

Design of lattice structure for controlling elastic modulus in metal additive manufacturing

In Yong Moon and Yeonghwan Song[†]

Korea Institute of Industrial Technology, Gangneung 25440, Korea

(Received December 7, 2023)

(Revised December 14, 2023)

(Accepted December 14, 2023)

Abstract With the high design freedom of the additive manufacturing process, there is a growing interest in multi-dimensional lattice structures among researchers, who are studying intricate structural modeling that is challenging to produce using conventional manufacturing processes. In the case of titanium alloy implants for human insertion, a multi-dimensional lattice structure is employed to ensure compatibility with bones, adjusting strength and elastic modulus to levels similar to those of bones. Therefore, securing a database on the mechanical properties based on lattice structure design variables and the development of related simulation techniques are believed to efficiently facilitate the customization of implants. In this study, lattice structures were additively manufactured using Ti-6Al-4V alloy, and the elastic modulus was measured based on design parameters. The results were compared with simulations, and an approach to finite element analysis for accurate prediction of the elastic modulus was proposed.

Key words Additive manufacturing (AM), Powder bed fusion (PBF), Lattice structure, Elastic modulus, Implant

금속 적층제조에서의 격자구조 설계변수에 따른 탄성계수 분석

문인용, 송영환[†]

한국생산기술연구원, 강릉, 25440

(2023년 12월 7일 접수)

(2023년 12월 14일 심사완료)

(2023년 12월 14일 게재확정)

요약 적층제조 공정의 높은 설계자유도에 의해 기존 공정으로 성형이 어려운 형상이 적용된 제품의 제작이 가능해짐에 따라 복잡한 구조를 갖는 기능성 구조에 대한 연구자들의 관심이 증가되고 있다. 타이타늄 합금으로 제작되는 인체 삽입형 임플란트의 경우, 뼈와의 친화성을 확보하기 위해 다차원 격자구조를 적용하여 강도 및 탄성계수를 뼈와 유사한 수준으로 조절하고 있다. 따라서 격자구조의 설계 변수에 따른 기계적 특성에 대한 데이터 베이스 확보 및 관련 시뮬레이션 기술 개발은 개인 맞춤형 인플란트 제작을 효율적으로 수행할 수 있게 할 것이라 생각된다. 따라서 본 연구에서는 Ti-6Al-4V 합금 소재를 적용하여 설계변수별 격자구조체를 제작하고 이에 대한 탄성계수를 측정하였으며 그 결과를 시뮬레이션과 비교하여 정확한 탄성계수 예측을 위한 유한요소해석 방안을 제시하였다.

1. 서론

타이타늄 합금은 높은 내식성 및 생체 친화적인 특성을 갖으며, 이에 따라 인체 삽입용 생체소재 및 임플란트 등의 재료로 널리 사용되고 있다[1-3]. 대표적 인체 삽입용 생체소재 적용 사례로는 손실부 대체 인공 뼈, 골절부 고정용 본 플레이트, 척추 고정기구 및 케이지

등이 있다. 이러한 사례의 경우, 금속 생체소재가 실제 뼈와 접촉된 상태로 인체 내부에 삽입되며 이에 따라 뼈와 유사한 기계적 물성 확보가 중요한 요소이다[4,5]. 뼈와의 물성차이가 존재할 경우, 식립 후 골밀도 저하(stress shielding)를 유발하게 된다고 알려져 있으며, 이를 방지하기 위해 타이타늄 생체소재를 높은 설계 자유도를 갖는 적층제조 공정을 통해 다차원 격자구조체로 제작하여 탄성계수를 낮추는 기술이 적용되고 있다[6,7].

이와 더불어, 임플란트에서의 격자구조는 인체 삽입 후 뼈와의 결합에 있어 크랙, 이탈 및 불안정성을 방지

[†]Corresponding author

E-mail: yhsong0105@kitech.re.kr

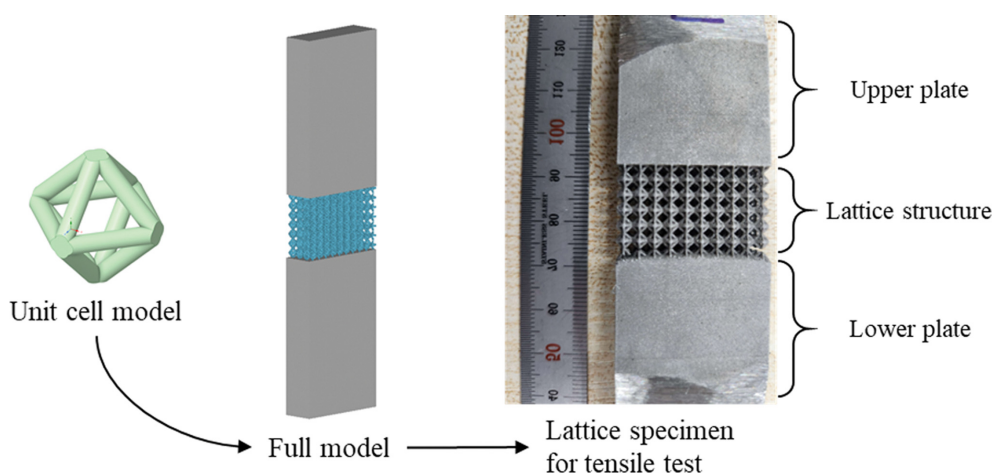


Fig. 1. Lattice structure modeling applied to tensile test.

Table 1
Design parameters for double pyramid lattice structure

Type	Parameter	Value						
Unit cell	Fill	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
	Length	3						
	Thickness	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
Full model	Fill	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9		
	Length	3						
	Thickness	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9		
Experiment	Fill	0.1	0.3	0.5	0.7			
	Length	3						
	Thickness	0.1	0.3	0.5	0.7			

하는 효과도 있는 것으로 알려져 있다[8]. 대퇴부 및 경골 표면부에 격자구조를 적용하여 인체에 삽입한 임상실험을 통해, 인공 재료와 뼈 사이의 골융합(osseointegration) 현상이 발생되어 두 대상물 간의 결합이 효과적으로 진행됨이 확인되었다.

앞서 언급한 바와 같이, 인체 삽입용 임플란트 분야에서의 격자구조의 활용이 활발히 이루어지고 있으며, 이에 따라 다양한 격자구조의 종류 및 설계변수에 따른 기계적 물성 데이터의 구축은 관련 산업 발달에 중요한 바탕이 될 것이라 판단된다[9-12]. 따라서 본 연구에서는 격자구조에 대한 다양한 설계변수에 따른 탄성계수의 영향을 유한요소해석과 실제 실험 데이터를 통해 분석하고 실제 값을 정확히 계산할 수 있는 시뮬레이션 방안을 모색하였다. 그 결과 격자구조 설계 변수의 조절을 통해 최소 2.29 GPa의 탄성계수를 갖는 격자구조 제작이 가능하였다. 또한 실제 시험 결과를 정확히 모사하는 시뮬레이션 방안을 모색하기 위해 unit cell 모델과 전체 모델을 활용한 유한요소해석을 각각 수행하였으며 전체 모델을 적용한 시뮬레이션이 높은 정확도로 탄성계수의 변화 추세를 예측함을 확인하였다.

2. 실험 방법

설계변수에 따른 격자구조의 탄성계수를 얻기 위해 Fig. 1과 같이 Double pyramid 타입의 격자구조를 설계하였다. 그림과 같이 유한요소해석은 하나의 unit cell을 적용한 시뮬레이션과, 전체 모델을 적용한 시뮬레이션을 통해 탄성계수 계산을 모두 진행하였으며, 각각의 결과를 실제 인장시험 결과와 비교하여 신뢰성 검증을 수행하였다. Unit cell에 대한 변형 시뮬레이션은 격자구조에 대한 재료물성을 간단하게 얻을 수 있는 방식이며, Ansys mechanical의 material designer 모듈을 통해 진행하였다.

Table 2
Process parameters for additive manufacturing

Parameter	Value
Powder	Ti-6Al-4V Grade 5
Power	279 W
Scan speed	1,117 mm/s
Layer thickness	0.05 mm
Hatch space	0.12 mm

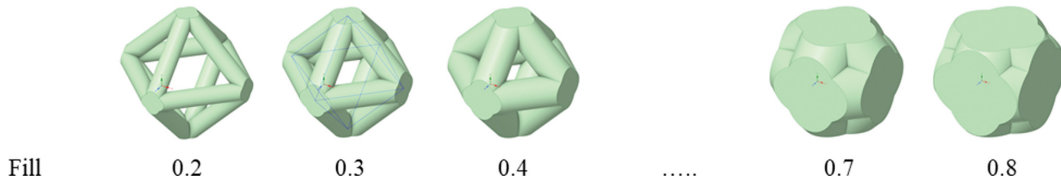


Fig. 2. Unit cell design according to design parameters.

전체 모델에 대한 도면은 double pyramid 타입의 unit cell을 $20 \times 30 \times 10$ mm 공간에 패턴화 하여 설계하였으며, 그림과 같이 격자구조를 중심으로 상, 하부에는 인장 시험기에 장착할 수 있도록 판상부를 적용하였다. 인장 시험편의 전체 크기는 $120 \times 30 \times 10$ mm으로 설계되었으며 이를 이용하여 시뮬레이션 수행 및 실제 인장시험 제작을 수행하였다.

Table 1은 격자구조 설계에 적용된 설계변수를 나타내고 있다. 설계변수는 채우기(fill), unit cell 크기(length) 그리고 strut의 굵기(thickness) 3가지가 존재하며 채우기 값과 unit cell의 크기가 정해지면 strut의 굵기가 자동으로 정해지게 된다.

인장시험을 위한 실제 인장시험편은 Lasertec(DMG MORI, Bielefeld, Germany) 장비를 사용하여 제작하였으며, Ti-6Al-4V 타이타늄 합금 소재가 적용되었다. 적층성형에 대한 공정 조건은 아래 Table 2와 같다. 제작된 격자구조 인장시험편은 590°C 에서 2시간 동안 진공열처리를 수행하여 파트 내부의 잔류응력 제거를 수행한

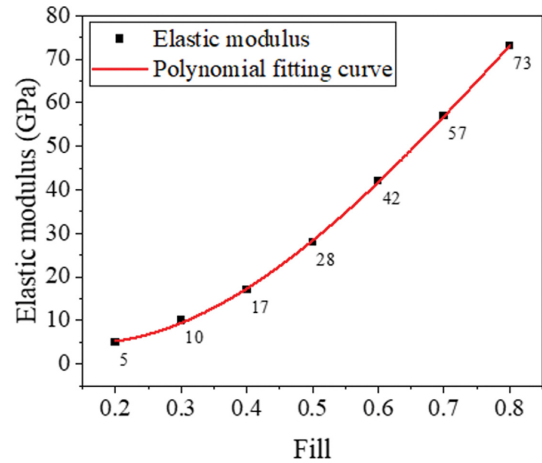


Fig. 3. Result of unit cell analysis according to design parameters.

뒤 인장시험을 수행하였다. 모든 인장시험은 상온에서 0.001 s^{-1} 속도로 진행하였으며, 변위는 인장시험기에 장착된 신율계(strain gauge) 값을 기준으로 하였다.

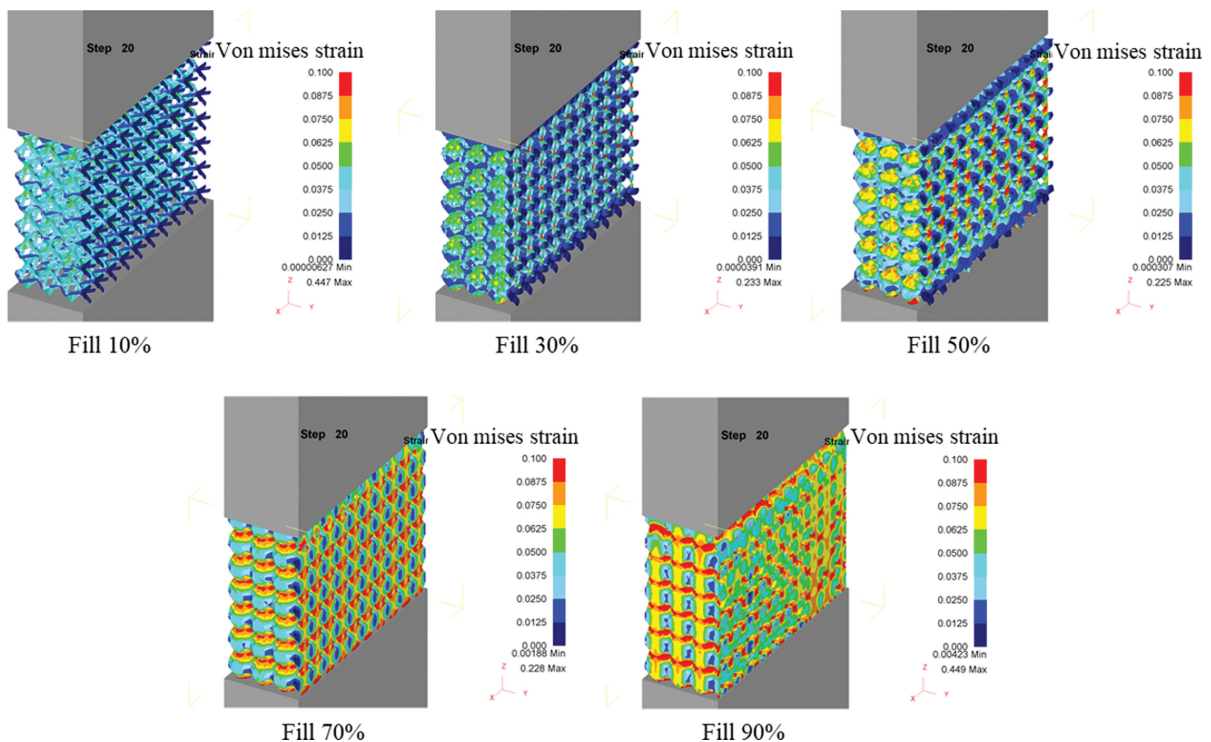


Fig. 4. Von Mises strain distribution at 1.68 mm displacement during full model analysis.

3. 결과 및 고찰

Figure 2는 unit cell에 대한 유한요소해석에 사용된 형상을 나타내고 있다. Unit cell 크기가 3 mm로 고정된 상태로 채우기 값이 증가될수록 strut의 굽기가 증가되면서 내부의 빈 공간이 줄어들어 가는 것을 확인할 수 있다. 채우기 값이 100%에 도달하게 되면 일반적인 solid 형태가 되며 탄성계수 또한 재료의 고유 물성치에 도달할 것임을 예상할 수 있다.

Unit cell에 대한 탄성계수 해석 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 채우기 값이 증가할 수록 탄성계수 또한 증가하는 경향이 확인되었으며, 비선형적인 증가 추세를 나타내었다. 유한요소해석을 수행하지 않은 구간에서의 탄성계수를 추론하기 위해 다항식 추세선(polynomial fitting curve)을 그래프에 함께 나타내었다.

전체 모델에 대한 유한요소해석을 진행하였을 때의 인장거리 1.68 mm에서의 변형량(Von mises strain) 분포 상태를 Fig. 4에 나타내었다. 그림과 같이, 동일한 인장

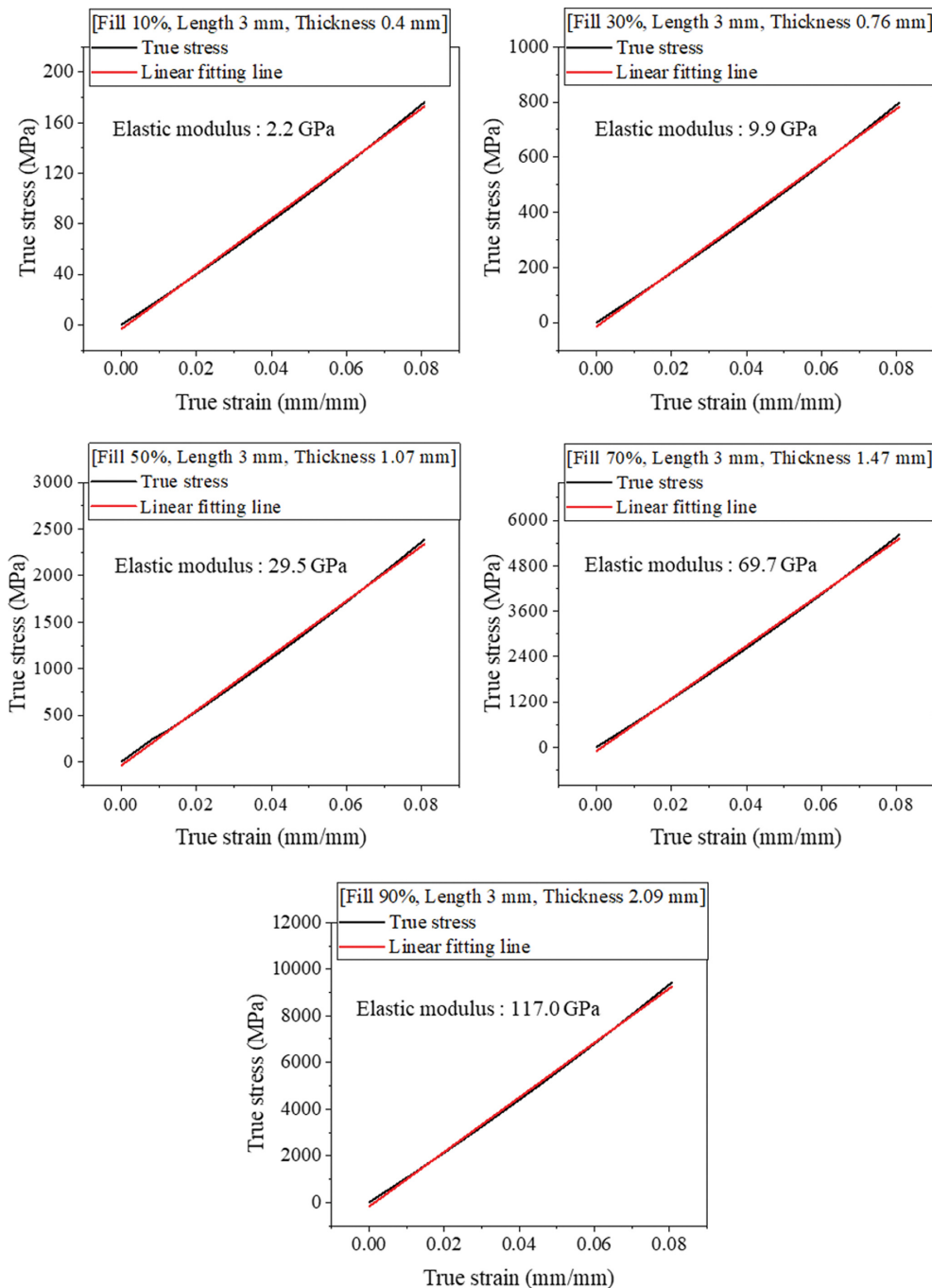


Fig. 5. Stress-strain curve calculated from full model analysis.

거리 조건에서 채우기 값의 차이에 의해 격자구조의 변형을 차이가 나타남을 알 수 있다. 채우기 값이 낮을 경우 격자구조 내의 변형을 또한 낮게 계산되며, 채우기 값이 증가함에 따라 격자구조의 변형률이 증가하는 특성을 보였다. 탄성구간에서의 변형률(ϵ)과 응력(σ)은 아래의 수식에 따라 비례관계를 갖기 때문에 채우기 값이 낮을수록 응력분포 또한 낮게 계산되며, 이에 따라 낮은 탄성계수(E)를 갖게 될 것임을 예상할 수 있다.

$$\sigma = E\epsilon \quad (1)$$

탄성계수는 인장거리 0에서 1.68 mm 구간에서의 변위-하중데이터를 활용하여 변형률-응력 선도를 구한 뒤 이에 대한 기울기 값을 통해 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 해석 결과, unit cell 결과와 동일하게 채우기 값이 증가함에 따라 탄성계수 또한 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 채우기 값이 30% 이하에서는 unit cell 해석을 통해 계산된 탄성계수보다 낮은 값이 계산되었으며, 50% 이상의 채우기 값에서는 unit cell 해석 결과보다 높은 탄성계수를 보였다. 이러한 경향 차이는 격자구조의 변형시 격자와 격자 간의 상호작용이 전체 모델 해석에서는 고려되지만, unit cell 모델 해석에서는 고려되지 않기 때문이라 판단된다.

위의 2가지 방식으로 계산된 탄성계수를 실제 인장시험을 통해 측정된 설계변수별 격자구조의 탄성계수와 비교하기 위해 인장시험을 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 앞서 언급한 바와 같이 실제 인장시험은 10, 30, 50 그리고 70%의 채우기 값을 적용한 격자구조에 대해 수행하였다. 그 결과, 해석과 동일하게 채우기 값이 증가할수록 인장시험을 통해 측정된 탄성계수 또한 증가하는 경향을 보였으며, 전체 모델을 적용한 해석 결과가 실제 인장시험의 결과를 더욱 유사하게 모사함을 확인할 수 있었다. 이는 변형중 각각의 unit cell간

의 상호작용이 탄성계수에 큰 영향을 준다는 것을 의미하며, 따라서 격자구조의 재료물성 시뮬레이션은 격자구조체 내부에 충분히 많은 unit cell을 적용하여 수행해야 함을 알 수 있다. 본 연구를 통해 격자구조의 설계변수에 따라 탄성계수를 최소 2.29 GPa까지 저감시킬 수 있음과 동시에 격자구조 설계변수별 해석 결과를 통해 필요한 물성을 갖는 격자구조에 대한 설계가 가능함을 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 격자구조의 설계변수에 따른 탄성계수를 유한요소해석을 통해 계산하고 실제 실험 데이터와의 비교를 통해 해석의 신뢰성을 검증하였다. 대상 소재로는 Ti-6Al-4V 타이타늄 합금을, 격자구조체로는 double pyramid 타입의 격자구조를 선정하였으며, 격자구조의 설계변수로는 채우기, unit cell 크기, 그리고 strut의 굵기를 선정하여 각각의 변수에 따른 탄성계수의 영향을 분석하였다. 유한요소해석 방식으로는 unit cell 모델과 전체 모델을 각각 수행하여 두 방식이 결과에 미치는 영향을 분석하였다.

그 결과 격자구조의 설계변수 조절을 통해 최소 2.29 GPa까지 탄성계수 조절이 가능함을 확인하였다. 또한 전체 모델을 적용한 해석은 변형중 각각의 unit cell간의 상호작용을 고려하여 계산을 진행함에 따라 unit cell 모델에 비해 실제 시험 결과를 정확하게 계산함을 확인하였다. 따라서 전체 모델을 적용한 유한요소해석을 통해 원하는 재료물성을 갖는 격자구조체의 설계가 가능함을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 한국생산기술연구원 기업수요기반생산기술 실용화사업(과제번호 JA230014)의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

References

- [1] K.P. Lee, K.M. Kim, S.H. Kang, J.H. Han and K.H. Jung, "Optimization for high speed manufacturing of ti64 alloy by a selective laser melting technique", J. Korean Cryst. Growth Cryst. 28 (2018) 217.
- [2] B. Liu, H. Wang, N. Zhang, M. Zhang and C.K. Cheng, "Femoral stems with porous lattice structures: a review", Front. Bioeng. Biotechnol. 9 (2021) 772539.
- [3] X.Z. Zhang, M. Leary, H.P. Tang, T. Song and M. Qian,

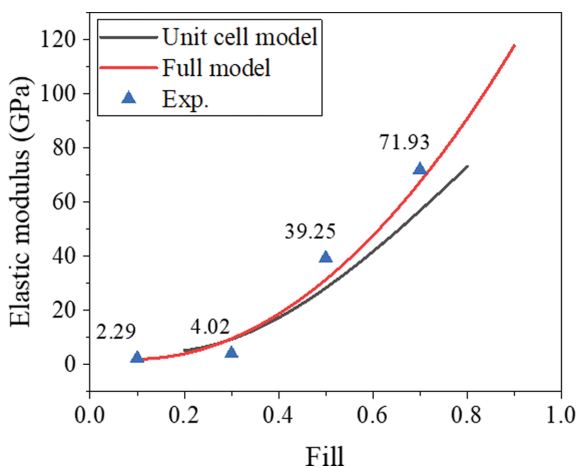


Fig. 6. Comparison between FEM and experiment results.

- “Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges”, *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci.* 22(3) (2018) 75.
- [4] L. Bai, C. Gong, X. Chen, Y. Sun, J. Zhang, L. Cai and S.Q. Xie, “Additive manufacturing of customized metallic orthopedic implants: Materials, structures, and surface modifications”, *Metals* 9 (2019) 1004.
- [5] D. Mahmoud and M.A. Elbestawi, “Lattice structures and functionally graded materials applications in additive manufacturing of orthopedic implants: a review”, *J. Manuf. Mater. Process.* 1 (2017) 13.
- [6] O. Bittredge, H. Hassanin, M.A. El-Sayed, H.M. Eldesouky, N.A. Alsaleh, N.H. Alrasheedi and M. Ahmadein, “d”, *Materials* 15 (2022) 3095.
- [7] A.A. Al-Tamimi, H. Almeida and P. Bartolo, “Structural optimisation for medical implants through additive manufacturing”, *Prog. Addit. Manuf.* 5 (2020) 95.
- [8] L.E. Murr, S.M. Gaytan, E. Martinez, F. Medina and R.B. Wicker, “Next generation orthopaedic implants by additive manufacturing using electron beam melting”, *Int. J. Biomater.* 2012 (2012) 14.
- [9] S. Bose, S. Vahabzadeh and A. Bandyopadhyay, “Bone tissue engineering using 3D printing”, *Mater. Today* 16 (2013) 496.
- [10] M. McGregor, S. Patel, S. McLachlin and M. Vlasea, “Architectural bone parameters and the relationship to titanium lattice design for powder bed fusion additive manufacturing”, *Addit. Manuf.* 47 (2021) 102273.
- [11] F. Distefano, R. Mineo and G. Epasto, “Mechanical behaviour of a novel biomimetic lattice structure for bone scaffold”, *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 138 (2023) 105656.
- [12] D. Mahmoud and M.A. Elbestawi, “Selective laser melting of porosity graded lattice structures for bone implants”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 100 (2019) 2915.