한국소성가공학회 2008년도 추계학술대회 논문집 pp. 435~438

샌드위치판재의 U-bending 공정에서 굽힘하중식의 검증

성대용[1] · 정창균[1] · 심도식[1] · 양동열[#] · 정완진[2]

Verification of load equations for sandwich plates during U-bending

D. Y. Seong, C. G. Jung, D. S. Shim, D. Y. Yang, W. J. Chung

Abstract

To verify the load equations, the load-stroke curves of the load equation that were analytically derived for sandwich plates were compared with those of the simulations in the case of the total thickness of 3 mm, the thickness of the face sheets of 0.5 mm, a gap between attachment points of 1.5 mm, and a thickness of the core element of 0.8 mm. The results of the comparisons showed that the overall analytic loads enable the prediction of the numerical loads irrespective of the change of the clearance, the radius of the die, and the radius ratio.

Key Words : Sandwich Plate, Load equation, U-bending.

1. 서 론

금속샌드위치판재는 상하표면판재 사이에 규칙 또는 불규칙적으로 반복되는 구조형 경량 소재를 내부구조로 구비하여 초경량, 고강도, 고강성 고내충격성의 판재로서 정적/동적 하중에 대한 우수한 저항능력을 가진다. 이런 하중에 대한 저항특성 외에 단열, 방음, 진동흡수, 유체채널, 전류채널, 촉매 등 다양한 기계적/ 물리적 특성과 기능들을 가진다 [1,2].

특히, 메탈폼 구조, 트러스 구조, 직조금속망 구조, 주름 구조, 허니콤 구조 등에 대한 연구가 활발하게 진행되었고, 내부구조에 따른 금속샌드위치판재의 기계적, 재료적 특성을 이론적으로 또는 실험적으로 분석하였으며, 굽힘하중, 전단하중, 압축 하중에 대하여 샌드위치판재의 전체적인 기계적 거동을 분석하고 각각의 내부구조재의 국부적 특성도 분석하고 설명해 주었다 [3~14]. 내부구조의 개념설계로부터 제작 및 생산방법에 대한 연구가 우선적으로 진행되었는데 금속샌드위치 판재의 제작방법은 쾌속조형을 이용한 주조공정으로 시작하여 생산성과 형상정밀도를 향상시키면서, 접합부 파단을 최소화하는 다양한 제작 방법들이 제안되었다. 개념적으로 설계된 각각의 형상에 대하여 이론적으로 탄성 설계하는 연구가 기본적으로 수행되었다. 대부분의 이론적 연구는 특정화된 하중(굽힘하중과 전단하중의 조합)에 대하여 네 가지 탄성결함들(표면판재좌굴, 표면판재항복, 내부구조좌굴, 내부구조항복)이 발생하지 않는 범위에서 최소무게를 가지도록 하는 최적설계에 관련된 연구가 주를 이루었다. 사방형 트러스 구조에 대해서는 표면판재항복, 표면판재주름, 내부구조전단결함, 내부구조압축 등을 고려하여, 탄성영역을 넘어선 소성 붕괴 메케니즘 맵에 대한 연구가 진행되었다.

Mohr[15]는 타공망 구조와 Fiber 구조를 내부구조로 하는 샌드위치판재의 Draw bending 거동에 대하여 실험적으로 분석하고 굽힘성형에서 샌드위치판재의 내부구조가 받는 전단력에 대하여 이론적으로 설명하였다. 그리고, 성형공정에서 내부

1. KAIST 기계항공시스템학부 대학원
2. 서울산업대학교 금형설계학과
KAIST 기계항공시스템학부, E-mail: dyyang@kaist.ac.kr

구조의 전단결함이 발생하지 않기 위해서 요구되는 전단강도가 이론적 탄성설계에서 요구되는 설계 값보다 매우 높다고 언급하였다. 또한, 샌드위치 판재의 성형 메커니즘을 거시적으로 설명하는 설계지침서역할을 하였으며, 내부구조전단결함과 표면판재파단이 발생하지 않기 위한 설계식도 제안하였다. 여기서, 성형결함을 방지하기 위한 설계식은 모두 성형 하중식으로부터 유도되었다. 그러나 Draw Bending 공정에서 성형하중은 정상상태로 가정하여 펀치압하량과는 상관없이 최대하중만 예측 가능하다. 대부분의 굽힘성형공정에서는 하중식을 정상상태로 가정할 수 없으며 펀치압하량, 틈새간격, 펀치와 다이의 곡률반경, 반경비 등의 공정변수의 영향을 무시할 수 없으므로 이를 고려한 하중식이 제안되었다[16].

본 연구에서는 U-bending 공정에서 성형결함을 방지하기 위한 설계식으로 활용하기 위한 중요한 데이터인 이론적 성형하중식을 유한요소 해석을 통하여 검증하고자 한다.

2. 펀치압하량에 따른 성형하중

샌드위치판재의 굽힘 하중식을 유도하는 절차는 다음과 같다[16].

하중식을 계산하기 위해서는 우선 동적조건과 하중 평형조건을 연립하며 상하부 표면판재의 변형율(ε^{top} , ε^{bot})을 계산한다. U-bending 공정에서 외력에 의한 일률 (rate of external work)을 계산한다. 그 다음, 내부소산일률 (rate of internal dissipation)을 각각 계산한다. 외력에 의한 일률과 내부소산일률이 같다는 조건에 소재물성에 관한 식을 연립한다. 여기서, 소재물성은 아래의 식을 사용하였다.

$$\sigma = K\varepsilon^{n} \tag{1}$$

그러면, U-bending 공정에서의 샌드위치판재의 성형하중을 펀치압하량(δ)의 함수로 유도할 수 있다.

$$P = 2t_f' \frac{K}{n+1}\left\{\varepsilon^{bot}\Big|^{n+1}\lambda_b(\delta) + (\varepsilon^{top})^{n+1}\lambda_t(\delta)\right\} \tag{2}$$

펀치압하량에 따른 성형하중을 계산하기 위해서 다음과 같은 가정을 하였다.

1) 샌드위치판재는 표면판재의 인장과 압축만으로 굽힘성형되며 내부구조는 전단변형을 하지 않는다.

2) 내부구조의 형상이나 물성은 전단변형과 면외 압축거동을 하지 않는 이상적 굽힘으로 가정하였다.

3) U-bending 공정이 진행되는 동안 상부표면판재의 인장력과 하부 표면판재의 압축력이 같다는 정적 평형 조건을 가정하였다. 이 조건은 굽힘성형 초기에 수평방향 하중평형조건에 의해 만족하는 조건이다.

4) 표면판재와 내부구조는 이상적으로 접합되어 있어 접합부 파단은 발생하지 않는다.

3. 유한요소해석을 통한 검증

유도된 하중 식을 검증하기 위해서, 이론적 하중-압하량 선도를 유한요소해석에서의 결과와 샌드위치판재 전체두께 3mm, 표면판재 두께 0.5mm, 접점간 틈새간격 1.5 mm 과 코어요소두께 0.8 mm 인 조건에서 Fig. 1~3 과 같이 비교해 보았다.

해석 조건에서는 표면판재좌굴, 표면판재파단, 내부구조 전단결함, 내부구조 붕괴와 같은 성형결함은 발생하지 않았다.

유한요소해석과 비교해본 결과, 전반적인 하중경향이 틈새간격(c), 펀치와 다이의 곡률반경(R_p , R_d), 반경비($r = R_p / R_d$)에 상관없이 유한요소해석의 하중경향을 잘 예측할 수 있었다.

유한요소해석의 하중이 이론적 하중식보다 조금 크게 계산되었는데 이는 이론적 하중식은 내부구조의 저항을 고려하지 않았기 때문이다. 그리고, 상부 표면판재의 인장력과 하부 표면판재의 압축력의 차이도 오차의 원인이다. 반경비와 펀치의 곡률반경이 증가함에 따라 성형하중과 최대하중이 발생하는 펀치 압하량이 증가한다 (Fig. 1). 펀치의 곡률반경이 증가하게 되면 유효경간거리가 증가하게 되어서 샌드위치판재는 내부구조의 전단변형은 줄고 표면판재의 인장과 압축에 의한 굽힘성형모드로 변형하게 된다.

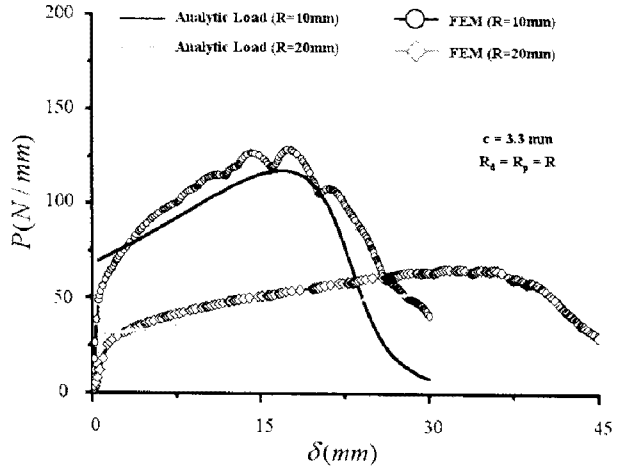

Fig. 1. Comparisons of forming loads of the analysis with those of the simulations (with the radius of the punch and die, c = 3.3 mm)

틈새간격에 따른 하중변화를 Fig. 2 에 도시하였다. 틈새간격이 샌드위치강판의 두께와 비슷해지면($h \approx c$), 전단변형 없이 표면판재만의 이상적 굽힘 성형으로 가정한 이론적 해석에서는 하중의 급격한 감소가 나타난다. 따라서 이론적 해석에서는 이상적으로 90°로 굽혀진다. 반면에, 유한요소 해석에서는 샌드위치판재의 두께가 틈새간격과 같아지더라도 중간재의 전단변형에 의한 형상오차각도에 의해 하중은 서서히 감소하게 된다.

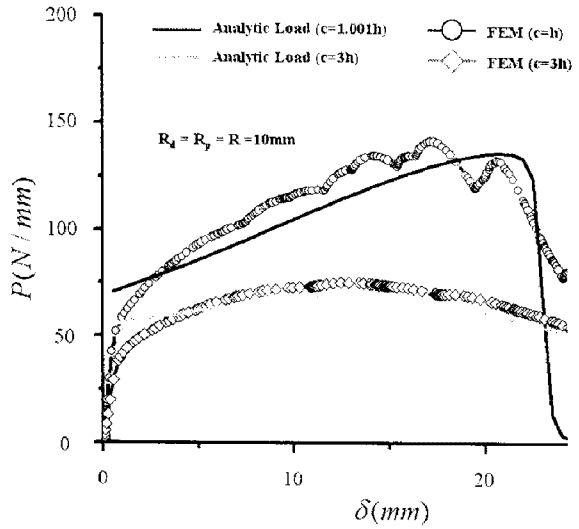

Fig. 2. Comparisons of forming loads of the analysis with those of the simulations (with the clearance, R = 10 mm)

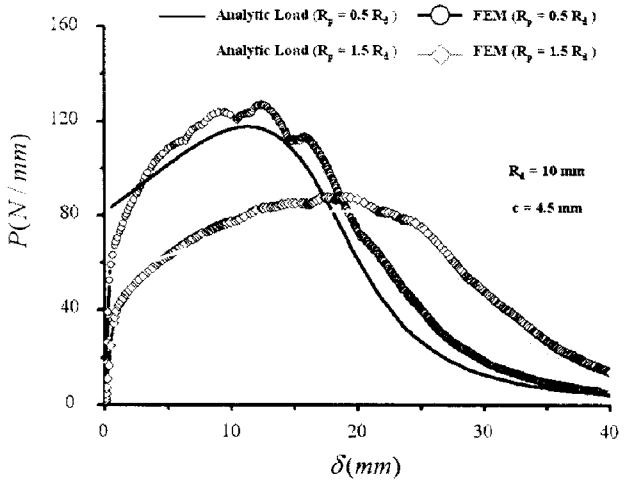

Fig. 3. Comparisons of forming loads of the analysis with those of the simulations (as radius ratio of the punch of the die , c =4.5 mm and R_d = 10 mm)

그리고 유효경간거리와 성형하중의 관계가 Fig. 3 에서도 같은 이유로 설명된다. 틈새간격과 펀치와 다이의 반경비가 유효경간거리를 결정한다. 펀치의 곡률반경이 다이의 곡률반경보다 클수록, 성형하중을 줄이고 굽힘변형이 지배적인 영역을 확장하여 성형에 유리하게 한다. 그리고, 해석적 결과에서 표면판재파단은 다이의 곡률반경에 크게 영향을 받는 반면에, 틈새간격과 펀치의 곡률반경은 U-bending 공정에서 중간재의 전달결함을 방지하기 위한 중요한 제어인자임을 확인 하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 이론적으로 계산된 U-bending 공정에서 샌드위치판재의 굽힘성형 하중식을 검증하기 위해서, 이론적 하중-압하량 선도를 유한요소해석에서의 결과와 비교해 보았다. 유한요소해석과 비교해본 결과, 이론적 하중식의 전반적인 경향이 틈새간격, 펀치와 다이의 곡률반경, 반경비에 상관없이 유한요소해석의 하중경향을 잘 예측할 수 있는 것을 확인하였다. 검증된 하중식은 샌드위치판재의 굽힘성형특성을 거시적으로 분석할 수 있고 샌드위치판재의 성형결함(특히, 내부구조 전단결함과 표면판재 파단)을 예측하는 데 유용한 설계식으로 활용 가능하다. 따라서, 나쁜 성형성으로 인하여 적용범위가 좁은 영역으로 제한되고 있는 샌드위치판재를 일반박판성형 공정

으로도 성형 가능한 샌드위치판재를 개발하여 생산성, 경제성, 시장성을 개선할 수 있는 핵심적인 기초 데이터로 활용 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 제조기반 전략기술개발 사업인 "3차원 형상의 금속 구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재 개발" 연구결과의 일부이며 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[1] H.N.G. Wadley, N.A. Fleck, A.G. Evans, 2003, Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures, Composites Sciences and Technology, Vol. 63, pp. 2331- 2343.

[2] J. Banhart, 2001, Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. Progress in Materials Science, Vol. 46, pp. 559-632.

[3] M.F. Ashby, A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson, H.N.G. Wadley, 2000, Metal Foam: A Design Guide. Butterworth Heinemann, Boston.

[4] N. Wicks, J.W. Hutchinson, 2001, Optimal truss plates, International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, pp. 5165-5183.

[5] 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. 41, pp. 6249-6271.

[6] F.W. Zok, H.J. Rathbun, Z. Wei, A.G. Evans, 2003, Design of metallic textile core sandwich panels. International Journal of Solids and Structures, Vol. 40, pp. 5707-5722.

[7] 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.

[8] N. Wicks, J.W. Hutchinson, 2001, Optimal truss plates, International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, pp. 5165-5183.

[9] 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.

[10] S. Chiras, D.R. Mumm, A.G. Evans, N. Wicks, J.W. Hutchinson, K. Dharmasena, H.N.G. Wadley, S. Fichter, 2002, The structural performance of near-optimized truss core panels, International Journal of Solids and Structures Vol. 39, pp. 4093-4115.

[11] M. Zupan, V.S. Deshpande, N.A. Fleck, 2004, The out-of-plane compressive behavior of woven-core sandwich plates, European Journal of Mechanics A/Solids, Vol. 23, pp. 411-421.

[12] J. Wang, A.G. Evans, K. Dharmasena, H.N.G. Wadley, 2003, On the performance of truss panels with Kagome cores, International Journal of Solids and Structures, Vol. 40, pp. 6981-6988.

[13] F. Cote, V.S. Deshpande, N.A. Fleck, A.G. Evans, 2006, The compressive and shear responses of corrugated and diamond lattice materials, International Journal of Solids and Structures, Vol. 43, pp. 6220-6242.

[14] J.H. Lim, K.J. Kang, 2006, Mechanical behavior of sandwich panels with tetrahedral and Kagome truss cores fabricated from wires, International Journal of Solids and Structures, Vol. 43, pp. 5228–5246.

[15] D. Mohr, 2005, On the role of shear strength in sandwich sheet forming, International Journal of Solids and Structures, Vol. 42, pp. 1491-1512.

[16] 성대용, 정창균, 심도식, 양동열, 정완진, 2008, U-bending 공정에서 틈새간격이 샌드위치판재의 내부구조 전단변형에 미치는 영향, 소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 320-323.