

< 논문 >

## 딴플형 내부구조 금속 샌드위치 판재의 제작 및 정적 굽힘 실험

성대용\* · 정창균\* · 윤석준\* · 양동열† · 이상훈\*\* · 안동규\*\*

(2005 년 10 월 20 일 접수, 2006 년 4 월 12 일 심사완료)

### Fabrication of Metallic Sandwich Plates with Inner Dimpled Shell Structure and Static Bending Test

Dae-Yong Seong, Chang Gyun Jung, Seok-Joon Yoon, Dong-Yol Yang, Sang-Hoon Lee and Dong-Gyu Ahn

**Key Words :** Metallic Sandwich Plate(금속 샌드위치 판재), Inner Dimpled Shell Structure(딴플형 내부구조), Fabrication Process(제작 공정), Static Bending Test(정적 굽힘 실험)

#### Abstract

Metallic sandwich plates with various inner cores have important new features with not only ultra-light material characteristics and load bearing function but also multifunctional characteristics. Because of production possibility on the large scale and a good geometric precision, sandwich plates with inner dimpled shell structure from a single material have advantages as compared with other solid sandwich plates. Inner dimpled shell structures can be fabricated with press or roll forming process, and then bonded with two face sheets by multi-point resistance welding or adhesive bonding. Elasto-plastic bending behavior of sandwich plates have been predicted analytically and measured. The measurements have shown that elastic perfectly plastic approximation can be conveniently employed with less than 10% error in elastic stiffness, collapse load, and energy absorption. The dominant collapse modes are face buckling and bonding failure after yielding. Sandwich plates with inner dimpled shell structure can absorb more energy than other types of sandwich plates during the bending behavior.

#### 기호설명

H : 샌드위치 판재의 두께  
 $h_c$  : 내부구조재의 두께  
L : 샌드위치 판재의 길이  
b : 샌드위치 판재의 폭  
 $t_f$  : 표면판재 두께  
 $t_i$  : 내부 딴플 재료판재 두께  
R : 반구형 딴플 반경

$2l$  : 양단 지지점간 거리  
EI : 굽힘 강성  
 $(EI)_{eq}$  : 등가 굽힘 강성  
 $(AG)_{eq}$  : 등가 전단 강성  
P, V, M : 단위 폭당 하중, 전단력, 모멘트  
 $P_c, M_c$  : 소성 붕괴 하중, 모멘트  
 $P_y$  : 임계항복하중  
e : 변형 에너지  
 $\phi$  : 내부구조의 패턴각도  
 $\delta_{max}$  : 붕괴까지의 최대변위  
k : 스프링 상수  
 $\sigma_y$  : 단축인장 항복응력  
W : 샌드위치 판재의 무게

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과  
E-mail : dyyang@kaist.ac.kr  
TEL : (042)869-3214 FAX : (042)869-5214

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 조선대학교 기계공학과

## 1. 서론

금속 샌드위치 판재는 메탈 폼(metal foam)구조, 트러스 구조, 벌집구조, 직조금속 망구조, 딴플 구조 등의 다양한 내부구조 상하 양면에 표면판재를 저항용접이나 접착제로 접합한 경량 고강도/고강성 판재이다.<sup>(1-3)</sup> 금속 샌드위치 판재는 다양한 하중조건에서의 이론적 최적화와 등가물성을 이용한 탄소성 구성방정식 확립을 위한 연구<sup>(4)</sup>가 진행 중이며 목적과 용도에 맞게 설계를 변경하여 제품화, 실용화, 대량생산 및 공정 안정화를 목적으로 하고 있다. 그런데 아직 최적의 내부구조가 확립되지 않은 기초연구단계이고 대량생산 공정개발을 위한 다각적인 노력이 진행 중인 현 시점에서 내부구조의 기계적 특성과 더불어 정밀도와 대량 생산성 또한 중요한 내부구조의 특성으로 부각되고 있다. Lim<sup>(5)</sup>과 Kang<sup>(6)</sup> 등은 옥테드 트러스와 카코메 트러스 코어를 꼭질된 와이어를 이용하여 만들고, 브레이징으로 접합하여 샌드위치 판재를 제작하는 공정을 제안하였으며 굽힘 거동을 이론과 실험적으로 비교 분석하였다. 그리고, 샌드위치 판재의 대량생산을 위한 내부구조 제조 공정은 Jung<sup>(7-9)</sup> 등이 사각 익스펜디드 메탈을 굽힘 성형하여 피라미드형 트러스 코어를 제작하는 공정과 직조금속 망을 내부구조로 하는 샌드위치 판재의 제작 공정을 소개하였는데 무게대비 강성은 좋으나 표면판재항복에 의하여 파손이 발생하고 파손직후 표면판재좌굴에 의해 붕괴하여 붕괴하중이 낮은 단점을 보였다. 일반적으로 굽힘 하중을 받는 샌드위치 판재는 표면판재가 굽힘 하중을 지탱하고, 내부구조는 전단력에 대한 저항을 가지며 표면판재가 항복된 후 소성거동을 좌우한다. 따라서 본 연구에서는 대량생산이 가능하고 정밀도 높은 딴플형 내부구조의 제작공정을 제안하고 표면판재항복 후 좌굴에 의한 붕괴를 억제하여 샌드위치 판재의 소성거동을 개선하고자 한다.

## 2. 샌드위치 판재 제작공정

### 2.1 딴플형 내부구조 제작공정

이론적 최적화 결과<sup>(10)</sup> 상하 동일 반경의 반구형 딴플이 굽힘 하중에 대한 최적형상이므로 반구형 딴플 내부구조를 제조하기 위하여 구분적 구획 성형기법(piecewise sectional forming)<sup>(11)</sup>의 개념을 일부

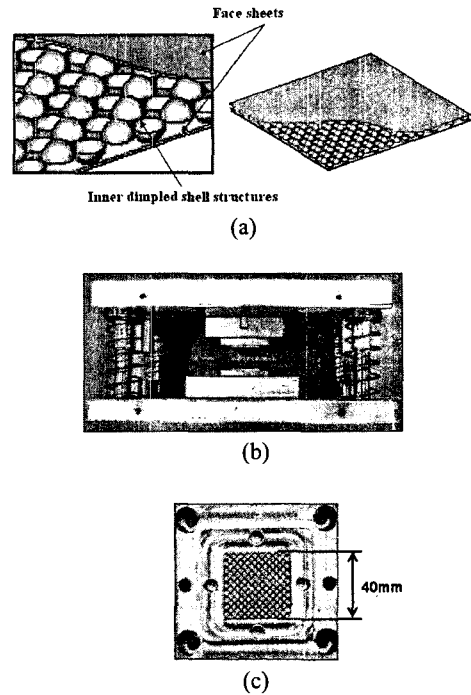


Fig. 1 Punch and die set to fabricate inner dimpled shell structure (a) Schematics of sandwich plates with inner dimpled shell structures (b) Punch and die set (c) Top view of punch

이용하여 Fig. 1 과 같은 금형을 제작하였다. 구분적 구획성형은 금형 보다 큰 박판재료를 성형하기 위해 성형위치를 단계별로 변경하면서 성형하는 공정으로 작은 크기의 펀치와 다이 금형으로 원하는 크기의 시편을 성형하는 방법이다.

따라서 가로 40mm, 세로 40mm 넓이에 미세패턴이 가공된 금형으로 시편의 위치를 변경하면서 Fig. 2 와 같이 여러 단계로 성형하여 3점 굽힘 시편 (20mm × 160mm) 또는 충격시편 (120mm × 120mm) 등의 원하는 넓이에 내부구조를 복제할 수 있다. 설계변경을 고려해 간의 펀치와 다이의 교체가 가능하도록 가이드 금형에서 펀치와 다이를 따로 설계하여 분리 및 장착이 용이하도록 하였다. 펀치보다 넓은 면적의 시편에 내부구조를 복제하기 위하여 성형된 시편의 끝 부분을 다이의 패턴과 일치시켜 다음 단계의 성형을 위한 위치를 제어하였으며 마찰을 최소화하기 위하여 WD-40 윤활제를 사용하였다. 제작된 내부구조는 프레스를 통해 성형되어 두께편차가 3% 이내의 정밀도

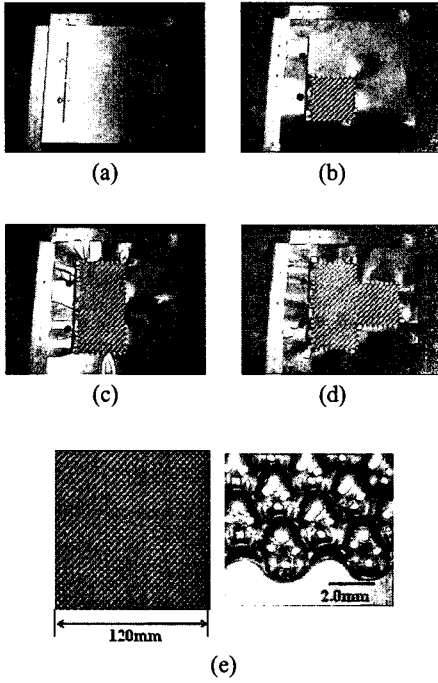


Fig. 2 Piecewise sectional forming process; (a) Initial specimen (b) 1<sup>st</sup> forming (c) 2<sup>nd</sup> forming (d) 3<sup>rd</sup> forming (e) Inner dimpled shell structure

를 가지며 롤 금형을 이용할 경우 대면적 내부구조를 대량생산 할 수 있다는 장점이 있다.

2.2 접합공정

박판을 성형하여 내부구조를 제작하고 내부구조 상하양면에 표면판재를 Fig. 3(a)와 같은 다점저항용접으로 접합하여 딴플형 내부구조 금속 샌드위치 판재를 제작할 수 있다. 다점 저항용접은 Fig. 3(b)와 같이 표면판재와 내부구조에 접점이 판재의 폭 방향으로 이루는 선을 기준으로 용접하고 다음 접촉 선까지 시편을 이동하여 순차적으로 접합하는 공정이다. 여기서 샌드위치 판재의 두께는 용접 스톱퍼(stopper)의 높이에 의하여 결정된다. 그런데 용접 공정에서 Fig. 4와 같이 전극의 압력에 의해 샌드위치 판재의 두께(H)가 얇아져서 굽힘 강성이 낮아지게 된다. 따라서 2.5mm 와 2.2mm 두께의 샌드위치 판재를 제작하기 위해 스톱퍼의 높이를 샌드위치 판재의 두께에 맞게 설정하였으며 전류 통전시간, 전류 밀도와 같은 샌드위치 판재의 형상에 영향을 미치지 않는 용접변수를 선정하여 최대 접합강도를 가지는 용접조건을

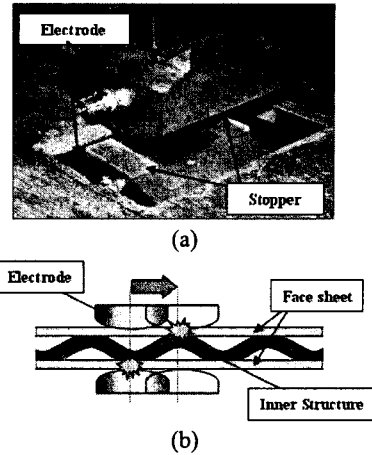


Fig. 3 Multipoint resistance welding process (a) equipment (b) Welding process

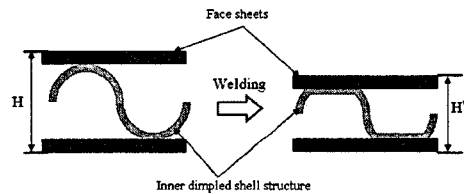


Fig. 4 Reduced thickness of inner structure during the welding process

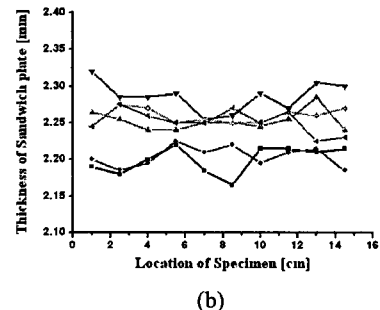
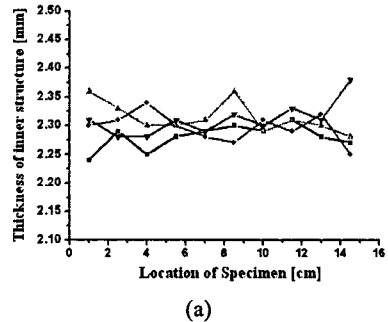


Fig. 5 Thickness deviation (a) inner structures (b) the sandwich plates

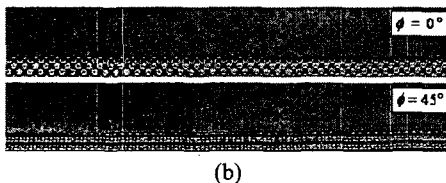
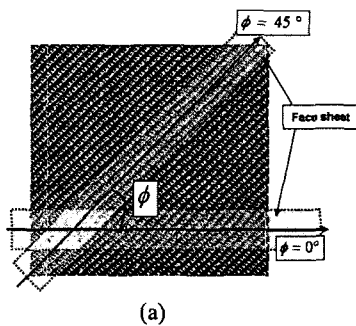
결정하였다. 여기서 구체적인 용접변수 선정과정은 생략한다. 그리고 Fig. 5 는 제작된 시편들의 두께편차를 측정하기 위해 시편길이방향으로 15mm 간격으로 측정할 결과이며 측정은 다이얼 게이지를 이용하였고 시편마다 10 개의 위치에서 측정하였다. 그 결과를 Table 1 과 Table 2 에 표기하였는데 내부구조와 샌드위치 판재의 두께편차는 모두 시편내 3%, 시편간 7% 이내로 측정되었다.

**Table 1** Thickness deviation of inner structures

Specimen Number	$t_{ave}$	$\frac{t_{max} - t_{ave}}{t_{ave}}$ (%)	$\frac{t_{min} - t_{ave}}{t_{ave}}$ (%)
1	2.28	1.32	1.75
2	2.297	1.87	2.05
3	2.314	1.99	1.47
4	2.311	2.99	1.34

**Table 2** Thickness deviation of sandwich plates

Specimen Number	$t_{ave}$	$\frac{t_{max} - t_{min}}{t_{ave}}$ (%)	$\frac{t_{min} - t_{ave}}{t_{ave}}$ (%)
1	2.165	0.93	1.57
2	2.185	0.95	0.86
3	2.240	1.44	0.55
4	2.255	1.49	1.36
5	2.250	0.62	0.49
6	2.225	1.02	1.20



**Fig. 6** Sandwich plates with inner dimpled shell structure (a) Definition of pattern angle ( $\phi$ ) (b) Specimens of 3-point bending test (20mm × 160mm)

내부구조에 표면판재를 접합할 때 표면판재와 접합되는 내부구조의 방향을 Fig. 6 과 같이 패턴 각도( $\phi$ )로 정의하였는데 상하 덩플이 연결되는 방향을  $0^\circ$ 로 정의하였다. 정적 굽힘 실험시편은 패턴각도  $0^\circ$  와  $45^\circ$ , 샌드위치 판재의 두께 2.5mm 와 2.2mm 총 4 가지 종류의 시편을 제작하였고 제작된 시편에 대한 세부적인 치수는 Table 3 에 표기하였다. 2.5mm 두께의 샌드위치 판재는 내부 덩플 판재( $t_f$ )의 재료로 0.3t 를 사용하였고 2.2mm 의 샌드위치 판재는 0.2t 의 내부 박판을 사용하였다. 이는 표면판재를 0.3t 로 고정하고 최적의 용접 변수를 찾기 위해 용접 스토퍼와의 관계에서 결정된 재료 두께이다. 재료는 표면판재와 내부판재 모두 스테인리스 스틸(sus 304)을 사용하였고 탄성 계수(E)는 180GPa 이고 단축인장 항복응력( $\sigma_y$ ) 283MPa 로 측정되었다.

2.3 이론적 굽힘 특성 예측

제작된 샌드위치 판재는 길이에 비해 폭이 짧아서 좁은 빔(narrow beam)이론을 적용 할 수 있고 굽힘 강성을 계산 할 때 포아송 비의 영향을 무시할 수 있다. 탄성 처짐( $\delta$ )은 굽힘과 전단에 의한 처짐을 합으로 식 (1) 과 같다.<sup>(13)</sup>

$$\delta = \frac{Pl^3}{6(EI)} + \frac{Pl}{2(AG)_{eq}} = \frac{Pl^3}{6(EI)_{eq}} \quad (1)$$

그런데 제작된 샌드위치 판재는 양단 지지점간 간격(2l)에 비해 내부구조의 두께( $h_c$ )가 작으므로 ( $h_c/2l = 0.016$ ) 고전 적층 이론(classical lamination theory)과 같이 전단 변형을 무시한다는 가정을 하였고 내부구조의 굽힘 강성을 무시하면 등가 굽힘 강성과 임계항복하중은 다음과 같이 단순화된다.

$$(EI)_{eq} \cong \frac{Et_f h_c^2}{2} \quad (2)$$

**Table 3** Dimension of specimens for 3-point bending test

size	B	L	R	$t_f$	$t_i$	$h_c$
H						
2.5	20	160	1.1	0.3	0.3	1.9
2.2	20	160	1.1	0.3	0.2	1.6

$$P_y = \frac{2\sigma_y t_f h_c}{l} \quad (3)$$

$$P_p = \frac{2M_p}{l} \quad (8)$$

샌드위치 판재의 파손모드는 표면판재항복, 표면판재좌굴, 내부딴플파손의 3 가지 모드에 의해 발생한다. 내부딴플의 파손은 좌굴과 붕괴가 있으나 파손모드변수는 고려하지 않고 임계하중만 고려하였다. 파손이 발생하지 않기 위해서는 다음 식 (4)-(6) 들을 만족해야 한다.<sup>(9)</sup>

표면판재항복 (face sheet yielding)

$$\left(\frac{V^2}{M}\right)\left(\frac{1}{2\sigma_y}\right)\left(\frac{l^2}{Rt_f}\right) \leq 1 \quad (4)$$

표면판재좌굴 (face sheet buckling)

$$\left(\frac{V^2}{EM}\right)\left(\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2}\right)\left(\frac{Rl^2}{t_f^3}\right) \leq 1 \quad (5)$$

내부딴플파손 (inner dimple failure)

$$\left(\frac{V^2}{EM}\right)\left(\frac{96}{1-\nu^2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(\frac{Rl}{t_i^2}\right) \leq 1 \quad (6)$$

계산결과 Table 3 에 표기된 치수로 제작된 샌드위치 판재는 모두 표면판재항복에 의해 파손이 발생할 것으로 예상된다. 3 점 굽힘 하중에서 표면판재가 항복되면 내부구조도 소성변형을 하게 되는데 하중점의 내부구조가 소성변형을 하게 되면 샌드위치 판재는 소성힌지에 의해 붕괴하게 된다. 이때 완전소성 붕괴하중은 다음과 같다.

$$M_p(\varphi = 0^\circ) = \sigma_y b t_f (H - t_f) + \left\{ \left( \frac{H - 2t_f}{2} \right)^2 - \left( \frac{H - 2t_f - 2t_i}{2} \right)^2 \right\} \times \left( \frac{H - 2t_f - t_i}{2} \right) \left( \frac{2b\sigma_y}{3R} \right) \quad (7a)$$

$$M_p(\varphi = 45^\circ) = \sigma_y b t_f (H - t_f) + \left\{ \left( \frac{H - 2t_f}{2} \right)^2 - \left( \frac{H - 2t_f - 2t_i}{2} \right)^2 \right\} \times \left( \frac{H - 2t_f - t_i}{2} \right) \left( \frac{\sqrt{2}b\sigma_y}{3R} \right) \quad (7b)$$

이론적 붕괴하중은 중립면의 위치가 샌드위치 판재의 중앙에 위치하고 접합공정에서 이상적으로 딴플 반경은 줄어드나 형상은 유지된다고 가정하에 계산하였다.

### 3. 정적 굽힘 실험

#### 3.1 굽힘 특성 분석

딴플형 금속 샌드위치 판재가 굽힘 하중을 받을 때 탄소성 굽힘 거동과 파손 및 붕괴 모드를 파악하고 이론적 해석과 비교하기 위하여 Fig. 7 과 같은 3 점 굽힘 실험을 수행하였다. 실험은 표준 실험장치인 INSTRON 5583 장치를 이용하였으며, ASTM E270 규격<sup>12</sup>에 따라 직경이 25.4mm 인 펀치와 다이를 이용하였으며 다이 간격(span length)은 120mm 의 조건으로 실험을 실시하였고 펀치의 압하량을 5mm/min 로 30mm 까지 설정하였다. 실험결과와 하중-처짐 선도와 완전 강소성 이론적 (elastic perfectly plastic) 해석을 Fig. 8 에서 비교하였고 정량적으로 분석한 데이터는 Table 4 에 표기하였다.

패턴각도 45° 의 2.5mm 샌드위치 판재의 경우만 붕괴 후 하중이 급격하게 감소하는 현상이 발생하였고 나머지의 경우 붕괴 후 내부구조가 하중을 어느 정도 지탱하는 현상을 보였다. 이는 패턴각도 45°의 경우, 딴플 간의 간격이 0°에 비해 커서 표면판재가 딴플 사이로 밀려들어가는 좌굴이 발생하기 때문이다.

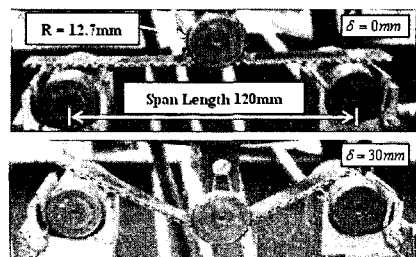


Fig. 7 Schematic of 3-point bending test

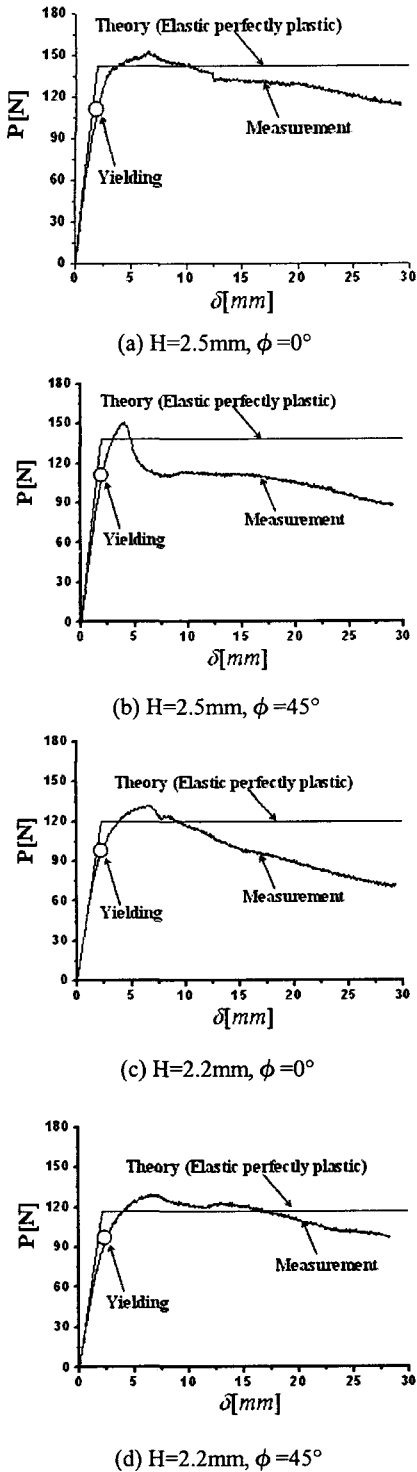


Fig. 8 Measured load versus deflection response of sandwich plates

Table 4 Comparison of measured results from 3-point bending test with analytically predictions

		H [mm]	$\phi$	Test	Theory	Error (%)
k	2.5	2.5	0°	65.9	73.3	10.0
			45°	63.4	73.3	13.5
	2.2	2.5	0°	52.6	54.8	4.01
			45°	48.4	54.8	11.7
$P_p$ [N]	2.5	2.5	0°	152.7	143	6.35
			45°	151.1	138	8.67
	2.2	2.5	0°	132.7	120	9.57
			45°	129.5	117	9.65
$\delta_{max}$ [mm]	2.5	2.5	0°	6.46	-	-
			45°	4.00	-	-
	2.2	2.5	0°	6.79	-	-
			45°	6.58	-	-
e [Nm]	2.5	2.5	0°	0.755	0.784	3.40
			45°	0.390	0.421	7.36
	2.2	2.5	0°	0.677	0.683	0.88
			45°	0.623	0.645	3.41

그러나 2.2mm 의 샌드위치 판재의 경우 용접시 전극의 압력에 의해 반구형 덩플이 썩 형태로 소성변형하여 덩플 간의 간격이 좁아져서 좌굴을 억제한 것으로 판단된다. 완전 탄소성 이론은 샌드위치 판재가 붕괴하기까지의 거동을 비교적 잘 묘사하고 있는데 특히 내부구조의 강성을 무시한 굽힘 강성과 가공경화현상을 고려하지 않은 붕괴하중이 약 10% 의 오차로 예측된 것을 확인 할 수 있었다. 그리고 패턴각도 0° 가 붕괴하중이 크고 붕괴까지의 최대 처짐량이 길어 많은 변형에너지를 흡수 할 수 있으므로 굽힘 하중에 대한 샌드위치 빔으로써 보다 안전한 구조로 판단된다.

내부구조의 강성은 패턴각도의 영향을 거의 받지 않았으나 패턴각도 0° 일 때가 다소 크게 측정되었고 내부구조의 강성을 무시한 이론적 강성보다 약 10% 정도 적은 경향을 보였다. 이는 샌드위치 판재와 재료판재의 두께편차에 의한 불안정성과 접점에서 발생하는 탄성 힌지에 의한 추가적인 전단변형이 오차요인<sup>(13)</sup>으로 분석된다. 그리고 붕괴하중은 측정치보다 10% 이내로 적게 계산되었으나 비교적 붕괴하중을 잘 예측한 것으로 판단되므로 전단력보다는 모멘트에 의한 소성힌지가

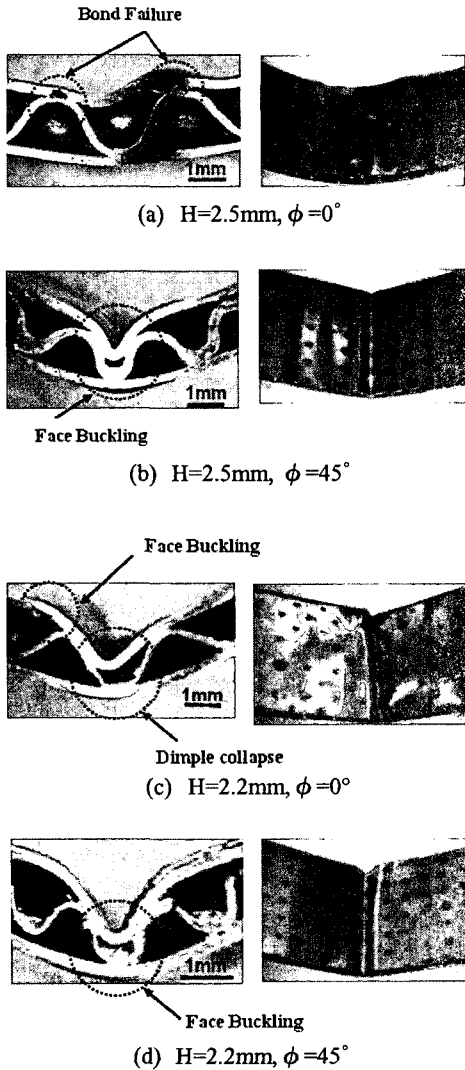


Fig. 9 Final collapse mode of sandwich plates

발생하여 붕괴한 것으로 분석하였다. 가공경화현상과 용접 및 내부구조 성형시 발생하는 잔류응력 등이 오차원인으로 판단된다.

소성구조해석 관점에서 샌드위치 판재의 내부구조가 표면판재항복 후 붕괴까지의 하중을 지탱한 것으로 판단되며 제작된 샌드위치 판재는 모두 표면판재항복에 의해 파손이 발생하였고 소성힌지의 발생 시점에서 붕괴되었다. 따라서 소성붕괴모드는 Fig. 9 와 같이 내부 판재의 두께와 패턴각도에 따라 다른 거동을 보였다.

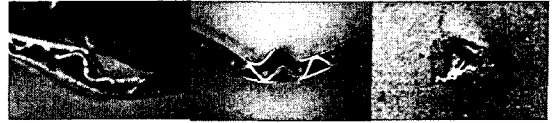


Fig. 10 Bond failure after yielding (  $H=2.5\text{mm}$ ,  $\phi=0^\circ$  )

내부판재를 0.3t 를 사용한 2.5mm 두께의 샌드위치 판재에서는 딴플의 붕괴는 발생하지 않았으며 패턴각도 0° 일 때는 Fig. 10 과 같은 용접결함에 의해 붕괴되었고 내부구조와 분리된 표면판재는 접점간의 간격이 길어져서 결국에는 표면판재 좌굴이 발생한 것으로 판단된다. 한편, 패턴각도 45° 의 경우는 바로 표면판재 좌굴모드로 붕괴하였는데 패턴각도 45° 일 때가 접점간의 간격이 길어 좌굴에 불리한 구조이기 때문이다. 그리고 내부판재를 0.2t 를 사용한 2.2mm 두께의 샌드위치 판재의 경우에 패턴각도 45° 일 때는 표면판재좌굴에 의해, 0° 일 때는 용접결함, 내부딴플붕괴와 표면판재좌굴이 동시에 발생하면서 붕괴하였다.

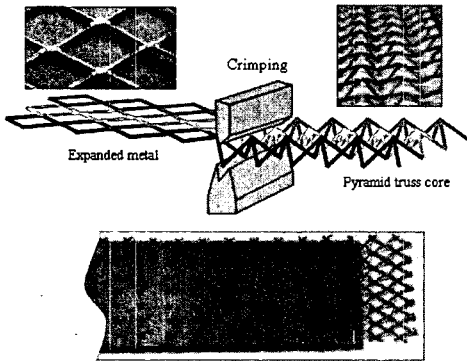
따라서 패턴각도 0° 의 내부구조가 표면판재의 좌굴을 억제하며 다른 붕괴모드로 전환될 때까지 하중을 더 지탱한다. 그리고 내부구조는 전단력에 의한 탄성파손이 발생하지 않는 범위에서 굽힘 강성을 무시할 수 있으나, 소성거동에서는 소성힌지의 발생을 억제하고 붕괴하중과 붕괴모드를 결정하므로 탄성항복에서 소성붕괴까지의 거동을 좌우한다.

### 3.2 유사모델 샌드위치 판재와 비교

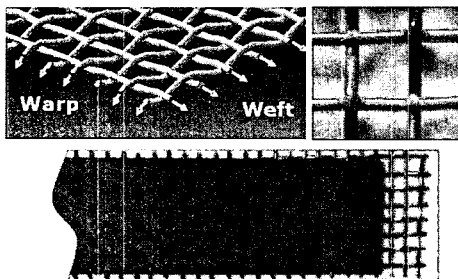
딴플형 샌드위치 판재를 다른 형태의 내부구조를 갖는 금속 샌드위치 판재와 굽힘 특성을 비교해 보았다. 비교 대상의 샌드위치 판재는 Fig. 11 과 같이 상용 익스펜디드 메탈을 절곡하여 만든 피라미드형 트러스 코어를 내부구조로 하는 샌드위치 판재<sup>(7)</sup>와 상용 직조금속 망을 내부구조로 하는 샌드위치 판재<sup>(9)</sup>이며 내부구조와 표면판재를 다점저항용접을 통해 접합한 판재이다. Fig. 12 는 각각의 샌드위치 판재들의 하중-변위 선도를 나타내는 그림이다. 모든 실험 시편은 폭 20mm, 길이 160mm, 표면판재의 두께 0.3t, 양단 지지점간 거리(span length) 120mm 의 동일 재료와 실험조건에서 실시하였다.  $\theta$  는 피라미드형 트러스 코어를 제작하기 위해 익스펜디드 메탈을 절곡한 각도이고

직조금속 망의 직조배열각도는 페턴각도( $\phi$ )와 동일 기호를 사용하였는데 weft 방향을  $0^\circ$ , warp 방향을  $90^\circ$  로 정의하였다.

딴플형 샌드위치 판재는 트리스나 직조금속 망내부구조 샌드위치 판재보다 붕괴하중이 크고 붕괴하기까지 많은 에너지를 흡수 할 수 있다. 구체적인 붕괴하중과 변형에너지는 Table 5 에서 정량적으로 비교하여 표기하였다. 굽힘 특성을 비교하기 위해 샌드위치 판재의 두께가 비슷한 트리스( $H=2.4\text{mm}$ ), 직조금속( $H=2.5\text{mm}$ ), 딴플( $H=2.5\text{mm}$ )형 샌드위치 판재의 굽힘 특성을 Table 5 의 결과로부터 비교 분석한 결과, 딴플형 금속 샌드위치 판재는 무게는 트리스보다 약 10% 무거우나 붕괴하중은 약 2 배 단위 질량당 변형에너지는 약 10 배 정도 개선되었다. 또한, 직조금속 내부구조 샌드위치 판재보다 무게는 약 6% 정도 가벼우나 붕괴하중은 7.5%, 단위 질량당 변형에너지는 약 80% 개선되었다. 이는 면재의 딴플 내부구조가 표면판재항복에 의한 초기 파손발생 후 붕괴까지의 하중을 지탱하는 반면에 선재의 트리스나 직조금속 망 내부구조는 표면판재의 항복 후 하중을 지탱하지 못하고 바로 붕괴하기 때문이다.



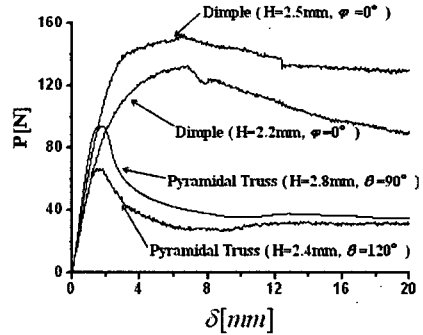
(a) Sandwich plates with pyramidal truss core



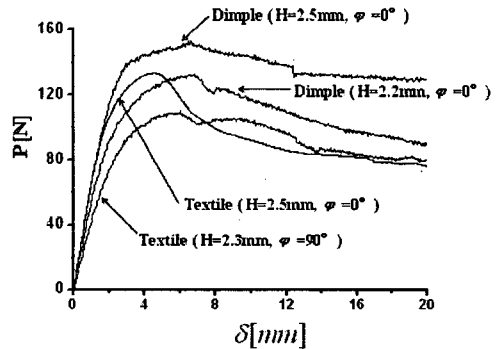
(b) Sandwich plates with textile core

Fig. 11 Sandwich plates with other types inner structures

그리고 딴플형 내부구조 금속 샌드위치 판재는 붕괴하기까지 처짐량이 다른 내부구조에 비해 크기 때문에 굽힘에 의한 저곡률 성형이 가능할 것으로 보이며 붕괴하중이 높고 많은 에너지를 흡수할 수 있어 보다 안전한 빔 구조로 활용 가능하다



(a) Comparison with pyramidal truss core



(b) Comparison with textile core

Fig. 12 Comparison of bending response of dimple type sandwich plates with other types

Table 5 Comparison of deformation energy of dimple type sandwich plates with other types

type			e	$P_p$	$e/W$
	H[mm]	W(g)	[Nm]	[N]	[Nm/kg]
Truss	2.8	19.8	0.210	94.1	10.6
	2.4	18.9	0.067	66.5	3.54
Textile	2.5	22.2	0.439	133	19.8
	2.3	22.5	0.478	110	21.2
Dimple	2.5	20.9	0.755	143	36.1
	2.2	21.0	0.677	120	32.2



4. 결 론

본 연구는 굽힘 하중에 대한 샌드위치 판재의 붕괴하중과 에너지 흡수량을 개선하기 위하여 딴플형 내부구조 금속 샌드위치 판재를 제작하였다. 그리고 정적 굽힘 실험을 통해 트러스와 직조금속 망 내부구조 샌드위치 판재와 굽힘 특성을 비교 분석하였다. 이상의 연구 결과를 다음과 같이 정리하였다.

(1) 구분적 구획성형기법을 원용하여 시편보다 작은 금형으로 원하는 사이즈의 딴플형 내부구조를 복제하였고 다점저항용접을 통해 시편내 두께 편차 3% 이내의 정밀도 높은 샌드위치 판재를 제작하였다.

(2) 제작된 샌드위치 판재의 정적 굽힘 실험결과 표면판재항복에 의해 파손이 발생하였으며 소성힌지에 의해 붕괴하였고 붕괴모드는 패턴각도 0° 일 때는 용접결합, 패턴각도 45° 일 때는 표면판재좌굴의 모드로 붕괴하였다.

(3) 내부구조의 강성을 무시한 굽힘 강성과 완전 강소성 붕괴하중의 측면에서 이론적 해석과 실험결과가 10% 정도의 오차로 비교적 일치하였다.

(4) 딴플형 금속 샌드위치 판재는 무게는 트러스보다 약 10% 무거우나 붕괴하중은 약 2 배, 단위 질량당 변형에너지는 10 배 정도 개선되었다. 또한, 직조금속 망 내부구조 샌드위치 판재보다 약 6% 가벼우나 붕괴하중은 7.5%, 단위 질량당 변형에너지는 약 80% 개선되어 샌드위치 범으로써 안전한 구조임을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

(1) Waldley, H. N. G., 2003, "Fabrication and Structural Performance of Periodic Cellular Metal Sandwich Structures," *Compos. Sci. Technol.*, Vol. 63, pp. 2331~2343.

(2) Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., Wadley, H. G. N., 2000, "Metal Foams: a Design Guide," Butterworth-Heinemann, Boston.

(3) Wicks, N., Hutchinson, J. W., 2001, "Optimal Truss Plates," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 5165~5183.

(4) Zok, F. W., Waltner, S. A., Wei, Z., Rathbun, H. J., McMeeking, R. M., Evans, A. G., 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.

(5) Lim, J. H., Nah, S. J., Koo, M. H., Kang, K. J., 2005, "Compressive and Bending Behavior of Sandwich Panels with Octet Truss Core Fabricated from Wires," *J. of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol.29, No.3, pp. 470~476.

(6) Kang, K. J., Jeon, G. P., Nah, S. J., Ju, B. S., 2004, "A New Way to Manufacture Ultra Light Metal Structures," *J. of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 28, No. 3, pp. 296~303.

(7) Jung, C. G., Yoon, S. J., Yang D. Y., Lee, S. M., Na, S. J., Lee, S. H., Ahn D. G., 2005, "Fabrication and Static Bending Test in Ultra Light Inner Structured and Bonded(ISB) Panel Containing Repeated Inner Pyramidal Structure," *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp.175~182.

(8) Jung, C. G., Yoon, S. J., Yang D. Y., Lee, S. M., Na, S. J., Lee, S. H., Ahn D. G., 2005, "Basic Study in Fabrication and Mechanical Characteristics of Ultra Light Inner Structured and Bonded(ISB) Panel Containing Perpendicularly Woven Metal," *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp.152~158.

(9) Ahn, D. G., Lee, S. H., Kim, M. S., Hahn, G. Y., Jung, C. G., Yang, D. Y., 2004, "Investigation into Characteristics of Bending Stiffness and Failure for ISB Panel," *Conference of the Korea Society of Precision Engineering*, autumn, pp. 1274~1277.

(10) Seong, D. Y. Jung, C. G., Yoon, S. J., Yang, D. Y., 2005, "Optimal Design of Metallic Sandwich Plates with Inner Dimpled Shell Subjected to 3-Point Bending," *Conference of the Korea Society of Precision Engineering*, spring, pp. 702~705.

(11) Li, M. Z., Cai, Z. Y., Sui, Z., Yan, Q. G., 2002, "Multi-Point Forming Technology for Sheet Metal," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 129, pp. 333~338.

(12) ASTM, 1995, "Standard Test Method for Semi-Guided Bend Test for Ductility of Metallic Materials," E270.

(13) Deshpande, V. S., Fleck, N. A., 2001, "Collapse of Truss Core Sandwich Beams in 3-Point Bending," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, pp. 6275~6305.