

2차 접착된 Sandwich 구조의 굽힘에 관한 실험연구

김익태[†]

홍익대학교 조선해양공학과

An Experimental Study on the Bending Behavior of F.R.P. Sandwich Structure with 2nd Reinforced Bonding

Ik Tai Kim[†]

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Hongik University, Sejong 30016, Korea

요 약

2차 보강 접착을 한 F.R.P. sandwich 보에 대한 굽힘 거동 특성을 실험적으로 연구하였다. 굽힘 실험을 위해 시편의 면재는 chopped mat 300-450, roving clothes 570과 심재는 urethane foam core, resin은 불포화 polyester 713-bp 선박용을 사용하였고 Resin과 Fiber의 비율을 55 대 45로 하여 제작하였다. 이 연구의 주요 목적은 double-strap-joint 로 2차 보강한 샌드위치 보의 정확한 굽힘 거동특성을 알기 위해서이고 2차 보강 접착을 이용한 sandwich 구조의 설계, 유지 및 보수 시의 2차 보강 ply의 두께 및 길이 결정을 제안했다.

Abstract – It has made a special study of bending behavior of F.R.P. sandwich beams with bonded 2nd-reinforced plies. Specimen's faces were made of chopped mat 300-450, roving clothes 570, core is urethane foam, resin is 713bp unsaturated polyester for ship construction and the mixture weight ratio of resin versus fiber was 55:45 for bending analysis. The purpose of this paper is to study the exact bending behavior of bonded area's deflection and stiffness depends upon various bonded F.R.P. (2nd reinforced ply) length and thickness on which covered joints and to find the optimum design for the sandwich structures. All results and suggestions are based on experiment and using thick face calculation.

Keywords: Sandwich Structure(샌드위치 구조), Thin Face(얇은 면재), Thick Face(두꺼운 면재), Weight Fraction(중량비), Butt Strap Joint(맞댐 락판 연결), 2nd Reinforced Ply(2차 보강 접착)

1. 서 론

접착 형상에 대한 T자 연결부위는 공학적으로 또는 설계상 여러 가지 형태가 있을 수 있으나 인장력에 대한 연결 형태는 조선업 또는 수리업에서 주로 사용하는 양면 중 한 면만이 절단된 상태에서 나머지 면을 보존한 채로 접착하는 것이 보통의 작업이다. 이러한 형태의 접착형태를 Single Butt Strap Joint, 또는 양면을 모두 접착하는 형태를 Double Butt Strap Joint라 하고 소형선의 신조나 파손된 부위의 수리에서 주로 사용되는 접착 방법 들 중의 하나이다. 연결부위의 설계를 위해서는 구조적인 특성 즉 응력 및 강성해석에 근거한 정확한 구조 거동을 파악해야 하고 항해 중의 파력이나 작업 시 또는 접안 시의 예기치 못한 충격력에 근거한 구조해석을

위해서는 굽힘 거동의 실험 자료가 필요하다.

본 연구에서는 2차 보강 접착을 한 F.R.P. sandwich 보에 대한 굽힘 거동 특성을 조사하기 위해서 시편의 면재는 chopped mat 300-450, roving clothes 570을 심재는 urethane foam core, resin은 불포화 polyester 713-bp 선박용을 사용하였고 resin과 fiber의 비율을 55 대 45로 하여 윗 면재와 아랫 면재를 제작하고 그 사이를 urethane form core로 채운 채 적용하였다. 2차 보강 접착 실험을 위하여 두 종류의 시편, 두꺼운 면재 및 얇은 면재의 형태로 제작하고 시편의 중앙을 폭 방향으로 절단 한 후 2차 보강 길이를 50 mm에서 150 mm 까지 Double Butt Strap Joint의 방법으로 F.R.P. 보강을 한 후 굽힘 실험을 수행 하였다. 여기서 2차 보강 F.R.P.의 두께는 1 ply를 1 mm 기준으로 2 ply에서 6 ply까지 적용하였다(Liyong and Grant[1999]).

또한, 2차 보강 접착 시 수 작업으로 F.R.P. 보강을 하게 되고 이때 수직면이나 수평 면재의 여러층 접착에 따른 보강 접착 면재의

[†]Corresponding author: kimit@hongik.ac.kr

두께 붙일지 또는 resin과 fiber의 연속 반복 적층에서 발생하는 액상 수지의 경화속도에 따른 강도 변화 등은 제작 시 고려되지 않는 상황이다. 따라서 본 실험에서는 굽힘 실험 후 파괴된 시험편으로 5개의 F.R.P. 시편을 만들고 태워서 계산 시의 이론적인 resin과 fiber의 중량 비, 제작 후 resin과 fiber의 중량 비를 구하는 Weight Fraction을 사용하여 강도의 정확성을 높였다.

이 연구의 주요 목적은 보강접착 방법 중 수리 보수와 소형선 신조 시 많이 발생하는 형태 인 double-Butt-strap-joint로 2차 보강한 샌드위치 보에서 두꺼운 면재까지도 실험 및 해석을 수행하였고 보의 정확한 굽힘 거동특성을 실험적으로 구한 특성 치를 근거로 보강 두께, 즉 적층 Ply의 최적 수, 보강 길이 등을 언급했다.

2. 면재 및 심재의 구성

2.1 샌드위치 보의 굽힘 공식

Sandwich 구조는 강도가 낮은 심재와 강도가 큰 면재를 조합하여 두 재료의 단점을 보완하고 장점을 조화시킨 합성 구조물이다.

해석적인 고찰에는 크게 얇은 면재와 두꺼운 면재로 대별되고 본 연구의 범위는 두 식이 모두 사용 되어지는 2차 보강 된 구조이므로 2차 보강 전 샌드위치 시편을 얇은 면재, 두꺼운 면재로 각각 제작 후 각각의 식에 근거한 값을 구했고 그 식을 간략히 나타내고 면재에 대한 기준도 나타 냈다(Deborah [1973]).

1. 면재의 두께가 $100 \geq \frac{d}{t} \geq 5.77$ 인 경우 thin face
 2. 면재의 두께가 $\frac{d}{t} \leq 5.77$ 인 경우 thick face
- 얇은 면재의 bending stiffness는

$$D = E_f \frac{btd^2}{2} + D_f \tag{1}$$

여기서 $D_f = \frac{E_f bt^3}{6}$ 는 면재 자체의 중심축에서의 moment of inertia이다.

τ 가 심재의 전단응력이고 Q 를 Sandwich의 전단력이라 할 때

$$Q = bct + 2\left(\frac{bct}{2}\right) = b(c+t) = bd\tau \tag{2}$$

b = Breadth

Sandwich 보의 전체 전단 변위를 Fig. 1(c)에 보여주고 있다.

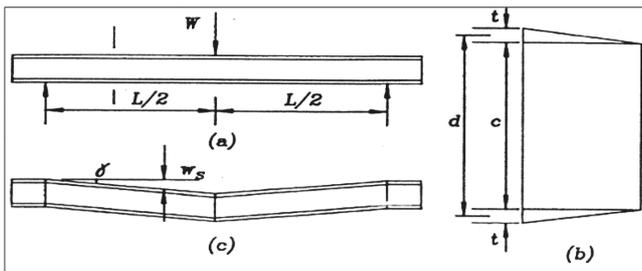


Fig. 1. Simply supported thin face sandwich beam. (a) Simply supported beam with central point load, (b) Effective shear stress in core, (c) Shear deformation of beam.

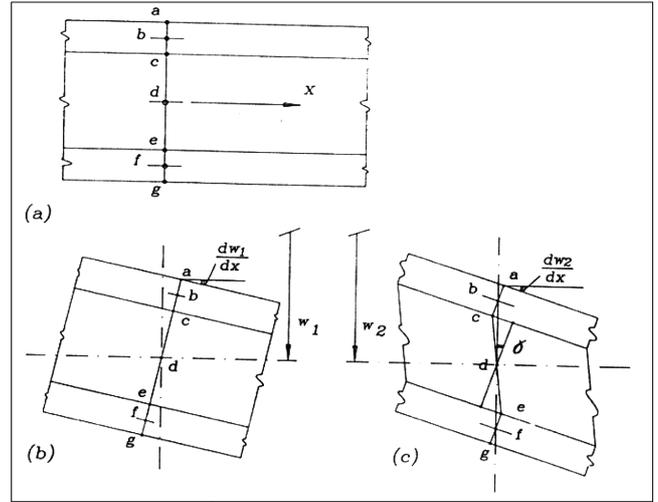


Fig. 2. Simply supported thick face sandwich beam.

얇은 면재의 굽힘에 대한 처짐은 아래 처짐 c를 심재로 표시 할 때

$$\Delta_s = \gamma \frac{L}{2} = \frac{Q}{bdG_c} \frac{l}{2} = \frac{WL}{4A_c G_c} \tag{3}$$

Δ_s = 얇은 면재 sandwich 보의 처짐, $A_c = bd$ 는 심재의 effective area. γ = 심재의 전단 변형을

두꺼운 면재의 굽힘에 대한 처짐은 Fig. 2(a)의 정상 상태에서 sandwich 보의 횡단면에 대한 1차 처짐(Primary displacement)과 2차 처짐(Secondary displacement)으로 분류하고 전체 처짐은 1차 처짐 인 Fig. 2(b)와 2차 처짐 인 Fig. 2(c)를 합한 값이다. 여기서 sandwich 보에 하중이 작용할 때 Fig. 2(b)에서 나타 낸 것과 같이, 보가 휨 후에도 단면 abcdefg 는 보의 중립축에 수직하게 남아있다. 이때의 처짐 량은 1차 변형, primary displacement w_1 이다.

Fig. 2(c)는 위 아래 면재 중심에 놓여있는 점 b와 f는 면재의 두께가 두껍기 때문에 변형 된 면재 자체의 수직방향을 중심으로 위 아래로 움직인다. 또한 면재는 그 자체의 중심축에 대해서 회전만 보의 길이방향으로의 이동이 없기 때문에 각 면재에서의 mean direct stress는 0이다. 이런 변형을 2차 변형, secondary displacement w_2 이다. 또한, 면재의 회전은 심재의 shear strain (γ)의 발생 원인이 되고 shear strain (γ)는

$$\gamma = \frac{dw_2}{c dx} \tag{4}$$

Primary displacement와 secondary displacement를 서로 독립적이라 가정하면 두꺼운 면재의 처짐 식은 각 다음과 같다(Erdogan and Ratwani [1971]).

$$w = \frac{WL^3}{48D} + \frac{WL}{4D_Q} \left(1 - \frac{D_f}{D}\right)^2 S \tag{5}$$

S = tabulated coefficient,

Q = primary shear force

D = Bending Stiffness of primary displacement

D_Q = Shear Stiffness of secondary displacement

3. 실험

3.1 실험 시편의 종류 및 치수

시편의 종류에는 크게 4가지가 있다. Type1은 thin face를 가지고 있고, sandwich 보 길이의 중앙이 절단된 면재와 심재는 epoxy로 채워져 있지 않고 제작 시 사용된 수지로 메워진 두 면재위를 double butt strap joint의 형태로 2차 보강을 한 것이다. 2차 보강 시 FRP의 적층은 보강 길이를 달리 하였고 보강 ply 수도 변화를 주어 두께도 달리 하였다. Type 2는 중앙 절단면이 epoxy로 채워져 있고 심재의 두께, 면재의 두께, 2차 보강 길이 및 두께를 Type 1과 달리 하여 제작하였으며 Type 3의 시편은 면재 두께가 thick face를 가지고 있는 것만을 제외하고는 Type1과 동일하고 Type 4 역시 면재가 thick face를 가지고 있는 것만을 제외하고는 Type 2와 동일하다. Table 1에 시편의 종류를 보여주고 있다.

심재의 두께는 30, 40 mm이고 지지점간의 거리와 심재 두께의 비는 약 10으로 잡았다. sandwich 구조로 만들어진 요트 나 파워보트의 경우 심재의 두께는 대략 20 mm에서 35 mm 정도 이므로 심재 두께의 기준을 30 mm로 선택하였다.

또한 2차 보강 접착된 sandwich 보의 굽힘 거동 특성을 상세히 알기 위해 40 mm 두께의 코어를 가진 시편까지도 제작하여 실험하였다.

Fig. 3은 실험시편의 기본 치수 기준과 실험형태를 보여주고 있다(ASTM C 394-94).

3.2 물성치

Table 2는 제작업체에서 주어진 자료와 Wight Fraction 실험에서 얻어진 자료를 기초로 수정한 물성치를 보여주고 있다. F.R.P. 면재와 Foam Core의 young's modulus 의비는 약 $E_f/E_c = 100$ 이다.

Table 1. Thin and Thick face beam specimens

Dimensions	Type 1 (P40)	Type 2 (P50)
Face ply's number (t)	3	4
Core thickness (tc)	30 mm	40mm
Width (w)	70mm	90mm
Span length (L)	280mm	380mm
Total length (LT)	400mm	500mm
2'nd reinforced ply's number (Thickness, tR)	2, 4, 6 plies (2, 4, 6 mm)	2, 4, 6 plies (2, 4, 6 mm)
2'nd reinforced ply's length (LR)	50,80,110 mm	70, 110, 150 mm
Dimensions	Type 3 (TP40)	Type 4 (TP40)
Face ply's number (t)	8	10
Core thickness(tc)	30 mm	40mm
Width (w)	70mm	90mm
Span length (L)	280mm	380mm
Total length (LT)	400mm	500mm
2'nd reinforced ply's number (Thickness, tR)	2, 4, 6 plies (2, 4, 6 mm)	2, 4, 6 plies (2, 4, 6 mm)
2'nd reinforced ply's length(LR)	50,80,110 mm	70,110,150 mm

*TP: TP means specimen has thick faces.

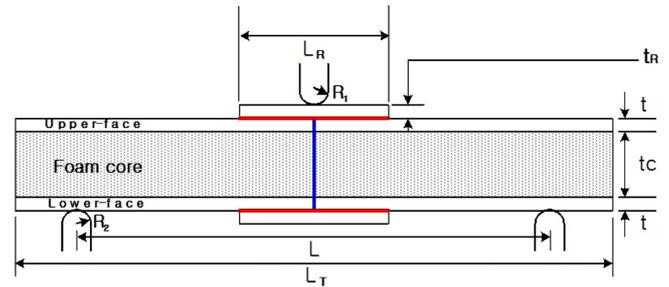


Fig. 3. Three point bending of sandwich beam with indenter and supports. *Red & Blue line : epoxy bonded area, *R1=R2 = 11 mm.

Table 2. Material properties of FRP, EPOXY and Foam core

	FRP	EPOXY
Young's Modulus (E) [N/m ²]	9.807E6	3.236E6
Density (ρ) [g/cm ³]	1.67	1.52
Poissons ratio (ν)	0.17	0.2
URETHANE FOAM CORE		
Shear Modulus (G) [N/m ²]		9.79E4
Density (ρ) [g/cm ³]		0.98
Poissons ratio (ν)		0.34

3.3 Weight Fraction

Sandwich 구조의 특성을 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나가 면재를 구성하는 물질 중 Fiber와 수지의 상관적인 비율이다. 이 상관적 비율을 계산하는 방법에는 Volume Fraction과 Weight Fraction 두 가지 방법이 있으나 전자의 방법은 연소시킨 후 정확한 Volume을 구하기가 난해해서 Volume Fraction보다는 정확한 무게를 확인할 수 있는 방법인 Weight Fraction을 사용하였다(Shenoi and Wellicome[2011]).

중량 비를 측정하기 위해 굽힘 실험에서 파괴된 시편을 각 종류 별로 Random Sampling하여 완전 연소시킬 시편 5개를 선정하였

Table 3. Weight Ratio [g]

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Before Combustion	169.814	73.258	61.291	84.603	83.211
After Combustion	78.646	38.536	31.920	38.295	42.577
	Average		weight ratio		
Before Combustion	80.725		0.489		
After Combustion	39.4624				

고 심재와 면재 들을 물리적으로 분리시키고 위, 아래 면재 중 한 면만을 선정하고 정밀저울을 사용하여 1/1000g 까지 측정 한 후, 연소 Torch를 사용하여 1차 연소시킨 후, Fiber와 Fiber 사이에 남아 있는 수지를 다시 분리 한 후 2차 연소시켜 완벽한 연소가 되도록 하였다. 이렇게 완전 연소시킨 수지 외에 태워 남은 Fiber의 무게를 측정하여 중량 비를 구하였다. Table 3의 평균 중량 비는 case1 부터 case5까지의 결과에 수지와 Fiber의 밀도 비를 고려한 참고문헌 5의 Weight Fraction식을 참고하였다.

Table 3은 연소 후의 평균 중량 비를 나타내고 있고 Resin과 Fiber의 비가 51 대 49로 시편을 제작 할 때의 예상 중량비와 제작 후의 중량비 차이가 약 4% 정도임을 밝혀냈다. 이 오차는 실험 시 오차 범위 내에 들어 있을 수 있으나 본 연구의 결과인 Table 3에 제안 한 강성 계산에 수정 된 중량 비를 사용하였다.

4. 실험 및 실험결과

제작된 시편은 약 한달 동안 온도가 21 °C이고 습도가 약 48% 인 곳에서 완전 경화시킨 후, ASTM standard C393-94에 따라 시편을 설계하고 굽힘 시험을 실시하였다(James[1984]).

2차 보강 ply를 접착하지 않은 시편도 비교 분석을 위하여 제작 및 실험을 하였으나 절단 된 시편 중앙의 접착 면적이 너무 작아 sandwich 보에 하중을 작용하자마자 파단이 일어났다. 이는 강도가 너무 약한 결과이어서 비교대상에서 제외 시켰다.

Sandwich 보의 굽힘 실험에 있어서 2차 보강 ply의 길이와 두께에는 밀접한 상관관계가 있음이 실험을 통하여 나타났다.

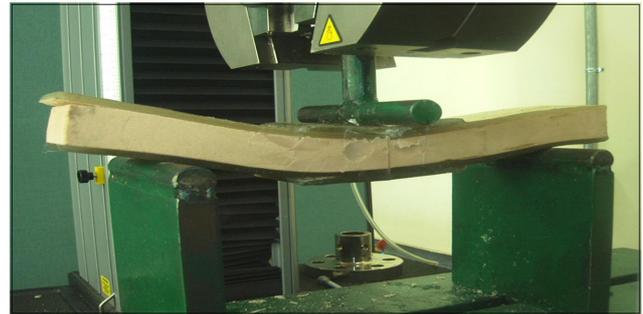
Thin face와 Thick face를 가진 sandwich 보의 2차 보강을 2 ply로



Fig. 4. A processing for calculating the weight ratio of the tested specimens.



(a) Fracture shape for thin face



(b) Fracture shape for thick face

Fig. 5. Yielding and Fracture shape for sandwich beams.

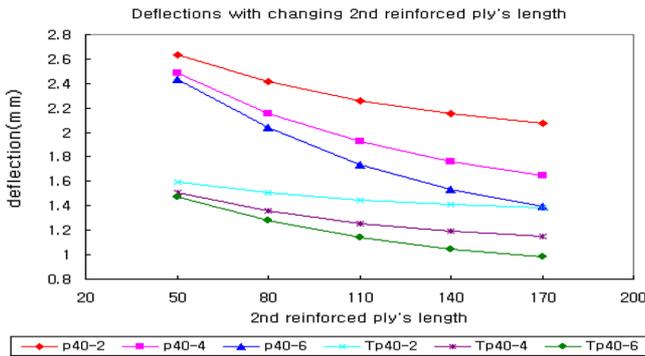
한 경우, 그 접착이 완전하다 할지라도 2차 보강의 두께가 너무 얇아 심재의 파단 전단 응력보다 2차 보강 ply의 응력이 약해 2차 보강 ply가 먼저 파단 되는 경우가 발생했다. 특히 thick face sandwich 보의 경우 보 자체의 face 두께가 너무 두껍기 때문에 횡 하중에 의한 면재의 굽힘 현상보다는 힘의 대부분을 2차 보강 ply가 고스란히 받기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)에 파단 형태를 보여 주고 있으며 보강의 길이를 늘려주는 것보다 두께를 늘려주는 것이 강도 면에서 효율적인 것으로 나타났다.

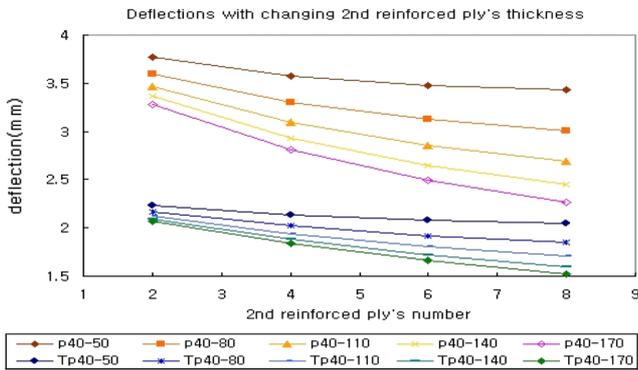
2차 보강을 2 ply로 하였을 때의 보강stiffness는 sandwich 보 자체의 stiffness 보다 약하고, 2차 보강길이의 증가에 비해 sandwich 보의 stiffness 증가는 미약하나, 2차 보강의 두께를 6 ply로 증가시킨 경우 sandwich 보의 stiffness는 그 길이의 증가에 따라 뚜렷이 증가함을 보이고 있다.

Fig. 6(a)는 2차 보강 ply의 길이와 처짐량의 관계에서 2차 보강의 길이가 50mm 일 때, 그 처짐의 변화가 약간 줄어들고 있음을 보이는 반면, 2차 보강의 길이가 80mm 와 110mm 일 경우 처짐의 변화가 뚜렷이 감소하고 있음을 보이고 있다. 그러나 2차 보강의 길이가 110mm를 넘는 경우부터 감소 기울기가 완만 해 지고 있으므로 2차 보강으로서의 효율이 떨어진다고 볼 수 있다. 이 결과는 2차 보강 길이는 span의 약 30%에서 40%가 최적이다.

Fig. 6(b)는 2차 보강 ply의 두께 증가 수와 처짐량의 관계에서 4 ply와 6 ply 사이에서 기울기의 감소가 뚜렷하다. 이 결과는 2차 보강 ply수의 최적 값이라 평가 할 수 있다.



(a) Deflection curves with changing 2nd reinforced ply's length



(b) Deflection curves with changing 2nd reinforced ply's thickness

* (P40-80) : 40 means specimens length is 40
 : P means specimen has thin faces
 : 80 means 2nd reinforced plys length is 80 mm

Fig. 6. Comparison of the experimental result for the 2nd reinforcements.

5. 결 론

본 연구의 결과를 통해서 2차 보강 접착을 한 sandwich 보의 설계, 유지 및 보수 시 다음과 같은 보강 ply의 두께 및 길이 결정을

제안한다.

I_s 를 보강 전 sandwich 보 전체 중립축에 대한 moment of inertia 이고, L_{re} 를 2차 보강 된 sandwich 보의 두께를 포함한 수정 된 중립축에 대한 moment of inertia 일때

1. 2차 보강 ply의 두께의 결정: Thin face sandwich 보의 경우는 $L_{re} \geq 2L_s$, Thick face sandwich 보의 경우는 $L_{re} \geq L_s$ 를 확보하여야 2차 보강으로써 최적의 조건을 갖는다.

2. 2차 보강 ply의 길이의 결정: 2차 보강의 길이는 span 길이의 30%에서 40% 이상을 확보하여야 한다.

References

- [1] Erdongan, F. and Ratwani, M., 1971, "Stress Distribution in Bonded Joint", Compos. Mater., Vol. 5, No. 3, 378-393.
- [2] Sheno, R.A. and Wellicome, J.F., 2011, "Composite materials in maritime structure", Cambridge University Press, Vol. 1, 205-227.
- [3] Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions, ASTM C 393-94.
- [4] Tong, L. and Steven, G.P., 1999, "Analysis and Design of Structural Bonded Joints", Kluwer Academy Publishers, 1-69.
- [5] Weissman-Berman, D., 1973, "Structural tests and preliminary laminate design for sandwich-cored panels", M. Rosenblatt & Son. Inc.
- [6] Whitney, J.M., 1984, "Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials", The Society of Experimental Mechanics.

Received 30 November 2015

Revised 17 February 2016

Accepted 19 February 2016