

< 논문 >

## 벌크형 와이어직조 카고메 트러스 PCM의 압축거동 (I) - 균일 변형 상계해 -

현상일\* · 최지은\*\* · 강기주†  
(2007년 4월 2일 접수, 2007년 5월 21일 심사완료)

### Mechanical Behaviors under Compression in Wire-Woven Bulk Kagome Truss PCMs (I)

- Upper Bound Solution with Uniform Deformation -

Sang-il Hyun, Ji-Eun Choi and Ki-Ju Kang

**Key Words :** Kagome Truss(카고메 트러스), PCM(Periodic Cellular Metal; 규칙적 다공질금속), P.B.C(Periodic Boundary Metal; 주기경계조건)

#### Abstract

Recently, a new cellular metal, WBK(Wire woven Bulk Kagome) has been introduced. WBK is fabricated by assembling metal wires in six directions into a Kagome-like truss structure and by brazing it at all the crossings. Wires as the raw material are easy to handle and to attain high strength with minimum defect. And the strength and energy absorption are superior to previous cellular metals. Therefore, WBK seems to be promising once the fabrication process for mass production is developed. In this paper, an upper bound solution for the mechanical properties of the bulk WBK under compression is presented. In order to simulate uniform behavior of WBK consisted of perfectly uniform cells, a unit cell of WBK with periodic boundary conditions is analyzed by the finite element method. In comparison with experimental test results, it is found that the solution provides a good approximation of the mechanical properties of bulk WBK cellular metals except for Young's modulus. And also, the brazing joint size does not have any significant effect on the properties with an exception of an idealized thin joint.

#### 1. 서론

다공질 금속은 무게대비 강성과 강도가 높고 내부공간을 냉각이나 유체 등의 저장 용도로 활용할 수 있는 다기능 재료이다. 발포금속은 가장 먼저 실용화된 다공질 금속이나 높은 가격과 낮은 강도 때문에 공학적인 용도로서의 사용이 제한되고 있

다. 반면에 규칙적인 구조를 갖는 다공질금속인 PCM(Periodic Cellular Metal)은 높은 강도를 갖기 때문에 주목을 받고 있다.<sup>(1)</sup> PCM에는 단위셀(unit cell)의 형태에 따라 각주(prismatic)형, 셸(shell)형, 트러스(truss)형 등이 있으며 이중 트러스 PCM은 개방형 셸(open cell)로 구성되어 있어 내부 공간을 응용하여 다기능성(multi-functionality)을 가질 것으로 기대된다.

트러스 PCM을 이루는 구조로 피라미드(pyramid),<sup>(2)</sup> 옥테트(octet),<sup>(4-7)</sup> 카고메(Kagome)<sup>(8-10)</sup> 트러스 등이 제안되었고, 특히 카고메 트러스 PCM은 다른 트러스 PCM에 비해 소성 좌굴에 대한 저항성이 좋고 높은 소성변형에너지와, 낮은 이방성을 갖는다고 알려져 있다.

최근 Kang & Lee<sup>(11)</sup>는 카고메 트러스와 유사한

† 책임저자, 회원, 전남대학교 기계시스템 공학부  
E-mail : kjkang@chonnam.ac.kr  
TEL : (062)530-1668 FAX : (062)530-1689

\* 경북대학교

\*\* 전남대학교 자동차연구소

구조를 갖는 PCM으로서 와이어를 3차원 직조하여 제조되는 소위 'WBK'(Wire woven Bulk Kagome)를 제안하였다. WBK는 6방향의 연속적인 나선형 금속 와이어로 구성되며 조립 후 브레이징을 통해 와이어의 교차점을 접합하여 완성한다. WBK는 굴곡된 와이어로 구성되었음에도 불구하고 압축과 3점 굽힘 시험에서 직선 트러스요소(strut)로 구성된 이상적인 카고메 트러스 구조에 버금가는 높은 강도를 보이고 최대 강도 도달 후에도 파손 현상이 보이지 않고 강도 하강의 속도가 매우 완만하여 많은 에너지를 흡수하는 바람직한 거동하는 것으로 보고되었다.<sup>(12)</sup>

WBK는 가장 이상적인 것으로 알려진 카고메 트러스와 유사한 구조를 가지면서 연속된 와이어로 조립되므로 값싼 가격으로 대량생산에 용이한 덩어리(bulk) PCM 소재가 될 것으로 기대된다. 또한 이방성(anisotropy)이 낮기 때문에 보통의 고밀도(dense) 금속과 같이 임의의 형태로 절삭하여 사용할 수 있고, 소재로 사용되는 와이어 직경에 따라 나노 스케일로부터 수 미터에 이르는 다양한 크기의 단위셀을 갖는 구조체로 제작될 수 있어 응용 범위가 매우 넓다. WBK의 실용화에 가장 큰 관건은 대량생산을 위한 와이어의 직조(조립) 공정과 효과적인 브레이징 공정의 개발이다.

브레이징(brazing)이란 450°C 이상의 온도에서 접합하고자 하는 모재의 용융점 이하에서 녹은 용가재(filler metal)로 둘 이상의 모재를 접합하는 기술로, 다른 접합기술보다 접합강도가 크고 이종재료나 크기가 다른 부품들의 접합도 가능하여 재료의 원가절감이 가능하다. 바람직한 브레이징은 일정한 온도에 이르면 용가재가 녹으면서 모재에 젖어(wet) 그 접촉부 사이로 스며 들어가서 굳게 되는 것이다. WBK에서는 와이어의 모든 교차부분이 브레이징을 통해 접합되는데, 이때 용가재의 양과 모재(와이어)와 용가재의 친화력의 정도를 나타내는 성질인 젖음성(wettability)과 모재들 사이의 접합간격 사이로 흘러 들어가게 하는 모세관 현상(capillary action)에 의해 브레이징 부의 크기와 접합강도 및 결합면도가 결정된다.<sup>(13)</sup>

WBK는 연속된 와이어로 조립되기 때문에 단층(single layer) 구조보다는 수 내지 수백 층의 트러스 구조를 갖는 덩어리(bulk) 형태로 제작/활용하는 것이 유리하다. 수 많은 셀로 구성된 덩어리 PCM의 기계적 거동은 와이어의 굴곡과 브레이징부 존재에 의하여 이론해석이 곤란하다. 따라서 WBK의 탄성계수, 압축강도 등의 등가 물성을 평

가하기 위해서는 이 두 인자의 영향을 정밀하게 고려할 수 있는 수치적 방법을 사용할 필요가 있다. 하지만 수많은 셀로 구성된 덩어리 WBK 전체를 모델로 하여 일반적인 구조해석기법을 적용하는 것은 시간상이나 비용상 현실성이 없으므로 새로운 전산해석모델에 의한 모사가 필요하다.

본 연구에서는 두 가지 방법으로 압축하중을 받는 덩어리 WBK의 기계적 거동을 평가하였다. 제 1 보에서는 결합이 없고 구조적으로 완벽하게 균일한 무한개의 셀로 구성된 WBK를 대상으로 모든 셀의 거동이 완전히 동일하다고 가정하여, 간이모델(rough model)로 모사된 단위셀에 주기경계조건(periodic boundary condition)을 적용하여 탄성 및 소성 거동을 해석하였다. 이 방법의 타당성을 변형의 적합성(compatibility) 검토와 유한(6\*6\*6=216)개의 셀을 갖는 모델에 대한 해석결과와의 비교를 통하여 검증하였다. 그리고 동일한 방법을 브레이징부 형상을 포함하여 보다 정교한 모델로 모사된 단위셀에 적용하여 덩어리 WBK의 기계적 거동과 브레이징부 크기의 영향을 조사하였다. 제 2 보에서는 스프링이나 트러스들로 구성된 여러 형태의 네트워크 구조의 정적인 특성을 해석하는데 많이 사용되어온 네트워크(network) 해석법을 이용하여 브레이징 결합이나 기하학적 불균일성등의 결합의 영향에 대하여 평가할 예정이다.

## 2. 주기경계조건(PBC; Periodic Boundary Condition)

### 2.1 주기경계조건(PBC; Periodic Boundary Condition)

많은 수의 단위구조가 규칙적으로 반복되어 형성되는 구조물을 해석하고자 하는 경우 전체의 구조물을 대상으로 하는 것은 비경제적이며 실질적으로 불가능한 경우도 있다. 이러한 경우 구조물의 주기성을 이용하여 단위구조에 적절한 경계조건을 줌으로써 간단하고 효과적으로 문제를 해석할 수 있다. Mills<sup>(14)</sup>은 ABAQUS의 MPC(multi point constraints)을 이용하여 3차원 주기경계조건을 모사할 수 있음을 보였다.

트러스 PCM의 구조는 단위셀이 모든 방향으로 주기적으로 반복되어서 덩어리를 이룬다. Fig. 1(a)는 Kang & Lee<sup>(11)</sup>가 제안한 WBK의 형상을, Fig. 1(b)는 WBK에서 규칙적으로 반복되는 단위셀의 형상을 나타낸다. 2개의 사면체와 1개의 팔면체가 순차적으로 맞붙어 배열된 형상이다. WBK는 이러한 단위셀이 주기적으로 반복되는 구조로서, 전체적인 구조는 비대칭(asymmetric)이다. WBK가 무

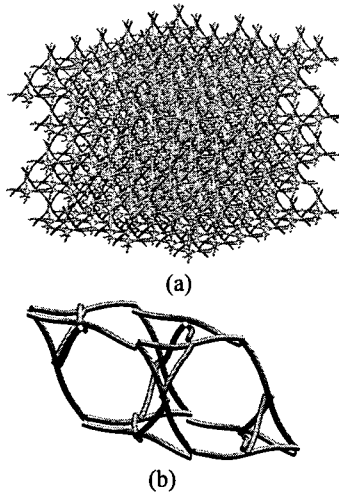


Fig. 1 Configuration of (a) a bulk WBK PCM, (b) the unit cell

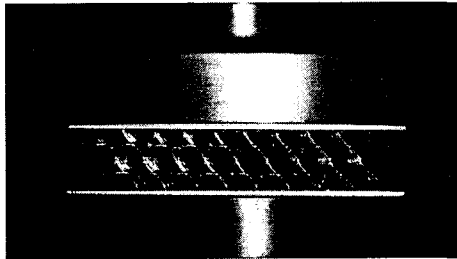


Fig. 2 A WBK sample between compression jigs

한히 많은 단위셀을 가지는 덩어리 형태로 존재한다면 그 기계적 거동에 미치는 바깥경계의 자유표면(거시적으로 보았을 때)의 영향은 거의 없을 것이다. 따라서 자유표면의 영향을 무시하고 주기경계조건을 단위셀에 적용하여 덩어리 WBK의 기계적 거동을 평가할 수 있다. 덩어리 WBK에 외부에서 힘이 가해질 때 모든 단위셀은 균일한 거동을 한다고 가정하면 반복되는 단위셀의 경계부분의 변형형상은 인접한 단위셀의 경계부분의 변형형상과 부합(match)하여야 한다.

아래 식 (1)은 주기경계조건으로서 단위셀에 가해진 구속조건(constraint equations)이다.

$$\begin{aligned}
 u_1|_j - u_1|_{j'} &= u_1(C_o) \\
 u_2|_j - u_2|_{j'} &= u_2(C_o) \\
 u_3|_j - u_3|_{j'} &= u_3(C_o) \\
 (j, j' &= 1, 2, \dots, n)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

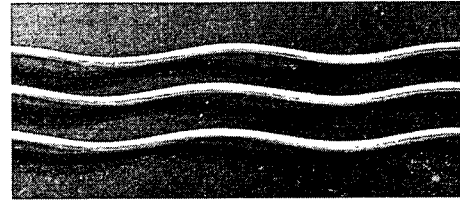


Fig. 3 Helix wires assembled into the WBK sample

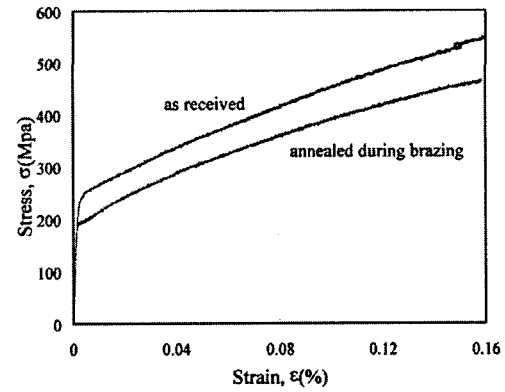


Fig. 4 Stress-strain curves of the as-received and annealed wires during brazing

여기서  $u_1, u_2, u_3$ 은 각각  $x, y, z$  방향의 변위이고  $C_o$ 은 참조(reference point)절점을 나타낸다.  $j$ 는 윗면에 위치한 절점들을 나타내고,  $j'$ 은 아랫면에서 대응하는 위치에 있는 절점을 나타낸다. 따라서  $j$ 와  $j'$ 은 각각 1부터 각 면상의 절점의 갯수인  $n$ 까지 있다. 윗면과 아랫면의 각각의 대응점은  $x, y, z$ 의 모든 방향에서 일정한 변위 차  $u_i(C_o)$  ( $i=1,2,3$ )를 갖는다.

## 2.2 주기경계조건 적용 모델의 검증

본 논문에서는 선형해석을 통하여 단위셀에 적용된 주기경계조건(PBC)의 타당성을 검증하였다. Lee 등<sup>(12)</sup>의 스테인레스 와이어로 제작된 WBK를 해석대상으로 선택하였다. 와이어 직경은 0.78mm, 이상적인 카고메 트러스의 트러스요소(strut) 길이에 해당하는 와이어 교차점사이의 거리는 8.1mm이다. Fig. 2는 Lee<sup>(12)</sup> 등이 압축실험 했던 스테인레스 시편의 사진이며 Fig. 3은 시편을 구성하는 나선형 SUS304 스테인레스 와이어(피치 16.2mm, 진폭 0.46mm)를 나타내고 있다. Fig. 5와 같이 범용 구조해석 소프트웨어인 PATRAN 2005로 단위셀의 간이모델(rough model)을 만들고 주기경계조건(PBC)을 적용하여 ABAQUS ver 6.5로 유한요소해석을 수행하였다. 간이모델은 와이어와 용가재가 채워진 브레이징부로 구성되며 와이어 부분은 단

면이 한 개인 20 절점 솔리드 요소(solid element) (C3D20M)로, 브레이징부는 MPC(Multi Point Constraint)을 이용하여 면상 구속을 하였다. 간이 모델은 총 716 개의 요소와 8,545 개의 절점을 갖는다. Fig. 4는 Lee<sup>(12)</sup> 등이 별도의 인장실험에서 구한 와이어의 재료물성으로서 여기서 얻어진 탄성 계수  $E=170\text{GPa}$  과 항복응력  $\sigma_y=184\text{MPa}$  및 항복 후 응력-변형을 곡선을 대입하였으며, 점진소성 이론(incremental theory of plasticity)을 적용하였다. 포아송의 비는  $\nu=0.3$  으로 취하였다.

단위셀 모델로부터 멀리 떨어진 임의의 지점을 참조절점으로 정의하고 참조절점에서  $z$  방향으로만 15%압축을 했고 식 (1)의 경계조건을 통하여 간이 모델의 변형을 유발하였다. Fig. 5는 Fig. 4의 간이 모델의 압축 후 변형형상을 나타내고 있다. Fig. 6은 Fig. 5의 단위셀 모델의 변형형상을 WBK 구조에서 인접한 3 개의 단위셀의 위치에 반복하여 그려 넣은 것으로 각 단위셀의 변형이 어긋남이 없이 완벽하게 부합하는(match) 것을 알 수 있다. 따라서 단위셀에 식 (1)의 주기경계조건이 가하는 방법으로 무한히 많은 셀로 구성된 WBK의 균일한 변형양상을 정확히 모사할 수 있음을 알 수 있다.

위의 단위셀과 주기경계조건을 이용한 WBK의 해석방법을 검증하기 위한 별도의 방법으로서 비교적 많은 셀로 구성된 덩어리 WBK 모델에 대한 해석 결과와 비교하였다. Fig. 7은  $x, y, z$  축 방향으로 각각 6 개씩 총  $6 \times 6 \times 6=216$  개의 셀로 구성된 덩어리 WBK 모델의 형상을 나타내고 있다. 전체 모델은 Fig. 4의 단위셀 간이모델을 3 차원 공간상에서 반복하여 구성되었으므로 각 셀은 간이모델과 정확히 같은 요소를 갖는다. 요소의 총수는 39,787 개, 절점의 총수는 464,334 개이다. 전체모델을  $x-y$  평면과 평행한 고정된 면에 두고 최상부의 절점들의 변위를  $z$  방향으로 15% 압축하는 변위를 가하였다.

Fig. 8은 해석결과로 얻어진 Fig. 7 모델의 중심에 위치한 하나의 셀에서 발생하는 최대 Mises 등가응력과 셀의  $z$  방향 평균변형을 관계를 나타내고

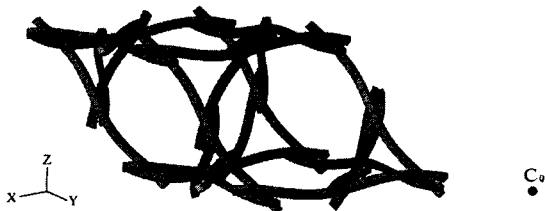


Fig. 5 A rough finite element model of the WBK unit cell

있다. 초기  $\epsilon < 3\%$ 까지는 두 모델의 전반적인 거동이 비교적 일치하나 그 이상의 변형에서는 상당히 다르게 된다. 그 원인은  $6 \times 6 \times 6$  셀로 구성된 모델의 변형 양상을 살펴보면 알 수 있다. 즉, 초기 변형 시에는 모든 셀의 변형이 균일하게 이루어 지지만, 어느 한계 이후 ( $\epsilon > 3\%$ )에는 위치에 따라 변형이 크게 달라져서 위의 주기경계조건을 갖는 단위셀에서 모사하는 완벽하게 균일한 변형상태로부터 멀어지기 때문이다. 이것은 Fig. 7의 모델이 유한한 수의 셀로 구성되어 바깥경계의 자유표면(거시적인)의 영향으로부터 발생할 것으로 추정된다.

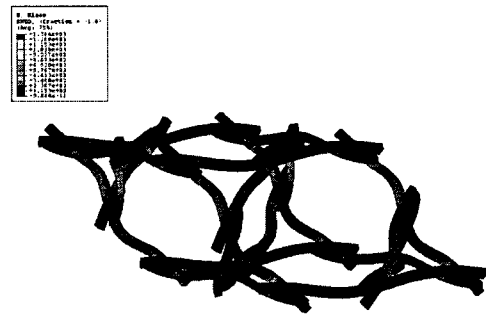


Fig. 6 Deformed shape of the WBK unit cell model with Mises effective stress distribution

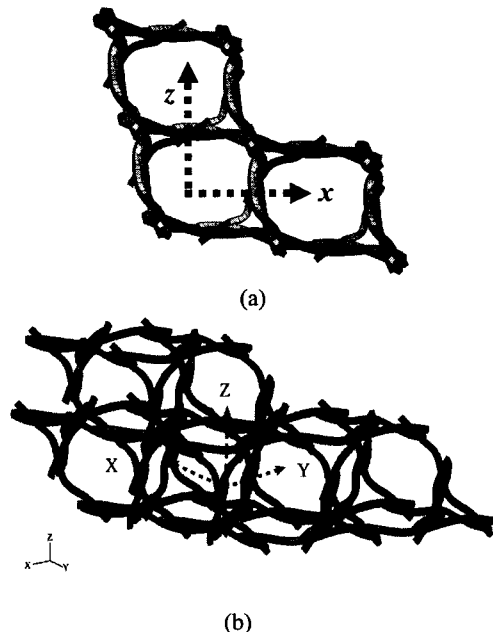


Fig. 7 Deformed shape of the WBK unit cell overlapped with its neighbors: (a) a view from y-axis, (b) angled view

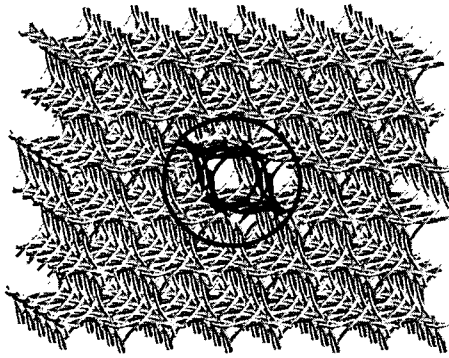


Fig. 8 A finite element model of WBK with 6x6x6 cells

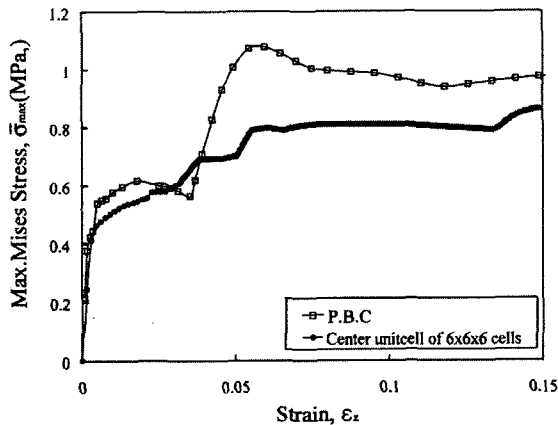


Fig. 9 Variation of maximum Mises stress with compressive strain founded in the WBK unit cell with PBC compared with that in the cell located in WBK composed of 6x6x6 cells

### 3. 균일한 덩어리 WBK의 기계적 거동과 브레이징 부 크기의 영향

앞서의 검증 결과를 바탕으로 동일한 방법을 브레이징 부의 형상을 포함 훨씬 정교한 단위셀 모델에 적용하여 무한히 많은 셀로 구성되며 균일한 거동을 하는 덩어리 WBK의 압축거동을 조사하였다. 모델링이나 해석 소프트웨어는 위와 같다. 와이어 부분은 역시 20 절점 솔리드 요소(C3D20R)를 사용하되 원형인 와이어의 단면의 형상을 정밀하게 묘사할 수 있도록 한 단면에 32개의 요소와 267개의 절점을 가지도록 모델링 하였으며, 와이어의 접합하는 브레이징 부는 위에서와 같이 단순히 MPC로 묘사하거나 10 절점 솔리드 요소(C3D10)를 이용하여 2, 4, 6mm의 3가지 높이로 모델링 하였다. 와이어 및 브레이징 부의 재료물성으로는 간이모델에서와 같이 SUS304 와이어의 측정치를 적용하였다. Fig. 9는 Lee<sup>(12)</sup> 등의 WBK 시편의 브레이징 부의 사진을 본 연구의 유한요소

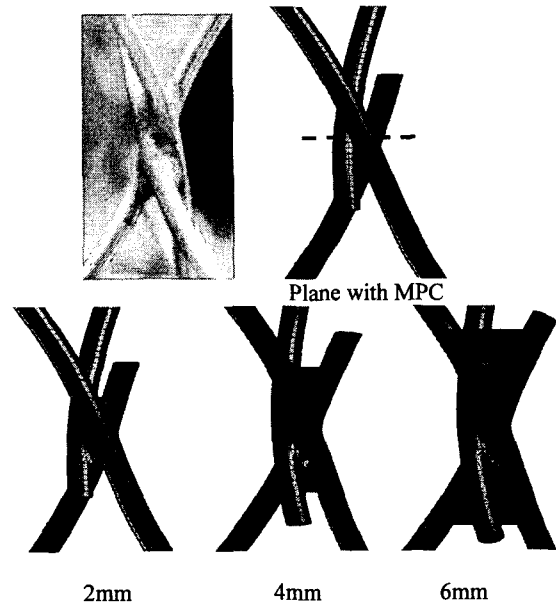


Fig. 10 Images of a brazed joint in the SUS 304 stainless steel WBK specimen compared with corresponding four different finite element models

모델과 비교하여 나타내고 있다. 실제시편의 브레이징 부 높이는 약 4mm이다. Fig. 10은 높이 4mm의 브레이징 부를 갖는 WBK 단위셀의 유한요소 모델을 나타내고 있다.

#### 3.1 PBC 적용 브레이징 효과 해석결과

Fig. 11은 브레이징 부의 높이가 4mm로 실제시편과 같은 경우 WBK의 압축거동을 Fig. 2의 2층 시편을 실험한 결과<sup>(15)</sup> 및 이론예측결과와 비교하여 나타내고 있다. 여기서 응력변형률은 압축에 의한 수직 응력과 수직 변형률을 말한다. 이론예측이란 Lee<sup>(12)</sup> 등이 WBK를 직선 트러스요소가 볼조인트(ball joint)로 조합된 이상적인 카고메 트러스로 묘사하여 유도한 등가탄성계수, 항복응력 또는 최대응력을 뜻하며, 다음 식과 같다.

$$E_c = \frac{\sqrt{2}}{12} \pi E \left( \frac{d}{a} \right)^2 \quad (2)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_s = \frac{\sqrt{2}}{8} \pi \sigma_0 \left( \frac{d}{a} \right)^2 \quad (3)$$

여기서 E와  $\sigma_0$ 는 각각 소재인 SUS304 와이어의 Young 계수와 항복응력이다. 전반적인 거동과 항복응력, 최대응력은 세가지 결과 모두 유사하다. 특히 주기경계조건을 갖는 단위셀의 해석결과는 이론해석결과와 매우 유사하며, 실험 결과보다는 높은 강성도를 가진다. 실험에서 낮은 강성도가 얻어진 것은 뒤에서 다룰 시편 내의 결함에 기인

한 것으로 보인다.

Fig. 12 은 브레이징을 MPC로 모사된 경우와 그 높이가 2, 4, 6mm 순으로 변화할 때 WBK의 기계적 특성을 나타내고 있다. Table 1 은 실험 및 여러 해석 결과 얻어진 압축 시 재료물성을 요약한 것이다. Young 계수, 항복응력 및 최대응력 모두 이론 예측 값이 가장 높으며 브레이징 부의 높이가 증가할수록 이에 접근한다. 브레이징 부를 MPC로 모사한 경우를 제외하고 그 높이에 의한 효과는 크지 않았으나 브레이징 부가 높아질수록 최대응력에 이르는 변형값은 커지고 최대응력 이후에도 응력이 완만하게 감소한다. 브레이징 부가 높아질수록 굴곡된 와이어가 브레이징 부 때문에 직선 트러스에 가까워져 최대응력에 도달하기까지의 변형율( $\epsilon_{max}$ )이 증가한다. 하지만 최대 응력값 자체는 브레이징 부의 크기가 영향을 받지 않고 굴곡된 와이어로 제작되었음에도 이상적인 카고메 트러스 구조에 버금가는 높은 값을 갖는다.

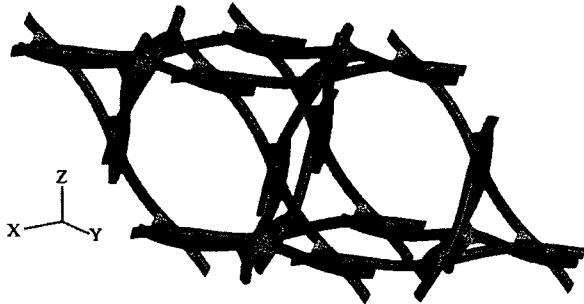


Fig. 11 Refined finite element model of the WBK unit cell

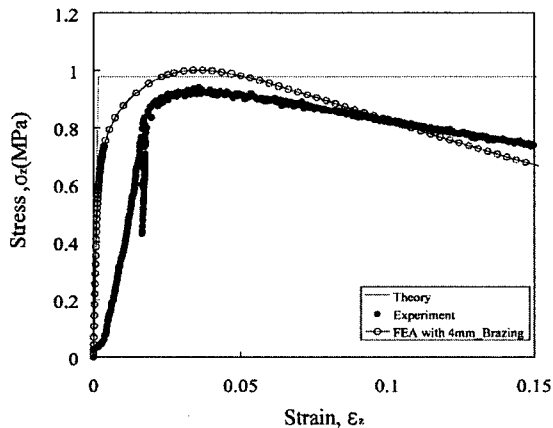


Fig. 12 Stress-strain responses of WBK under compression

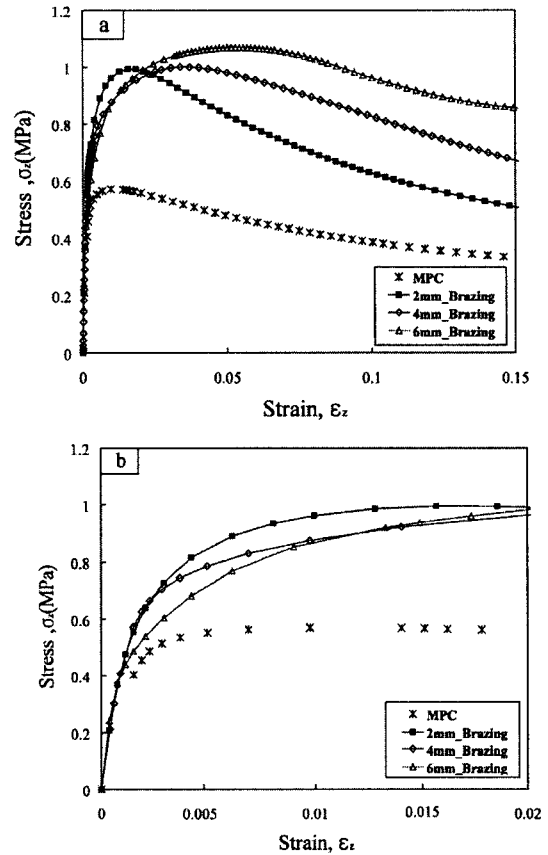


Fig. 13 (a) Stress-strain responses of WBK under compression estimated by finite element analyses for the refined unit cell model with periodic boundary condition and various constraints at the brazed joints, (b) with the smaller strain range

Table 1 Summary of material properties of WBK PCM under compression

	$E$ (MPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	
<b>Theory</b>	583.7	0.98	0.98	
<b>Experiments</b>	300.36	*0.9	0.93	
<b>FEA with different brazed joints</b>	<b>MPC</b>	282.4	*0.53	0.57
	<b>2mm</b>	421.0	*0.8	0.99
	<b>4mm</b>	483.1	*0.73	1.0
	<b>6mm</b>	493.2	*0.6	1.07

\*0.2% offset yield stress

#### 4. 결론

본 논문에서는 결함이 없고 구조적으로 완벽한 무한개의 셀로 구성된 압축하중을 받는 덩어리 WBK 의 새로운 전산모사모델을 제안하여 기계적 거동을 평가하고, 이론값과 실험값과 비교하고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 단위셀에 주기경계조건을 적용하여 모든 셀의 거동이 완전히 동일하다고 가정하여 거시적 기계적 거동을 예측할 수 있는 모델을 제시하고 검증하였다.

(2) 구조적으로 완벽한 무한개의 셀로 구성된 WBK 의 등가물성치를 구하고 이론값과 실험값과 비교하였다.

(3) 브레이징부가 커짐에 따라 최대응력에 이르는 변형 값은 커지고 최대응력후 완만히 감소하지만, 최대응력의 크기는 거의 일정하다. 또한 브레이징부가 거의없는 경우를 제외하고는 최대응력값은 이론값과 실험값과 비슷하다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학기술연구원 특정기초연구(R01-2006-000-10349-0)지원을 받아 수행하였습니다. 관계자 여러분께 감사 드립니다

#### 참고문헌

- (1) Wadley, H.N.G., Fleck, N.A., and Evans, A.G., 2003, "Fabrication and Structural Performance of Periodic Cellular Metal Sandwich Structures," *Composite Science and Technology*, Vol. 63, pp. 2331~2343.
- (2) Zok, F.W., Waltner, S.A., Wei, Z., Rathbun, H.J., McMeeking, R.M., and Evans, A.G., 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.
- (3) Jung, C.G., Yoon, S.J., Yang, D.Y., Lee, S.M., Na, S.J., Lee, S.H., and Ahn, D.G., 2005, "Fabrication and Static Bending Test in Ultra Light Inner Structured and Bonded (ISB) Panel Containing Repeated Inner Pyramidal Structure," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 22, pp. 175~182.
- (4) Sypeck, D.J. and Wadley, H.N.G., 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.
- (5) V.S. Deshpande, N.A. Fleck, M.F. Ashby, 2001, "Effective Properties of the Octet-Truss Lattice Material," *J. of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.49, pp.1747~1769.
- (6) Chiras, S., Mumm, D.R., Wicks, N., Evans, A.G., Hutchinson, J.W., Dharmasena, K. Wadley, H.N.G. and Fichter, S. 2002, "The Structural Performance of Near-Optimized Truss Core Panels," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, pp. 4093~4115.
- (7) Kang, K.J., Lim, J.H., Nah, S.J. and Koo, M.H., 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.
- (8) 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.
- (9) Wang, J., Evans, A.G., Dharmasena, Wadley, H.N.G., 2003, "On the Performance of Truss Panels with Kagome Cores," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 6981~6988.
- (10) Kang, K.J., Jeon, G.P., Nah, S.J., Ju, B.S., and Hong, N.H., 2004, "A New Way to Manufacture Ultra Light Metal Structures," *J. of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.A-28, pp. 296~303.
- (11) Kang, K.J. and Lee, Y.H., 2004, "Three-Dimensional Cellular Light Structures Directly Woven by Continuous Wires and the Manufacturing Method of the Same," Patent Pending PCT/KR2004/002864 /05 November.
- (12) Lee, Y.H., Choi, J.E., Kang, K.J., 2006, "A new periodic cellular metal with Kagome trusses and its performance," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Chicago, USA*, No. IMECE2006-15467, November.
- (13) George E. Linnert, 1965, "Welding Metallurgy," *American welding society*, Vol. 1, pp. 158~166.
- (14) Mills, N.J., 2006, "The hight strain mechanical response of the wet Kelvin model for open-cell foams," *Int. J. Solids and Structures*, Article in press.
- (15) Lee, B.K., Lee, Y.H., Kang, K.J., Jeon, I.S., 2007, "Evaluation of Compressive Behavior of Wire Woven Bulk Kagome," *Submitted to Conferences of the Korean Society of Material and fracture division*.