

U-bending 공정에서 틈새간격이 샌드위치판재의 내부구조 전단변형에 미치는 영향

성대용¹, 정창균¹, 심도식¹, 양동열[#], 정완진²

Effect of The Clearance on Core Deformation of Sandwich Plate during U-bending

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

Abstract

In this study, a macroscopic approach was carried out to gain insight into the bending mechanism of metallic sandwich plates. Shear force-punch stroke curves for various clearances were analytically derived for mild steel (CSP 1N) sandwich plates with the total thickness of 3 mm and 0.5 mm face sheets. As the clearance increases, shear force of the inner structures and sensitivity of punch stroke decrease. These data are useful to derive a criterion of judgment for core shear failure and de-bonding failure during U-bending.

Key Words : Sandwich Plate, Clearance, Core Deformation, U-bending.

1. 서론

금속샌드위치판재는 상하표면판재와 그 사이에 규칙적으로 반복되는 경량 내부구조로 구성된 구조형 판재로, 구조적으로 강성과 강도를 향상시켜 정적/동적 하중에 대한 우수한 저항능을 가지며 단열, 방음, 유체 및 전류 채널, 촉매 등 다양한 기능들을 가진다[1,2]. 금속샌드위치판재의 내부구조로는 메탈폼, 트러스 구조, 직조금속망 구조, 주름구조, 허니콤 구조 등이 있다[3~8]. 이러한 샌드위치판재에 대한 연구는 제작 및 생산방법론을 중심으로 활발히 진행되었고, 이론적으로 굽힘하중과 전단하중으로 조합된 특정화된 하중에 대하여 최소무게를 가지도록 하는 최적설계에 관련된 연구가 주를 이루었다. 네 가지 탄성 구속조건들 즉, 표면판재좌굴, 표면판재항복, 내부구조좌굴, 내부구조항복을 최적화에 고려하였다. 그리고, 사방형 트러스 구조의 붕괴 메커니즘 맵에 대한 연

구가 진행되었는데 표면판재항복, 표면판재주름, 내부구조전단, 내부구조압축 등을 고려하였다[9]. 이론적 최적화에 대한연구는 굽힘, 전단, 압축 하중에 대하여 샌드위치판재의 전체적인 기계적 거동을 설명하고 각각의 내부구조재의 국부적 특성도 설명해 주었다. 그리고, 실험적 연구를 통하여 샌드위치판재의 실용가능성을 보였으며, 특히 자동차, 항공, 선박등 연료소비성 산업의 경량화에 기여할 것으로 예상된다[10~14].

그런데 일반 박판소재에 비해 샌드위치판재가 가지는 나쁜 성형성으로 인하여 그 적용범위가 좁은 영역으로 제한되고 있는 실정이다. 일반박판성형 공정으로 성형 가능한 샌드위치판재의 개발은 샌드위치판재의 생산성, 경제성, 시장성을 개선할 수 있다. 타공망 구조를 박판중간재로 하는 샌드위치판재의 굽힘성형에 대한 연구가 Mohr[15]에 의해 진행되었는데, 굽힘성형에서 샌드위치판재의 거시적 거동을 이론적으로 설명하였다. 그리

1. KAIST 기계항공시스템학부 대학원

2. 서울산업대학교 금형설계학과

KAIST 기계항공시스템학부, E-mail: dyyang@kaist.ac.kr

고, 드로우 벤딩(Draw Bending)에서 요구되는 전단강도가 탄성영역에서의 최적설계보다 훨씬 높다고 결론지었다. 이 논문은 샌드위치판재의 굽힘성형에 관하여 설계지침서역할을 하였으며, 특히 내부구조전단결합과 표면판재파단을 방지할 수 있는 설계방법도 제안하였다. 그러나 Draw Bending 공정에서 전단결합은 정상상태로 가정하여 편치압하량과는 상관없는 임계전단강도를 분석하였다. 대부분의 굽힘에서는 정상상태로 가정할 수 없으며 편치압하량, 틈새간격, 편치와 다이의 곡률반경 등의 공정변수의 영향을 무시할 수 없다. 본 연구에서는 U-bending 공정에서 내부구조가 지탱하는 전단력과 공정변수인 틈새간격과의 관계를 이론적으로 분석하였다.

2. 결함모드

굽힘성형공정에서 샌드위치판재의 주 결함모드는 표면판재좌굴, 표면판재파단, 내부구조좌굴, 내부구조파단, 접합부파단 등이 있다. 샌드위치판재가 굽힘하중을 받을 때 한쪽표면판재는 압축응력을 나머지 하나의 표면판재는 인장응력을 받게 된다. 그리고 내부구조는 전단응력을 지지하는 역할을 한다. 표면판재좌굴은 굽힘하중에 의해 발생하는 압축응력에 의해 발생하며 표면판재의 탄성좌굴은 표면판재의 두께, 탄성계수, 접점간 틈새간격의 함수이며, 피라미드형 트러스 내부구조를 가지는 샌드위치판재의 표면판재 임계탄성좌굴은 아래 식(1)과 같이 표현된다[5].

$$\left(\frac{V}{\sqrt{EM}}\right)^2 \frac{24(1-\nu^2)k\pi^2 H_c l^2}{k\pi^2 t_f^3} \leq 1, \quad (1)$$

표면판재파단은 곡률반경과 소재물성의 함수로 다음과 같이 Mohr 에 의해 유도되었다[15].

$$\varepsilon_i^{\max} = \frac{1}{2+\varepsilon^*} \left[\frac{\sigma_0}{E_T} \varepsilon^* + \ln(1+\varepsilon^*)(1+\varepsilon^*) \right] \quad (2)$$

내부구조붕괴와 내부구조파단은 주로 내부구조가 지탱하는 전단력에 의해 발생하기 때문에 내부구조 전단결합으로 지칭한다. Draw bending 에서 굽힘성형 시 요구되는 내부구조의 전단강도는 다

음 식(3)과 같이 표현된다[15].

$$\tau_c = 2 \left(\frac{t\sigma_0}{C} \right) \left\{ (\varepsilon_i^* - \varepsilon_i^*) + \frac{E_T}{\sigma_0} \left[(\varepsilon_i^*)^2 + (\varepsilon_i^*) \right] \right\} \quad (3)$$

이때 요구되는 전단강도는 정상상태하중에서 다이의 곡률반경과 소재물성만의 함수로 편차압하량과 틈새간격에 따른 영향을 고려할 수 없다. U-bending 과 L-bending 과 같은 일반적인 굽힘성형 공정에서 압하량이나 틈새간격은 굽힘성형에서 주요인자인 것을 고려해 볼 때, 전단강도에 대한 새로운 설계식이 요구된다.

3. 편치압하량에 따른 성형하중

내부구조가 지지하는 전단력에 관한 식을 유도하기 위해서는 편치압하량에 따른 성형하중을 계산해야 한다. 이때 내부구조의 형상이나 물성은 전단변형과 면의 압축거동을 하지 않는 이상적 굽힘으로 가정하였기에 고려하지 않았다. 표면판재의 변형율을 계산하기 위해서는 적당한 정적평형 조건을 가정해야 한다. 굽힘 초기에서는 수평방향 하중평형조건에 의해 상부표면판재의 인장력과 하부 표면판재의 압축력이 같아야 한다 [15]. 이 조건이 U-bending 공정이 진행되는 동안 만족한다는 가정을 하였다. 동적조건과 하중평형조건을 연립하면, 상하부 표면판재의 변형율(ε^{top} , ε^{bot})을 계산할 수 있다.

그리고, 그 다음, U-bending 공정에서 외력에 의한 일률 (rate of external work)과 내부소산일률 (rate of internal dissipation)을 각각 계산하고 두 일률이 같다는 조건과 소재물성을 연립하면 U-bending 공정의 성형하중을 편치압하량(δ)의 함수로 식 (4)와 같이 유도할 수 있다.

$$P = 2t_f' \frac{K}{n+1} \left\{ \varepsilon^{bot} \lambda_b(\delta) + (\varepsilon^{top})^{n+1} \lambda_t(\delta) \right\} \quad (4)$$

이때, 소재물성은 식(5)로 가정하였다.

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (5)$$

그리고, λ_b 는 단위시간에 편치 압하량에 따른

굽힘 변형된 하부표면판재의 길이이며, λ 는 상부표면판재의 값을 의미하며 펀치와의 접촉점과 다이와의 접촉점을 연결하는 직선방정식을 유도하면 기하학적 조건들에서 쉽게 계산할 수 있다. 그러면 정의된 λ 값도 펀치압하량(δ)의 함수로 표현된다.

4. 펀치압하량에 따른 반력

펀치압하량에 따른 전단력을 계산하기 위해서 우선 굽힘각도(θ)를 펀치압하량의 함수로 유도하여야 한다. 굽힘각도는 앞서 기하학적 조건으로부터 다이와의 접촉점의 좌표를 이용하여 계산된다. 유도된 성형 하중식으로부터 자유물체도를 그리면 내부구조가 지지하는 전단하중을 계산할 수 있다. 수평방향 하중평형, 수직방향 하중평형, 그리고 모멘트 평형조건으로부터 아래의 반력식들을 계산할 수 있다.

$$P_v = \frac{P}{2} \quad (6)$$

$$P_h = P_v \tan \theta \quad (7)$$

$$V = P_h \sin \theta + P_v \cos \theta \quad (8)$$

식(8)은 펀치압하량에 따른 내부구조의 전단력을 나타내는 식이며, 샌드위치판재의 기하학적 설계 변수와 U-bending 공정에서 틈새간격, 펀치 곡률 반경, 다이 곡률반경 등의 공정변수들이 고려되었다.

5. 틈새간격과 전단력의 관계

U-bending 공정에서 샌드위치판재의 내부구조가 받는 전단력을 분석하기 위해 Mild Steel (CSP 1N) 소재로 구성된 샌드위치판재에 대하여 적용해 보았다. 이론적 해석에서 샌드위치판재의 전체두께(h)는 3.0 mm, 표면판재 두께(t_f)는 0.5 mm로 선정하였고 펀치와 다이의 곡률반경(r)은 10 mm 조건에서 틈새간격에 따른 전단력을 분석한 그림을 Fig. 1에 도시하였다. 틈새간격이 샌드위치 판재의 전체두께와 가까워 질수록 내부구조가 지탱하는 전단력은 거의 무한대로 증가한다. 이는 내부구조의 전단변형 없이 표면판재의 인장과 압축으로만

굽힘성형된다는 가정하에 계산된 결과이기 때문이다.

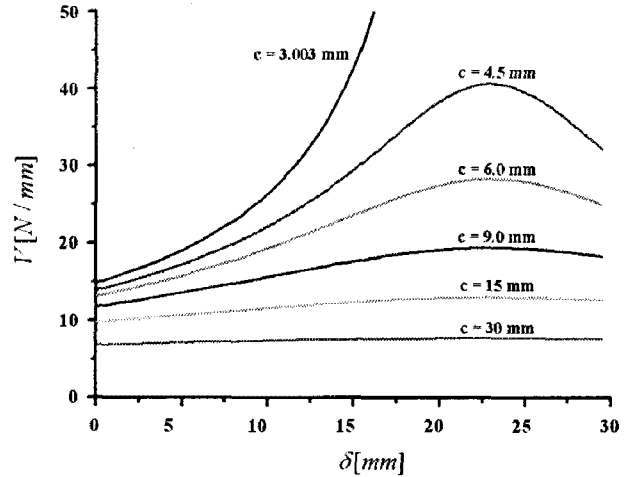


Fig. 1 Shear force per unit width – punch stroke curves for various clearance.

실제로는 내부구조의 전단변형이 발생하며 내부구조가 가지는 전단강도를 넘어서면 내부구조 전단결합이 발생하고 표면판재와 내부구조 사이에 접합강도를 넘어도 접합부 파단이 발생하게 된다. 일반적인 박판소재와는 달리 샌드위치판재의 굽힘성형에서는 틈새간격이 좁아질수록 굽힘성형에서 내부구조전단결합과 접합부 파단이 발생할 가능성이 높아져서 성형에 불리하게 된다.

틈새간격이 길어질수록 내부구조가 받는 전단력은 줄어들게 되고 펀치 압하량의 민감도도 줄어들게 된다. 특히, 틈새간격이 샌드위치판재의 전체 두께의 10배가 넘으면 펀치압하량에 무관하게 전단력은 거의 일정하게 된다. 따라서 단순지지 굽힘 실험(3-point bending or simply supported bending)과 같이 틈새간격이 긴 굽힘 공정에서는 펀치 압하량과 내부구조의 전단결합이 거의 독립적임을 알 수 있다. 틈새간격이 길어질수록 굽힘 공정에서 경간거리(span length)가 길어지게 된다. 따라서 경간거리가 길어질수록 샌드위치판재의 굽힘성형에 유리할 것으로 보인다. U-bending 공정에서 경간거리를 길게 할 수 있는 방법은 틈새간격을 늘이는 것 외에도 다이의 곡률반경에 비해서 펀치의 곡률반경을 크게 하는 것도 있다. 결론적으로 내부구조의 전단변형은 내부구조의 전단강도와 같은 설계변수로도 제어할 수 있으나 틈새간격과 펀치의 곡률반경과 같은 공정변수로도

제어할 수 있다. 따라서 목적형상의 굽힘 각도, 소재의 물성, 내부구조의 종류와 형상에 따른 전단강도, 내부구조와 표면판재의 접합강도, 벤딩공정에서의 공정변수 등을 모두 고려하여 내부구조 전단결합과 접합부 파단을 방지할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 U-bending 공정에서 샌드위치판재의 내부구조가 지지하는 전단력과 틸새간격과의 관계를 이론적으로 분석하였다. 틸새간격에 따른 내부구조가 받는 전단강도는 내부구조의 전단강도설계와 접합부 파단을 방지하기 위한 데이터로 유용하게 활용될 수 있다. 이상의 결과를 정리하면 다음과 같다. (1) 틸새간격이 증가할수록 내부구조가 받는 전단력이 감소하며 편치압하량의 민감도도 감소한다. (2) 샌드위치판재의 설계에 있어서 내부구조의 전단결합은 내부구조의 전단강도를 높여서 제어할 수 있지만 틸새간격과 같은 공정변수로도 제어할 수 있다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 중장기산업기술개발사업 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.