

새로운 와이어 직조 다공질 금속의 압축 특성§

고경득* · 이기원** · 강기주***†

* 전남대학교 자동차연구소, ** 전남대학교 기계시스템공학부

Compressive Characteristics of New Wire-woven Cellular Metal

Gyeong-Deuk Ko*, Ki-Won Lee** and Ki-Ju Kang***†

* Automobile Research Center, Chonnam Nat'l Univ.,

** School of Mechanical Systems Engrg., Chonnam Nat'l Univ.

(Received May 17, 2010 ; Revised August 12, 2010 ; Accepted August 17, 2010)

Key Words : Cellular Metal (다공질 금속), WBK(Wire-woven Bulk Kagome, 와이어직조 카고메), Compressive Characteristics(압축특성), Truss(트러스), Buckling(좌굴)

초록: WBD(wire-woven bulk diamond)라고 명명한 와이어로 직조된 다공질 금속의 새로운 형태를 소개한다. WBD 는 기계적 열 특성과 공학적 응용면에서 몇 년 전에 소개되어진 WBK(wire-woven bulk Kagome)와 같이 나선형 와이어로 구성된다. WBK 에서는 각 교차점에서 3 개의 와이어가 접하나 WBD 에서는 4 개의 와이어가 서로 접하여 배열된다. 압축하중 하에서 WBD 의 기계적 거동을 조사하고 그 결과를 WBK 와 비교하였다. 같은 세장비(d/c)에서 WBD 의 밀도 및 강도는 WBK 의 약 2 배이나, WBD 의 강성도는 WBK 보다 그만큼 높지 않다.

Abstract: In this study, a new type of wire-woven cellular metal named WBD(wire-woven bulk diamond) was developed. Like WBK(wire-woven bulk Kagome), WBD is composed of helically formed wires; WBK was introduced a few years ago, and its mechanical, thermal properties, and engineering applications have been extensively investigated. The number of wires that pass by one another at each cross point in WBD is four, whereas that in WBK is three. The mechanical behavior of WBD subjected to compression was investigated and the results were compared to those for WBK. For a given slenderness ratio the density and yield strength of WBD were about twice as high as those for WBK, but elastic stiffness of WBD was not that higher than that for WBK.

1. 서론

트러스 PCM(Periodic Cellular Metal : 규칙적 다공질 금속)은 트러스로 구성되어 있는 다공질 금속의 일종으로 무게대비 강도 및 강성도가 하나쯤 수준으로 높아 차세대 금속재료로 주목받고 있다. 대표적인 트러스 구조로는 Fig. 1 에서 보여지는 피라미드(Pyramid), 옥테트(Octet), 카고메(Kagome) 등이 제안되어 있다. 이 중에서 카고메 트러스는 2003 년 Hyun⁽¹⁾ 등에 의해 제안된 구조물로서 옥테트 트러스에 비해 트러스 요소의 길이가 절반에 불과하므로 트러스

구조물의 주요 파괴모드인 좌굴에 대한 저항성이 좋고, 소성변형에너지가 높으며, 재료이용성이 낮은 것으로 알려져 있다.

Wang⁽²⁾ 등은 인베스트먼트 주조법(Investment casting)으로 Hyun 이 제안한 Kagome 트러스 PCM 을 심재로 갖는 샌드위치 판재를 제작하여 압축, 전단, 굽힘 실험을 수행하여 같은 상대밀도에서 옥테트 트러스 심재를 갖는 것보다 더 높은 강도와 안정적인 파괴거동을 보임을 증명하였다.

Lee 와 Kang⁽³⁾는 카고메 트러스와 유사한 구조를 갖는 PCM 인 WBK(Wire-woven Bulk Kagome)를 제안하였다. 또한, 2009 년에 Lee 와 Kang⁽⁴⁾⁽⁵⁾은 WBK 를 나선형 와이어를 이용하여 3 차원 6 축으로 직조하여 트러스 PCM 을 제작하고 이에 대한 압축 특성을 평가하였다.

WBK 에 대한 Lee 와 Kang⁽³⁾⁻⁽⁵⁾의 연구결과에 따

§ 이 논문은 2010 년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술 대회(2010. 4. 22-23., 라테나콘도) 발표논문임.

† Corresponding Author, kjkang@chonnam.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

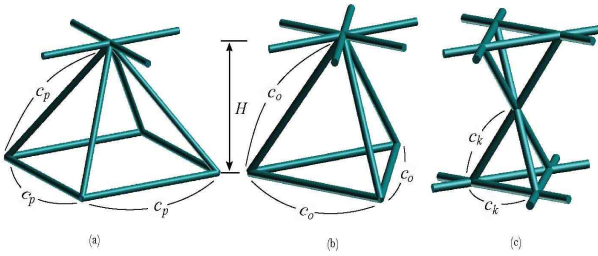


Fig. 1 Configurations of unit cells of ideal (a) pyramid, (b) octet, and (c) Kagome truss structures

르면 WBK 와 같은 연속된 나선형 와이어를 이용한 구조물은 연속적인 조립으로 강건하고 높은 비강도를 갖는 구조물이 될 수 있으며, 트러스 PCM의 대량생산도 가능하다고 하였다. 또한 와이어는 쉽게 소재 자체를 강화하여 강도를 높일 수 있고, 손쉽게 제작을 할 수 있을 뿐 아니라, 결함이 적은 높은 품질을 유지 할 수 있는 장점도 있으며, 나선형 와이어로 제작된 구조물의 압축 특성도 우수한 것으로 주장하였다.

본 연구에서는 WBK 와 같이 나선형 와이어로 직조할 수 있는 새로운 트러스 PCM 소재인 WBD(Wire-woven Bulk Diamond)를 제안한다. 그 기하학적, 기계적 특성을 예측하고 실제 실험한 결과와 비교하였다. 또한 동일한 와이어로 제작된 WBK 와 위의 여러 특성을 비교하고 분석하였다.

2. WBD 소개

2.1 WBD 소개

WBD 는 나선형 와이어를 이용하여 복수의 정팔면체와 14 면체(cub-octahedron 또는 vector equilibrium)로 이루어진 다층 트러스 구조체와 유사한 구조체를 조립한 것이다. Fig. 2 는 이상적인 트러스 구조, WBD truss 구조의 그림과 실제 제작된 WBD 시편 사진을 보여주고 있다.

2.2 강도와 이론 해의 정리

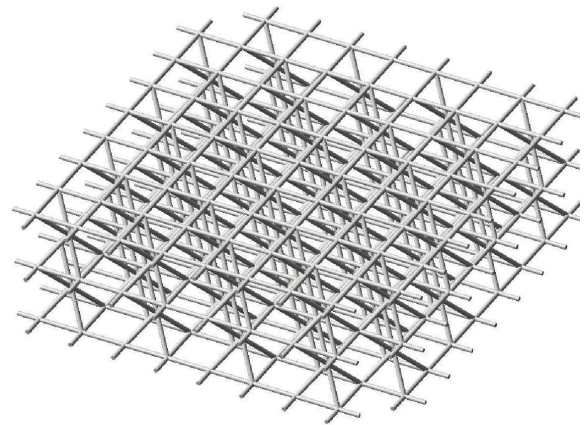
WBD truss PCM 의 압축강도를 예측하기 위하여 기본적인 재료역학에 기초한 식을 사용하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다.⁽⁵⁾

- i) 하중은 하중방향의 요소에만 전달된다.
- ii) WBD 트러스는 요소의 인장항복이나 취성 파괴가 아니라 탄성, 소성 좌굴에 의해 파손된다.

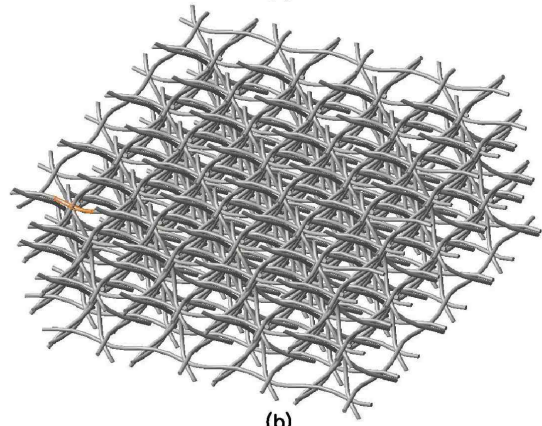
와이어의 탄성, 소성 좌굴에 의한 임계 하중은 다음과 같다.

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

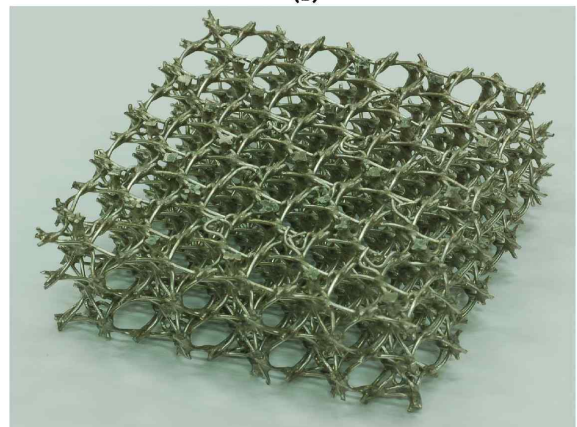
$$F_{cr,plastic} = \frac{\pi d^4}{4} \sigma_0 \quad (2)$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 (a) Ideal Diamond truss (b) WBD truss (c) WBD specimen

여기서, σ_0 , E 는 각각 소재의 항복응력과 Young 계수이다. k 는 트러스의 요소의 끝단 지지조건에 따른 상수이다. Fig. 3 은 WBD의 단위셀과 이론식의 유도에 사용된 이상적인 트러스의 단위셀을 보여주고 있다. Fig. 4 에서 트러스 구조물의 각 요소에 걸리는 하중은 다음과 같다.

$$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = \frac{Q}{2\sqrt{2}} \quad (3)$$

한개의 WBD 트러스가 지지하는 바닥 면적(A_u) 은 다음과 같으며 Fig. 5 에 도시되어 있다.

$$A_u = 2c^2 \quad (4)$$

위 식을 토대로 등가항복응력(σ_y^c)을 계산하면 다음과 같이 구해진다.

$$\sigma_y^c|_{\text{elasticbuckling}} = \frac{\sqrt{2}}{64} \pi^3 k E \left(\frac{d}{c}\right)^4 \quad (5)$$

$$\sigma_y^c|_{\text{plasticyielding}} = \frac{\sqrt{2}}{4} \pi \sigma_0 \left(\frac{d}{c}\right)^2 \quad (6)$$

Q 의 작용으로 생기는 변형(δ)은 다음과 같다.

$$\delta = \frac{c}{2EA_u} Q \quad (7)$$

WBD의 Young 계수는 다음과 같다.

$$\bar{E}_c = \frac{Q/A_u}{\delta/H} = \frac{\sqrt{2}}{8} \pi E \left(\frac{d}{c}\right)^2 \quad (8)$$

WBD의 상대밀도는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\rho_{rel} = \frac{3\sqrt{2}}{4} \pi \left(\frac{d}{c}\right)^2 \times \frac{\sqrt{c^2 + (\pi a)^2}}{c} + \frac{10V_b}{2\sqrt{2}c^3} \quad (9)$$

$$V_b = \frac{2}{3} B^3 + 2a^2 B + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} acB \cos \frac{\sqrt{2}\pi}{c} B - \frac{2ac^2}{\pi^2} \sin \frac{\sqrt{2}\pi}{c} B - \frac{\pi}{4} d^2 B \quad (10)$$

여기서 V_b 는 브레이징부의 부피, a 는 나선반경, B 는 브레이징부의 높이이다.

식 (5) ~ (9)은 단위 셀로부터 유도 되었으며 등가항복응력의 상계(upper bound)로 간주된다. 그러므로 위 식은 WBD 트러스가 무한히 커서 결함이나 측면의 자유 표면을 무시할 수 있을 때 가장 정확하다.

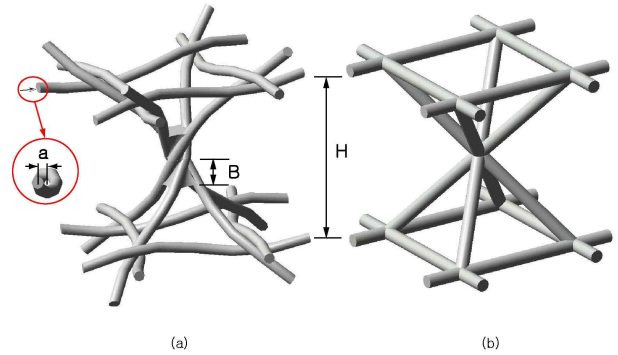


Fig. 3 Unit cell of (a) WBD(Wire-woven Bulk Kagome) and (b) the equivalent ideal truss

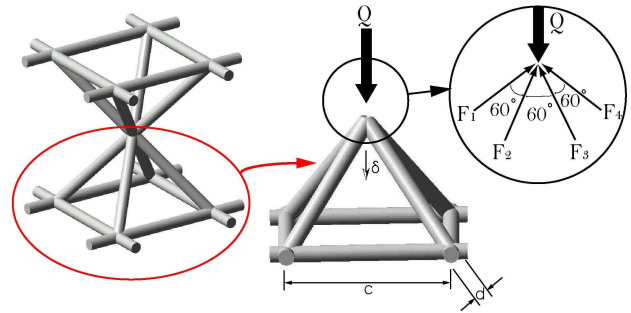


Fig. 4 Free body diagram of the equivalent ideal truss of WBD

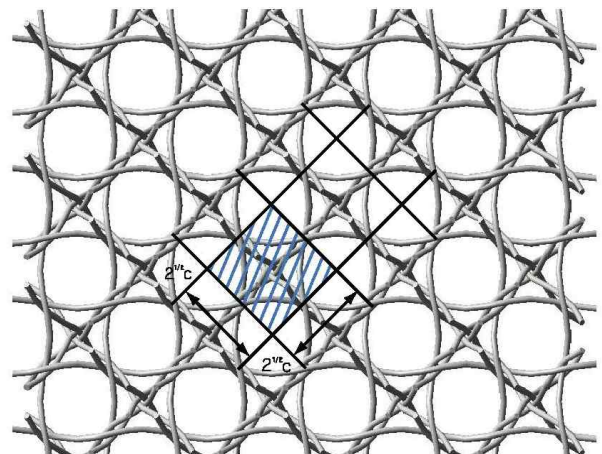


Fig. 5 Top view of WBD truss shown in Fig. 2(b). The hatched region indicates the area which a unit cell supports

비교대상인 WBK 의 등가항복응력(σ_y^c)은 다음과 같다.^(4,5)

$$\sigma_y^c \Big|_{\text{elasticbuckling}} = \frac{\sqrt{2}}{128} \pi^3 k E \left(\frac{d}{c} \right)^4 \quad (11)$$

$$\sigma_y^c \Big|_{\text{plasticyielding}} = \frac{\sqrt{2}}{8} \pi \sigma_0 \left(\frac{d}{c} \right)^2 \quad (12)$$

WBK 의 Young 계수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\bar{E}_c = \frac{Q / A_{WBK}}{\delta / H_{WBK}} = \frac{\sqrt{2}}{12} \pi E \left(\frac{d}{c} \right)^2 \quad (13)$$

WBK 의 상대밀도는 다음 같이 계산할 수 있다.

$$\rho_{rel} = \frac{3\sqrt{2}}{8} \pi \left(\frac{d}{c} \right)^2 \times \frac{\sqrt{c^2 + (\pi d)^2}}{c} + \frac{8V_b}{4\sqrt{2}c^3} \quad (14)$$

$$V_b = \frac{3\sqrt{3}}{4} \left[\frac{B^3}{6} + a^2 B + \frac{2\sqrt{3}}{3\pi} acB \cos \frac{\sqrt{6}\pi}{2c} B \right. \\ \left. - \frac{2\sqrt{2}ac^2}{3\pi^2} \sin \frac{\sqrt{6}\pi}{2c} B \right] - \frac{\pi}{8} d^2 B \quad (15)$$

3. WBD 실험

3.1 시편

WBD 시편들은 SUS304 와이어를 사용하여 제작 하였다. 제작 방법은 Lee⁽³⁾ 등에서 설명된 WBK 제작방법과 유사한 제작방법을 사용하였다. 그 제작 방법은 다음과 같으며, Fig. 6 에 완성된 WBD 압축시편이 도시되어 있다.

- 1) 곧은 와이어 4 가닥을 평행하게 비틀림 장치에 장착하고 비틀어서 연속적인 나선형 와이어를 제작한다.
- 2) 나선형 와이어를 정사각형의 격자 형태로 2D 구조를 제작한다.
- 3) 제작된 다수의 2D 구조물을 일정한 간격을 두고 적층을 한다.
- 4) 적층된 구조물을 plate 위쪽에서 4 방향으로 45°의 각도로 와이어를 삽입한다.
- 5) 완성된 3D 구조물에 Wall Colmonoy 사의 페이스트(Nicobraz LM BNI-2)를 도포한다.

6) 브레이징은 90 분에 걸쳐 온도를 930°C로 올리고 15 분 동안 온도를 유지한후 15 분에 걸쳐 온도를 1040°C로 올리고 15 분간 유지한다. 그 후 90 분에 걸쳐 온도를 상온까지 내려준다. 모든 과정은 10⁻⁴-10⁻⁵ torr 의 진공에서 이루어 진다.

7) 심재와 같은 재료인 SUS304 상하 면판을 에폭시(AXIA EP-04 epox)를 이용하여 접합한다.

WBD 의 와이어 직경(d)은 0.78, 0.98, 1.18mm 이고, 요소의 길이(c)는 8.1mm 이고, WBD core 에 부착된 plate 의 두께는 2mm 이며, 길이(L)는 100mm 이다. 시편들의 가장자리는 불규칙하며 하중을 지지할 수 있는 point 가 없기 때문에 하중을 지지하는 면적이라고 할수 없다. 실제 시편이 지지하는 유효 단면적(effective area)은 $A_e = L_e \times W_e$ 로 정의한다.⁽⁵⁾ 여기서 L_e , W_e 는 유효 길이와 유효 폭이다.

WBD 시편들은 Pointed faced 시편으로 실험 결과의 정확성을 얻기 위해서 core 의 지름에 따라 2 개씩의 시편을 준비하여 실험하였다. 이론값과 실험값의 비교는 사용된 시편의 unit cell 갯수 만큼 실험값을 나누어서 이론값과 비교하였다. Core 의 지름과 길이 그리고 시편의 unit cell 갯수는 Table. 1 에 나타나 있다.

3.2 압축 실험

WBD 에 대한 모든 압축실험은 Instron-Satec TC-55 를 이용하여 압축 실험을 하였다. 0.01mm/sec 의 변위 제어로 압축을 하였다. 모든 시편의 충분한 압축 거동을 얻기 위하여 변형률(ϵ)을 약 40%가

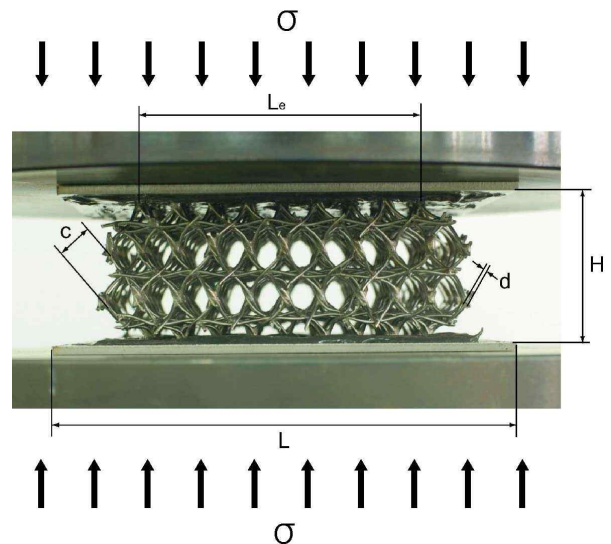


Fig. 6 Sandwich plate with Wire-woven Bulk Diamond (WBD) truss core

지 압축하였다

4. 결과 및 토론

4.1 WBD의 압축거동

Fig. 7은 3층으로 형성된 WBD의 압축 실험 결과와 이론 압축 강도를 나타내고 있다. WBD의 압축 실험 결과, 세장비 $d/c = 0.096$ 인 시편은 항복강도가 약 1.72MPa이고, $d/c = 0.121$ 인 시편은 3.9MPa, $d/c = 0.146$ 인 시편은 5.92MPa를 가지는 것을 알 수 있었다. 이상의 측정치는 식(6)의 이론 강도와 비슷하거나 높게 나타나고 있다. Table 2는 WBD와 WBK의 압축강도, 탄성계수 및 상대밀도의 이론치와 측정치를 요약하여 나타내고 있다.

3가지 직경 모두에서 처음의 탄성변형 구간을 지난후 최대압축응력이 나타났다. 그후 굴곡진 형태로 strain-stress curve가 형성되었다. 초기 피크점 이후 다시 강도가 증가하는 시점이 변형률 0.08, 0.12, 0.14 순으로 세장비(d/c)가 커질수록 지연됨을 확인할 수 있었다.

4.2 WBK의 압축거동

Lee^(4,5) 등의 논문을 보면 층수에 따른 응력-변형률 곡선은 거의 유사한 값을 가진 것을 확인할 수 있었다. 다소 오차가 존재하지만 이러한 오차는 엔지니어링 응용에서 허용할 수 있다고 하였다. 그렇기 때문에 층수에 관계 없이 WBD와 WBK의 응력-변형률 곡선을 토대로 두 구조물을 비교할 수 있다고 판단한다.

Table 1 The diameter, strut lengths and type of the WBD specimens and the WBK specimens

	Diameter, d(mm)	Strut length, c(mm)	No. of cells
WBD	0.78	8.1	5 X 5
	0.98		5 X 5
	1.18		5 X 5
WBK	0.78		5 X 5
	0.98		5 X 5
	1.18		5 X 5

Fig. 8은 WBK의 2층 구조에 요소의 길이(c)는 8.1mm로 직경 변화에 따른 실험의 결과를 보여주고 있다. 와이어 직경(d)인 0.78, 0.98, 1.18mm에 따른 각각의 와이어 세장비는 $d/c=0.096, 0.121, 0.146$ 이다. WBK의 압축 결과에 대한 내용은 Lee⁽⁴⁾⁽⁵⁾ 등의 논문에서 설명되어 있으며 WBK의 압축강도는 Table 2에 나타내었다.

4.3 WBD와 WBK의 비교

WBD와 WBK의 응력-변형률 선도는 탄성 변형

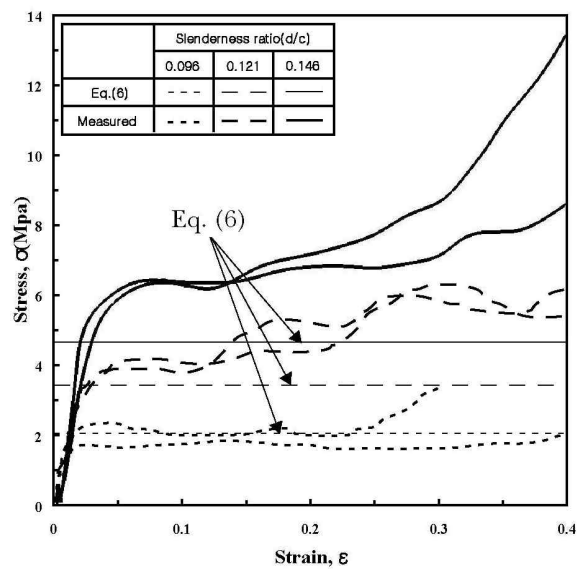


Fig. 7 The stress-strain curves measured by compression tests of WBD

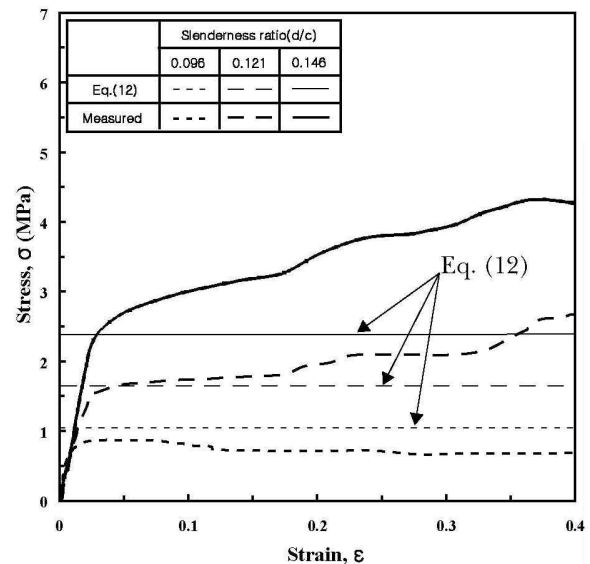


Fig. 8 The stress-strain curves measured by compression tests of WBK

Table 2 Strength, Young’s modulus, and relative density of WBD and WBK for three levels of slenderness ratios

	Slenderness ratio (d/c)	Yield stress σ_{max} (MPa)		Young’s Modulus \bar{E}_c (MPa)		Relative Density ρ_{rel} (%)		
		Theory	Experiment	Theory	Experiment	Theory		Experiment
						Ideal	Curvature + Brazing	
WBD	0.096	2.048	1.72	1032	574	3.08	3.72	4.64
	0.121	3.252	3.89	1626	1480	4.88	5.90	6.29
	0.146	4.715	5.92	2258	2123	7.08	8.51	8.10
WBK	0.096	1.03	0.83	687	282	1.54	1.63	1.77
	0.121	1.63	1.56	1084	962	2.44	2.59	2.77
	0.146	2.36	2.64	1571	1781	3.54	3.76	3.89

구간을 지난 후 반복적인 굴곡의 형태가 나타난다. WBD 와 WBK 는 세장비가 $d/c=0.096, 0.121, 0.146$ 으로 커질수록 압축강도도 증가하고 있다.

WBD 최대압축응력의 실험값은 이론값에 비해 세장비가 $d/c=0.096$ 일 때 16%정도 낮고, $d/c=0.121$ 일 때 20%, $d/c=0.146$ 일 때 26%정도 높으며 WBK 의 최대압축응력은 실험값과 이론값이 유사하다.

WBD 가 WBK 보다 이론적으론 세장비에 상관없이 약 2.3 배의 무게를 가지고 압축강도의 값은 2 배 상승하며, 실질적으로는 세장비가 $d/c=0.096$ 일 때 2.62 배의 무게를 가지면서 압축강도의 값은 2.06 배 상승, 세장비가 $d/c=0.121$ 일 때 2.27 배의 무게를 가지면서 압축강도의 값은 2.5 배 상승, 세장비가 $d/c=0.146$ 일 때 2 배의 무게를 가지면서 압축강도의 값은 2.24 배 상승만 보여주고 있다.

Table 2 에서 동일 세장비에 대하여 WBD 와 WBK 의 경우에는 세장비가 $d/c=0.096$ 인 경우를 제외하고 실험값과 이론값은 서로 유사한 수준이다. 그리고 동일 세장비에 대하여 이론 영계수는 WBD 가 항상 WBK 보다 1.5 배 높은 값을 갖으나 실제 실험결과와는 약 1.4 배의 높은 값을 갖는다.

Fig. 9 를 보면 $\sigma_{max} / \sigma_0 \rho_{rel}$ 의 이론값은 0.33 정도로 일정한 값을 이루고 있지만 실험값은 WBD 와 WBK 모두 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10 에서 WBD 의 $E_c / E \rho_{rel}$ 이론값은 0.167 정도로 일정한 값을 이루고 있으며, 실험값은 선

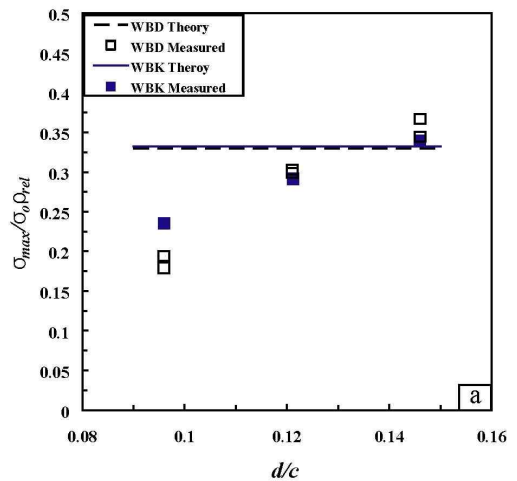


Fig. 9 Normalized strength versus slenderness ratios

형적으로 점점 증가한다. WBK 의 경우도 이론값은 0.21 로 WBD 와 마찬가지로 세장비에 구애 받지 않고 실험값은 세장비가 증가함에 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

4.4 토론

WBD 도 WBK 와 마찬가지로 세장비가 압축강도에 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있었으며 여러 층을 가진 구조물이기 때문에 응력-변형률 선도에서의 거동이 반복적인 굴곡을 나타나는 것을 알 수 있었다.

Fig. 11 은 와이어가 나선형일 때의 편심상태와

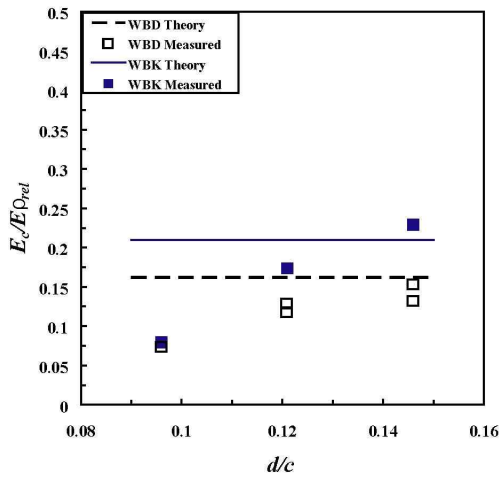


Fig. 10 Normalized stiffness versus slenderness ratios

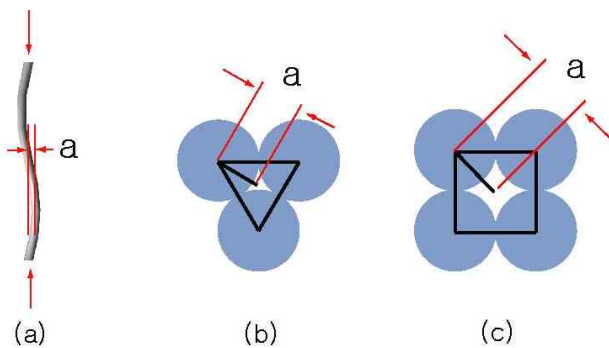


Fig. 11 (a) Eccentricity of struts under axial compression due to helical radius of wire used for fabricating (b) WBK (c) WBD

WBK, WBD의 나선반경을 보여준다. 도시된 바와 같이 WBD의 교차점에서는 4개의 와이어가 접하므로 이를 구성하는 나선와이어의 이론적 최소 나선반경은 $a = (\sqrt{2}/2)d$ 이고, WBK의 교차점에서는 3개의 와이어가 접하므로 나선반경은 $a = (\sqrt{3}/3)d$ 이다. 따라서 WBD의 나선 반경이 WBK보다 약 22.5% 높다. 나선반경이 커지면서 와이어의 편심효과가 증가하기 때문에 WBD의 압축강도가 WBK보다 이론값과 실험값의 차이가 크게 나타난 것으로 추정된다. 이와 같은 트러스 PCM에서 스트럿의 굴곡이 강도 및 강성도에 미치는 효과(waviness effect)에 대해서는 참고문헌(7,8)에도 보고된 바 있다.

식 (9)와 식 (14) 처럼 나선과 브레이징부를 고려하게 되면 상대밀도는 약 6%정도 증가하게 된다. 이중 브레이징부만을 살펴보면 세장비가 $d/c=0.096$ 일때는 3.7%, 세장비가 $d/c=0.121$ 일때는

2.5%, 세장비가 $d/c=0.146$ 일때는 1.0%의 상대밀도를 증가시키게 된다. 그러므로 브레이징부는 세장비가 작을수록 상대밀도에 많은 영향을 미치게 되기 때문에 WBD나 WBK에 있어 브레이징부는 중요한 요소이다.

5. 결론

WBD가 WBK보다 이론 압축강도가 2배 상승하고 실험 압축강도가 세장비가 $d/c=0.096$ 일때 2.62배, 0.121일 때 2.06배, 0.146일때 2.24배 정도 높은 응력을 나타나는 것으로 보아 와이어가 1개 늘어남으로써 보다 높은 강도를 가지게 된다.

상대밀도 대비 항복응력은 WBD와 WBK가 이론과 실험에서 비슷하지만, WBK보다 WBD의 밀도 및 강도의 절대값이 크므로 보다 높은 하중을 받는 경우에 적합할 것으로 보인다. 상대밀도 대비 영계수는 WBD가 WBK보다 이론과 실험에서 현저히 낮다.

후기

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

참고문헌

- (1) 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, 6989~6998.
- (2) Wang, J., Evans, A. G., Dharmasena, K. and Wadley, H. N. G., 2003, "On the Performance of Truss Panels with Kagome Cores." *International J. of Solids and Structures* Vol. 40, 6981~6988.
- (3) Lee, Y.-H., Lee, B.-K., Jeon, I. and Kang, K.-J., 2007, "Wire-Woven Bulk Kagome (WBK) Truss Cores." *Acta Materialia* Vol. 55, 6039~6400.
- (4) Lee, B.-K., Jeon, I. and Kang, K.-J., 2009, "Compressive Characteristics of WBK Truss Cores," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol.23, pp.14~18.
- (5) Lee, B.-K. and Kang, K.-J., 2009, "A Parametric Study on Compressive Characteristics of Wire-Woven Bulk Kagome Truss Cores," *Composites Structures*, Vol.92, pp.445~453.
- (6) Buckminster Fuller, 1975, *Synergetics: Explorations in the Geometry of Thinking*, Macmillan Publishing Co., p.669.
- (7) Park, J.-S., Joo, J.-H., Lee, K.-W. and Kang, K.-J.,

2010, "Truss Waviness Effects on Mechanical Behaviors of WBK," *Proceedings of KSME Spring Conference*, pp.297~302

(8) Queheillalt, D. T., Deshpande, V. S., Wadley, H. N.

G., 2007, "Truss Waviness Effects In Cellular Lattice Structures," *Journal Of Mechanics Of Materials And Structures*, Vol. 2, No. 9, 1657~1675.