

# GFRP보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 휨 거동

## Flexural Behaviors of Sandwich Panels of Polymer Mortar Reinforced with GFRP

지경용\*      연구석\*\*      유근우\*\*\*      김남길\*\*\*\*      권윤환\*\*\*

Ji, Kyong Yong    Yeon, Kyu Seok    You, Keun Woo    Jin, Nan Ji    Kwon, Yoon Hwan

### ABSTRACT

In this study, a polymer mortar sandwich panel (PMSP) was developed : Core was made with the polymer mortar whose compressive strength was about 840 kgf/cm<sup>2</sup>, and both facings were made with the glass fiber reinforced plastics (GFRP). The results showed that the strain energies and the ductility indices increased 16-340 times and 2-8 times, respectively, as the thicknesses of facings increased from 0.6 to 3.0mm with fixing the core thickness to constants (12-36mm). On the other hand, these values showed a tendency of decrease as the core thickness increased regardless of thickness of facings. A set of basic data for the structural analysis could be provided by investigating the correlations, within the scope of this research, between the resisting moment and the thicknesses of core and facings.

### 1. 서론

폴리머 콘크리트나 모르타르는 일반 시멘트 콘크리트나 모르타르에 비해 압축, 휨 및 인장강도가 높을 뿐만 아니라 내약품성 및 내동결융해 등 내구성이 우수하여 지하나 해양 등 열악환경 조건하에서의 구조부재로 널리 이용되어 지고 있다. 폴리머 콘크리트는 자체 재료가 고가이고 압축강도에 비해 탄성계수가 상대적으로 작기 때문에 보나 기둥과 같은 단면두께가 두꺼운 부재보다는 단면형상에 비해 두께가 얇은 박스 구조물이나 관체와 같은 면재로 이용되어지는 경우가 대부분이다. 단면두께가 얇은 휨부재는 중립축 길이가 짧아 보에서와 같은 인장축 보강철근에 의한 내하력이나 연성 증대 효과는 기대하기 어렵다. 이러한 얇은 두께를 갖는 휨부재는 중립축 길이를 최대한 크게 할 수 있고 또한 부착이나 구속 및 인장보강에 의한 균열억제 및 하중증대 효과를 극대화 할 수 있는 섬유보강 면재로 형성되는 샌드위치구조 보강형식이 경제적으로나 역학적으로 가장 유리하다고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 중심부가 폴리머 모르타르이고 양표면부가 우주항공, 선박제조분야에서 널리 이용되고 있고 그 우수성이 입증된 고인장, 고내구성의 GFRP(Glass fiber reinforced plastics)로 보강된 샌드위치를 제작하고 이에 대한 휨특성을 실험적으로 고찰함으로써 GFRP보강 폴리머모르타르를 이용한 제품의 단면결정시 기초적인 자료로 제공코저 한다.

- \* 정회원, 강원대학교 대학원 석사
- \*\* 정회원, 강원대학교 농업공학부 교수
- \*\*\* 정회원, 강원대학교 대학원 석사과정
- \*\*\*\* 정회원, 강원대학교 대학원 박사과정

## 2. 사용재료

중심부 폴리머 모르타르 제조에 사용된 폴리머 모르타르는 국내시판 중인 국내 A사의 불포화 폴리에스터 수지로 코발트계 경화촉진제가 첨가되어 있는 액상인 올소타입(Ortho type)을 사용하였으며, 경화수축을 감소시키기 위해 열가소성인 폴리스티렌을 스티렌 모노머에 용해시킨 Shrinkage-reducing agent를 사용하였다. 충전제는 중질 탄산칼슘을 사용하였고, 골재는 국내 K사의 규사를 사용하였다. 충전제와 골재는 함수율이 0.3%미만이 되도록 충분히 건조시켰다. 또한 FRP적층용 수지는 중심부 폴리머 모르타르의 결합재와 동일한 종류의 불포화 폴리에스터 수지를 사용하였고 보강용 유리섬유는 Roving cloth와 표면마무리용 Lining용 Cloth 두종류의 유리섬유를 사용하였다.

## 3. 시험체 제작

### 3.1 폴리머 모르타르 공시체 제작

KS F 2419의 (폴리에스테르 레진 콘크리트의 강도 시험용 시험체 제작방법)의 제작방법에 의해 공시체를 제작하였다. 사용된 폴리머 모르타르 배합비는 Table 1과 같다.

Table 1 Mix proportion of polymer mortar (unit : wt %)

Binder			Filler	Fine aggregate
UP*	SR**	Initiator contents (phr***)		
14.45	2.55	1.0	17	66

Notes : UP\* : Unsaturated polyester resin SR\*\* : Shrinkage reducing agent phr\*\*\* : Parts per hundred parts of resin

### 3.2 GFRP인장시편 제작

GFRP두께와 인장강도, 인장탄성율의 관계를 고찰하기 위해 Hand lay up 공법으로 적층 성형한 1.3, 1.9, 2.5, 3.1, 3.7, 4.3mm 두께의 인장시편을 KS F 2241(유리 섬유 강화 플라스틱의 인장시험방법)의 규정대로 정밀가공 하였고, 시편중앙부의 일률적인 파괴를 유도하기 위해 시편중앙부에 1mm의 Noth를 두었다.

### 3.3 GFRP보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널 시험체의 제작

중심부 폴리머 모르타르 두께가 12, 24, 36mm이고 압축·인장축 GFRP 보강층 두께를 1.9, 2.5, 3.1, 3.7로 변화시킨 300×500mm 크기 샌드위치 구조형식의 12종류 얇은 평판 시험체를 제작하였다.

## 4. 시험방법

### 4.1 폴리머 모르타르 역학적 성질시험

중심부 폴리머 모르타르의 역학적 성질을 파악하기 위하여 KS F 2481(폴리에스테르 레진 콘크리트의 압축강도 시험방법), KS F 2482 (폴리에스테르 레진 콘크리트의 휨강도 시험방법), KS F 2480 (폴리에스테르 레진 콘크리트의 인장강도), KS F 2438 (콘크리트 원주 시험체의 정탄성계수 및 프와슨 비 시험방법)에 따라 압축, 휨, 조깅인장강도 및 탄성계수를 측정하였다.

### 4.2 GFRP 인장시험

GFRP 인장시험은 KS F 2241(유리 섬유 강화 플라스틱의 인장 시험 방법)에 따라 실시하였다.

### 4.3 GFRP보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널 휨시험

하중은 변위 제어방식을 취하여 최대용량 25tonf인 Instron사의 만능시험기를 이용하여 0.5mm/min의 일정속도로 재하 하였고. 하중방향과 같은 방향으로 LVDT(변위 측정기)를 설치하고, 시험체의 인장축과 압축축 중앙부에 각각 스트레인 게이지를 부착하여 재하단계별 처짐과 변형률을 연속적으로 측정하였다. Photo. 1에 3점 재하에 의한 평판의 휨시험광경을 나타내었다.

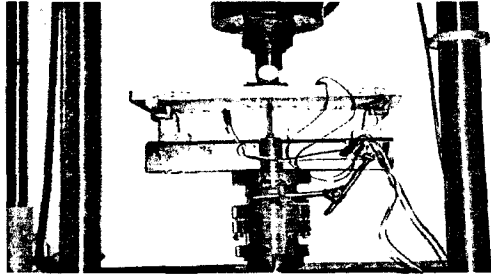


Photo. 1 View of flexural test for PMSP

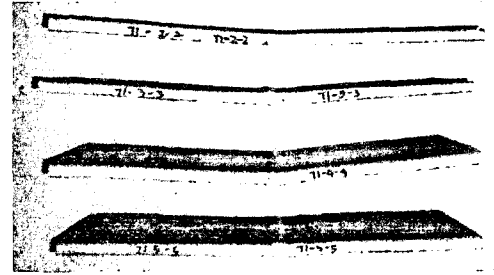


Photo. 2 Failure mode of PMSP

## 5. 결과 및 고찰

### 5.1 폴리머 모르타르 역학적 성질

폴리머 모르타르의 압축, 조깅인장, 휨강도 및 탄성계수는 각각 844kgf/cm<sup>2</sup>, 90kgf/cm<sup>2</sup> 및 223kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났는데 이는 비슷한 수준의 압축강도를 갖는 고강도 시멘트 콘크리트에 비해 조깅인장, 휨강도는 상대적으로 높은 수준인 반면 탄성계수는  $2.03 \times 10^5$ kgf/cm<sup>2</sup>로 상대적으로 작은 값을 나타내었다.

### 5.2 GFRP 인장강도특성

GFRP의 인장응력은 적층수에 관계없이 변형율의 증가에 따라 직선적으로 증가하다가 변형율 3%정도에서 일률적으로 파단되었다. 또한 인장강도는 보강층 두께에 관계없이 2970~2980kgf/cm<sup>2</sup>의 값을 나타냈는데 이는 폴리머 모르타르의 인장강도 90kgf/cm<sup>2</sup>에 비해 훨씬 높은 값이다. 한편 인장탄성계수도 보강층 두께에 관계없이  $1.04 \sim 1.05 \times 10^5$ kgf/cm<sup>2</sup>으로 폴리머 모르타르의 50%수준을 나타내었다. Table 2에 GFRP의 보강층수에 따른 역학적성질을 나타내었다.

Table 2 Mechanical properties of GFRP according to thickness

Series	Roving cloth		Tensile strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Secant elastic modulus (10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	Strain (%)
	Number of layers	Thickness (mm)			
GFT 1,2,3,4,5,6	1,2,3,4,5,6	0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0, 3.6	2970~2980	1.04~1.05	3±0.05

### 5.3 GFRP보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널 휨 특성

GFRP보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 파괴는, 중심부 폴리머 모르타르 두께 및 압축·인장축 유리섬유 적층수에 관계없이 하중의 증가에 따라 중심부 인장축 폴리머 모르타르에서 초기 휨균열이 발생 및 진전되다가 인장축 GFRP파단에 의해 최종 파괴되었다. 초기휨균열이 발생한 후에도 인장축 GFRP의 인장보강효과 및 압축축 GFRP - 중심부 폴리머모르타르 - 인장축GFRP에 의한 스트럿-타이효과에 의해 판상시험체는 상당한 연성을 나타내었다. Photo. 2에 시험체의 파괴양상을 나타내었다.

#### 5.3.1 변형에너지

외부하중에 의해 발생된 변형 에너지가 휨부재가 파괴될 때 까지 전부 부재에 축적된다는 가정하에 휨부재

가 흡수할 수 있는 변형에너지를 산출한다. 즉 단계별 하중크기와 그 하중에 의해 이동된 미소거리의 적분에 의한 식(1)에 의해 구해진다. 이는 또한 실험적으로 하중-처짐곡선 면적으로부터 간단히 구해진다.

$$W = \int P_i d(\delta) \quad \text{----- (1)}$$

Fig. 1~3에 각각 중심부 폴리머 모르타르 두께에 따른 GFRP층 보강두께에 따른 하중-처짐 곡선을 나타냈다. 압축, 인장 GFRP 보강층 두께가 0에서 1.3~3.7mm로 증가 할 때 폴리머 모르타르 두께가 12mm인 경우에는 변형에너지가 0.9에서 100.1~308.9kgf/m·m로 약 110~340배 증가하였고, 폴리머 모르타르 두께가 24mm인 경우에는 2.1에서 117.5 ~ 273.5 kgf/m·m로 약 56~130배 증가하였으며, 폴리머 모르타르 두께가 36mm인 경우에는 4.4에서 68.8 ~ 151.7 kgf/m·m로 약 16~34배 증가하여 중심부 폴리머 모르타르 두께가 증가함에 따른 GFRP보강에 의한 변형에너지는 감소하는 경향을 나타내었다.

### 5.3.2 연성지수

한편 철근 콘크리트 보나 슬래브의 연성지수는 하중-처짐곡선이나 곡률-모멘트 곡선에 의한 변위 연성지수와 곡률 연성지수로 정의할 수 있다. 이때 연성지수란 부재가 휨 능력에 큰 감소 없이 변형을 일으킬 수 있는 능력을 나타내는 지표로서 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad \text{---- (2)} \quad \text{여기서, } \Delta_u : \text{최대하중시의 변위 } \Delta_y : \text{인장철근이 항복시의 변위.}$$

본 실험에서는 GFRP보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널 휨 특성상 연성지수를 식(3)과 같이 변환시켜 적용코저 한다.  $\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_c}$  ---- (3) 여기서  $\Delta_u$  : 최대하중시의 변위  $\Delta_c$  : 폴리머 모르타르 균열발생시 변위

Fig. 1~3에서 볼 수 있듯이 폴리머 모르타르의 초기균열발생시 처짐은 GFRP의 보강효과에 의해 무보강시의 2mm 정도에서 5mm정도로 현저히 증가하여 GFRP의 균열억제와 중심부 모르타르 구속효과에 의한 폴리머 모르타르 강도증진을 확인 할 수 있었다.

압축, 인장 GFRP 보강층 두께가 0에서 1.3~3.7mm로 증가 할 때 폴리머 모르타르 두께가 12mm인 경우에는 연성지수가 7~8정도 나타났고 , 폴리머 모르타르 두께가 24mm인 경우에는 4~5정도 나타났으며, 폴리머 모르타르 두께가 36mm인 경우에는 2~3정도의 값으로 변형에너지와 마찬가지로 GFRP층 보강두께에 관계없이 중심부인 폴리머 모르타르 두께의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내었다.

Table 3에 시험체별 최대하중, 최대변위, 균열발생시 변위, 연성지수 및 변형에너지를 나타내었다.

### 5.3.3 극한모멘트 추정식

유리섬유 적층수와 중심부 폴리머 모르타르 두께를 변수로 회귀분석한 결과 이들 두가지 모두 GFRP 보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 휨모멘트와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

그 결과 폴리머 모르타르의 역학적 성질이 일정할 경우 GFRP 보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 극한모멘트에 대한 추정식을 다음과 같은 지수함수식으로 표시할 수 있다.

$$M_{res} = a \cdot e^{bx} \quad \text{----- (4)}$$

여기서,  $M_{res}$  : GFRP 보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 휨모멘트

$x$  : 유리섬유 적층수 (층)  $a, b$  : 중심부 폴리머 모르타르 두께에 의해 결정되는 실험상수

#### ① 실험상수 a, b의 결정

Fig. 7에는 중심부 폴리머 모르타르 두께와 실험상수 a, b와의 관계를 나타낸 것이다. 회귀분석을 통해 중심부의 두께에 따른 실험상수 a, b에 대한 함수식을 구하였다.

#### ② 극한모멘트 추정식

이상과 같이 상관관계 분석을 통해 극한 모멘트에 대한 추정식을 다음과 같이 제안 할 수 있다.

$$M_{res} = 6.1454t^{1.3113} e^{(-0.0095t + 0.7084)x} \quad \text{-----(5)}$$

여기서,  $M_{res}$  : GFRP 보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 최대모멘트(kgf · m/m)

$t$  : 중심부 폴리머 모르타르 두께(cm),  $x$  : 유리섬유 적층수 (층)

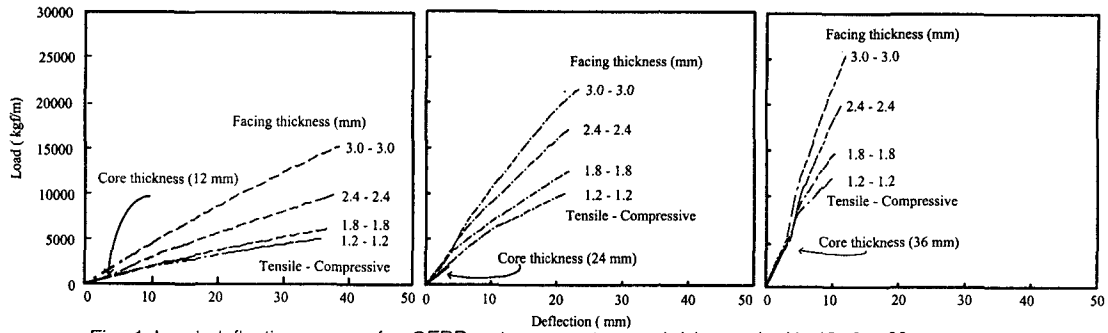


Fig. 1 Load-deflection curves for GFRP polymer mortar sandwich panel with 12, 24, 36mm core thickness

Table 3. Strain energy of GFRP-Reinforced PMSP

Series	Core thicknesses (mm)	Facing thicknesses Tensile-compressive (mm)	Failure load (kgf/m)	Deflection (mm)	Cracking deflection (mm)	Ductility Index ( $\bar{u}$ )	Strain energy (kgf/m · m)
T1-0-0	12	0-0	529	2.39	$4.8 \pm 0.1$	-	0.9
T1-2-2		1.2-1.2	4,987	35.6		7.4	100.1
T1-3-3		1.8-1.8	6,105	36.4		7.6	118.8
T1-4-4		2.4-2.4	9,766	37.4		7.8	191.6
T1-5-5		3.0-3.0	15,228	38.4		8.0	308.9
T2-0-0	24	0-0	2,115	2.1	$4.7 \pm 0.1$	-	2.1
T2-2-2		1.2-1.2	10,032	21.1		4.5	117.5
T2-3-3		1.8-1.8	12,500	21.7		4.6	153.3
T2-4-4		2.4-2.4	17,142	21.8		4.6	204.0
T2-5-5		3.0-3.0	21,502	23.4		5.0	273.5
T3-0-0	36	0-0	4,753	1.9	$4.4 \pm 0.1$	-	4.4
T3-2-2		1.2-1.2	11,976	9.9		2.3	68.8
T3-3-3		1.8-1.8	14,700	10.3		2.3	81.9
T3-4-4		2.4-2.4	19,953	11.3		2.6	111.4
T3-5-5		3.0-3.0	25,325	11.9		2.7	151.7

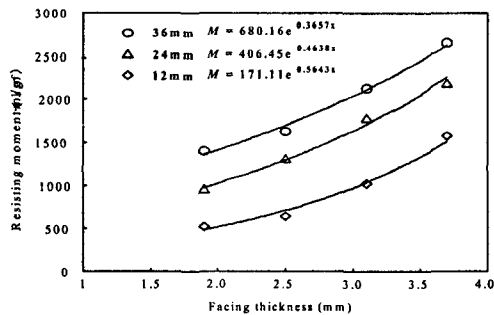


Fig. 2 Relationship between bending moment and facing thickness

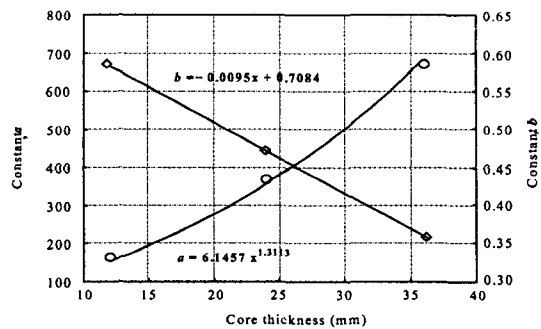


Fig. 3 Correlation between constant a, b and core thickness

## 6. 결론

본 연구는 GFRP 보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 휨거동을 실험적으로 구명한 것으로 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 폴리머 모르타르의 압축, 쪼갬인장, 휨강도 및 탄성계수는 각각 844kgf/cm<sup>2</sup>, 90kgf/cm<sup>2</sup>, 223kgf/cm<sup>2</sup>,  $2.03 \times 10^5$ kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다.
- 2) 보강층 두께에 관계없이, GFRP 인장강도는 2970~2980kgf/cm<sup>2</sup>의 값을 나타냈고 인장탄성계수는  $1.04 \sim 1.05 \times 10^5$ kgf/cm<sup>2</sup>으로 나타났다.
- 3) 압축, 인장 GFRP 보강층 두께가 0에서 1.3~3.7mm로 증가 할 때 변형에너지는 16~340배 증가하였는데 중심부 폴리머 모르타르 두께가 증가함에 따라 증가율은 감소하였다.
- 4) 압축, 인장 GFRP 보강층 두께가 0에서 1.3~3.7mm로 증가 할 연성지수는 2~8배 증가하였는데 중심부 폴리머 모르타르 두께가 증가함에 따라 증가율은 감소하였다.
- 5) 본 실험범위에서 중심부 모르타르 두께  $t$ 와 유리섬유 적층수  $x$  및 극한모멘트  $M_{res}$ 사이에는 다음과 같은 상관관계가 존재하였다.

$$M_{res} = 6.1454t^{1.3113} e^{(-0.0095t + 0.7084)x}$$

- 6) 유리섬유로 보강 폴리머 모르타르(콘크리트) 샌드위치 형식의 얇은 판재에 대한 깊이 있는 연구를 위해서는 좌굴이나 4변지지된 판재에 대한 보다 다양한 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합신소재제품연구센터의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고 문헌

1. 지경용, "GFRP 보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 휨거동," 강원대학교 대학원 석사학위논문, 2001.
2. 大濱嘉彦, 出村克宜, "ポリマーコンクリート", シーエムシー, pp. 72-132, 1984.
3. 유능환, 연규석, 김기성, 이윤수, 최동순, "FPR보강 폴리머 모르타르 패널의 역학적 특성," 한국농공학회 학술발표회 논문집, pp. 342-347, 1999.
4. 宮入裕夫, "サンドイッチ構造の基礎," 日刊工業新聞社, 1999.
5. 우홍식, 이갑래, 한지원, "재료파괴공학," 보성문화사, 1993.
6. 藤井太一, 座古 勝, "複合材料の破壊と力學," 實教出版株式會社, 1992.