

복합 입체형 정육면체 트러스 단위구조체의 강도 및 강성에 대한 해석 연구

최정호
경남대학교 기계공학부 교수

A Study on the Strength and Stiffness of Multi-Stage Cubic Truss Unit Structures

Jeongho Choi

Assistant Professor, Kyungnam University, School of Mechanical Engineering

요 약 이 논문은 복합 입체형 트러스 단위구조체에 대한 강도 및 강성을 연구하였다. 사용된 모델은 카고메 모델과 정육면체 트러스 모델을 합한 core-filled 모델이다. 해석을 위해 사용한 재질 특성은 304 스테인레스 스틸로 탄성계수는 193GPa, 항복응력 215MPa이다. 이론식은 김슨-애쉬비의 상대탄성 관계식을 바탕으로 이론식을 유도하였고, 상용도구인 Deform 3D를 사용하여 해석을 실시하였다. 결론적으로 이 단위모델에 대한 상대탄성력은 상대밀도의 1.25배와 상수 계수값과 상관관계를 형성하고, 탄성은 기공과 반비례한다. 그리고, 상대압축강도는 상대밀도와 1.25배의 상관관계를 이룬다. 이에 대한 증명은 실제 실험을 해야 하겠으며, 유도한 이론 관계식은 굽힘과 좌굴등의 기계적 거동을 추가로 고려해야 한다. 앞으로 입체공간 구조에 따른 탄성 및 응력에 대해 지속적인 연구가 진행될 것이다.

주제어 : 트러스, 개방형 셀구조, 입방체, 샌드위치중심, 단위셀

Abstract This paper investigated the strength and stiffness of composite truss unit structures. The model used is a core-filled model combining the Kagome model and the cube truss model. The material properties used for the analysis are 304 stainless steel with elastic modulus of 193 GPa and yield stress of 215 MPa. The theoretical equation is derived from the relative elasticity relation of Gibson - Ashby ratio, the analysis was performed using Deform 3D, a commercial tool. In conclusion, the relative elasticity for this unit model correlates with 1.25 times the relative density and constant coefficient, elasticity is inversely proportional to pore size. The relative compressive strength has a correlation with relative density of 1.25 times. Proof of this is a real experiment, the derived theoretical relationship should further consider mechanical behavior such as bending and buckling. In the future, it is hoped that the research on the elasticity and the stress according to the structure of the three-dimensional space will be continued.

Key Words : Truss, Open Cell Structure, Hyper Cube, Sandwich Core, Unit cell

1. 서론

현대시대의 운송수단들 중 가장 중요한 핵심 고려사

항은 경량화이다. 즉, 재료의 경량화 또는 구조의 경량화 등 경량화에 대한 연구개발에 관심을 가지고 있으며, 가벼운 소재 개발이 굉장히 중요한 핵심 기술사항으로 여

*This work was supported by Kyungnam University Foundation Grant, 2018

*Corresponding Author : Jeongho Choi(choicaf@kyungnam.ac.kr)

Received January 11, 2019

Revised March 29, 2019

Accepted April 20, 2019

Published April 28, 2019

기고 있다.

경량화의 대표적인 형상은 벌집구조, 일명 허니콤 구조로서 현재 일반화되어 다방면에 적용되고 있는 구조가 대표적이다 [1-3]. 이 구조는 벌집형의 단위 형상을 반복적 연결을 통해 판재형태로 구성하여 샌드위치 판재의 코어에 적용하여 형성한 판재형 구조로서, 항공기나 선박 등 운송 분야의 재료 또는 건축이나 스포츠 장비 등의 다양한 분야에 사용되고 있기도 하다 [4-6].

허니콤 구조는 벌집형태의 단위셀 구조를 기본으로 형성된다. 즉, 샌드위치구조의 강도 및 강성은 단위셀의 강도 및 강성 연구를 기본으로 정의가 된다는 것이다, 예를들면, 생산업체들은 형상, 적용가능 재료들, 제조방법, 물성치 데이터, 최종 적용분야 등등 벌집형 단위셀을 기본으로 제작된 샌드위치 코어 구조의 연구 결과 및 다양한 적용가능 분야까지 제시하고 있다[6-9].

카고메 트러스구조[4]인 경우도 카고메 단위구조체에 대한 강도 및 강성이 정의된 후 다양한 분야에 적용되었다. Sypeck[10,11]은, 메탈와이어메쉬를 이용한 단위구조체를 개발하여 샌드위치구 코어 구조를 형성하여 강도 및 강성등을 연구하였다. 즉, 단위구조체의 에너지 흡수성이 뛰어난을 실제 시편제작과 실험을 통해 증명하였다. Wadley는 다양한 단위구조의 형상과 이론적인 기본개념, 샌드위치판넬구조로의 적용, 제작방법, 그리고 시험을 통한 장단점 등 기본개념부터 최종 시험평가 결과까지 전과정을 제시하였다[12]. 그 외 많은 연구자들이 샌드위치 판넬구조의 가장 기본이 되는 단위구조체에 대한 연구를 지속하고 있음. 즉, 단위구조체를 개발하여 기존의 샌드위치 판넬 구조보다 훨씬 더 우수한 샌드위치 판넬 구조를 개발하여 경량화 구조체로 의학의 뼈 대체, 항공기의 경량화, 선박의 방수 및 방음 등에 적용하여 효과성을 향상시키고자 한다[13-16]. 즉, 경량화구조로서 조선, 자동차, 항공, 의학, 전자, 전기 등 다방면에 적용가능한 가볍고 강한 샌드위치 판넬 구조를 개발하고자 하는 것이다. 최근들어 항공 산업에 관심이 많아지기 시작하면서, 드론이나 소형 무인기에 대한 연구, 항공기술의 융합성, 그리고 이음매가 없는 일체화에 대한 연구등 다방면으로 관심을 가지고 있으므로, 앞으로 경량화구조에 대한 관심이 증가할 것이며, 따라서 이런 경량화구조의 단위구조의 중요성이 강조 될 것으로 여겨진다[17,18,19].

이처럼 단위셀 구조의 형상 및 강도 강성에 대한 정의가 바탕이 되어야 충격흡수, 열차단, 소음진동 흡음, 생체

임플란트 등 여러 응용분야에 적용하여 사용가능성을 판단할 수 있으며, 또한, 항공기나 선박, 자동차등 샌드위치 구조를 적용하는 산업 등에 적용되어 새로운 샌드위치 구조 개발을 제안할 수 있다.

따라서, 이 논문은 기존에 발표하고 연구된 형상과는 다른 단위구조 형상을 정의하고, 강도와 밀도, 강성과 밀도의 상호 관계성을 찾고자 한다. 연구하고자 하는 단위 구조는 트러스를 기본으로 형성된 입체형 단위셀 구조로 core-filled unit model 로 명명하였고, 그림 1에 나타내었다.

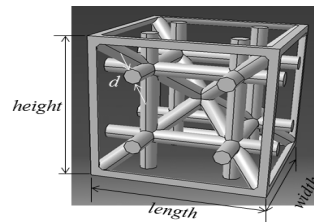


Fig. 1. Schematic unit model

2. 본론

2.1 이론식

이 논문에서 연구하고자 하는 단위모델의 기본모양을 Fig.1에 제시한 형상으로 Fig. 2의 두가지 모델을 합한 형상이다. 즉, Fig.2 (a)에 제시한 대각선을 이은 트러스 구조와 Fig.2(b)에 나타난 육각면 트러스 구조를 합한 형상이며, 이를 core-filled unit model 로 정의하였으며, Fig.1에 제시한 형상이다. 이 구조에 대한 이론적 상대 밀도식을 아래에 정의하였다. Fig.2 (1)는 대각선방향으로 트러스가 이어진 모델이다. 이 모델은 카고메 구조의 개념을 적용하였다. 우선 이 구조에 대한 상대밀도식은 이론적으로,

$$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) = \left(\frac{3}{4} + \sqrt{3}\right)\pi\left(\frac{d}{l}\right)^2 \quad (1)$$

이 된다. 여기서 ρ^* 는 전체부피를 중량으로 나눈 밀도값, ρ_s 는 적용한 재질에 대한 밀도값, d 는 트러스의 직경, 그리고, l 은 길이, 폭, 높이가 동일한 정육면체 구조의 단면 길이이다. 따라서, 카고메 구조 단위모델의 상대밀도는 전체부피당 무게의 비율을 이 구조에 사용하는 재질의 밀도로 나눈 것으로 사용하는 트러스 직경과 정육면체 단면의 길이 비율의 제곱에 비례한다.

Fig.2 (2)는 정육면체 트러스 구조로서 에쉬비-김슨 모델의 개념을 적용하였다[6,7]. 따라서, 정육면체 트러스 구조에 대한 상대 밀도식은

$$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) = 3\pi\left(\frac{d}{l}\right)^2 \quad (2)$$

이 된다. 즉, 정육면체 트러스 구조의 상대밀도는 전체 부피당 단위모델 무게의 비율, ρ^* , 과 사용한 재질 밀도, ρ_s , 의 비율이다. 따라서, 정육면체 트러스 구조의 상대밀도 비율은 직경과 단면 길이의 비율의 제곱과 비례한다.

그러므로, core-filled 단위모델은 카고메 단위모델과 정육면체 트러스 단위모델을 종합한 것으로서, 최종 상대밀도식은

$$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right) = \left(\frac{15}{4} + \sqrt{3}\right)\pi\left(\frac{d}{l}\right)^2 \quad (3)$$

이 된다. 이식을 기본으로 모델의 압축시험 해석을 통해 나타나는 결과와 비교분석하고자 한다.

2.2 해석

유한요소법을 적용한 모델의 압축시험 해석을 통해 강성을 확인하고자 한다. 모델 해석을 위해 사용된 재질은 AISI 304이다[20]. 이 재질은 탄성계수는 193GPa, 뺨아송비는 0.29, 밀도 8 g/cc, 최대인장력 505MPa, 항복응력 215MPa 이다.

해석경계조건은 아랫면이 고정된 상태를 정의하여 Rigid 상태를 의미한다. 따라서, 모델의 바닥면은 $R_x=R_y=R_z=0$, $F_x=F_y=F_z=0$ 로 정의한다. 여기서 R 은 회전을 의미하고, x, y, z 는 축방향을 의미한다. y는 수직방향이다. 그리고, 모델의 상단면 경계조건은 수직방향으로만 이동이 가능하다고 가정하여 $R_x=R_y=R_z=0$, $F_x=F_z=0$, $F_y=free$ 로 정의되었다. 해석에 사용하는 모델은 3가지로 구분하였다.

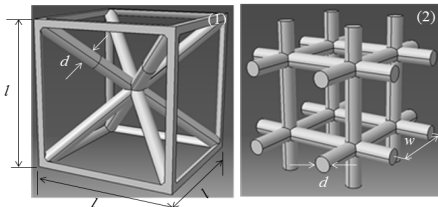


Fig. 2. Separated models: (1) diagonal truss model, (2) hexagonal truss model (d: diameter, w: space of truss, l: width, length, or height is equal defined as a regular hexahedron.)

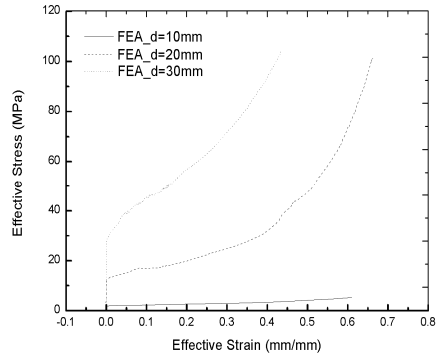


Fig. 3. Stress as a function of strain

즉, 외부 전체 부피는 고정된 상태로 트러스 직경만 10mm, 20mm, 30mm로 모델을 각각 제작하였다. 외부 전체 부피는 100mm x 100mm x 100mm 로 정의하였다. 따라서, 해석 결과, Fig.3 은 각 모델별 해석결과를 통해 확인한 stress-strain을 종합하여 나타내었다. 이 결과에 따르면, 고정된 부피에서 직경이 증가함에 따라 탄성계수인 Young's modulus, 항복응력과 plateau 상태, 그리고 densification 이 증가함을 확인하였다. 각 모델별 탄성계수를 Table 1 에 정리하였다.

Table 1. Relative elastic modulus and relative compressive yield strength

	d=10mm	d=20mm	d=30mm
E' (GPa)	1.83	11.76	27.74
E_s (GPa)	193	193	193
E'/E_s	0.009463	0.06096	0.14371
σ^* (MPa)	1.826	11.765	27.736
σ_s (MPa)	215	215	215
σ^*/σ_s	0.008495	0.05472	0.129

각 모델별 탄성계수값, E' , 은 후크의 법칙을 적용하여 직경이 10mm일 때 1.83GPa, 20mm일 때 11.76GPa, 30mm일 때 27.74GPa로 증가함을 확인하였다. 즉, 직경이 10mm에서 20mm로 증가함에 따라 84.47% 탄성계수가 증가함을 나타내었고, 직경이 20mm에서 30mm로 증가함에 따라 이론적으로 탄성계수가 57.58% 증가됨을 보였다.

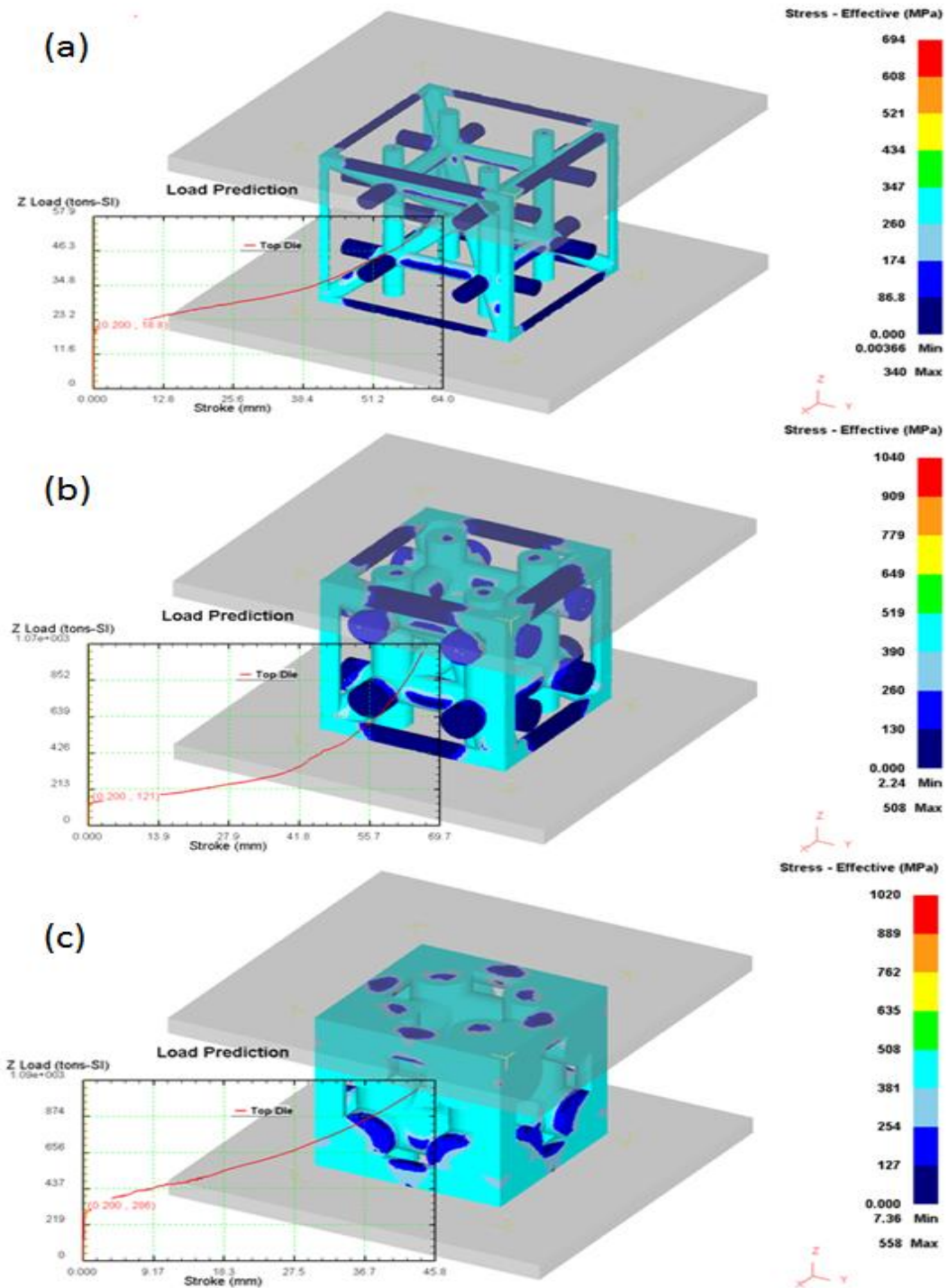


Fig. 4. Stress distribution for each model at yielding point (top, d=10mm; middle, d=20mm; bottom, d=30mm)

따라서, 상대탄성계수는 직경이 10mm, 20mm, 30mm 일 때, 0.009463, 0.06096, 0.14371로서 동일한 증가율을 보였다.

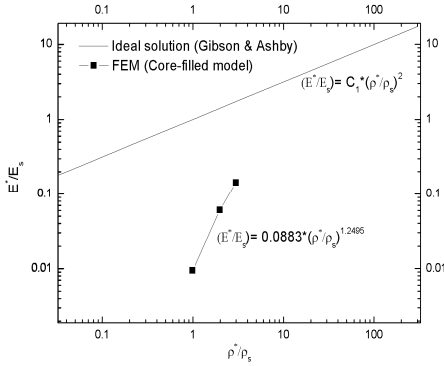


Fig. 5. Relative elastic modulus as a function of relative density

압축항복응력은 직경 10mm일때 1.826MPa, 20mm일 때 11.765MPa, 30mm일 때 27.736 MPa로 증가하였다. 즉, 직경이 10mm에서 20mm로 증가함에 따라 84.48% 압축강도가 증가함을 나타내었고, 직경이 20mm에서 30mm로 증가함에 따라 57.58% 증가됨을 보였다. 따라서, 상대압축항복강도는 직경이 10mm, 20mm, 30mm로 증가함에 따라, 0.008495, 0.05472, 0.129 로 동일한 증가율을 보였다. Fig.4는 해석을 통한 응력의 분포를 나타낸 것이다. Fig.4 (a)는 트러스직경이 10mm 인 경우이고, Fig.4 (b)는 트러스직경이 20mm, Fig.4 (c)는 트러스직경이 30mm 인 모델이고, 각 모델의 총 부피는 100mm x 100mm x 100mm로 모두 동일하다.

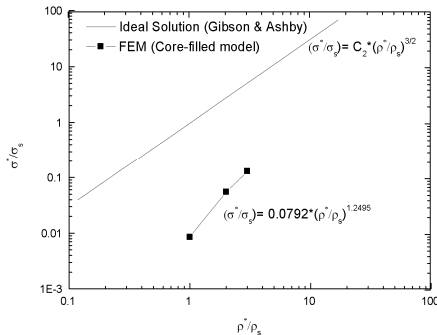


Fig. 6. Relative compressive yield strength as a function of relative density

따라서, 각 모델에 대한 응력분포를 확인해 본바, 응력 집중은 수직방향의 트러스에 작용하며, 중앙부위에 구성된 정육면체 트러스구조에는 응력분포가 예상보다 덜 일어남을 확인하였다. 또한, 트러스 직경과 기공률이 반비례관계를 형성하는 것을 확인하였다. 즉, 고정된 입체공간 부피에서 트러스의 직경만 커진다면, 기공률은 감소하고, 탄성과 압축강도는 증가함을 확인하였다.

이론식과 해석결과를 비교해 본 바, Fig.5는 상대탄성과 상대밀도의 상관관계를 나타내었고, Fig.6은 상대압축강도와 상대밀도의 상관관계를 나타내었다. 따라서, 로그-로그 로서 결과를 비교해 본 바, 해석을 통한 상대밀도와 상대탄성의 관계식은 Eq.(4)로 구성되며,

$$\frac{E^*}{E_s} = 0.0883 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1.2495} \quad (4)$$

상대밀도와 상대압축항복강도는 Eq.(5)로 구성되었다.

$$\frac{\sigma^*}{\sigma_s} = 0.0792 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{1.2495} \quad (5)$$

여기서, E*는 단위 구조체의 탄성계수, Es는 재료의 탄성계수, sigma*는 단위 구조체의 압축항복강도, sigma_s는 재료의 압축항복강도, rho*는 단위 구조체의 밀도, 그리고 rho_s는 재료의 밀도를 의미한다.

그러나, 해석결과와 유도한 이론식은 많은 차이를 보였다. 차이가 발생하는 이유를 확인해 본 바, 이론식에서 굽힘이나 좌굴등의 기계적 움직임등을 고려하지 않은 것이었다.

해석을 통해 단계별 모델의 응력분포 상태를 확인해 본 바, 굽힘과 좌굴이 일어난 경우가 Fig. 4(a)와 Fig. 4(b) 모델이었고, Fig. 4(c) 모델은 전체가 가득 채워져 있는 고체형의 응력분포를 보였다.

여기서 흥미로운 사실을 Fig. 4(c)에서 확인하였다. 즉, 제한된 부피 내에서 최소의 공간을 남겨둔 상태로 설계한 모델의 경우로서 탄성이 우수하게 나타남을 확인하였다.

따라서, 직경이 2배로 증가하면 탄성이 85% 증가하고, 직경이 3배로 증가하면 탄성이 94%로 증가됨을 확인하였다. 또한, 이 의미는 기공률과 탄성과의 상관관계도 형성되는 것을 의미하며, 이 분야에 대한 연구가 앞으로 추가적으로 필요하다.

3. 결론

이 논문은 복합 입체형 정육면체 트러스 단위 구조체의 강도와 강성에 대해 연구하였다. 이론식을 유도하고 해석을 통해 복합 입체형 트러스 단위 구조체에 대한 강성과 강도를 연구하였다.

적용한 모델은 카고메 모델과 정육면체 트러스모델을 혼합한 단위모델로 core-fill 모델로 정의하였고, 샌드위치 코어 구조에 PCS (periodic cellular structure)로 확장 가능한 모델이다.

이 연구를 통해 core-fill 단위모델은 겹손과 애쉬비가 제시한 세포성 다공질 구조의 강도 및 강성이 밀도와 상관관계를 이룬다는 이론이 타당하다는 것을 증명하였다. 그리고, 상대탄성은 상대밀도의 1.25배와 상관관계를 형성하고, 상대압축강도는 상대밀도와 1.25배의 상관관계를 이루는 것을 확인하였다.

앞으로 실제 복합입체형 정육면체 트러스 단위구조를 샌드위치 판재형에 적용하여 기계적 거동에 대한 연구를 해야 될 것으로 생각되며, 향후, 입체공간의 구조 형상에 따른 탄성력과 응력의 상관관계에 대해 지속적인 연구가 진행되어 새로운 경량화 구조체의 개발 및 발전이 지속 될 것이다.

REFERENCES

- [1] L. Wang, K. Saito, Y. Gotou & Y. Okabe. (2017). Design and fabrication of aluminum honeycomb structures based on origami technology, *Journal Sandwich and Materials*, 0(00), 1-19.
DOI : 10.1177/1099636217714646
- [2] K.P. Dharmasena, H.N.G. Wadley, Z. Xue & J. W. Hutchinson. (2008). Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading, *International Journal of Impact Engineering*, 35, 1063-1074.
DOI : 10.1016/j.ijimpeng.2007.06.008
- [3] A. J. Wang & D. L. McDowell. (2004). In-plane stiffness and yield strength of periodic metal honeycombs, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 126(2), 137 - 156.
DOI : 10.1115/1.1646165
- [4] J. Hwang. (2017). Application of seismic-sound Insulation Panel Using Kagome Truss Structure, *Review of Architecture and Building Science*, 61(3), 58-62.
ISSN : 1225-1666
- [5] M. F. Ashby, A. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson & J. W. Hutchinson, H.N.G. Wadley. (2002), Metal Foams: a design guide, *Materials & Design*, 23(1), 119.
DOI : 10.1016/s0261-3069(01)00049-8
- [6] L. J. Gibson & M. F. Ashby. (1999). *Cellular Solids-Structure and Properties*, Cambridge University Press.
DOI : 10.1002/crat.2170250912
- [7] L. J. Gibson, M. F. Ashby. & B. A. Harley. (2010), *Cellular Materials in Nature and Medicine*, Cambridge University Press.
ISBN 978-0-521-19544-7 hardback
- [8] Hexcel Corporation. (2016), *HexWeb Honeycomb Attributes and Properties*. Technical manual [Online].
<https://www.hexcel.com/Products/Honeycomb/>
- [9] R. Sterling. (2013). *Periodic cellular materials*. Technical manual [Online].
<http://www.cellularmaterials.net/>
- [10] D. J. Sypeck & H. N. G. Wadley. (2001), Multifunctional microtruss laminates: Textile synthesis and properties, *Journal of Materials Research*, 16(3), 890 - 897.
DOI : 10.1557/JMR.2001.0117
- [11] D. J. Sypeck. (2002, February). Constructed cellular metals-Processing and properties of lightweight cellular metals and structures. *proceedings of a symposium held during the 2002 TMS annual meeting in Seattle, Washington*, (pp. 35 - 45). USA : TMS
- [12] H. N. G. Wadley. (2006), Multifunctional periodic cellular metals, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 364(1838), 31 - 68.
DOI : 10.1098/rsta.2005.1697.
- [13] G. Zhang, B. Wang, L. Ma, J. Xiong & L. Wu. (2013), Response of sandwich structures with pyramidal truss cores under the compression and impact loading, *Composite Structures*, 100, 451 - 463.
DOI : 10.1016/j.compstruct.2013.01.012
- [14] M. R. M. Rejab & W. J. Cantwell. (2013), The mechanical behaviour of corrugated-core sandwich panels, *Composites Part B: Engineering*, 47, 267 - 277.
DOI : 10.1016/j.compositesb.2012.10.031
- [15] J. Choi & T. Chae. (2015), Effective stiffness and effective compressive yield strength for unit-cell model of complex truss, *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 11(1), 91 - 110.
DOI : 10.1007/s10999-014-9267-9
- [16] G. Zhang, B. Wang, L. Ma, J. Xiong & L. Wu. (2013),

- Response of sandwich structures with pyramidal truss cores under the compression and impact loading, *Composite Structures*, 100, 451 - 463 .
DOI : 10.1016/j.compstruct.2013.01.012
- [17] T. L. Nguyen & D. Han. (2017) Texture Mapping of a Bridge Deck Using UAV Images. *Journal of Digital Contents Society*, 18(6), 1041-1047.
DOI : 10.9728/dcs.2017.18.6.1041
- [18] S. Bae, D.Kwang & E. Park. (2015) The Study of the Aviation Industrial Technology Convergence through Patent analysis, *Journal of the Korea Convergence Society*, 6(5), 219-225
DOI : 10.15207/JKCS.2015.6.5.219
- [19] J. Kim, S. Ha & Y. Moon. (2017) A Study on Automatic Precision Landing for Small UAV's, *Industrial Application*, 7(3), 27-36
DOI : 10.22156/CS4SMB.2017.7.3.027
- [20] MatWeb. (2017). *304 stainless steel*. Material Property Data. [Online]
<http://matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da>

최 정 호(Choi, Jeong Ho)

[정회원]



- 2005년 5월 : 미국 엠브리리들 항공대학교 우주항공공학과(공학석사)
- 2010년 12월 : 호주 뉴사우스웨일즈 대학교 우주항공공학과(공학박사)

- 2017년 3월 ~ 현재 : 경남대학교 기계공학부 교수
- 관심분야 : 역학, 다공질구조, 복합재, 경량화구조
- E-Mail : choicaf@kyungnam.ac.kr