

피라미드 트러스 코어 단위셀의 기계적 특성에 관한 해석적 및 수치적 연구

Analytical and Numerical Study on Mechanical Behavior of Unit Cell of Pyramidal Truss Core Structures

김상우^{1,✉}, 이영선¹, 강범수²

Sang Woo Kim^{1,✉}, Young Seon Lee¹ and Beom Soo Kang²

¹ 재료연구소 변형제어연구그룹 (Materials Deformation Group, Korea Institute of Materials Science)

² 부산대학교 항공우주공학과 (Department of Aerospace Engineering, Pusan National University)

✉ Corresponding author: kims@kims.re.kr, Tel: 055-280-3528

Manuscript received: 2010.10.18 / Revised: 2010.12.17 / Accepted: 2011.2.10

Metallic sandwich panels based on a truss core structure have been developed for a wide range of potential applications with their lightweight and multi-functionality. Structural performance of sandwich panels can be predicted from the studies on mechanical behavior of a unit cell of truss core structures. Analytical investigations on the unit cell provide approximated guidelines for the design of overall core structures for a specific application in short time. In this study, the effects of geometrical parameters on mechanical behavior of a pyramidal shape of unit cell were investigated with analytical models. The unit cell with truss member angle of 45 degree was considered as reference model and other models were designed to have the same weight and projected area but different truss member angle. All truss members were assumed to be connected with pin joint in analytical models. Under the assumptions, the equivalent strength and stiffness of the unit cell under compressive and shear loads were predicted and compared. And finally, the optimum core member angle to have maximum mechanical property could be calculated and verified with FE analysis results.

Key Words: PCM (주기적 다공질 금속), Truss (트러스), Sandwich Panel (샌드위치 판넬), Pyramidal Structure (피라미드 구조), FEM (유한요소법)

기호설명

$\bar{\rho}_c$ = relative density

σ_s = stress applied on truss member [MPa]

σ_{cr} = critical buckling stress [MPa]

$\bar{\sigma}_{peak}$ = maximum equivalent normal stress [MPa]

$\bar{\tau}_{peak}$ = maximum equivalent shear stress [MPa]

\bar{E} = equivalent compressive modulus [MPa]

\bar{G} = equivalent shear modulus [MPa]

1. 서론

최근 PCM(Periodic cellular metal)이 가지는 경량성 및 다기능성을 활용한 개방형 트러스 내부구조를 갖는 샌드위치 판넬에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다. 개방형 트러스 구조는 경량화 효과뿐만 아니라 내부공간을 활용하여 각종 전자장비의 배선통로 및 유체의 이동통로로 활용 가능함에 따라 잠재적인 적용범위가 매우 넓은 장점이 있

다.^{1,3} 상·하부의 판재(face sheet)와 트러스 코어(truss core)로 구성된 샌드위치 판넬은 내부 코어의 형상에 따라 피라미드(pyramid), 사면체(tetrahedron), 카고메(kagome) 구조 등 다양한 형태로 제조될 수 있으며, 코어의 형상, 원재료 및 제조방법에 따라 다양한 특성을 가지게 된다. 개방형 트러스 코어를 이용한 샌드위치 판넬은 자동차, 항공기 등 수송기기류의 외판 및 건축용 자재 등 경량 구조용 재료로서의 활용뿐만 아니라 민/군용 충격 에너지 흡수체, 열 교환기용 열전달 매체 등 다양한 특성을 가진 기능성 소재로 광범위하게 활용될 수 있다.

개방형 트러스 코어를 이용한 샌드위치 판넬에 대한 국내외 연구자들의 관심이 증대되고 있는 가운데 국내의 경우 Lee⁴는 와이어 직조를 통한 카고메(kagome) 구조의 PCM 을 개발한 바 있으며, Jung⁵은 익스펜디드 메탈을 이용한 연속제조공정을 제안한바 있다. 또한, 국외 사례로는 Despande^{6,7}는 PCM 의 기계적 특성을 예측할 수 있는 이론적 모델을 제시하고 실험을 통해 이를 검증한바 있으며, Wadley⁸⁻¹⁰는 정밀 주조 및 천공-굽힘 공정에 의한 코어 제조방법을 제안하였다. Xue¹¹는 PCM 코어 판재를 압축성, 변형률 속도 의존성, 이방성을 고려한 연속체 구성방정식을 개발하여 3 차원 유한요소해석을 통해 이를 검증하였으며, Hyun¹²은 카고메 및 사면체 코어의 압축 및 전단 하중 하에서의 기계적 거동을 유한요소해석을 통해 분석한 바 있다. 이들 연구는 코어의 기계적 특성이 단위셀(unit cell)의 상대밀도에 의존하고 있음을 보여주고 있다. 그러나, 동일한 형상의 트러스 코어라 하더라도 트러스 요소(truss member)의 기울임 각에 따라서 기계적 특성이 달라질 수 있으므로, 이에 대한 영향을 분석하고 최대의 강도 및 강성을 가지기 위한 단위셀의 최적의 형상을 도출할 필요성이 있다.

코어 단위셀의 기계적 거동에 대한 해석적 근사해는 짧은 기간 내에 코어의 특성을 분석할 수 있는 매우 유용한 해법이며, 다양한 설계변수의 영향을 분석함으로써 설계 가이드라인으로 적용할 수 있다. 저자는 샌드위치 판넬용 트러스 코어의 기초 형상설계를 위한 방법으로 해석적 접근을 통해 피라미드 단위셀의 기계적 거동에 대한 연구를 수행한 바 있다¹³. 본 연구에서는 앞서 수행된 해석적 방법에 의해 도출된 결과의 신뢰도를 검증하기 위하여 유한요소법을 이용한 수치적 해석을 수

행하였다. 해석모델은 단위 면적당 차지하는 코어의 체적이 동일한 조건하에, 피라미드 요소의 각도를 달리하여 각각의 단위셀 모델에 대한 압축 및 전단 하중 작용 시 지지할 수 있는 최대응력(peak stress) 및 동가강성(equivalent stiffness)을 계산하여 각각의 기계적 특성이 최대가 될 수 있는 트러스 요소의 최적 각도를 예측하고, 이와 동일한 조건의 3 차원 모델을 이용하여 유한요소해석을 수행하고 그 결과를 비교 분석함으로써 설계 가이드라인으로서의 적용 가능성을 검증하고자 하였다.

2. 해석적 접근

2.1 해석모델 정립

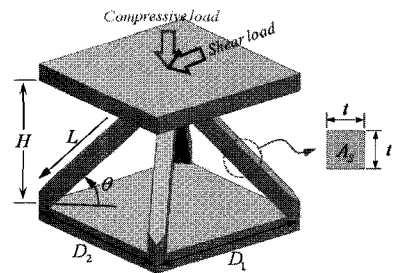


Fig. 1 Schematic illustration of a pyramidal unit cell

Fig. 1 과 같이 상면에 압축 또는 전단 하중이 작용하는 피라미드 코어의 단위셀을 가정하자. 각 단위셀은 한 변의 길이가 t 인 정사각형 단면을 가진 길이 L 의 트러스 요소로 구성되어 있으며, 각 트러스 요소는 밑면으로부터 각도 θ 만큼 기울어져 있다. 단위셀을 구성하는 밑면 변의 길이는 D_1, D_2 이며, 코어의 높이는 H 이다.

단위셀이 차지하는 공간의 체적(V)에 대한 코어의 체적(V_C)의 비로 정의되는 상대밀도($\bar{\rho}_c$)는 Fig. 1 에 도시된 형상인자들의 기하학적 관계로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\rho}_c = \frac{V_C}{V} = 2 \left(\frac{t}{L} \right)^2 \frac{1}{\cos^2 \theta \sin \theta} \quad (1)$$

샌드위치 판재에 압축 또는 전단하중이 작용할 때 코어 상·하부의 판재는 하중을 전달하는 역할만 할 뿐 실제 하중은 트러스 요소만이 지지하므로 문제의 간소화를 위해 모든 트러스 접합부는 핀

조인트(pin joint)로 연결되어 있다고 가정할 수 있으며, 따라서 접합부에서의 회전 에 대한 저항성은 무시하였다.

단위셀의 상면에 압축하중 또는 전단하중이 작용할 때 외력과 이를 지지하는 트러스 요소들에 작용하는 응력(σ_s)의 힘의 평형 방정식으로부터 단위셀에 작용하는 등가압축 및 전단응력은 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{\sigma} = \bar{\rho}_C \sigma_s \sin^2 \theta, \quad \bar{\tau} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \bar{\rho}_C \sigma_s \sin 2\theta \quad (2)$$

각 트러스 요소가 지지할 수 있는 최대하중은 트러스 요소의 모재의 항복강도(yield strength), 탄성 혹은 비탄성 좌굴강도(buckling strength)에 의해 결정될 수 있다. 본 연구에서는 세가지 경우를 모두 고려한 해석적 결과를 도출하고 유한요소해석을 통해 이를 검증하고자 하였다.

우선, 항복강도에 의해 결정된다고 가정하면, 최대지지응력은 식(2)의 σ_s 를 모재의 항복강도 σ_y 로 대체함으로써 식(3), (4)와 같이 표현된다.

$$\bar{\sigma}_{peak,yielding} = \bar{\rho}_C \sigma_y \sin^2 \theta \quad (3)$$

$$\bar{\tau}_{peak,yielding} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \bar{\rho}_C \sigma_y \sin 2\theta \quad (4)$$

또한, 최대지지응력이 탄성 또는 비탄성 좌굴강도에 의해 결정된다고 가정하면 접선계수이론(tangent modulus theory)에 의해 요소의 임계좌굴응력(critical buckling stress)는 다음과 같다.

$$\sigma_{cr,elastic(inelastic)} = \frac{\pi^2}{12} \left(\frac{te}{L} \right)^2 E_{(t)} \quad (5)$$

여기서, e 는 요소의 양 끝단의 구속조건과 관련된 상수로 본 연구에서는 2.0을 사용하였으며, $E_{(t)}$ 는 탄성 좌굴일 경우, 모재의 탄성계수와 동일하며, 비탄성 좌굴일 경우, 탄성구간 이후 모재의 가공경화 특성에 의존하는 접선계수이다. 따라서, 식(5)의 σ_{cr} 을 식(2)의 σ_s 에 대입하면, 단위셀이 지지할 수 있는 압축 또는 전단하중 하에서의 최대 등가응력은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma}_{peak,buckling} = \bar{\rho}_C \sigma_{cr} \sin^2 \theta \quad (6)$$

$$\bar{\tau}_{peak,buckling} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \bar{\rho}_C \sigma_{cr} \sin 2\theta \quad (7)$$

또한, 단위셀 전체에 작용하는 외력에 의한 변형 에너지와 각 트러스 요소에 작용하는 내력에 의한 에너지 평형으로부터 단위셀이 가지는 등가탄성계수 및 전단계수는 식(8),(9)와 같이 상대밀도, 트러스 요소의 각도 및 모재의 탄성계수의 함수로 표현될 수 있다.

$$\bar{E} = \bar{\rho}_C \sin^4 \theta E_s \quad (8)$$

$$\bar{G} = \frac{1}{8} \bar{\rho}_C (\sin^2 2\theta) E_s \quad (9)$$

2.2 트러스 요소 각도의 최적화

식(3)~(9)의 결과로부터 트러스 코어 단위셀의 기계적 특성은 상대밀도, 트러스 요소의 각도 및 모재의 기계적 물성에 의존적임을 알 수 있다. 본 연구에서는 단위면적당 코어의 체적이 동일한 조건하에 단위셀의 지지하중 및 압축/전단 강성이 최대가 될 수 있는 최적의 트러스 요소 각도를 결정하고자 하였다. 동일한 소재의 트러스 코어에 대해 단위면적당 코어의 체적이 동일하므로 코어 요소가 이루는 각에 따라 코어 요소의 단면적 크기 및 단위셀의 높이가 달라지게 됨에 따라 상대밀도는 달라지며, 따라서, 식(3)~(9)의 최대지지응력 및 강성은 코어 요소의 각도만의 함수로 표현될 수 있다. 밀면이 정사각형인 기준모델(reference model)의 한 변의 길이 (D_1) 및 코어 체적(V_c)가 일정하 때 기하학적 관계로부터 식(10)과 같이 $(t/L)^2$ 은 상수 C 와 트러스 요소 각도 θ 의 함수로 표현될 수 있다. 상수 C 는 기준모델 트러스 요소의 기하학적 형상에 의해 결정되는 값이다.

$$\left(\frac{t}{L} \right)^2 = C \cos^3 \theta \quad \left(C = \frac{\sqrt{2}V_{c,Ref}}{2D_{1,Ref}^3} \right) \quad (10)$$

식(10)을 식(1)에 대입하면, 트러스 코어 단위셀의 상대밀도는 식(11)과 같이 표현되며, 따라서, 모재의 항복 및 탄성좌굴에 의한 최대압축 및 전단

응력은 식(10),(11)을 식(3)~(7)에 대입함으로써 식(12)~(15)와 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{\rho}_C = \frac{2C}{\tan \theta} \quad (11)$$

$$\bar{\sigma}_{peak,yielding} = 2C\sigma_y \sin \theta \cos \theta \quad (12)$$

$$\bar{\tau}_{peak,yielding} = \sqrt{2}C\sigma_y \cos^2 \theta \quad (13)$$

$$\bar{\sigma}_{peak,eb} = \frac{1}{6}(C\pi e)^2 E_s \sin \theta \cos^4 \theta \quad (14)$$

$$\bar{\tau}_{peak,eb} = \frac{1}{12\sqrt{2}}(C\pi e)^2 E_s \cos^5 \theta \quad (15)$$

비탄성 거동에 의한 임계좌굴응력은 모재의 가공경화거동에 의존적이므로, 모재의 응력-변형률 선도가 경화식 $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ 을 따른다고 가정하면, 식(5)의 임계 좌굴 응력은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma_{cr,ib} = K \left[\frac{n\pi^2 e^2}{12} C \cos^3 \theta \right]^n \quad (16)$$

따라서, 식(16)을 식(6),(7)에 각각 대입함으로써, 비탄성 좌굴에 의한 압축 및 전단하중 작용 시에 단위셀에 작용하는 최대등가강도는 식(17)과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{\sigma}_{peak,ib} = 2KC^{n+1} \left(\frac{n\pi^2 e^2}{12} \right)^n \sin \theta \cos^{3n+1} \theta \quad (17)$$

$$\bar{\tau}_{peak,ib} = \sqrt{2}KC^{n+1} \left(\frac{n\pi^2 e^2}{12} \right)^n \cos^{3n+2} \theta \quad (18)$$

또한, 식(11)을 식(8),(9)에 대입함으로써 등가강성은 식(19),(20)과 같다.

$$\bar{E} = 2C \cos \theta \sin^3 \theta E_s \quad (19)$$

$$\bar{G} = C \cos^3 \theta \sin \theta E_s \quad (20)$$

위 식으로부터 동일한 소재로 구성된 단위면적당 코어 체적이 일정한 트러스 코어 단위셀의 최대등가강도 및 강성은 트러스 형상 및 트러스 요소가 이루는 각도에 의존함을 알 수 있다.

2.3 기준모델

트러스 요소의 각도가 최대지응력 및 강성에 미치는 분석하기 위하여 SUS304 1t 판재의 인장시험 결과로부터 도출된 탄성계수 203GPa 및 응력-변형률 선도를 이용하였다. 식(16)의 임계 좌굴 응력이 비탄성 좌굴조건에 의해 유도되었으므로, 소성구간을 포함하는 비탄성구간 전체를 근사할 때에는 비례한도 이후 항복이전까지의 실제 사용구간 내에서는 많은 오차를 포함할 수 있으므로 소재의 가공경화지수(n) 및 강도계수(K)는 선형탄성구간이후 0.2% 오프셋(offset)에 의한 항복점 이전까지 비선형 탄성구간의 비선형 커브 피팅을 통해 얻어진 값 $K=832\text{MPa}$, $n=0.158$ 을 사용하였다.

기준모델의 형상은 $L = 21.21\text{mm}$, $t = 2\text{mm}$, $\theta = 45^\circ$, $V_C = 339 \text{ mm}^3$ 로 정하였다. Fig. 2는 피라미드 코어 단위셀의 트러스 요소의 각에 따른 상대밀도를 보여주고 있는데, 모든 단위셀은 밀면적이 동일하고 단위 면적당 체적이 동일하므로 트러스 요소의 각도가 클수록 단위셀의 높이가 증가함에 따라 상대밀도는 감소함으로 보여주고 있다.

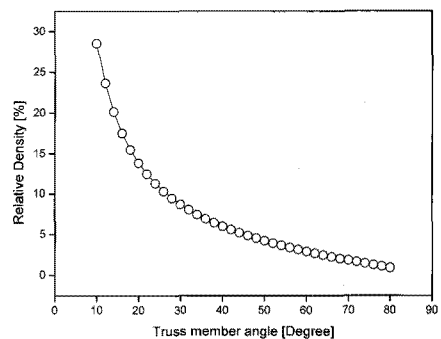


Fig. 2 Relative density variations for strut angles

2.4 트러스 요소 각도의 영향

기준모델의 형상 및 소재물성을 이용하여 식(10)의 상수 C 를 구한다음 식(12)~(15),(17)(18)을 이용하여 트러스 요소의 각도를 10° 에서 80° 까지 변화 시키면서 최대압축응력을 분석하였다. Fig. 3은 단위셀에 압축하중 작용 시 최대지응력 발생조건 별 최대압축응력을 보여주고 있는데, 모든

조건에서 트러스 요소의 각도가 증가함에 따라 증가하다가 최대값을 보인 후 감소하는 경향을 보임으로써 최대압축하중을 지지할 수 있는 최적의 트러스 요소 각도가 반드시 존재함을 나타내고 있다. 또한, 각 조건에 따라 최대압축응력 및 트러스 요소의 각이 다르게 나타나고 있는데, 탄성좌굴의 경우, $\theta=27^\circ$ 에서 242.39MPa, 항복의 경우, $\theta=45^\circ$ 에서 7.69MPa, 비탄성좌굴의 경우, $\theta=40^\circ$ 에서 9.15MPa의 최대압축응력을 예측하였다. 탄성좌굴에 의한 최대지지응력은 나머지 두 조건에 비해 최대약 32 배 이상의 값을 보임으로써 과도하게 예측하는 경향을 보였다. 또한, $\theta=59.04^\circ$ 를 기준으로 트러스 요소의 각이 이보다 작을 경우 비탄성좌굴에 의한 최대압축응력이 항복에 의한 값보다 크게 나타났으며, 이보다 클 경우에는 반대의 양상을 보였다. 이는 세장비(slenderness ratio)에 따라 단위셀이 지지할 수 있는 최대하중의 발생조건이 다를 수 있음을 의미한다. 또한, 저자의 이전 연구에서 보였던 A15052 판재의 경우, 비탄성 좌굴과 항복조건에서의 최대압축응력이 반전되는 트러스 요소의 각이 $\theta=40.71^\circ$ 로 본 연구의 결과와는 상이한 경향을 보이고 있는데, 이는 두 소재의 가공경화특성이 다름에 따라, 임계 비탄성 좌굴응력의 차이에 따른 것으로 판단된다.

Fig. 4는 전단하중 하에서의 각 조건에 따른 최대전단응력을 보여주고 있는데, 압축하중에서와는 달리 트러스 요소의 각도가 증가함에 따라 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. $\theta=10^\circ$ 일 경우 탄성좌굴에 의한 최대전단응력은 16,090.73MPa, 항복의 경우 10.55MPa, 비탄성 좌굴조건에서는 14.35MPa의 값을 보임으로써 압축에서와 유사하게 탄성좌굴조건은 나머지 두 조건에 비해 과도하게 큰 값을 예측하는 경향을 보였다. 또한 압축과 동일한 각도 $\theta=59.04^\circ$ 에서 비탄성좌굴 조건과 항복에 의한 최대전단응력이 반전되는 경향을 보였다.

Fig. 5는 단위셀의 등가압축계수 및 전단계수를 보여주고 있는데 식(19),(20)으로부터 등가압축 및 전단계수는 기준모델의 형상에 의해 결정되어지는 상수 C 및 모재의 탄성계수 E_s 에 의해 결정됨에 따라, 최대응력발생조건과는 무관하게 모두 동일한 값을 가진다. 결과로부터 최대등가압축계수는 $\theta=60^\circ$ 에서, 최대등가전단계수는 $\theta=30^\circ$ 에서 발생하였다. 따라서, 이상의 결과로부터 단위셀이 지지할 수 있는 최대강도, 최대압축/전단계수를 가질 수 있는 트러스 요소의 각도는 각각 다르게 존재함을 알 수 있다.

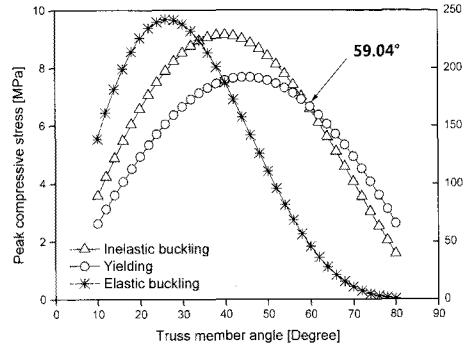


Fig. 3 Effect of truss member angle on peak stress under compressive load

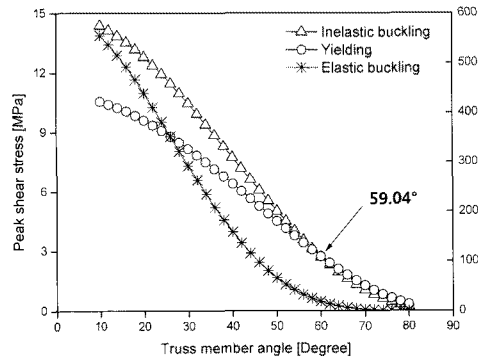


Fig. 4 Effect of truss member angle on peak stress under shear load

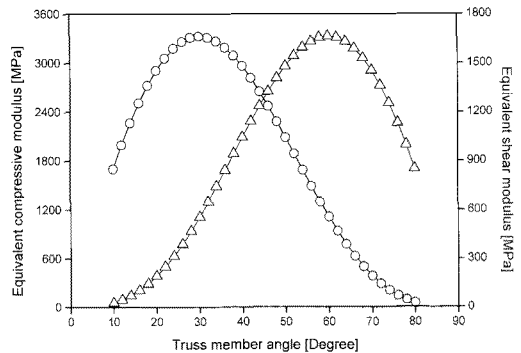


Fig. 5 Effect of truss member angle on equivalent modulus under compressive and shear load

3. 수치적 접근

3.1 유한요소해석모델 및 조건

상기의 해석적 접근에 의한 결과를 검증하기 위하여 이상적인 피라미드 형상으로 구현된 트러스

스 요소의 각도가 35°, 40°, 45°, 50°, 55°인 5 가지 단위셀에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 각각의 수치해석모델은 앞서 수행되었던 해석적 접근에서와 같이 동일한 단위면적 및 체적을 가지면서 트러스 요소의 각에 따라 두께가 달라지도록 모델링 하였으며, 해석에 사용된 탄성계수 및 유동응력은 앞서 언급한 인장시험결과를 이용하였다. 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 3D-implicit solver 를 이용하였으며, 각 모델의 상면에는 수직방향 또는 수평방향으로 강제변위 경계조건을 적용하여 압축 및 전단하중 하에서의 거동을 분석하였다.

3.2 유한요소해석결과

Fig. 6 은 $\theta=45^\circ$ 인 모델에 대한 변형 전후의 단위셀의 형상을 보여주고 있다. 압축의 경우 좌굴에 의해 ‘S’자 형상으로 변형되었으며, 전단의 경우 인장을 받는 트러스요소는 직선으로 늘어나는 반면, 압축을 받는 트러스요소는 ‘C’자 형상으로 변형되었다.

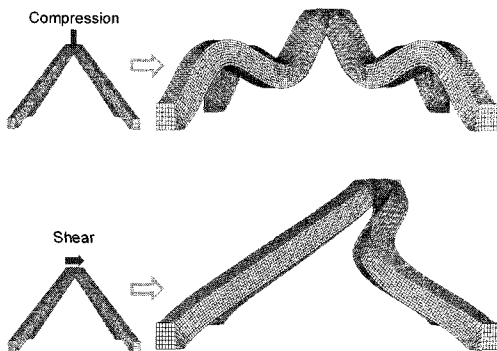


Fig. 6 Undeformed and deformed shape of unit cells

Fig. 7 은 각 단위셀을 50%까지 압축한 후 얻어진 하중을 단위면적으로 나누어 구한 등가압축응력곡선을 보여주고 있다. 트러스 요소의 각이 작을수록 최대응력이 발생하는 변형률이 큰 경향을 보이고 있으며, 이는 동일한 압축률하에서 트러스 요소의 각이 작을수록 변형률로 인해 흡수하는 에너지가 크음을 의미한다.

Fig. 8 은 앞서 수행된 해석적 접근에 의한 결과와 유한요소해석에 의한 결과를 보여주고 있다. 탄성좌굴조건에 의한 결과는 지나치게 크게 예측하는 경향을 보임으로써 비교대상에는 제외하였다. 다섯가지 트러스 요소각에 대한 해석결과, 모든

모델에 대해 비탄성좌굴조건에 의한 결과가 유한요소해석결과와 가장 잘 일치하는 경향을 보였으며, 항복조건에 의한 예측은 최대압축응력을 과소평가하는 경향을 보이고 있다. 또한, 유한요소해석 결과 $\theta=40^\circ$ 에서 최대압축응력 9.26MPa 를 보임으로써 동일한 각도에서 비탄성 좌굴조건에 의한 최대압축응력 9.15MPa 와 불과 1.2%의 극소한 오차를 보이고 있다. 식(17)로 부터 모재 및 단위면적당 체적이 동일할 경우 최대압축응력은 트러스 요소의 각도에 의존하므로, 해석적 및 수치적 해석에 의한 결과로부터 최대하중을 지지하기 위한 최적의 트러스 요소 각은 약 40°부근임을 알 수 있다.

Fig. 9 는 등가압축계수에 대한 결과를 보여주고 있는데, 두 결과 모두 트러스 요소 각이 증가함에 따라 증가하다 $\theta=50^\circ$ 이상에서는 증가폭이 감소하는 동일한 경향을 보이고 있으며, 해석적 방법에 의한 결과가 약간 과대평가하는 경향을 보이고 있으나, $\theta=55^\circ$ 에서 최대 5.9% 오차 범위내에서 비교적 잘 일치하는 경향을 보이고 있다.

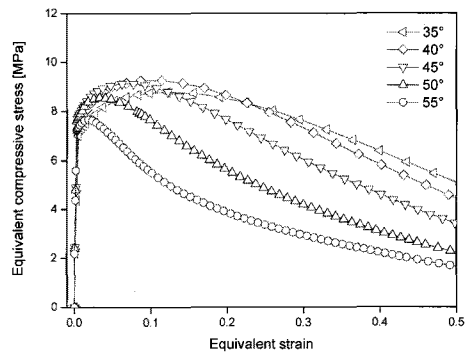


Fig. 7 Equivalent compressive stress curves for various truss member angles

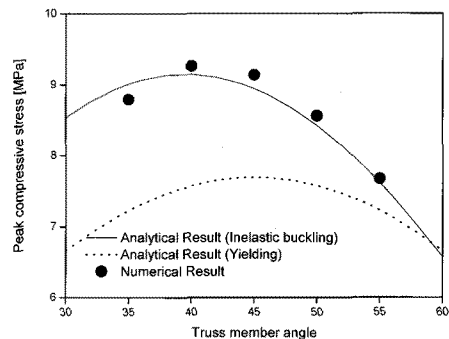


Fig. 8 Analytical and numerical prediction of peak compressive stresses

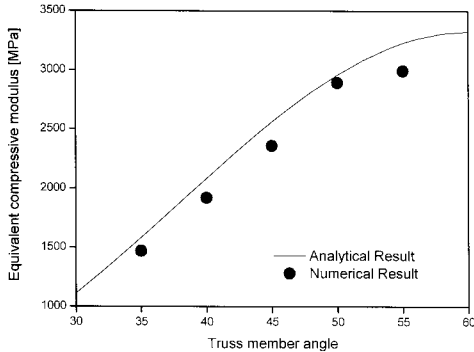


Fig. 9 Analytical and numerical prediction of equivalent compressive modulus

Fig. 10 은 전단하중하에서의 등가전단응력곡선을 보여주고 있는데 변형이 진행됨에 따라 지속적으로 응력이 감소하는 압축과는 달리 특정한 변형률 이후에는 일정한 값을 유지하는 경향을 보였으며, 트러스 요소각이 작을수록 등가전단응력은 커지는 경향을 보였다.

Fig. 11~12 는 최대전단응력 및 등가전단계수에 대한 두가지 접근법에 따른 결과를 보여주고 있는데 최대전단응력의 경우 비탄성 좌굴조건에 의한 예측이 유한요소해석에 의한 예측값과 잘 일치하는 경향을 보였다. 또한, 등가전단계수의 경우 트러스 요소 각이 증가함에 따라 감소하는 전체적인 경향은 일치하고, 트러스 요소의 각이 45° 이하인 경우 해석적 접근에 의한 결과가 약간 높게 예측하는 경향을 보이고 있으나, 트러스 요소각이 커질수록 오차가 줄어드는 경향을 보였다.

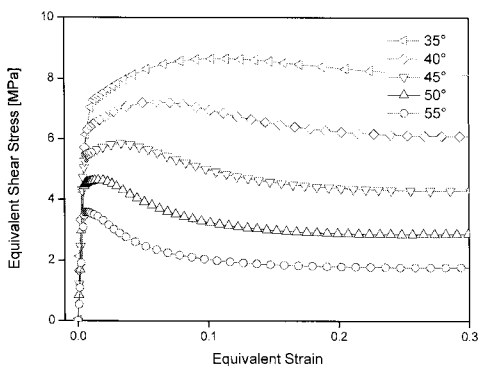


Fig. 10 Equivalent shear stress curves for various truss member angles

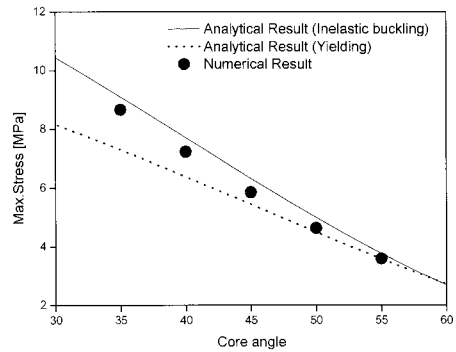


Fig. 11 Analytical and numerical prediction of peak shear stresses

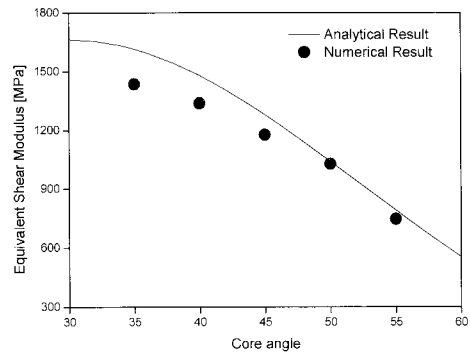


Fig. 12 Analytical and numerical prediction of equivalent shear modulus

4. 모재의 기계적 물성의 영향

유한요소해석 결과와 비탄성 좌굴조건에 의해 도출된 해석적 해가 가장 잘 일치하는 결과를 바탕으로 모재의 기계적 물성에 따른 영향을 해석적 결과를 이용하여 분석하였다.

최대압축 및 전단응력은 트러스 요소의 비선형 좌굴조건과 연관되어 있으므로, 단위셀의 기하학적 형상뿐만 아니라, 모재의 가공경화 특성에 의존적이다. 본 연구에서는 모재의 가공경화 특성이 이에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 피라미드 단위셀에 대해 재료강도계수(K) 및 가공경화지수(n)를 각각 기준모델 대비 10%씩 점차 증가시키면서 최대압축 및 전단응력의 변화를 살펴보았다.

Fig. 13,14 는 가공경화지수를 고정시키고 재료 강도계수를 10%씩 증가시킨 결과이다. 단위셀의 압축 및 전단강도는 재료강도계수가 증가할수록

증가하는 경향을 보였으며, 최대등가응력이 발생하는 구간에서는 증가 폭이 가장 크게 나타났다. 또한 압축의 경우 최대등가응력이 발생하는 트러스 요소의 최적각도는 조금씩 작아지는 경향을 보였다. 이는 최대강도를 위한 최적의 트러스 요소 각도가 모재의 기계적 물성에 의존함을 나타낸다.

Fig. 15,16 은 반대로 재료강도계수는 고정시키고 가공경화지수를 10%씩 증가시킨 결과이다. 단위셀의 압축 및 전단강도는 가공경화지수가 1.0 이하의 값에서 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 최대응력이 감소하는 폭은 동일 비율 만큼 증가시킨 재료강도계수의 영향보다는 작게 나타났으나, 최대응력이 발생하는 최적의 트러스 각도의 감소폭은 큰 것으로 나타났다.

따라서, 모재의 가공경화 특성은 최대지지응력 뿐만 아니라, 최대응력이 발생하는 최적 트러스 요소각도에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

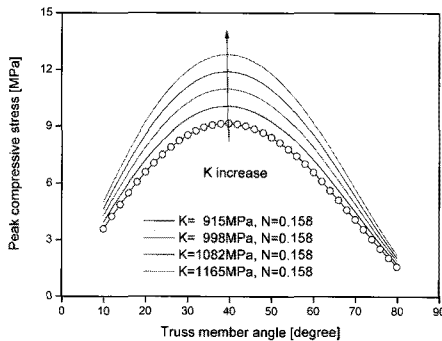


Fig. 13 Effect of strength coefficient on peak stress under compressive load

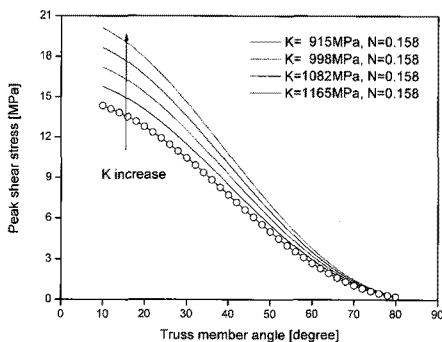


Fig. 14 Effect of strength coefficient on peak stress under shear load

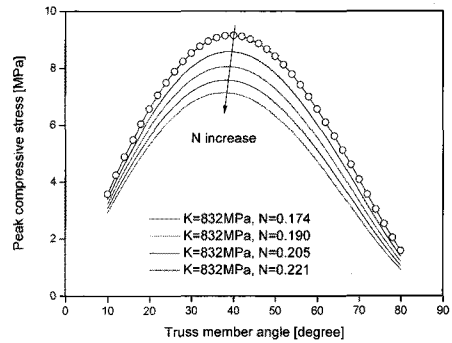


Fig. 15 Effect of strain hardening exponent on peak stress under compressive load

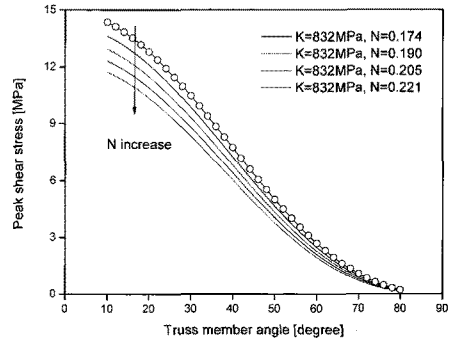


Fig. 16 Effect of strain hardening exponent on peak stress under shear load

5. 결론

본 연구에서는 피라미드 코어 단위셀의 압축 및 전단하중에서의 기계적 거동을 분석하기 위하여, 해석적 모델을 이용하여 트러스 요소의 각도에 따른 최대압축 및 전단응력, 압축 및 전단계수의 영향을 분석하였으며, 유한요소법을 이용한 수치해석을 통해 이를 검증하였다. 이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 최대지지가능 압축강도는 트러스 요소의 각이 증가함에 따라 증가하고, 최대점 이후 감소하는 경향을 보임으로써 최대압축강도를 가질 수 있는 트러스 요소의 각도가 반드시 존재하며, 이는 모재의 기계적 특성에 의존적이다.
- 2) 트러스 요소의 각이 클수록 최대전단강도는 지속적으로 작아지는 경향을 보인다.
- 3) 등가압축 및 전단계수는 단위면적당 체적이 동일할 경우, 각각 60°, 30°에서 최대치를 가지며,

이는 모재의 특성과는 무관하다.

4) 본 연구에서 고려했던 최대압축 및 전단응력을 예측하기 위한 세가지 조건중 비탄성 좌굴조건에 의한 예측결과가 유한요소해석결과와 가장 잘 일치하는 경향을 보였으며, 탄성좌굴조건은 과대하게 예측하는 경향을, 항복조건은 약간 작게 예측하는 경향을 보였다.

5) 모재의 재료강도계수 및 가공경화지수에 따라 최대강도는 향상 또는 감소될 수 있으며, 최대강도를 보이는 최적의 트러스 요소 각도 역시 이에 의존한다.

후 기

본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소의 기본사업에 의해 수행되었음.

참고문헌

- Gibson, L. J. and Ashby, M. F., "Cellular solids: structure and properties, 2nd Ed.," Cambridge University Press, 1997.
- Evans, A. G., Hutchinson, J. W. and Ashby, M. F., "Multifunctionality of cellular metal systems," *Progress in Materials Science*, Vol. 43, No. 3, pp. 171-221, 1999.
- Evans, A. G., Hutchinson, J. W., Fleck, N. A., Ashby, M. F. and Wadley, H. N. G., "The topological design of multifunctional cellular metals," *Progress in Materials Science*, Vol. 46, No. 3-4, pp. 309-327, 2001.
- Lee, Y. H., Lee, B. K., Jeon, I. S. and Kang, K. J., "Wire-woven bulk Kagome truss cores," *Acta Materialia*, Vol. 55, No. 18, pp. 6084-6094, 2007.
- Jung, C. G., Seung, D. Y., Yang, D. Y., Na, S. J. and Ahn, D. G., "Development of a continuous fabrication system for a metallic sandwich plate with a three-dimensional truss core," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 45, No. 3-4, pp. 352-361, 2009.
- Despande, V. S. and Fleck, N. A., "Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending," *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 38, No. 36-37, pp. 6275-6305, 2001.
- Despande, V. S., Fleck, N. A. and Ashby, M. F., "Effective properties of the octet-truss lattice material," *J. of Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 49, No. 8, pp. 1747-1769, 2001.
- Wadley, H. N. G., Fleck, N. A. and Evans, A. G., "Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, No. 16, pp. 2331-2343, 2003.
- Sypeck, D. J. and Wadley, H. N. G., "Cellular metal truss core sandwich structures," *Advanced Engineering Materials*, Vol. 4, No. 10, pp. 759-764, 2002.
- Wadley, H. N. G., "Cellular metal manufacturing," *Advanced Engineering Materials*, Vol. 4, No. 10, pp. 726-733, 2002.
- Xue, Z. and Hutchinson, J. W., "Constitutive model for quasi-static deformation of metallic sandwich cores," *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 61, No. 13, pp. 2205-2238, 2004.
- Hyun, S., Karlsson, A. M., Torquato, S. and Evans, A. G., "Simulated properties of Kagome and tetragonal truss core panels," *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 40, No. 25, pp. 6989-6998, 2003.
- Kim, S. W., Jung, H. C., Lee, Y. S. and Kang, B. S., "Analytical approach to compression and shear characteristics of the unit cell of PCM core with pyramidal configuration," *Transactions of Materials Processing*, Vol. 19, No. 7, pp. 411-415, 2010.