

## 등가 모델을 이용한 3점 굽힘 하중을 받는 딴플형 금속 샌드위치판재의 효율적 해석

성대용<sup>1</sup>, 정창균<sup>1</sup>, 윤석준<sup>1</sup>, 양동열<sup>#</sup>

### Efficient FE-Analysis Method with Equivalent Models for Metallic Sandwich Plates with Inner Dimpled Shell Subject to 3-Point Bending

D. Y. Seong<sup>1</sup>, C. G. Jung<sup>1</sup>, S. J. Yoon<sup>1</sup>, D. Y. Yang<sup>#</sup>

#### Abstract

Efficient finite element method has been introduced for metallic sandwich plates subject to 3-point bending. A full model 3-point bending FE-analysis shows that plastic behavior of inner structures appears only at the load point. So, Unit structures of sandwich plates are defined to numerically calculate the bending stiffness with recurrent boundary condition of pure bending. And then equivalent models with same bending stiffness and strength of full models are designed analytically. It is demonstrated that results of both models are almost same and FE analysis method with equivalent models can reduce analysis time effectively.

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

#### 1. 서 론

최근 환경규제가 강화 되면서 자동차, 항공, 조선 등 운송기계분야에서 경량화에 대한 관심이 높아지고 있는데 그 중의 일환으로 경량 고강도 금속 샌드위치판재에 대한 연구가 최근 활발하게 진행되고 있다.

금속 샌드위치판재는 메탈 폼(Foam)[1], 금속선재를 이용한 다양한 트러스 구조[2]~[4], 그리고 박판을 이용한 벌집(Honeycomb)형[2] 또는 딴플형 구조[5] 등 다양한 내부구조의 상하양면에 표면판재를 저항용접이나 접착제로 접합하는 다양한 공정으로 생산된다.

그런데 금속선재를 내부구조로 하는 샌드위치판재들은 내부구조들의 강성이 외부판재들의 강성에

비해 매우 작아서 무시할 수 있고 특히 벌집형 내부구조 샌드위치판재는 내부구조의 기하학적 형상이 단순하여 내부구조의 굽힘 강성을 쉽게 계산할 수 있다[2]~[4]. 따라서 이와 같은 샌드위치판재들은 탄성 또는 소성의 가능한 결함모드(Failure Mode)를 수식화하여 특정 강도의 최소무게를 가지는 샌드위치판재를 설계 할 수 있다.

그러나, 박판을 성형하여 만든 딴플형 내부구조 샌드위치판재는 설계변수에 대한 연구가 미흡하고 내부구조의 강성과 결함을 수학적으로 예측하기가 어렵다. 또한 실험을 통하여 모든 설계변수를 분석하기에는 다양한 시편의 제작이 어렵고 유한요소 해석을 통해 설계변수를 분석하기도 많은 곡면형상때문에 요소와 절점의 수가 너무 많아 비효율적이다. 따라서 본 연구에서 효율적으로 딴플형 내부

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

구조 금속 샌드위치판재의 굽힘 특성을 예측하고 설계변수의 특성을 파악하기 위한 등가모델을 이용한 유한요소 해석기법을 제안하고자 한다.

## 2. 샌드위치판재의 유한요소해석

### 2.1 딩플형 내부구조 금속 샌드위치판재

딩플형 내부구조 금속 샌드위치판재는 Fig. 1 과 같이 프레스나 롤 금형으로 성형된 딩플형 박판내부구조 상하 양면에 표면판재를 저항용접 또는 접착제로 접합한 판재이다.

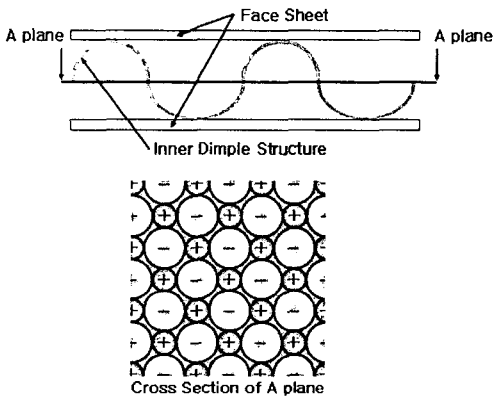


Fig. 1 Schematic of the sandwich plate with inner dimple shells

### 2.2 3점 굽힘 유한요소해석

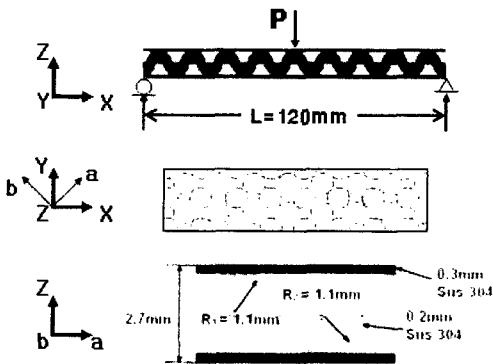


Fig. 2 Model of sandwich plate for 3-point bending FE-analysis

Fig. 2 은 하중점(Load point)를 기준으로 대칭조건을 주어 3점 굽힘 하중을 받는 딩플형 내부구조 샌드위치판재를 해석하기 위하여 설계한 도면이다. 재료의 물성은 가공경화(work hardening)을 무시한 완전탄소성(Elasto-perfectly plastic)재료로 가정하였고 아바쿠스(ABAQUS 6.4 Implicit) 상용프로그램을 이용하여 해석하였다. 딩플형 샌드위치판재들 중요요소와 절점의 개수를 최소화 할 수 있도록 상하 딩플의 형상이 같은 모델을 선정하였는데 편의상 a-b-Z 좌표에서 형상의 치수를 도시하였다. 3D 선형 사면체요소를 이용하여 두께 방향으로 표면판재는 3층, 내부 딩플은 2층으로 요소를 생성하였다.

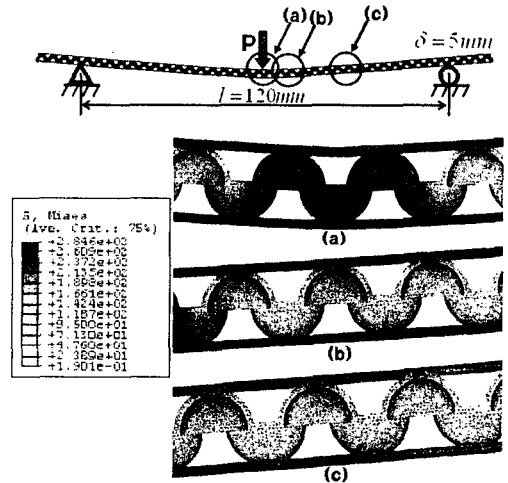


Fig. 3 Results of half model FE-analysis of sandwich plate subject to 3-point bending

Fig. 3 은 딩플형 샌드위치판재의 유한요소해석의 결과이다. 주 결함모드는 표면판재항복(Face sheet yielding)이며 중앙 하중점에서 발생한다. 그리고 내부 판재는 중앙 하중점에 국한되어 소성변형을 하지만 외부판재는 소성변형영역이 중앙으로부터 좌우로 전파되고 있음을 알 수 있다. 그리고 탄성변형을 하는 내부 딩플의 응력분포가 중앙에서 세 번째 단위구조 이후부터 단위구조마다 거의 반복되는 형태를 보인다.

그런데 샌드위치 판재의 전체모델 유한요소해석은 137861개의 절점과 535761개의 사면체 요소를 생성하여 펜티엄 4의 3.2GHz의 컴퓨터에서 해석시간이 17시간이 소요된다. 만약 중앙 하중점에서 대칭이 아닌 경우 더욱더 비효율적인 해석을 해야 할 것으로 예상된다.

### 3. 등가모델을 이용한 3점 굽힘 해석

#### 3.1 등가모델을 이용한 해석기법 제안

Fig. 4 는 샌드위치판재의 등가모델을 이용한 3점 굽힘 해석기법의 흐름도이며 전체모델해석에서 관찰한 내부구조의 탄성변형영역을 동일한 강도와 강성을 가지는 등가모델로 대체하여 해석하는 기법이다. 여기서 등가모델의 기하학적 형상과 치수는 단위구조의 순수 굽힘(Pure bending) 해석결과로부터 이론적으로 결정 할 수 있다.

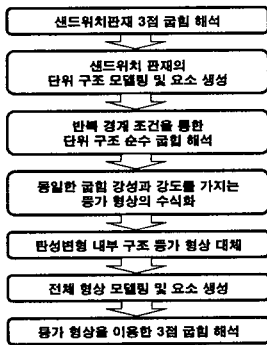


Fig. 4 Flowchart of efficient FE-analysis method for sandwich plate subject to 3-point bending

#### 3.2 등가형상결정을 위한 순수 굽힘 해석

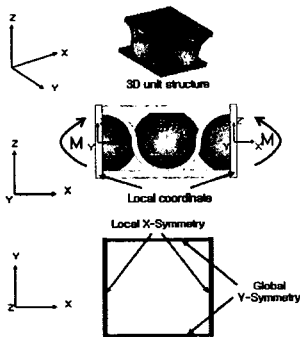


Fig. 5 Recurrent boundary condition of unit structure of sandwich plate subject to pure bending

대부분의 금속 샌드위치판재는 단위구조의 반복된 형태로 구성되어있어서 단위구조만을 해석하여 전체 샌드위치판재의 굽힘 특성을 분석할 수 있다.

그런데 단위구조만을 해석할 경우 단위구조의 경계에 반복경계조건(Recurrent Boundary Condition)을 설정해야 하고 하중조건 또한 전체 샌드위치판재의 하중조건을 단위구조만으로 표현할 수 있어야 한다. 따라서 Fig. 5 와 같이 단위구조에 순수 굽힘 하중과 반복경계조건을 주어 샌드위치판재가 굽힘 하중에 대하여 어떤 특성을 보이는지 분석하고 굽힘 강성과 강도를 계산하였다.

반복경계조건을 이용한 단위구조의 순수 굽힘 해석과 연속된 모델의 순수 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 해석만으로 샌드위치판재의 굽힘 강성을 효율적으로 계산할 수 있음을 알 수 있었다.

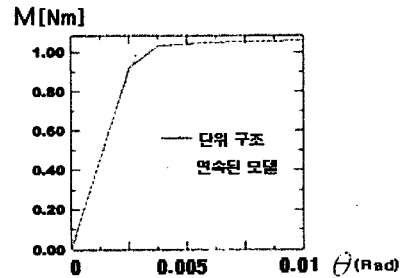
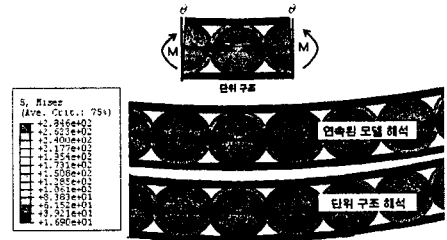


Fig. 6 Analytical result comparison of unit structure with full model sandwich plate subject to pure bending

#### 3.3 등가형상 결정

단위구조만의 해석으로 샌드위치판재 전체의 굽힘 강성을 해석적으로 계산하고 샌드위치판재와 동일한 강성과 강도를 가지도록 Fig. 7과 같이 다양한 형상을 이론적으로 결정할 수 있다.

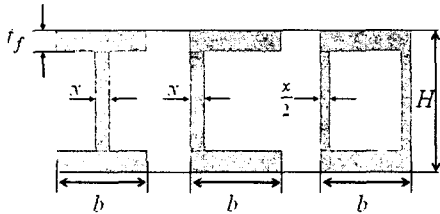


Fig. 7 Various equivalent models with same stiffness and strength of sandwich plates

### 3.4 등가모형을 이용한 3점 굽힘 해석

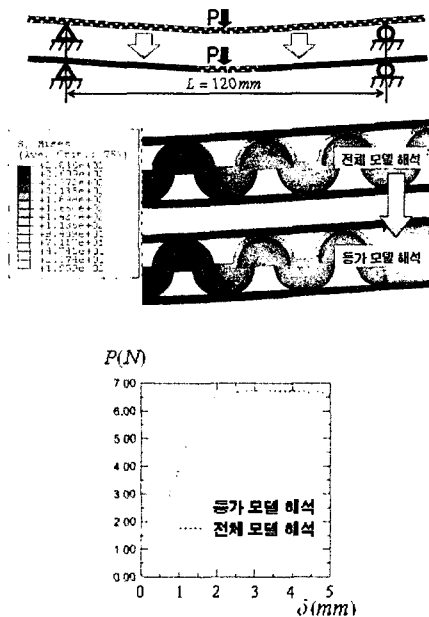


Fig. 8 Analytical result comparison of equivalent model with full model sandwich plate subject to 3-point bending

해석시간을 줄이기 위해 내부구조가 탄성변형하는 영역인 하중점에서 세 번째 단위구조 이후의 샌드위치판재를 동일한 강도와 강성을 가지는 등가모형으로 대체하여 해석하였다. Fig. 8 에서 등가모형해석과 전체모형해석의 3점 굽힘 하중에 대한 응력분포와 하중-변위(Load-displacement)곡선이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. Table. 1 에서 등가모형해석을 통한 해석이 전체모형해석에 비해 절점과 요소 수를 80%이상 작고 동일 컴퓨터에서 해석시간을 95% 정도 단축할 수 있어 효율적 방법임을 검증하였다.

Table 1 Mesh number and analysis time comparison of full model with equivalent model

	절점개수	요소개수	해석시간
전체모델	137861	535760	1020분
등가모델	23844	82164	50분
비율	17.3%	15.3%	5%

## 4. 결론

굽힘 하중을 받는 금속 샌드위치판재의 효율적 해석기법에 관한 연구를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 등가모형을 이용한 굽힘 하중을 받는 금속 샌드위치판재의 효율적 해석기법을 제안하였다.
- (2) 단위구조해석을 통해 등가모형의 형상을 결정하였다.
- (3) 전체모형해석과 거의 동일한 결과를 보이는 등가모형 해석기법의 효율성을 검증하였다.

## 후기

본 연구는 산업자원부의 국책연구개발사업인 마이크로 첨단복제생산 시스템 개발사업결과의 일부이며 이에 감사 드립니다.

## 참고 문헌

- [1] M. F. Ashby, 2000, Metal Foam: A Design Guide. Butterworth Heinemann, Boston
- [2] N. Wicks, 2000, Optimal truss plates, Int. J. Solids. Struct. Vol. 38, pp. 5164~5183
- [3] F. W. Zok, 2003, Design of metallic textile core sandwich panels, Int. J. Solids. Struct. Vol. 40, pp. 5707~5722
- [4] V. S. Deshpande, 2001, Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending, Int. J. Solids. Struct. Vol. 38, pp. 6275~6305
- [5] H. N. G. Waldley, 2003, Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures, Compos. Sci. Technol., Vol. 63, pp. 2331~2343