

# 유리섬유보강 폴리머 복합패널의 피로특성

## Fatigue Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Panels

연 규 석\* · 김 수 보\*\* · 유 능 환\*\*\*

Yeon, Kyu Seok · Kim, Soo Bo · Ryu, Neung Hwan

### Abstract

In this study, the fatigue properties of the GFRP composite panels of which core was made of the polymer mortar and both facings were reinforced by the high-tensile GFRP were surveyed. Composite-panel specimens consisted of polymer mortar core and GFRP compressive and tensile sides with various thickness were produced for an experimental study. Flexural fatigue tests were conducted to examine the correlation between the fatigue load and the fatigue life for various thickness of core and facings, and its results are presented. The correlation obtained in this study between the fatigue load and the fatigue life for various thickness are in good agreement with the modified Miner's law.

Keywords : GFRP, polymer mortar, composite panel, fatigue load, fatigue life

### I. 서 론

폴리머 복합체는 우수한 물리·역학적 특성을 갖기 때문에 건설산업분야에서 신소재로 각광 받고 있으며, 이를 이용한 구조물의 보수·보강이나 프리캐스트 제품의 개발 등 실용화에 대한 연구도 끊임없이 이루어져 오고 있다.<sup>1)</sup>

특히 폴리머 콘크리트는 일반 시멘트 콘크리트에

비하여 강도나 내구성이 우수하여 건설분야에서 점차적으로 그 이용이 증가되고 있다.<sup>2)</sup> 그러나 폴리머 콘크리트는 탄성계수가 압축강도에 비하여 상대적으로 작고 극한 변형률이 크므로 단면이 큰 강성 부재용으로는 적합하지 않다. 현재 보편적으로 적용되고 있는 폴리머 콘크리트의 보강방식으로는 철근보강 혹은 강판보강 방식이 있고, 또한 양면을 탄소섬유나 유리섬유로 보강한 샌드위치 형식이 있다. 이와 같은 보강방법 중 가격 대비 성능과 작업의 용이성을 따져보면 샌드위치형식의 얇은 복합패널구조가 적합하며 폴리머 복합소재의 장점을 극대화 시킨 구조형식이라 할 수있다. 한편, 샌드위치 구조형식을 갖는 복합 휨부재의 정적 휨거동에 대

\*, \*\*\* 강원대학교 지역기반공학과 교수  
\*\* (주)동일기술공사  
\* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6465  
Fax: +82-33-251-3965  
E-mail address: ksyeon@kangwon.ac.kr

한 연구는 다소 이루어지고 있으나 이의 피로거동에 관한 시험 및 이론적 연구는 찾아보기 힘든 실정이다.<sup>3)</sup>

따라서 본 연구에서는 중심부에 폴리머 모르타르를 갖고 압축 및 인장축에 GFRP보강층을 갖는 샌드위치 형식의 복합패널 시험체를 제작하고, 이에 대한 휨 피로시험을 수행함으로써 폴리머 모르타르층의 두께와 GFRP보강층의 두께가 패널의 휨 피로거동에 미치는 영향, 즉 피로하중수준-피로수명과의 상관관계를 구명하였던 바, 그 결과를 여기에 보고한다.

## II. 사용재료

### 1. 폴리머 모르타르

#### 가. 불포화 폴리에스테르 수지

결합재로는 시판 중인 국내 A사의 불포화 폴리에스테르 수지(unsaturated polyester resin: UP)로 코발트계 경화촉진제가 첨가되어 있는 올소타입(Ortho type)을 사용하였으며, 경화수축을 감소시

Table 1 Properties of UP resin

Density (25℃)	Viscosity (25℃, mPa·s)	Acid value	Styrene content (%)
1.13	300	20.0	40

Table 2 Properties of shrinkage-reducing agent

Density (25℃)	Viscosity (20℃, mPa·s)	Nonvolatile matter (%)	Appearance
1.11	3100~4100	34~38	Transparent

Table 4 Physical properties of heavy calcium carbonate

Density (gr/cc)	Absorption (cc/gr)	Water content (%)	pH	Mean grain size(μm)	Retained percentage of 325 mesh sieve
0.75	0.20	≤0.3	8.8	13	0.03

키기 위해 열가소성인 폴리스티렌을 스티렌모노머에 용해시킨 수축저감제(shrinkage reducing agent: SRA)를 사용하였다.

#### 나. MMA (methyl methacrylate)

불포화 폴리에스테르 수지를 결합재로 하는 폴리머 모르타르의 작업성, 저온 경화성, 조기강도 발현 및 내구성 개선을 위하여 결합재에 MMA를 첨가하였다.

Table 3 Properties of MMA monomer

Density (20℃)	Viscosity (20℃, mPa·s)	Molecular weight (g/mol)	Appearance
0.94	0.56	100	Transparent

#### 다. 충전재 및 골재

충전재는 중질 탄산칼슘을 사용하였고, 골재는 국내 K사의 규사(≤5 mm)를 사용하였다. 충전재의 함수율은 0.3 % 미만, 골재의 함수율은 0.1 % 미만이 되도록 충분히 건조시킨 후 사용하였다.

### 2. GFRP

#### 가. 적층용 수지

본 연구에서는 적층용 수지로서 중심부 폴리머 모르타르의 결합재와 동일한 종류의 불포화 폴리에스테르 수지를 사용하였다.

#### 나. 유리섬유

유리섬유는 매체인 적층 수지로부터 전달되어온 응력을 분담하는 역할을 한다. 본 연구에서는 인장

Table 5 Physical properties of fine aggregate

Size (mm)	Apparent density	Bulk density	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )	Absorption (wt.%)
0.8~5	2.62	2.61	1.645	0.5
0~0.8	2.45	2.54	1.500	0.5

Table 6 Physical properties of roving cloth

Count (yarns/in)		Weave	Weight (g/m <sup>2</sup> )	Width (mm)	Thickness (mm)
Warp	Fill				
6.3	6.3	Plain	580	1000	0.6

Table 7 Physical properties of lining cloth

Count (yarns/in)		Weave	Weight (g/m <sup>2</sup> )	Width (mm)	Thickness (mm)
Warp	Fill				
10	8	Plain	529	1,020	0.5

보강용 roving cloth와 표면마무리용 lining cloth 두 종류의 유리섬유를 사용하였다.

### III. 시험체 제작

#### 1. 폴리머 모르타르

KS F 2419(폴리에스테르 레진 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법)에 제시된 방법에 의해 시험체를 제작하였다. 사용된 폴리머 모르타르의 배합비는 Table 8 과 같다.

Table 8 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

#### 2. GFRP

GFRP두께와 인장강도, 인장탄성률 및 피로응력 수준-피로수명사이의 관계를 고찰하기 위해 hand lay up 방법으로 적층 성형한 1, 2, 3, 4, 5, 6 mm 두께의 인장시편을 KS M 3381(유리섬유 강화 플라스틱의 인장 시험 방법)의 규정대로 정밀가공하였고, 시편중앙부의 일률적인 파괴를 유도하기 위해 시편중앙부에 1 mm의 노치를 두었다.<sup>4)</sup>

#### 3. 복합패널 시험체의 제작

중심부의 폴리머 모르타르층 두께를 12, 24, 36 mm로 하고 압축·인장축의 GFRP 층 두께를 1, 2, 3, 4 mm 으로 변화시킨 300 × 500 mm 크기의 샌드위치 구조형식의 복합패널 공시체 12종류를 제작하였다.

### IV. 시험방법

#### 1. 폴리머 모르타르의 역학적 성질시험

중심부용 폴리머 모르타르의 역학적 성질을 파악하기 위하여 KS F 2481(폴리에스테르 레진 콘크리트의 압축강도 시험방법), KS F 2482 (폴리에스테르 레진 콘크리트의 휨강도 시험방법) 및 KS F 2480 (폴리에스테르 레진 콘크리트의 인장강도 시험방법)에 따라 압축, 휨, 조깅 인장강도를 측정하였고, 탄성계수와 포아송비는 시험체 양측면에 스트레인 게이지를 부착하여 KS F 2438 (콘크리트 원주 공시체의 정탄성 계수 및 포아송비 시험방법)에 따라 극한하중의 40 %를 반복적으로 가하

어 얻어진 응력-변형률 곡선으로부터 구하였다.

## 2. GFRP의 인장 및 피로시험

GFRP의 인장시험은 KS M 3381(유리 섬유 강화 플라스틱의 인장 시험 방법)에 따라 실시하였다. 하중은 250 kN 용량의 Instron 만능시험기를 이용하여 변위제어 방식으로 0.5 mm/min의 일정한 속도로 가하였다. 한편 피로시험은 응력수준을 50, 65, 80 %로 유지하면서 0.5 Hz의 속도로 가력하였다.<sup>5)</sup>

## 3. 복합패널의 정적 휨 시험

복합패널의 정적 휨 시험은 3점 재하 시험방법으로 실시하였으며, 하중은 최대용량 250 kN 인 Instron사의 만능시험기를 이용하여 10 kN/min의 일정속도로 하중제어방식에 의해 재하 하였다. 재하방향으로 LVDT(변위 측정기)를 설치하고, 시험체의 인장측과 압축측 중앙부에 각각 스트레인 게이지를 부착하여 재하단계별 처짐과 변형률을 연속적으로 측정하였다.

## 4. 휨피로시험

복합패널의 휨 피로시험은 250 kN 용량의 Instron 사의 만능시험기를 사용하였고, 재하방법은

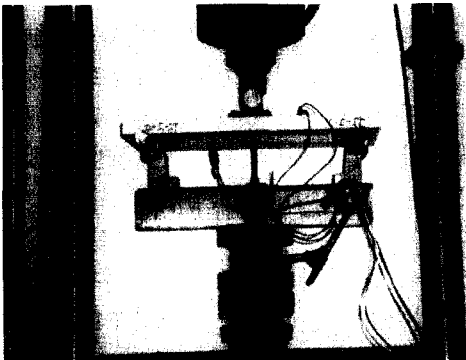


Fig. 1 View of flexural test for GFRP composite panel

하중 0으로부터 피로상한 하중수준까지의 일정한 하중폭을 유지하면서 0.5 Hz의 속도로 재하 하였다. Fig. 1은 폴리머 복합패널의 휨 피로시험 광경을 나타낸 것이다.

## V. 결과 및 고찰

### 1. 폴리머 모르타르의 역학적 성질

중심부용 재료인 폴리머 모르타르의 압축강도는 시험결과 103 N/mm<sup>2</sup>, 조강 인장강도는 13.7 N/mm<sup>2</sup>, 탄성계수는 2.25×10<sup>4</sup> N/mm<sup>2</sup> 이었고, 포아송비는 0.26 으로 나타났다.

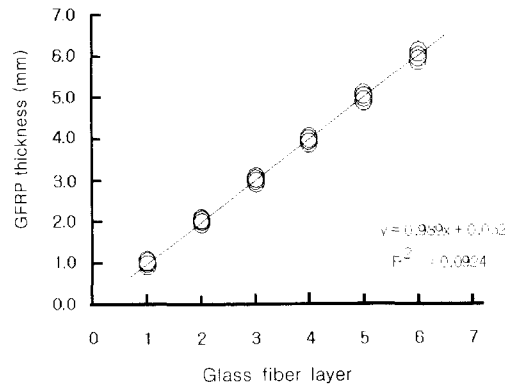


Fig. 2 Relationship between glass fiber layer and GFRP thickness

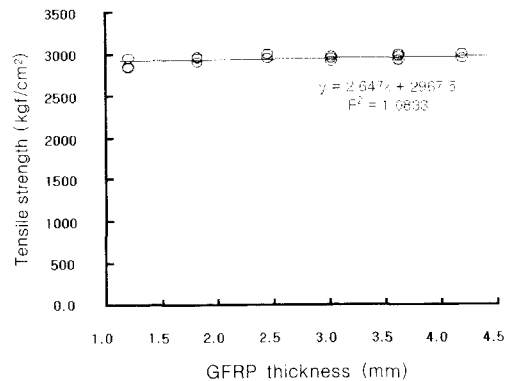


Fig. 3 Relationship between GFRP thickness and tensile strength

Table 9 Mechanical properties of GFRP according to thickness

Roving cloth		Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )	Secant elastic modulus (10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	Strain (%)
Number of layers	Thickness (mm)			
1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 2, 3, 4, 5, 6	291~292	1.02 ~ 1.03	3±0.05

2. GFRP의 인장강도

GFRP의 인장강도는 적층두께에 관계없이 변형률이 증가함에 따라 직선적으로 증가하다가 변형률 3 %정도에서 일률적으로 파단이 일어났다. 또한 인장강도는 적층 두께에 관계없이 291~292 N/mm<sup>2</sup>로 일정한 값을 나타냈는데, 이는 폴리머 모르타르의 인장강도 8.8 N/mm<sup>2</sup>에 비해 훨씬 높은 값이다. 한편 인장탄성계수도 적층 두께에 관계없이 1.02 ~ 1.03 × 10<sup>4</sup> N/mm<sup>2</sup>정도의 일정한 값을 나타내었으며 GFRP의 적층두께에 따른 인장강도 및 탄성계수 등 역학적 특성은 Table 9의 결과와 같다.

3. 폴리머 복합패널의 휨 강도 및 동적 피로 특성

가. 폴리머 복합패널의 정적 휨강도 특성

폴리머 복합패널의 휨 파괴 양상을 보면, 우선

모르타르의 인장측에 미세 균열이 발생하고 하중이 증가함에 따라 균열이 압축측으로 진전되다가 종국에는 인장측 유리섬유의 파단에 의해 패널이 파괴되는 양상을 보였다.<sup>2)</sup>

Table 10는 중심부 폴리머 모르타르층의 두께와 압축 및 인장측 GFRP 두께에 따른 복합패널의 휨 시험결과를 나타낸 것이다. 중심부 모르타르 층의 두께에 관계없이 GFRP 층 두께가 1 mm로부터 4 mm로 증가함에 따라 패널의 휨강도는 증가하는 경향을 보였고, GFRP 층의 보강두께가 변하지 않을 때 중심부 모르타르 층의 두께가 증가함에 따라 역시 휨강도는 높아지는 경향을 보였다.

한편 복합패널의 연성지수는 GFRP 층의 두께에 관계없이 중심부 폴리머 모르타르 층의 두께가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

Table 10 Failure load of GFRP composite panels

Series	Core thickness (mm)	Facing thickness (mm)	Failure load (N/m)	Deflection (mm)	Cracking deflection (mm)	Ductility Index (u)
T12-1	12	1-1	48,873	35.6	4.8±0.1	7.6
T12-2		2-2	59,829	36.4		
T12-3		3-3	95,707	37.4		
T12-4		4-4	149,234	38.4		
T24-1	24	1-1	98,313	21.1	4.7±0.1	4.6
T24-2		2-2	122,500	21.7		
T24-3		3-3	167,991	21.8		
T24-4		4-4	210,720	23.4		
T36-1	36	1-1	117,365	9.9	4.4±0.1	2.3
T36-2		2-2	144,060	10.3		
T36-3		3-3	195,539	11.3		
T36-4		4-4	248,185	11.9		

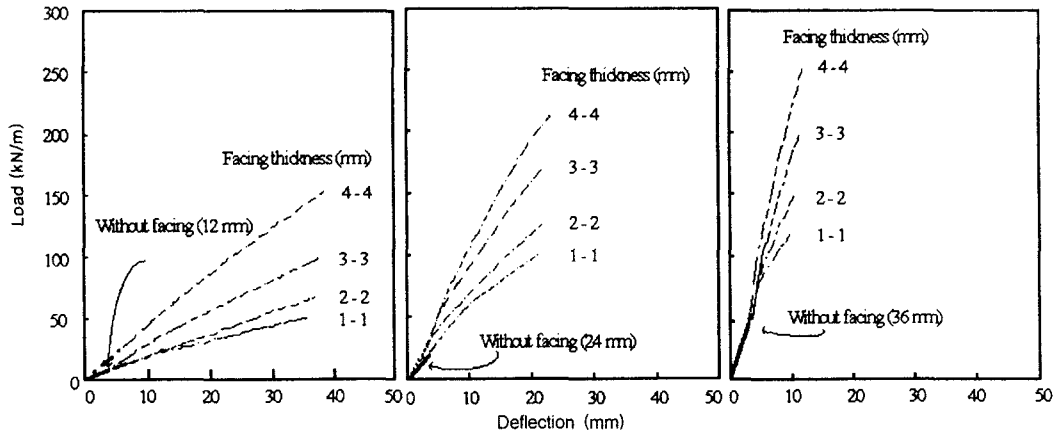


Fig. 4 Load-deflection curves for GFRP composite panel with 12, 24, 36mm core thickness

나. GFRP의 피로특성

GFRP 층과 폴리머 모르타르 층으로 구성되는 샌드위치 형식의 복합패널에 대한 피로 특성을 구명함에 있어, GFRP 및 폴리머 모르타르 각각의 소재에 대한 피로특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. GFRP 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 휨 피로 파괴는 종국적으로 인장측 유리섬유 층의 파단으로 발생하는 만큼, 복합패널의 피로특성과 GFRP의 피로특성은 상당한 유사성을 갖는다고 할 수 있다.<sup>5),6)</sup>

본 연구에서는 GFRP의 피로특성을 구명키 위해 피로시험 결과에 대한 회귀분석을 수행하였던 바, 피로응력수준과 피로수명사이에는 매우 밀접한 관계가 있었으며, 이는 Miner 법칙으로 설명이 가능하다.<sup>7)</sup>

식 (1)은 피로응력수준과 피로수명에 대한 Miner법칙의 일반식이다. 여기서 상수 m, C 는 피로응력수준-피로수명 곡선(S-N 곡선) 형태를 결정하는 주요 재료상수로서 본 연구에서는 시험결과에 대한 회귀분석을 통하여 산출하였다.

$$\sigma^m N = C \dots \dots \dots (1)$$

$$\begin{cases} C = 2.546 \times 10^{24} \\ m = 9.987 \end{cases}$$

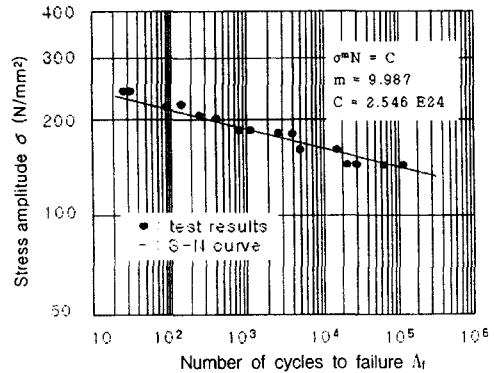


Fig. 5 S-N curve under constant amplitude load

다. 복합패널의 피로특성

본 시험은 패널 중심부층 모르타르 두께와 GFRP 층을 변수로 하여, 해당하는 파괴 하중(해당 모멘트)의 50 %, 65 %, 80 % 에 대응하는 피로 하중 수준과 피로수명 관계를 구명하였다.

Table 11에 나타낸 바와 같이 피로하중 수준이 증가함에 따라 피로수명은 현저히 감소하였고, 동일한 피로하중 수준에서는 중심부 모르타르 두께에 관계없이 GFRP 층 두께가 증가함에 따라 피로수명은 증가하는 경향을 보였다.

또한 피로하중 수준이 일정할 경우 GFRP 층 두께에 관계없이 중심부 모르타르 층의 두께가 얇을

Table 11 Fatigue life according to the fatigue load

Series	50%		65%		80%		Failure load	
	Load (N/m)	Fatigue life (cycles)	Load (N/m)	Fatigue life (cycles)	Load (N/m)	Fatigue life (cycles)	Load (N/m)	Fatigue life (cycles)
T12-1	23,971	6,917	31,164	4,015	38,357	2,613	47,941	-
T12-2	32,330	9,752	42,032	5,554	51,724	3,596	64,660	-
T12-3	49,617	10,643	64,494	6,312	79,390	4,102	99,235	-
T12-4	74,617	11,796	97,000	6,845	119,384	4,364	149,234	-
T24-1	48,490	5,688	63,043	3,295	77,596	2,154	96,991	-
T24-2	62,867	7,896	81,732	4,326	100,587	2,856	125,734	-
T24-3	83,251	8,491	108,221	4,877	133,202	3,197	166,502	-
T24-4	100,068	9,023	130,085	5,198	160,103	3,376	200,136	-
T36-1	62,005	5,012	80,605	2,894	99,205	1,825	124,009	-
T36-2	75,754	6,453	98,480	3,812	121,206	2,410	151,508	-
T36-3	101,910	7,317	132,486	4,239	163,062	2,684	203,830	-
T36-4	127,988	7,764	166,453	4,483	204,869	2,793	256,094	-

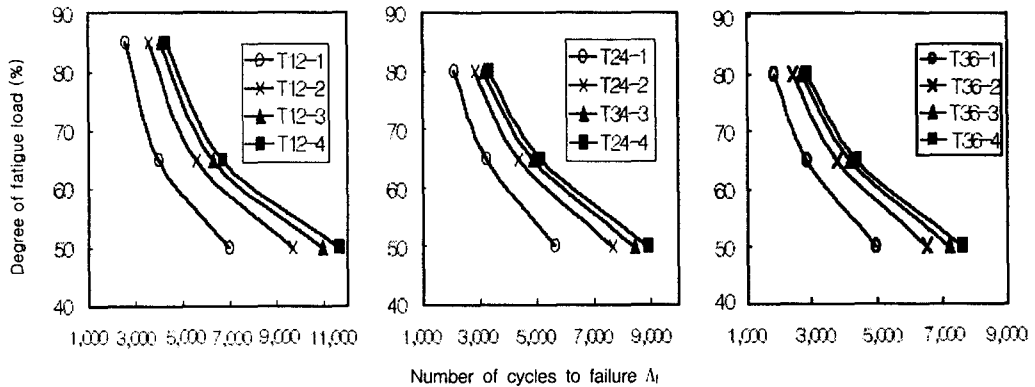


Fig. 6 S-N curve under degree of fatigue load

수록 피로수명은 우수한 것으로 나타났다.

일반적으로 복합소재의 피로손상은 모재균열(matrix cracking), 층간분리(interfacial debonding), 탈적층(delamination) 및 섬유파단(fiber breakage) 등의 상호작용에 의하여 손상이 일어남으로 피로손상 거동이 복잡할 뿐만아니라 금속재료의 균열길이와 같이 손상의 척도를 정의하기가 어렵다.<sup>2),3),5)</sup>

GFRP보강 폴리머 복합패널의 휨 피로파괴 양상

을 살펴보면 정적 휨 파괴와 비슷하게 극한변형률이 작은 폴리머 모르타르의 인장측에서 휨균열이 발생하여 상당한 피로하중이 작용한 후 인장측 GFRP층의 파단으로 폴리머 복합패널의 최종파괴를 유발한다. 총체적으로 복합패널의 파괴양상은 중심부 모르타르와 인장보강층의 GFRP가 일체화하여 거동을 한다. 이러한 파괴양상으로 나타내어지는 복합패널의 휨 피로파괴특성은 GFRP의 피로

특성과 매우 흡사하며, 본 시험에서는 식 (2)와 같은 수정된 Miner의 선형모델(4)로 샌드위치 패널의 피로하중수준-피로수명사이의 상관관계를 구명하였다.

$$N_i = A(b \gamma_i)^{-m} \dots \dots \dots (2)$$

- 여기서  $N_i$  : 복합패널의 힘 피로수명,
- $\gamma_i$  : 피로하중수준
- $A, m$  : S-N 피로하중곡선의 형태를 결정 짓는 재료상수(실험상수)
- $b$  : 모르타르 두께 P 및 GFRP 층 두께 Q에 의하여 결정되는 실험상수

Table 10에 나타난 피로하중수준과 피로수명의 상관관계에 대한 회귀분석을 통하여 다음과 같은 재료상수(실험상수)가 산출되었다.

$$\begin{aligned} A &= 6.00 \\ m &= 2.1 \\ b &= 0.03P^{0.2} + 0.02 / Q \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

## VI. 결 론

GFRP보강 폴리머 복합패널의 피로특성을 구명하기 위하여, 패널 힘 파괴강도의 50 %, 65 %, 80 %에 해당하는 반복 피로하중을 가하여 피로수명을 측정하고, 수정된 Miner의 피로손상 모델을 이용하여 그 결과를 분석하였던 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. GFRP의 인장강도, 탄성계수 및 과단변형률은 두께에 관계없이 일정한 값을 나타냈으며, GFRP의 피로하중수준-피로수명 관계는 Miner 법칙과 매우 잘 부합되었다.
2. 피로하중의 수준이 증가함에 따라 폴리머 모르타르 및 GFRP 두께에 관계없이 폴리머 복합패널의 피로수명은 감소하는 경향을 나타냈다.
3. 동일 하중수준에서는 폴리머 모르타르 층의 두께가 증가함에 따라 피로수명은 감소하는 경향을

나타냈으며, GFRP 층의 두께가 증가함에 따라 피로수명이 증가하는 경향을 나타내었다.

4. 이러한 폴리머 모르타르 층의 두께 및 GFRP 층 두께에 따른 피로응력수준-피로수명의 상관관계는 수정된 Miner의 법칙과 잘 부합됨을 확인할 수 있었다.

## References

1. Yeon, K. S., 2003, "Recent Progress of the Researches of Concrete Polymer Composite in Korea", *Research Institute for Repair and Rehabilitation Materials of Concrete*, pp.17-34. (in korea)
2. Yeon, K. S., Jin, N. J., Kwon, Y. H. & Ryu, K. W., 2003, "Workability and Strength Properties of MMA-Modified UP Polymer Concrete", *Journal of Polymer Engineering*, Vol. 23, No. 5, pp.385-398.
3. Ji, K. Y., Yeon, K. S., You, K. W., Jin, N. J. and Kwon, Y. H., "Flexural Behavior of Sandwich Panels of Polymer Mortar Reinforced with GFRP", *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 13 No. 2, pp.159-164. (in Korea)
4. Ryu, K. W., 2003, "Flexural Behavior of GFRP-Polymer Mortar Composite Panels", *M. S. Thesis, Kangwon National University*. (Korea)
5. Kim, J. K. & Shim, D. S., 1996, "The Fatigue Cumulative Damage and Life Prediction of GFRP under Random Loading", *Transactions of the KSME A*, Vol. 20, No. 12. pp.3892-3898 (in Korea)
6. Miner, M. A., 1945, "Cumulative Damage in Fatigue," *ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 12, pp.A159~A164.
7. Yeon, K. S., Park, J. S., Kim, K. W., Sung, K. T. & Kim, T. K., 1993, "Flexural Fatigue Behavior of Unreinforced Polyester Polymer concrete Beams", *Journal of the Korea Concrete Institute Issn*, Vol. 5, No. 3, pp.179-186. (in Korea)