

Double-lap-joint 로 2차 보강 접착을 한 FRP Sandwich Beam 의 굽힘 거동 특성에 관한 연구

손충열* · 김익태** · 노민식*** · 김성준*** · 김상호***

*인하대학교

**홍익대학교

***인하대학교 대학원

A Study on bending behavior of FRP sandwich beam with 2nd reinforced by double-lap-joint

CHOONG-YUL SON, IK-TAE KIM, MIN-SHIK ROH, SUNG-JUN KIM, SANG-HO KIM

KEY WORDS : 2nd-reinforced ply, Adhered Area, Weight Fraction, Lap Joint

ABSTRACT

It has made a special study of bending behavior of F.R.P sandwich beams with bonded 2nd-reinforced plies. Specimens were made of Chopped Mat 300-450, Roving Clothes 570 and the mixture weight ratio of Resin versus hardener was 55:45 for bending tests. It was fabricated by hand lay-up method, hardened for 24 hours in nature, cut specimens according to ASTM standard C393-94 Knowing exact behavior of bonded area's stress and strain depends upon various bonded F.R.P length on which covered lap joint. We also considered shear stress in adhered area and have done computational estimation by ANSYS as well. This study reveals that the length of plies covered lap joint are longer, Failure stresses are remarkably larger.

1. 서 론

복합재료에서의 sandwich 구조물은 낮은 자중에 비해 높은 강성과 뛰어난 동적 거동 특성을 가지고 있어 해양 구조물을 설계하는 설계자들이 선호하는 재료중의 하나이다.

금속재료의 경우, 복합재료와는 달리 Welding, Bonding, Bolting 등과 같은 경우에 대한 연구가 활발히 진행중이고, 이런 연구들은 구조물의 설계의 기준으로 사용이 되고 있다.

본 연구실에서는 sandwich 구조물의 진동특성에 관한 연구를 10여 년 간 지속해왔다. 이제는 sandwich 구조물의 2차 보강에 따른 특성을 연구중이며 앞으로 진동 및 피로시험도 할 예정이다.

이 논문에서 주로 언급하고자 하는 것은 epoxy를 이용한 접착이다. 이것은 해양 구조물 및 선박을 설계하는 공학설계자들에 경제적으로 또는 기술적으로 상당한 이득을

가져다 줄 것이고 또한 조선소에서 선박의 유지 보수에 상당한 잠재력을 제공할 것이다.

시편은 복합재료의 접착형태의 하나인 Lap Joint 형태를 이용하여 시편의 중앙을 절단한 후 Epoxy로 접착시키고, 절단된 시편 중앙부를 다양한 길이와 두께로 2차 보강한 형태의 시편을 수작업으로 만들었다.

이 논문의 주된 목적은 다양한 두께와 길이로 보강 된 2차 보강 ply에 따라 sandwich beam의 접착 면의 응력과 변형률의 정확한 굽힘 거동을 알아내는데 있다. 또한 시편의 심재와 면재, 그리고 2차 보강 ply의 두께를 다양화 시켰고, 또한 시편의 중앙은 double-strap joint 의 형태로 절단한 후 다시 접착하였다.

2차 보강이 없는 thin face 또는 thick face sandwich beam 의 거동특성에 대한 연구는 많이 이루어져 있지만, 시편의 중앙을 절단한 후 다양한 형태로 2차 보강을 한 sandwich beam의 접착부와 beam의 거동 특성에 대한 연구는 부족한 것이 현실이다. 본 논문에서는 2차 보강된 sandwich beam의 접착부에서의 응력과 변형률에 관한 정확한 거동을 연구한다.

제1저자 손충열 연락처: 인천시 남구 용현동 인하대학교

032-860-738 soncy@inha.ac.kr

Hand-lay-up 공법에 의해 제작된 복합재료는 그 거동을 예측하기란 매우 어렵다. 그 이유는 Fiber와 Resin 비율, 다양한 적층순서, 섬유양의 정도, 환경적 요인 등의 변수에 따라 물성치의 차이가 판이하게 다르기 때문이다. 거기에 Epoxy 접착과 보강ply의 2차 접착은 더욱더 그것을 어렵게 한다.

그렇기 때문에 실험과 FEM Analysis 사이의 오차는 필연적이고 본 논문에서는 2차 보강 접착의 길이와 두께의 거동에 대한 경향을 파악하는데 주안점을 가지고 접근하였다.

본 논문을 진행시키기 위해 다음과 같은 가정을 내렸다.

1. 모든 접착은 완전히 이루어져 있다.
2. 면재의 두께가 $100 \geq \frac{d}{t} \geq 5.77$ 인 경우 thin face
3. 면재의 두께가 $\frac{d}{t} \leq 5.77$ 인 경우 thick face
4. 면재와 심재의 두께, 길이, 폭등 치수는 일정하다.

* d : upper face 와 lower face의 중앙 사이의 거리

2. EXPERIMENTS

2.1 Bending Test Specimens

시편의 종류에는 크게 2가지가 있다. 첫 번째 type의 시편은 thin face를 가지고 있고, sandwich beam 중앙이 절단된 면재와 심재는 epoxy로 접착되어 있으며, 중앙을 double strap-joint의 형태로 2차 보강을 한 것이다. 두 번째 type의 시편은 thick face를 가지고 있는 것만 다를 뿐, 나머지는 type1과 동일하다.

심재의 두께는 30mm이고 지지점간의 거리와 심재 두께의 비는 약 10으로 잡았다. sandwich 구조로 만들어진 요트 나 파워보트의 경우 심재의 두께는 20mm에서 35mm이다. 따라서 심재의 두께를 30mm로 선택하였다.

Fig. 1은 위에서 언급한 시편의 형태를 보여주고 있다.

2.2 Comparison of changing the core thickness in thin face and thick face

다음에 나타내는 표와 그림들은 시편의 치수와 오차를 나타낸다.

Table 1. Thin and Thick face beam specimen.

Dimensions	Specimen (P40)	Specimen (TP40)
Face ply's number	3	6
Core thickness (tc)	30 mm	30 mm
Width (w)	70mm	70mm
Span length (L)	280mm	280mm
Total length (L _T)	400mm	400mm
2'nd reinforced ply's number (Thickness, tR)	2, 6 plies (2,6 mm)	2, 6 plies (2,6mm)
2'nd reinforced ply's length (L _R)	50,80,110 mm	50,80,110 mm

Table 2. Tolerance of thin and thick face beam specimen.

Tolerance	Specimen (P40)	Specimen (TP40)
Face ply's thickness (t)	0.1 mm	0.5 mm
Core thickness (tc)	1mm	1mm
Width (w)	1mm	1mm
Total length	3mm	3mm
2'nd reinforced ply's number (Thickness)	2, 6 plies (0.1,0.2 mm)	2, 6 plies (0.1,0.2 r.m)
2'nd reinforced ply's length	5,6,4 mm	3,5,6 mm

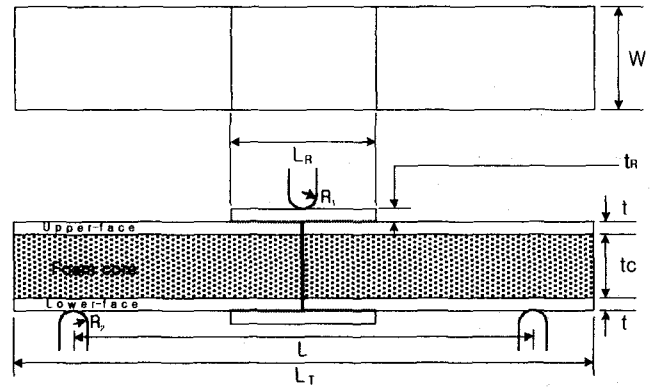


Fig. 1 Three point bending of sandwich beam with indenter and supports.

*Red & Blue line: epoxy bonded area

*R₁=R₂ = 11 mm

*(P40-2-80): 40 means specimens length is 40

: P means specimen has thin faces

: 2 mean 2nd reinforced plies number is 2

: 80 mean 2nd reinforced plies length is 80 mm

*TP : TP means specimen has thick faces.

2.3 Material properties

Table 3, 4 제작업체에서 주어진 data 와 실험에서 얻어진 data를 기초로 한 material property를 보여주고 있다.

Table 3. Material properties of FRP and EPOXY

	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

Table 4. Material properties of Foam core

	URETHANE FOAM CORE
Shear Modulus (G) [N/m^2]	9.79E3
Density(ρ) [g/cm^3]	0.98
Poissons ratio(ν)	0.34

2.4 Weight Fraction

복합재료의 특성을 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나가 fiber 와 matrix의 상관적인 비율이다. 이 상관적인 비율을 계산하는 방법에는 Volume Fraction과 Weight Fraction의 두 가지 방법이 있다. 그러나 전자의 방법은 연소시킨 후 정확한 Volume을 구하기가 난해하다. 그래서 이 논문에서는 Volume Fraction보다 정확한 방법인 Weight Fraction을 사용하였다.

중량비를 측정하기 위해 굽힘 실험에서 파괴된 시편을 각 종류별로 Random Sampling하여 완전 연소시킬 시편 10개를 선정하였다. 이렇게 선정된 Sample들을 정밀저울을 사용하여 1/1000g 까지 측정한 후, Touch를 사용하여 1차 연소시킨 후, 이것을 다시 찢어서 남아있는 수지를 확인하고 남아있는 수지를 2차 연소시켜 완벽한 연소가 되도록 하였다. 이렇게 완전 연소시킨 수지를 태워 남은 Fiber의 무게를 측정하여 중량비를 구하였다.

Table 5. 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

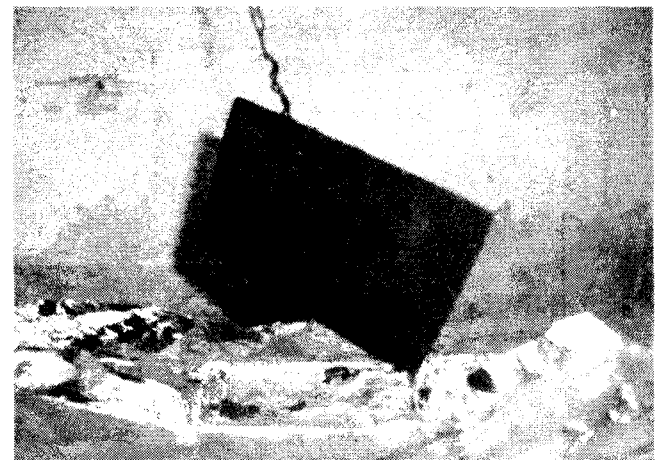
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Before Combustion	169.814	73.258	61.291	84.603	83.211
After Combustion	78.646	38.536	31.920	38.295	42.577

	Average	weight ratio
Before Combustion	80.725	0.489
After Combustion	39.4624	

Table 5. 는 fiber의 평균중량비(weight ratio)를 보여주고 있다. 이는 fiber 와 matrix 의 비가 49% vs 51%로 시편의 제작상의 오차가 크지 않다는 것을 보이고 있다.



(a) a burning specimen



(b) a burned specimen

Fig 2. A processing for calculating the weight ratio of the tested specimens.

2.5 Experimental process

ASTM standard C393-94에 따라 시편을 설계하고 굽힘 시험을 실시하였다. 굽힘 실험은 Instron 4482 universal tester를 사용하였고, data는 Instron Co., Ltd.에서 제공한 Series IX 프로그램을 사용하여 값을 얻어냈다.

sandwich beam에 작용하는 하중의 속도는 5 mm/min의 속도로 하였다.



Fig 3. The bending tester (Instron4482)

3. EXPERIMENT RESULTS

2차 보강 ply를 접착하지 않은 시편은 시편 중앙의 접착 면적이 너무 작아 sandwich beam에 하중을 작용하자마자 파단이 일어났다. 이는 강도가 너무 약해 실험의 대상에서 제외 시켰다.

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

Thin face 와 Thick face를 가진 sandwich beam의 2차 보강 ply의 수가 들인 경우, 그 접착이 완전하다 할지라도 2차 보강의 두께가 너무 얇아 코어의 파단 전단 응력보다 2차 보강ply의 응력이 약해 2차 보강 ply가 파단 되는 경우가 발생한다. 특히 thick face sandwich beam의 경우 보 자체의 face 두께가 너무 두껍기 때문에 transverse load 에 의한 굽힘 현상이 발생하지 않아 이 힘의 대부분을 2 차 보강ply가 고스란히 받기 때문인 것으로 판단된다.

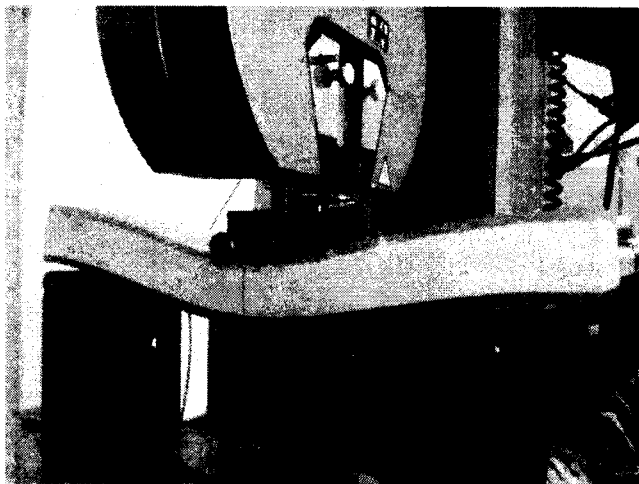


Fig 4. After yielding

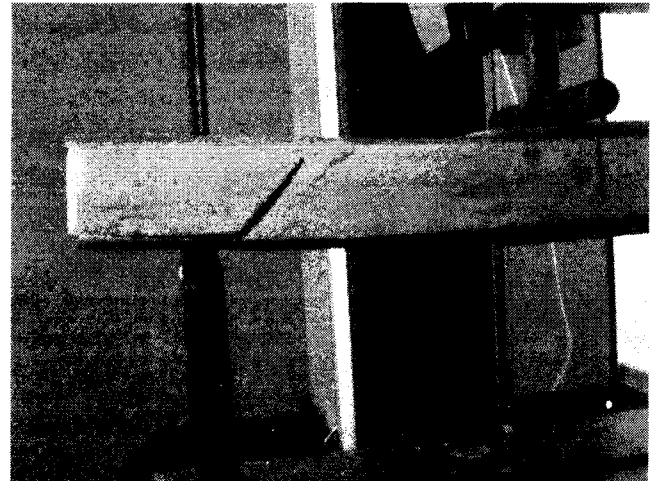


Fig 5. After fracture

Table 6. 은 sandwich beams에 대한 0.2% offset yield strength and displacement를 나타내고 있다.

Table 6. 0.2% offset yield strength and displacement for sandwich beams

0.2% offset yield strength	P40
yield strength Load (kgf)	153.56
yield stress Displacement (mm)	4.2408
	TP40
yield strength Load (kgf)	205.91
yield strength Displacement (mm)	3.6495

0.2% offset	P40-2-50	P40-2-80	P40-2-110
yield strength Load (kgf)	161.88	173.96	173.96
yield strength Displacement (mm)	4.2941	4.0961	3.9128

0.2% offset	P40-6-50	P40-6-80	P40-6-110
yield strength Load (kgf)	164.3	169.13	182.02
yield strength Displacement (mm)	3.5361	3.2922	3.0758

0.2% offset	TP40-2-50	TP40-2-80	TP40-2-110
yield strength Load (kgf)	212.09	219.33	214.5
yield strength Displacement (mm)	3.4065	3.4128	3.4541

0.2% offset	TP40-6-50	TP40-6-80	TP40-6-110
yield strength Load (kgf)	272.49	281.35	300.41
yield strength Displacement (mm)	3.7144	3.4634	3.4525

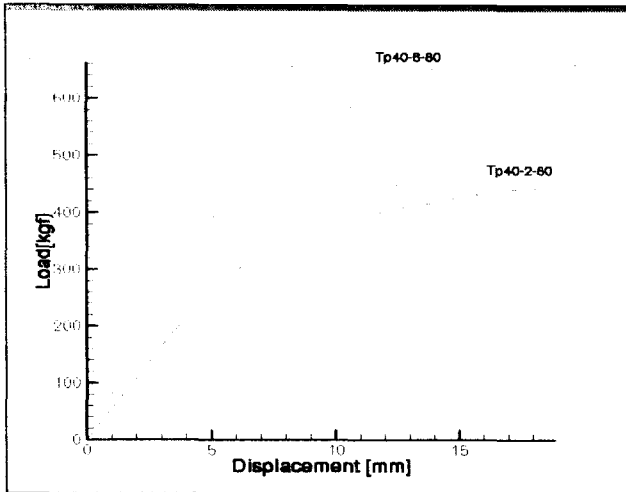


Fig. 6. Load-Deflection curve of Experimental results

4. FEM Analysis

Fig. 7 은 유한요소 구조 해석 프로그램인 ANSYS를 이용해 해석한 결과로 응력과 변형률의 분포를 보여주고 있다. 위에서도 언급했듯이, 접착은 완벽하다는 가정 하에 보강된 빔이 어떠한 경향으로 거동하는지에 대해 집중적으로 분석하였다.

FEM 해석에 사용된 element 는 8-node를 가지고 있으며, 각각의 node마다 2자유도를 가지고 있다: translations in the nodal x and y directions. 이 element는 plane element 또는 axisymmetric element로 사용할 수 있고, plasticity, creep, swelling, stress stiffening, large deflection, and large strain capabilities의 해석이 가능하다.

FEM 해석은 linear elastic material properties 로 a linear elastic analysis.를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 7 에서 보는 바와 같이 strain 은 심재(foam core)에서 가장 많이 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7 (a), (b) 와 같이 2차 보강ply의 두께가 얇은 경우 하중이 작용하는 지점에서 최대 응력이 나타나고 있고, 반면에 (c),(d) 와 같이 2차 보강ply의 두께가 face의 두께보다 두꺼워 최대 응력이 2차 보강ply의 바로 옆의 lower face에서 발생한다.

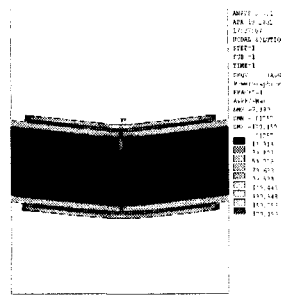
이는 sandwich 구조로 이루어진 구조물을 설계 또는 수리할 때 sandwich구조물의 원래 face 의 두께를 고려하여 2차 보강을 해야한다는 것이다.

심재의 경우 Fig. 7 (e),(f) 와 같이 thin face를 갖는 sandwich beam에서 face 자체의 두께가 얇아 face 자체가 늘어나기 때문에, Fig. 7 (g),(h)의 thick face를 갖는 sandwich beam에서와 같이 strain의 대부분을 심재에서 분담하지 않는다.

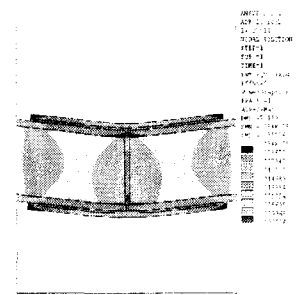
이 결과는 FRP에 비해 낮은 Young's Modulus 값을 갖는 심재(foam core) 때문에 응력은 작고 변형률은 크게 나온다는 것을 알려준다. 또한 중앙 절단면 Epoxy의 접착면적은 굽힘에 있어서 2차 보강Ply의 강도에 비해 미미하다는 것을 보여주고 있다.

Fig. 5와 같이 파단은 전단에 의하여 지지 점으로부터 시작하여 일어나고 있음이 FEM의 결과와 일치함을 보여주고 있다.

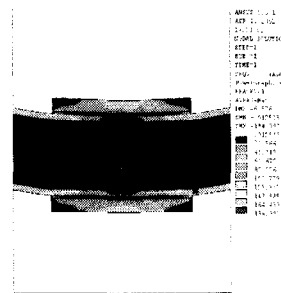
Fig. 8 (a)의 graph에서 보이는 것과 같이 thin face를 갖는 sandwich beam(p40)의 2차 보강의 두께가 2.46 mm 일 때의 deflection curve의 경향은 대체적으로 일치하나, thick face를 갖는 sandwich beam(Tp40)의 경우는 2차 보강의 두께가 2 mm 일 때는 2차 보강의 길이에 관계없이 deflection 의 변화가 거의 없음이 나타난다. Fig. 8 (b)의 graph에서는 2차 보강 ply 의 길이가 50mm인 경우 두께의 변화에 따른 deflection 의 변화가 거의 없음이 나타난다. 하지만 2차 보강 ply 의 길이가 110 mm를 넘어 가면 2차 보강의 효율이 떨어지는 것을 볼 수 있다.



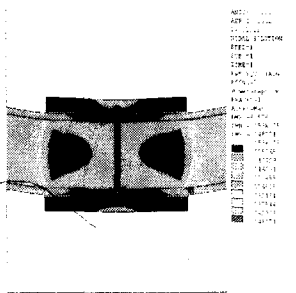
(a)p40-2-110(stress)



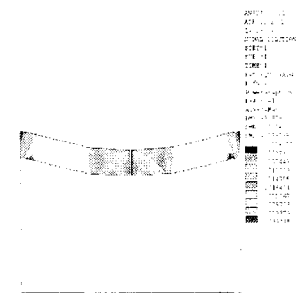
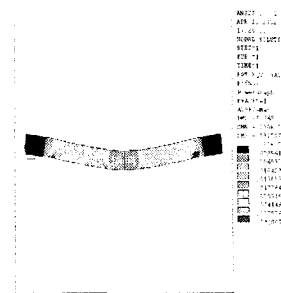
(b)p40-2-110(strain)



(c)p40-6-80(stress)



(d)p40-6-80(strain)



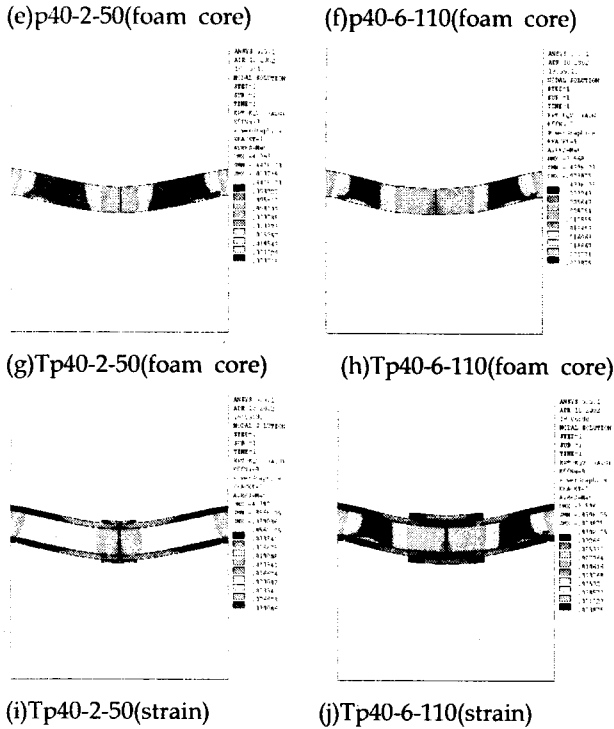
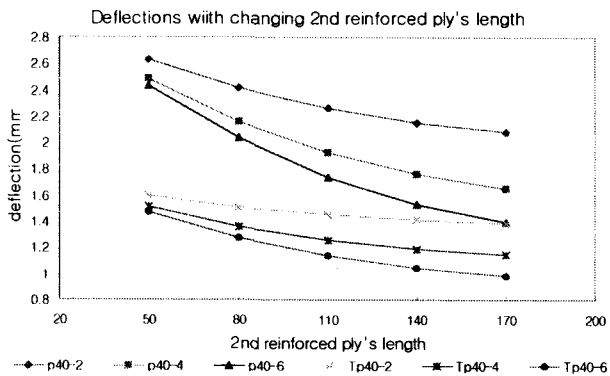
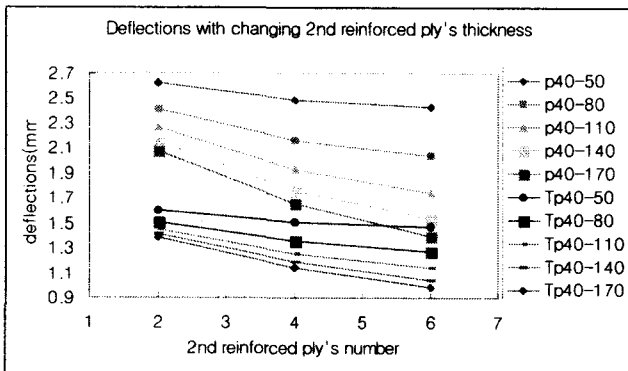


Fig. 7 FEM simulation result of sandwich beams with stress and strain



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



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

thickness

Fig. 8 Deflection curves for FEM simulation result of sandwich beams

5. 결론

본 연구에서는 실험과 simulation을 통하여 2차 보강의 두께와 길이의 변화에 따른 시편의 거동특성에 주목하여 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. Thin face sandwich beam 의 2차 보강 두께의 결정 - Thin face sandwich beam 자체 face 두께의 1~2배 정도의 2차 보강을 하는 것이 굽힘강도 면에서 가장 효율적이다.
2. Thick face sandwich beam 의 2차 보강 두께의 결정 - Thick face sandwich beam 자체 face의 두께만큼 2차 보강을 하는 것이 굽힘강도 면에서 가장 효율적이다.
3. 2차 보강의 길이는 span 길이의 1/3 ~ 1/2 사이에서 하는 것이 강도 면에서 가장 효율적이다.

앞으로 sandwich beam 에 대한 2차 접착 보강ply의 두께 및 길이에 대한 다양한 연구가 이루어져, FRP sandwich 구조물의 유지 및 보수의 측면에 있어서의 최적설계 좀더 공학적인 접근이 필요하다 하겠다.

참고 문헌

Crocombe, A.D. and Adams, R, D (1981), "Peel Analysis Using the Finite Element method" Journal of Adhesion, Vol. 12, p. 127-13.

Erdogan, F. and Ratwani, M (1971), "Stress Distribution in Bonded Joint" Journal of Composite Material, July, Vol. 5, No. 3, p. 378-393

Liyong Tong, Grant p. Steven (1999) "Analysis and Design of Structural Bonded Joints" Kluwer Academy Publishers, p.1-69,

James M. Whitney (1984) "Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials" The Society of Experimental Mechanics.

Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions, ASTM C 393-94