볼록형 와이어 직조 카고메 트러스 PCM 의 압축특성평가

이명진* · 강기주†

The Compressive Characteristics of The Convex Type Wire-woven Bulk Kagome Truss PCM

Ming-Zhen Li and Ki-Ju Kang

Key Words : Periodic Cellular Metal(규칙적 다공질 금속; PCM), Kagome Truss(카고메 트러스), Concave(오목형), Convex(볼록형), Compressive Strength(압축강도), Ultra Light metal Structure(초경량 구조물), Wire-wounded Bulk Kagome(WBK)

Abstract

Recently, a new periodic cellular metal(PCM) named as Wire wove Bulk Kagome(WBK) was introduced. Based on the shape of tetrahedra composing a WBK, WBKs are classified into two types, namely, concave and convex type. They are easily differentiated by changing the assembling sequence. The effect of geometrical parameters such as the wire diameter, strut length and number of layers on the compressive behavior of concave type WBK has already been investigated. In this work, the similar works were performed with the convex type WBKs. It was shown that the compressive strength of the convex type WBK was quite similar to that of the concave type. The compressive strengths of convex type specimens also depend on the slenderness ratio, but a little different from those of concave type specimens in the detailed behavior. And densification occurs earlier than the concave type WBK.

1. 서 론

PCM(Periodic Cellular Metal)은 다공질 금속의 일종으로서 내부구조가 규칙적인 것을 말한다. PCM 중 무게대비 강도가 좋은 PCM 으로는 prismatic PCM 과 truss PCM 으로 나눈다 .전자의 대표적인 구조재는 허니콤 구조재이며 특히 항공 구조재로 널리 사용된다. 하니콤 구조재는 무게에 대한 강도가 좋은 장점을 가지지만 내부구조가 막혀 있어 공간 활용성이 떨어진다. 후자는 2000 년대에 들어서 소개된 것으로 규칙적인 트러스로 이루어져 있어 기계적 물성 측면에서 가장 이상적이다. 트러스 PCM 의 대표적인 구조물로는 피라미드, 옥테트및 카고메 이다. 이중 Kagome 트러스는 2003 년 Hyun(1) 등에 의해 제안된 구조물로서 Octet 에 비해 트러스 요소의 길이가 절반에 해당하므로 트러스 구조물의 주요파괴 모드인 좌굴에 대한 저항성이 좋고 내부 공간 활용이 높고 소성변형에너지가 높으며, 이방성(anisotropy)이 낮은 것으로 알려져 있다.

Wang(2)등은 인베스트 주조법(investment casting)으로 Kagome 트러스 코어를 갖는 샌드위치 판재를 제작하여 압축, 전단, 굽힘 시험을 수행 하여 안정적인 거동을 함을 증명하였고 Lim 과 Kang(3,4,5)은 와이어를 절곡하고 3 축으로 직조하여 truss PCM 을 제작하고 강도를 평가 함으로서 그 활용 가능성을 가졌다.

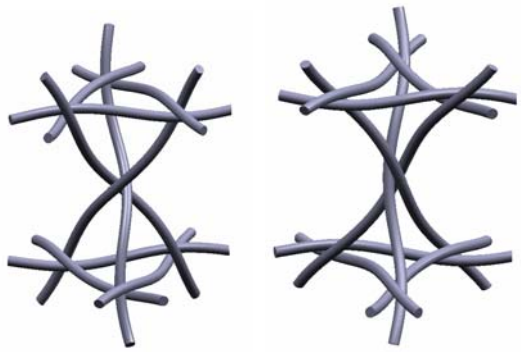
Lee 와 Kang(6,7)은 와이어를 이용하여 다층 구조를 가지는 Wire-wove Bulk Kagome(WBK)를 소개하였다. 와이어는 피아노 선과 같이 쉽게 소재자체를 강화 하여 강도를 높일 수 있을 뿐만 아니라, 높은 품질을 유지 할 수 있는 장점이 있다. 나선

† 회원, 전남대학교 기계시스템 공학부
E-mail : kjkang@chonnama.ac.kr
TEL : (062)530-1668 FAX : (062)530-1689
* 전남대학교 대학원 기계공학과

형으로 성형된 와이어를 Lee 와 Kang(6,7)이 제안한 방법에 따라 3 차원 공간 상에서 서로 60° 또는 120° 로 교차하도록 조립하고 교차점을 브레이징하여 WBK 를 제작한다. 와이어의 배열 순서에 따라 WBK 는 오목형(concave)과 볼록형(convex) 두 가지 형태의 구조물을 얻을 수 있다(Fig.1).

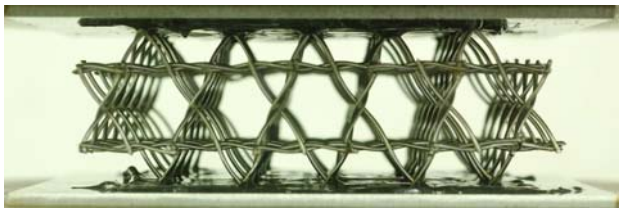
최근에 Lee(8)는 SUS304 와이어로 제작된 오목형 형태를 가지는 WBK 트러스 PCM 의 파손 메커니즘과 기계적 특성을 조사하였고 다른 다공질 재료에 비해 좋은 기계적 성능을 가짐을 보고하였다.

본 연구에서는 같은 재료로 제작된 볼록형 형태를 가지는 WBK 트러스 PCM 를 Lee(8)가 연구하였던 시편과 동일한 기하학적 변수, 즉 와이어 직경, 요소의 길이, 다층 효과, 그리고 2 가지 접합경계조건(Fig.2)이 압축강도에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

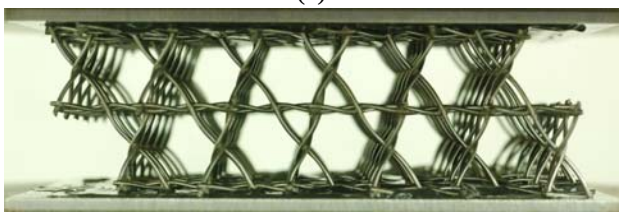


(a) (b)

Fig. 1 Configuration of (a)convex type unit cells and (b)Concave type unit Cells



(a)



(b)

Fig. 2 Two different configuration of convex type specimens: (a) pointed faced and (b) flat faced.

2. 실험

2.1 시편준비

시편 제작 시 선택된 재료는 SUS304 와이어 이다. 제조 과정은 WBK 트러스 PCM 의 Lee(8) 등의 논문에 자세히 기재 되여 있다. 실험에 사용한 시편은 Table1,2 에서 보여주고 있는 것처럼 Point faced 와 Flat faced 두 가지 형태로 나누고 사용된 와이어의 직경(d)은 0.5mm~1.18mm, 요소의 길이(c)는 5.35mm~12.6mm 범위에 있다.

제작 완성된 시편은 용가재(filler material)를 노드부에 도포한 뒤 진공로에서 브레징을 완성한다. 압축 시 수평방향의 미끄러짐을 막아주고 안정적인 실험을 위하여 엑포시(AXIA EP-04 epox)를 이용하여 동일한 재료인 SUS304 면판을 접합하였다.

2.2 압축실험

압축실험은 SATEC TC-55 전기 유압식 실험기를 이용하여 0.005mm/s 의 변위 제어로 수행 하였다. 또한 하중 증가에 따른 시편의 형상 변화를 디지털 카메라에 기록하였다. 모든 시편은 제하 그리고 부하(Unloading and Reloading)를 실행하였고 충분한 압축거동 관찰을 위해 Densification 이 일어날 때까지 압축 하였다.

Table 1 The diameter, strut lengths, number of layers, number of cells of pointed faced WBK specimens**.**

	Pointed faced						
Diameter, *d* (mm)	0.5	0.98	1.18	0.78	0.78	0.78	0.78
Strut length, *c* (mm)	8.1	8.1	8.1	8.1	5.35	6.45	12.6
No. of layers	2	2	2	2,3,4	2	2	2
No. of cells	5×5	5×5	5×5	5×5	8×8	6×6	5×5

Table 2 The diameter, strut lengths, number of layers, number of cells of pointed faced WBK specimens**.**

	Flat faced				
Diameter, *d* (mm)	0.98	1.18	0.78	0.78	0.78
Strut length, *c* (mm)	8.1	8.1	8.1	5.35	6.45
No. of layers	2	2	1,2,3,4	2	2
No. of cells	5×5	5×5	5×5	8×8	6×6

3. 이론해석과 결과

3.1 압축강도에 대한 이론 해

시편들의 가장자리 불규칙 때문에 가장자리의 몇 개 요소들은 하중을 지지 하지 않는다.(6) 유효 단면적(effective area)은 실제 하중을 지지하는 단면적 $A_e = L_e \times W_e$ 로 정의 한다. 여기서 L_e 는 유효길이, W_e 는 유효 폭이다. 상세한 정의는 Lee(8)의 논문에 상세히 기재 되였다. 압축 응력은 작용하중을 위에서 정의한 유효 단면적을 나눔으로 서 구한다.

압축강도를 구하기 위하여 Lee(8)는 WBK 트러스 PCM 은 직선 와이어로 구성 되였고 하중은 하중 방향 요소에만 전달 된다고 가정한다. 또한, WBK 트러스는 요소의 인장 항복이나 취성 파괴가 아니라 탄성, 소성 좌굴에 의해 파손된다고 가정 하였다. 탄성, 소성 좌굴에 의한 임계하중은 아래와 같다.

$$F_{cr,elastic} = \frac{\pi^3 k E d^4}{64 c^2} \tag{1}$$

$$F_{cr,plastic} = \frac{\pi d^2}{4}\sigma_0 \tag{2}$$

여기서, σ_0 와 E 는 각각 소재의 항복응력과 Young 계수 이다. k 는 경계 지지 조건에 따른 상수 이다. Lee(8)는 WBK 트러스를 등방성(homogeneous)재료로 간주하며, 등가항복응력(σ_y^c)은 하나의 단위셀 상부에 부가 할 수 있는 최대하중($Q_{\max} = \sqrt{6}F_{cr}$)을, 단위셀이 담당하는 면적 $2\sqrt{3}c^2$ 으로 나누어 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\sigma_y^c\Big|_{elasticbuckling} = \frac{\sqrt{2}}{128}\pi^3 k E\left(\frac{d}{c}\right)^4 \tag{3}$$

$$\sigma_y^c\Big|_{plasticbuckling} = \frac{\sqrt{2}}{8}\pi\sigma_0\left(\frac{d}{c}\right)^2 \tag{4}$$

3.2 Convex type of Point faced WBK

Fig. 3 은 층수에 따라 측정된 3 가지 시편의 응력-변형율 곡선이다. 시편은 동일한 와이어 직경(d=0.78mm)과 요소의 길이(c=8.1mm)를 가진다. 볼록형 point faced 시편은 층수가 증가함에 따라, 압축 강도가 조금씩 감소 한다. 압축 거동을 보면 먼저 면재와 접합부위인 뾰족 부분이 좌굴이 일어나고 다음 가운데 층이 좌굴이 일어 난다. 식 (4)에 의해 예측된 등가항복응력은 $\sigma_y^c = 0.97$ MPa 이고 실험에 의해 측정된 값은 예측한 값보다 낮았다. 그 원인은 식(4)가 상계해로 간주 되였고, 시편을 모두 손으로 제작하였기에 때문이다.

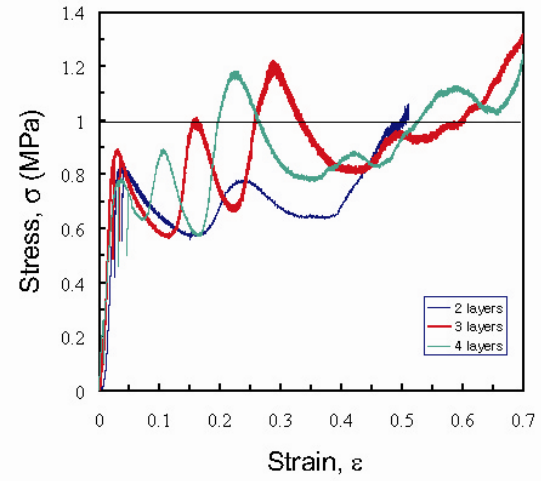


Fig. 3 Compressive responses of point faced convex type specimens with three different layers of constant strut length and diameter.

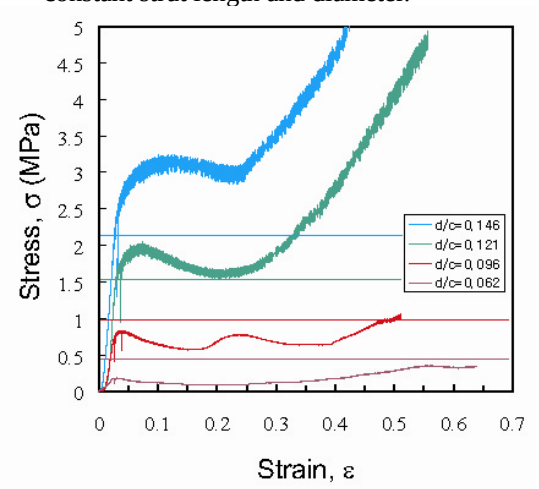


Fig. 4 Compressive responses of point faced convex type specimens with a constant strut length and four different wire diameter

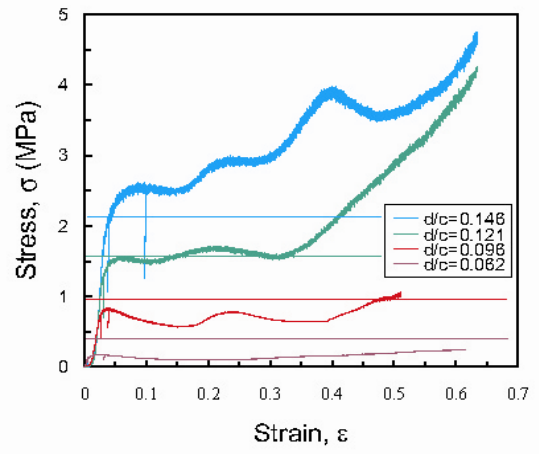


Fig. 5 Compressive responses of point faced convex type specimens with a constant wire diameter and four different strut length

Fig. 4 는 트러스 요소의 길이(c)는 일정하고와이어의 직경을 변화하는 시편의 압축실험 결과를 보여준다. 시편 사이즈는 트러스 요소 길이 c=8.1mm 이고 와이어 직경은 각각 0.5mm, 0.78mm, 0.98mm, 1.18mm 이다. Fig. 4 로부터 보면 4 가지 시편 모두 초기의 선형적인 변형 후에 곧바로 최대 압축응력이 나타났다. 세장비(d/c)가 0.062 와 0.096 일 경우엔 안정적인 압축 거동을 보였는데 세장비가 0.121 과 0.146 로 커지면서 시편은 $\varepsilon = 0.3$ 인 곳에서 Densification 이 일어 난다. 식(4)에서 예측한 값과 비교 하면 세장비가 0.062 와 0.096 으로 작을 때 최대 압축응력이 예측 값보다 작았고 세장비가 0.121 과 0.146 으로 클 때 식(4)에서 예측한 값보다 더 커짐을 볼 수 있다.

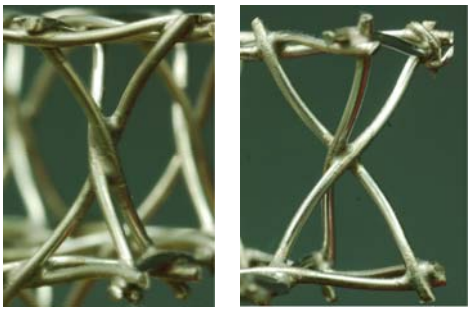
Fig. 5 는 위와 반대로 와이어의 직경이 일정하고 트러스 요소를 4 가지로 변화 시킨 시편의 실험 결과 이다. 앞에 실험 결과와 비교해보면 세장비 d/c=0.146 인 경우만 Densification 이 좀 늦게 일어 났지만 전반적으로는 유사한 거동을 하였다.

3.3 Convex Type of Flat Faced WBK

Fig. 7 은 Flat faced 시편의 다층효과에 따른 응력-변형율 곡선이다. 시편 사이즈는 Point faced 다층효과 시편과 동일한 와이어 직경 d=0.78mm, 트러스 요소의 길이 c=8.1mm 로 정하였다. 2~4 층 Flat face 시편의 최대 압축응력은 Point faced 시편의 결과와 유사했다. 또한 Point faced 시편의 다층효과와 마찬가지로 층수의 증가에 따가 최대 압축응력이 조금씩 감쇠하는 경향을 보였다. 식(4)로부터 예측한 등가항복응력 $\sigma_y^c = 0.97$ MPa 과 실험결과 값도 유사하였다. 하지만 1 층 Flat faced 시편의 경우에는 상당히 높은 최대압축 응력이 측정되였다. 이것은 Lee(8) 논문에서 기술 된 것과 같이 유효단면적이 최소한의 단면적으로 정의 되였기 때문이다. 결론적으로 보면 최소한의 단면적인 유효단면적은 최대압축응력을 과대 평가하게 된다.

Fig. 8 는 트러스 요소의 길이를 c=8.1mm 로 고정하고 와이어 직경을 각각 0.78mm, 0.98mm, 1.18mm 로 변화 시켰다. 그리고 모든 시편은 2 층으로 구성 되였다. 이 실험에서는 최대압축응력이 세장비가 0.146 일 때만 식(4)에서 예측한 등가항복응력 보다 높았고 세장비가 0.121 와 0.096 일 때는 식(4)에서 예측한 값과 유사한 결과를 보였다.

그리고 Fig. 9 는 위와 반대로 직경을 0.78mm 로 고정하고 트러스 요소의 길이를 각각 5.35mm, 6.45mm, 8.1mm 로 하였으며 모두다 2 층 Flat face 시편이다. Fig. 8 와 Fig. 9 를 비교해 볼때 동일한 세장비에 대해서 응력-변형율 곡선이 거이 유사함을 보여준다. 또한 Point faced 시편과 동일한 세장비 0.146 과 0.121 일 때 보면 Point faced 시편은 변형율이 $\varepsilon = 0.3$ 인 곳부터 Densification 이 일어 났는데 Flat faced 시편인 경우는 $\varepsilon = 0.55$ 인 곳으로부터 Densification 이 일어 나기 시작했다.



(a) (b)

Fig. 6 (a)Concave type unit cell with braized. (b)Convex type unit cell with braized

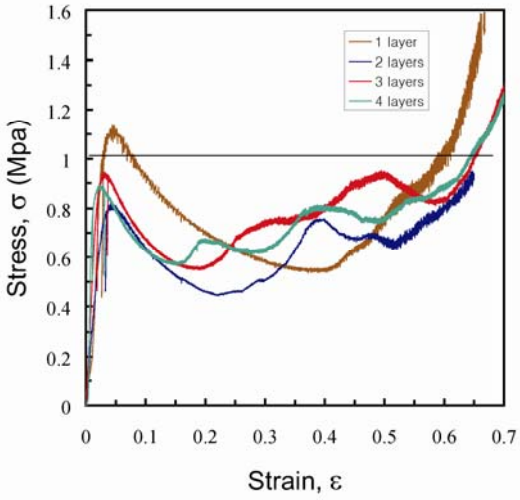


Fig. 7 Compressive responses of flat faced convex type specimens with four different layers of constant strut length and diameter.

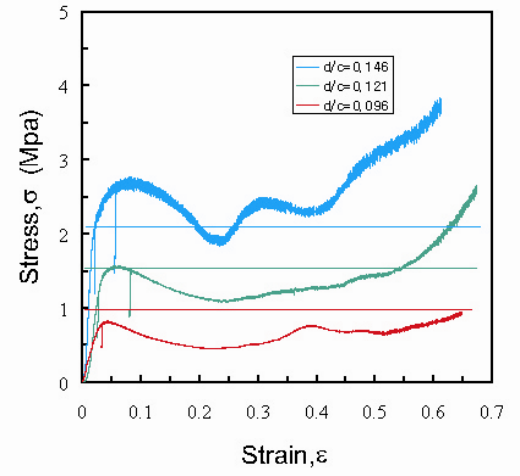


Fig. 8 Compressive responses of flat faced convex type specimens with a constant strut length and three different wire diameter

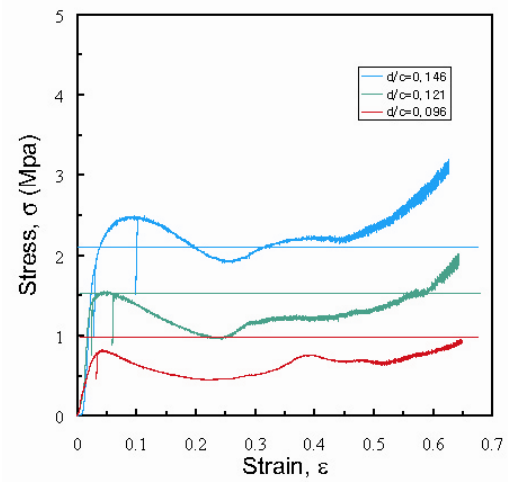


Fig. 9 Compressive responses of flat faced convex type specimens with a constant wire diameter and three different strut length

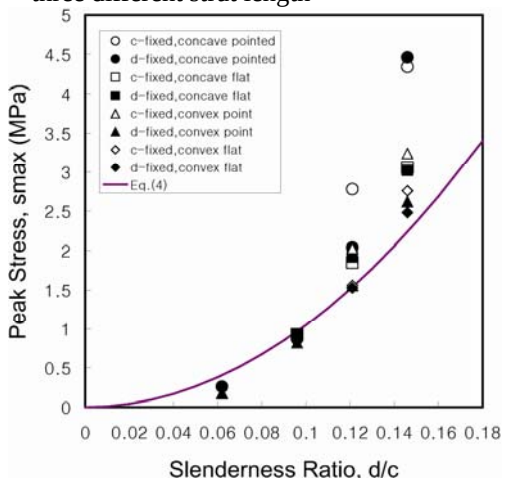


Fig.10 The peak stresses measured through compression tests for various WBK specimens as a function of the slenderness ratio.

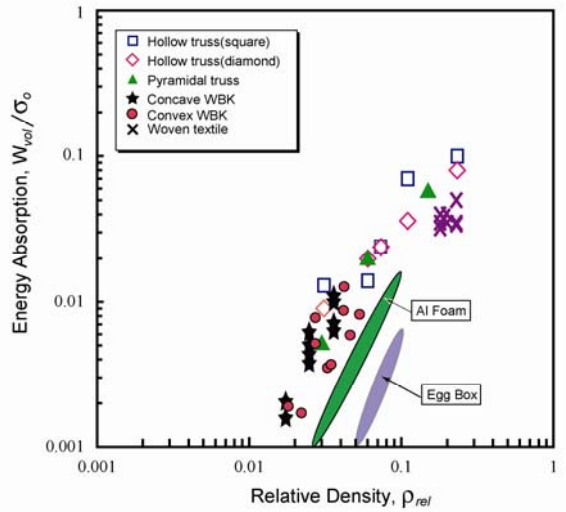
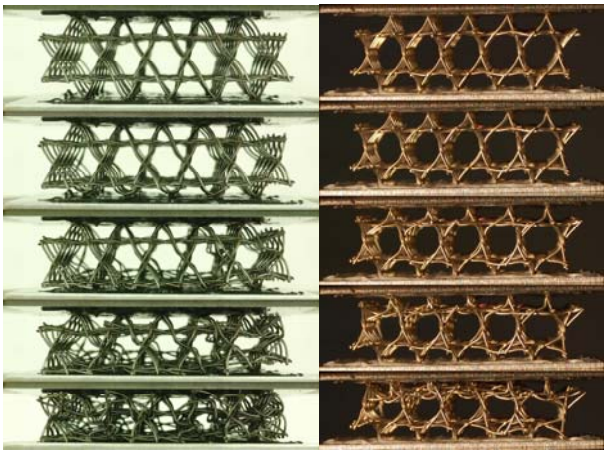


Fig.11 The performances of WBK compared with those of other competing materials of the energy absorption divided by the yield stress of solid materials.



(a) (b)

Fig.12 Photographs showing the deformation characteristics of 2-layered convex(a) and concave(b) type WBK cores at plastic strains of 0%,7%,15%,25%,40%.

4. 토론

볼록형 형태를 가지는 WBK 트러스 PCM Fig. 3 과 Fig. 7 의 결과로부터 1 층 Flat faced 시편을 제외한 2,3,4 층 시편은 접합상태인 Point faced 와 Flat faced 에 관계 없이 층이 증가함에 따라 조금씩 낮은 압축강도를 보였다. 이것은 시편이 원래부터 가지고 있는 결함과 수공제작 시 생긴 결함으로 볼수 있다. 1 층 Flat faced 시편은 다른 시편보다 높은 강도를 보였는데 이것은 유효단면적의 정의에 의하여 최소한의 단면적으로 정의 되였기 때문이다. Fig.6 은동일한 와이어 직경과 트러스 요소 길이를 가지는 concave 와 convex 단위 셀의 부레이징부 높이 사진이다. 그림에서 보다 싶이 concave 형이 브레이징 높이가 convex 보다 높지만 최대 압축응력이 concave 형과 유사한 값을 보여준다. Fig.10 을 보면 세장비가 커질수록 최대압축응력이 식(4)의 예상 값보다 급격히 상승하는 것을 볼수 있다. 이로부터 Convex type WBK 트러스 PCM 도 Lee(8)가 연구한 Convex type WBK 트러스 PCM 과 마찬가지로 압축강도는 기하학적 변수인 와이어 직경, 요소의 길이 및 다층효과보다도 세장비에 지배적으로 의존함을 볼 수 있다.

Fig.11 은 상대밀도에 따른 에너지 흡수율을 보여주고 있다. 볼록형 WBK 은 오목형 WBK 와 비슷한 에너지 흡수율을 가지며 다른 경쟁 구조보다 뛰여난 에너지 흡수율을 갖진다.

Fig.12 는 2 층인 오목과 볼록형 WBK 심재의 파손 메카니즘을 보여준다. 변형율 0%인 시편의 사진을 보면 상하면판에 닿은 스트러트의 위치가 비

대칭임을 알 수 있다. 최대 압축응력(변형율 3%좌우) 이후에는 가해지는 하중이 증가함에 따라 시편의 파괴를 가져왔다. 변형율 약 15%에서 오목형 WBK 는 상하면판의 비대칭으로 인해 코어가 회전을 하여 처음에 맞닫지 않은 와이어들이 상하면에 닿으므로써 압축응력이 증가하는 것을 볼수 있었다. 하지만 볼록형은 약간의 회전후에 먼저 밑면과 접합부인 뾰족부분이 좌굴되여 아래면과 면접합을 이루는것으로 볼수 있다. 하여 압축응력이 다시 증가 하기 시작하였다. 이러한 원인은 SUS304 면판과 접합부분이 비대칭이고 볼록형과 오목형의 형상이 틀린데 있다고 본다.

5. 결 과

본 연구에서는 SUS304 와이어로 제작된 Convex type WBK 시편의 압축특성을 실험적으로 연구 하였다.

첫째. 시편의 다층효과에서 층수가 증가 할수록 시편자체가 존재하는 결함으로 인해 압축강도는 조금씩 감소 하였다.

둘째. WBK 의 압축특성은 기하학적 변수인 와이어 직경, 트러스 요소 길이 및 층수의 영향보다는 세장비에 지배적이다. Concave 형 WBK 보다 브레이징부 높이가 낮지만 유사한 최대압축응력을 보였다.

셋째. 볼록형 WBK 의 파손 메커니즘은 오목형 파손 메커니즘과 조금 틀렸다. 오목형의 코어는 압축시 먼저 회전이 일어나서 맞닿지 않은 와이어들이 맡다아 압축응력이 증가하였지만 볼록형은 먼저 접합부분인 뾰족부분이 좌굴되여 밑판과 면접합을 이루게 된 후 한층씩 파손되였다.

넷째. 에너지 흡수율 방면에서 다른 경쟁 재료에 뒤지지 않는 뛰여난 성능을 보여주었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 국가지정연구실사업 (R0A-2006-000-10249-0)의 지원을 받아 수행하였습니다.

참고문헌

(1) 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

(2) J. Wang, A. G. Evans, K. Dharmasena and H. N. G. Wadley, 2003,“On the performance of truss panels with Kagomé cores”, *Int. J. Solids and Structures*, Vol 40, pp 6981-6988

(3) Lim, Ji-Hyun and Kang, Ki-Ju, 2006a. ”Mechanical behavior of sandwich panels with tetrahedral and Kagome truss cores fabricated from wires.” *International J. of Solids & Structures* 43, 5228-5246.

(4) Lim, Ji-Hyun and Kang, Ki-Ju, 2006b. “Wire formed cellular metals.” *Materials Transactions* 47, 2154-2160

(5) 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

(6) Lee, Yong-Hyun, Lee, Byung-Kon, Jeon, Insu and Kang, Ki-Ju, 2007a. “Wire-woven bulk Kagome (WBK) truss cores.” *Acta Materialia* 55, 6039-6400.

(7) Kang, Ki Ju and Lee, Yong Hyun, 2005. “Three-dimensional cellular light structures directly woven by continuous wires and the manufacturing method of the same.” *US Patent Pending* (Application 10/578,421).

(8) Lee, Byung Kon and Kang, Ki Ju, 2008 “Effect of Geometrical Parameters On Compressive Characteristics of Wire-woven Bulk Kagome Truss PCMs” J. of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 88~93.