

〈학술논문〉

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.4.353

굽힘하중 하의 벌크형 와이어 직조 카고메 트러스 중간재를 갖는 샌드위치 판재의 기계적 거동

최 지 은* · 강 기 주†

(2009년 1월 19일 접수, 2009년 3월 20일 수정, 2009년 3월 25일 심사완료)

Finite Element Simulation of Behavior of WBK Cored Sandwich Panels Subjected to Bending Loads

Ji-Eun Choi and Ki-Ju Kang

Key Words : PCM(Periodic Cellular Metal; 규칙적 다공질 금속), Kagome Truss(카고메 트러스), Sandwich Panel(샌드위치 판재), Ultra Light Metal Structure(초경량 금속 구조물), WBK(Wire-wounded Bulk Kagome; 와이어로 직조한 덩어리 카고메)

Abstract

Wire-woven Bulk Kagome (WBK) is a new truss type cellular metal fabricated by systematic assembling of helical wires in six directions. In this work, the experiments of mechanical behaviors of WBK cored sandwich panels subjected to bending load were performed and the results were compared with those by the corresponding analytic solutions. And also, finite element simulations were performed to validate the optimal design according to the analytic solutions. It is found the sandwich panel with WBK core performed excellently in terms of energy absorption and deformation stability after the peak point as well as the load capacity.

1. 서 론

강도와 강성이 높은 면재(face sheet)와 낮은 밀도를 갖는 심재(core)로 구성된 샌드위치 판재는 경량 고강도/고강성 구조물로서 널리 사용되고 있다. 심재로서 종래의 허니컴(honeycomb), 발포금속⁽¹⁾(metal foam), 격자구조재(lattice frame materials)⁽²⁾ 뿐만 아니라 지난 몇 년간 트러스 PCM(Periodic Cellular Metal; 규칙적 다공질금속)^(3,4)이 관심을 끌고 있다. 과거부터 사용되어온 발포금속(metal foam)은

불규칙한 개방형과 폐쇄형 구조로 인하여 기계적 강도가 비교적 낮고 고비용인 반면에 PCM은 규칙적인 구조를 갖기 때문에 기계적 강도가 매우 우수하다.

이 중 트러스 PCM은 피라미드(pyramid)⁽⁵⁾, 옥테트(octet)⁽⁶⁾, 그리고 카고메(Kagome)⁽⁷⁾ 등이 제안되었다. 그러나 트러스 PCM의 제조방법은 대부분은 단층구조에 국한되어 있다. 유일하게 다층구조를 제조하는 방법으로는 여러 개의 단층을 적층하는 방법이나 이는 강도, 제조비용 뿐만 아니라 대량생산에도 불리하다.

최근 Kang 등⁽⁸⁾은 와이어를 조립하여 제조되는 소위 'WBK(Wire-woven Bulk Kagome)' 라는 새로운 트러스 PCM을 보고하였다. WBK는 3차원 공간에서 6방향의 나선형 금속 와이어를 서로 교차하여 조립하고, 교차점은 브레이징 공정을 통하여 고정한다. 이와 같은 WBK제작공정은 연속적으로 와이어를 회전삽입하여 조립이 가능함으로써

[이 논문은 2008년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2008. 5. 29.-30., 충북대) 발표논문임]

† 회원, 전남대학교 기계시스템공학부

E-mail : kjkang@chonnam.ac.kr

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

* 전남대학교 자동차연구소

대량생산이 가능하고 쉽게 덩어리 형태(bulk material) 즉, 다층 트러스 PCM으로 제작할 수 있다.

한편 Wicks and Hutchinson⁽⁹⁾은 굽힘 하중 하에서 옥테트 트러스 심재를 갖는 샌드위치 판재를 대상으로 최대하중과 무게를 재료의 물성(항복 시 변형률)과, 면재 두께, 심재 높이 등 기하학적 변수로 표현하고 무차원해석을 수행하여 파손선도(failure map)을 도출하고 목적함수인 무게를 최소화하는 최적설계 방법(minimum mass designs)을 제시하였다. 힘-모멘트 평형에 기반하여 4 가지 파손모드, 즉 면재의 탄성좌굴 및 항복과 심재의 탄성전단 및 소성전단에 대한 최대하중을 유도하였다. 그리고 Ashby 등⁽¹⁰⁾에 의하면 샌드위치판재의 파손은 위의 4 가지 파손모드 외에도 면재의 압흔(indentation)이 있으며 심재의 전단도 두 모드로 나뉠 수 있음이 알려져 있다.

Kang등은⁽¹¹⁾ WBK 샌드위치 판재를 대상으로 Wicks and Hutchinson⁽⁹⁾의 무차원 해석기법을 사용하였다. 여기서, 보다 다양한 파손모드를 고려하기 위해서 Ashby등⁽¹⁰⁾ 과 같이 에너지평형에 기반하여 파손하중에 대한 이론식을 유도하였다. 최적설계 방법으로서 샌드위치 판재의 무게 ψ 를 기준으로 파손하중을 최대화하여 설계를 도출하는 것과 WBK 트러스 요소의 세장비(slenderness ratio)에 기준하여 무게대비 강도를 최대화하는 설계방법을 제시하였다. 그리고 최적화된 WBK 샌드위치 판재는 Octet 샌드위치 판재보다 우월하고 재래의 허니컴샌드위치 판재와 대등함을 보고하였다.

본 논문에서는 유한요소해석을 사용하여 WBK 트러스 심재를 가진 샌드위치판재의 기계적 거동을 조사하였다. 그 결과를Kang 등⁽¹¹⁾의 이론해석에 의한 것과 비교하여 검증하고 파손현상의 원인을 예측하였다.

2. 유한요소해석

2.1 WBK 샌드위치 판재 형상

WBK 샌드위치 판재는 심재의 배열방향, 심재 높이, 심재를 구성하는 트러스 요소의 세장비, 그리고 면재의 두께 등에 따라 다양한 샌드위치 판재의 제작이 가능하며 이러한 요소들을 고려하여 파손하중이 최대가 되도록 최적설계안을 도출할 수 있다. 심재의 배열방향에 따라서는 2 가지 종류의 샌드위치 판재로 제작이 가능하다. Fig. 1 은 두 가지 샌드위치 판재의 형상을 나타내고 있다. Orientation-I 과 Orientation-II 심재는 90° 의 차이가 있다. 이와

같이 WBK 구조는 심재의 방향을 90° 회전시킬 때마다 Orientation-I 과 Orientation-II 가 반복된다. Orientation-I 은 심재의 좌우가 대칭으로 배열되어 있으며, 길이방향으로 더 많은 단위구조가 포함된다. 반면에 Orientation-II 는 좌우가 비대칭적으로 배열되어 있다. 따라서, 심재의 배열 방향에 따라 굽힘 거동 특성이 다소 차이가 있다고 예상된다.

본 연구에서는 굽힘하중을 받는 WBK 샌드위치 판재에서 기계적 거동을 평가 비교 하기 위하여 다음과 같은 3 가지 경우를 결정하였다. 먼저, Case1 과 Case2 는 동일한 외형치수를 갖는 샌드위치 판재에 심재의 배열만 Orientation-I 과 Orientation-II 로 구성 되도록 하였다.

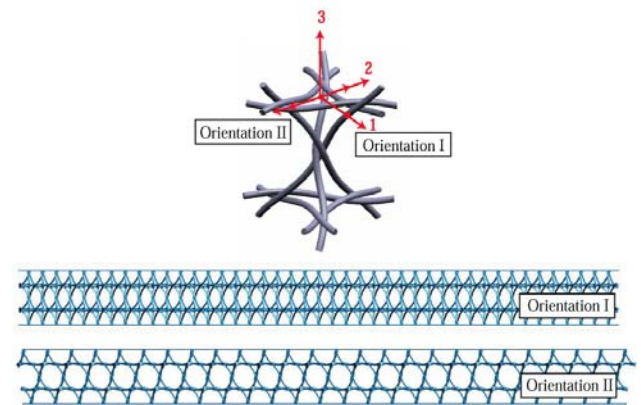


Fig. 1 Configuration of WBK cored sandwich panels with Orientation-I & Orientation-II

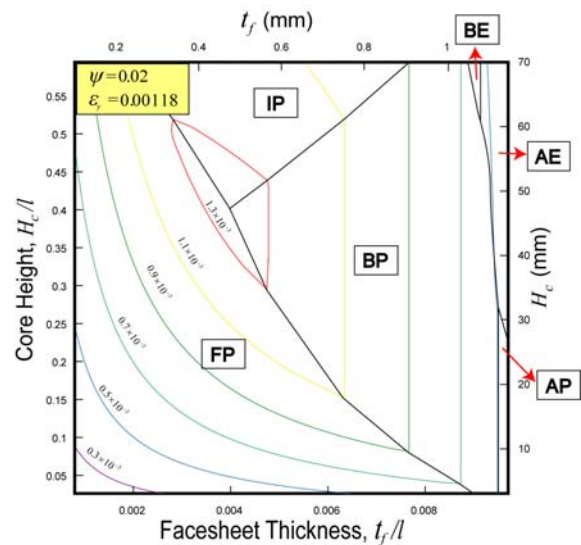


Fig. 2 Dimensionless failure map illustrated as a function of H_c and t_f for a given weight index; $\psi=0.02$ for sandwich panels with Orientation-I WBK core

Table 1 Dimension of three designs of three-point-bend Specimen (unit : mm)

Case	t_f	H_c	d/c	L	B	Orientation
1	0.6	26.4	0.096	344	40.5	II
2						I
3	0.475	48	0.13	355	58	I

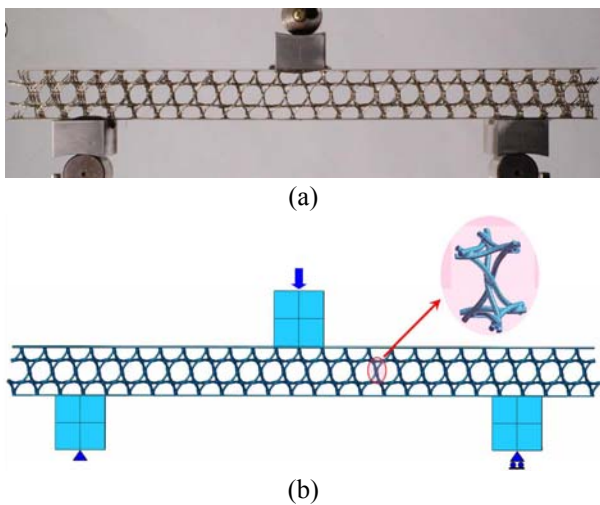


Fig. 3 (a) Optical image showing WBK cored sandwich panel during 3-point bend test. (b) the finite element model with the applied load and boundary condition

각각 방향에서의 심재를 구성하는 단위구조의 수는 151 개로 동일하다. 여기서 시편의 외형치수는 선행연구⁽¹²⁾에서 실험을 수행하였던 WBK 샌드위치판재를 적용하였다. Case 3 은 무차원 최적설계안을 바탕으로 결정된 최적설계모델로서 특히 무게변수 $\psi=0.02$ (무게 0.324Kg)을 기준으로 파손하중이 최대가 되도록 설계하였다. 여기서 무게변수는 $\psi = \frac{W}{\rho\lambda}$ 로 정의되며 여기에서 W, ρ 는 샌드위치판재의 단위면적당무게와 밀도이고 λ 은 최대모멘트 M 과 최대전단력 V 비(ratio) $\lambda = \frac{M}{V}$ 로 정의된 특성길이이다. Fig. 2 은 선행연구에서 얻어진 결과로서 최적화 방법 중 무차원 무게변수 ψ 을 기준으로 WBK 심재를 갖는 샌드위치 판재의 파손선도이다. 이 때 최대파손하중은 면판의 항복/소성좌굴(FP), 면판의 소성압흔(IP) 그리고 심재의 전단모드-B(BP)의 삼중점인 $t_f=0.0475$ 와 $H_c=48\text{mm}$ 에서 발생한다. 샌드위치판재가 포함하는 심재의 단위셀 수는 길이 방향으로 49 개, 넓이

방향으로 2.5 개, 높이방향으로 4 층으로 구성된다. 여기서 심재의 배열은 Orientation-I이다.

Table 1 는 3 가지 Case 설계안의 구체적인 외형치수를 타내고 있다. 여기서 $t_f, H_c, d/c, L, B$ 는 각각 면재의 두께, 심재의 높이, 트러스 요소의 세장비, 시편의 길이, 시편의 폭이다.

2.2 유한요소해석모델

유한요소 해석 모델은 실제 실험에 사용한 시편과 동일한 형상을 갖도록 Patran2005 를 이용하여 모델링을 하고 ABAQUS ver.6.5 로 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 3 는 실험에서 사용된 시편의 형상을 묘사한 해석 모델과 경계조건을 나타내고 있다. 실제의 굽힘 실험을 묘사하기 위하여 상부 블럭과 면판은 접촉(contact)조건을 적용하였다. 여기서, 브레이징 부는 실험에 사용한 시편의 브레이징 부를 측정하여 평균치인 3mm 로 전체 해석모델에 반영하였다. 이모델은 실제 시편과 동일하게 브레이징부가 포함되어 있다. 와이어 부분은 원형인 와이어의 형상을 묘사하였고 브레이징부와 분리하여 형상을 묘사하였다. 와이어와 브레이징부는 모두 6 절점 요소(6-node linear triangular prism of ABAQUS; C3D6)이고, 상하면판과 지그는 20 절점 요소(20- node quadratic brick of ABAQUS; C3D20)를 사용하였다.

선행 유한요소해석에서 브레이징부가 와이어 부에 비해 더 딱딱한 재료라면 브레이징 부 물성은 강도에 영향을 주지 않았다. 또한 Lee의 연구에서 브레이징 부는 와이어에 비해 약 3 배 정도 높은 경도를 가진다고 보고하였다. 따라서 브레이징 부의 재료물성은 와이어와 동일하게 적용하였다. 재료물성은 시편제작에 사용된 SUS304 을 적용하였다. 즉 인장실험에서 구한 탄성계수 $E=170\text{GPa}$, 항복응력은 $\sigma_y=193\text{MPa}$, 푸아송의 비 (poisson's ratio) $\nu=0.3$ 이다. 또한 항복 후 거동은 실험의 응력-변형을 곡선에 근거하여 점진소성이론 (incremental theory of plasticity)을 적용하였다. 실험시편과 동일한 해석모델의 총 요소수는 67,414 개이고 절점수는 425,426 개이다. 반면에 최적설계 기법의 타당성을 검증하기 위한 모델, 즉 무차원해석을 통해 도출된 최적설계안은 심재가 4 층으로 구성되어 있다. 그래서 최적설계안 해석모델은 총 요소와 절점수가 더욱 증가하여 각각 574,014 개와 543,161 개이다.

2.3 유한요소해석모델 검증

Fig. 4 는 Case1 시편에 대한 이론예측과 유한요소해석결과 실험결과의 하중-변위 곡선을

나타내고 있다. 이론예측값은 실험에서 관측된 최대값에 비해 약간 낮게 평가되며 오히려 하중변위 곡선상_초기항복이 일어나는 점과 일치한다. 이러한 이유는 Case1 시편의 파손은 이론해석에서도 언급한 바와 같이 심재의 소성전단모드B(BP)에 의해 발생하는데 WBK를 이루는 트리스 요소가 초기 항복점 에서 소성 좌굴이 된다고 가정하였기 때문이다. 그러나 실제 WBK 심재의 전단시에는 초기항복 이후에도 상당히 많은 저항을 보이는 것으로 보고⁽¹²⁾되고 있다. 반면에 유한요소모델의 최대 굽힘하중은 실험값에 비해 대략 4.8%정도 낮게

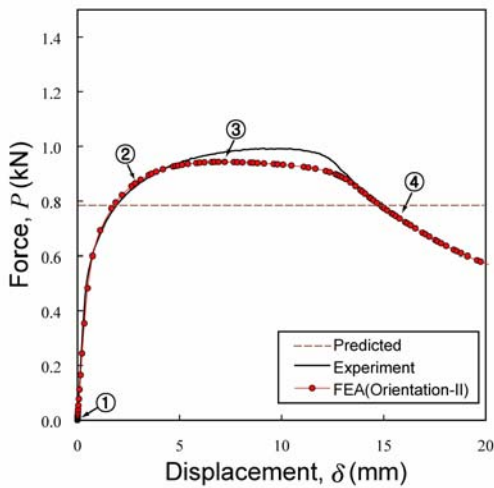


Fig. 4 The load-displacement curve obtained from the finite element analysis for the specimen model in comparison with that measured by the bend test

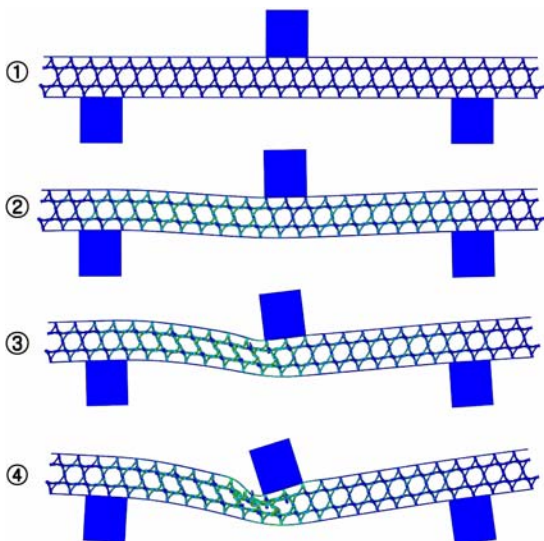


Fig. 5 The deformed shapes of the model with orientation-II core at four positions ① to ④ marked on the load-displacement curve shown in Fig. 4

평가 되었지만 최대하중 이후 안정적인 거동을 보이는 경향은 실험과 매우 유사함을 확인하였다.

이 결과로부터 유한요소해석모델이 실제 3 점 굽힘 실험을 잘 모사됨을 확인하였다.

3. 해석결과

3.1 Orientation-I 과 Orientation-II WBK

Fig. 5 은 Case1 시편에 대한 3 점 굽힘 해석 결과 중 변형형상을 순차적으로 보여주고 있다. 여기서, 표시된 ①~④의 굽힘 거동시점은 Fig. 4 의 하중-변위 곡선에 동일하게 나타내었다. 굽힘하중 부가 후 초기의 변형은 왼쪽에서부터 심재의 전단변형이 발생하였다(②). 그리고 최대하중이 발생하는 지점에서는 상판 블럭 주위에 소성 힌지가 발생하여 안정적으로 변형이 계속 진행된다(③). 그 후 상판 블럭의 왼쪽 아래 부분에 하중이 집중되어 함몰되면서 하중은 점진적으로 감소한다. Fig. 6 는 Orientation-II시편이 최대하중에 도달하였을 때 양쪽 심재의 변형형상을 확대하여 보여주고 있다. 굽힘 하중을 받는 샌드위치 판재의 경우에 심재는 주로 전단응력이 지배적이다. Kang 등⁽¹¹⁾의 연구에서 도출된 이론해석에 의하여 두 방향에 대한 이론 예측값은 $\phi=210^\circ$ 방향이 $\phi=30^\circ$ 에 비하여 50%정도 낮아서 비대칭적으로 전단변형이 일어남을 확인할 수 있다. Fig. 7 은 Orientation-I(Case 2)과 Orientation-II(Case 1)의 배열로 구성된 시편의 유한요소해석 결과를 하중-변위 곡선으로 도시하였다. 최대 굽힘하중은 Orientation-I에서는 1.19kN이고, Orientation-II는 0.943kN로 평가되었으며, Orientation-I이 Orientation -II에 비해 20%정도 높게 평가되었다.

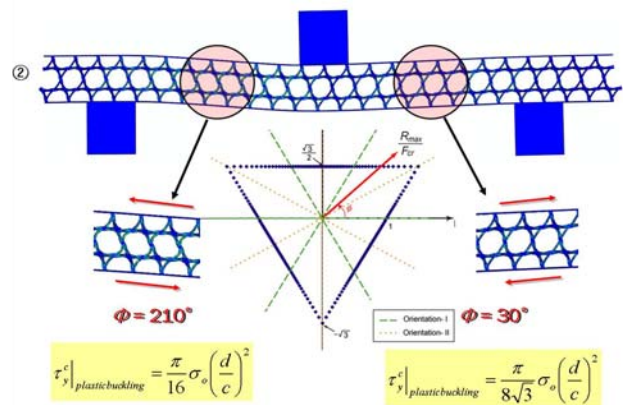


Fig. 6 Deformed shape of the model with orientation-II core at the position ② on the peak plateau of the load-displacement curve shown in Fig. 4

이는 기하학적으로 Orientation-I 심재가 시편의 길이방향으로 대칭적으로 배열되어 있어 양쪽 심재에는 같은 전단하중이 작용하여 Orientation-II 에 비해 더 오랫동안 대칭적인 변형형상을 유지하기 때문이다. Fig. 8 은 Orientation-I 의 선택된 각 지점의 변형형상을 나타내고 있다. Orientation-I 과 Orientation-II 의 심재를 포함하는 WBK 샌드위치판재의 변형형상을 비교하여 보면 Orientation-II 방향을 가지는 WBK 심재는 최대하

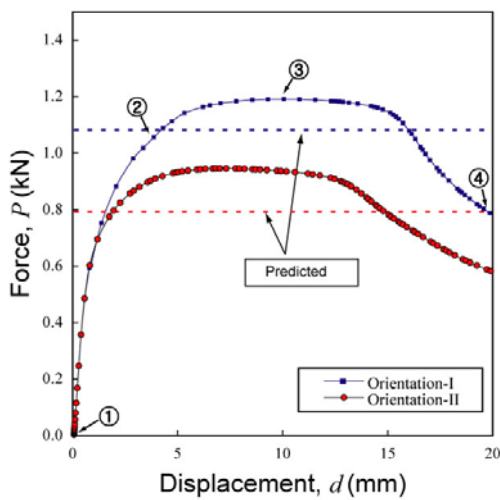


Fig. 7 The load-displacement curve obtained for the model with orientation-I core in comparison with that with orientation-II core shown in Fig. 4

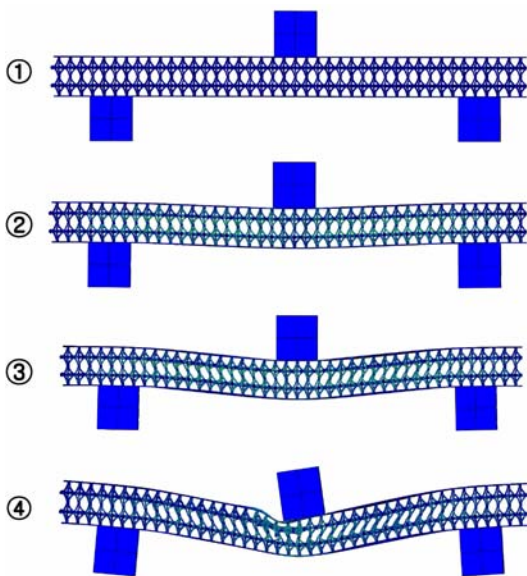


Fig. 8 The deformed shapes of the model with orientation-I core at four positions ① to ④ marked on the load-displacement curve shown in Fig. 7

중에 도달하기도 전에 비대칭적인 변형이 발생한다. 반면에 Orientation-I-방향을 가지는 심재는 최대하중도달 후 지연되는 현상과 함께 대칭적인 변형을 가짐을 확인하였다. Fig. 9 은 Orientation-I시편이 최대하중에 도달하였을 때 양쪽 심재의 변형형상을 확대하여 보여주고 있다. 심재에 작용되는 전단하중 방향은 $\phi=60^\circ$ 와 $\phi=240^\circ$ 로서 Kang⁽¹¹⁾등의 연구에서 도출된 이론해석에 의하여 동일한 전단항복응력이 적용됨을 알 수 있다. Case 1 과 Case 2 의 WBK 샌드위치 판재의 파손모드는 심재의 전단모드 B에 지배적으로 파손이 발생함을 유한요소해석결과로부터 확인 할 수 있다.

이상의 결과로 부터 WBK 샌드위치 판재 설계시 20%정도 우수한 성능을 가지는 Orientation-I 으로 심재를 배열하여 사용함이 바람직하다.

3.2 최적화 설계모델

Fig. 10 은 Case3 의 모델로서 최적화 설계안의 기하학적 형상을 갖는 유한요소해석에서 얻어진 하중-변위곡선 이다. 그리고 이전연구⁽¹¹⁾에 근거하여 예측된 이론 예측해도 함께 도시하였다. 유한요소해석에서 최대 굽힘하중은 $P_{max}=3.56kN$ 이고 예측된 이론해의 최대 굽힘하중은 $P_{max}=3.54kN$ 으로 매우 잘 일치하였다. Fig. 11 는 유한요소해석 결과로 Fig. 10 에서 표시된 ①~④지점의 변형형상을 나타내고 있다. 최대 굽힘 하중이 나타나는 ②지점에서 면판의 항복/소성좌굴(FP), 면판의 소성압흔(IP), 심재의 전단모드-B(BP)가 발생됨을 해석결과를 통해 확인하였다. 특히 ③과 ④지점에서 변형형상은 면판의 항복/소성좌굴(FP)과 면판의 소성압흔(IP)에 지배적임을 확인하였다.

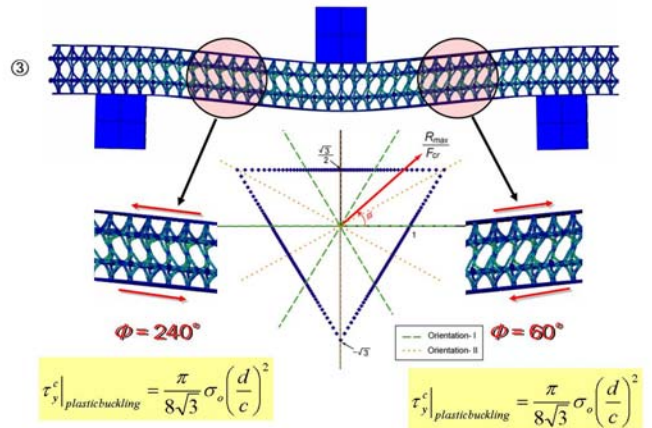


Fig. 9 Deformed shape of the model with orientation-I core at the position ③ on the peak plateau of the load-displacement curve shown in Fig. 7

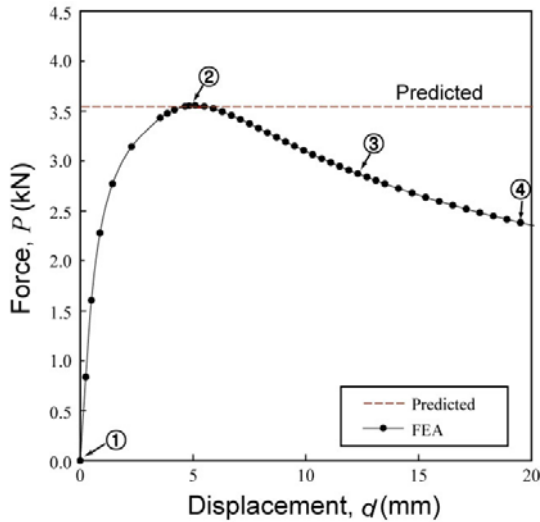


Fig. 10 The load-displacement curve calculated for a sandwich model with orientation-I core optimized for a given dimensionless weight, $\Psi=0.02$ together with the peak load predicted by the analytic solution

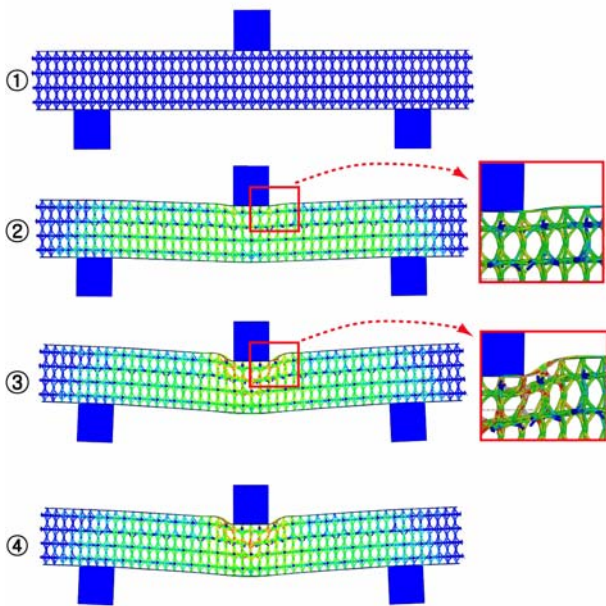


Fig. 11 Deformed shapes of the model with orientation-I core at four positions ① to ④ marked on the load-displacement curve shown in Fig. 10

이와 같이 최적설계된 모델은 다양한 파손모드가 동시에 일어나는 설계안이다. 다양한 파손모드가 동시에 일어남으로서 안정성면에서 매우 우수한 설계를 할 수 있다. 또한 Case1과 Case2와는 상이하게 최적설계된 모델은 이론 예측값과 유한요소해석의 결과값이 매우 잘 일치하였다. 이는 샌드위치판재의

파손모드와 관련이 있다. Case1과 Case2 경우 파손하중은 심재의 전단모드B(BP)에 의해 지배적으로 발생하므로 트러스 요소가 초기 항복점에서 소성 좌굴이 된다고 가정한 이론해 보다는 실제의 값이 더 높게 평가된다. 반면에 최적설계된 모델(Case3)은 최대하중이 소성압입(IP)의 발생시점과 일치하며 (Fig.11의②) 소성압입(IP)에 대한 이론해가 상당히 정밀함을 의미한다.

4. 결 론

Kang등⁽¹¹⁾의 선행연구에 기초하여 굽힘 하중을 받는 WBK 심재를 갖는 샌드위치판재의 기계적 거동을 유한요소해석을 통하여 평가하였다. 또한 무차원해석을 통해 도출된 최적설계안의 파손모드와 이론강도를 유한요소해석 결과와 비교함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) WBK 는 배열방향에 따라 최대하중이 20%정도 차이가 있으므로 실제 적용시 Orientation-I 을 선택함이 안정성에서 유리하다.

(2) WBK 는 굴곡된 선재로 구성되었음에도 불구하고 최대 굽힘 하중도달 후에도 안정적인 변형과 높은 에너지 흡수율을 유지하는 매우 바람직한 거동을 보였다.

(3) 실험 및 유한요소해석으로부터 얻은 최대하중이 선행 연구에 의한 예측 값과 잘 일치하여 선행연구의 이론 해와 이에 기반을 둔 최적설계기법이 타당함을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Bart-Smith, H., Hutchinson, J.W., Evans, A.G., 2001, "Measurement and Analysis of the Structural Performance of Cellular Metal Sandwich Construction," *Int. J. of Mechanical Sciences*, Vol. 43, pp.1945~1963.
- (2) Deshpande, V.S. and Fleck, N.A., 2003, "Energy Absorption of an Egg-Box Material," *J. of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol.51, pp.187~208.
- (3) 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.
- (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) 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,” *Int. J. of Solids and Structures*, Vol.41, pp.6249~6271.
- (6) 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.
- (7) Hyun, S., Karlsson, A. M., Torquato, S. and Evans, A. G., 2003, "Simulated Properties of Kagome and Tetragonal Truss Core Panel," *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 40, pp.6989~6998.
- (8) Lee, Y. H., Lee, B. K., Jeon, I. and Kang, K. J., 2007a. "Wire-woven bulk Kagome (WBK) truss cores." *Acta Materialia* 55, pp. 6039~6400.
- (9) Wicks, N. and Hutchinson, J. W., 2001, "Optimal Truss Plates," *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 5165~5183.
- (10) Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., and Wadley, H.N.G. 2001, *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth Heinemann, pp.116~120.
- (11) Lee, Y. H. and Kang, K. J., 2008. " An optimal Design of Sandwich Panels with Wire-woven Bulk Kagome Cores," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 32, pp.782~787.
- (12) Lee, Y. H., 2007. " Mechanical Behaviors of Bulk Kagome Truss PCMs Woven of Metal Wires," Master Thesis, Chonnam National University, Korea.