

## 피라미드 코어를 가진 샌드위치 판재의 L형 굽힘 성형해석

임 성 진·김 종 호·정 완 진<sup>†</sup>

서울산업대학교 금형설계학과  
(2009년 10월 7일 접수, 2009년 10월 15일 수정 및 채택)

### Forming Analysis of L-type Bending of Sandwich Sheet with Pyramid Core

Sung-Jin Lim, Wan-Jin Chung<sup>†</sup>, and Jong-Ho Kim

Department of Product Design and Manufacturing Engineering,  
Seoul National University of Technology, Seoul, Korea

(Received October 7, 2009, Revised & Accepted October 15, 2009)

**요약** : 본 연구에서는 피라미드 형상의 코어재를 갖는 복합판재의 성형해석을 위한 축약모델의 사용이 제안되었다. L형 굽힘성형에 대하여 유한요소해석에 의한 해석을 수행하여 제안된 축약모델의 정확성과 유효성이 검증되었다. 성형해석의 정확성을 향상하기 위하여 코어의 보다 상세한 모델링과 코어성형에 의한 가공경화의 고려가 수행되었다. 변형형상과 성형하중곡선에 대하여 비교하였으며 실험과 좋은 일치치를 보였다. 힘-하중 곡선의 비교에서 본 해석이 좌굴후변형거동을 잘 예측할 수 있음을 보였다.

**ABSTRACT** : In this study, the use of a condensed model is proposed for the simulation of forming of sandwich sheet with pyramid core. A corresponding finite element analysis for L-type bending is carried out to prove the accuracy and the effectiveness. In order to improve the accuracy of forming analysis, more precise modeling of core shape and consideration of work-hardening of previous core forming are carried out. Simulation results are compared with those of experiment. Deformation shape and post-buckling behavior by simulation are in good agreement with those of experiment for the considerable range of deformation. From the comparison of force-displacement curve, it is shown that the proposed model shows good prediction of post-buckling behavior.

**Keywords** : sandwich sheet, pyramid core, L-bending, finite element analysis

## I. 서 론

박판재의 무게를 감소시키며 강도 또는 강성을 향상시키기 위해 이중 재료의 판재를 적층하거나 접합한 샌드위치(Sandwich) 구조의 박판재 개발이 세계적으로 연구되고 있다. 특히 내부에 구조재를 갖는 샌드위치판재의 경우, 무게가 매우 가볍고 기계적 강도가 현저히 증가되기 때문에 이들 선진국에서는 이에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 연구 대상인 샌드위치 판재는 Figure 1 과 같은 중공형 접합 판재로서 내부에 중간구조물(코어)을 갖는 판재이다.

현재 국내에서는 특정형상의 메쉬패턴 구조재를 내부재로 가지는 접합판재의 개발<sup>1,2</sup>과 내부 구조재를 가지는 중공형 접합판재의 기계적 특성과 전단특성<sup>3</sup>, 성형특성에 관한 연구<sup>4</sup>가 수행되었다. 국외에서는 Wicks<sup>5</sup> 등은 트러스형 샌드위치

강판의 굽힘 하중을 정의하고, 이론적으로 최적화하였으며, 유사 모델 샌드위치 강판과 굽힘 특성을 비교하였다. Zok<sup>6</sup> 등은 내부재가 트러스형인 샌드위치 강판의 특성을 분석하였고, Deshpande<sup>7</sup> 등은 트러스 내부구조를 갖는 샌드위치 판재의 4 가지 파단 모드에 대하여 상세해와 3점 굽힘 실험결과를 비교하여 붕괴메커니즘지도를 작성하였다.

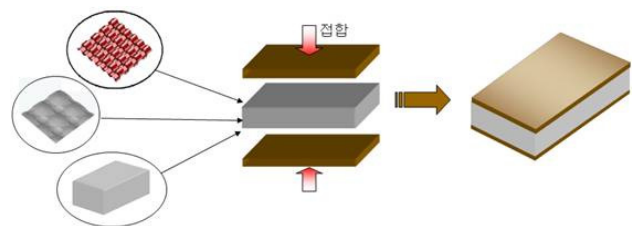


Figure 1. Fundamental shapes of sandwich sheet metal.

<sup>†</sup> 대표저자 E-mail: wjchung@snut.ac.kr

이러한 접합판재의 성형 및 특성에 대한 연구는 활발하게 진행되고 있으나 성형해석을 수행하기 위한 연구는 접합판재의 역학적 복잡성으로 인해서 상대적으로 연구 사례가 많지 않은 실정이다. 조기철<sup>8</sup> 등은 접합판재 셀에 대하여 두께방향 압축특성에 대해 3차원 솔리드 요소를 이용한 성형해석을 수행하고 실험과 비교하여 압축방향의 좌굴특성을 모사할 수 있음을 보였다. 성대용<sup>9</sup> 등은 접합판재의 굽힘 성형특성을 등가성을 이용하여 2차원 솔리드유한요소를 이용하여 근사적으로 모사하는 방법을 개발하고 굽힘 성형 중이 불량 현상을 잘 표현할 수 있음을 보였다.<sup>10</sup> 접합판재의 성형해석은 그 형상의 복잡함으로 2차원 성형공정의 해석에 국한되어 왔으며 3차원 솔리드 요소를 이용한 해석은 계산시간 및 기억용량의 과다로 인해서 매우 곤란하였다. 정완진<sup>11</sup> 등은 3차원 해석을 위하여 축약모델을 제안하고 굽힘공정의 해석이 가능함을 보였다.

본 연구에서는 미세 패턴의 피라미드형 코어를 사용한 접합판재의 성형을 해석하기 위하여 제안된 축약모델을 활용하여 L형 굽힘공정에 대한 해석을 수행하였다. 변형 특성을 실험과 이론해석을 비교하여 유효성과 효율성에 대하여 검증하였다. 기존의 연구<sup>11</sup>에서 제안된 접합판재 축약모델의 해석의 정확도를 개선하기 위한 연구를 수행하고 변형현상 및 힘-하중 특성을 실험과 이론해석을 비교하여 분석하여 접합판재 성형해석을 위한 기반을 구축하고자 하였다.

## II. L 굽힘 실험

### 1. 실험방법

본 연구에서는 접합판재의 L-굽힘 성형성과 굽힘부에서의 변형을 조사하기 위해 이에 영향을 주는 틈새량, 굽힘선 위치, 펀치성형깊이, 소재의 위치 등의 작업조건을 Figure 2 에서와 같이 하여 실험하였다. 또한 접합판재의 표면재 (STS304) 및 내부재 (CSP-1N)에 대하여 각각 인장시험을 수행하였다.

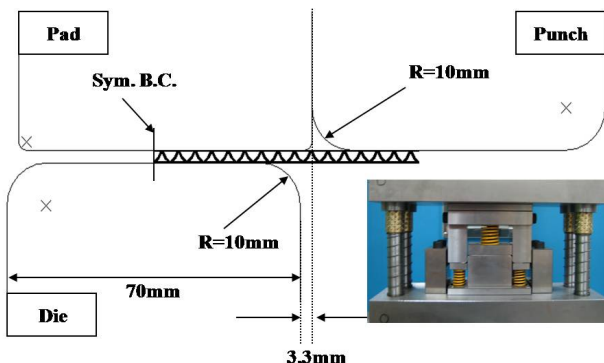


Figure 2. Experimental set-up for L-bending.



Figure 3. Deformation of sandwich sheet according to the location of bend line (clearance=3.3 mm) at stroke of (a) 0 mm, (b) 15 mm and (c) 30 mm.

### 2. 실험결과

Figure 2와 같이 작업조건에 따라 굽힘의 틈새는 3.3 mm에 대해서, 그리고 소재의 굽힘선 위치는 피라미드 코어의 비용점 위치로 고정시킨 후 실험하였다. 또한 L-굽힘은 비대칭 굽힘이기 때문에 패드력으로 소재를 미리 클램핑하더라도 실제 작업 중에는 소재가 펀치측으로 일부 이동할 수 있기 때문에 이동하지 못하도록 위치 결정핀을 사용하여 고정하였다. Figure 3은 소재를 완전 고정시킨 상태의 굽힘선의 위치를 비용접점과 일치하게 하여 실험한 펀치 행정별 변형 상태를 나타내고 있다. 다이 코너 반경 부위의 굽힘부 변형을 살펴보면 접합판재의 내측에는 굽힘이 시작되면서 리코일 (Recoil)과 같은 함몰현상이 심하게 나타나고 있으며 처음의 리코일 함몰이 공정 진행에 따라 점점 더 심해지면서 굽힘부의 두께가 급격히 감소하는 패턴을 보이고 다시 한 번 굽힘 현상이 발생하면서 추가적인 함몰이 형성되는 과정을 반복하는 변형양상을 보여주고 있다.

Table 1 과 Table 2는 표면재와 내부재의 인장시험에 의해 구해진 물성치를 보여준다.

Table 1. Material properties of skin sheet

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

Young's Modulus (GPa)	$\epsilon_0$ offset strain	$K$ Strength coefficient (MPa)	$n$ work hardening exponent
206	0.0132	1493.83	0.468

**Table. 2. Material Properties of core**

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

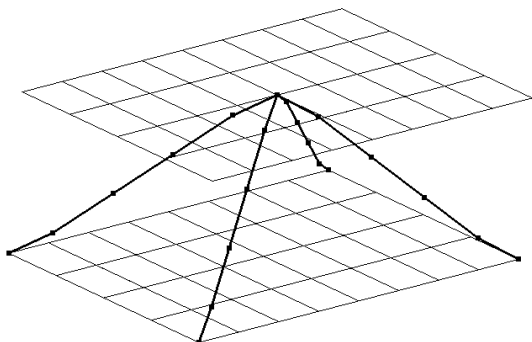
Young's Modulus (GPa)	$\epsilon_0$ offset strain	$K$ Strength coefficient (MPa)	$n$ work hardening exponent
206	0.0133	610.52	0.306

### III. L형 굽힘 해석

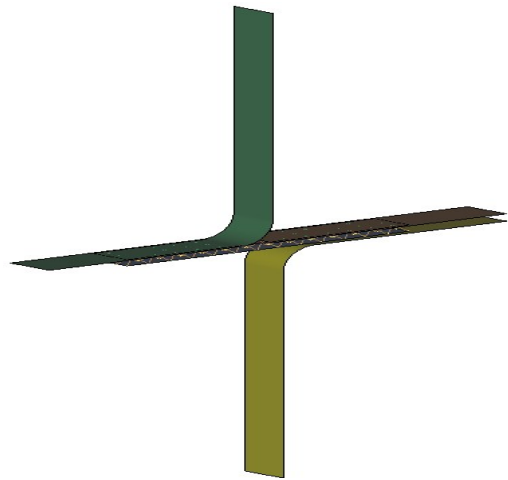
#### 1. 축약모델 및 해석과정

접합판재의 내부 형상을 솔리드요소로 모델링 하여 프레스 성형공정을 해석하는 것은 계산시간 측면에서 실용적으로 감당할 수 없는 방법이다. 따라서 트러스형의 내부 구조재의 패턴을 가지는 접합판재의 L굽힘 프레스 성형 해석을 위해 셀, 빔 및 강체 요소를 혼합한 축약모델을 이용하여 효과적인 계산시간과 국부적인 표면재 및 다리 부위의 좌굴 표현도 가능한 이론 해석 방법을 도입하였다.<sup>11</sup> 이 연구에서는 판재의 단위셀에 대하여 Figure 4와 같이 8개X4개의 판요소로 표면재를 모델링하고 피라미드형 코어의 다리 부위를 5개의 빔요소로 모델링하였다. 이러한 모델링은 샌드위치 판재의 솔리드 모델링 형상에 기초하여 수행하였다.

성형해석은 LS-DYNA<sup>12</sup>를 사용하여 수행되었다. LS-DYNA는 동적외연적유한요소법을 사용하는 프로그램으로 금속판재 성형해석에 널리 사용되는 프로그램이다. 단일금속 판재에 대한 성형해석 사례는 많이 보고되어 있으나 접합판재에 대한 해석연구는 거의 알려져 있지 않다. 성형해석을 위하여 Figure 4의 단위 셀을 다수의 셀로 복사하여 접합판재 메쉬를 모델링하였다. 금형의 메쉬는 4절점 면요소를 사용하여 모델링하였으며 면요소의 바깥방향 수직벡터가 금형의 외부로 향하도록 하여 금형의 내부와 외부를 구분하였다. 그리고 Figure 5에서 실제 성형에서와 같이 L굽힘 성형해석을 하기 위한 금형 및



**Figure 4. Mesh of unit cell.**

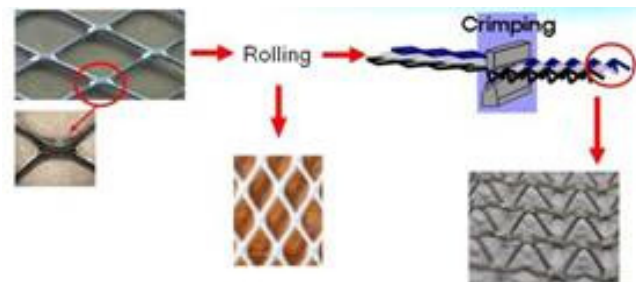


**Figure 5. Mesh setup for L-bending.**

소재의 메쉬를 위치하도록 하였다. 해석이 시작되면 아래의 다이는 고정되어 있고 위의 펀치가 하강하며 접합판재는 다이와 펀치 사이에서 굽힘성형을 받게 된다. 접합판재와 금형 사이에는 접촉 및 마찰조건이 주어지며 이에 따라 금형이 접합판재를 성형하게 된다. 접합판재 내부의 코어와 표면재 사이에도 접촉이 정의되어 코어의 좌굴을 정확하게 표현하도록 하였다. 이 때 마찰계수는 0.15로 부여하였다. 성형 중 접합판재의 고정을 위하여 성형부의 반대쪽은 대칭경계조건을 부여하여 고정되게 하였다. 성형 시 펀치의 하강속도는 시간에 따른 그래프로 주어지며 최대 500 mm/s로 하여 준정적 해석을 구현하도록 하였다.

#### 2. 접합판재의 제작과정

Figure 6는 접합판재의 제작과정을 보여주고 있다. 먼저 판재를 슬리팅(Slitting)한 후 소재 면에 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 적용한다. 마지막으로 크림핑



**Figure 6. Comparison of deformation at stroke of 30 mm.**

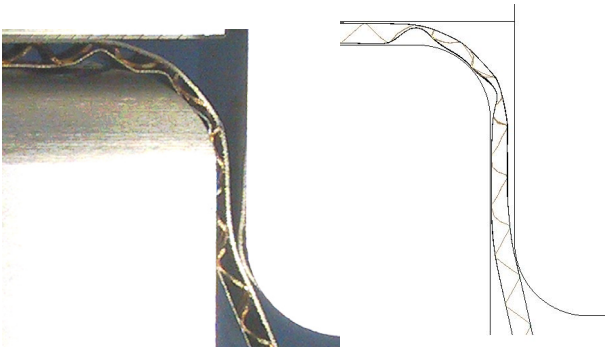


Figure 7. Production process of pyramid core.

(Crimping) 작업을 통하여 연속적인 3차원 형상의 피라미드 형상의 내부 구조재 (코어)의 제작이 완료된다. 이러한 공정을 거치면서 내부의 피라미드형 코어가 성형되는데 Table 2의 초기 물성치에서 가공경화에 의해 재료가 경화되게 된다. 코어가 준비되면 상하면에 표면재를 저항용접에 의하여 접합하여 접합판재를 제작한다.

### 3. 축약모델 개선

Figure 7은 실험 결과 형상과 1차 해석 모델의 성형해석 결과 형상이다. 성형해석결과 형상이 실험결과 형상과는 좌굴의 양상이 다르게 심하게 압착되어 변형형상을 정확하게 나타내지 못하였다. 성형해석 결과 형상이 실험 결과 형상과 차이가 나는 이유는 접합판재의 용접 시 발생하는 표면재와 피라미드형 코어의 압착으로 인해 코어와 외부재의 용접부 단면적이 증가하며 코어와 표면재가 이루는 각도 또한 증가하게 되는데 이러한 변화를 축약모델에 반영하지 않아 접합판재의 실제형상과의 오차가 발생된 것이 원인의 하나라고 판단된다.

이러한 용접과정에 의한 접합판재의 형상 변동을 반영하기 위하여 실제 코어와 표면재의 각도를 측정하여 모델링에 반영하였다. Figure 8과 같이 용접부의 면적을 증가시키고 추가 빔요소를 생성하였고, 코어의 각도도 실제 접합판재와 같이 수정하였다. 또한 피라미드형 코어를 표현하는 빔 요소의 수가 적어서 좌굴현상을 적절히 나타내지 못한다고 판단되었다.

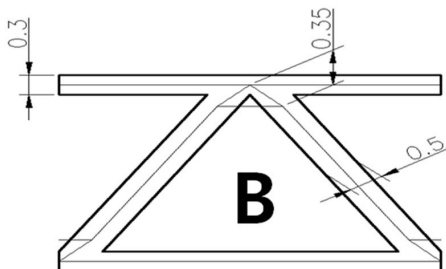


Figure 8. Welding Part Beam Creation.

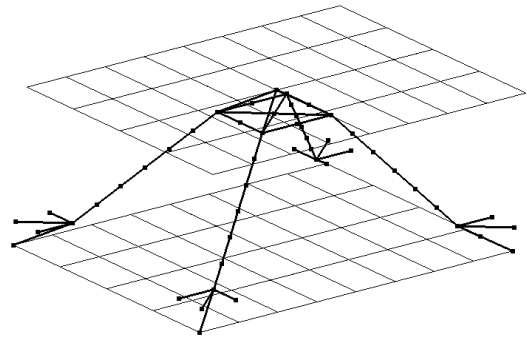


Figure 9. Improved mesh of unit cell.

Figure 9는 1차 개선된 축약모델의 단위셀 메쉬 형상이다. 외부재 메쉬는 8개X4개의 판요소를 모델링 하였고, 코어를 나타내는 빔요소를 5개에서 8개로 증가 시켰다.

### 4. 해석 결과 및 고찰

Figure 10은 실험결과 형상과 1차 개선된 축약모델의 성형 해석결과 형상이다. 개선 전에 비해 실험형상과 유사하게 3곳에서 좌굴 형상이 나타났다. 그러나 판재 좌굴의 형상이 아직 부정확하고 내부재의 좌굴 형상도 실험형상과는 차이가 발생하였다. 따라서 접합판재의 가공순서를 조사하고, 접합판재 코어의 가공 시 발생할 수 있는 가공경화를 고려하여 2차 개선 축약모델을 작성하였다. Figure 11은 접합판재 피라미드 코어의 가공 전, 후의 치수이다. 상용화된 판재를 슬리팅 (Slitting)하고 신장한 후의 코어소재 치수는  $L_1 = 8 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 4 \text{ mm}$ ,  $W = 0.5 \text{ mm}$  이다. 코어소재는 코어소재의 중심선의 길이는 4.37 mm 가 측정되었고, 가공 후 피라미드 코어 내부재의 중심선의 길이는 4.6 mm로 측정 되었다. 측정된 치수를 토대로 코어의 다리부위가 단순인장된 것으로 가정하여 계산하여 가공경화율은 5.3%로 구하였다.

Figure 12는 가공경화를 고려하지 않았을 때와 가공경화 5.3%를 고려하였을 때의 응력-변형률 곡선을 나타낸다. 가공경화를 고려하였을 경우가 같은 변형율에서 응력이 높게 나타난다. Figure 13, 14는 가공경화를 고려한 2차 개선된 축약모델

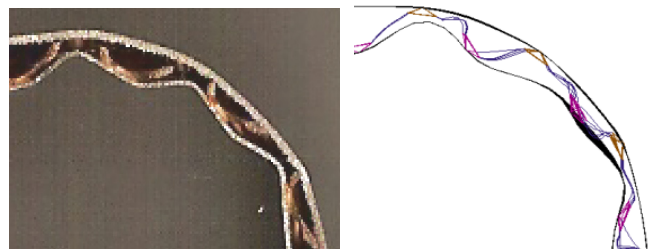


Figure 10. Comparison of deformation around die radius at stroke of 30 mm.

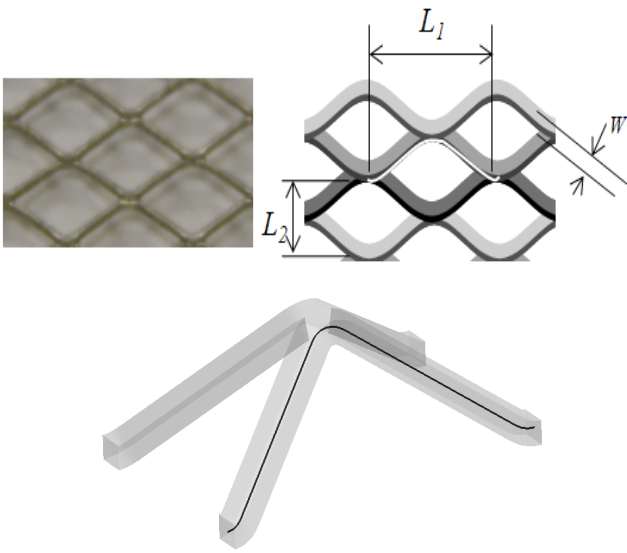


Figure 11. Measurement of core dimension.

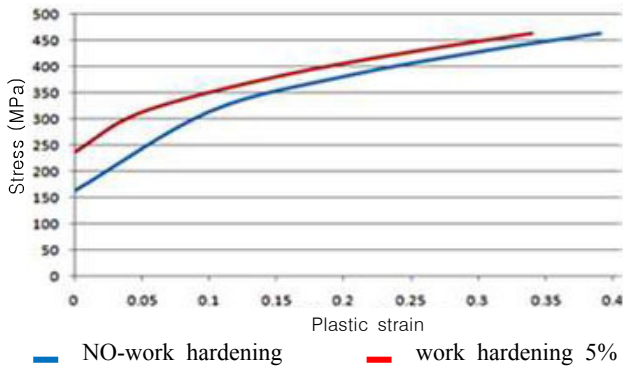


Figure 12. stress-strain curve for forming analysis.

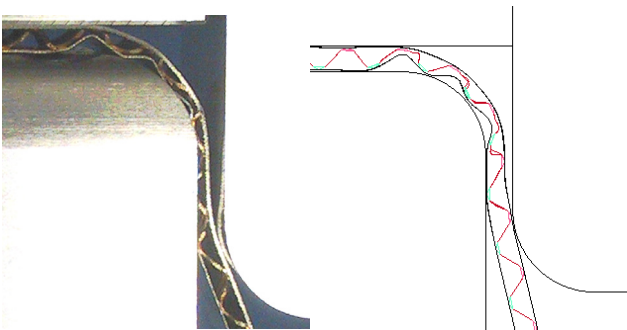


Figure 13. Comparison at deformation at stroke of 30 mm.

의 성형해석 결과 형상이다. 실험과의 형상비교를 하였을 때 내부재의 좌굴 형상이 발생하는 3부분 모두 비교적 유사하게 나타났다. 이 결과에서 개선된 해석방법으로 변형 형상의 효과적인 예측이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 그리고 성형 시 발생하는 반력의 변화에 대해 알아보기 위해 Figure 15와

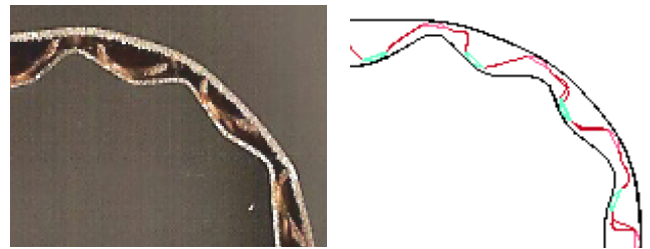


Figure 14. Comparison at deformation around die radius at stroke of 30 mm.

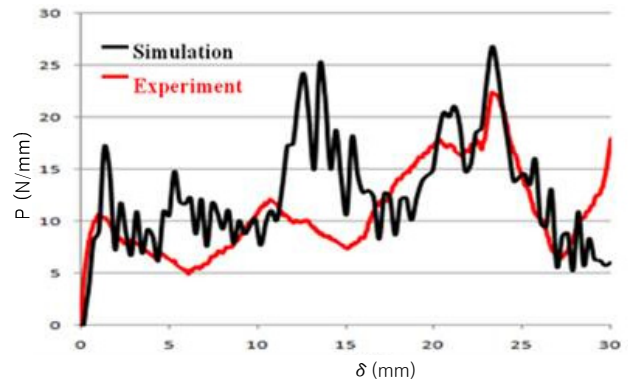


Figure 15. Load-displacement curve in L-bending of sandwich metal.

같이 변위에 따른 하중의 그래프를 실험과 비교하여 보았다. 실험에서는 하중이 성형 시작 시 변위에 따라 급격히 증가하여 약 1 mm 성형지점에서 11 N/mm 정도의 힘을 받은 후 감소하였다. 약 6 mm 성형지점에서 하중이 증가하며 약 11 mm 성형지점에서 12 N/mm 정도의 힘을 받은 후 다시 감소하게 된다. 약 15 mm 성형지점에서 다시 증가하여 약 24 mm 성형 지점에서 22.5 N/mm 정도의 최대 하중을 받고 감소하다가 약 27 mm 성형 지점에서 재차 증가하는 모습을 보인다. 해석에서도 유사한 위치의 3개의 지점에서 하중의 고점이 발생하고 있으나 하중 값에 있어서는 차이가 있음을 알 수 있다. 약 27 mm 지점에서 최대하중이 발생하는 것은 실험과 동일하며 27 N/mm 가 예측되어 실험에 비해 큰 하중을 예측하고 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 현재 연구개발 중인 피라미드 코어를 내부재로 사용한 접합판재의 성형성을 파악하기 위해 기본 성형공정의 하나인 L굽힘 성형에 대하여 연구하였다. 접합판재에 실제적으로 적용될 수 있고 해석정확도가 높은 해석방법을 개발하기 위해 축약모델을 사용하였다. 성형 해석과 실험과의 오차를 줄이기 위해 접합판재 모델링을 개선하였으며 변형형상과 하중-변위 곡선을 비교하여 개선된 성형해석의 유효성을 검

증하고자 하였다.

실제모델의 가공 시, 용접에 의한 용접부의 면적 증가와 내부재의 각도변화, 가공경화 등을 축약모델에 반영하여 L굽힘 성형해석을 하였다. 성형해석결과가 실험결과와 비교하여 유사한 변형 형상을 보였으며 피라미드형 코어의 좌굴현상을 잘 표현하였다. 또한 하중-변위 곡선을 비교하였을 때 힘의 발생 지점이 거의 유사하고 하중크기가 유사하여 해석방법이 유효성을 보인다고 판단된다.

개발된 피라미드형 코어를 가진 접합판재의 3차원 성형해석 기법은 접합판재의 다른 성형공정에도 유효하게 적용될 수 있는 방법이라 판단되며 향후 접합판재 연구에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 과제(연구)는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략 기술인력양성사업으로 수행된 결과임.

## 참 고 문 헌

1. 양동열, 나석주, 유중돈, 김중호, 정완진 외 36명, 2004, 마이크로 첨단복제 생산시스템개발 한국과학기술원, 보고서.
2. 정창균, 윤석준, 양동열, 이상민, 나석주, 이상훈, 안동규, “수직방향 직조 금속망을 이용한 초경량 금속 내부구조 접합판재의 제작 및 특성에 관한 기초 연구”, *한국정밀공학회지*, **22**, 152 (2005).
3. 김지용, 김중호, 정완진, 양동열, “접합판재의 전단변형거동에 관한 연구”, *한국소성가공학회지*, **14**, 257 (2005).
4. 김지용, 길혜영, 조기철, 김중호, 정완진, “피라미드형 내부구조재를 가지는 중공형 접합판재의 성형특성에 관한 연구”, *한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집*, 295 (2006).
5. N. Wicks and J. W. Hutchinson, “Performance of sandwich plates with truss cores”, *Mechanics of Materials*, **36**, 739 (2004).
6. F. W. Zok, S. A. Waltner, Z. Wei, H. J. Rathbun, R. M. McMeeking, and A. G. Evans, “A protocol for characterizing the structural performance of metallic sandwich panels: application to pyramidal truss cores”, *International Journal of Solids and Structures*, **40**, 6249 (2004).
7. V. S. Deshpande and N. A. Fleck, “Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending”, *International Journal of Solids and Structures*, **38**, 6275 (2001).
8. 조기철, 김지용, 정완진, 김중호, “피라미드 코어를 가진 샌드위치 판재의 두께 방향 압축특성에 관한 연구”, *한국소성가공학회 논문집*, **15**, 635 (2006).
9. 성대용, 정창균, 심도식, 양동열, “가상등가투영형상을 이용하여 피라미드형 트러스 코어를 구비한 금속샌드위치 판재의 효율적 해석기법 제안”, *한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 262-265, 2007.
10. D. Y. Seong, C.G. Jung, D. S. Shim, D. Y. Yang, J. H. Kim, and W. J. Chung, “Failure Modes of metallic sandwich plates with pyramidal truss cores during U-bending”, *proceedings of 9th International Conference of Technology of Plasticity*, pp. 428-429, 2008.
11. 임성진, 김중호, 성대용, 양동열, 유정수, “피라미드 코어를 가진 샌드위치 판재의 성형해석기술개발”, *한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 266~267, 2007.
12. LS-Dyna user manual, LSTC, ver. 970.