

# 가상등가투영형상을 이용하여 피라미드형 트러스 코어를 구비한 금속샌드위치 판재의 효율적 해석기법 제안

성대용<sup>1</sup>·정창균<sup>1</sup>·심도식<sup>1</sup>·양동열<sup>#</sup>

## Introduction of Efficient FE-analysis Method Using Virtual Equivalent Projected Model (VEPM) for Metallic Sandwich Plates with Pyramidal Truss Cores

D. Y. Seong, C. G. Jung, D. S. Shim and D. Y. Yang

### Abstract

Metallic sandwich plates constructed of two face sheets and low relative density cores have lightweight characteristics and various static and dynamic load bearing functions. To predict the formability and performance of these structured materials, a computationally efficient FE-analysis method incorporating virtual equivalent projected model has been newly introduced for analysis of metallic sandwich plates. Two dimensional models using the projected shapes of 3D structures have the same equivalent elastic-plastic properties with original geometries including anisotropic stiffness, yield strength and linear hardening function. The projected shapes and virtual properties of the virtual equivalent projected model have been estimated analytically with the same equivalent properties and face buckling strength of 3D pyramidal truss core.

**Key Words** : Virtual Equivalent Projected Model (가상등가투영형상), Metallic Sandwich Plates(금속 샌드위치 판재), Pyramidal Truss Core(피라미드형 트러스 코어)

### 1. 서론

금속샌드위치 판재는 두 개의 표면판재 사이에 상대공간밀도가 낮은 코어로 구성되어 높은 무게 대비 강성, 강도, 내충격성을 가지는 기능성 재료이다[1]. 이러한 금속 샌드위치 판재에 관하여 트러스, 허니콤, 주름구조등 다양한 내부구조재들을 특정 항복강도에서 최소무게를 가지도록 이론적으로 최적설계한 연구와 제작공정에 대한 연구가 발표되고 있다[2~5]. 샌드위치 판재의 성형성 분석에 대한 연구가 발표되고 있으나 성형성 개선을 위한 설계변수 분석 및 성형공정 개발에 관한 연구는 아직 미흡한 실정이다[6, 7].

성형을 위한 샌드위치 판재의 내부구조를 개발

및 설계하기 위해서는 다양한 설계변수범위에서 탄소성 유한요소해석이 필요하다. 그러나 3 차원 구조체로 구성된 단위구조의 크기가 전체 샌드위치 판재의 넓이에 비하여 비교적 작기 때문에 긴 계산시간과 메모리의 부족으로 인하여 많은 어려움이 있다. 따라서 3 차원 구조체를 균질화하여 연속체로 가정한 등가물성을 이용한 해석기법이 개발되었다[8,9]. 균질화 기법을 이용한 해석은 Deshpande 가 비압축성 연속체의 소성변형에 압축성을 부가한 탄소성 구성방정식을 제안하고 메탈 폼에 적용하였다[10]. Xue 등이 피라미드형 트러스, 허니콤, 주름구조의 탄소성 이방성 물성과 압축성을 고려한 연속체의 구성방정식을 제안하고 검증하였다[11].

1. 한국과학기술원 기계항공시스템공학부 대학원  
# 교신저자: 한국과학기술원 기계항공시스템공학부  
, E-mail:dyyang@kaist.ac.kr

그러나 균질화 기법을 이용한 해석은 샌드위치 판재의 국부적 좌굴을 예측하지 못한다는 단점을 가지고 있다. 샌드위치 판재의 대부분의 성형결함은 표면판재와 내부구조의 국부적 좌굴, 내부구조 붕괴, 접합결함 등에 의해 발생한다는 것을 고려하면 균질화 기법을 이용한 해석은 샌드위치 판재의 성형성 평가에 적합하지 않다.

그리고 계산시간을 줄이기 위해 등가형상을 이용한 해석기법이 제안되었는데 좌굴이 발생하지 않을 것으로 예상되는 부분을 3 차원 구조체와 동일한 굽힘 강성과 강도를 가지는 등가형상(I-beam)으로 대체하여, 덩플 형상의 내부구조를 구비한 샌드위치 판재의 굽힘 거동을 효율적으로 예측하였으나 3 점 굽힘 해석처럼 좌굴발생 영역이 예측 가능한 해석에만 적용될 수 있다는 단점이 있다[12].

따라서 본 연구에서는 샌드위치 판재의 성형공정에서 국부적 좌굴과 내부구조 붕괴를 예측할 수 있고 3-point bending, clamped bending, U-bending, draw bending, plane drawing, indentation 과 같은 일반적인 유사 2 차원 하중-경계조건의 공정에 적용할 수 있는 효율적 해석기법을 제안하고자 한다.

## 2. 가상등가투영형상을 이용한 해석

트러스 코어는 허니콤 코어와 더불어 금속샌드위치 판재의 대표적인 3 차원 구조체이며 굽힘과 전단하중을 받을 때 무게 대비 항복강도가 가장 높은 것으로 보도되고 있다. 3 차원 구조체의 모델링, 요소 생성 및 유한요소 해석에는 많은 계산시간과 메모리가 필요하다. 따라서 Fig. 1 과 같이 3 차원 구조체와 동일한 탄소성 등가물성을 가지는 가상적으로 투영된 2 차원 형상을 이용하는 효율적 해석기법을 제안하였다. 가상등가투영형상의 치수와 물성을 결정하기 위해서는 다음과 같은 과정으로 이루어진다.

- 1) 3 차원 트러스 코어를 균질한 연속체로 가정하고 탄소성 이방성 등가물성을 계산한다. 등가물성은 단위구조의 이론적 해석으로 계산한 방법을 인용하였다[11]. 그리고 가공경화함수는 선형이라 가정하여 유도하였다.
- 2) 가상등가투영형상 역시 같은 방법으로 탄소성 이방성 등가물성을 계산한다.
- 3) 트러스 코어와 가상등가투영형상의 탄소성 이방성 등가물성과 표면판재의 좌굴강도가 동일

한 투영형상의 치수와 가상 물성을 계산한다.

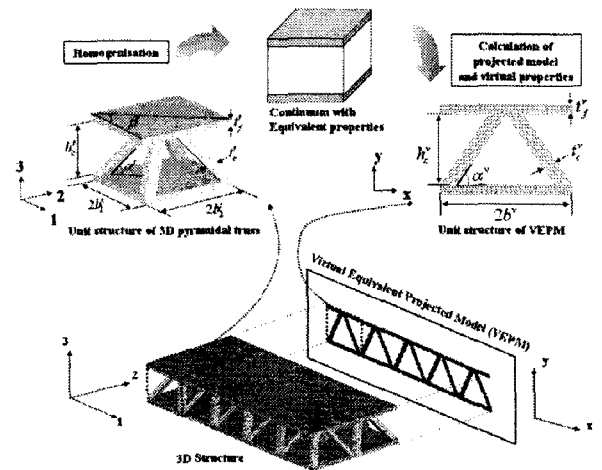


Fig. 1 Procedures of Virtual Equivalent Projected Model

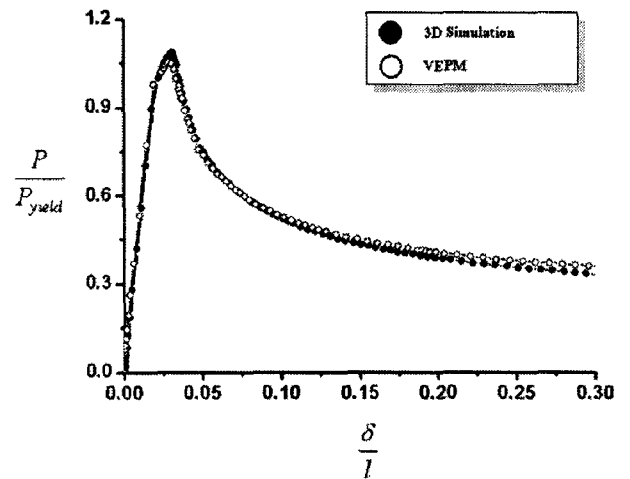


Fig. 2(a) Load-deflection curves of VEPM and 3D Model

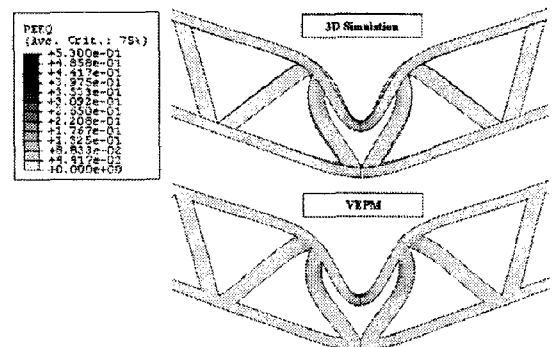


Fig. 2(b) Deformed Shapes of VEPM and 3D Model

가상등가투영형상과 3차원 피라미드 트러스의 등가물성이 같아도 표면판재의 좌굴강도가 다르면 하중-처짐 선도와 변형모드가 달라진다. 따라서 단위구조에서 발생하는 표면판재의 좌굴강도가 두 모델이 같도록 수식화하여 3점 굽힘 해석에 적용해 보았다. 샌드위치 판재가 3점 굽힘 하중을 받을 때 표면판재는 굽힘에 의한 모멘트와 전단력이 동시에 작용한다. 굽힘 하중에 의해 압축응력을 받는 표면판재는 내부구조의 빈 공간으로 좌굴되는 현상이 발생하며 내부구조도 전단력 또는 주름진 표면판재의 형상에 의해 좌굴되는 경향이 있다. 3점 굽힘 해석은 샌드위치 판재의 굽힘 성능을 예측하고 표면판재 또는 내부구조의 좌굴을 모사하기에 적절한 예제 중 하나이다. ASTM 표준시험규격을 참조하여 양단 지지점간 거리( $2l$ ) 120 mm, 펀치와 다이의 반경( $R$ )을 12.7 mm 로 정하고 Symmetric 조건을 부여하여 1/2 해석을 수행하였다[13]. 평균요소크기 0.075 mm 로 3차원 해석은 C3D8R, 투영형상은 CRE4R 요소를 이용하여 ABAQUS ver. 6.4 Implicit code 로 해석하였다. 해석대상의 샌드위치 판재는 표면판재와 내부구조 모두 SUS304 재료로 구성되었고 샌드위치 판재두께( $H$ ) 3 mm, 표면판재 0.3 mm, 코어 요소두께 0.4 mm, 코어각도 45°, 코어의 상대공간밀도를 4.42 % 로 선정하였다. 해석결과를 Fig. 2(a) 에 도시하였는데, 가상등가 투영형상의 하중- 처짐 선도가 3차원 해석의 거동을 잘 묘사하고 있는 것을 알 수 있다. 특히 굽힘 강성, 굽힘 강도, 붕괴 하중, 붕괴하기까지의 처짐량, 에너지 흡수량 등을 거의 유사하게 예측하였다. 그런데 처짐량이 증가할수록 가상등가투영형상의 하중이 다소 크게 계산되었는데 내부구조 좌굴이 하중에 지배적인 영향을 미치는 부분이다. 가상등가 투영형상은 3차원 모델과 동일한 등가물성을 가지면서 표면판재 좌굴강도가 같도록 계산된 가상의 형상이다. 따라서 내부구조의 좌굴이 크게 발생하는 경우 다소 오차를 보일 수도 있다. 그런데 Fig. 2(b)와 같이 붕괴 이후 표면판재와 내부구조의 좌굴모드를 관찰하면 변형된 형상과 유효소성변형률 분포도 거의 비슷하다는 것을 알 수 있어 가상등가투영형상으로 3점 굽힘 실험에서의 발생할 수 있는 결함모드를 정확히 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 해석된 샌드위치 판재의 경우, 표면판재가 항복된 직후 표면판재 좌굴이 발생하여 하중이 급격하게 감소하므로 표면판재 좌굴에 의해 붕괴

된다고 할 수 있다. 좌굴된 표면판재의 형상이 내부구조를 굽히는 모멘트를 생성해 내부구조 역시 좌굴된다. 이 경우 표면판재좌굴과 내부구조좌굴이 주 붕괴모드이며, 가상등가투영형상으로 효율적으로 예측할 수 있다.

### 3. 결 론

피라미드형 트러스 코어를 구비한 금속 샌드위치 판재의 해석 효율을 높이기 위해 가상적으로 투영시킨 형상과 그 형상에 가상의 물성을 부여하여 해석하는 기법을 제안하였다. 이상의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 가상등가투영형상을 이용한 피라미드형 트러스 코어를 구비한 샌드위치 판재의 효율적 해석기법을 제안하였다.

(2) 3 차원 피라미드 트러스 구조체와 2 차원 가상투영형상의 등가물성을 단위구조 해석을 통하여 이론적으로 계산하였다.

(3) 가상등가투영형상이 3 차원 피라미드 트러스 구조와 동일한 등가물성과 표면판재 좌굴강도를 가지도록 투영형상의 치수와 가상물성을 유도하였다.

(4) 3 점 굽힘 해석을 통해 하중-처짐 선도를 비교한 결과, 3 차원 피라미드 코어의 해석과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 가상등가투영형상을 이용한 2 차원 해석이 3 차원 구조체의 굽힘 강성, 강도, 에너지 흡수량, 붕괴하중, 붕괴하기까지 처짐량 등을 예측 할 수 있는 가능성을 확인하였다.

(5) 3 차원 피라미드형 트러스 코어를 갖는 샌드위치 판재의 주 결함모드는 표면판재항복이며 붕괴모드는 표면판재좌굴이다. 가상등가투영형상도 3 차원 전체모델 해석과 동일한 결함 및 붕괴모드를 예측하였다.

가상등가투영형상은 Draw bending, U-bending, L-bending, Clamped bending 과 같은 유사 2 차원 공정해석에 적용 할 수 있을 것으로 기대된다.

### 후 기

본 연구는 산업자원부의 차세대신기술개발사업인 3 차원 형상의 금속 구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재 개발 연구결과의 일부이며 이에 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. N. G. Waldley, 2003, Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures, *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 63, pp. 2331~2343.
- [2] F. W. Zok, S. A. Waltner, Z. Wei, H. J. Rathbun, R. M. McMeeking, A. G. Evans, 2004, A protocol for characterizing the structural performance of metallic sandwich panels: application to pyramidal truss cores, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, pp. 6249~6271.
- [3] N. Wicks, J.W. Hutchinson, 2001, Optimal truss plates, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 5165~5183.
- [4] V. S. Deshpande, N.A. Fleck, 2001, Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 6275~6305.
- [5] L. Valdevit, J. W. Hutchinson, A.G. Evans, 2004, Structurally optimized sandwich panels with prismatic cores, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, pp. 5105~5124.
- [6] 김지용, 김종호, 정완진, 2005, 샌드위치 강판의 전단가공에 있어서 전단면에 미치는 금형 설계변수의 영향, *한국소성가공학회지*, 제 14 권 제 1 호, pp. 37~42.
- [7] 김지용, 김종호, 정완진, 양동열, 2005, 접합판재의 전단변형거동에 관한 연구, *한국소성가공학회지*, 제 14 권 제 3 호, pp. 257~262.
- [8] J. Hohe, W. Becker, 2001, An energetic homogenization procedure for the elastic properties of general cellular sandwich cores, *Composites: Part B*, Vol. 32, pp. 185~197.
- [9] X. F. Xu, P. Qiao, 2002, Homogenized elastic properties of honeycomb sandwich with skin effect, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, pp. 2153~2188.
- [10] V. S. Deshpande, N. A. Fleck, 2000, Isotropic constitutive models for metallic foams, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 48, pp. 1253~1283.
- [11] Z. Xue, J. W. Hutchinson, 2004, Constitutive model for quasi-static deformation of metallic sandwich cores, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 61, pp. 2205~2238.
- [12] 성대용, 정창균, 윤석준, 양동열, 2005, 등가형상을 이용한 덤플형 금속 샌드위치 판재의 효율적 굽힘 거동 예측, *한국소성가공학회지*, 제 14 권, 제 8 호, pp. 718~724.
- [13] ASTM, 1995, Standard test method for semi-guided bend test for ductility of metallic materials, E270.