한국정밀공학회지 제 26 권 11 호 pp. 116-123 November 2009 / 116
Journal of the Korean Society for Precision Engineering Vol. 26, No. 11, pp. 116-123

망형 직조 금속을 내부구조체로 가진 ISB 판재의 심재 종탄성 및 전단 계수 예측

Estimation of Young's and Shear Moduli of a Core in ISB Panel with Woven Metal as Inner Structures

안동규 [1,✉], 남경흠 [2], 정창균 [3], 양동열 [4]
Dong-Gyu Ahn[1,✉], Gyung-Heum Nam[2], Chang-Gyun Jung[3] and Dong-Yol Yang[4]

1 조선대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chosun Univ.)
2 조선대학교 일반대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Chosun Univ.)
3 포스코 기술연구원 자동차가공연구그룹 (Automotive Steel Applications Research Group, Technical Research Lab. POSCO.)
4 KAIST 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, KAIST.)
✉ Corresponding author: smart@mail.chosun.ac.kr, Tel: 062-230-7043

Manuscript received: 2009.6.2 / Accepted: 2009.8.17

The elastic properties of core affect mechanical properties and deformation behaviours of the lightweight sandwich panel. The objective of the present paper is to estimate experimentally Young's and shear moduli of a core in internally structured boned (ISB) panel with woven metal as inner structures using the deflection theory of sandwich beam considered core stiffness. Three points bending experiments were performed to obtain force-deflection curves of the designed ISB panel in each material direction. The elastic and shear moduli of the core in each material direction were estimated from slopes and intercepts of relationships between compliance per the span length and square of the span length, respectively. The results of the estimation showed that the fabric technology of the woven metal affects the variation of the elastic properties in the core. Through the comparison of shear moduli and force-deflection curves of the proposed method and those without considering the core stiffness, it was shown that the core stiffness should be considered to estimate properly the Young's and shear moduli of ISB panels. Finally, the contribution ratio of bending and shear deflections of ISB panels to the total deflection was quantitatively examined.

Key Words: ISB Panel (ISB 판재), Woven Metal (망형 직조 금속), Young's Modulus (탄성 계수), Shear Modulus (전단계수), Three-points Bending Test (3 점 굽힘 시험), Core Stiffness (심재 강성), Material Direction (재료 방향)

기호설명

Ψ = flexural rigidity
E_f = Young's modulus of a face sheet
W = width of specimen
t = thickness of face sheet
d = distance between neutral axes of face sheets
E_c = Young's modulus of a core
c = thickness of a core
Ψ_b = flexural rigidity per unit width
P = the measured force in three-points bending test
δ_b = deflection of specimen induced by bending
L_s = length of span
L = length of specimen

γ_{max} = shear strain
G_c = shear modulus of a core
δ_s = deflection of specimen induced by shear
δ = total deflection of specimen
D_p = diameter of punch for three-points bending test
Ds = diameters of supporters for three-points bending test
λ_1 = slope of linear regression equation
λ_2 = intercept of linear regression equation
R^2 = correlation coefficient
P_{es} = estimated force

1. 서론

최근 화석 연료의 고갈과 지구 환경 변화에 대응하기 위하여 수송기계 관련 산업계에서는 고연비 및 저 환경 영향성 부품/재료 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1] 이러한 연구의 한가지 방향으로 자동차/항공기/선박의 무게를 현저히 감소 시키면서도, 강성과 내충격성을 향상시키는 초경량 샌드위치 판재 개발에 대한 연구가 전세계적으로 폭넓게 수행되고 있다.[2,3] 샌드위치 판재는 상하 외판과 심재 (core) 부의 내부구조체로 구성된다.[4] 샌드위치 판재의 기계적 특성은 내부구조체의 설계와 배치에 따라 조절이 가능하다.[5]

국내에서는 2003 년부터 내부에 3 차원 구조물을 가지며, 외판과 심재를 연속적으로 용접하여 두께를 3 mm 이하로 유지시키는 초경량 고강성/고강도/고내충격성 샌드위치 판재인 ISB(Internally structureed bonded) 판재 개발에 대한 연구가 수행되고 있다.[6,7]

초경량 샌드위치 판재의 변형특성은 심재의 기계적 물성에 매우 의존적이다. 알루미늄 폼(foam) 및 카고메(kagome) 같이 일체형 구조로 부가 하중에 의한 강체 변형이 거의 발생하지 않는 심재의 기계적 물성은 심재의 직접적인 인장 시험을 통하여 취득할 수 있다.[8] 그러나 트러스 구조 또는 망형 직조 금속과 같은 하중 부가시 대 변형 및 강체 변형이 발생하는 유연 심재(flexible core) 는 심재의 직접적인 인장시험으로 기계적 물성을 취득하기 어렵다. 특히 ISB 판재와 같이 외판과 유연 심재가 용접되어 있는 경우에는 심재의 변형이 용접에 의하여 구속을 받기 때문에 용접된 샌드위치 판재의 심재에 대한 기계적 물성은 심재의 직접적인 인장시험으로 취득된 기계적 물성과 상당히 다를 수 있다. Hazizan 등은 심재인 알루미늄 허니컴 재료의 전단 계수(shear modulus)를 3 점 굽힘 시험과 심재의 강성 영향을 무시한 샌드위치 판재 이론을 통하여 간접적으로 산출한 바 있다.[9] Jung 등은 트러스형 금속 샌드위치 판재에서 심재의 전단계수를 3 점 굽힘 시험과 심재의 강성 영향을 무시한 샌드위치 판재 이론을 이용하여 계산하였다.[10] 또한 이 연구에서는 3 점 굽힘 시험에 의한 시편 처짐시 굽힘 성분과 전단 성분의 처짐 기여도에 대한 고찰도 수행하였다.

심재의 강성 영향이 무시된 샌드위치 판재 이론을 적용하기 위해서는 심재 두께 대비 외판 두께비 범위 0.02 - 0.1 을 만족시켜야 한다.[11] 그러나 ISB 판재의 경우 심재의 두께가 외판의 두께에 비하여 두껍지 못하여 심재의 강성 영향을 무시한 샌드위치 판재 이론을 적용하기 어렵다. 망형 직조 금속의 경우 주 직조 방향(weft direction) 과 부 직조 방향(wrap direction)의 와이어들이 단순 직조되어 있어 전단 변형에 대하여 거의 저항할 수 없다.[12] 그러므로 망형 직조 금속의 인장 시험을 통한 기계적 물성 취득이 매우 어렵다. 또한 ISB 판재와 같이 용접이 된 경우는 전단 변형이 용접에 의하여 구속 받게 되므로 망형 직조 금속의 인장 시험으로 취득된 물성과 용접된 판재 상태에서의 내부구조체의 기계적 물성이 상당히 다르게 된다.

본 연구에서는 망형 직조 금속을 내부구조체로 가진 ISB 판재의 심재 종탄성 계수(elastic modulus)와 전단 계수(shear modulus)를 3 점 굽힘 시험과 두꺼운 심재를 가진 샌드위치 판재 이론을 이용하여 산출하였다. 이 결과를 이용하여 심재의 강성 영향이 무시된 샌드위치 판재 이론으로 계산된 결과와 심재의 전단계수 및 ISB 판재의 하중-처짐 특성 측면에서 비교/분석 하였다. 또한 3 점 굽힘 시험시 처짐에 대한 굽힘 및 전단 성분의 기여도를 정량적으로 분석하였다.

2. 내부구조체의 종탄성 및 전단 계수 유도 관련 이론

Fig. 1 과 같이 외판과 심재로 구성된 샌드위치 판재의 유연 굽힘 강성(flexural rigidity)은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.[11] 식 (1)에서 1 과 2 항은 외판에 관계된 유연 굽힘 강성항들이고, 3 항은 심재와 관계된 유연 굽힘 강성이다. 심재의 강성 영향성이 무시된 샌드위치 판재 이론의 경우 식 (1)의 3 항을 무시하고 유연 강성을 계산한다.[12,13] 또한

일반적으로 식 (1)의 1 항의 경우 2 항에 비하여 현저히 작은 값을 나타냄으로 유연 강성 계산에서는 무시된다. 이러한 심재의 유연 굽힘 강성 영향이 무시된 샌드위치 판재 이론을 적용하기 위해서는 식 (2), (3) 및 (4)와 같은 조건을 만족하여야 한다.[11] 그러나 ISB 판재와 같이 전체 두께가 얇고, 심재 두께 대비 외판의 두께가 두꺼운 경우의 경우는 심재의 굽힘 강성 영향이 무시된 샌드위치 판재 이론을 판재 변형 예측에 적용하기 어렵다.

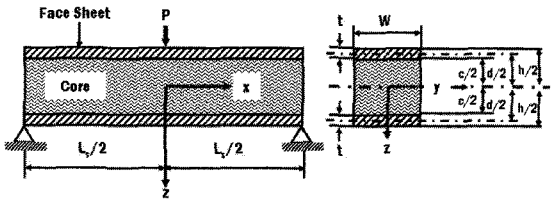

Fig. 1 Sectional dimension of sandwich beam[11]

$$\Psi = E_f \frac{Wt^3}{6} + E_f \frac{Wtd^2}{2} + E_c \frac{Wc^3}{12} \quad (1)$$

$$\frac{d}{t} > 5.77 \quad (2)$$

$$\frac{d}{c} \approx 1.0 \quad (3)$$

$$0.02 < \frac{t}{c} < 0.1 \quad (4)$$

시편의 폭 방향의 변형이 거의 없는 평면 변형에서 양단이 단순 지지되고 중앙에 집중하중이 부가된 경우 시편 중앙의 처짐은 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

$$\delta_b = \frac{PL_s^3}{48\Psi} \quad (5)$$

샌드위치 판재의 심재가 휘어지거나 중립축에서 초기 심재 위치가 시편 길이 방향으로 이동하지 않는다고 가정한 경우, 심재의 굽힘 강성이 고려된 샌드위치 판재의 최대 전단 변형은 식 (6) 과 같이 계산될 수 있다.[11] 식 (6) 으로부터 전단 변형율과 판재의 회전각도 관계를 이용하여 판재의 전단변형에 의하여 발생되는 시편의 최대 처짐량을 식 (7) 과 계산할 수 있다.

$$\gamma_{max} = \frac{P}{4G_c\Psi}\left\{E_f td + E_c \frac{c^2}{4}\right\} \quad (6)$$

$$\delta_s = \frac{PL_s}{8G_c\Psi}\left(\frac{c}{d}\right)\left\{E_f td + E_c \frac{c^2}{4}\right\} \quad (7)$$

식 (5)와 (7)으로부터 양단 단순지지와 중앙 집중하중 조건에서의 시편 중앙부 최대 처짐을 식 (8) 및 (9)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (9)의 경우 3 점 굽힘 시험시 지지점간의 거리(length of span)의 제곱에 대한 선형식이다.

$$\delta = \delta_b + \delta_s \quad (8)$$

$$\frac{\delta}{PL_s} = \frac{1}{48\Psi}L_s^2 + \frac{1}{8G_c\Psi}\left(\frac{c}{d}\right)\left\{E_f td + E_c \frac{c^2}{4}\right\} \quad (9)$$

3. 실험 방법

3.1 시편 제작

실험에 사용된 ISB 판재 시편은 Fig. 2 와 같이 상용 망형 직조 금속을 두장의 두께 0.3mm 인 SUS 304 스테인레스 박판 사이에 삽입한 후, 다점 전기 저항 용접(multi-points resistance welding)으로 결합시켜 제작하였다.

망형 직조 금속의 경우 Fig. 2 와 같이 주 직조 방향과 부 직조 방향을 가지며 와이어 지름은 약 0.86 mm 였다. 부 직조 방향과 주 직조 방향의 초기 와이어 굽힘 각도는 각각 219° - 222° 및 199° - 202° 범위였으며, 부 직조 방향의 경우 주 직조 방향에 비하여 와이어의 초기 굽힘 각도가 크게 나타났다. 망형 직조 금속의 와이어 재질은 KS D 3509 규격을 만족하는 피아노 강선이었다. 이로 인하여 부 직조 방향에 대한 시편의 경우 변형 하중이 높게 나타날 것으로 사료되었다. 시편의 길이는 160mm 와 200mm 이며, 시편의 폭은 20mm 이다. Table 1 은 제작된 시편의 주요 치수이다. 제작된 시편의 단위 길이 및 폭당 와이어 포함 개수는 각각 0.23-0.24 개 및 0.23-0.25 개이다.

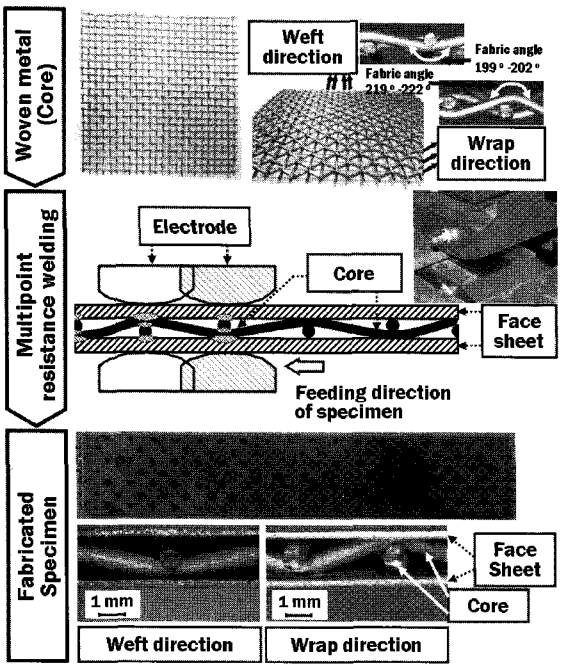

Fig. 2 Manufacturing procedure of specimen

Table 1 Dimensions of specimens

Material Direction	W (mm)	L (mm)	t (mm)	c (mm)	d (mm)
Weft	20	160	0.3	1.66	1.96
	20	200	0.3	1.65	1.95
Wrap	20	160	0.3	1.71	2.01
	20	200	0.3	1.68	1.98

3.2 실험 방법 및 데이터 분석

ISB 판재의 종탄성 계수와 전단 계수를 산출하기 위하여 Fig. 3 과 같이 3 점 굽힘 시험을 수행하였다. 본 실험은 INSTRON 5583 에서 수행되었다.

3 점 굽힘 시험시 길이 160mm 와 200mm 시편에 대하여 지지점간의 거리를 각각 120mm 와 160 mm 로 결정 하였다. 3 점 굽힘 시험시 펀치의 직경과 지지부의 직경은 모두 25mm 이다. INSTRON 5583 의 데이터 취득 시스템을 이용하여 접촉 하중 및 시편의 처짐을 실시간으로 측정하였다. 실험은 각 조건별로 5 개의 시편에 대하여 수행하여, 최대/최소를 나타내는 2 개의 시편에 대한 데이터를 제외하고 나머지 3 개의 시편에 대한 데이터로 결과 분석을 수행하였다.

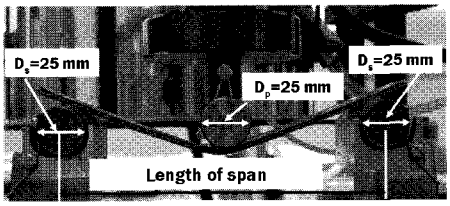

Fig. 3 Experimental set-up of three-points bending test

3 점 굽힘 시험결과 취득된 각 시험 및 시편 조건별 하중-처짐 데이터중 하중-처짐 관계가 선형으로 나타나는 구간의 데이터를 이용하여 강성 계수(P/δ)를 산출하였다. 각 시험조건의 지지점간 거리 제곱(L_s^2)과 지지점간 거리당 컴플라이언스(δ/PL_s)의 선형 관계식을 선형 회귀법(linear regression method)을 도출하였다. 이 선형 관계식의 기울기와 절편으로부터 식 (10)의 상수인 λ_1 과 λ_2 를 산출하였다. 계산된 λ_1 과 λ_2 을 이용하여 식 (11) 및 (12) 과 같이 심재의 탄성 계수와 전단계수를 도출하였다. 외판으로 사용된 0.3mm 두께의 SUS 304 재료에 대한 종탄성 계수는 인장시험 결과 180GPa 정도였다.[10]

$$\frac{\delta}{PL_s} = \lambda_1 L_s^2 + \lambda_2 \tag{10}$$

$$E_c = \frac{1}{4\lambda_1 Wc^3} - 2E_f\left(\frac{t}{c}\right)^3\left\{1+3\left(\frac{d}{t}\right)^2\right\} \tag{11}$$

$$G_c = 6\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\left(\frac{c}{d}\right)\{E_f td + E_c\left(\frac{c^2}{4}\right)\} \tag{12}$$

4. 결과 및 고찰

4.1 시편 특성 및 강성 계산

Table 2 는 제작된 시편의 치수를 측정하여 계산된 전체 두께 대비 외판 두께의 비(d/t), 전체 두께 대비 외판 중심축간 거리의 비(d/c) 및 외판 두께 대비 외판 중심축간 거리의 비(t/c)이다. Table 2 에서 d/t 는 6.5 이상으로 식 (2)의 조건을 만족하는 것을 알 수 있었다. 그러나 d/c 와 t/c 는 각각 1.2 와 0.18 정도로 식 (3)과 (4)의 조건을 만족하지 못함을 알 수 있었다. 이 결과로부터 ISB 판재의 유연강성계수와 전단계수 산출시 심재의 영향이 고려되어야 함을 알 수 있었다.

Table 2 Dimensional characteristics of specimens

Material Direction	W (mm)	L (mm)	d/t	d/c	t/c
Weft	20	160	6.5	1.2	0.18
		200	6.5	1.2	0.18
Wrap	20	160	6.7	1.2	0.18
		200	6.6	1.2	0.18

Fig. 4는 망형 직조 금속을 심재로 가진 ISB 판재의 3 점 굽힘 시험 결과 선형구간에서 취득된 하중-처짐 상관관계 데이터이다. 이 하중-처짐 데이터를 선형 회귀 분석하여 Table 3과 같은 스프링 강성계수를 산출하였다. 선형 추세선에 대한 상관계수(R^2)는 0.99 로 산출되었다. 이 결과로부터 선형 회귀 분석에 의하여 도출된 선형 하중-처짐 상관관계 추세선이 하중-처짐 데이터 분포를 매우 잘 묘사하는 것을 알 수 있었다. Table 3 의 스프링 강성계수의 경우 부 직조방향의 시편이 주 직조방향의 시편보다 높은 값을 나타냄을 알 수 있었다.

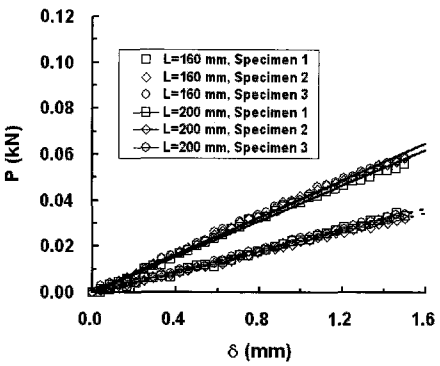

Fig. 4(a) Force-deflection relationships for different span length in the weft direction

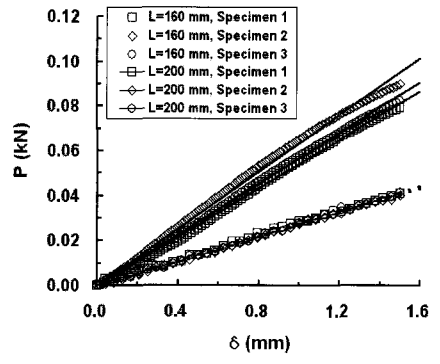

Fig. 4(b) Force-deflection relationships for different span length in the wrap direction

Table 3 Estimated stiffness of the ISB panel

Material Direction	L (mm)	L_s (mm)	P/δ (mm/kN)	R^2
Weft	160	120	0.041	0.99
			0.041	0.99
			0.039	0.99
	200	160	0.023	0.99
			0.023	0.99
			0.022	0.99
Wrap	160	120	0.054	0.99
			0.064	0.99
			0.057	0.99
	200	200	0.028	0.99
			0.027	0.99
			0.027	0.99

4.2 종탄성 및 전단 계수

Fig. 5는 망형 직조 금속을 심재로 가진 ISB 판재에 대하여 3 점 굽힘 시험 결과 취득된 시편 지지점 거리당 컴플라이언스와 시편 지지점 거리 제곱의 상관 관계를 선형 회귀법으로 산출한 결과이다. 이 선형 관계식에서 각 시편별 기울기와 절편은 Table 4 와 같이 산출하였다. 각 시편별 기울기를 식 (11)에 대입하여 각 시편의 심재인 망형 직조 금속의 종탄성 계수를 Table 5 와 같이 산출하였다. 또한 각 시편별 절편을 식 (12)에 대입하여 각 시편의 심재인 망형 직조 금속의 전단계수를 Table 5 와 같이 도출하였다.

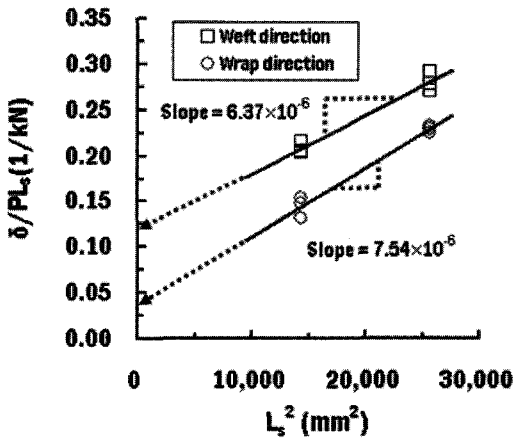

Fig. 5 Relationship between square of span length and compliance per span length

Table 4 Coefficients of relationship between square of span length and compliance per span length

Material Direction	λ_1(1/kN·mm^2)	λ_2(1/kN)
Weft	6.37×10^{-6}	0.116
Wrap	7.54×10^{-6}	0.035

본 계산 결과 주 직조 방향에 대한 망형 직조 금속의 종탄성 계수와 전단계수는 각각 평균 160.8GPa 과 51.9MPa 정도 였다. 그리고 부 직조 방향에 대한 망형 직조 금속의 종탄성 계수 및 전단계수는 각각 74.2GPa 과 174.5MPa 이었다.

Table 5 Estimated Young's and shear moduli of woven metal

Material Direction	E_c (GPa)	G_c (MPa)
Weft	158.2	59.4
Wrap	74.2	174.5

Table 5 에 망형 직조 금속은 종탄성 계수의 경우 주 직조 방향이 부 직조 방향보다 큰 값을 가지며, 전단 계수의 경우 주 직조 방향이 부 직조 방향보다 작은 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 이같은 현상은 Fig. 2 와 같이 망형 직조 상태에서 부 직조 방향의 와이어 굽힘 각도가 주 직조 방향보다 약 20° 이상 커서 수직 응력 부가시 길이 방향 수직 변형이 주 직조 방향보다 크게 나타나며,

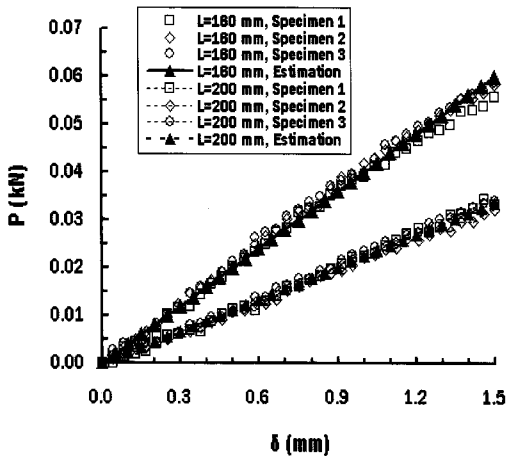

Fig. 6 Comparison of the measured force-deflection curves and the estimated force-deflection curves (Weft direction)

전단응력 부가시 주 직조 방향보다 적게 전단변형하기 때문으로 사료된다.

본 연구에서 예측된 종탄성 계수와 전단 계수를 식 (9)에 대입하여 예측된 ISB 판재의 선형 구간 하중-처짐 곡선을 시험 결과와 비교하였다. Fig. 6 은 실제 하중-처짐 선도와 예측된 하중-처짐 선도를 비교한 결과이다. 이 결과로부터 시험 결과 대비 예측된 하중-처짐 선도의 오차범위가 ±10% 범위 이하임을 알 수 있었다.

4.3 심재 강성 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 ISB 판재 전단계수 및 하중-처짐 특성 비교

Fig. 7 은 심재 강성 영향을 고려한 경우와 심재 강성 영향이 고려되지 않은 경우에 대한 망형 직조 금속의 전단계수를 비교한 결과이다. 심재의 강성 영향이 고려되지 않은 전단계수는 Jung 등이 제안한 방법에 의하여 산출하였다.[10]

Fig. 7 에서 심재의 강성이 고려되지 않은 망형 직조 금속의 전단계수가 심재의 강성이 고려된 전단계수보다 주 직조 방향과 부 직조 방향에 대하여 각각 22.1% 및 13.9% 정도 적게 예측됨을 알 수 있었다.

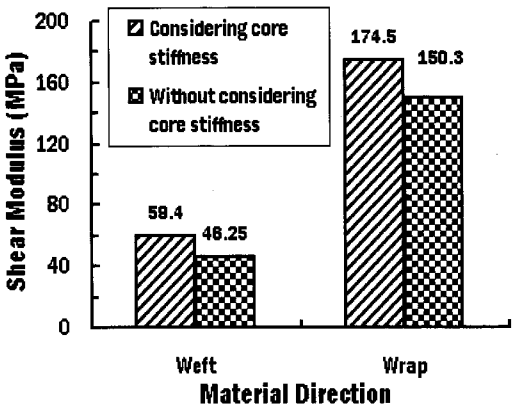

Fig. 7 Comparison of shear moduli considering core stiffness and those without considering core stiffness

Fig. 8 은 본 연구에서 산출된 심재의 종탄성 계수와 전단계수를 식 (9)에 대입하여 예측된 하중-처짐 선도와 심재의 강성을 고려되지 않고 산출된 전단계수를 식 (13)[10,11] 에 대입하여 예측된 하중-처짐 선도를 비교한 결과이다.

$$\delta = (\frac{L_s^3}{24E_f Wtd^2} + \frac{cL_s}{4Wd^2G_c})P \qquad (13)$$

Fig. 8 에서 심재의 강성이 고려된 경우와 고려되지 않은 경우의 하중-처짐 선도가 현저히 다르게 나타남을 알 수 있었다. 동일 변위에 대한 하중 측면에서 심재의 강성이 고려된 경우와 고려되지 않은 경우를 비교한 결과 심재의 강성이 고려되지 않은 경우가 주 직조 방향과 부 직조 방향에 대하여 각각 20.5-25.6% 및 19.6-31.6% 정도 작게 예측됨을 알 수 있었다. 위 결과로부터 ISB 판재와 같은 얇은 샌드위치 판재의 종탄성/전단계수 도출 및 하중-처짐 상관관계 예측을 위해서는 심재의 강성이 고려되어야 됨을 알 수 있었다.

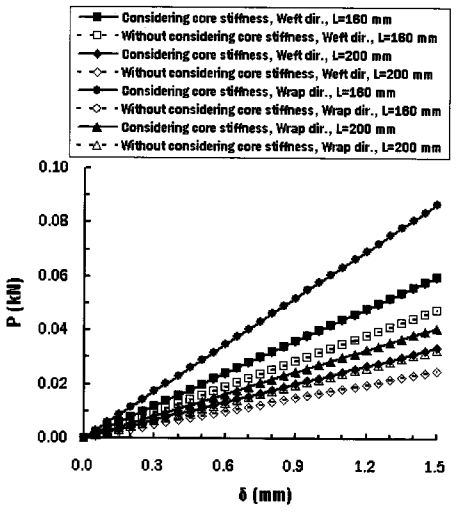

Fig. 8 Comparison of force-deflection curves considering core stiffness and those without considering core stiffness

4.4 ISB 판재 처짐량에 대한 굽힘 및 전단 성분 기여도

Fig. 9 는 3 점 굽힘 시점에서 각 시편 조건별 ISB 판재의 총 처짐량에 대한 굽힘성분의 처짐량 기여율과 전단성분의 처짐량 기여율이다.

Fig. 9 로부터 주 직조 방향으로 채취된 시편의 경우 굽힘과 전단에 의한 처짐량이 전체 처짐량에 대하여 각각 44.2-58.4% 및 41.6-55.8% 인 것을 알 수 있었다. 이 결과로부터 주 직조 방향으로 채취된 시편의 경우 심재 전단변형이 ISB 판재의 처짐

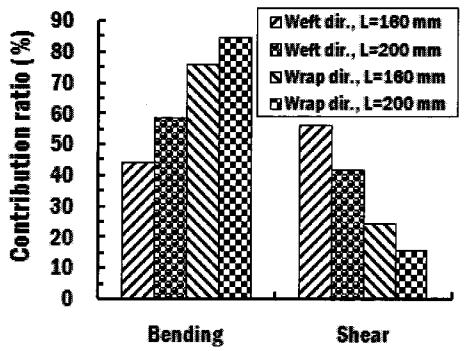

Fig. 9 Contribution ratios of bending and shear deflections to a total deflection of ISB panel

량에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있었다. 부 직조 방향으로 채취된 시편의 경우 굽힘과 전단에 의한 처짐량이 전체 처짐량에 대하여 각각 75.6-84.7% 및 15.3-24.4%로 나타났다. 부 직조 방향 시편의 경우 심재의 굽힘 각도가 주 직조 방향보다 20° 정도 크다. 이로 인해 굽힘 하중 부가시 시편에 발생하는 길이방향 수직응력에 의한 부 직조 방향 심재의 펴짐 현상이 증대되어 길이방향 수직 변형량 늘어남으로써 부직조 방향 시편 처짐시 굽힘의 영향이 증가하는 것으로 사료된다.

5. 결론

본 논문에서는 망형 직조 금속을 내부구조체로 가진 ISB 판재의 심재 종탄성 및 전단계수를 실험적으로 예측하는 방법을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 심재 강성을 고려한 샌드위치 판재 이론과 3 점 굽힘시험을 이용하여 실험적으로 망형 직조 금속을 내부구조체로 가진 ISB 판재의 심재 종탄성 및 전단계수를 예측하였다. ISB 판재 상태에서 망형 직조 금속 심재의 종탄성 계수는 주 직조 및 부 직조 방향에서 각각 158.2GPa 와 74.2GPa 로 예측되었다. 또한 전단계수의 경우 주 직조 및 부 직조 방향에서 각각 59.4MPa 와 174.5MPa 로 산출되었다. 이 결과로부터 망형 직조 금속의 직조 방향에 따라 이방성이 나타남을 알 수 있었다.

둘째 실험적 방법으로 예측된 각 시편별 종탄성 및 전단계수를 심재 강성을 고려한 샌드위치 판재 이론에 대입하여 계산된 하중-처짐 선도와 시편별 실험결과를 비교한 결과 오차범위가 ±10%

범위내에 있음을 알 수 있었다.

셋째 심재 강성을 고려한 샌드위치 판재 이론으로 예측된 전단계수 및 하중-처짐 선도를 심재 강성이 고려되지 않은 샌드위치 판재 이론으로 예측된 결과들과 비교하여, 심재의 강성이 고려되지 않을 경우 전단계수와 하중이 심재의 강성을 고려한 경우에 대비하여 각각 13.9-22.1% 및 19.6-31.6% 정도 적게 예측됨을 알 수 있었다. 이 결과로부터 ISB 판재와 같이 얇은 샌드위치 판재의 종탄성/전단계수 및 하중-처짐 상관관계 예측시 심재의 강성이 고려되어야 함을 알 수 있었다.

넷째, ISB 판재의 전체 처짐량에 대한 굽힘 및 전단 성분 기여율을 정량적으로 평가하였다. 그 결과 주 직조 방향 시편의 경우 전단성분의 시편 처짐량에 미치는 영향이 약 41.6-55.8% 정도로 매우 크며, 부 직조 방향의 경우 굽힘 성분의 시편 처짐량 영향이 약 75.6-84.7% 정도로 지배적임을 알 수 있었다.

추후 추가적인 이론적/실험적 연구를 수행하여 다양한 형상의 심재를 가진 얇은 샌드위치 판재의 심재 물성 검증/평가 방법에 대한 연구를 계속적으로 수행할 예정이다.

참고문헌

1. Fuganti, A., Lorenzi, L., Hanssen, A. G. and Langseth, M., "Aluminum Foam for Automotive Applications," Advanced Engineering Materials, Vol. 2, No. 4, pp. 200-204, 2000.
2. Evans, A. G., Hutchison, M. F. and Ashby, M. F., "Multifunctionality of Cellular Metal Systems," Progress in Materials Science, Vol. 43, No. 3, pp. 171-221, 1999.
3. Dear, J. P., Lee, H. and Brown, S. A., "Impact Damage Processes in Composite Sheet and Sandwich Honeycomb Materials," International Journal of Impact Engineering, Vol. 32, No. 1-4, pp. 130-154, 2005.
4. Wadly, H. N. G., Fleck, N. A. and Evans, A. G., "Fabrication and Structural Performance of Periodic Cellular Metal Sandwich Structures," Composites Science and Technology, Vol. 63, No. 16, pp. 2331-2343, 2003.
5. Rathbun, H. J., Zok, F. W. and Evans, A. G., "Strength Optimization of Metallic Sandwich Panels Subjected to Bending," International Journal of Solids and Structures, Vol. 42, No. 26, pp. 6643-6661, 2005.
6. 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 in Ultra Light Inner Structured and Bonded (ISB) Panel Containing Repeated Inner Pyramidal Structure," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 175-182, 2005.
7. Ahn, D. G., Lee, S. H., Jung, C. G., Hahn, G. Y. and Yang, D. Y., "Mechanical Properties and Failure Characteristics of ISB Panel with Metallic Pyramidal Inner Structures," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, pp. 521-525, 2007.
8. Styles, M., Compston, P. and Kalyanasundaram, S., "The Effect of Core Thickness on the Flexible Behaviour of Aluminum Foam Sandwich Structures," Composite Structures, Vol. 80, No. 4, pp. 532-538, 2007.
9. Hazizan, M. A. and Cantwell, W. J., "The Low Velocity Impact Response of an Aluminum Honeycomb Sandwich Structures," Composites Part B: Engineering, Vol. 34, No. 8, pp. 679-687, 2003.
10. Jung, C. G., Seong, D. Y., Yang, D. Y., Moon, K. J. and Ahn, D. G., "Experimental Investigation of Shear Modulus of a Core in a Metallic Sandwich Plate with a Truss Core," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 8, pp. 67-73, 2007.
11. Neal, B. G., "Analysis and Design of Structural Sandwich Panels," Pergamon Press, pp. 8-14, 1969.
12. Jung, C. G., Yoon, S. G., Yang, D. Y., Lee, S. M., Na, S. J., Lee, S. H. and Ahn, D. G., "Basic Study in Fabrication and Mechanical Characteristics of Ultra Light Inner Structured and Bonded (ISB) Panel Containing Perpendicularly Woven Metal," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 5, pp. 152-158, 2005.
13. Seong, D. Y., Jung, C. G., Yoon, S. J., Yang, D. Y., Lee, S. H. and Ahn, D. G., "Fabrication of Metallic Sandwich Plates with Inner Dimpled Shell Structure and Static Bending Test," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 30, No. 6, pp. 653-661, 2006.