

# GFRP보강 MMA개질 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 휨 거동

## Flexural Behavior of Sandwich Panels Using MMA Modified Polymer and GFRP

연규석\*      유근우\*\*      주명기\*\*\*      김남길\*\*      권윤환\*\*  
Yeon, Kyu Seok    Ryu, Keun Woo    Joo, Myung Ki    Jin, Nan Ji    Kwon, Yoon Hwan

### ABSTRACT

In this study, a MMA modified polymer mortar sandwich panels was developed : Core was made with the MMA modified polymer mortar whose compressive strength was about 1020 kgf/cm<sup>2</sup>, and both facings were made with the glass fiber reinforced plastics (GFRP). The results showed that the strain energies increased 20-33 times, respectively, as the thicknesses of facings increased from 1.50 to 2.76 mm with fixing the core thickness to constants (30-50 mm). 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. 서 론

최근 구조물들의 고층화, 대형화되어 감에 따라 새로운 건설재료가 요구되고 있어 건설 신소재의 개발 및 적용이 절실히 요구되고 있다. 이에 부응 할 수 있는 건설재료로서 일반 시멘트 콘크리트나 모르타르에 비해 압축, 휨 및 인장강도가 높으며, 내약품성 및 내동결융해 등 내구성이 우수한 폴리머 콘크리트 및 모르타르에 대한 관심이 높아지고 있고 연구 또한 활발히 진행되고 있다.

이러한 여러 장점을 가지고 있는 폴리머 콘크리트는 생산단가가 높고 압축강도에 비해 탄성계수가 상대적으로 작기 때문에 보나 기둥과 같은 두꺼운 부재보다는 단면형상에 비해 두께가 얇은 박스 구조물이나 관체와 같은 면재로 이용되어지는 경우가 대부분이다. 단면두께가 얇은 부재는 중립축 길이가 짧아 보와 같이 보강철근에 의한 내하력이나 연성 증대 효과는 기대하기 어렵다. 이러한 얇은 두께를 갖는 휨부재는 중립축 길이를 최대한 크게 할 수 있고 또한 부착이나 구속, 인장보강에 의한 균열억제 및 하중 증대 효과를 극대화 할 수 있는 섬유보강 샌드위치구조 보강형식이 경제적으로나 역학적으로 가장 유리하다고 판단된다. 하지만 아직까지 폴리머 모르타르를 이용한 섬유보강 샌드위치 패널의 개발에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 중심부를 MMA개질 폴리머 모르타르로 하고 양표면부를 고인장, 고내구성인 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)로 보강하여 샌드위치를 제작하고, 이에 대한 단순 휨시험을 실시하여 GFRP보강 MMA개질 폴리머 모르타르 샌드위치패널의 단면결정시 필요한 설계 휨 모멘트의 산정을 위한 기초적인 자료로 제공코저 한다.

### 2. 사용재료

- \* 정희원, 강원대학교 농업공학부 교수
- \*\* 정희원, 강원대학교 농업공학부 대학원
- \*\*\* 정희원, 강원대학교 석재복합신소재제품연구센터 전임연구원

## 2.1 MMA개질 폴리머 모르타르

MMA개질 폴리머 모르타르의 제조에 사용된 결합재는 기존 폴리머 모르타르의 작업성 및 내구성 개선을 위해 국내 H사의 MMA 와 A사의 불포화 폴리에스터 수지를 혼합하여 사용하였고, 경화수축 저감을 위해 수축저감제를 첨가했다. 골재는 국내 K사의 규사, 충전재는 중질탄산칼슘을 사용했다.

## 2.2 GFRP

GFRP 보강층 제작을 위해 사용된 유리섬유는 국내 H사에서 생산되는 Roving cloth를, 결합재로는 MMA개질 폴리머 모르타르 결합재와 동일한 것을 사용하였다.

## 3. 시험체 제작

### 3.1 폴리머 모르타르

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

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

Binder				Filler	Fine aggregate
UP*	SR**	MMA***	Initiator contents (phr****)		
6.0	1.2	4.8	2.0	18.0	70

Notes UP\* : Unsaturated polyester resin  
MMA\*\*\* : Methyl Methacrylate

SR\*\* : Shrinkage reducing agent  
phr\*\*\*\* : Parts per hundred parts of resin

### 3.2 GFRP인장시편

GFRP인장시편의 제작은 Hand lay up 공법에 의하여 두께 0.98, 1.50, 2.05, 2.76, 3.45mm로 제작한 후 KS F 2241(유리 섬유 강화 플라스틱의 인장시험방법)에 따라 정밀가공 하였으며, 시편중앙부의 일률적인 파괴를 유도하기 위해 중앙부에 1mm의 노치를 두었다.

### 3.3 GFRP보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널

시험체는 중심부 폴리머모르타르 두께가 각각 30, 40, 50 mm이고, 압축·인장축 GFRP의 보강층 두께가 1.50, 2.05, 2.76 mm인 GFRP보강 폴리머 모르타르 샌드위치 시험체 9종, 두께가 30, 40, 50인 무보강 폴리머 모르타르의 시험체 3종 및 지름이 5 mm이고 간격이 7.5×7.5 cm인 와이어메쉬로 보강된 시험체 3종으로 총 15종의 시험체를 제작했고, 시험체 크기는 25×100 cm로 하였다.

## 4. 시험방법

### 4.1 폴리머 모르타르의 강도특성

강도 시험은 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 최대용량 25tonf인 Instron사의 만능시

험기를 이용하여 실시하였고, 변위제어방식으로 1 mm/min의 일정속도로 재하하였다.

#### 4.3 GFRP보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 휨시험

샌드위치 패널의 휨시험은 3점 재하방식으로 최대용량 25 tonf인 Instron사의 만능시험기를 이용하여 0.8 mm/min의 일정속도로 재하하였고, 하중방향과 같은 방향에 LVDT(변위 측정기)를 설치하고, 시험체의 인장측과 압축측 중앙부에 각각 스트레인 게이지를 부착하여 재하 단계별 처짐과 변형률을 연속적으로 측정하였다.

### 5. 결과 및 고찰

#### 5.1 MMA개질 폴리머 모르타르의 역학적 성질

MMA개질 폴리머 모르타르의 압축, 쪼갬인장, 휨강도 및 탄성계수는 각각 1020 kgf/cm<sup>2</sup>, 138 kgf/cm<sup>2</sup> 및 240 kgf/cm<sup>2</sup>,  $2.3 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

#### 5.2 GFRP의 인장강도특성

GFRP의 두께에 관계없이 인장응력은 변형율의 증가에 따라 직선적으로 증가하다가 변형율 3%정도에서 일률적으로 파단되었다. 또한 인장강도는 보강층 두께에 관계없이 2,870~3,020 kgf/cm<sup>2</sup>의 값을 나타냈고, 인장탄성계수와 파단신율도 GFRP의 두께에 관계없이  $1.02 \sim 1.03 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>,  $3 \pm 0.05$  %로 거의 일정한 값을 보였다.

#### 5.3 GFRP보강 MMA개질 폴리머 모르타르 샌드위치 패널 휨 특성

##### 5.3.1 하중-처짐 곡선

Fig. 1에 중심부 폴리머 모르타르의 두께별 하중-처짐 곡선을 나타내었다. 하중-처짐 곡선의 기울기는 중심부 폴리머 모르타르의 초기 균열 발생전후로 큰 변화를 보였다. 구역 ①의 경우 중심부 폴리머 모르타르에 균열이 발생하지 않고 단면 전체가 유효하게 작용하는 구간이며, 구역 ②의 경우는 중심부 폴리머 모르타르 하단에서 균열 발생 후 점차 중립축까지 균열이 진전되는 단계로 구역①에 비해 강성이 저하되어 하중 증가에 따른 처짐이 ①구역에 비해 크게 나타났다. 또한 중심부 폴리머 모르타르의 두께가 증가함에 따라 최대처짐 발생량은 약 50 mm에서 30 mm로 감소하는 경향을 나타냈다. 아울러, 중심부 폴리머 모르타르의 두께가 30~50 mm의 범위내에서 철근보강에 비해 GFRP에 의한 표면 보강효과가 현저히 큼을 확인 할 수 있었다.

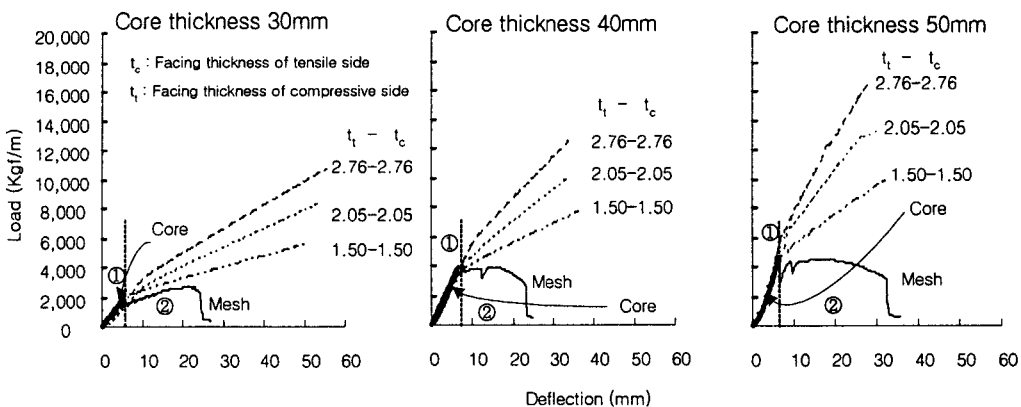


Fig. 1 Load-deflection curves for GFRP polymer mortar sandwich panels with core thickness of 30, 40, 50 mm

### 5.3.2 변형에너지

변형에너지의 산정은 실험적으로 하중-처짐 곡선의 면적으로부터 간단히 구할 수 있으며, 산정식은 식(1)과 같다.

$$W = \int P_i d(\delta) \quad (1)$$

여기서,  $P_i$ 는 단계별 하중이며,  $\delta$ 는  $P_i$ 에 대응되는 하중 단계별 처짐량이다. Fig. 1에 나타난 하중-처짐 곡선으로부터 변형에너지를 산출한 결과 GFRP 표면보강에 의한 폴리머 모르타르의 변형에너지는 중심부 폴리머 모르타르의 두께에 관계없이 보강층 두께가 1.50 mm에서 2.76 mm로 증가함에 따라 무보강에 비해 약 40~70배 증가하여 철근보강에 의한 9~10배 보다 현저한 보강효과를 나타내었다.

Table 2 Strain energy of GFRP reinforced MMA modified polymer mortar sandwich panels

Series	Core thickness (mm)	Facing thicknesses (mm)		Failure load (kgf/m)	Deflection (mm)	Strain energy (kgf/m · m)
		Compressive	Tensile			
T3-0-0-0	30	-		1,600	4.72	3.7
T3-0-0-M		Mesh		2,630	26.98	34
T3-2-2-G		1.50	1.50	5,354	48.71	157
T3-3-3-G		2.05	2.05	7,271	45.36	198
T3-4-4-G		2.76	2.76	9,553	55.68	254
T4-0-0-0	40	-		2840	3.52	4.9
T4-0-0-M		Mesh		3,860	24.86	46
T4-2-2-G		1.50	1.50	7,784	36.20	178
T4-3-3-G		2.05	2.05	9,962	33.87	226
T4-4-4-G		2.76	2.76	12,964	35.63	263
T5-0-0-0	50	-		4440	2.82	6.2
T5-0-0-M		Mesh		4,509	35.79	57
T5-2-2-G		1.50	1.50	9,962	33.21	210
T5-3-3-G		2.05	2.05	13,262	30.01	246
T5-4-4-G		2.76	2.76	16,493	27.99	270

### 5.3.3 극한 모멘트 산정을 위한 이론식

#### 1) 단면해석

GFRP 보강 폴리머 모르타르 샌드위치 평판의 휨거동은 크게 중심부 폴리머 모르타르의 균열 발생전 및 균열 발생후 두 단계로 나눌수 있는데, 균열전의 휨거동은 GFRP 및 폴리머 모르타르의 탄성계수, 응력-변형을 관계 등 재료적 특성만 주어지면 탄성이론을 이용하여 쉽게 해석할 수 있으나, 중심부 폴리머 모르타르 균열 발생후의 휨거동은 이론해석이 거의 불가능하다. 한편 압축·인장 보강층이 상대적으로 강하고 중심부의 면재는 상대적으로 약한 통상적인 샌드위치 구조형식의 휨거동에 대한 이론적 연구는 많이 이루어져 왔으나, 중심부가 폴리머 모르타르와 같이 매우 강한 재료로 이루어진 샌드위치 구조형식에 대한 연구는 그다지 많지 않은 실정이다. 본 연구에서는 극한 휨모멘트 산정시 필요한 극한변형율의 요인을 실험적으로 구명하여 이를 이용한 극한 모멘트 이론식을 제안코자 한다.

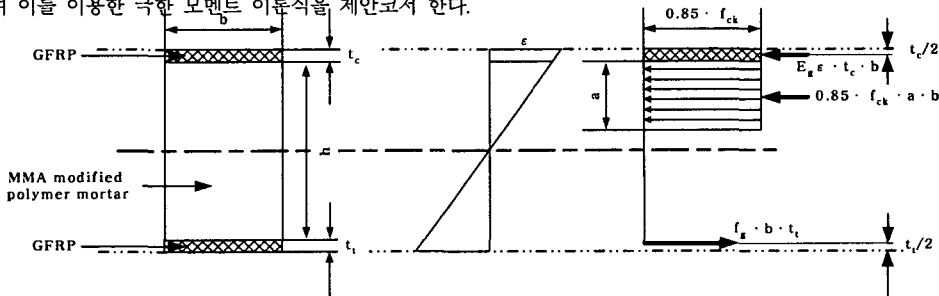


Fig. 2 Strain and stress block

부재가 힘을 받을때, 단면에서 압축력과 인장력 평형조건에 의해 식(2)와 같은 관계식이 존재한다.

$$E_g \cdot \varepsilon \cdot b \cdot t_c + 0.85f_{ck} \cdot a \cdot b = f_g \cdot b \cdot t_i \quad (2)$$

여기서,  $E_g$  : GFRP 탄성계수,  $\varepsilon$  : 극한하중시 압축측 GFRP 변형율,  $b$  : 부재의 폭  
 $t_c$  : 압축측 GFRP층 두께,  $f_{ck}$  : 폴리머 모르타르 압축강도  $a$  : 직사각형 응력블록 깊이  
 $f_g$  : GFRP 인장강도  $t_i$  : 인장측 GFRP층 두께

식 (2)로부터 직사각형 응력블록 깊이  $a$ 는 식 (3)과 같이 표시할 수 있다

$$a = \frac{f_g \cdot t_i - E_g \cdot \varepsilon \cdot t_c}{0.85f_{ck}} \quad (3)$$

따라서, 극한 모멘트 산정식 (4)을 얻을 수 있다.

$$M_{ult} = 0.85f_{ck} \cdot a \cdot b \cdot \left(h - \frac{a}{2} + \frac{t_i}{2}\right) + E_g \cdot \varepsilon \cdot t_c \cdot b \cdot \left(h + \frac{t_i}{2} + \frac{t_c}{2}\right) \quad (4)$$

극한 모멘트 산정을 위한 식 (4)에서 극한 하중시의 압축측 변형율  $\varepsilon$ 을 제외한 모든 변수는 부재의 단면치수 및 각 소재의 재료상수에 의해 쉽게 얻을 수 있으므로 압축측 변형율  $\varepsilon$ 만 알면 극한 모멘트의 이론적 예측이 가능하다.

### 2) 압축측변형률

Fig. 3과 같은  $h-\varepsilon$  산점도에 의한 상관관계 회귀분석결과 이들 사이에는 식(5)과 같은 로그함수관계가 존재함을 알 수 있었다.

$$\varepsilon = a \cdot \ln(h) + b \quad (5)$$

한편, 실험변수  $a$  및  $b$ 와 중심부 폴리머 모르타르의 두께 사이에는 Fig. 4와 같은 선형관계가 존재하여 극한하중시의 압축측 변형율  $\varepsilon$ 와 압축·인장측 GFRP층 및 중심부 폴리머 모르타르 두께와 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 이러한 관계는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = (-51.67 \cdot h + 7738.6) \cdot \ln(t) + (-87.58 \cdot h + 8502.6) \quad (6)$$

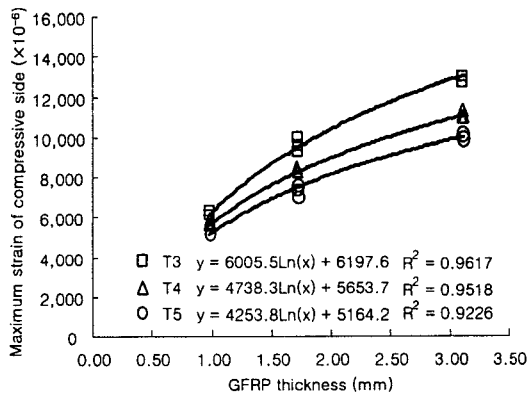


Fig. 3 Relationship between maximum strain of compressive side and GFRP thickness

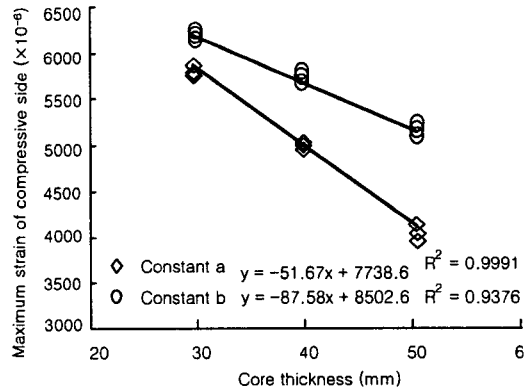


Fig. 4 Correlation between constant a, b and core thickness

### 3) 이론식 타당성

Table 3에 식 (4) 및 식 (6)로부터 구해지는 극한 모멘트 이론값과 실험 결과값을 나타내었다. 극한 모멘트 이론값과 실험 결과값을 비교한 바 매우 그집한 양상을 보임으로써 이론값의 적용에 무리가 없을것으로 판단된다.

Table 3 Comparison of predicted and measured resisting moment

Core thickness (cm)	GFRP thickness (cm)		Maximum strain of compressive side	$M_n$ (kgf · cm/m)		Flexural strength (kgf/cm <sup>2</sup> )
	Compressive	Tensile		Measured	Predicted	
30	0.1500	0.1500	8385	120,486	130,116	803
	0.2050	0.2050	10319	163,590	175,570	1,091
	0.2762	0.2762	11680	203,254	232,393	1,355
40	0.1500	0.1500	7300	172,125	175,745	645
	0.2050	0.2050	9073	224,156	237,508	841
	0.2762	0.2762	10320	280,145	315,127	1,051
50	0.1500	0.1500	6215	224,140	221,330	538
	0.2050	0.2050	7826	289,154	299,354	694
	0.2762	0.2762	8960	372,154	397,680	893

## 6. 결론

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

- 1) MMA개질 폴리머 모르타르의 압축, 인장, 휨강도 및 탄성계수는 각각 1,020, 138, 240 및  $2.3 \times 10^6$  kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다.
- 2) GFRP의 두께에 관계없이 인장강도는 2,870~3,020 kgf/cm<sup>2</sup>의 값을 나타냈고 인장탄성계수는  $1.02 \sim 1.03 \times 10^5$  kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다.
- 3) 본 실험범위에서 극한하중시 압축측 변형율과, 중심부 모르타르 두께  $h$  및 GFRP 보강두께  $t_g$ 에 사이에는 다음과 같은 상관관계가 존재하였다.

$$\epsilon = (-51.67 \cdot h + 7738.6) \cdot \ln(t) + (-87.58 \cdot h + 8502.6)$$

- 4) 압축측 GFRP의 최대 변형을 추정식을 사용해 산정한 GFRP 보강 MMA개질 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 최대 저항 모멘트 이론값과 실험값은 매우 잘 부합되었다.
- 5) 중심부 MMA개질 폴리머 모르타르의 두께에 관계없이 압축 및 인장 GFRP 보강층 두께가 0에서 1.50~2.76 mm로 증가함에 따라 휨강도는 2.3~5.6배로 현저히 증가하였다.
- 6) 중심부 MMA개질 폴리머 모르타르의 두께에 관계없이 압축 및 인장 GFRP 보강층 두께가 0에서 1.50~2.76 mm로 증가할 때 변형에너지는 40~70배 증가하여 철근보강에 의한 9~10배 보다 현저한 보강효과를 나타내었다.
- 7) GFRP보강 MMA개질 폴리머 모르타르(콘크리트) 샌드위치 패널의 적합한 해석을 위해서는 압축측에 보강된 GFRP가 받는 압축력 산정방법에 대한 연구가 더 이루어져야 할 것이다.

## 감사의 글

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

## 참고 문헌

1. Yeon, K. S., " Flexural Behavior of Sandwich Panels of Polymer Mortar Reinforced with GFRP", FRP Composites in Civil Engineering, 2001, pp.1395~1402
2. 咸炯吉, "폴리머 콘크리트 샌드위치패널의 변형 특성", 경북대학교 대학원 박사학위논문, 1995
3. 宮入裕夫, "샌드위치구조의基礎", 日刊工業新聞社, 1999.
4. 우홍식, 이갑래, 한지원, "재료파괴공학", 보성문화사, 1993.
5. Mallick, P. K., "Fiber-Reinforced Composites", Marcel Dekker, 1988