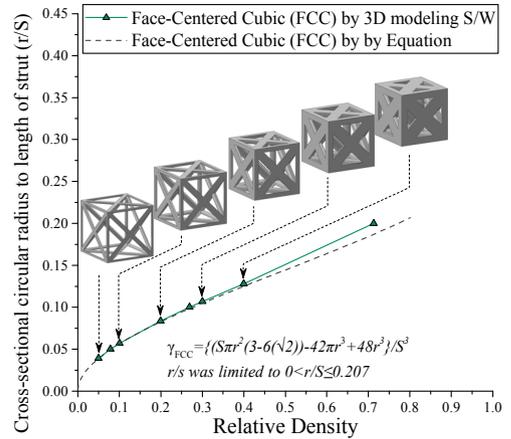
단, 본 연구에서는 스트럿 형상은 원으로 제한하여 진행하였다. 또한 격자 구조체는 향후 적층 제조 제작성을 고려하여 바운더리 박스의 한 변을 20 mm 로 설계하였다. 단위 셀을 3축 방향으로 $1 \times 1 \times 1$, $2 \times 2 \times 2$, $3 \times 3 \times 3$ 및 $4 \times 4 \times 4$ 배열로 단위 셀을 구성하여 격자 구조체를



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Relative density as a function of the ratio of cross-sectional circular radius to length of strut
(a) Simple Cubic (b) Body-Centered Cubic
(c) Face-Centered Cubic

Table 4. Relative density by 3D modeling S/W and Equation

Relative Density by 3D modeling S/W	Simple Cubic		Body-Centered Cubic		Face-Centered Cubic	
	Equation	Percent error (%)	Equation	Percent error (%)	Equation	Percent error (%)
0.050	0.0503	0.600	0.0502	0.400	0.0504	0.800
0.100	0.1006	0.600	0.1006	0.600	0.1017	1.700
0.200	0.2019	0.950	0.2017	0.850	0.2040	2.000
0.300	0.3041	1.367	0.3034	1.133	0.3093	3.100
0.400	0.4067	1.675	0.4058	1.450	0.4151	3.775

생성하였다. 여기서 적층 제조의 특성을 반영하여 단위 셀의 접합 경계면이 생성하지 않도록 배열 완료 후 병합 (merge)하여 설계하였다. 최종 생성된 격자 구조체 바운더리 박스는 한 변의 길이를 20 mm로 동일하게 축소하여 설계하였다.

2.2 유한요소해석을 통한 기계적 특성 검토

최종 설계한 격자 구조체의 압축 하중 조건에서의 항복 강도를 도출하기 위하여, Table 3과 같이 격자 구조체의 시험 요인과 수준은 단위 셀 종류, 상대 밀도 및 단위 셀 구성 배열로 설정하였다. 단위 셀은 BC, BCC, FCC로 구성하고, 상대 밀도는 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 및 0.4로 구성하였다. 단위 셀 구성은 1×1×1, 2×2×2, 3×3×3 및 4×4×4 배열로 하였다. 상용 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하여 유한 요소 해석(Finite Element Analysis, FEA)을 수행하였다. 구조체 소재는 Ti6Al4V (titanium)으로 선정하였으며, 탄성 계수 104800 MPa, 항복 강도 827 MPa, 포아송비 0.31이다. 대상 구조체를 솔리드 단위로 메쉬화하였고, 메쉬 크기는 상용 프로그램에서 설정 가능한 최대 조밀 크기로 하였다. 격자 구조체의 항복 강도를 도출하기 위해 모델 상단에 수직 압축 방향으로 외부 하중을 재하하였다. 재하 하중을 증가하면서 항복 강도에 도달한 메쉬가 발생할 때의 하중을 항복 하중으로 정의하였다.

3. 연구 결과 및 분석

3.1 단위 셀 및 격자 구조체 설계

Fig. 3에 상대 밀도 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 및 0.4로 설계한 각 단위 셀을 나타내었다. 상대 밀도 γ 은 V_s/V 로 계산한다. 여기서 V_s 는 단위 셀의 체적이고 V 는 바운더리 박스의 총 체적이다. 단위 셀 설계값 도출 결과, 동일한 상대 밀도로 설계할 때 r/s 는 SC, BCC, FCC 순으로

작아지는 결과가 나타났다. 예를 들어 상대 밀도 0.2의 경우 SC, BCC 및 FCC는 각 0.1623, 0.0895 및 0.0838이고, 상대 밀도 0.3의 경우 SC, BCC 및 FCC는 각 0.2056, 0.1134 및 0.1068로 확인되었다.

Table 4에 3D 모델링 소프트웨어로 설계한 상대 밀도 및 수식에 의한 상대 밀도를 나타내었다. 각 단위 셀의 오차율을 도출한 결과, 상대 밀도가 크고, 조인트(joint)이 많고, m-value가 클수록 오차율이 증가하는 결과를 나타냈다. 조인트가 가장 많은 FCC는 상대 밀도가 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 및 0.4로 증가할수록 오차율이 0.800 %, 1.700 %, 2.000 %, 3.100 % 및 3.775 %로 커지는 결과가 나타났다. Table 5에 2×2×2 배열의 격

Table 5. 2×2×2 shaped lattice structures

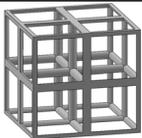
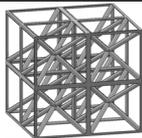
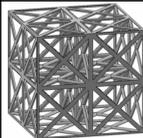
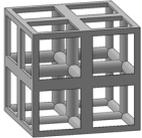
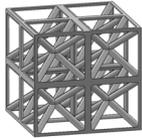
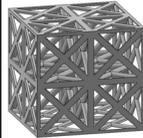
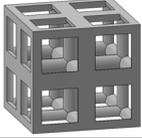
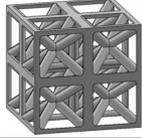
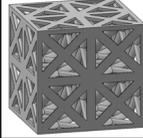
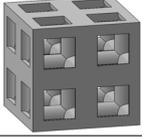
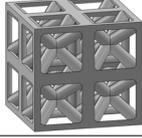
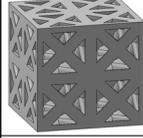
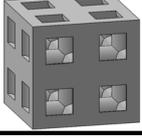
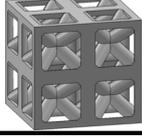
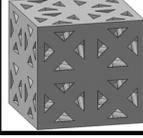
Relative density	Simple Cubic	Body-Centered Cubic	Face-Centered Cubic
0.05			
0.1			
0.2			
0.3			
0.4			

Table 6. Yield force of lattice structures

Relative Density	Simple Cubic				Body-Centered Cubic				Face-Centered Cubic			
	1×1×1	2×2×2	3×3×3	4×4×4	1×1×1	2×2×2	3×3×3	4×4×4	1×1×1	2×2×2	3×3×3	4×4×4
0.05	594	710	914	883	199	211	142	102	162	185	190	172
0.1	1966	2356	2803	2787	393	516	560	466	571	676	629	650
0.2	5546	8339	9223	8736	1751	2020	2717	1645	2128	2927	2698	2815
0.3	9845	13210	16685	17319	3135	3618	4603	5420	4644	6572	7870	5125
0.4	16865	23850	27165	28990	6846	9938	11030	11640	11830	15320	16450	12125

자 구조체를 상대 밀도별로 나타내었다.

본 연구에서 제시한 오차율은 모든 경우에서 4.0 % 이하로 도출됨에 따라 96 % 이상의 신뢰도를 가지는 것으로 확인되었다.

한편 상대 밀도 및 교차하는 점이 증가함에 따라 오차율이 증가하는 이유는 각 형상의 중복된 부분이 다면체 및 원기등과 같이 일반적인 도형이 아닌 기하학적인 표현의 제약 때문에 한 변이 2r 인 정육면체로 가정한 도출 수식의 한계로 판단된다. 이에 대한 상세한 분석은 추후 계속 연구를 진행할 계획이다.

3.2 유한요소해석을 통한 기계적 특성 검토

Table 6에 상대 밀도(0.05, 0.1, 0.2, 0.3 및 0.4), 단위 셀 배열(1×1×1, 2×2×2, 3×3×3 및 4×4×4)에 따른 격자 구조체의 항복 하중을 나타내었다. 동일한 셀 배열 조건에서는 상대 밀도가 커짐에 따라 항복 하중이 커지는 결과가 나타났다. 1×1×1 SC 격자 구조체의 경우, 상대 밀도에 따라 594 N, 1966 N, 5546 N, 9845 N 및 16865 N으로 항복 하중이 증대하는 결과가 나타났다. Fig. 4.(a)에 상대 밀도 0.2, Fig. 4.(b)에 상대 밀도 0.3의 결과를 표기하였다. 일부 오차는 존재하나, 동일 배열 조건에서는 SC, BCC, FCC 순으로 압축 항복 하중이 작아지는 결과가 나타났다. SC의 경우 Maxwell 안정성 임계지수가 -6으로 압축 항복에 우수한 것으로 보인다.

상대 밀도 0.2에서 단위 셀 배열이 1×1×1, 2×2×2, 3×3×3 및 4×4×4 로 증가함에 따라 SC 격자 구조체의 항복 하중은 5546 N, 8339 N, 9223 N 및 8736 N, BCC 격자 구조체의 항복 하중은 1751 N, 2020 N, 2717 N 및 1645 N, FCC 격자 구조체의 항복 하중은 2128 N, 2927 N, 2698 N 및 2815 N로 나타났다. 결과적으로 3×3×3 배열 격자 구조체에서 항복 하중이 수렴하는 경향이 나타났다. 상대 밀도 0.3도 동일한 경향이 나타났다. 단, 본 논문에서는 20 mm × 20 mm × 20

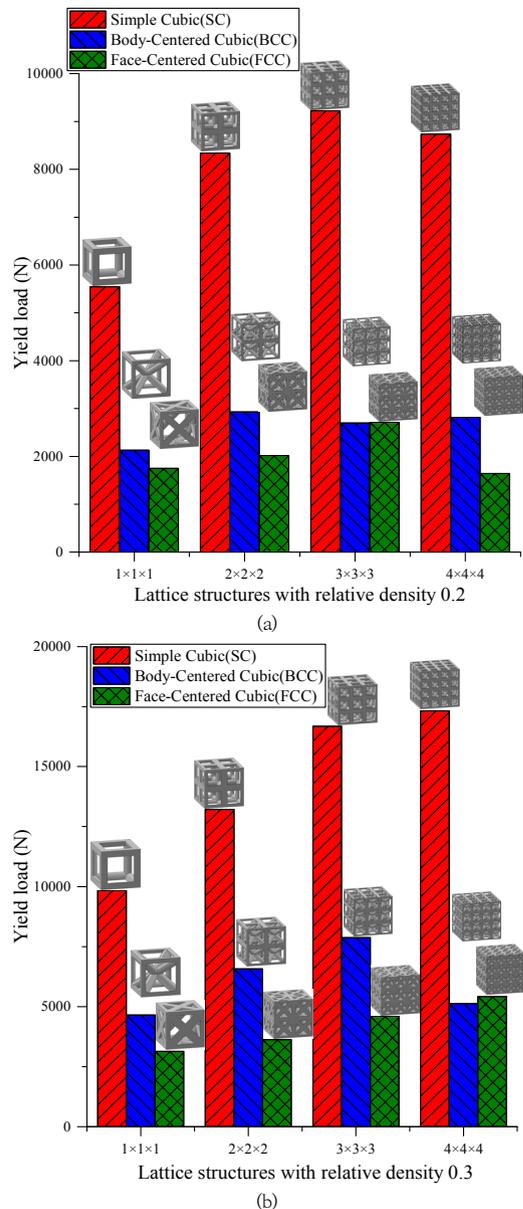


Fig. 4. Yield load of lattice structures
(a) Relative density 0.2 (b) Relative density 0.3

mm 로 제한된 구조체에 한해서 검토를 진행하였다. 향후 구조체 크기 및 배열이 항복 하중에 미치는 영향에 대해서 지속적인 연구가 필요하다.

본 연구에서 제시하고 있는 20 mm × 20 mm × 20 mm 크기의 구조체는 3×3×3 배열로 단위 셀을 구성하는 것이 구조적 최적화가 가능한 것으로 판단된다. 또한 압축 하중만을 고려할 경우 SC 격자 구조체가 가장 우수한 특성을 가진 것으로 판단된다. 향후, 다양한 단위 셀 형상을 대상으로 압축 하중 뿐만 아니라 인장, 굽힘 등 복합 하중에서의 항복 하중을 검토하여 구조적 안정성을 검토할 계획이다. 추가적으로 본 연구에서는 Ti6Al4V (titanium) 소재에 한정하여 검토를 진행하였으나, 향후 금속 적층 제조에서 범용적으로 사용하는 소재에 대해서도 검토 범위를 확대할 계획이다.

4. 결론

본 연구는 단위 셀 형성을 위하여 3차원 좌표 방법 및 상대 밀도 고려 설계를 위하여 추정식을 제안하였다. 또한, 단위 셀 배열을 변수로 하여 격자 구조체 최적화를 검토하였다. 본 연구 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. Simple Cubic(SC), Body-Centered Cubic(BCC) 및 Face-Centered Cubic(FCC)을 대상으로 3차원 좌표 방법을 적용한 모델링 소프트웨어를 사용하여 상대 밀도 맞춤형 구조체를 설계하였다. 소프트웨어를 사용하여 설계한 구조체와 본 연구에서 제안한 상대 밀도 산출식의 정확도는 SC, BCC 및 FCC에서 98.3 %, 98.6 % 및 96.2%의 신뢰성으로, 상대 밀도 산출식은 단위 셀 조인트(joint)가 많고, m-value가 클수록 오차율이 증가하는 결과가 나타났다.
2. 격자 구조체를 대상으로 시뮬레이션 수행 결과, 동일한 셀 배열 조건에서는 상대 밀도가 커짐에 따라 항복 하중이 커지는 결과가 나타났다. 또한, 동일 배열 조건에서는 SC, BCC, FCC 순으로 압축 항복 하중이 작아지는 결과가 나타났다. 또한, 본 연구에서 제시하고 있는 20 mm × 20 mm × 20 mm 크기의 구조체는 SC 단위 셀을 3×3×3 배열로 구성하는 것이 압축 하중에 대한 구조적 최적화가 가능한 것으로 나타났다.

References

- [1] X.Z. Zhang, M. Leary, H.P. Tang, T. Song, M. Qian, "Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges", *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol.22, No.3, pp.75-99, June 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00163-010-0086-1>
- [2] M. Mazur, M. Leary, M. McMillan, S.Sun, D. Shidid, M. Brandt, "Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM), Laser Additive Manufacturing", Woodhead Publishing, 2017, pp.119-161.
DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100433-3.00005-1>
- [3] X. Cao, S. Duan, J. Liang, W. Wen, D. Fang, "Mechanical properties of an improved 3D-printed rhombic dodecahedron stainless steel lattice structure of variable cross section", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.145, pp.53-63, Sep 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.07.006>
- [4] D. Xiao, Z. Dong, Y., Li, W. Wu, D. Fang, "Compression behavior of the graded metallic auxetic reentrant honeycomb: experiment and finite element analysis", *Materials Science and Engineering*, Vol.758, pp.163-171, June 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.116>
- [5] M. Leary, M. Mazur, J. Elambasseril, M. Mcmillan, T. Chirent, Y. Sun, M. Qian, M. Easton, M. Brandt, "Selective laser melting (SLM) of AlSi12Mg lattice structures", *Materials and Design*, Vol.98, No.15, pp.344-357, May 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.127>
- [6] L. Cheng, P. Zhang, E. Biyikli, J. Bai, "Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: Theory and experimental validation", *Rapid Prototyping Journal*, Vol.23, No.4, pp.660-677, June 2017.
- [7] O. Al-Ketan, R. Rowshan, R.K. Al-Rub, "Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials", *Additive Manufacturing*, Vol.19, pp.167-183, Jan 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.006>
- [8] V.S. Deshpande, M.F. Ashby, N.A. Fleck, "Foam Topology:Bending Versus Stretching Dominated Architectures", *Acta Materialia*, Vol.49, No.6, pp.1035-1040, April 2001.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(00\)00379-7](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(00)00379-7)

박 광 민(Kwang-Min Park) [정회원]



- 2006년 3월 : 일본 미에대학교 건축공학 (공학사)
- 2006년 3월 : 일본 미에대학교 건축공학 (공학석사)
- 2008년 9월 ~ 2013년 1월 : ㈜동양구조안전기술
- 2013년 1월 ~ 현재 : (재)한국건설생활환경시험연구원 책임연구원
- 2020년 3월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 건축공학 (박사 수료)

〈관심분야〉

건축재료, 건축구조, 디지털패브리케이션

김 정 길(Jung-Gil Kim) [정회원]



- 2017년 2월 : 세종대학교 수학과 (이학사)
- 2018년 6월 ~ 현재 : (재) 한국건설생활환경시험연구원 연구원
- 2020년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 교육대학원 (교육학석사)

〈관심분야〉

공학수학

노 영 숙(Young-Sook Roh) [정회원]



- 1993년 2월 : 단국대학교 건축공학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 미국 콜로라도 대학교 건축공학 (공학석사)
- 2000년 2월 : 미국 콜로라도 대학교 건축공학 (공학박사)
- 2002년 9월 ~ 2005년 4월 : 단국대학교 초빙교수
- 2005년 5월 ~ 현재 : 서울과학기술대학교 건축학부 건축공학전공 부교수

〈관심분야〉

건축구조