

Wire-woven Bulk Kagome 의 파손 메커니즘 분석

이병곤* · 최지은** · 강기주*** · 전인수†

Analysis of Failure Mechanism for Wire-woven Bulk Kagome

Byung-Kon Lee and Ji-Eun Choi , Ki-Ju Kang and Insu Jeon

Key Words : PCM(Periodic Cellular Metal; 규칙적 다공질 금속), Sandwich Plate(샌드위치 판재), Kagome truss(카고메 트러스), Ramberg-Osgood relation(람버그-오스굿 관계식)

Abstract

Lightweight metallic truss structures with open, periodic cell are currently being investigated because of their multi-functionality such as thermal management and load bearing. The Kagome truss PCM has been proved that it has higher resistance to plastic buckling, more plastic deformation energy and lower anisotropy than other truss PCMs. The subject of this paper is an examination of the failure mechanism of Wire woven Bulk Kagome(WBK). To address this issue, the out-of-plane compressive responses of the WBK has been measured and compared with theoretical and finite element (FE) predictions. For the experiment, 2 multi-layered WBK are fabricated and 3 specimens are prepared. For the theoretical analysis, the brazed joints of each wire in WBK are modeled as the pin-joint. Then, the peak stress of compressive behavior and elastic modulus are calculated based on the equilibrium equation and energy method. The mechanical structure with five by five cells on the plane are constructed is modeled using the commercial code, PATRAN 2005. and the analysis is achieved by the commercial FE code ABAQUS version 6.5 under the incremental theory of plasticity.

1. 서론

규칙적인 트러스로 구성되어 있는 트러스 PCM 은 다공질 금속의 일종으로 무게대비 강도 및 강성도가 허니컴 수준으로 높아 차세대 금속재료로서 주목 받고 있다. 대표적인 트러스 구조물로는 Fig.1 과 같이 피라미드(pyramid), 옥테트(octet), 카고메(Kagome)등이 제안되어 있다. 이 중에서 카고메 트러스 PCM 은 2003 년 Hyun⁽⁴⁾ 등에 의하여 제안된 구조물로서 Octet 에 비해 트러스 요소의 길이가 절반에 해당하므로 트러스 구조물의 주요 파괴모드인 좌굴에 대한 저항성이 좋고, 내부 공간 활용이 높고, 소성변형에너지가 높으며, 이방성

이 낮은 것으로 알려져 있다. Wang⁽⁸⁾ 등은 Hyun 이 제안한 Kagome 구조물을 인베스트먼트 주조법 (investment casting)으로 제작하여 압축, 전단, 벤딩 시험을 수행하여 같은 상대밀도에서 Kagome PCM 이 사면체 구조와 피라미드 구조보다 더 좋은 성능을 보임을 증명하였다. Lee⁽²⁾와 Kang 등은 최근에 와이어를 이용한 Wire bulk Kagome truss PCM 을 제안하였다. 와이어는 피아노선과 같이 쉽게 소재 자체를 강화하여 강도를 높일 수 있고, 손쉽게 제작을 할 수 있을 뿐 아니라, 와이어 표면과 내부에 높은 품질을 유지할 수 있는 장점이 있다. 또한 이 방법은 다층으로 만들 수 있다는 장점이 있다.

이 연구에서는 Lee 와 Kang⁽²⁾ 등이 제안한 Wire woven Bulk Kagome(WBK)의 압축 파손 특성을 살펴보는 데 있다. 첫째로, WBK 의 압축 최대 응력과 등가탄성계수를 이론식을 통해 예측하였다. 둘째로, 압축실험을 수행하였고 실험 결과를 이론식과 유한요소해석 결과와 비교하였다. 셋째로, 압축시 파손 거동을 분석하였다.

* 전남대학교 대학원 기계공학과
** 전남대학교 자동차연구소
*** 회원, 전남대학교 기계시스템공학부
† 회원, 전남대학교 기계시스템공학부
E-mail : i_jeon@chonnam.ac.kr
TEL : (062)530-1688 FAX : (062)530-1689

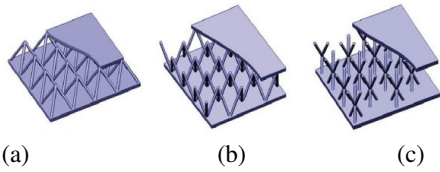


Fig. 1 a) Pyramid truss PCM b) Octet truss PCM c) Kagome truss PCM

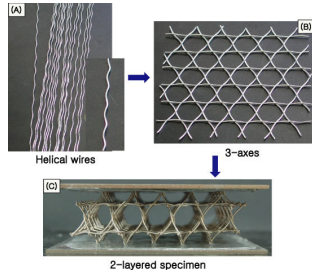


Fig. 2 Photographs showing manufacturing process of WBK

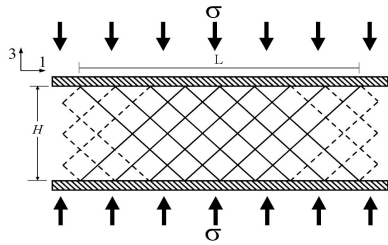


Fig. 3 Sketch of a Wire woven Bulk Kagome core sandwich plate under out-of-plane compression.

2. 제작

시편의 제작은 Lee 와 Kang⁽²⁾의 논문에서 제시한 방법으로 제작되었다. 시편의 중간층 와이어와 상하면판 모두의 제작에 사용된 재료는 SUS 304이다. 와이어의 직경은 $d=0.78\text{mm}$ 이고 트러스 요소의 길이는 $a=8.1\text{mm}$, 상하 면판의 두께는 3mm 이다. 제작 과정은 Fig. 2에 나타내었다. (A)와 같이 직선 와이어를 비틀림기계(Twisting Machine)을 이용하여 Helical wire를 만든다. 다음은 (B)에서처럼 연속된 와이어를 이용하여 3 방향으로 Kagome 평면을 제작하여 평면 사이에 $2\sqrt{6}a/3$ 의 높이 차이를 주고 위치시킨 후, (C)에서 와 같이 나머지 3 방향으로 조립하여 중간층을 제작하였다. 노드(node)부의 접합을 위해서 브레이징 공정을 실행하였다. 브레이징 페이스트(NICROBRAZE, LM-S)를 노드부에 도포한 다음 진공도 $10^{-4}\sim 10^{-5}\text{torr}$ 의 진공로에서 930°C 에서 15분 동안 유지시킨 후 1040°C 에서 15분을 유지시킨다. 압축 시편의 경우 시험 중 수평방향 미끄러짐을 막아주고,

안정적인 압축실험을 위하여 에폭시를 이용하여 상하면에 면판(face sheets)을 접착하였다. 압축시편의 총 길이는 $L=89\text{mm}$, $W=80\text{mm}$, 중간층의 높이 H_c 는 27이다. Fig.2의 (C)는 실제 제작된 2층 시편으로, 3개를 제작하여 상하면판(face sheet)을 부착하였다.

3. 이론해석

3.1 탄성계수(Elastic Modulus)

WBK의 상대 밀도(relative density), 즉 단위셀이 차지하는 전체내부 부피(ρ_s)에 대한 트러스가 차지하는 부피(ρ_c)의 비, ρ_{rel} 는 식 (1)과 같다.

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{core}}{\rho_s} \quad (1)$$

실험에 사용된 WBK의 상대밀도는 약 1.7%이다. Fig. 3은 실제 시편을 이론 해석을 위해 도식화한 그림이다. 양쪽 면판에 모두 닿는 와이어는 실선으로, 한쪽 면판에만 닿는 와이어는 점선으로 나타내었다. Zupan⁽³⁾등이 제안한 이론식을 적용하기 위해서, 양쪽 면판에 맞닿는 와이어는 σ 를 받게 되지만, 한쪽 면판에만 닿는 와이어에는 하중이 전달되지 않는다고 가정한다(lower bound analysis). 등가탄성계수를 구하기 위해서 식(2)와 같이 Energy Method를 사용하였다.

$$\frac{1}{2} \frac{\sigma_e^2}{E_e} LWH = N \frac{\sigma_s^2}{2E_s} \frac{\pi d^2 a}{4} \quad (2)$$

여기서, σ_s , σ_e 는 각각 와이어 소재의 항복응력과 등가응력을 나타내고, N은 상하면판 모두에 맞닿는 길이 a의 strut의 개수이다.

Fig.4의 3방향으로의 힘의 평형 방정식을 적용해보면, 식(3)와 같이 σ_e 와 σ_s 의 관계를 얻을 수 있다.

$$\sigma_e = \sigma_s \frac{N}{LWH} \frac{\pi d^2}{6} a \quad (3)$$

이식을 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 등가 Young 계수를 얻을 수 있다.

$$E_e = E_s \frac{N}{LWH} \frac{\pi d^2}{9} a \quad (4)$$

여기서 E_e 와 E_s 는 각각 등가 Young 계수와 와이어 소재의 Young 계수를 나타낸다.

3.2 최대압축응력

트러스 요소 양단을 핀 조인트로 이상화하고, 직선 와이어로 가정하면, 탄성좌굴에 의한 임계하중은⁽¹¹⁾ 다음과 같다.

$$\sigma_{elastic} = \frac{k^2 E_s \pi^2 r^2}{4a^2} \quad (5)$$

Kagome truss PCM 의 최대 압축 응력(maximum compressive stress)은 중간층 좌굴에^(4,13) 의해 좌우된다. 트러스를 구성하는 재료가 변형경화 재료이면 소성좌굴에 의한 임계하중은 Shaely-Engesser tangent modulus 이론에⁽¹⁴⁾ 의해 식(5)의 E_s 를 E_t 로 대체하면 식(6)으로 나타내어진다.

$$\sigma_c = \frac{k^2 E_t \pi^2 r^2}{4a^2} \quad (6)$$

여기서, E_t 는 인장시험의 응력-변형률 그래프에서, 임계하중 σ_c 에서의 기울기인 $E_t = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$ 로 정의되어진다. σ_c 를 구하기 위하여, Real⁽¹²⁾등의 논문에서 제시한 수정된 Ramberg-Osgood 관계식을 사용하였다. 이 식에서는 항복점을 기준으로 두 구간으로 분리하여 응력 변형률 곡선을 표현하였다. 각각의 Ramberg-Osgood 관계식이 식 (8)과 식 (9)이다. Fig.4는 SUS304 재료의 인장시험 결과와 Ramberg-Osgood 관계식을 도시한 그래프이다. 실선으로 나타낸 부분이 인장시험의 응력-변형률(stress-strain)곡선이고, 점선이 Ramberg-Osgood 관계식이다. Fig.5의 곡선들로부터 수정된 Ramberg-Osgood 관계 곡선이 인장시험 곡선을 정확히 표현하고 있음을 확인 할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E_0} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{14.3} \quad \sigma \leq \sigma_{0.2} \quad (8)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \epsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^{1.2} + \epsilon_{0.2} \quad \sigma > \sigma_{0.2} \quad (9)$$

여기서 E_0 , $E_{0.2}$ 는 재료의 Young 계수, 0.2% offset 한 변형률에서의 Young 계수이다. 식 (8)에서, α 는 단순히 0.2% offset 한 값 0.002로서 상수로 대입하여 $n=14.3$ 의 값을 얻을 수 있었다. 식 (9)에서는 식 (7)의 α 값에 대응하는 ϵ_u 값을 찾아 대입하였고, $m=1.2$ 의 값은 시행 착오법으로 구하였다. Deshpande⁽¹³⁾ 등이 제시한 σ_c (bifurcation stress)를 구하기 위해 식 (6)을 식 (9)식에 대입하면 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{\pi r}{2l} \right)^2 = \frac{\sigma_c - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \epsilon_u \left(\frac{\sigma_c - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^{1.2} + \epsilon_{0.2} \quad (10)$$

여기서, $r=0.39\text{mm}$, $l=8.1\text{mm}$, $\epsilon_u=0.1233$, $\sigma_{0.2}=193\text{MPa}$, $E_{0.2}=16.8\text{GPa}$, $\epsilon_{0.2}=0.003132$ 이다. 각각 대입하여 풀어주면 $\sigma_c=204\text{MPa}$ 를 얻을 수 있다. 최대 압축응력 σ_{peak} 는 식(3)에 σ_s 대신에 σ_e , σ_e 대신에 σ_{peak} 를 대입하여 구할 수 있다.

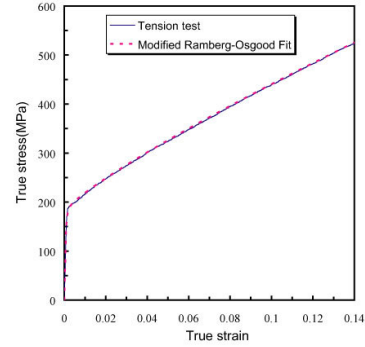


Fig. 4 The tensile stress/strain response of the Sus304 material, showing the Ramberg-Osgood fit.

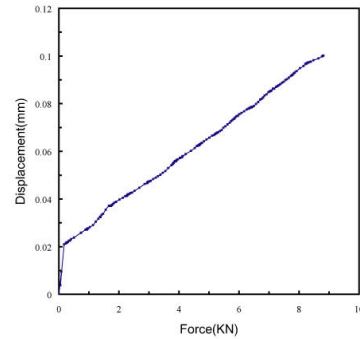


Fig. 5 Machine compliances of a load cell

4. 실험

4.1 인장시험

WBK의 중간층 제작에 사용된 SUS304 wire의 인장시험과 샌드위치 시험편의 압축시험은 SATEC TC-55 전기 유압식 시험기를 이용하여 수행하였다. 브레이징 과정에서 풀림 처리된 SUS304 판재를 대상으로 인장시험을 하였다. WBK의 물성치 파악을 위해, 직경 $d=0.78\text{mm}$ 인 wire 시험편에 기준길이(gage length)가 25mm인 변위계(extensometer)를 부착하여 0.01mm/sec 변위제어로 인장하였다. Fig.4는 인장시험의 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 항복 강도(0.2% offset)는 193 Mpa이고 Young 계수는 170 GPa이다.

4.2 Machine compliance

압축시험을 하는 동안 정확한 시험편의 변위량을 구하기 위해서는 Strain gage, Extensometer가 필요하다. 그러나, Wire wove Bulk Kagome의 표면조건이나 구조상의 약점 때문에 위의 것을 가지고 측정하는 것은 매우 어렵다. 실제로, 압축시험으로 얻어지는 변위 데이터는 식(11)과 같이 시험편의 변위량과 테스트 기계의 변위량의 합이다.

$$\delta_R = \delta_s + \delta_c \quad (11)$$

여기서, δ_R , δ_S , δ_C 는 각각 측정된 변위량과, 시편의 변위량, 기계의 변위량(machine compliance)를 나타낸다. 그러므로, 시편의 정확한 변위량을 구하기 위해서는 전체 변위량에서 테스트 기계의 변위량을 빼줘야 한다. Fig.5 은 테스트 기계의 machine compliance 를 보여주고 있다.

4.3 압축실험

압축실험은 0.01mm/sec 의 속도로 변위 제어하여 수행하였다. 시간의 따른 시편의 형상 변화는 디지털 카메라에 의해 기록됐다. 모든 실험에서 등가탄성계수를 구하기 위하여 Unloading, Reloading 을 수행하였다.

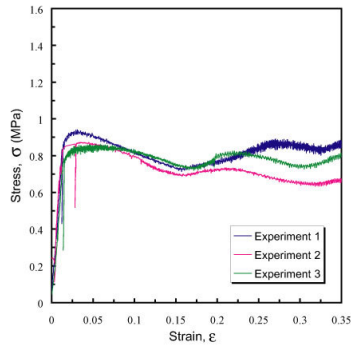


Fig. 6 The compressive stress-strain curves for the 2 layered specimens

5. 유한요소해석

본 연구에서는 실험에서 수행한 결과와 실제 파손 메커니즘을 규명하기 위하여 실제시편(Fig. 2)과 같은 형상을 범용 구조해석 소프트웨어인 PATRAN 2005 로 해석모델을 만들었고 ABAQUS ver 6.5 로 유한요소해석을 수행하였다.

Fig. 7 은 실험에서 사용된 시편의 형상을 모사한 유한요소해석 모델을 나타내고 있다. 해석모델은 크게 시편과 시험기로 구분되며 시편은 상하면판과, 와이어와 와이어 접합부인 브레이징부로 이루어지는 중간층으로 구성된다. 와이어 부분은 원형인 와이어의 형상을 정밀하게 묘사하였고 브레이징부와 분리하여 형상을 묘사하였다. 와이어와 브레이징부 모두 15 절점 솔리드 요소(solid element)(C3D15)로, 묘사하였고 총 59,936 개의 요소와 222,875 개의 절점을 갖는다. 와이어와 상하면판의 재료물성은 시편제작에 사용된 SUS304 로서, 인장실험에서 구한 탄성계수 $E=170\text{GPa}$ 과 항복응력 $\sigma_y=193\text{MPa}$ 및 항복 후 응력-변형률 곡선을 대입하였으며, 점진소성이론(incremental theory of plasticity)을 적용하였다. 포아송의 비(poisson's

ratio)는 $\nu=0.3$ 으로 취하였다.

실제의 압축실험과 유사한 모사를 위하여 상하면판과 상하 압축지그의 접촉면은 contact 조건을 적용하였고 상부 실험기는 앞뒤, 상하, 좌우방향을 고정하였으며, 하부 실험기는 실험과 유사하게 Z 방향으로 15%변위를 주었다.

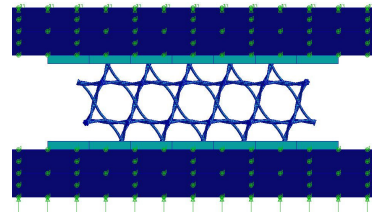


Fig. 7 The finite element models of compression model

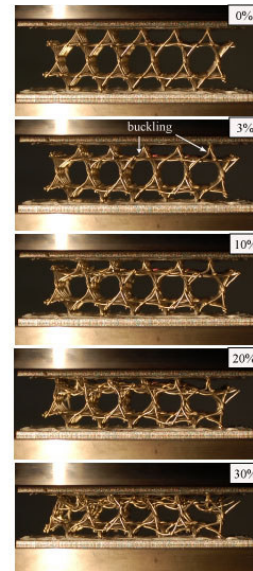


Fig. 8 Photographs showing the deformation characteristics of the WBK at plastic strains of 0,3,10,20,30%

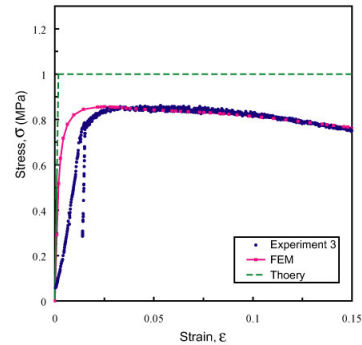


Fig. 9 Comparison with compression response of experiment, FEA and theory

6. 결과 및 토론

6.1 압축시험 결과

Fig. 6 은 2 층으로 구성된 3 개의 WBK 시편의 압축 시험 결과 곡선이다. 실험 곡선을 살펴 보면, 초기에 탄성구간, 항복 후 변형률이 약 3%인 구간에서 최대압축응력을 지나, 최대압축응력의 75%까지, 완만한 기울기로 감소함을 볼 수 있다. 시편제조 공정상의 결함과 WBK의 특성(비어있는 구조)으로 인해, 실험 결과 곡선에서 약간의 흠트럼(scatter)이 관찰되었다. Fig.8의 0%에서의 시편의 사진을 보면, 상하 면판에 맞는 스트러트(strut)가 비대칭이므로, 변형률 약 15%에서, 왼쪽, 오른쪽 끝에 있던 스트러트(strut)가 시계방향으로 회전을 하여 상하면판에 닿음으로써, 압축응력이 다시 증가하는 것을 볼 수 있었다. 최대압축응력에는 영향을 미치지 않지만 최대압축응력 이후의 거동에 영향을 미치는 것을 확인 할 수 있었다.

6.2 최대압축응력 이론 해석 결과

WBK의 최대압축응력은 식 (10)에서 구한 σ_c 의 값을 식 (3)에 대입하여 구하였다. 실험에 사용된 2 층 시편에서는 상하 면판에 닿는 와이어의 개수(N)가 46 개이다. 2 층 시편의 단면적 A는 Fig. 4 에서와 같이 상판에 닿는 노드(node)의 면적으로서 $A = 32\sqrt{3}a^2$ 을 사용하였다. 이론(Shanley-Engesser theory)에 의해 얻어진 2 층의 σ_{peak} 의 값은 1MPa 이다.

6.3 등가탄성계수

이론 등가탄성계수의 값은 식 (4)식에 와이어의 개수(N), 면적(A)를 대입하여 구하였다. 실험에서는 등가탄성계수를 구하기 위하여 Unloading 을 실시하였다. 이론식에 의해 구해진 등가 Young 계수의 값은 559MPa 이고, 실험에 의해 구해진 값은 Table. 1 에 나타냈다.

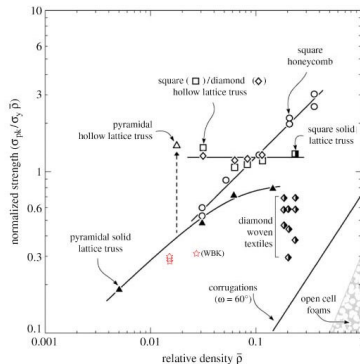


Fig. 10 Normalized Strength variation with relative density for cellular metals

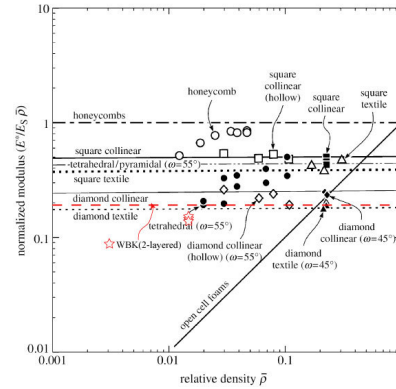


Fig. 11 Normalized stiffness(modulus) variation with relative density for cellular metals

6.4 유한요소해석 결과

Fig.9 의 붉은점을 잇는 선은 압축거동을 해석한 결과를 나타낸다. 초기에는 양쪽 면판에 닿은 스트러트(strut)에서부터 응력이 발생하여 한쪽 면판에 닿는 스트러트(strut)로 응력이 전달된다. 변형률 2.5%에서 최대압축응력이 발생하며 실험과 유사한 값인 0.86Mpa 얻었다. 변형률 3%부근에서부터 스트러트(strut)은 시계방향으로 회전을 하면서 변형하며 실험의 결과에서와 같이 15%이후 부터는 상하면판과 접촉이 일어 나게 된다. 변형률 15%까지 기계적 거동은 실험과 매우 유사한 거동을 나타냄을 확인할 수가 있었다.

6.5 토론

Table 1 은 본 연구에서 실시한 이론, 실험, 유한 요소해석 결과를 비교한 표이다. 압축 실험 결과, 최대압축응력이, 이론에서 구한 값과 실험값이 약 -11%의 차이를 보였다. 등가탄성계수의 값은 이론에서 구한 값과 약 34.78% 정도의 차이를 보였다. 이러한 원인은, 이론에서 구한 등가탄성계수는 직선 트러스 요소로 가정하였지만, 실제 실험용 시편은 헬릭스(helix)로 구성되어 굴곡효과 때문으로 판단되고, 상하면판(face sheet)을 브레이징 접합이 아닌 에폭시(epoxy)를 사용한 접합으로 추정하고 있다. 유한요소해석 결과를 보면, 최대압축응력값이 실험값에 비해 3.5%낮게 측정되었고, 등가탄성계수의 값도 18% 낮게 측정되었지만, 실험 결과를 잘 묘사함을 확인할 수 있었다. Fig.9,10 은 다공질 금속의 상대 밀도에 따른 무차원화된 압축강도와, 강성(Elastic modulus)를 비교하는 그래프이다. 여기에서 WBK 는 Pyramidal core 보다 같은 상대 밀도(relative density)에서 약간 낮은 무차원 강도를 가짐을 볼 수 있다. 그러나, 피라미드 구조 (5)는

최대 압축응력 이후의 거동이 불안정하지만, Fig.6의 실험 곡선처럼, WBK는 비교적 안정적인 거동을 한다. 또한 피라미드 구조는, 1층으로만 제작할 수 있지만, WBK는 다층으로 제작이 가능하고, 제작 방법 또한 수월하다는 장점이 있다.

	Compression	
	σ_{peak} (MPa)	E_e (MPa)
Predicted (A)	1	559
Exp. 1	0.94	384
Exp. 2	0.87	291
Exp. 3	0.86	419
Average(B)	0.89	364.6
FEA(C)	0.86	309
(B-A)/B	-11%	-34.78%
(B-C)/B	3.5%	18%

Table 1 Maximum compression stress & modulus estimated by Eqs. (3) to (10) in comparison with the results measured and estimated by analytic solution

7. 결론

본 연구에서는 Wire woven Bulk Kagome(WBK)의 압축파손과 최대압축응력과 등가탄성계수를 실험, 이론해석, 유한요소해석을 통하여 알아보았다. 실험에서 얻어진 값과 이론 해석, 유한요소해석을 비교해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) WBK을 이루는 각 strut들을 양단에 핀 조인트를 갖는 이상적인 트러스 요소로 가정하여, 최대압축응력을 Shanley-Engesser theory로 예측하였는데, 실험값과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

(2) 유한요소해석 결과가 실험 결과를 잘 묘사함을 확인할 수 있었고, 차후 거시적 혹은 미시적 거동의 예측에 유효한 수단으로 사료된다.

(3) WBK는 최대 압축응력 이후에서 스트러트(strut)의 소성 좌굴에 의해 파손이 일어남을 확인할 수 있었고, 안정적인 거동을 함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 국가지정연구실사업(R0A-2006-000-10249-0)지원을 받아 수행하였습니 다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Ki-Ju Kang, Ji-Hyun Lim, Seong-Jun Nah and Man-Hoe Koo, 2005, "Compressive and Bending Behavior of Sandwich Panels with Octet Truss Core Fabricated from Wires," *J. of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.A-29, pp.470~476
- (2) Yong-Hyun Lee, Ji-Eun Choi, InSu Jeon, Ki-Ju Kang, 2007, "A new method to fabricate bulk PCMs from continuous wires and the mechanical behaviors", *J. of the Korean Society of Mechanical Engineers* Vol.A-31, pp 245~252
- (3) Zupan, M., Deshpande, V.S., Fleck, N.A., 2004, "The out-of-plane compressive behaviour of woven-core sandwich plates", *Euro J Mech A/Solids*, Vol. 23, pp.441~421
- (4) S. Hyun, A. M. Karlsson, S. Torquato and A. G. Evans, 2003, "Simulated Properties of Kagome and Tetragonal Truss Core Panel," *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 40, pp.6989~6998
- (5) F. W. Zok, S. A. Waltner, Z. Wei, H. J. Rathbun, R. M. McMeeking and A.G. Evans, 2004, "A Protocol for Characterizing the Structural Performance of Metallic Sandwich Panels: Application to Pyramidal Truss Cores," *International J. of Solids and Structures*, Vol.41, pp.6249-6271.
- (6) D. J. Sypeck and H. N. G. Wadley, 2001, "Cellular Metal Truss Core Sandwich Structures," *Proceedings of the 2nd International Conference on Cellular Metals and Metal Foaming Technology (MetFoam 2001)* edited by J. Banhart, M. F. Ashby, N. A. Fleck, pp.381~386.
- (7) Insu Jeon, Tadashi Asahina, 2005, "The effect of structural defects on the compressive behavior of closed-cell Al foam", *Acta Materialia*, Vol. 53, pp.3415-3423.
- (8) J. Wang, A. G. Evans, K. Dharmasena and H. N. G. Wadley, 2003, "On the performance of truss panels with Kagome cores", *Int. J. Solids and Structures*, Vol 40, pp 6981-6988
- (9) Haydn N. G. Wadley, Norman A. Fleck and Anthony G. Evans, "Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures", *Composites Science and Technology*, Vol. 63, pp 2331-2343
- (10) Douglas T. Queheillalt and Haydn N.G. Wadley, 2005, "Pyramidal lattice truss structures with hollow trusses", *Materials Science and Engineering A*, vol.1397, pp 132-137
- (11) Ugural, A.C. & Fenster, S.K., 2003, "Advanced Strength and Applied Elasticity, 4th Ed", Preutice-Hall, pp.406
- (12) E.Real, E. Mirambell, 2003, "Discussion of "full-range stress-strain curves for stainless steel alloys", *J. Constructional Steel Research*, Vol.59, pp. 47-61
- (13) V.S. Deshpande, N.A. Fleck, 2001, "Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending", *Int J. of solids and structures*, V.38, Pages 6275-6305