

트러스형 금속 샌드위치 판재에서 심재의 전단탄성계수의 실험적 결정

정창균*, 성대용*, 양동열#, 문경제**, 안동규***

Experimental Investigation of Shear Modulus of a Core in a Metallic Sandwich Plate with a Truss Core

Chang Gyun Jung*, Dae-Young Seong*, Dong-Yol Yang#, Kyung-Je Moon** and Dong-Gyu Ahn***

ABSTRACT

A sandwich plate with a truss core is composed of two face sheets and a pyramidal truss core between face sheets. This paper shows how to estimate the shear modulus of a truss core, experimentally. To determine the shear modulus of truss cores, 3-point bending tests are performed. For tests, metallic sandwich beams with truss cores are fabricated. Two kinds of truss cores are tested to investigate the shear modulus. Each test is repeated under different widths in order to increase accuracy. As a result, the shear modulus of sandwich beam is properly calculated. The deflection of a sandwich beam with a truss core by shear deformation takes the major contribution of the total deflection and the shear modulus of sandwich beam should be considered whenever it is designed.

Key Words : Sandwich beam (샌드위치 빔), Truss core (트러스 심재), Shear modulus (전단탄성계수), 3-point bending test (3 점굽힘실험)

기호설명

D = equivalent flexural rigidity
 D_f = local flexural rigidity of a face sheet
 D_s = global flexural rigidity of a sandwich beam
 D_c = flexural rigidity of a core
 E_f = Young's modulus of a face sheet
 E_c = Young's modulus of a core
 G_c = shear modulus of a core

t_f = thickness of a face sheet
 c = thickness of a truss core
 b = width of a beam
 d = thickness between mid-plane of face sheets
 H = thickness of a beam
 P = load
 P_{max} = maximum Load
 δ = total central deflection of a sandwich beam
 δ_{normal} = deflection associated with sheet bending

접수일: 2007 년 3 월 29 일; 게재승인일: 2007 년 5 월 31 일

* KAIST 기계항공시스템학부 대학원

KAIST 기계항공시스템학부

E-mail: dyyang@kaist.ac.kr Tel. (042) 869-3214

** 조선대학교 기계공학과 대학원

*** 조선대학교 기계공학과

δ_{shear} = deflection associated with shear deformation of a core

L = length of a beam

L_s = length of a strut in a truss

L_{span} = span length

α_f = half angle between struts of a truss

$2\alpha_f$ = crimping angle

R_s = diameter of a support

R_p = diameter of a punch

1. 서론

샌드위치 판재는 현재의 경량화 추세에 맞추어 여러 재료를 접목함으로써 다양하게 연구 개발되고 있다. 이중 최근 연구되고 있는 트러스 심재(core)를 이용한 샌드위치 판재는 면재(face sheet) 사이에 형상이 트러스 형인 심재를 넣어 만든 것으로 그 특성이 허니컴(honeycomb) 과 유사한 특성을 가진다고 보고 되었다.¹ 더욱이 트러스형 심재는 개방형 구조를 가지고 있기 때문에 내부공간에 기능성 물질을 유동시킬 수도 있어 다기능성 재료로서의 가능성도 크다. 또한 면재와 심재의 재료를 금속으로 하여, 소성변형에 의한 에너지 흡수를 높이고 다양한 온도에서도 사용이 가능하도록 하려는 금속샌드위치 판재에 대한 연구도 활발하다. Jung² 등은 금속 트러스형 심재 및 이를 가지는 금속 샌드위치 판재를 연속적으로 제작하기 위한 생산방식을 제안하였다. 그러나 이러한 샌드위치 판재는 우수한 기계적 특성에도 불구하고 심재 제작의 어려움, 면재와 심재의 접합공정등으로 인해 단가가 비싸다는 단점이 있다. Kim³ 등은 롤형 전극을 가진 저항점용접을 이용하여 심재와 면재를 연속적으로 제조하는 다점전기저항용접(multi-point resistance welding)을 제안하여 이를 극복하고자 하였다.

한편 굽힘하중을 받는 트러스형 샌드위치 판재의 변형량을 면재의 수직변형량과 심재의 전단변형량의 합으로 계산할 수 있다.⁴ 굽힘변형량은 샌드위치 판재의 기하학적 치수를 이용하여 구할 수 있으나 전단변형량은 심재의 전단탄성계수가 필요하여 기하학적으로 계산하기가 어렵다. 일반적으로 심재의 전단탄성계수는 일부 재료에 대하여 실험적으로 직접 구하거나 상용재료의 경우 제조사에서 엄밀한 실험을 거쳐 물성을 제공하고 있다. 반

면 트러스형 심재의 경우 명확한 실험적 규정이나 결과가 없는 실정이다. 그러나 전단탄성계수는 굽힘현상에서 면재와 심재의 역할을 관찰하고 흡수 에너지를 계산하기 위해 반드시 필요한 물성이다. 따라서 이론적으로 구하거나⁵, 형상에 따라 전단 변형이 매우 적다고 판단하여 무시하고 계산하는 경우도 있다.⁵ 반면 Hazizan⁶ 등은 알루미늄 허니컴 재료의 전단탄성계수를 3 점 굽힘시험을 통하여 간접적 결정된 바가 있다.

이 논문에서는 피라미드 형상의 트러스 심재를 가지는 샌드위치 빔에서 트러스형 심재의 전단탄성계수를 Hazizan의 방법과 유사하게 3 점 굽힘 시험을 통하여 간접적으로 구하고, 이를 통해 굽힘현상을 보다 정확도 있게 예측하고자 한다. 이를 위해 시편의 폭과 길이가 다른 4 가지 종류의 샌드위치 빔을 제작하여 2 가지 경우에 대한 트러스 심재의 전단탄성계수를 구하고자 한다.

트러스 심재는 상용재료를 가공하여 피라미드 형태로 제작하였으며 다점전기저항용접을 이용하여 제작되었다. 제작된 시편은 3 점 굽힘시험을 수행하여 전단탄성계수를 추정하고 이를 이용하여 굽힘현상에 대한 관찰을 수행하였다

2. 이론적 배경

샌드위치 빔의 굽힘강성은 면재 자체의 국부 굽힘강성(D_1), 샌드위치 판재 전체의 굽힘강성(D_2), 심재의 국부 굽힘강성(D_3)으로 나누어 지며 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.⁷

$$D = D_1 + D_2 + D_3 = E_f \frac{bt_f^3}{6} + E_f \frac{bt_f d^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} \quad (1)$$

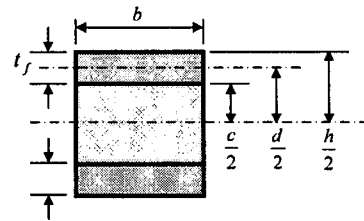


Fig. 1 Sectional dimension of sandwich beam

얇은 샌드위치 판재의 경우 D_1 및 D_3 의 기여도는 무시할 만하며, 굽힘강성은 D_2 로 단순화할

수 있다. 본 연구에서도 식 (2)와 같이 D_2 를 D 의 값으로 사용하였다.

$$D \approx D_2 \approx E_f \frac{bt_r d^2}{2} \quad (2)$$

굽힘하중을 받는 샌드위치 빔에서 처짐량은 굽힘하중에 의한 처짐, 전단하중에 의한 처짐을 중첩함으로써 구할 수 있다. 이중 굽힘하중에 의한 처짐과 전단하중에 의한 처짐은 식 (3) 과 같다.⁷

$$\delta = \delta_{normal} + \delta_{shear} + \frac{PL_{span}^3}{48D} + \frac{PL_{span}}{4AG_c} \quad (3)$$

$$A = \frac{bd^2}{c} \quad (4)$$

여기서 D 는 식 (2)의 굽힘강성을 의미하며, b , c 와 d 는 각각 빔의 폭, 트러스 심재의 두께, d 는 면재의 중간면 사이의 거리를 의미한다. 또한 L_{span} 은 3 점 굽힘시험시 스펠간의 거리이다. 그리고 G_c 는 트러스 심재의 두께방향으로의 전단탄성계수이다. 통상 D 와 마찬가지로 AG 를 전단굽힘강성 (shear stiffness, S)라고 칭한다. 전단탄성계수를 실험적으로 추정하기 위해 식 (3)을 아래와 같이 바꾸어 나타낼 수 있다.

$$\frac{\delta}{PL_{span}} = \frac{1}{48D} L_{span}^2 + \frac{1}{4AG_c} \quad (5)$$

3 점 굽힘시험에서 얻어진 결과를, 식(5)에 따라 y 축에 δ/PL_{span} 를, x 축에 L_{span}^2 으로 나타내면 L_{span}^2 값에 따른 결과를 도시할 수 있다. 도시된 결과를 직선으로 보간하면 직선의 기울기는 $1/48D$ 가 되고 직선의 연장선이 y 축과 만나는 점, 즉 y 절편은 $1/4AG$ 값을 가진다고 볼 수 있다. 이를 통해 실험적으로 트러스 심재의 G_c 값을 추정할 수 있다.

3. 시편제작 및 실험방법

3.1 샌드위치 빔 제작과정

본 연구가 대상으로 하는 트러스형 내부구조를 가지는 샌드위치 빔은 금속박판을 면재로 하고 금속 피라미드 모양의 3 차원 트러스 구조를 심재로 한다. 시편의 제작 절차를 Fig. 2에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 트러스형 내부구조를 가지

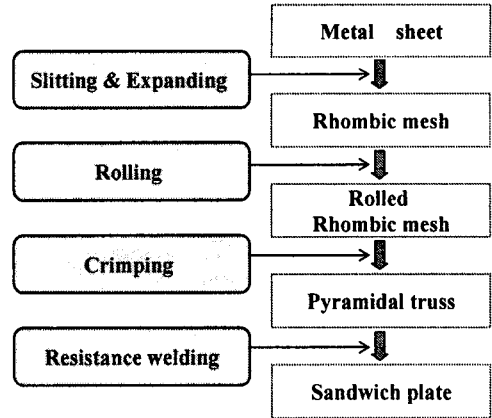


Fig. 2 Fabrication of sandwich plate with a truss core

는 샌드위치 판재를 제작하기 위해 익스팬디드 메탈(expanded metal)을 절곡(crimping)하여 사용하였다. Fig. 3(a)에 보인 것과 같이, 익스팬디드 메탈은 금속박판을 전단한 후 전단방향으로 확장하여 만들어지는 사각 금속망으로 추가공정 및 재료의 손실 없이 연속적으로 사각형상을 제작할 수 있다. 이러한 익스팬디드 메탈은 상용화된 공정으로 매우 저렴한 가격으로 다양한 재료를 이용하여 제작, 판매되고 있다.⁸

익스팬디드 메탈과 같은 사각금속망은 대각선 방향으로 절곡(crimping)하면 피라미드 형상을 가지는 트러스 구조를 만들 수 있다. 절곡공정은 Wadley⁹에 의해 제안되었으며 가장 간편하게 트러스 구조를 성형할 수 있다. 절곡공정의 개요를 Fig. 3(b)에 나타내었는데 절곡각 ($2\alpha_2$)에 따라 트러스 심재의 높이와 밀도가 결정됨을 알 수 있다. 제작된 트러스 구조는 접착, 브레이징, 다점 전기저항 용접을 이용하여 금속 면재와 접합할 수 있으며 본 연구에서는 다점전기저항용접을 이용하여 시편을 제작하였다. 원형 전극을 이용할 경우 연속적인 접합이 가능하다. 본 실험에서는 실험의 경제성을 고려하여 이와 유사하도록 곡률을 가진 전극을 이용하였다. 연속 다점전기저항용접의 개념과 제작에 사용된 실제 장치들을 Fig. 3(c)에 나타내었다.

제작된 샌드위치 판재의 예를 Fig. 4에 나타내었다. 면재는 두께가 0.3 mm인 SUS304 스테인레스 강을 사용하였는데, 인장실험을 통해 얻어진 재료의 평균탄성계수 및 항복하중은 각각 179.6

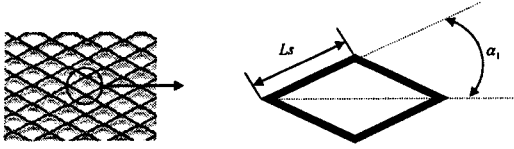


Fig. 3(a) Example of expanded metal and its dimension

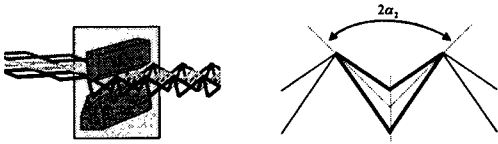


Fig. 3(b) Concept of crimping process and crimping angle

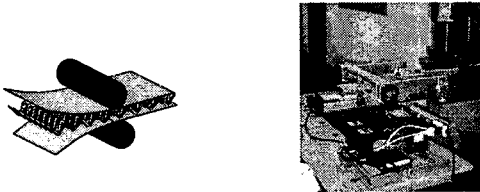


Fig. 3(c) Concept of multipoint resistance welding and its apparatus

GPa 과 282.1 MPa 이다.

한편 상용재료인 익스팬디드 금속망은 CQ 급 일반강판으로 제작되었다. 인장시험을 통해 얻어진 탄성계수는 180 GPa, 항복강도는 142.9 MPa 이며 사각망의 한변의 길이(L_{s1})는 4.5 mm, 사잇각(α_1)은 약 27.2° 이다.

표면의 점들은 각 트러스 구조의 꼭지점이 면재와 닿는 부분에서 다점전기저항점 용접에 의해 접합되었기 때문에 발생한 것이다. 이렇게 제작된 샌드위치 판재는 와이어 커팅을 이용하여 Table 1 에 나타낸 크기에 맞게 재단되어 실험에 사용되었다.

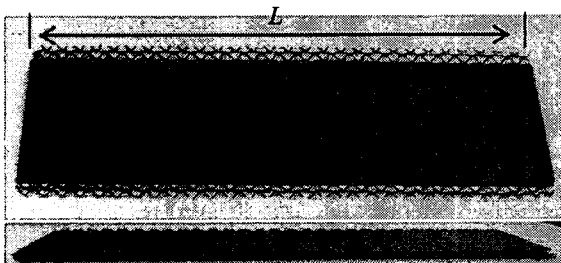


Fig. 4 Example of fabrication ($L = 200$ mm)

3.2 실험방법

3 점 굽힘실험을 위해 시편의 폭이 30 mm, 20 mm 이고 시편의 길이가 200 mm 와 160 mm 인 2 가지 길이의 샌드위치 빔을 제작하였다. 절곡각은 90° 와 120° 로 하였다. 제작된 시편의 조건을 Table 1 에 나타내었다. Group 1 은 절곡 각이 90° 인 피라미드 트러스 구조의 전단탄성계수를 측정하기 위한 실험이다. 여기서 Exp. 1 과 Exp. 2 의 시편 폭은 각각 20 mm 와 30 mm 이며 실험의 정확성을 판단하기 위함이다. 마찬가지로 Group 2 는 절곡각이 120° 인 경우의 전단탄성계수를 구하기 위한 실험이다. 이 역시 시편 폭을 20 mm 와 30 mm 두 가지로 하여 실험의 정확도를 높이고자 하였다.

Table 1 Details of test conditions

Group	case	L [mm]	b [mm]	H [mm]	L_{span} [mm]	
1	Exp 1	1	200	20	2.8	160
		2	160	20	2.8	120
	Exp 2	3	200	30	2.8	160
		4	160	30	2.8	120
2	Exp 3	5	200	20	2.0	160
		6	160	20	2.0	120
	Exp 4	7	200	30	2.0	160
		8	160	30	2.0	120

3 점 굽힘시험은 ASTM 규격을 따라 INSTRON 사의 표준장치를 이용하여 수행되었다.¹⁰ Fig. 5 에 수행된 3 점 굽힘시험의 규격 및 실제 수행 예를 나타내었다. 길이가 200 mm 인 시편의 스패 길이는 160 mm, 그리고 160 mm 인 시편의 스패 길이는 120 mm 이며 펀치 및 다이의 지름이 25.4 mm 인 원통형 형상을 가진다.

4. 결과

이론적으로 계산된 트러스 심재의 높이는 2.8 mm 이나 실제 시편의 트러스 심재의 높이는 2.2 mm 로 20 % 정도 낮아졌다. 이는 용접공정에서 심재와 면재의 접촉저항을 유발하기 위해 가해진 압력으로 인해 피라미드 구조가 일부분 압하되고 또한 용접과정 중 접합부가 서로 녹기 때문이다. 3 점 굽힘시험 수행 중 접합부로 인해 파단이 발생

하지 않아 정성적으로 볼 때 만족한 수준으로 판단하였다. 샌드위치의 시편제작 결과 판재의 정밀도는 두께편차가 2.1%로 매우 양호하였다.

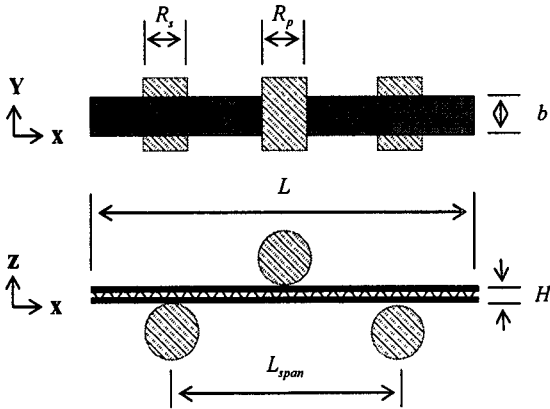


Fig. 5 (a) Experimental setup of 3-point bending test



Fig. 5 (b) Example of 3-point bending test

3 점 굽힘시험 수행 후 전단변형의 결과로 발생한 트러스 심재의 변형을 Fig. 6 에 나타내었다. 왼쪽그림은 실험전의 트러스 심재의 형상을 오른쪽은 실험 후 트러스 심재의 형상이다. 굽힘에 의한 전단변형으로 인해 심재의 각 부재가 실험전에 비하여 굽힘이 발생함을 확인할 수 있다.

2 가지의 스펠길이에 대하여 수행된 3 점 굽힘 시험의 결과를 이용하여 식(5)에 보인 바와 같이, x 축을 $(L_{span})^2$ 으로 y 축을 D/PL_{span} 로 나타내면 연장된 추세선으로부터 얻어진 y 절편을 통해 $1/AG$ 값을 얻는다. 얻어진 그래프를 Fig. 7 과 Table 2 에 나타내었다. 이때 계산된 값은 샌드위치 판재가 단위 폭을 가진다고 가정하였다.

Fig. 7(a) 는 Group 1 의 결과를 나타낸다. Fig. 7(a) 에서 Exp. 1 실험은 시편의 폭이 30 mm 일 때의 결과를 나타내고 Exp. 2 는 시편의 폭이 20 mm 일 때의 결과를 나타낸다. 실험이 정확하다면 시편의 폭에 관계없이 전단 탄성계수는 동일하여야 할 것이다. 그래프에서 각 점은 실험결과 값을, 검은

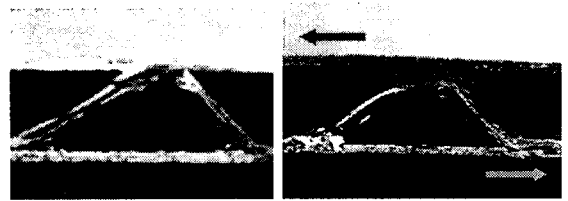


Fig. 6 Shear deformation of a truss core; the left image presents original core shape and the right image presents the result shape of shear deformation

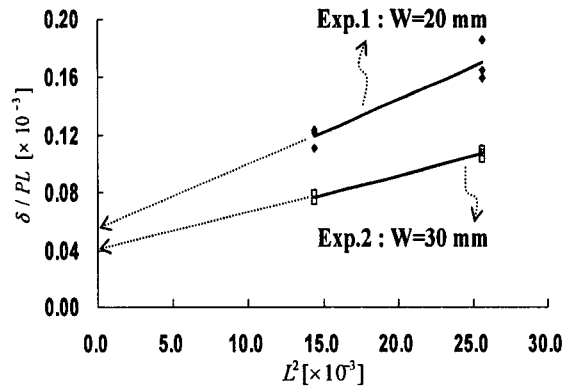


Fig. 7(a) Result curves of Group 1

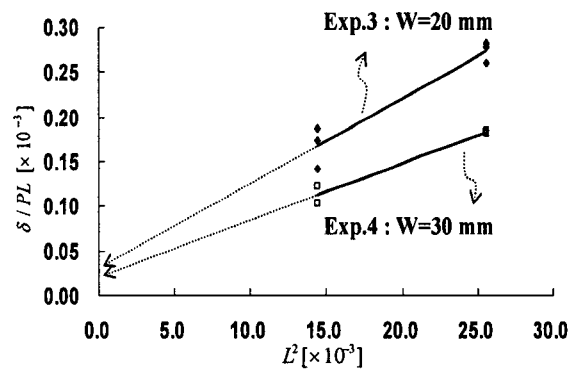


Fig. 7(b) Result curves of Group 2

실선은 결과로부터 얻어진 추세선을 나타낸다. 추세선으로부터 세로축인 y 축의 절편값을 추정하면 Exp. 1 과 Exp. 2 는 각각 0.05×10^{-3} 와 0.04×10^{-3} 를 얻는다. 이 값으로부터 추정된 전단탄성계수는 각각 73 MPa 과 80 MPa 로 약간의 오차를 가진다.

한편 Group 2 에 대하여 동일한 방법으로 구해진 추세선 그래프를 Fig. 7(b) 에 나타내었다. Fig. 7(b) 에서 Exp. 3 Exp. 4 는 Fig. 7(a)의 Exp. 1 및 2 와 같은 역할을 한다. 실험결과 결과 Exp. 3 과 Exp. 4 는 170 MPa 로 매우 유사함을 알 수 있다. Group 1 의 오차는 트러스 코어의 두께가 Group 2 에 비해 상대적으로 크기 때문에 3 점 굽힘시험 시 상부 면재의 국부합몰이 상대적으로 크기 때문으로 판단된다.

Fig. 7 으로부터 절곡각이 증가하면(즉 두께가 감소하면) 추정된 G_c 값은 증가하였다. 샌드위치 판재에서 두께가 얇아질수록 전단변형에 의한 처짐이 적게 발생한다는 일반적인 역학적 원리와 일치하는 결과이다. 보다 구체적으로 살펴보면, 트러스의 전단변형을 유발하는 전단력은 트러스의 각 부재의 압축력으로 전달되는데, 이때 전달되는 압축력은 부재의 변형을 유발한다. 절곡각이 작을 때보다 클 때 부재내에 전달되는 압축력이 보다 작아지게 되어 변형이 적게 발생하게 된다. 따라서 절

곡각이 큰 Group 2 에서 전단탄성계수가 증가하게 된 것으로 추정할 수 있다. 실험적으로 측정된 굽힘강성 및 전단탄성계수를 시편 폭(b) 30 mm 인 경우에 대하여 Table 2 에 정리하였다.

추정된 G_c 값을 이용하여 굽힘변형 시 면재와 심재의 변형량에 대한 기여도를 Fig. 8 에 나타내었다. 그래프는 전체 변형량을 100 로 하였을 때 굽힘변형과 전단변형의 비율을 나타낸 것이다. Group 1 의 경우 전단변형에 의한 심재의 변형은 약 25 %인 반면 Group 2 의 경우 14 %이다. 이는 전단탄성계수를 고려하지 않을 경우 Group 1 과 같은 조건을 가지는 샌드위치 빔의 경우 그 오차가 최대 25 % 이상 발생함을 의미 한다. 이러한 결과로부터 트러스 구조를 가지는 샌드위치 판재는 전단변형이 전체 변형에 기여하는 바가 비교적 크며 이를 고려하여 설계하여야 함을 확인 할 수 있다.

5. 결론

트러스형 심재를 가지는 샌드위치 판재의 굽힘강성과 전단탄성계수를 실험적으로 구하기 위해 실제 시편을 제작하여 3 점 굽힘시험을 수행하였다. 실험결과로 부터 실험에 사용된 트러스 구조의 전단탄성계수를 추정할 수 있었으며 절곡각이 커질수록 전단탄성계수는 증가함을 확인하였다. 추정된 전단탄성계수로부터 변형의 기여도를 파악하였으며 트러스 구조를 가지는 샌드위치 판재는 심재의 전단변형이 상대적으로 많이 발생하며 이를 반드시 고려하여 설계하여야 함을 확인할 수 있었다. 이러한 전단계수 결정방식은 샌드위치 판재의 심재가 아무리 복잡한 형상을 가지더라도 간단한 3 점 굽힘시험을 통해 쉽게 얻어질 수 있음을 보였다.

후 기

본 논문은 산업자원부 산하 차세대 신기술 개발사업의 3 차원 형상의 금속구조체를 가진 초경량 금속 샌드위치 판재 개발의 연구결과 중 일부이며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Wicks, N. and Hutchinson, J. W., "Optimal truss

Table 2 Experimental results

Group	1		2	
$2\alpha_2$ [°]	90		120	
b [mm]	20	30	20	30
y-intercept [$\times 10^{-3}$]	0.05	0.04	0.03	0.02
G_c [$\times 10^6 \text{ N/m}^2$]	88	73	170	170
D/width [Nm]	231	257	112	131

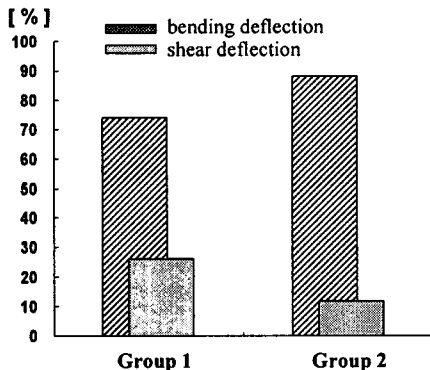


Fig. 8 Contribution of deflection in 3-point bending

- plates,” *International journal of solids and structures*, Vol. 38, Issues 30-31, pp. 5165 - 5183, 2001.
2. Jung, C. G., Yoon, S. J., Yang, D. Y., Lee, S. M., Na, S. J., Lee, S. H. and Ahn, D. G., “Fabrication and static bending Test on ultra light inner Structured and bonded (ISB) Panel containing repeated inner pyramidal structures,” *Korea Society for Precision Engineering*, Vol. 22, No. 6, pp. 175 - 182, 2005.
 3. Lee, S. M., Kim, J. B. and Na, S. J., “A study on the resistance welding of metallic sandwich panel : Part 1 - Determination of process parameters,” *The Korean welding and joining Society*, Vol. 23, No. 6, pp. 49 - 54, 2005.
 4. Zenkert, D., “The handbook of Sandwich Construction,” EMAS publishing, 1997.
 5. Kang, K. J., Jeon, G. P., Nah, S. J., Ju, B. S. and Hong, N. H., “A new way to manufacture ultra light metal structures,” *Trans. KSME A*, Vol. 28, No. 3, pp. 296-303, 2004.
 6. Hazizan, Md. A. and Cantwell, W. J., “The low velocity impact response of an aluminum honeycomb sandwich structure,” *Composites: part B Engineering*, Vol. 34, Issue 8, pp. 679-687, 2003.
 7. Allen, H. G., “Analysis and design of structural sandwich panels,” Pergamon Press, pp. 8-46, 1969.
 8. KS D361, “Expanded metal,” *Korean industrial standards*, 1993.
 9. Wadley, H. N. G., Fleck, N. A. and Evans, A. G., “Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structure,” *Composites science and technology*, Vol. 63, Issue 16, pp. 2331-2343, 2003.
 10. ASTM E270, “Standard test method for semi-guided bend test for ductility of metallic materials,” *American society for testing and materials*, 1995.