

굽힘성형을 위한 금속 샌드위치판재의 내부구조 개발

성대용¹· 정창균¹· 윤석준¹· 심도식¹· 양동열[#]· 이상훈²· 안동규²

The Development of Inner Structure of Metallic Sandwich Plates for Bending

D. Y. Seong, C. G. Jung, S. J. Yoon, D. S. Shim, D. Y. Yang, S. H. Lee, D. G. Ahn

(Received October 6, 2005)

Abstract

Metallic sandwich plates are ultra-light materials not only with high strength and stiffness but also with other multifunctional physical properties. Inner dimpled shell structure can be fabricated by a piecewise sectional forming process, and then bonded with face sheets of the same material by resistance welding. Possible region for bending and limit radius of curvature are defined to compare the formability of sandwich plates. Tests have shown that sandwich plates with inner dimpled shell structure subject to bending have longer possible region for bending and smaller limit radius of curvature than other types of sandwich plates. The proposed inner dimpled shell structure is shown to have better formability of sandwich plates for bending than other types inner structures.

Key Words : Metallic Sandwich Plates, Inner Dimpled Shell Structure, Bending, Incremental Bending, Possible Region for Bending, Limit Radius of Curvature

1. 서 론

금속 샌드위치판재는 메탈 폼(metal foam)구조, 트러스 구조, 벌집구조, 직조금속망구조, 딥플 구조 등의 다양한 내부구조 상하 양면에 표면판재를 저항용접이나 접착제로 접합한 경량 고강도/고강성의 판재로 전자파 차폐, 내충격성, 방음, 방열 특성의 고기능성 판재이다[1]. 특히 직조금속과 트러스형 내부구조 금속 샌드위치판재는 무게대비 강도/강성 측면에서 많은 이점을 가지고 있다는 것이 이론적으로 입증되었다[2~3]. 상용 익스펜디드 메탈을 절곡하여 제작한 피라미드형 트러스 내부구조와 상용 직조금속망을 내부구조로 하는 금속 샌드위치판재의 굽힘 특성을 실험적으로 분석한 연구가 진행되었다[4~5]. 일반 금속판재와 비

교했을 때 무게대비 강성은 높으나 Fig. 1과 같이 굽힘하중에 의한 탄성파손 후 바로 표면판재 좌굴에 의해 붕괴하는 특성을 보였다. 따라서 선재의 내부구조는 탄성변형영역에서 큰 장점을 가지나 소성변형영역에서 굽힘성형에 불리한 내부구조이며 낮은 성형성으로 인해 적용 및 응용에 많은 제약을 받고 있다.

이런 금속 샌드위치판재의 성형에 관한 연구는 내부구조가 없는 접합판재의 전단 성형에서 발생하는 현상을 실험하여 기술한 연구[6~7]가 있으나 구조체를 내부구조로 하는 금속 샌드위치판재의 공간배치나 형상설계가 성형성에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구가 부족한 실정이다.

본 연구는 구조체를 이용한 금속 샌드위치판재를 성형하기 위한 기초연구로써 금속 샌드위치판

1. 한국과학기술원 기계공학과 대학원

2. 조선대학교 기계공학과

교신 저자: 한국과학기술원 기계공학과, dyyang@kaist.ac.kr

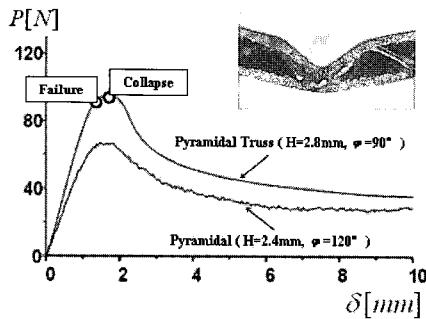


Fig. 1 Bending response of pyramidal truss sandwich plates[4](H: thickness of sandwich plates, ϕ : crimping angle of truss core, width of sandwich plates: 20mm)

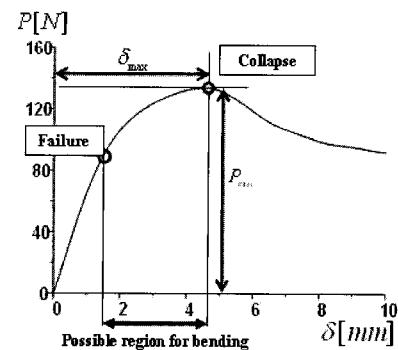


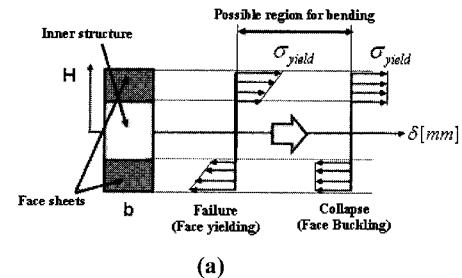
Fig. 2 Definition of the possible region for bending

재가 굽힘하중을 받을 때 표면판재가 항복된 이후 내부구조가 하중을 지탱하여 붕괴하기까지 변형량을 증가시켜 성형성을 개선하고자 한다. 그리고 금속 샌드위치판재의 성형성을 높이기 위해 면재를 이용한 담풀형 내부구조를 제안하여 표면판재가 항복되어도 바로 붕괴하지 않고 소성변형하여 굽힘성형이 가능한 내부구조를 개발하고자 한다.

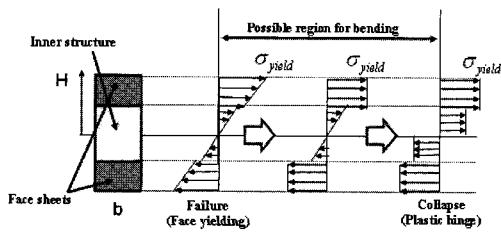
2. 금속 샌드위치 판재의 내부구조

2.1 굽힘성형영역 및 임계곡률반경의 정의
굽힘성형영역을 표면판재의 초기항복이 발생한 시점부터 샌드위치판재가 붕괴하기까지의 변위영역으로 정의하고 Fig. 2의 하중변위선도 상에 나타내었다. 여기서 δ_{max} 는 붕괴하기까지의 최대변위, P_{max} 는 붕괴하중을 각각 나타낸다.

선재의 내부구조를 이용하는 트러스형 금속 샌드위치판재의 굽힘하중에 대한 파손 및 붕괴모드는 Fig. 3(a)와 같이 표면판재의 항복에 의해 파손이 발생한 직후 표면판재가 두께방향으로 모두 항복되면 바로 붕괴하는 특성을 가진다. 따라서 초기항복이 발생하는 시점에서 샌드위치판재가 붕괴하는 시점까지를 굽힘성형영역이라 정의하면, 선재의 내부구조를 이용한 샌드위치판재는 내부구조의 굽힘 강성을 거의 무시할 수 있어 굽힘성형영역이 좁기 때문에 굽힘에 의한 성형이 어려운 것을 알 수 있다. 그러므로 Fig. 3(b)와 같은 내부구조의 강성이 높은 구조재를 이용하면 표면판재항복이 발생한 시점에서 붕괴하기까지의 변위



(a)



(b)

Fig. 3 Failure and collapse mechanism of sandwich plates with inner shell structures; a) Truss core b) Inner shell structures (b: width of sandwich plates, H: thickness of sandwich plates)

량을 증가시킬 수 있고 굽힘성형영역을 연장하여 굽힘성형이 가능하도록 내부구조재를 설계 할 수 있다. 여기서 b는 샌드위치 판재의 폭, H는 두께를 각각 나타낸다.

그리고 금속 샌드위치판재의 성형성과 성형한계를 정량화하기 위해 다음과 같은 가정을 하였다. 연구대상의 샌드위치판재는 두께가 길이의 2% 이하인 판재로 붕괴하기 직전까지 전단변형을

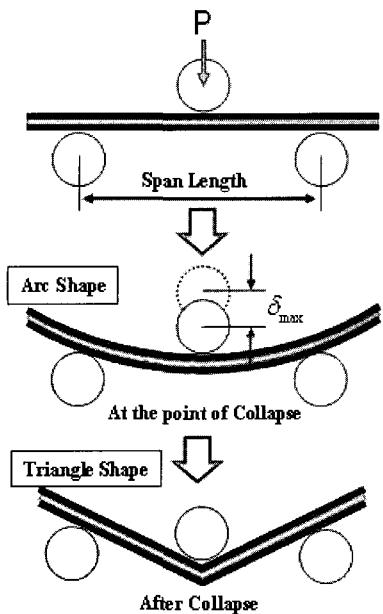


Fig. 4 Assumptive shapes of sandwich plates during the bending behavior

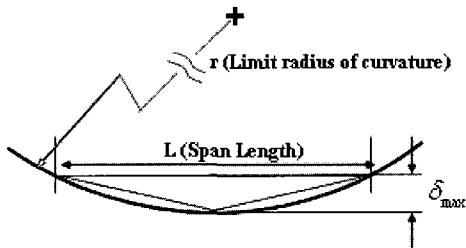


Fig. 5 Definition of the limit radius of curvature(r)

무시하고 굽힘에 의한 변형만 발생한다고 가정하였다. 붕괴할 때의 형상이 Fig. 4 와 같이 원호의 일부라는 가정을 할 수 있다. 따라서 Fig. 5 처럼 임계곡률반경을 정의할 수 있으며 임계곡률반경은 하중조건에서의 양단 지지점 간의 간격(span length)과 편치의 압하량이 만드는 삼각형으로부터 계산한다. 임계곡률반경을 정의함으로써 금속 샌드위치판재의 굽힘성형한계를 하중변위선도로부터 정량화하여 식(1) 과 같이 기하학적 조건으로 간단히 계산할 수 있다.

$$r = \frac{(\delta_{\max})^2 + (L/2)^2}{2\delta_{\max}} \quad (1)$$

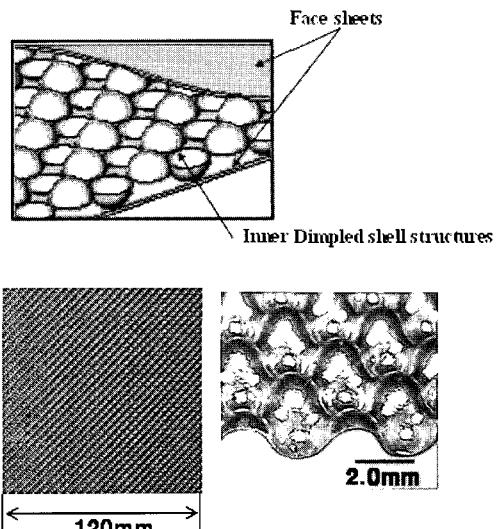


Fig. 6 Sandwich plates with inner dimpled shell structures

2.2 딥플형 내부구조 샌드위치판재의 제작

굽힘성형영역을 확보하기 위해 내부구조의 굽힘강성을 증가시켜야 한다. 따라서 면재의 박판을 사용하여 내부구조를 제작할 수 있는데 박판을 이용한 내부구조는 벌집형(honeycomb), 주름형(corrugated) 구조 등이 있다. 벌집형 내부구조와 주름형 내부구조는 표면판재와 선 접촉하여 접합하므로 용접이 어려워 접합강도가 낮다는 단점이 있다. 따라서 표면판재와 점 접촉을 하여 용접이 가능한 Fig. 6 과 같은 딥플형 내부구조 금속 샌드위치판재를 굽힘성형을 위한 내부구조재로 제안하였다.

굽힘하중을 받는 딥플형 내부구조 금속 샌드위치판재의 SQP-PD알고리즘을 이용한 이론적 최적화 결과[8] 상하 동일반경의 반구형 딥풀이 탄성영역에서 굽힘 하중에 대한 최적형상이며, 반구형 딥풀을 내부구조로 하는 금속 샌드위치판재의 굽힘성형 가능성을 유한요소해석으로 확인하였다[9]. 따라서 반구형 딥풀 내부구조를 제조하기 위하여 구분적 구획성형(piecewise sectional forming)기법의 개념을 일부 원용하여 금형($40\text{mm} \times 40\text{mm}$)을 제작하였는데 국부적 구획성형은 금형보다 큰 박판재료를 성형하기 위해 성형위치를 단계별로 변경하면서 성형하는 공정으로 작은 크기의 편치와 다이 금형으로 원하는 크기의 시편을 성형하는 방법이다[10]. 따라서 가로 40mm, 세로 40mm 넓이

에 미세패턴이 가공된 금형으로 시편의 위치를 변경하면서 여러 단계로 성형하여 3점 굽힘 시편(20mm×160mm) 또는 충격시편(120mm×120mm)등의 원하는 넓이에 내부구조를 제작 할 수 있다. 그리고, 박판을 성형하여 내부구조를 제작하고 내부구조 상하양면에 표면판재를 다점저항용접으로 접합하여 딥플형 내부구조를 구비한 금속 샌드위치판재를 제작할 수 있다. 여기서 2.5mm 두께의 샌드위치판재는 내부 딥플 판재의 재료로 0.3mm를 사용하였고 2.2mm의 샌드위치판재는 0.2mm의 내부 박판을 사용하였다. 이는 표면판재를 0.3mm로 고정한 상태에서 최적의 용접변수를 찾기 위하여 용접 스토퍼와의 관계에서 결정된 재료 두께이다. 재료는 스테인리스 스틸(SUS 304)을 사용하였고 탄성계수(E)는 180GPa이고 단축인장 항복응력(σ_y) 283 MPa로 측정되었다. 그리고 제작된 시편들의 두께편차가 시편내 3%, 시편간 7%이내의 정밀도를 가졌다.

3 정적 굽힘 실험 및 결과

3.1 실험조건

딥플형 금속 샌드위치판재가 굽힘 하중을 받을 때 탄소성 굽힘거동과 굽힘성형 가능성을 파악하기 위해 3점 굽힘 실험을 수행하였다. 실험은 표준 실험장치인 INSTRON 5583장치를 이용하였으며, ASTM E270 규격[11]에 따라 직경이 25.4mm인 펀치와 다이를 이용하였으며 양단 지지점 간의 간격(span length)은 120mm의 조건으로 실험을 실시하였고 펀치의 압하량을 5mm/min로 30mm까지 설정하였다. 제작된 샌드위치판재는 모두 표면판재항복에 의해 파손이 발생하였고 소성한지의 발생 시점에서 붕괴되었다. 그리고, 주어진 실험조건에서 최소 268mm의 임계곡률반경을 가졌다.

3.2 임계곡률반경 비교

굽힘하중을 받는 딥플형 샌드위치판재를 피라미드형 트러스 내부구조 샌드위치판재와 직조금속망을 내부구조로 하는 금속 샌드위치판재와 Fig. 7과 같이 비교하고 정량적 굽힘 특성은 Table 1에 표기하였다. 비교 대상의 샌드위치판재는 모두 폭 20mm, 길이 160mm, 표면판재의 두께 0.3mm, 양단 지지점간 거리(span length) 120mm의 동일 재료와 실험조건이다. 피라미드 트러스를 이용한 샌드위치판재는 마름모형 익스펜더드 메탈을 절곡하

Table 1 Comparison of bending characteristics of dimple type sandwich plates with other types

type	H[mm]	W[g]	δ_{max} [mm]	P_p [N]	r[mm]
truss	2.8	19.8	1.62	94.1	1110
	2.4	18.9	1.57	66.5	1150
textile	2.5	22.2	4.55	133	398
	2.3	22.5	6.04	110	301
dimple	2.5	20.9	6.46	143	282
	2.2	21.0	6.79	120	268

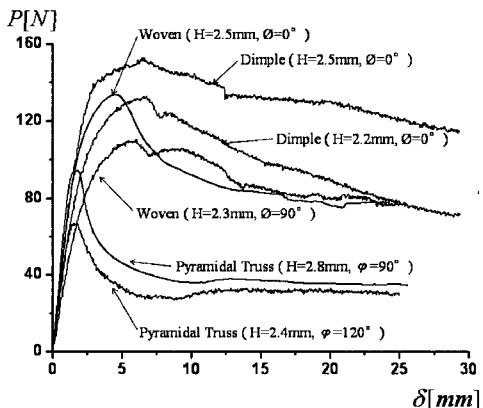
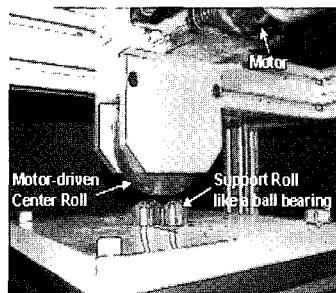


Fig. 7 Comparison of bending response of dimple type sandwich plates with other types

여 피라미드 구조를 제작하는데 여기서 크립핑각도(ϕ)는 마름모를 피라미드형으로 절곡한 각도이다[4]. 그리고, 직조 금속망의 직조배열각도는 패턴각도(θ)와 동일 기호를 사용하였는데 패턴각도는 표면판재의 길이방향이 내부구조와 접합되는 방향으로 상하부 딥플이 연결되는 방향을 0° 로 정의하였다.

면재의 딥플 내부구조가 표면판재항복에 의한 초기 파손발생 후 붕괴까지의 하중을 지탱하는 반면에 선재의 트러스나 직조금속 내부구조는 표면판재의 항복 후 하중을 지탱하지 못하고 바로 붕괴한 것으로 판단된다. 그리고, 트러스 샌드위치판재는 약 1100mm, 직조금속 샌드위치판재는 약 300mm의 임계곡률반경을 가진 반면에 딥플 내부구조는 임계곡률반경이 약 270mm로 굽힘에 의한 성형에 유리한 것으로 측정되었다.



(a)

(b)

Fig. 8 a) Experimental setup b) deformed workpieces [12]

4 굽힘에 의한 성형

4.1 점진적 룰 성형 장치

Fig. 8은 윤석준[12] 등이 개발한 점진적 룰 성형 장치와 임의의 이중곡률을 성형한 시편을 보여준다. 4개의 반침률이 다이의 역할을 하며 윗률이 압하하면서 이중 곡률을 동시에 생성할 수 있는 굽힘성형장치이다. 본 연구에서는 금속 샌드위치 판재의 성형을 위해 두 개의 반침률만 사용하여 점진적 굽힘성형을 실시하였다.

4.2 점진적 굽힘성형

덤플형 내부구조 금속 샌드위치판재를 점진적 룰 성형장치를 이용하여 3점 굽힘 조건에서의 굽힘성형영역에서 Fig. 9와 같이 성형하였으며 Fig. 10은 임계곡률반경(270mm)까지 성형된 시편이다. 부드러운 곡률을 얻기 위해 양단 지지점간의 간격을 40mm로 줄이고 시편을 10mm 간격으로 10등분하여 순차적으로 임계곡률한계까지 성형하였으나 스프링백의 영향으로 최종 성형된 판재의 곡률반경은 약 330mm으로 측정되었다.

본 연구에서 샌드위치판재의 점진적 굽힘성형은 성형가능성 여부만 판단하였으며 다이 간격, 펀치 압하량, 스프링백 등 공정변수에 따른 곡률분포와의 관계, 목적형상과의 비교와 같은 연구는 이행하지 않았다. 따라서 대면적 내부구조 제작과

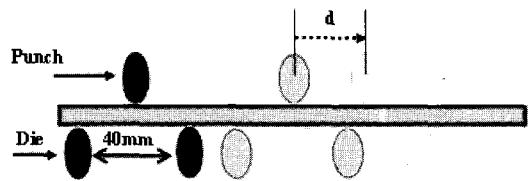


Fig. 9 Incremental bending for sandwich plates with inner dimpled shell structures

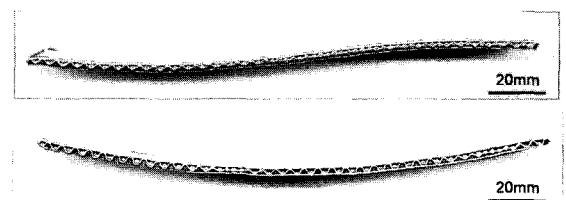


Fig. 10 Deformed shapes of sandwich plates with inner dimpled shell structure

접합공정에 대한 연구와 더불어 샌드위치판재의 일반적인 형상을 굽힘성형을 하기 위한 체계적인 공정 변수분석에 관한 연구가 필요하다.

5. 결 론

본 연구는 정밀도 높은 내부구조의 제작과 굽힘 성형을 위한 딥풀형 내부구조재 금속 샌드위치 판재를 제작하고 굽힘 특성을 분석하여 굽힘성형 가능성을 입증하였다. 그리고 임계곡률반경과 굽힘성형영역을 정의하여 샌드위치판재의 성형 특성을 정량화하였다. 이상의 연구 결과를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 국부적 구획성형기법을 원용하여 시편보다 작은 금형으로 원하는 사이즈의 딥풀형 내부구조를 복제하였고 다점 저항용점을 통해 시편내 두께변화 3%이내의 정밀도로 샌드위치판재를 제작하였다.

(2) 샌드위치판재가 굽힘하중을 받을 때 표면판재항복이 발생한 시점부터 붕괴하기까지의 펀치의 압하량을 굽힘성형영역으로 정의하였다. 또한 붕괴하기까지 전단변형을 무시하고 굽힘변형만 발생하여 원호형상으로 변형한다는 가정하에 임계곡률을 정의하여 샌드위치판재의 굽힘에 의한 성형성을 정량화하였다.

(3) 내부구조의 굽힘강성이 높을수록 굽힘성형에 유리하다.

(4) 딥플형 내부구조는 직조금속 보다 약 10%, 트러스 보다 400% 정도의 임계곡률반경이 개선되어 굽힘 성형에 유리한 구조임을 확인하였으며 점진적 굽힘 성형공정으로 굽힘 성형이 가능함을 보였다.

후기

본 연구는 산업자원부의 핵심연구개발사업인 마이크로 첨단복제 생산시스템 개발 연구결과의 일부이며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] H. N. G. Waldley, 2003, Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures, Compos. Sci. Technol., Vol. 63, pp. 2331~2343.
- [2] N. Wicks, J. W. Hutchinson, 2001, Optimal truss plates, International Journal of Solids and Structures, Vol. 38, pp. 5165~5183.
- [3] 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.
- [4] C. G. Jung, S. J. Yoon, D. Y. Yang, S. M. Lee, S. J. Na, S. H. Lee, D. G. Ahn, 2005, Fabrication and Static Bending Test in Ultra Light Inner Structured and Bonded(ISB) Panel Containing Repeated Inner Pyramidal Structure, KSPE, Vol. 22, No. 6, pp. 175~182.
- [5] D. G. Ahn, S. H. Lee, M. S. Kim, G. Y. Hahn, C. G. Jung, D. Y. Yang, 2004, Investigation into characteristics of bending stiffness and failure for ISB panel, Conference of KSPE, autumn, pp. 1274~1277.
- [6] 김지용, 김종호, 정완진, 2005, 샌드위치 강판의 전단가공에 있어서 전단면에 미치는 금형설계 변수의 영향, 한국소성가공학회지, 제 14 권 제 1 호, pp. 37~42.
- [7] 김지용, 김종호, 정완진, 양동열, 2005, 접합판재의 전단변형거동에 관한 연구, 한국소성가공학회지, 제 14 권 제 3 호, pp. 257~262.
- [8] D. Y. Seong, C. G. Jung, S. J. Yoon, D. Y. Yang, 2005, Optimal Design of Metallic Sandwich Plates with Inner Dimpled Shell Subjected to 3-Point Bending, Conference of KSPE, spring, pp. 702~705.
- [9] 성대용, 정창균, 윤석준, 양동열, 2005, 등가형상을 이용한 딥플형 금속 샌드위치 판재의 효율적 굽힘 거동 예측, 한국소성가공학회지, 제 14 권, 제 8 호, pp. 718~724.
- [10] M. Z. Li, Z. Y. Cai, Z. Sui, Q. G. Yan, 2002, Multi-point forming technology for sheet metal, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 129, pp. 333~338.
- [11] ASTM, 1995, Standard test method for semi-guided bend test for ductility of metallic materials, E270.
- [12] S. J. Yoon, D. Y. Yang, 2003, Development of a high flexible incremental roll forming process for the manufacture of a doubly curved sheet metal, Annals of the CIRP, Vol. 52, pp. 991~1004.