

<학술논문>

Wire-woven Bulk Kagome 의 압축 특성 분석

이병곤* · 최지은** · 전인수† · 강기주***
(2007년 10월 1일 접수, 2007년 11월 20일 심사완료)

Analysis of Compressive Characteristics of Wire-woven Bulk Kagome

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

Key Words : PCM(Periodic Cellular Metal; 규칙적 다공질금속), WBK(Wire-woven Bulk Kagome; 3차원 직조 카고메), Modified Ramberg-Osgood relation(수정 램버그-오스굿 관계식), Compressive Characteristics(압축특성), FEM(Finite Element Analysis; 유한요소해석)

Abstract

Periodic cellular metals (PCMs) are actively being investigated because of their excellent specific strength and stiffness, and multi-functionality such as a heat disperse structure bearing external loading. The Kagome truss PCM has been proved that it has higher resistance to plastic buckling and lower anisotropy than other truss PCMs. In this paper, the out-of-plane compressive responses of the WBK specimens have been measured, theoretically predicted and numerically analyzed. Three specimens of two-layered WBK are fabricated and tested for measuring the responses. The peak stress of compressive behavior and effective elastic modulus are predicted based on the equilibrium equation and elastic energy conservation. Moreover, the structure of the specimen is modeled using the commercial mesh generation code, PATRAN and the finite element analysis for the model under the compression is carried out using the commercial FE code, ABAQUS. Finally, the obtained results are compared with each other to analyze the compressive characteristics of Wire-woven Bulk Kagome (WBK).

1. 서론

규칙적인 트러스 구조로 이루어져 있는 트러스 PCM 은 다공질 금속의 일종으로 무게대비 강도 및 강성도가 허니컴 수준으로 높아 차세대 금속재료로서 많은 주목을 받고 있다. 대표적인 트러스 구조물로는 Fig.1 과 같이 피라미드(pyramid), 옥테트(octet), 카고메(Kagome)등이 제안되어 있다.⁽¹⁻⁷⁾ 이 중에서 카고메 트러스 PCM 은 2003 년 Hyun 등⁽⁶⁾ 에 의하여 제안된 구조물로서 옥테트에 비해 트러스 요소의 길이가 절반에 해당하므로 트러스 구조물의 주요 파괴모드인 좌굴에 대한 저항성이

좋고, 내부 공간 활용이 높고, 이방성이 낮은 것으로 알려져 있다. Wang 등⁽⁷⁾은 Hyun 등⁽⁶⁾이 제안한 카고메 구조물을 인베스트먼트 주조법(investment casting)으로 제작하여 압축, 전단, 굽힘 시험을 수행하여 같은 상대밀도에서 카고메 PCM 이 사면체 구조와 피라미드 구조보다 더 좋은 성능을 보임을 증명하였다. 최근에 Lee 등^(8,9)은 카고메 PCM 의 제작방법을 획기적으로 개선시킨, 와이어를 주 재료로 이용하는 Wire-woven Bulk Kagome (WBK) 트러스 PCM 의 제작 방법을 제안하였다. 와이어는 열처리 등을 통하여 소재 자체를 강화하여 쉽게 강도를 높일 수 있고, 와이어들의 조립을 통하여 손쉽게 다층의 구조의 PCM 재료를 제작할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 Lee 등^(8,9)이 제안한 WBK 의 압축 특성을 살펴보는 데 있다. 먼저, WBK 의 최대 압축 응력(Peak stress)과 등가탄성계수(Effective elastic modulus)를 이론식을 통해 계산한다. 그리고, 압축시험을 수행한 후, 실험으로부터 얻어낸 결과

† 책임저자, 회원, 전남대학교 기계시스템공학부
E-mail : i_jeon@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-1688 FAX : (062)530-1689

* 전남대학교 대학원 기계공학과

** 전남대학교 자동차연구소

*** 전남대학교 기계시스템공학부

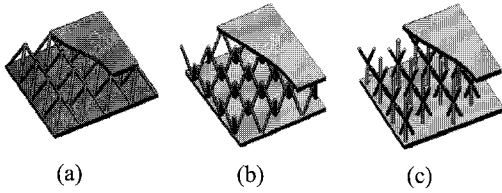


Fig. 1 (a) Pyramid (b) Octet (c) Kagome truss PCM

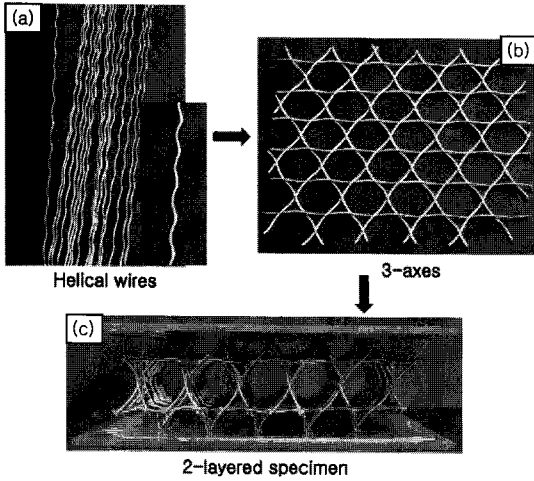


Fig. 2 Brief Introduction of manufacturing process of WBK

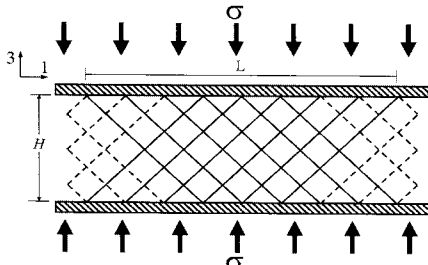


Fig. 3 Sketch of a sandwich plate with WBK core under out-of-plane compression

를 이론식과 유한요소해석의 결과와 비교한다. 마지막으로 압축하중하의 시편의 변형 상태를 관찰함으로써 WBK의 압축 파손 거동을 분석한다.

2. 제작

시편의 제작은 Lee 등^(8,9)의 논문에서 제시한 방법으로 제작되었다. 시편의 중간층 와이어와 상하 면판 모두의 제작에 사용된 재료는 SUS 304이다. 와이어의 직경 $d=2r=0.78\text{mm}$ 이고 트리스 요소의 길이는 $a=8.1\text{mm}$, 상하 면판 (face sheet)의 두께는

3mm 이다. 간략한 제작 과정의 소개를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)와 같이 먼저 직선의 와이어를 비틀림 기계 (Twisting Machine)를 이용하여 나선의 와이어로 만든다. 그런 다음 Fig. 2(b)에서와 같이 연속된 나선의 와이어를 이용하여 면내 3 방향으로 카고메 평면을 제작한다. 각각의 평면을 면외 방향으로 $2\sqrt{6}a/3$ 의 높이 차이를 두고 위치시킨 후, Fig. 2(c)에서와 같이 면외의 3 방향으로 와이어를 각각 조립하여 WBK 중간층을 제작한다. 와이어와 와이어가 교차하는 노드 (node)부의 접합을 위해서 브레이징 공정을 실시한다. 브레이징 페이스트 (Nicobraz, LM-S)를 노드 부에 도포한 다음 진공도 $10^{-4}\sim 10^{-5}\text{torr}$ 의 진공로에서 930°C 에서 15분 동안 유지 시킨 다음 1040°C 에서 15분을 유지 시킨다. 압축 시편의 경우 시험 중 수평방향 미끄러짐을 막아주고, 안정적인 압축실험을 위하여 에폭시를 이용하여 상하면에 면판을 접착하였다. 압축시편의 총 길이는 $L=89\text{mm}$, $W=80\text{mm}$, 중간층의 높이는 $H=27\text{mm}$ 이다. Fig. 2(c)는 제작된 2층 시편으로, 총 3개의 시편을 제작한 후 상하 면판을 부착하여 압축실험을 실시하였다.

3. 이론해석

3.1 탄성계수(Elastic Modulus)

WBK의 상대 밀도(relative density), 즉 셀들이 차지하는 전체부피의 밀도, ρ_s 에 와이어 재료의 밀도, ρ_{core} 의 비, ρ_{rel} 는 다음과 같다.

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

실험에 사용된 WBK의 상대밀도는 약 1.7%이다. Fig. 3은 실제 시편에 대한 이론적 해석을 위해 WBK의 측면을 도식화 한 모델이다. 양쪽 면판에 모두 닿는 와이어는 실선으로, 한쪽 면판에만 닿는 와이어는 점선으로 나타내었다. Zupan 등⁽⁴⁾과 Lee 등⁽⁹⁾이 제안한 이론식을 적용하기 위해서, 양쪽 면판에 맞닿아 있는 와이어는 외부하중, σ 를 받게 되지만, 한쪽 면판에만 닿아 있는 와이어에는 하중이 전달되지 않는다고 가정한다. 등가탄성계수를 구하기 위해서 이 모델에 대해 탄성 에너지 보존을 적용하였다.⁽⁹⁾

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

여기서, σ_s , σ_c 는 각각 와이어 소재의 항복응력과 등가응력을 나타내고, N은 상하면판 모두에 맞닿는 길이 a 의 스트러트(Strut)의 개수이다.

Fig. 3의 3 방향으로 힘의 평형 방정식을 적용해 보면, 다음과 같이 σ_e 와 σ_s 사이의 관계를 얻을 수 있다.⁽⁹⁾

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

이 식을 식 (2)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 등가 탄성계수를 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 탄성계수와 와이어의 탄성계수를 나타낸다.

3.2 최대압축응력

트러스 요소 양단을 핀 조인트로 이상화하고, 직선 와이어로 가정하면, 탄성 좌굴에 의한 임계 하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

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

카고메 트러스 PCM의 최대 압축 응력은 중간층 좌굴에 의해 좌우된다.⁽²⁾ 트러스를 구성하는 재료가 변형경화 재료이면 소성 좌굴에 의한 임계하중은 Shanley-Engesser tangent modulus 이론⁽¹¹⁾에 의해 식 (5)의 E_s 를 E_t 로 대체하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, E_t 는 인장시험의 응력-변형률 그래프에서, 임계하중 σ_c 에서의 기울기인 $E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ 로 정의된다.

임계하중 σ_c 를 구하기 위하여, Rasmussen⁽¹²⁾이 제시한 수정된 Ramberg-Osgood 관계식을 사용하여 와이어 재료의 응력 변형률 곡선에 대한 피팅을 실시한다. 이 식에서는 항복점을 기준으로 두 구간으로 분리하여 응력 변형률 곡선을 표현하였고 각각의 Ramberg-Osgood 관계식은 다음과 같이 나타낸다.⁽¹²⁾

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad \sigma \leq \sigma_{0.2} \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \varepsilon_u \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^m + \varepsilon_{0.2} \quad \sigma > \sigma_{0.2} \quad (8)$$

여기서 E_0 , $E_{0.2}$ 는 재료의 Young 계수, 0.2% offset 한 변형률에서의 탄성계수이다. 식 (7)에서, α 는 단순히 0.2% offset 시의 변형률 값 0.002로서 상수로 대입하여 $n=14.3$ 의 값을 얻을 수 있었다. 식 (7)에서는 식 (8)의 α 값에 대응하는 ε_u 값을

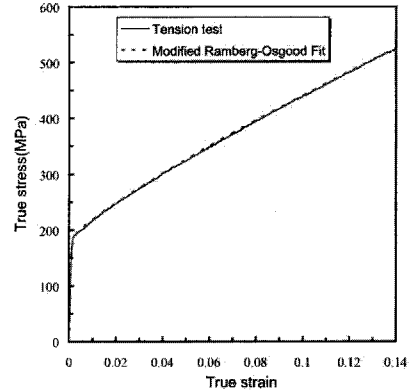


Fig. 4 The tensile stress-strain response of the SUS304 wire and its modified Ramberg-Osgood fit

찾아 대입하였고, $m=1.2$ 는 시행 착오법으로 구하였다.

식 (6)을 식 (8)식에 대입하면 다음과 같은 임계 하중 σ_c 를 구하기 위한 식을 얻을 수 있다.^(2,9)

$$\left(\frac{\pi r}{2l} \right)^2 = \frac{\sigma_c - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \varepsilon_u \left(\frac{\sigma_c - \sigma_{0.2}}{\sigma_u - \sigma_{0.2}} \right)^{1.2} + \varepsilon_{0.2} \quad (9)$$

여기서, $r=0.39\text{mm}$, $l=8.1\text{mm}$, $\varepsilon_u=0.1233$, $\sigma_{0.2}=193\text{MPa}$, $E_{0.2}=16.8\text{GPa}$, $\varepsilon_{0.2}=0.003132$ 이다. 이 값들을 각각 식 (9)에 대입하여 풀어주면 $\sigma_c=204\text{MPa}$ 를 얻을 수 있다. 최대 압축응력 σ_{peak} 는 식 (3)에 σ_s 대신에 σ_c , σ_e 대신에 σ_{peak} 를 대입하여 구할 수 있다.

4. 실험

4.1 와이어의 인장실험

WBK의 변형거동에 대한 수치해석을 실시하기 위하여 먼저 WBK의 중간층 제작에 사용된 SUS304 와이어에 대한 인장 실험을 SATEC TC-55 전기 유압식 실험기를 이용하여 수행하였다. 특히, 브레이징 과정에서 풀림 처리된 SUS304 와이어를 사용하여 인장실험을 하였다. 직경 $d=0.78\text{mm}$ 인 와이어 시편에 기준길이(gage length)가 25mm인 변위계(extensometer)를 부착하여 0.01mm/sec 변위 제어로 인장하였다.

Fig. 4는 인장실험의 응력-변형률 곡선을 나타내고 있다. 0.2% offset 항복 강도는 193 Mpa 이고 탄성계수는 170 GPa 를 얻을 수 있었다. 또한 Fig. 4에서는 와이어의 인장실험의 응력-변형률(stress-

strain) 곡선을 수정된 Ramberg-Osgood 관계식을 이용하여 커브피팅한 곡선도 함께 나타내었다. Fig. 4의 곡선들로부터 수정된 Ramberg-Osgood 관계식이 인장 실험 곡선을 정확히 표현하고 있음을 확인할 수 있다.

4.2 WBK 시편의 압축실험

WBK 시편에 대한 압축실험 역시 SATEC TC-55를 이용하여 실시하였다. 실험은 0.01mm/sec의 속도로 변위 제어하여 수행되었고, 시간의 따른 시편의 형상 변화는 디지털 카메라에 의해 기록됐다. 모든 실험에서 등가탄성계수를 구하기 위하여 하중의 제하와 재 부하를 수행하였다.

4.3 Machine Compliance

WBK 시편에 대한 압축시험을 하는 동안 정확한 시편의 변위량을 구하기 위해서는 스트레인 게이지(Strain gage) 또는 변위계가 필요하다. 그러나, WBK 시편의 표면 형상으로 인해 이와 같은 변위계로 변위량을 측정하는 것은 거의 불가능하다. 그러므로 시편의 정확한 변위량을 측정하기 위해서는 기계 자체의 변위량을 고려하여야 한다. 실제로, 압축 실험으로 얻어지는 변위 데이터는 시편의 변위량과 테스트 기계의 변위량의 합이다.⁽¹³⁾

$$\delta_R = \delta_s + \delta_c \quad (10)$$

여기서, δ_R , δ_s , δ_c 는 각각 측정된 변위량과, 시편의 변위량, 기계의 변위량을 나타낸다. 그러므로, 시편의 변위량은 전체 변위량에서 테스트 기계의 변위량을 빼준 값이다. 본 연구에서는 이와 같은 계산을 통하여 시편의 변위량을 얻어내었다. Fig. 5은 테스트 기계의 Machine compliance를 보여주고 있다.

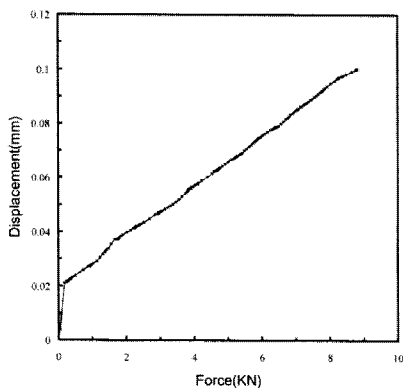


Fig. 5 Machine compliances of the test machine

5. 유한요소해석

본 연구에서는 WBK의 압축 특성을 분석하기 위하여 실제시편[Fig. 2(c)]과 동일한 형상의 모델을 범용 유한요소 생성 소프트웨어인 PATRAN으로 제작하고 범용 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAQUS를 사용하여 해석을 수행하였다.

Fig. 6은 실험에서 사용된 WBK 시편의 형상을 모사한 3차원 유한요소해석 모델을 나타내고 있다. 해석모델은 크게 시편과 시험기의 압반으로 구분되며 WBK 시편은 상하 면판과, 와이어, 그리고 와이어와 와이어 간의 접합부인 브레이징부로 이루어지는 중간층으로 구성된다. 와이어 부분은 나선의 원통형인 형상을 정밀하게 모사하였고 브레이징부는 와이어와 분리하여 그 형상을 모사하였다. 와이어와 브레이징부 모두 15절점 3차원 솔리드 요소(3D solid element)를 사용하였고, 총 59,936개의 요소와 222,875개의 절점으로 구성되었다. 와이어와 상하 면판, 그리고 브레이징부의 기계적 재료물성치는 시편 제작에 사용된 SUS304의 물성치로서, 인장실험에서 구한 탄성계수 $E=170\text{GPa}$ 과 항복응력 $\sigma_{0.2}=193\text{MPa}$ 및 항복 후 응력-변형률 곡선을 이용한 소성거동을 사용하였으며, 점진소성이론(Incremental theory of plasticity)을 적용하여 문제를 풀어내었다. 포아송의 비(Poisson's ratio)는 $\nu=0.3$ 으로 취하였다.

실제의 압축실험과 유사한 모사를 위하여 준정적인 하중 상태를 가정한 후 implicit 풀이 방법을 적용하였고, 또한 상하 면판과 상하 압반의 접촉면은 마찰이 없는 면 대 면 접촉조건(Frictionless surface to surface contact condition)을 적용하였고 상부 압반에는 앞뒤, 좌우 그리고 면외방향을 고정하였으며, 하부 압반에는 실험과 유사하게 앞뒤, 좌우를 고정하고 면외 방향으로는 15%의 변형률을 발생시키는 변위를 가하였다.

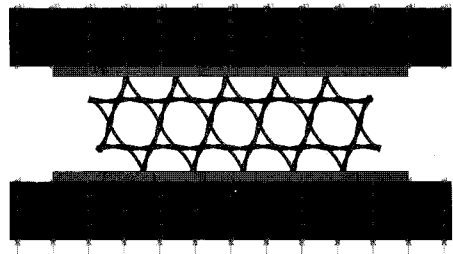


Fig. 6 The finite element model under the compression

6. 결과 및 토론

6.1 압축시험 결과

Fig. 7 은 준비된 3 개의 2 층 WBK 시편에 대한 압축 시험 결과 곡선들이다. 실험 곡선을 살펴 보면, 시편으로부터 측정되는 응력은 초기의 탄성영역을 나타내고, 변형률이 약 3%인 구간에서의 최대압축응력을 지나, 최대압축응력의 75%까지, 완만한 기울기로 그 값이 감소함을 확인할 수 있다. 시편 제조 과정으로부터 발생하는 WBK 시편의 결함들에 의해 세 개의 응력 변형률 곡선들이 약간의 편차 존재하나 비교적 서로 유사한 형상을 보여줌을 알 수 있었다.

Fig. 8 에는 압축 시험 시 변형률의 증가에 따르는 시편의 변형 형상들을 나타내었다. 이 그림들은 시편에 하중이 전달되기 전인 0% 변형률 상태에서의 시편 형상으로부터, 시편을 구성하는 대부분의 스트러트가 소성붕괴(plastic collapse) 되어 있는 30% 변형률 상태의 시편 변형형상까지 각각의 변형률에 대한 시편의 변형상태를 보여주고 있다. 특이한 사항은 최대압축응력이 발생하는 3% 변형률 지점에서 몇 개의 스트러트에 소성 좌굴(plastic buckling)이 발생하고 있는 점이다. 이와 같은 현상은 결국, WBK의 시편에 하중이 작용할 경우 스트러트의 소성 좌굴에 의해 시편의 최대압축응력이 결정되고, 또한 이러한 소성 좌굴로부터 시편 자체의 소성 붕괴가 발생함을 예측할 수 있게 한다. 또한 Fig. 8 에서는 시편의 구조상, 상하 면판에 맞닿는 스트러트가 비대칭이므로, 약 15% 변형률 상태에서, 왼쪽과 오른쪽 끝에 위치하는 스트러트들이 시계방향으로 회전하며 변형하여 상하 면판에 닿음으로써, 압축 응력이 다시 증가하는 현상을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 최대압축응력에는 영향을 미치지 않지만 최대압축응력 이후의 거동에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

6.2 최대압축응력의 계산 결과

WBK의 최대압축응력은 식 (9)에서 구한 σ_c 의 값을 식 (3)의 σ 대신에 대입하여 계산하였다. 실험에 사용된 2 층 시편에서는 상하 면판에 닿는 와이어의 개수(N)가 총 46 개이다. 2 층 시편의 단면적 A 는 Fig. 4 에서와 같이 상판에 닿는 노드(node)의 면적으로서 $A = 32\sqrt{3}a^2$ 을 사용하였다. 그러므로 이와 같은 계산을 통하여 얻어진 σ_{peak} 의 값은 1MPa 이다.

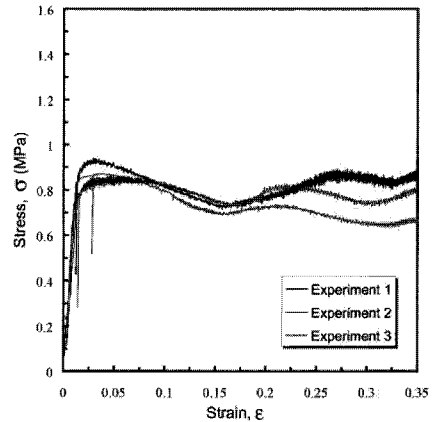


Fig. 7 The compressive stress-strain curves for two-layered specimens

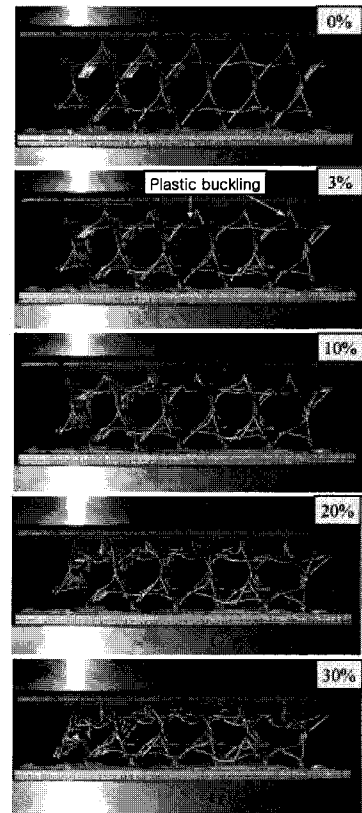


Fig. 8 Deformation of the WBK at the strain of 0, 3, 10, 20, 30%

6.3 등가탄성계수

이론 등가탄성계수의 값은 식 (4)에 와이어의

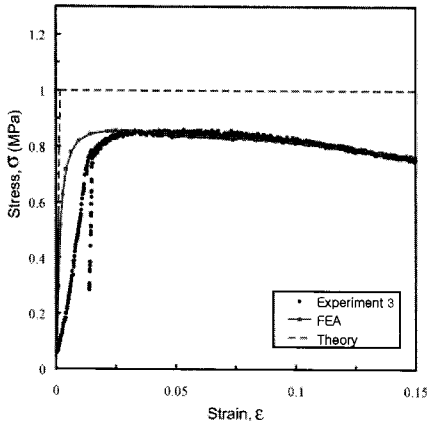


Fig. 9 Comparison of the compressive response obtained from experiment, FEA and theoretical prediction

개수(N), 면적(A)를 대입하여 구하였다. 실험에서는 등가탄성계수를 구하기 위하여 하중의 제하를 실시하였다. 계산에 의해 구해진 등가 탄성계수의 값은 559MPa 이고, 실험에 의해 구해진 값은 Table 1 에 나타내었다.

6.4 유한요소해석 결과

Fig. 9 에는 이론적으로 예측한 최대압축응력값과 실험을 통하여 얻은 결과 그리고 유한요소 해석을 통하여 얻어낸 결과들을 함께 나타내었다. 약 2.5% 변형률 상태에서 최대압축응력이 발생하며 실험과 유사한 값인 0.86Mpa 얻었다. 변형률 3%부근에서부터 스트러트는 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, 유한요소해석 결과를 비교한 표이다. 압축 실험 결과, 최대압축응력의 경우, 계산을 통하여 구한 값과 실험값이 약 -11%의 차이를 보였다. 등가탄성계수의 경우는 약 34.78% 정도의 차이를 보였다. 이러한 원인은, 계산으로부터 구한 등가탄성계수는 직선 트러스 요소로 가정하였지만, 실제 실험용 시편은 나선형태로 구성되어 있기 때문으로 판단되고, 상하 면판(face sheet)을 브레이징 접합이 아닌 에폭시(epoxy)를 사용하여 접합하였기 때문으로 추정된다.

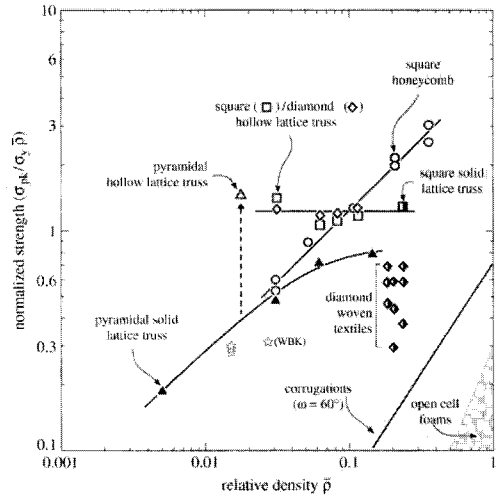


Fig. 10 Normalized Strength variation with relative density for cellular metals

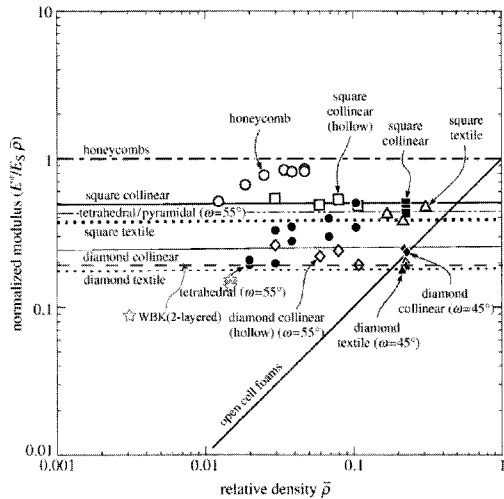


Fig. 11 Normalized stiffness variation with relative density for cellular metals

유한요소해석 결과를 보면, 최대압축응력값이 실험값에 비해 3.5% 낮게 계산되었고, 등가탄성계수의 값도 18% 낮게 계산되었지만, 실험 결과를 잘 모사함을 확인할 수 있었다. Fig. 10, 11 은 다공질 금속의 상대 밀도에 따른 무차원화된 압축강도와, 강성 (Elastic modulus)를 비교하는 그래프이다. 여기에서 WBK 다른 PCM 재료에 비해 같은 상대밀도 (relative density)에서 비교적 낮은 무차원 강도와 강성을 가짐을 확인할 수 있다. 그러나, 다른 PCM 재료들은 최대 압축응력 이후의 변형거동에 있어 응력이 급격히 저하되는 것과 같은 불

Table 1 The peak stress and effective elastic modulus predicted by Eqs. (3) to (10) in comparison with the results measured and obtained from FEA

	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%

안정성을 보이지만, WBK의 경우 Fig. 7의 실험 곡선처럼 비교적 안정적인 최대 압축응력 이후의 거동을 보여준다. 또한 열처리와 같은 과정을 통하여 와이어 소재에 대한 강도를 증가시키면 이와 같은 WBK의 강도 및 강성의 증가를 쉽게 유도할 수 있으며, 다른 PCM 재료의 경우 단층으로만 제작할 수 있으나, WBK는 다층으로의 제작이 가능하고, 제작 방법 또한 수월하다는 큰 장점이 있다.

7. 결론

본 연구에서는 WBK 시편의 압축특성을 실험, 이론적 계산 그리고 유한요소해석을 통하여 분석해 보았다. 본 연구를 통하여 얻은 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) WBK를 이루는 각 스트러트들을 양단에 핀 조인트를 갖는 이상적인 트러스 요소로 가정하여, 최대압축응력을 Shanley-Engesser 이론으로부터 예측하였고, 실험값과 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

(2) 유한요소해석 결과가 실험 결과를 잘 모사함을 확인할 수 있었고, 차후 거시적 혹은 미시적인 WBK의 변형거동의 예측을 위한 유효한 수단으로 활용될 것으로 판단 된다.

(3) WBK는 각각의 스트러트들의 소성 좌굴로부터 최대 압축응력이 결정되고 그 이후 이러한 소성 좌굴에 의해 전체 시편의 소성 붕괴가 발생됨을 확인할 수 있었고, 최대압축응력 이후에는 비교적 안정적인 변형거동을 보임을 확인할 수 있었다.

후기

이 논문은 2006년도 전남대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Deshpande, V.S., Fleck, N.A. and Ashby, M. F., 2001, "Effective Properties of the Octet-Truss Lattice Material," *J. Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 49, pp. 1747~1769.
- (2) Deshpande, V. S. and Fleck, N. A., 2001, "Collapse of Truss Core Sandwich Beams in 3-Point Bending," *Int J. of solids and structures*, Vol. 38, pp. 6275~6305.
- (3) Chiras, S., et al., 2002, "The Structural Performance of Near-Optimized Truss Core Panels," *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 39, pp. 4093~4115.
- (4) 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.
- (5) Queheillalt, D. T. and Wadley, H. N. G., 2005, "Pyramidal Lattice Truss Structures with Hollow Trusses," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 397, pp. 132~137.
- (6) Hyun, S., Karlsson, A. M., Torquato, S. and Evans, A. G., 2003, "Simulated Properties of Kagome and Tetragonal Truss Core Panel," *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 6989~6998.
- (7) Wang, J., Evans, A. G., Dharmasena, K. and Wadley, H. N. G., 2003, "On the Performance of Truss Panels with Kagomé Cores," *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 6981~6988.
- (8) Lee, Y. H., Choi, J. E., Jeon, I. and Kang, K. J., 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.
- (9) Lee, Y. H., Lee, B. K., Jeon, I. and Kang, K. J., 2007, "Wire-Woven Bulk Kagome (WBK) truss cores," *Acta Materialia*, in press.
- (10) Ugural, A. C. and Fenster, S. K., 2003, "Advanced Strength and Applied Elasticity, 4th Ed," Prentice-Hall.
- (11) Shanley, F. R., 1967, "Mechanics of Materials," NewYork, McGraw-Hill.
- (12) Rasmussen, K. J. R., 2003, "Full-range stress-strain curves for stainless steel alloys," *J. of Constructional Steel Research*, Vol. 59, pp. 47-61.
- (13) Jeon, I. and Asahina, T., 2005, "The Effect of Structural Defects on the Compressive Behavior of Closed-Cell Al Foam," *Acta Materialia*, Vol. 53, pp. 3415~3423.