

다구찌법을 이용한 WBK(Wire-woven Bulk Kagome)의 최적설계

최지은* · 강기주 †

Optimal design of an Wire-woven Bulk Kagome using taguchi method.

Ji -Eun Choi and Ki-Ju Kang

Key Words : PCM(Periodic Cellular Metal; 규칙적 다공질 금속), WBK(Wire-woven Bulk Kagome; 와이어로 직조한 벌크형 카고메), Ultra Light Metal Structure(초경량 구조물)

Abstract

A Wire-woven Bulk Kagome (WBK) is the new truss type cellular metal fabricated by assembling the helical wires in six directions. The WBK seems to be promising with respect to morphology, fabrication cost, and raw materials. In this paper, first, the geometric and material properties are defined as the main design parameters of the WBK considering the fact that the failure of WBK is caused by buckling of truss elements. Taguchi approach was used as statistical design of experiment(DOE) technique for optimizing the design parameters in terms of maximizing the compressive strength. Normalized specific strength is constant regardless of slenderness ratio even if material properties changed, while it increases gradually as the strain-hardening coefficient decreases. Compressive strength of WBK dominantly depends on the slenderness ratio rather than one of the wire diameter, the strut length. Specifically the failure of WBK under compression by elastic buckling of struts mainly depended on the slenderness ratio and elastic modulus. However the failure of WBK by plastic failed marginally depended on the slenderness ratio, yield stress, hardening and filler metal area.

1. 서론

최근에는 가볍고 높은 강도를 가지는 경량화 재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 운송기 부분에서 구조의 경량화는 에너지절감과 환경오염을 감소시킬 수 있다. 특히 규칙적 다공질 금속(PCM)인 트러스 PCM은 경량화 재료로서 주목 받고 있다. 트러스 PCM은 부피의 대부분이 비어 있고 규칙적인 구조를 가지고 있어 비강도 와 비강성은 매우 높고, 이는 허니컴 구조와 대등하다. 또한 내부가 개방형(open cell)으로 구성되어 다기능성(multi-functionality)이 기대된다. 즉 유체의 저장이나 이동통로, 배선 또는 기계적 하중을 지지

할 수 있는 구조재(기계, 건축 등) 기능이 있다. 그리고 넓은 표면적 때문에 열전달 특성이 우수하여 열전달매체나, 열흡수원 촉매용 서포트 등으로 활용이 기대되고 있다.⁽¹⁾ 대표적인 트러스 PCM은 피라미드(pyramid)⁽²⁾, 옥테트(octet)⁽³⁾, 카고메(Kagome)⁽⁴⁾ 등이 제안되고 있다. 이 중 카고메 트러스는 옥테트와 비교하여 탄성강성은 비슷하나, 단위셀을 구성하는 트러스요소의 길이가 옥테트의 절반이기 때문에 좌굴에 대한 강도는 옥테트보다 최고4배까지 높아질 수 있다. 또한 트러스가 작은 사면체와 큰 팔면체로 구성되어 내부 공간 활용성이 높고 낮은 이방성을 갖는 등 우수하다.

Kang 등은 나선형 금속와이어를 소재로 카고메 트러스와 유사한 WBK(Wire-woven Bulk Kagome)을 제안하였다⁽⁶⁾. WBK는 3차원 공간에서 6방향의 나선형 금속 와이어를 서로 교차 조립하고, 이 교차점은 브레이징 공정을 통하여 접합된다. WBK는 조립공정에서 연속적으로 와이어를 공급함으로써

† 회원, 전남대학교 기계시스템공학부

E-mail : kjkang@chonnam.ac.kr

TEL : (062)530-1668 FAX : (062)530-1689

* 전남대학교 자동차연구소

대량생산이 가능하고 덩어리 형태(bulk material) 즉, 다층 트러스 PCM으로 제작할 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 상대밀도에 비하여 높은 표면적을 가짐으로써 열전달매체로의 높은 잠재성도 확인되었다. Fig.1은 WBK을 나타내고 있다.

지금까지 WBK의 연구로는 WBK의 기계적 성능에 대한 연구가 주로 이루어졌다. 특히 스텐레스 와이어로 세장비 $d/c=0.1$ 로 제작된 WBK의 압축, 전단, 굽힘강도가 직선 트러스 요소로 구성된 카고메 구조와 비슷한 우수한 강도를 보이는 것은 트러스 요소가 골격처럼 있다는 점을 고려하면 매우 흥미로운 결과이다.^(8,9) 심지어 최근 Lee등은 기하학적 요인인 와이어의 직경과 길이의 비인 세장비를 변화시켜 여러 가지 WBK을 제작하고 각각의 압축성능을 비교한 결과 세장비가 증가할 수록 직선 트러스로 가정한 이론강도보다 높게 평가됨을 보고하였다. 또한 와이어를 구성하는 재료를 고강도 강을 적용하여 높은 기계적 성능을 얻을 수 있음을 보였다.

이전의 연구로부터 WBK의 강도는 세장비 뿐 아니라 브레이징부의 크기라던지 와이어의 재료에 크게 의존적일 것이 명백하다. 따라서 우수한 강도와 다기능성이 기대되는 WBK를 목적과 용도에 맞게 설계를 변경할 수 있도록 주요 설계인자를 규명할 필요가 있다. 또한 이러한 설계인자들이 WBK의 기계적 성능에 어떻게 영향을 주는 지 평가할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 첫째, WBK의 기계적 성능을 결정짓는 설계인자를 규명하였다. 이를 위해 압축하중 하에서 WBK의 파손은 좌굴에 지배적이라고 가정하였다. 그리고 트러스 요소의 좌굴에 지배적인 영향 인자로부터 WBK의 설계인자를 선정하였다. 둘째, 선정된 설계인자들이 WBK의 기계적 성능에 미치는 영향을 평가하였다. 이를 위해 기존 실험계획법에 비해 최소의 실험회수로 최적설계를 할 수 있으며 여러 설계변수등의 효과 분석에 유용한 다꾸지법을 적용하였다. 마지막으로 압축하중을 받는 WBK가 최대강도를 갖도록 설계방향을 제시하고자 한다.

2. WBK의 설계인자

2.1 트러스 PCM에서 좌굴이론

트러스 PCM의 파괴는 주로 트러스 요소의 좌굴 하중에 지배적이다. 그 원인은 트러스 요소가 단면적에 비하여 길이가 상대적으로 길기 때문이다. 현재까지는 이상적인 피라미드, 사면체, 옥테드, 카고메 트러스 PCM은 국부적인 결함이 없

고 완벽하게 균일한 구조를 갖는다는 가정을 토대로 단위셀의 소성 좌굴 하중으로부터 전체 PCM의 강도를 예측하였다.

따라서 본 연구에서는 트러스요소의 좌굴하중에 영향을 주는 인자로 부터 WBK의 압축강도에 영향을 주는 설계인자들을 선정하였다. 그리고 기하학적 인자와 재료적 인자로 구분하였다. 트러스 요소의 임계 좌굴 하중에 영향을 주는 인자는 세장비, 양단의 지지상태, 편심량 그리고 재료의 탄성계수값과 항복응력값이다. 선행연구에서 WBK의 이론강도 예측은 탄성좌굴과 소성좌굴에서 각각 세장비의 함수로 표현됨을 알 수 있었다. Fig. 2는 Lee⁽⁹⁾의 세장비에 따른 WBK의 압축실험결과로서 세장비가 증가함에 따라 압축강도가 증가함을 보여준다. 따라서 세장비가 WBK의 압축강도에 영향을 주는 중요한 설계인자이다.

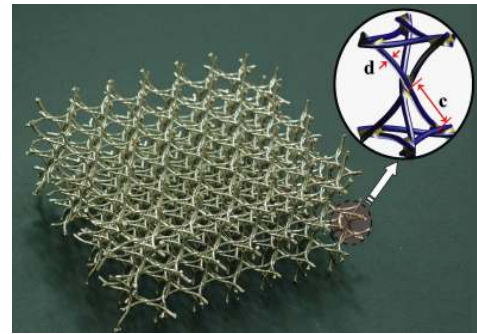


Fig. 1 Configurations of the three-dimensional Kagome Truss woven by six directional helical wires(WBK). The Enlarged view of the unit cell reveals a cross point of three helical wires filled with brazing metal.

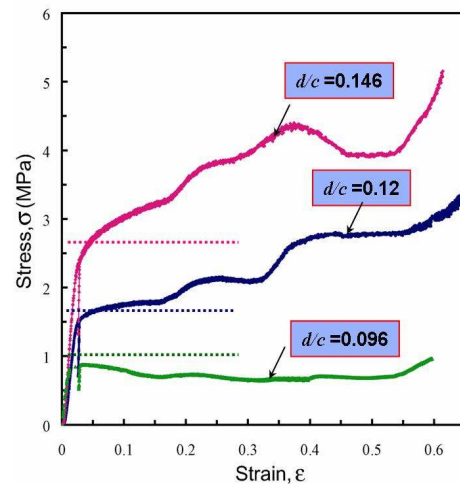


Fig. 2 The stress-strain curves measured by compression tests for the WBK specimens with a constant strut length and three different wire diameters.

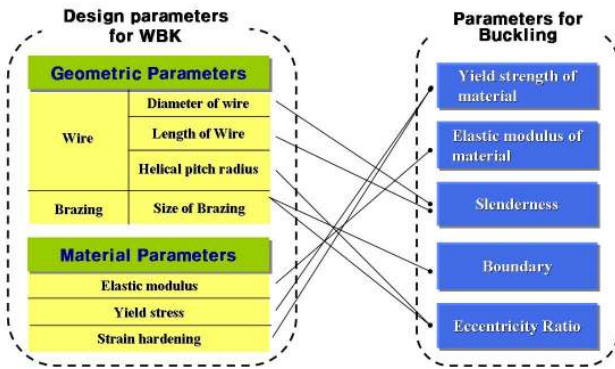


Fig. 3 The design parameters for WBK in relation with mechanical behavior and buckling.

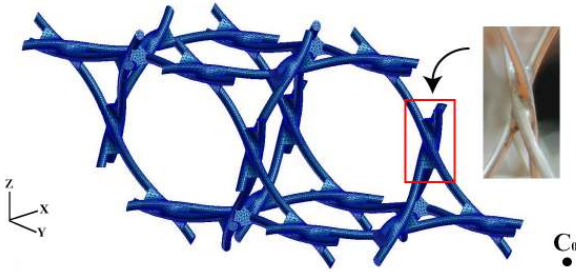


Fig. 4 Finite element model of the WBK unit cell with enlarged image of a brazed joint in the SUS 304 stainless steel WBK specimen

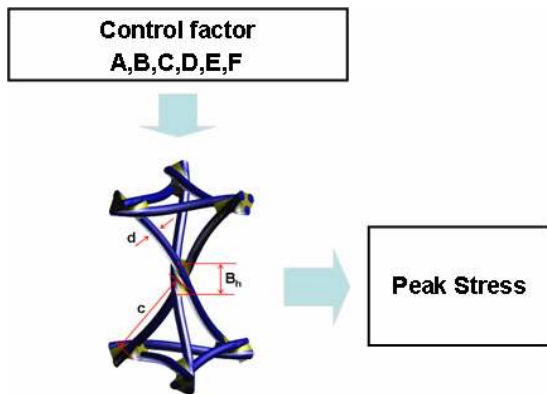


Fig. 5 Parameter diagram

이 밖에도 브레이징부의 높이는 트러스 요소의 좌굴 하중에 영향을 주는 경계조건과 편심율에 관계된다. 그러나 편심율에 영향을 주는 와이어의 나선 반경(helical radius)은 와이어의 직경에 비례하는 관계를 가짐으로 종속변수이다. 결과적으로 독립변수인 와이어의 직경과 길이 그리고 브레이징부의 크기가 WBK의 형상을 결정하는 기하학적 설계인자라고 할 수 있다. 특히 WBK는 최대 상대밀도는 6.3%까지만 조립하여 제작이 가능하다. 그 이유는 와이어의 교차점에서 충돌을 피해야 하는 기하학적 특성 때문이다. 이

기하학적 특성은 Hur⁽⁷⁾ 등의 논문에서 자세히 기술되어 있다.

다음으로 재료적 설계인자는 와이어와 브레이징부분의 강성과 항복응력 값, 가공 경하지수로 정의 할 수 있다. 탄성계수 값과 항복응력 값은 임계 좌굴 하중에 영향을 주는 또 다른 중요한 재료적인 설계인자이다. 탄성계수 값이 항복응력에 비해 훨씬 큰 재료는 탄성좌굴 보다는 소성좌굴에 지배적일 가능성이 크다. 이는 탄성좌굴과 소성좌굴이 발생하는 임계 세장비가 작아지기 때문이다. 반면, 항복응력이 탄성계수 값보다 훨씬 크면 이 재료는 탄성좌굴 영역에 지배적이다.

Fig.3은 WBK의 압축강도에 영향을 주는 설계인자들을 트러스 요소의 좌굴에 지배적인 인자와의 관계를 도시하였다.

2.2 WBK의 압축해석모델

WBK의 압축응력에 영향을 미치는 여러 설계인자들의 영향을 고려하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. 이는 WBK가 굴곡된 트러스 요소와 브레이징 부분 등 복잡한 기하학적 형태로 구성되어 있기 때문이다. 선행 연구에서 WBK의 단위구조에 주기경계조건(PBC)을 적용하여 단위구조만으로 전체의 거동을 효과적으로 평가할 수 있었다.⁽¹⁰⁾ 이러한 주기경계조건은 많은 수의 단위구조가 규칙적으로 반복되어 형성되는 PCM 구조물을 해석하고자 하는 경우 구조물의 주기성을 이용하여 단위구조에 적절한 경계조건을 줌으로써 간단하고 효과적으로 문제를 해석할 수 있는 방법이다. Fig.4는 주기경계조건이 적용된 WBK의 단위구조 해석모델이고, 단위구조에 적용된 주기경계조건은 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 u_1|_j - u_1|_{j'} &= u_1(C_0) \\
 u_2|_j - u_2|_{j'} &= u_2(C_0) \quad (j, j' = 1, 2, \dots, n) \\
 u_3|_j - u_3|_{j'} &= u_3(C_0)
 \end{aligned} \tag{1}$$

2.3 직교배열표를 이용한 실험계획법

설계인자가 WBK의 기계적 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 실험계획법의 한 종류인 다꾸지법을 적용하였다. 실험계획법은 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 방법이다. 특히 최소한의 실험으로 모든 경우에 대한 실험값을 예

측할 수 있으며 이러한 실험이 가능하도록 만든 실험배열을 직교배열이라 한다. 직교배열 이용 실험계획법에서는 전체 실험에 대하여 실험인자들 각 수준의 균형특성(balancing property)이 유지되므로 한인자의 효과를 구할 때 다른 인자의 영향에 대한 치우침이 없는 장점이 있다. 특히 다꾸지 겐이찌는 제어인자들 간의 교호작용(Interaction) 들이 모든 행들에 거의 균등하게 교락되어 있는 $L_{18} = (2^1 \times 3^7)$ 직교배열표 사용을 강건설계를 하는데 권장하고 있다.

따라서 본 연구에서는 여러 설계변수들의 영향과 수준들을 분석하기 위해 다꾸지 겐의 혼합 직교배열표 $L_{18} = (2^1 \times 3^7)$ 를 적용하였고 이로써 2187 번의 해석횟수를 18 개로 획기적으로 줄일 수 있었다.

WBK 의 기계적 성능에 영향을 미치는 설계인자들은 Fig. 3 에서 규명하였다. 기하학적 인자는 와이어의 직경과 길이 그리고 브레이징부의 크기이다. 여기서 와이어의 직경과 길이를 세장비로 표현하고 브레이징부의 크기는 와이어의 길이에 대한 상대적인 비로 나타내었다. 특히 WBK 는 최대상대밀도가 6.3%까지 가능하므로 와이어의 길이 8.1 에 조립이 가능한 직경의 크기는 1.26 이다. Table 1 에 해석에 적용된 WBK 의 형상을 자세히 나타내었다. 재료적 설계인자로는 와이어와 브레이징 부의 탄성계수 값, 항복응력 값과 가공경화 지수이다. 여기서, 와이어와 브레이징부의 물성치는 각각의 재료적 물성 비로서 항복 응력 비와 탄성계수의 비로 나타내고 전체적인 물성은 재료의 탄성계수값과 항복응력값의 상대적인 비, 항복변형률, $\varepsilon_y = \frac{\sigma_0}{E}$ 로 정의하였다.

Table 1 Geometry Parameters for finite element analysis

Case	1	2	3
d(mm)	0.4	0.78	1.26
c(mm)	8.1	8.1	8.1
Filler metal area(mm)	1	3	5

Table 2 Material property for finite element analysis

Material	SUS304	Al	Spring
E (Gpa)	170	71	201
σ_0 Mpa	184	210	1010
$\varepsilon_y(\sigma_0/E)$	0.001	0.003	0.005
Density	8	2.7	7.8

Table 3 Design parameters of WBK and levels

Factors			Levels		
			1	2	3
Geometry	A	d/c	0.05	0.1	0.16
	B	B/c	0.12	0.4	0.6
Material	C	$\varepsilon_y(\sigma_0/E)$	0.001	0.003	0.005
	D	n_s	4	6	∞
	E	E_B/E_s	0.1	1	10
	F	σ_0^B/σ_0^s	0.1	1	10

한편, 소성영역에서 주요한 파괴인자중 하나인 변형률 경화(Strain hardening)는 식 (6)의 Ramberg-Osgood 관계식을 나타내고 있으며 변형률 경화(Strain hardening)를 4,6, ∞ 으로 가정하였다. 해석에 사용된 재료는 SUS304, 알루미늄, Spring강으로 가정하였고 Table 1에 재료의 물성을 자세히 나타내었다.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \frac{\sigma_0}{E} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad \alpha \frac{\sigma_0}{E} = 0.002 \quad (2)$$

6 개의 실험인자를 A,B,C,D,E,F 라 하고 각 수준을 1,2,3 으로 정의하고 Table.3 에 각 인자의 수준을 나타내었다. Table 4 는 Table 3 에 대한 직교행렬 이용 실험계획표 이다. Table 4 에 나타난 행렬값 1,2,3 은 각 인자의 수준을 나타내는데, 각 열은 서로 직교성을 가지며, 각 인자의 열에는 같은 회수의 인자수준이 나타낸다. 기하학적 인자는 2 열에서 3 열까지 배치하고 4 열에서 7 열까지는 재료적 설계인자를 배치하였다. 나머지 두열은 오차 항으로 배치하였다. 그리고 특성치로서 최대응력을 선정하였다.

3. 해석결과

3.1 평균 분석에 의한 인자의 최적수준 선정

압축 하중을 받는 WBK 해석결과로부터 선정된 설계인자의 영향을 체계적으로 해석하기 위하여 평균치 분석(analysis of mean)을 수행한다. 평균분석은 전체평균으로부터 설계변수 수준에 의한 결과의 편차로 정의되는 설계변수 수준의 평균 분석을 통해서 최적해를 구하고 각 수준에서의 해석결과와 비교하여 우수한 값을 최적해로 선정한다. 최적 수준을 선정하기 위해서는 다꾸지 겐의 신호대 잡음비는 (Signal/Noise ratio)을 이용하였다. 신

호대 잡음비는 (Signal/Noise ratio)는 목표치(y)에서 벗어난 정도를 손실적 측면으로 다룬 것으로 성능의 평균과 산포를 동시에 고려할 수 있다. 즉 개선을 위한 정도를 나타내는 측정치이다. 본 연구에서는 WBK의 최대압축하중이 크면 클수록 좋은 망대특성(larger-then-better type) 분석에 준하여 실행하였다. S/N 비가 높을수록 개선이 잘 된 것으로 판단하며, 망대특성의 S/N 비는 다음과 같이 계산된다.

$$SN = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (3)$$

여기서, n은 동일한 인자 수준조합에서의 총 해석 수이며 y는 그때의 각각의 해석 값이다. Table. 5는 신호대 잡음비를 이용하여 각 설계변수에 대한 수준의 효과를 구하기 위하여 망대특성을 가지는 최대응력에 대한 인자들의 효과와 편차 기여율을 나타내었다.

Table 4 Results of L18 orthogonal array

	e	A	B	C	D	E	F	e	Stress (KN)	S/N
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.14	-17.1
2	1	1	2	2	2	2	2	2	0.19	-14.2
3	1	1	3	3	3	3	3	3	1.12	0.95
4	1	2	1	1	2	2	3	3	0.70	-3.1
5	1	2	2	2	3	3	1	1	0.63	-4.0
6	1	2	3	3	1	1	2	2	6.64	16.4
7	1	3	1	2	1	3	2	3	2.62	8.4
8	1	3	2	3	2	1	3	1	13.15	22.4
9	1	3	3	1	3	2	1	2	2.00	6.0
10	2	1	1	3	3	2	2	1	0.51	-5.8
11	2	1	2	1	1	3	3	2	0.22	-13.2
12	2	1	3	2	2	1	1	3	0.27	-11.4
13	2	2	1	2	3	1	3	2	0.54	-5.3
14	2	2	2	3	1	2	1	3	4.18	12.4
15	2	2	3	1	2	3	2	1	1.30	2.3
16	2	3	1	3	2	3	1	2	9.24	19.3
17	2	3	2	1	3	1	2	3	1.81	5.2
18	2	3	3	2	1	2	3	1	5.30	14.5

3.2 분산 분석에 의한 인자의 영향평가

WBK의 설계인자가 기계적 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 분산분석을 수행하였다. 분산분석은 특성치의 산포에 대해 제곱합으로 나타내고 이 제곱합을 실험과 관련된 인자의 제곱합으로 분해하여 오차에 비해 특히 큰 영향을 주는 인자가 무엇인가를 찾아내는 분석방법이다.

Table 5 Response table for signal to noise

Factor	Effect			Deviation	PC (%)
	1	2	3		
d/c	-10.12	3.1258	12.62	22.74	46.4
B/c	-0.61	1.43	4.80	5.41	11.0
$\epsilon_y(\sigma_0/E)$	-3.31	-2.00	10.94	14.26	29.1
n_s	3.58	2.55	-0.51	4.09	8.3
E_B/E_s	1.71	1.63	2.29	0.66	1.3
σ_0^B/σ_0^s	0.88	2.03	2.71	1.83	3.7

Table 6 Analysis of variance(ANOVA)

Factor	S	ϕ	V	F	P
d/c	1329.44	2	664.72	1287.59	0.0000
B/c	88.97	2	44.48	86.17	0.0022
$\epsilon_y(\sigma_0/E)$	745.04	2	372.52	721.59	0.0001
n_s	53.51	2	26.76	51.83	0.0047
E_B/E_s	1.58	2	0.79	1.53	0.3490
σ_0^B/σ_0^s	33.05	2	16.52	32.01	0.0095
Error	1.55	3	0.52		

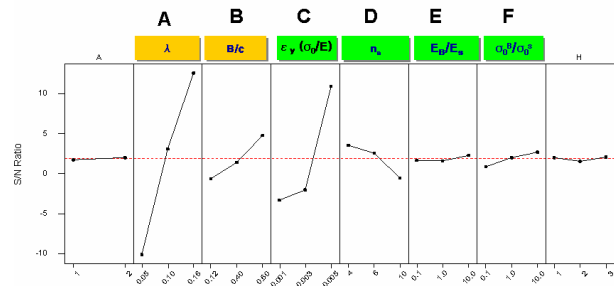


Fig. 6 Effect of design parameters on WBK by S/N ratio.

Table 5는 WBK의 설계인자에 대한 분산분석 결과이다. 여기서 S, ϕ , V, F, p는 특성치의 변동, 자유도, 분산, 분산비, 인자가 특성치에 영향을 주지 않을 확률이다.

분산분석 결과 세장비 (d/c)와 항복 변형률 $\epsilon_y(\sigma_0/E)$ 의 p값은 매우 작고 분산의 차이도 심함을 알 수 있다. 반면에 브레이징부와 와이어의 재료 물성적 차이인 E_B/E_s 와 σ_0^B/σ_0^s 는 p값이 크고 분산의 차이도 상대적으로 적다.

따라서 세장비, (d/c)와 항복 변형률 $\epsilon_y(\sigma_0/E)$ 은 WBK의 최대강도에 가장 큰 영향을 주는 인자이다. 반면 브레이징부와 와이어의 재료물성적 차이를 나타내는 인자 E_B/E_s 와 σ_0^B/σ_0^s 은 최대응력에 미치는 영향이 아주 작다.

3.3 세장비와 ϵ_y 영향

평균분석과 분산분석의 결과로부터 WBK의 강도에 가장 많은 영향을 주는 인자는 기하학적 설계인자인 세장비와 재료적 설계 인자인 와이어의 탄성계수 값과 항복응력 값이다. 따라서 WBK의 최대강도가 세장비와 와이어의 항복변형률, ϵ_y 에 대해 어떤 영향을 받는지 평가하였다. Fig. 7는 WBK의 단위셀에 압축하중 작용시 기하학적 설계인자인 세장비의 변화와 재료적인 인자인 항복변형률의 변화에 따른 최대 압축하중을 나타내고 있다. 여기서, 해석모델의 길이는 8.1mm로 일정하고 가정된 항복변형률, ϵ_y 는 0.001~0.005 범위이며 탄성 및 완전 소성재료로 가정한 경우이다.

항복변형률, ϵ_y 의 영향은 세장비가 증가할수록 커진다. 그리고 각 세장비에 대하여 SUS304와 Al의 최대강도는 유사하다.

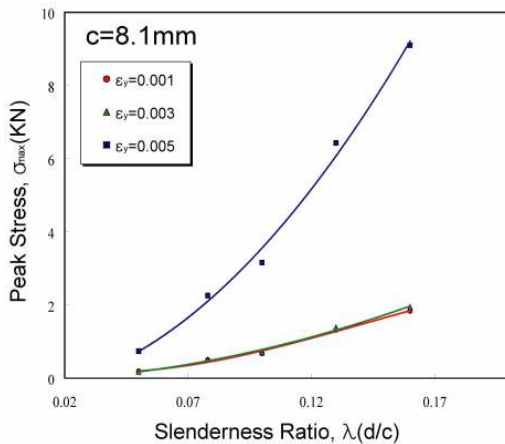


Fig. 7 Comparisons compressive performance of the WBK with $\epsilon_y=0.001, 0.003, 0.005$ as a function of the slenderness ratio.

4. 결론

본 연구에서는 압축하중을 받는 WBK는 좌굴 하중에 의해 파손된다고 가정하여 좌굴에 지배적인 영향 인자를 기하학적 인자와 재료적인 인자로 정의하였다. 그리고 이와 같은 설계인자들이 압축하중을 받는 WBK의 기계적 강도에 미치는 영향을 다루지법을 이용하여 평가하였다.

- WBK의 설계인자는 세장비와 브레이징부의 높이인 기하학적 인자와 와이어와 브레이징부의 탄성계수값, 항복응력값, 가공경화지수인 재료적 인자로 정의하였다.

- WBK의 압축강도는 직경과 피치비인 세장비와 항복변형률, ϵ_y 에 지배적으로 결정됨을 알 수 있었다.

이는 세장비와 항복변형률 ϵ_y 이 탄성과 소성 좌굴을 결정짓는 중요한 인자이기 때문이다.

- 와이어와 브레이징부의 탄성계수값의 비와 항복응력의 비 즉, 재료적 적합성은 WBK의 최대강도에 거의 영향을 주지 않는다.

- 최대강도를 갖는 WBK를 설계하기 위해 가장 중요한 것은 세장비를 WBK의 조립이 가능한 범위 즉, 상대밀도 6.3%범위에서 최대가 되게 하는 것이다. 다음으로는 와이어의 항복변형률 값이 최대가 되는 재료를 선택하는 것이 유리하다.

후기

이 논문은 2006년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 국가지정연구사업지원을 받아 수행된 연구임.(R0A-2006-000-10249-0)

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) Deshpande, V. S., Fleck, N. A. and Ashby, M. F., 2001, "Effective Properties of the Octet-Truss Lattice Material," *J. of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 49, pp.1747~1769.
- (4) 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
- (5) 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
- (6) K. J. Kang, and Y. H. Lee, 2004, "Three-dimensional cellular light structures directly woven by continuous wires and the manufacturing method of the same,"

Patent Pending PCT/KR2004/002864 /05.

- (7) Hae-Kyu Hur and Ki-Ju Kang, "Geometrical Modeling and Characteristics of Wire-woven Bulk Kagome structures," *Proceedings of the Korea society Mechanical Engineers(KSME)2008 Spring Annual Meeting*, May,29-30, Republic of Korea,
- (8) Y. H. Lee, J. E. Choi and K. J. Kang, 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.
- (9) Lee, Yong-Hyun, Lee, Byeong-Kon, Jeon, Insu and Kang, Ki-Ju, 2007a. "Wire-woven bulk Kagome (WBK) truss cores." *Acta Materialia* 55, 6039-6400.
- (10) S. Hyun, J. E. Choi and K. J. Kang, "Mechanical behaviors under compression in wire-woven bulk Kagome truss PCMs –Part I : Upper bound solution with uniform deformation," *J. of the KSME (A)* Vol.31(2007a) pp.694-700.