

등가형상을 이용한 딴플형 금속 샌드위치 판재의 효율적 굽힘 거동 예측

성대용¹ · 정창균¹ · 윤석준¹ · 양동열[#]

Efficient Methods of Prediction Incorporating Equivalent Models for Elasto-Plastic Bending Behavior of Metallic Sandwich Plates with Inner Dimpled Shell Structure

D. Y. Seong, C. G. Jung, S. J. Yoon, D. Y. Yang

(Received October 20, 2005)

Abstract

An efficient finite element method has been introduced for analysis of metallic sandwich plates subject to bending moment. A full model 3-point bending FE-analysis shows that the plastic behavior of inner structures appears only at the load point. The unit structures of sandwich plates are defined to numerically calculate the bending stiffness and strength utilizing the recurrent boundary condition for pure bending analysis. The equivalent models with the same bending stiffness and strength of full models are then designed analytically. It is demonstrated that the results of both models are almost the same and the FE-analysis method incorporating the equivalent models can reduce the computation time effectively. The dominant collapse modes are face buckling and face yielding. Since the inner dimpled structures prevent face buckling, sandwich plates with inner dimpled shell structure can absorb more energy than other types of sandwich plates during the bending behavior.

Key Words: Metallic Sandwich Plate, 3-point Bending, Unit Structure, Recurrent Boundary Condition, Equivalent Model

1. 서 론

금속 샌드위치 판재는 메탈 폼(Foam) 구조, 선재를 코어로 이용한 트러스 구조, 면재의 박판을 이용한 벌집(Honeycomb)구조, 그리고 딴플형 구조 등 다양한 형태의 내부구조 상하양면에 표면판재를 저항용접이나 접착제로 접합한 경량 고강도/고강성 판재이다[1]. 이러한 금속 샌드위치 판재에 대한 연구는 내부구조의 형상을 제안하고 제조공정을 설계하는 개념정립 단계, 굽힘 하중에 대한 이론적 최적화를 통한 설계변수 분석단계, 균질화된 등가물성의 구성방정식을 이용하여 해석기법

을 개발하는 탄소성 거동 예측단계, 굽힘, 압축, 전단, 충격과 같은 다양한 하중에 대한 특성분석과 소음, 진동, 방열, 전자파 차폐, 열변형 등의 특수목적의 판재 개발을 위한 목적과 용도에 맞는 설계변형단계로 진행되고 있으며 실용화, 제품화, 대량생산 및 공정안정화를 목적으로 하고 있다[2]. 또한, 제작된 샌드위치 판재의 성형성 평가 및 성형을 위한 기초연구가 진행되고 있다[3~4]. 그런데 대부분의 금속 샌드위치 판재는 특정 하중에 대한 이론적 최적화 단계와 등가물성을 통한 탄소성 거동을 예측하는 초기 단계의 연구가 진행되고 있는 실정이다. 특히 유한요소해석에서

1. 한국과학기술원 기계공학과 대학원
교신저자 : 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : dyyang@kaist.ac.kr

복잡한 내부구조의 기하학적 형상으로 인하여 요소와 절점 수가 많아 일반 PC 에서 긴 해석시간과 메모리 부족으로 해석이 불가능한 경우도 있어 탄소성 거동을 효율적으로 예측하기 위하여 등가물성을 이용하는 연구가 활발히 진행되고 있다[5-6]. 그러나 등가물성을 계산 또는 측정하기 위해서는 적지 않는 실험과 해석이 요구되며 단위구조의 크기에 따른 오차가 발생하고 소성변형을 예측하기 위한 방법이 확립되지 않은 실정이다. 따라서 본 연구는 등가물성을 계산 또는 측정하지 않고 단위구조의 순수 굽힘 해석만으로 등가형상을 계산하여 탄소성 굽힘 거동을 효율적으로 예측할 수 있는 기법을 제안하고 내부구조의 형상이 가장 복잡한 딥플형 내부구조 금속 샌드위치 판재에 적용하고자 한다.

2. 샌드위치 판재의 전체모델해석

2.1 딥플형 내부구조 금속 샌드위치 판재

딥플형 내부구조 금속 샌드위치 판재는 Fig. 1 과 같이 프레스나 롤 금형으로 성형된 딥플형 박판내부구조의 상하 양면에 표면판재를 저항용접 또는 접착제로 접합한 판재로써 정밀도 높은 내부구조의 대량생산이 용이하고 목적과 용도에 맞게 설계변경이 쉽다는 장점이 있다.

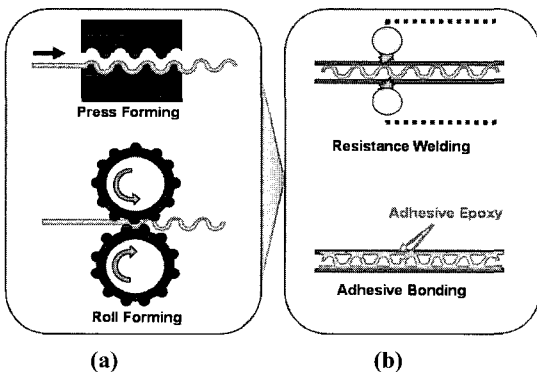


Fig. 1 (a) Fabrication of inner dimpled shell structures
(b) Bonding process

2.2 정적 굽힘 유한요소해석

굽힘 하중에 대하여 이론적 최적화 결과, 상하 동일 반경의 반구형 딥플형상이 굽힘 하중에 대한 최적의 내부구조이다[7]. 반구형 딥플 내부구조 금속 샌드위치 판재를 하중점(load point)을 기준으로

대칭조건을 주어 3 점 굽힘 하중조건에서 해석하기 위한 도면을 Fig.2 에 도시하였다. 요소와 절점의 수를 최소화하기 위해 y 방향을 폭으로 하는 샌드위치 빔을 전체모델해석 대상으로 선정하였으며 편의상 a-b-z 좌표에서 형상의 치수를 표기하였다. 재료의 물성은 가공경화(work hardening)을 무시한 완전탄소성(elastic perfectly plastic)재료로 가정하였고 아바쿠스(ABAQUS 6.4 Implicit) 상용프로그램을 이용하여 해석하였다. 등방성 탄성계수(E)는 180GPa, 항복응력(yield stress)는 284.6MPa, 포아송비는 0.28 로 재료 판재의 측정된 데이터를 사용하였다.

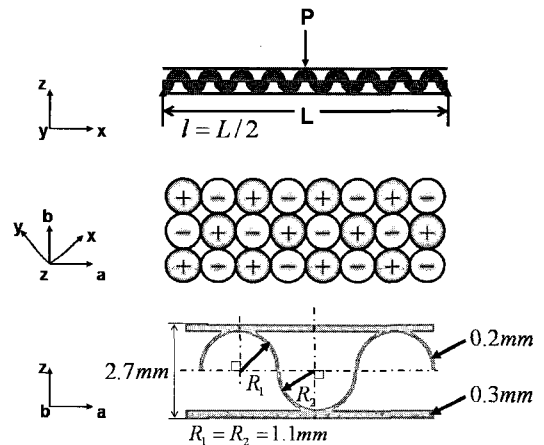


Fig. 2 Model of sandwich plate for 3-point bending FE analysis

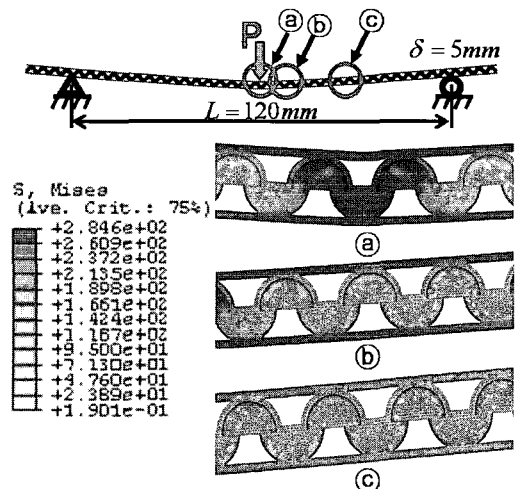


Fig. 3 Results of symmetric model FE analysis of sandwich plate subjected to 3-point bending

전체모델해석 결과를 Fig. 3 과 같이 주 파손모드는 표면판재항복(face sheet yielding)이며 중앙 하중점에서 발생한다. 표면판재의 소성변형영역은 하중점으로부터 좌우로 전파되나 내부구조는 하중점에서만 국한되어 소성변형을 한다. 그리고, 샌드위치 판재의 전체모델 유한요소해석은 137861개의 절점과 535761개의 선형 사면체 요소를 생성하여 펜티엄 4의 3.2GHz의 컴퓨터에서 해석시간이 17시간이 소요되었다. 만약 중앙 하중점에서 대칭이 아닌 경우 더욱더 비효율적인 해석을 해야 할 것으로 예상된다. 따라서 소성변형을 하는 표면판재의 형상은 고정하고 하중점을 제외한 나머지 내부구조를 동일 강성을 가지는 등가형상으로 대체하여 요소와 절점 수를 줄여 효율적으로 탄소성 굽힘 거동을 예측할 수 있다고 판단하였다.

3. 등가형상을 이용한 정적 굽힘 해석

샌드위치 판재의 등가형상을 이용한 3점 굽힘 해석기법의 흐름도를 Fig. 4 에 도시하였다.

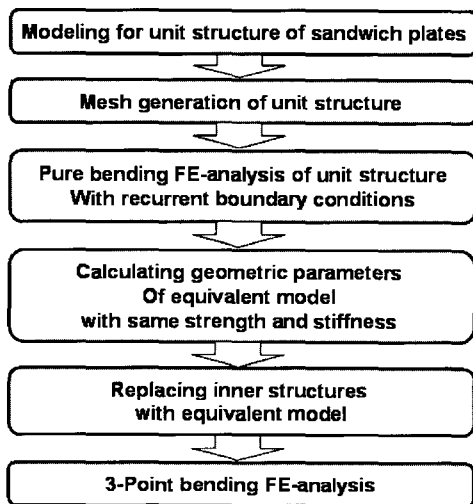


Fig. 4 Flowchart of the efficient FE-analysis method for sandwich plates

먼저 금속 샌드위치 판재의 단위구조를 정의하고 모델링하여 요소를 생성한다. 그 다음 단위구조의 순수 굽힘 해석을 통해 동일 강도와 강성을 가지는 등가형상의 기하학적 형상을 결정한다. 마지막으로 파손 및 붕괴 모드를 분석하고 정확한 내부구조의 소성변형을 묘사하기 위해 하중점 부

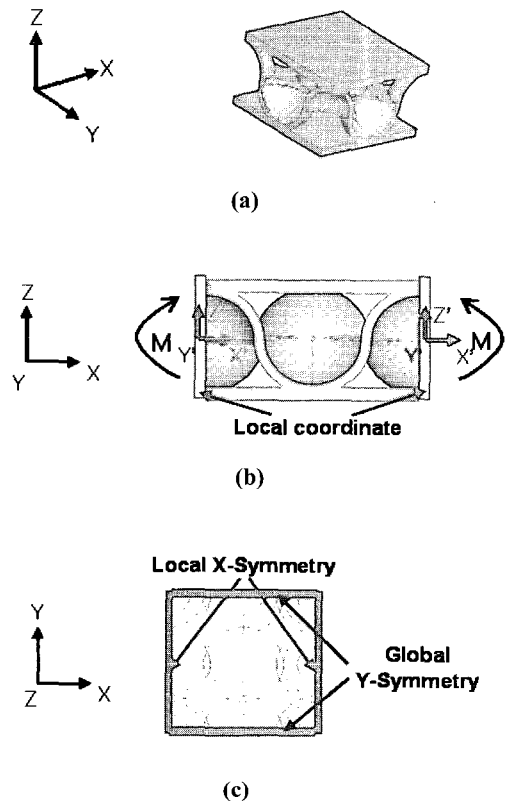


Fig. 5 (a) 3D unit structure (b) pure bending condition (c) recurrent boundary condition

근의 내부구조를 제외한 나머지 내부구조를 등가형상으로 대체하여 효율적인 샌드위치 판재의 굽힘 해석을 수행한다.

3.1 등가형상결정을 위한 순수 굽힘 해석

대부분의 금속 샌드위치 판재는 단위구조의 반복된 형태로 구성되어있어서 단위구조만을 해석하여 전체 샌드위치 판재의 굽힘 특성을 분석할 수 있다. 그런데 단위구조만을 해석할 경우 단위구조의 하중조건이 전체 샌드위치 판재의 하중조건을 표현할 수 있어야 하고 경계조건 또한 단위구조의 경계에 반복경계조건(recurrent boundary condition)을 부여하여 전체 샌드위치 판재의 거동을 묘사 할 수 있어야 한다.

따라서 Fig. 5 와 같이 단위구조에 순수 굽힘 하중조건과 반복경계조건을 주어 단위구조의 해석만으로 샌드위치 판재의 굽힘 강성과 강도를 계산할 수 있다. 그리고 반복경계조건을 검증하기 위해 단위구조의 순수 굽힘 해석과 연속된 모델의 순수

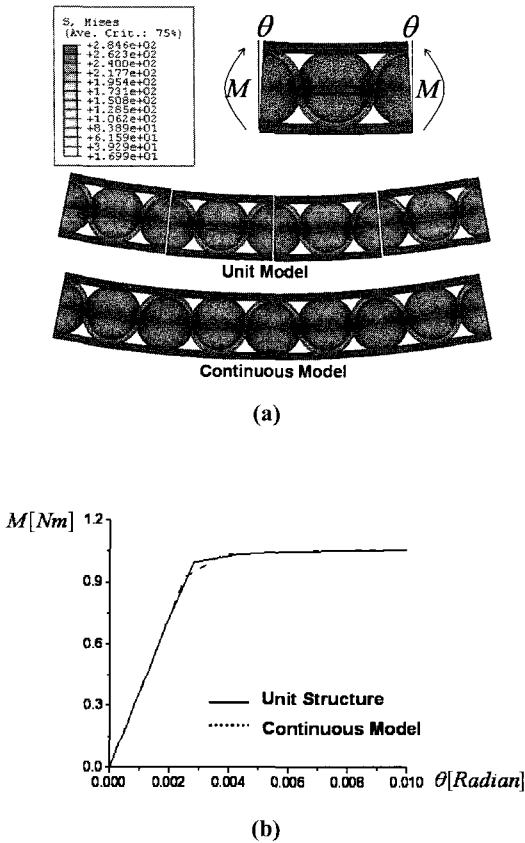


Fig. 6 Comparison of simulated results for unit structure with continuous model sandwich plate subjected to pure bending (a) stress distribution (b) moment-angle graph

굽힘 해석을 Fig. 6 과 같이 비교해 보았다. 그 결과 반복경계조건이 주어진 단위구조의 경계와 연속된 모델에서 단위구조의 경계에서 응력분포가 거의 일치하고 정량적 특성(moment-angle graph) 또한 거의 동일함을 확인 할 수 있었다. 따라서 단위구조의 해석의 결과를 신뢰할 수 있고 전체 샌드위치 판재의 굽힘 강성을 효율적으로 계산할 수 있음을 알 수 있었다.

3.2 등가형상 결정

단위구조만의 해석으로 샌드위치 판재 전체의 굽힘 강도와 강성을 해석적으로 계산하고 샌드위치 판재와 동일한 강성과 강도를 가지도록 Fig. 7 과 같은 등가형상을 결정할 수 있다. 등가형상을 계산할 때 표면판재의 두께(t_f), 샌드위치 판재 전

체두께(H), 단위구조의 폭(2b)를 고정하면 샌드위치 판재와 동일한 강도와 강성을 가지는 등가형상을 Fig. 7 의 x 값 만으로 식 (2)로부터 결정 할 수 있다.

$$\theta = \frac{MbL}{2EI} \quad (1)$$

$$x = \frac{b}{(H - 2t_f)^3} \times \left\{ \frac{12Mb}{E\theta} + (H - 2t_f)^3 - H^3 \right\} \quad (2)$$

여기서, E는 탄성계수, M은 단위구조가 받는 순수 굽힘 하중, θ 는 단위구조의 변형각도, I는 단면적 이차모멘트, L은 단위구조가 구성하는 샌드위치 판재의 길이(단위구조만 해석할 경우: $L=2b$)를 각각 나타낸다.

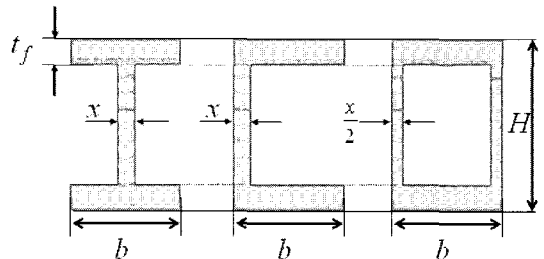


Fig. 7 Various equivalent models with same stiffness and strength of sandwich plates

순수 굽힘 해석을 통해 샌드위치 판재의 높이를 2.7mm, 2.5mm, 2.2mm의 경우와 패턴각도 0°와 45°에 따른 등가형상의 기둥(Web) 폭을 총 6가지 경우에 대하여 계산하여 Table 1 에 나타내었다. 여기서 패턴각도는 내부뒨플의 배열방향을 의미하며 Fig. 2 의 a축을 0, x축을 45°로 정의하였다.

Table 1 Geometric parameter(x value) of equivalent model from pure bending results

H	2.7mm		2.5mm		2.2mm	
ϕ	0°	45°	0°	45°	0°	45°
x (mm)	0.273	0.203	0.191	0.131	0.168	0.120

3.3 등가형상을 이용한 해석의 검증

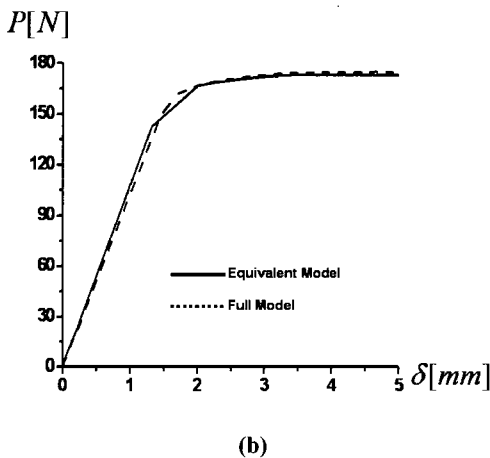
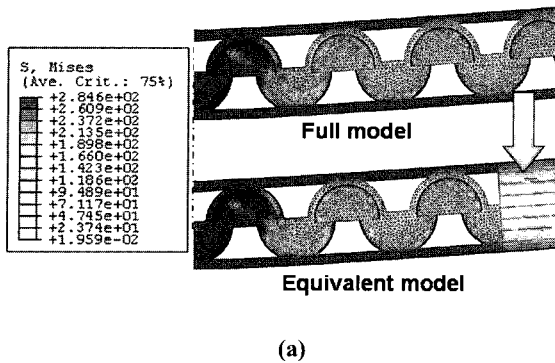


Fig. 8 Comparison of simulated results for equivalent model with full model sandwich plate subjected to 3-point bending(span length 120mm) (a) stress distribution (b) load-displacement graph

해석시간을 줄이고 파손 및 붕괴 모드를 파악하기 위해 내부구조가 탄성변형 하는 영역인 하중점에서 세 번째 단위구조 이후의 샌드위치 판재를 동일한 강도와 강성을 가지는 등가형상으로 대체하여 해석하였다. Fig. 8 에서 등가형상해석과 전체 모델해석의 하중-변위(load-displacement) 선도와 응력 분포가 거의 일치하였다. 강성에 있어서 약간의 오차는 등가형상 계산에서 전단변형을 고려하지 않았기 때문이다. 그러나 Table. 2 에서 등가형상을 이용한 해석이 전체모델해석에 비해 절점과 요소수가 80%이상 작고 동일 컴퓨터에서 해석시간을 95% 정도 단축할 수 있어 효율적 방법임을 확인하였다.

Table 2 Comparison of mesh number and computation time for full model with the equivalent model

	Number of Node	Number of Element	Analysis Time (minutes)
Full Model	137861	535760	1020
Equivalent Model	23844	82164	50
Ratio	17.3%	15.3%	5%

4. 탄소성 굽힘 거동 예측 및 분석

샌드위치 판재가 굽힘 하중을 받을 때 내부구조는 전단력을 지탱하며 표면판재가 대부분의 굽힘 하중을 지탱한다. 샌드위치 판재의 탄성거동은 쉽게 예측이 가능하나 소성변형은 내부구조의 복잡한 형상의 영향 때문에 이론적으로 예측하기가 쉽지 않다. 따라서 Fig. 9 와 같이 유한요소 해석을 통하여 탄소성 굽힘 거동을 예측하고 분석하였다. 파손모드는 모두 표면판재항복에 의해 발생하였으며 붕괴모드는 패턴각도 0° 일 때는 내부구조가 표면판재의 좌굴을 억제하여 표면판재가 인장응력에 의해 두께가 급격하게 감소하여 표면판재항복의 붕괴모드를 보였으나 패턴각도가 45° 일 때는 상부판재가 내부구조의 빈 공간으로 침투하는 표면판재좌굴에 의해 붕괴하였다. 그리고 패턴각도 0° 의 내부구조는 굽힘 강성, 변형 에너지와 붕괴 측면에서 탄소성 굽힘 특성이 패턴각도 45° 의 내부구조 보다 안전한 구조임을 Table 3 에서 정량적으로 확인하였다. 여기서 P_c 는 붕괴하중, δ_{max} 는 붕괴하기까지 변위, 붕괴까지 변형에너지를 각각 나타낸다.

트러스나 직조금속의 내부구조 샌드위치 판재의 경우 붕괴 후 하중이 급격하게 감소하는 현상을 보인다[8-9]. 그러나 뎀플형 내부구조의 경우 내부구조의 형상이 표면판재의 좌굴현상을 다소 억제하는 경향을 보여 판재가 붕괴하여도 하중을 지탱하였다. 이는 뎀플형 샌드위치 판재가 다른 내부구조 샌드위치 판재보다 많은 에너지를 흡수 할 수 있어 보다 빡빡한 안전한 구조임을 알 수 있었다.

등가형상을 이용한 유한요소 해석에서는 재료의 성형과 용접에서 발생하는 잔류응력을 고려하지 않았고 표면판재와 내부구조가 이상적으로 접합되

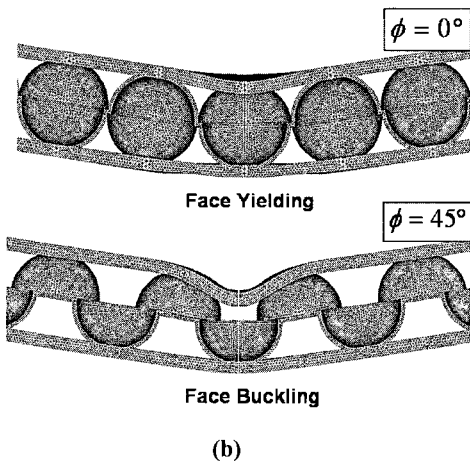
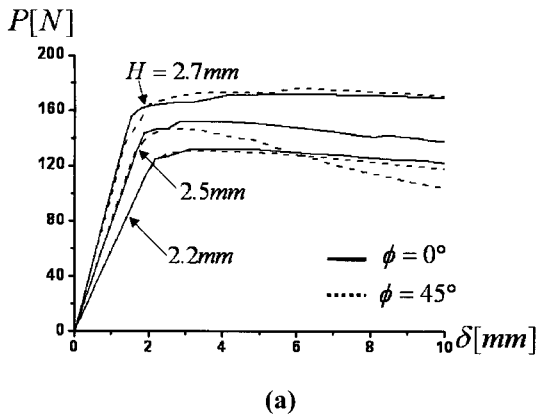


Fig. 9 Simply supported bending of sandwich plates
(a) load-displacement graph (b) collapse mode
(H=2.5mm, δ=10mm)

Table 3 Simulated results of sandwich plates from FE analysis for 3-point bending

H	2.7mm		2.5mm		2.2mm	
ϕ	0°	45°	0°	45°	0°	45°
K [kN/m]	108.3	107.9	77.8	74.7	60.5	58.8
P_c [N]	171.5	173.1	151.9	146.7	131.9	130.5
δ_{max} [mm]	5.80	4.54	3.46	2.67	4.19	3.27
E [Nm]	0.835	0.620	0.373	0.253	0.399	0.279

어 있다는 가정을 하였다. 그리고 순수 굽힘 해석의 결과로부터 등가형상을 계산할 때 동일 강도와

강성을 가지는 형상을 결정하였지만 전단변형의 영향은 고려하지 않았다. 따라서 등가형상을 통한 효율적 유한요소 해석은 전단력의 영향이 적은 굽힘 하중조건에 한하여 적용할 수 있고 정확한 데이터의 추출보다는 탄소성 굽힘 거동과 설계변수의 경향을 분석하는데 유용하다고 판단된다.

5. 결론

뒤틀림형 샌드위치 판재의 효율적 해석기법을 통한 탄소성 굽힘 거동 예측에 관한 연구를 요약하면 다음과 같다.

(1) 등가형상을 이용한 굽힘 하중을 받는 금속 샌드위치 판재의 효율적 해석기법을 제안하여 검증하였고 등가형상의 해석기법을 뒤틀림형 내부구조 금속 샌드위치 판재에 적용하여 탄소성 굽힘 거동을 예측하였다.

(2) 뒤틀림형 샌드위치 판재의 파손모드는 표면판재항복이며 붕괴모드는 샌드위치 판재의 두께에 무관하며 패턴각도 0° 일 때는 표면판재항복, 패턴각도 45° 일 때는 표면판재좌굴에 의해 붕괴되었다. 그리고, 뒤틀림형 내부구조는 표면판재의 좌굴을 억제하여 샌드위치 판재가 붕괴한 후 하중을 지탱하고 트러스나 직조금속 내부구조보다 많은 에너지를 흡수할 수 있다.

(3) 패턴각도가 0° 의 내부구조 샌드위치 판재는 패턴각도 45° 의 내부구조 샌드위치 판재 보다 굽힘 하중에 대하여 안전한 샌드위치 빔 구조이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 국책연구개발사업인 마이크로 첨단복제 생산시스템 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] 김지용, 김종호, 정완진, 2005, 샌드위치 강판의 전단가공에 있어서 전단면에 미치는 금형설계 변수의 영향, *한국소성가공학회지*, 제 14 권 제 1 호, pp. 37~42.
- [4] 김지용, 김종호, 정완진, 양동열, 2005, 접합판재의 전단변형거동에 관한 연구, *한국소성가공학회지*, 제 14 권 제 3 호, pp. 257~262.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 성대용, 정창균, 윤석준, 2005, 굽힘 하중을 받는 딴플형 금속 샌드위치판재의 최적설계, *한국정밀공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 130~133.
- [8] 정창균, 윤석준, 성대용, 양동열, 안동규, 2004, 피라미드 구조를 가지는 초경량 금속 내부구조 접합판재의 제작 및 특성평가, *정밀공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 483~486.
- [9] 안동규, 이상훈, 김민수, 한길영, 정창균, 양동열, 2004, ISB 판넬의 굽힘강성 및 과단특성에 관한 연구, *한국정밀공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 1274~1277.