

피라미드 코어를 가진 샌드위치 판재의 두께 방향 압축 특성에 대한 연구

조기철¹· 김지용¹· 정완진[#]· 김종호²

A Study on the Compressive Characteristics of Sandwich Sheet with Pyramid Core in the Thickness Direction

K. C. Cho, J. Y. Kim, W. J. Chung, J. H. Kim

(Received November 16, 2006)

Abstract

Sandwich sheet with inner structure is expected to find many applications because of high stiffness to mass ratio. However, low resistance to the compressive pressure in the thickness direction is a dominating factor in the formability of sandwich sheet. In this study, sandwich sheet with pyramid type core is considered. For the compressive characteristics in the thickness direction, experiments and finite element simulations are carried out. In the experiment, deformation behavior is observed and discussed as the compression proceeds. It is shown that a corresponding finite element simulation can give a reasonable agreement with experiment in terms of maximum pressure. However, simulation shows some discrepancy from the experiment in terms of compressive pressure-displacement characteristics. The reasons for this discrepancy are studied in the geometrical imperfectness of sandwich sheet. It is also observed that most of deformation is dominated by buckling mode of pyramid legs.

Key Words: Sandwich Panel, Pyramid Core, Compression Test, Formability

1. 서 론

박판재의 무게를 감소시키며 강도 또는 강성을 향상시키기 위해, 경량 고강도 재료 개발 등과 같은 여러 가지 방법이 시도되고 있다. 그 중에서 이종 재료의 판재를 적층하거나 접합한 샌드위치(sandwich) 구조의 박판재 개발이 세계적으로 각광 받고 있다.

본 해석에서 사용하게 될 접합판재는 Fig. 1 과 같은 중공형 접합 판재로서 내부에 중간구조물을 갖는 판재이다. 특히 내부에 구조재를 갖는 금속 접합 샌드위치 판재의 경우, 무게가 매우 가볍고

기계적 강도가 현저히 증가되기 때문에 선진국에서는 이에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 금속 접합 박판재를 개발하는데 있어, 내부에 금속구조체를 미세 단위의 패턴으로 반복적으로 생성시키는 기술은 핵심이 되는 기술 중의 하나이다. 또한 접합판재의 성공적인 적용을 위해서는 미세 패턴의 설계, 공간배치, 성형기술 및 성형공정, 복제기

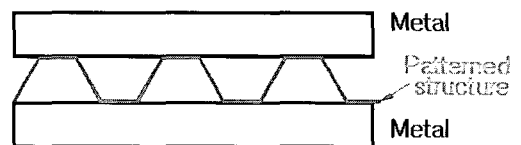


Fig. 1 Fundamental shapes of sandwich sheet metal

1. 서울산업대학교 대학원 정밀기계공학과
2. 서울산업대학교 금형설계학과
교신저자: 서울산업대학교 금형설계학과
E-mail : wjchung@snut.ac.kr

술, 시험 및 평가 등에 대한 연구가 필요하다[1]. 이러한 내부구조재를 가지는 중공형 접합판재의 연구동향을 살펴보면 Wicks[2]등은 트러스형 샌드위치 강판의 굽힘 하중을 정의하고, 이론적으로 최적화하였으며, 유사 모델 샌드위치 강판과 굽힘 특성을 비교하였다. Zok[3]등은 내부재가 트러스형인 샌드위치 강판의 특성을 분석하였고, Deshpande[4]는 트러스 내부구조를 갖는 샌드위치 판재의 4 가지 파단 모드에 대하여 상계해와 3 점 굽힘 실험결과를 비교하여 붕괴메커니즘지도를 작성하였다. Jung[5~6]등은 내부구조재가 익스펜디드 메탈(expanded metal)인 미세 구조 접합판재의 제작기술과 굽힘 특성에 대한 연구와 내부재가 우븐메탈(woven metal)인 미세 구조 접합판재의 제작기술과 기계적 특성에 대한 연구를 수행하였다. Ahn[7]등은 미세 구조 접합판재의 굽힘과 파단 특성에 내부재가 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 또한 Kim[8,9]등은 접합판재의 성형성 및 전단 특성에 대하여 연구하였다.

두께방향의 압축특성은 접합판재의 성형성에 큰 영향을 미치는 특성으로써 매우 중요하다. 판재 성형 시 두께 방향으로서는 평면 방향에 비해서는 일반적으로 낮은 수준의 응력이 걸리지만 샌드위치 판재는 중공특성으로 인해서 낮은 압력에도 내부재가 좌굴하게 되고 이로 인해 성형 시 압착되어 샌드위치 판재의 장점인 비강성을 잃어 버리는 문제점이 발생한다.

본 연구에서는 피라미드 형태의 내부재를 사용한 샌드위치 판재의 두께 방향의 압축 특성에 미치는 영향을 실험 및 해석을 통해 연구하였다. 내부재를 상세하게 모델링한 압축해석을 수행하여 압축과정에서의 변형과정 및 압축압력-변위 특성을 실험과 비교분석하였다. 이를 통하여 압축 특성 및 성형공정에의 적용성에 대하여 검토하였다.

2. 샌드위치 판재의 제조 과정

Fig. 2 는 샌드위치 판재의 제작과정을 보여주고 있다. 먼저 판재를 슬리팅(slitting)한 후 소재면에 직각 방향으로 신장하여 그물망 형상을 제작하는 과정을 거친다. 이렇게 하여 제작된 그물망은 다리 사이 연결 부에 단차가 존재한다. 이 단차를 평탄하게 만들어 표면재와의 용접공정에서 안정적인 면적을 확보하기 위하여 압연공정을

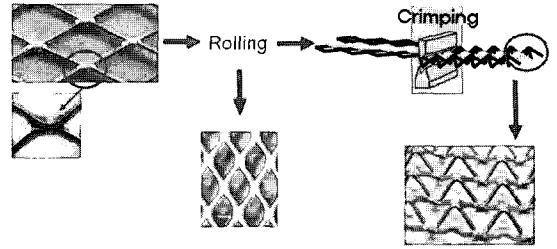


Fig. 2 Production process of pyramid core

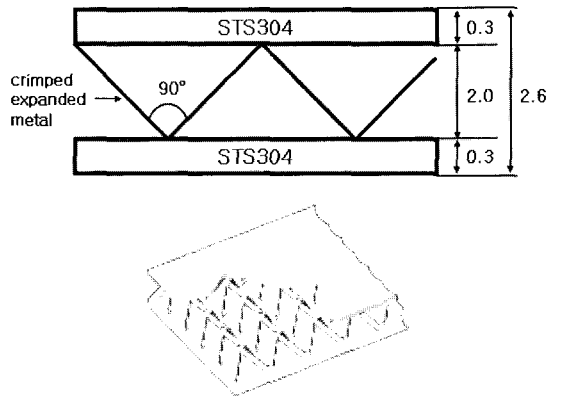


Fig. 3 sheet metal with pyramid core

적용한다. 마지막으로 크리핑(crimping) 작업을 통하여 연속적인 3 차원 형상의 피라미드 형상의 내부 구조재의 제작이 완료된다. 내부 구조재가 준비되면 상하면에 표면재를 저항용접에 의하여 접합하여 샌드위치 판재를 제작한다. 이러한 샌드위치 제작방법은 연속적인 형태의 내부재와 연속적인 공정으로 인해서 종전의 샌드위치에 비해 저비용으로 대량생산할 수 있는 장점이 있다.

3. 압축 실험

압축실험시편은 2에서 기술한 방법으로 제작된 샌드위치 판재를 사용하여 제작하였으며 내부구조재의 재질은 연강판(CSP-1N), 표면재는 스테인레스 판재(STS304)로 되어 있다. 압축시험시편의 치수는 19mm×31mm 로 내부 구조재인 피라미드의 수는 4×4.5개로 하였다. 시편 제작은 와이어 가공을 사용하여 시편의 변형을 최소화하고자 하였다. Fig. 3은 제작된 판재의 두께 방향의 구성 및 3차원 형상을 나타낸 것이다.

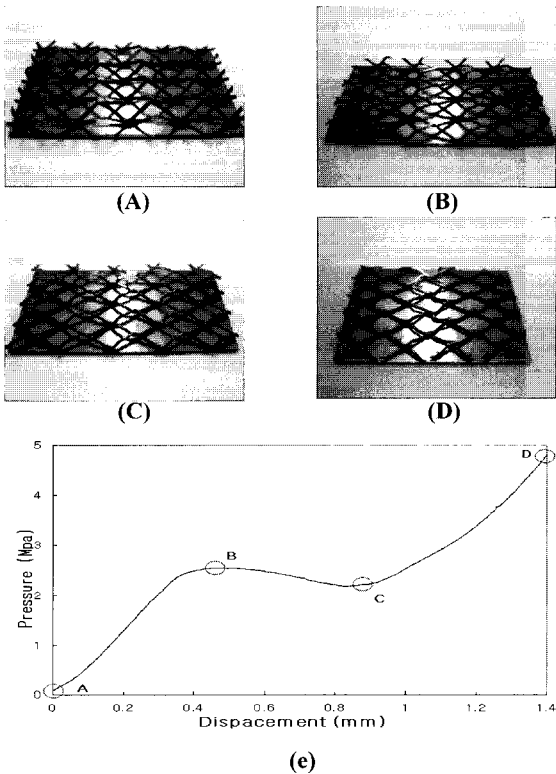


Fig. 4 Deformed shape of inner-structure according to compressive stress-displacement curve

압축 시 내부구조체의 변형거동을 보기 위해서 상하판이 완전히 압축될 때까지 압축하였다. 이때 사용된 장비는 인장시험기를 사용하였으며 이때 장비의 압축 속도는 1mm/min 으로 하였다.

Fig. 4(a)~(d)는 압축변위에 따른 내부 구조체의 변형을 정확하게 파악하기 위해서, 선정된 압축변위에서 샌드위치 판재의 상판을 연삭하여 제거한 후 관찰한 내부구조체의 변형양상을 보여준다. 또한 Fig. 4(e)와 같은 압축응력-변위 선도를 구할 수 있었다. 위치선정은 압축응력-변위 선도에서 변형 특성이 크게 변화하는 위치를 선정하였다. 압축에 의한 두께방향 재료거동은 압축응력-변위 선도에서 보듯이 크게 2개의 변곡점이 존재한다. 압축변위가 증가함에 따라 증가하던 하중은 위치 B를 지나면서 감소한다. 이러한 하중감소는 Fig. 4에서 나타난 바와 같이 내부 구조체에서 좌굴이 발생하여 지지할 수 있는 하중이 감소하기 때문이다. 압축변위가 위치 C에 도달하면 내부 구조체는 완전히 붕괴되어 그 형상을 유지하지 못하고 상하판재에 의해 압착되기 시작한다. 이 위치를

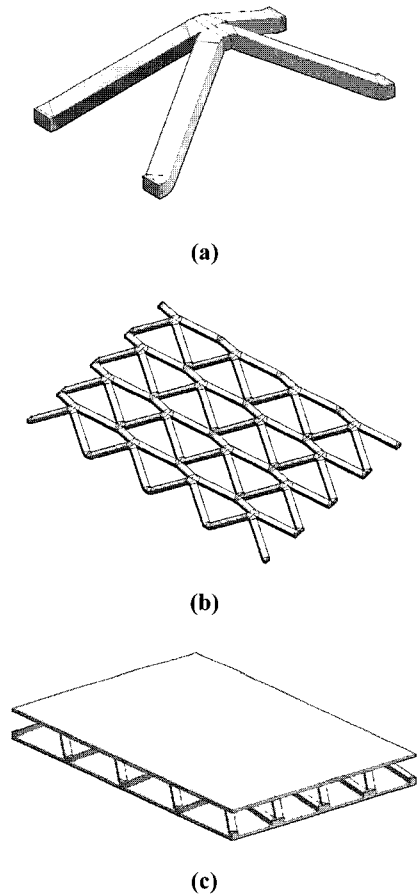


Fig. 5 Modeling of sandwich sheet with pyramid core; (a) unit cell, (b) pyramid core with 4x4 unit cells, (c) sandwich sheet with 4x4 unit cells

지나 위치 D에 이르게 되면 상하 판재와 내부구조체가 완전히 압착되며 다시 하중이 증가하는 단계로 진입한다.

이러한 결과를 토대로 압축 실험 결과를 정리하면 내부재가 견디는 하중은 157.5Kgf로 내부구조체 1개가 견딜 수 있는 하중은 8.23kgf이며 이때의 최대압축응력은 2.44Mpa이다. 따라서 일반 강판에 비해 매우 낮은 압축응력에서 판재와 내부재가 압착되어 성형과정에서 접합판재의 장점인 비강성을 상실하기 쉬움을 알 수 있다.

4. 압축 해석

해석 모델은 Fig. 5과 같은 형상으로 CAD S/W를 사용하여 모델링하였다. 실제 제품은 내부재의 성

형 시 복잡한 공정을 거치기 때문에 최초의 단면이 변형되어 실제 단면의 크기를 예측하기가 어렵다. 따라서 해석 시 보다 정확한 단면 치수를 입력하기 위하여 제품의 단면을 직접 측정된 결과 0.71mm×0.42mm의 직사각형 단면을 구하여 적용하였다. Fig. 5(a)는 단위 셀을, Fig. 5(b)는 4×4의 형태로 모델링된 내부재의 형태를 보여 준다. 전체 해석모델은 Fig. 5(c)와 같이 상하판을 부착하여 모델링하였으며 총 3,280개의 8절점 6면체 요소를 사용하였다. 탄소성좌굴현상을 충분히 정확하게 표현할 수 있도록 다리 부분에서 4층의 육면체 요소를 사용하였다.

Table 1 Material properties of skin sheet(STS304)

$$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n$$

Young's Modulus (GPa)	ϵ_0 offset strain	K Strength coefficient (MPa)	n work hardening exponent
206	0.0132	1493.83	0.468

Table 2 Material properties of core(CSP-1N)

$$\bar{\sigma} = K(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n$$

Young's Modulus (GPa)	ϵ_0 offset strain	K Strength coefficient (MPa)	n work hardening exponent
206	0.0133	610.52	0.306

본 해석에 사용한 물성치는 표면재(Stainless steel)의 경우 Table 1 과 같으며 내부재(CSP-1N)의 물성치는 Table 2 와 같다. 해석 시 부여된 경계 조건은 4×4 접합판재의 윗면에 두께 대비 30%의 압축 변위를 주었다. 해석 과정에서 실제 실험과 동일한 조건으로 해석하기 위해서 측면에는 변위를 구속하지 않고 아래 판재를 강체변형이 발생하디 않도록 구속하였다. 해석은 ABAQUS 를 사용하여 수행되었다.

5. 결과 및 검토

Fig. 6 은 변위에 따른 압력에 대하여 실험 및 해석 결과를 비교한 것이다. 실험에서는 압력이 변위에 따라 완만하게 증가하여 0.5mm 부근에서 최대 값이 발생하지만 해석에서는 급격하게 증가

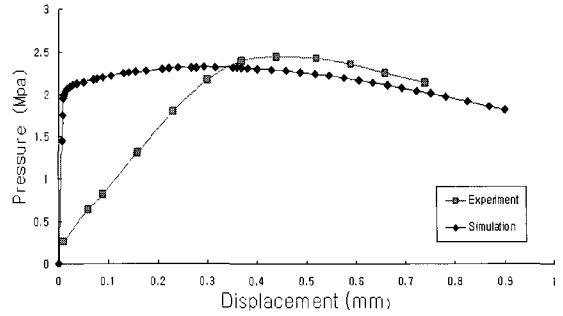


Fig. 6 Comparison of compression pressure-displacement curve

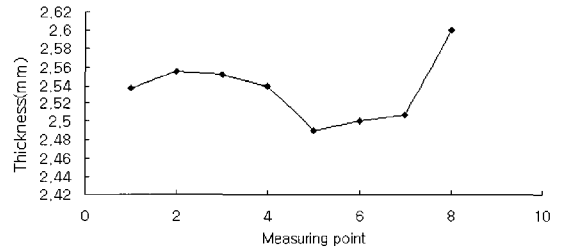
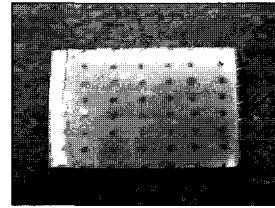


Fig. 7 Measurement of thickness of sandwich sheet

하여 최대 값에 도달하는 양상을 보이고 있다. 최대 값에 도달한 후 추가로 압축될 때 실험과 해석 모두 하중은 완만하게 감소하는 모습을 보이고 있다. 위판을 가해진 최대 압력은 해석의 경우 2.32Mpa 실험의 경우가 2.44Mpa 로 유사하게 예측되어 최대 좌굴하중의 예측은 유사하므로 성형 시 두께방향 성형한계하중은 양호하게 예측될 수 있을 것으로 판단된다.

초기에 실험과 해석에서 최대하중이 발생하는 변위의 차이는 기하학적으로 완전히 대칭인 형상을 가지는 해석모델과 실제 접합판재와의 차이에서 비롯되는 것으로 판단되어 두께분포와 평면도에 대한 측정을 실시하였다. 실제 제작된 접합판재는 두께를 측정된 결과 Fig. 7 과 같이 약 0.1mm 정도의 산포를 가지고 있었다. 또한, 접합판재를

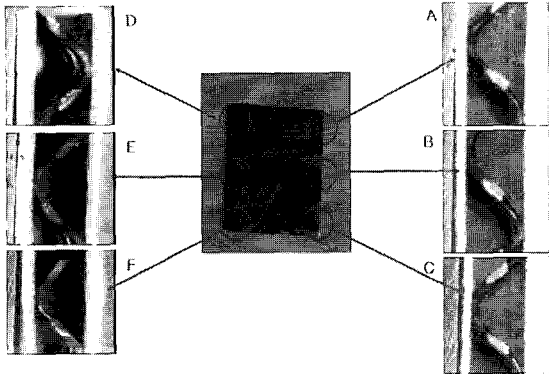


Fig. 8 Measurement of flatness of sandwich sheet

Table 3 Gap between flat surface and sandwich sheet

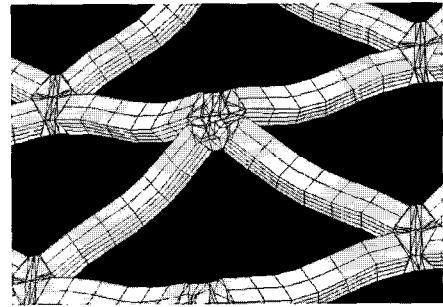
	A	B	C	D	E	F
GAP (mm)	0.196	0.233	0.305	-	-	0.523

Fig. 8 과 같이 전자현미경으로 정반 위에서 겹을 측정된 결과 Table 3 과 같이 판 전체가 크게 만곡되어 있음을 알 수 있었다. 즉 판 전체가 평면에서 많이 벗어나 뒤틀어진 형상을 하고 있다. 또한 내부의 구조재의 전반적인 형상도 기하학적으로 대칭인 해석모델과는 상당한 차이가 있으며 한 쪽으로 기울어진 형상을 하고 있다.

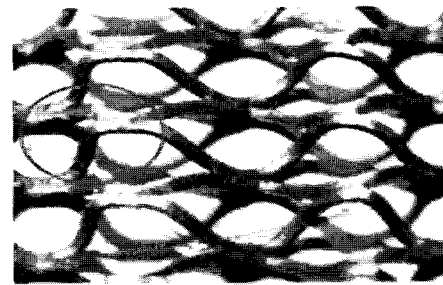
이러한 형상 및 두께의 불균일이 구조재에서 좌굴 변형모드가 축차적으로 발생하게 하고 복잡한 변형모드를 발생시켜 변위에 따른 압력 곡선의 형태를 변화시킨 것으로 판단된다. 변형의 초기 단계에서는 판 전체의 굽힘이 이루어지면서 하중이 완만하게 증가하고 판이 상하누름판에 밀착된 후에 실제적인 두께방향의 변형이 발생하게 되므로 시험에서 최대하중이 늦게 발생하는 것이 적절하게 설명될 수 있다.

그러나 실험이나 해석 모두 항복응력에 비해 매우 낮은 압력에서 쉽게 한계하중에 도달하므로 성형공정에서 판재와 내부재가 압착되어 접합판재의 장점인 비강성을 상실하기 쉬운 문제점을 노출하고 있다. 따라서 이를 방지하기 위한 코어의 형상설계 및 적합한 성형기술의 개발이 요구된다.

Fig. 9 는 압축해석 시 내부재에서 발생하는 응력 분포를 보여주고 있다. 내부재의 모습에서 다리 부분이 좌굴이 발생하여 휘어진 모습을 알 수



(a)



(b)

Fig. 9 Comparison of deformation mode between (a) simulation and (b) experiment

있다. 이러한 결과로부터 압축 시 대부분의 변형이 다리 부분의 굽힘에 의하여 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 내부재의 판재와 연결된 부분은 단지 힘을 전달해주는 경로 역할을 주로 하며 다리 부분의 굽힘 변형에 의해 압축과정이 지배됨을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 현재 연구개발 중인 피라미드형 코어를 내부재로 가진 샌드위치 판재의 성형성 파악에 중요한 두께방향에 따른 압축특성에 대하여 연구하였다. 압축특성을 파악하기 위하여 피라미드 코어를 가진 접합판재의 압축 해석 및 실험을 수행하였다.

압축 과정에서 대부분의 변형에너지가 피라미드 다리 부위의 굽힘 변형 에너지로 구성됨을 확인할 수 있었다. 변형이 진전됨에 따라 다리 부위의 좌굴현상이 발생하여 샌드위치 판재의 두께방향의 변형특성을 지배하였다. 두께 방향의 압축에 대한 압력의 변화는 실험과 해석 모두 최대압력

에 도달한 후 완만하게 하강하는 특성을 보여주며 최대하중값은 유사한 결과를 보여주었다. 그러나 샌드위치 판재의 두께 및 형상의 불균일로 인하여 변위에 따른 압력 곡선의 형태는 실험의 경우 완만한 곡선을 그리며 올라가는 반면 상대적으로 해석의 경우 갑자기 상승하는 차이를 보였다.

적용된 해석방법이 피라미드 코어를 가진 샌드위치 판재의 두께방향 압축 시 변형특성을 잘 묘사할 수 있음이 검증되었다. 실험이나 해석 모두 항복응력에 비해 매우 낮은 압력에서 쉽게 좌굴이 발생하여 성형공정에서 판재와 내부재가 압착되어 접합판재의 장점인 비강성을 상실하는 문제점을 나타냈다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위한 피라미드 형상 내부재 설계 개발 및 공정기술의 개발이 요구된다.

참 고 문 헌

- [1] 양동열, 나석주, 유중돈, 김종호, 정완진 외 36명, 2006, 마이크로 첨단복재 생산시스템 개발, 한국과학기술원, 최종보고서.
- [2] N. Wicks, J. W. Hutchinson, 2004, Performance of sandwich plates with truss cores, *Mechanics of Materials*, Vol. 36, pp. 739~751.
- [3] 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.
- [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] 정창균, 윤석준, 성대용, 양동열, 안동규, 2004, 피라미드 구조를 가지는 초경량 금속내부구조 접합판재의 제작 및 특성 평가, 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 483~486.
- [6] 정창균, 윤석준, 양동열, 이상민, 나석주, 이상훈, 안동규, 2005, 수직방향 직조 금속망을 이용한 초경량 금속 내부구조 접합판재의 제작 및 특성에 관한 기초 연구, 한국정밀공학회지, 제 22 권 제 5 호, pp. 152~158.
- [7] 안동규, 이상훈, 김민수, 한길영, 정창균, 양동열, 2004, ISB 판넬의 굽힘강성 및 파단특성에 관한 연구, 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 1452~1455.
- [8] 김지용, 2005, 내부구조재를 가진 중공형 접합판재의 프레스 가공특성에 관한 연구, 서울산업대학원 석사 논문, pp. 35~37.
- [9] 김지용, 김종호, 정완진, 양동열, 2004, 접합판재의 전단변형거동에 관한 한국소성가공학회지, 제 14 권 제 3 호, pp. 257~262.