

리브를 갖는 유리섬유 보강 폴리머 콘크리트 복합패널의 휨 특성

Flexural Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer Concrete Composite Panel

김 수 보* · 연 규 석** · 유 능 환***

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

Abstract

In this study, twelve different glass fiber reinforced polymer concrete composite panel specimens with various rib heights and tensile side and reinforced side thickness were produced, and the flexural tests were conducted to figure out the effect of the height and thickness influencing on the flexural properties of composite panel. Test results of the study are presented. Especially, a prediction equation of the ultimate moment based on the strength design method agrees well with the test results, and it is thought to be useful for the corresponding design of cross-section according to various spans as the glass fiber reinforced polymer concrete composite panel is applied for a permanent mold.

Keywords : polymer concrete, composite panel, ultimate moment, permanent mold

I. 서 론

폴리머 복합체는 물리·역학적 특성이 우수하여 최근 건설산업용 신소재로서 각광을 받고 있으며, 이를 이용한 구조물의 보수보강이나 프리캐스트 제품의 개발 등 실용화에 대한 연구도 지속적으로 이루어지고 있다.¹⁾

한 예로서, 현재 일본에서는 PMC를 사용한 영구 거푸집이 개발 이용되고 있으며, 국내에서도 유사한 제품이 개발되고 있다. 현재 교량상판용 거푸집으로 사용되고 있는 목재나 강재는 설치나 해체에 인력과 비용이 많이 소요 되고 있는 실정이다. 최근에는 철재 영구거푸집이 이용되고 있으나 부식으로 인한 유지보수 등이 문제시 되고 있다.

거푸집 설계에서는 콘크리트 타설 시 충격에너지 및 타설 후 콘크리트 압력에 의한 거푸집 자체의 변형이 기준변형을 초과하여서는 안 되며, 또한 거푸집 면 부재의 휨 강도는 이러한 압력과 충격 에너지로 하여 생기는 휨 모멘트를 충분히 만족시켜

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

야 한다.

따라서 본 연구에서는 반영구적인 교량상판용 영구거푸집을 개발할 목적으로 리브를 갖는 유리섬유 보강 폴리머 콘크리트 복합패널을 제작하고, 이에 대한 휨 특성을 구명코저 한다. 이를 위해 리브높이와 인장축 GFRP 층의 두께를 달리하는 12종류의 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널 시험체를 제작하고, 이에 대한 휨 시험을 수행함으로써 리브 높이와 GFRP 층 두께가 리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널의 휨 특성에 미치는 영향을 실험적으로 구명 하였던 바, 그 결과를 여기에 보고한다.

II. 사용재료

1. 폴리머 콘크리트

가. 불포화 폴리에스테르 수지

결합재로는 시판 중인 국내 A사의 불포화 폴리에스테르 수지(unsaturated polyester resin : UP)로 코발트계 경화촉진제가 첨가되어 있는 올소 타입(Ortho type)을 사용하였으며, 경화수축을 감소시키기 위해 열가소성인 폴리스티렌을 스티렌모노머에 용해시킨 수축저감제(shrinkage reducing agent : SRA)를 사용하였다. Table 1 및 2에 사

용된 UP와 SRA의 성질을 나타냈다.

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	3,100~4,100	34~38	Transparent

나. MMA (Methyl methacrylate)

불포화 폴리에스테르 수지를 결합재로 하는 폴리머 모르타르의 작업성, 저온 경화성, 조기강도 발현, 경화수축 감소를 위하여 결합재에 MMA를 첨가하였다.²⁾ Table 3에 MMA의 물성을 나타내었다.

Table 3 Properties of MMA monomer

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

Table 5 Physical properties of fine aggregate

Size (mm)	Apparent density	Bulk density	Unit weight (kg/m ³)	Absorption (wt.%)
3.0~8.0	2.78	2.76	1,660	0.5
0.8~3.0	2.62	2.61	1,645	0.5
0~0.8	2.45	2.54	1,500	0.5

다. 충전재 및 골재

충전재는 중질 탄산칼슘을 사용하였고, 골재는 국내 K사의 규사를 사용하였다. 충전재의 함수율은 0.3 % 미만, 골재의 함수율은 0.1 % 미만이 되도록 충분히 건조시킨 후 사용하였다. Table 4, Table 5에 각각 충전재와 규사의 물성을 나타내었다.

2. GFRP

가. 적층용 수지

적층용 수지로 중심부 폴리머 모르타르의 결합재와 동일한 종류의 불포화 폴리에스테르 수지를 사용하였다.

나. 유리섬유

유리섬유는 인장보강용 roving cloth 와 표면마무리용 lining cloth 두 종류를 사용하였다. Table 6, Table 7 에는 사용된 유리섬유의 물리적 특성을 나타내었다.

Table 6 Physical properties of roving cloth

Count (yarns/in)		Weave	Weight (g/m ²)	Width (mm)	Thickness (mm)
Warp	Fill				
6.3	6.3	Plain	580	1,000	0.6

Table 7 Physical properties of lining cloth

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

Ⅲ. 시험체 제작 및 시험방법

본 연구에서의 주요 실험변수로는 복합패널 인장축의 리브높이와 유리섬유 보강두께이다. 즉, GFRP 층 두께(1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm)와 리브 높

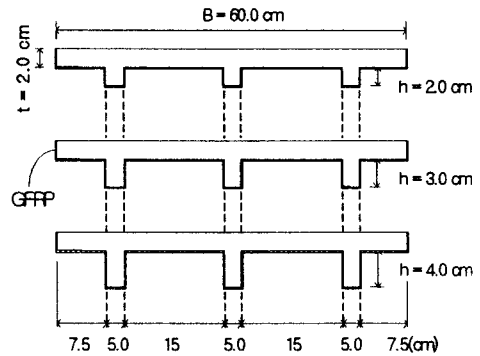


Fig. 1 Cross section of polymer concrete composite panel

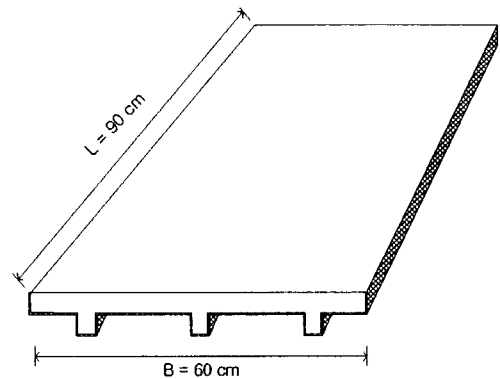


Fig. 2 Specimen of polymer concrete composite panel

이(2.0, 3.0, 4.0 cm)를 달리하는 12종류의 폴리머 콘크리트 복합패널을 제작하였다. Fig. 1, Fig. 2에 그 단면과 전체 모양을 나타내었다.

유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널의 제작에 있어 복합패널의 강도에 가장 큰 영향을 미치는 외부 요인으로는 폴리머 콘크리트의 배합, GFRP의 특성성형 및 GFRP 층과 폴리머 콘크리트와의 부착이라 할 수 있다.³⁾ Table 8 에 본 연구에서 사용한 폴리머 콘크리트의 배합비를 나타내었다.

GFRP 층은 불포화 폴리에스테르 수지로 적층후 매 층당 두께가 약 1 mm 씩 증가 하였다. 본 연구에서는 사전에 치수에 맞게(각각 90 × 9 cm, 90 × 11 cm, 90 × 13 cm) 절단된 직조 유리섬유를 핸드레이업 공법에 의해 불포화 폴리에스테르 수지

Table 8 Mixing proportion for testing the elastic modulus and the Poisson's ratio

Binder content (wt %)	Binder formation				Filler : binder ratio	Aggregate ratio	
	UP	MMA	SRA	MEKPO*		Fine	Coarse
8.5	70	20	10	0.75	2 : 1	1.5	1

* Methyl ethyl kepton peroxide

로 충분히 적층하고 이를 몰드 내벽에 거치시킨 후 폴리머 콘크리트를 타설 한 다음 충분히 진동 다짐 하였다. 이때 폴리머 콘크리트와 유리섬유 시트 적층용 불포화 폴리에스테르 수지의 경화가 동시에 이루어지게 함으로써 폴리머 콘크리트와 유리섬유 사이의 부착효과를 극대화하였다.

복합패널의 정적 휨시험은 3점 가력 휨 시험방법으로 실시하였으며, 하중은 변위 제어방식을 취하여 최대용량 250 kN인 Instron사의 만능시험기를 이용하여 10 kN/min의 속도로 일정하게 재하 하였다. 또한 재하방향과 같은 방향으로 LVDT(변위 측정기)를 설치하고, 시험체의 인장측과 압축측 중앙부에 각각 스트레인 게이지를 부착하여 재하단계 별 처짐과 변형률을 연속적으로 측정하였다.

IV. 결과 및 고찰

리브를 갖는 복합패널은 T형 보와 마찬가지로 중립축이 플랜지 안에 있을 때는 직사각형 단면으로 계산하고, 중립축이 복부에 있을 때는 T형 단면으로 계산한다.

일반적으로 중립축이 플랜지 안에 약간 들어가도록 설계하는 것이 경제적으로는 유리하다. T형 단면에서도 직사각형 단면에서 사용하는 등가직사각형 응력블록을 사용한다. 이 등가직사각형 응력블록은 원래 직사각형 보에 대한 실험을 기초로 하여 고안된 것이나 단면형상이 T형 뿐만 아니라 원형, 삼각형 등 어떤 모양에도 적용되며, 그 오차는 매우 작아 충분히 정확한 것으로 알려져 있다.^{3),4)}

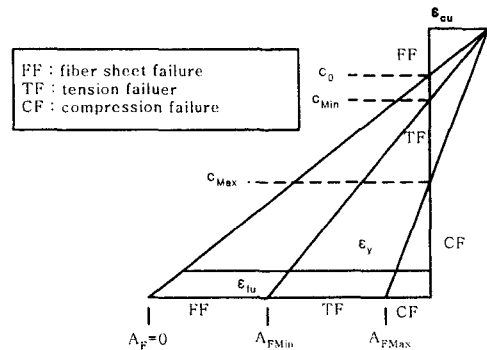


Fig. 3 Strain distribution across strengthened cross section

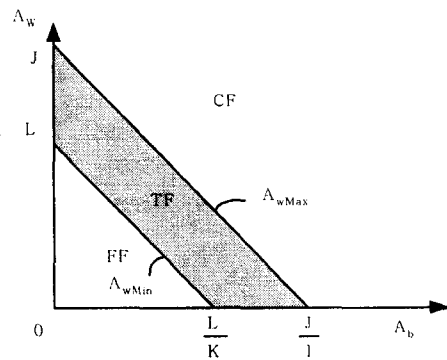


Fig. 4 Failure mode relations of fiber sheets

1. 리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널의 휨 파괴 모드

리브를 갖는 폴리머 콘크리트 복합패널의 인장측에 GFRP를 부착함으로써 휨 보강이 가능하고 균열 억제능력을 향상시킬 수 있다. 복합패널의 밑면만 GFRP로 보강하는 경우 GFRP와 폴리머 콘크리트

트간 부착력의 한계로 인한 박리 또는 콘크리트의 부분탈락과 같은 국부적인 파괴가 유발되어 전체적인 구조물의 파괴가 진행된다. 따라서 GFRP의 박리파괴의 방지, 휨 및 사인장 전단균열의 발생을 억제시키기 위해서는 부착면적을 증대시키는 옆면 보강(U형 보강) 방법이 매우 효과적이다.³⁾

리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널은 폴리머 콘크리트 및 GFRP의 변형 상태에 따라 세가지 유형의 휨 파괴형태를 나타낸다. 첫 번째는 GFRP 인장 파괴 전에 압축부의 콘크리트가 파괴되는 압축파괴(compression failure; CF), 두 번째는 압축부의 폴리머 콘크리트가 파괴되기 전에 인장측 GFRP가 파괴되는 인장파괴(tension failure; TF)이다. 이밖의 파괴유형으로 콘크리트와 GFRP 사이의 박리파괴(debonding failure)나 콘크리트의 탈락파괴(peeling failure)와 같은 취성적인 파괴가 있는데, 이는 GFRP의 단부를 볼트 또는 GFRP를 이용한 정착장치를 도입함으로써 파괴를 방지할 수 있다.

Fig. 3에서 GFRP의 단면적이 큰 경우 중립축이 평형상태일 때보다 아래에 위치하게 되어 GFRP가 파단되기 이전에 압축부 콘크리트에서 압축파괴가 발생한다. GFRP의 단면적이 작은 경우 중립축이 GFRP의 파괴상태 중립축과 보강전 중립축 사이에 위치하게 되어 GFRP의 파괴변형을 초과하게 된다. Fig. 3으로부터 GFRP의 단면적과 중립축 위치가 GFRP의 극한변형 상태에서 최소 중립축 위치보다 작은 경우에는 폴리머 콘크리트가 소성단계에 도달하기 전 GFRP의 파괴에 지배되고, 최대 중립축 위치보다 큰 경우에는 GFRP 파괴가 발생하기 전에 압축부 콘크리트에서 압축파괴가 발생한다. 결과적으로 GFRP의 보강단면적을 최대와 최소 범위내에서 하여야만 폴리머 콘크리트 복합패널의 연성을 확보할 수 있다. 밀면과 옆면이 GFRP로 보강된 리브를 갖는 폴리머 콘크리트 복합패널의 경우는 인장파괴가 일어나기 위한 GFRP 층 단면적의 상한값(A_{FMax})과 하한값(A_{FMin})은 단면의 형상에 의

해 결정된다.

여기서, I , K 와 J , L 은 A_{wMax} 과 A_{wMin} 을 A_b 에 관한 1차 방정식으로 정리했을 때 나타나는 각각의 계수와 상수이다.

Fig. 4는 식 (1)과 (2)를 그림으로 나타낸 것으로 A_{wMax} 및 A_{wMin} 과 밀면 보강단면적 A_b 와의 관계를 나타낸 것이다. 따라서 인장파괴의 범위에 해당하는 옆면 GFRP 단면적 A_w 와 밀면 GFRP 층 단면적 A_b 는 각 경우에 대하여 Fig. 4와 같은 범위에서 선택할 수 있다.

GFRP 층의 단면적과 중립축 위치 관계는 다음 식 (1)와 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{FMin} \leq A_F \leq A_{FMax} \leq A_{FB} \dots \dots \dots (1)$$

$$c_{Min} \leq c \leq c_{Max} \leq c_B \dots \dots \dots (2)$$

여기서,

- A_F : GFRP 층 단면적
(= $A_b + 2A_w$)
- A_b : 밀면 GFRP 단면적
- A_w : 복부 옆면 한쪽에 부착된 GFRP 단면적
- A_{FMin} : GFRP의 최소 보강 단면적
- A_{FMax} : GFRP의 최대 보강 단면적
- A_{FB} : 균형상태에서 GFRP의 단면적
- c : 밀면과 옆면이 GFRP로 보강된 상태에서
의 중립축 위치
- c_{Min} : 밀면과 옆면이 GFRP로 보강된 상태에서
의 최소 중립축 위치
- c_{Max} : 밀면과 옆면이 GFRP로 보강된 상태에서
의 최대 중립축 위치
- c_B : 밀면과 옆면이 GFRP로 보강된 균형상태
에서의 중립축 위치

밀면이 보강된 상태에서 옆면에 추가로 보강되는 옆면 GFRP의 최대 보강단면적 A_{wMax} 과 최소 보

강단면적 A_{wMin} 은 하부 보강 GFRP 단면적 A_b 와 다음식 (3)과 같은 선형 관계를 갖는다.

$$\left. \begin{aligned} A_{wMax} &= -IA_b + J \\ A_{wMin} &= -KA_b + L \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

본 연구에서는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널의 해석을 위해 다음과 같은 가정을 한다.^{5),6)}

- 1) 단면의 깊이에 따라 변형을 분포는 선형이다.(즉 중립축과의 거리에 정비례 한다.)
- 2) 콘크리트의 인장력은 무시하고 압축측 콘크리트의 응력은 등가 직사각형 응력분포로 가정한다.
- 3) GFRP는 파괴시까지 선형 탄성거동을 한다.
- 4) 콘크리트, 철근 및 GFRP 시트는 완전 부착되어 일체화 거동을 한다.

2. 단면해석

리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널의 경우 힘의 평형조건은 식 (4)과 같이 나타낼 수 있다

$$C_R = T_R \dots\dots\dots (4)$$

리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널을 유효폭이 B인 T형 단면으로 가정하고, 위 식 (4)에 압축합력 C_R 과 인장합력 T_R 을 적용하여 다음과 같은 일반식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$0.85f'_c aB = f_b A_b + (f_{wb} + f_{wt}) A_w \dots\dots\dots (5)$$

여기서,

- f'_c : 폴리머 콘크리트의 압축강도
- a : 폴리머 콘크리트의 등가직사각형 응력블록 깊이($\beta_1 c$)

- β_1 : 폴리머 콘크리트 응력블록의 매개변수 (부재의 압축부 선단에서 중립축까지 거리에 대한 압축부 선단에서 압축합력 거리비)
- c : 압축부 선단에서 중립축까지의 거리
- b : 폴리머 콘크리트 복합패널 단면의 플랜지 유효폭
- f_b : 인장측 GFRP의 인장응력
- A_b : 인장측 GFRP의 단면적
- f_{wb} : 옆면 GFRP 최하단의 인장응력
- f_{wt} : 옆면 GFRP 최상단의 응력
- A_w : 옆면 GFRP 단면적

Fig. 5, Fig. 6 은 각각 단면해석 모델로 삼은 리브와 그 해석도이다.

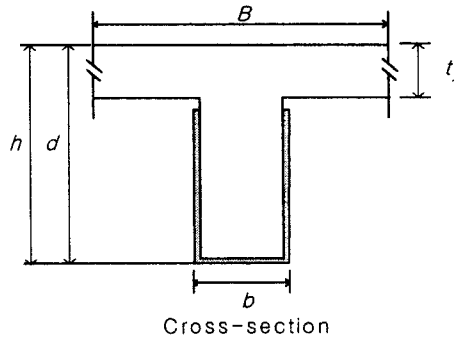


Fig. 5 Shape of composite panel used for flexural test

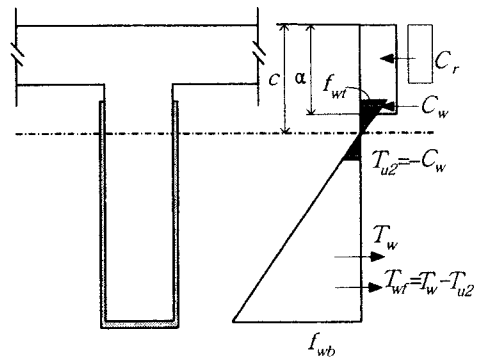


Fig. 6 Force equilibrium in a composite panel section : neutral axis below flange and top fiber sheets

상기 (5)식에서, 등가직사각형 응력블록 깊이 a 는 단면에서의 모멘트 평형 조건식을 a 에 관한 2차 다항식으로 정리하고 근의 공식을 이용하여 구할 수 있다.

$$0.85f'_c ba^2 + (2A_w E_F \epsilon_{cu} - f_b A_b) a - \beta_1 A_w E_F \epsilon_{cu} (2h - h_w)(2h - h_w) = 0 \dots\dots (6)$$

또한 상기 (5)식에서의 f_{wb} , f_{wt} 는 Hooke의 법칙과 적합조건에 의해 다음식 (7), (8)과 같이 구할 수 있다.

$$f_{wb} = E_F \epsilon_{wb} = E_F \epsilon_c \frac{h-c}{c} \dots\dots\dots (7)$$

$$f_{wt} = E_F \epsilon_{wt} = E_F \epsilon_c \frac{h-c-h_w}{c} \dots\dots\dots (8)$$

여기서,

- ϵ_{wb} : 옆면 GFRP 최하단의 변형률
- ϵ_{wt} : 옆면 GFRP 최상단의 변형률
- ϵ_c : 콘크리트 압축 변형률
- h : 리브를 갖는 복합패널의 단면 깊이
- h_w : 옆면시트의 보강 깊이
- E_F : GFRP의 탄성계수

식 (7) 및 (8)은 중립축의 위치가 플랜지 하부, 옆면 GFRP 상단 사이에 있는 경우를 나타낸 것이다. 한편, 중립축이 플랜지 안에 위치하는 경우(옆면 GFRP 층은 중립축 아래 위치)에도 GFRP의 인장력성분인 T_w 의 항 $(f_{wb} + f_{wt}) \times A_w$ 의 값은 동일하게 적용될 수 있다. 또한, 중립축의 위치가 옆면 GFRP에 위치한 경우에도 중립축 위의 GFRP가 받는 압축력 (C_w)만큼 중립축 아래 GFRP의 부분 인장력 (T_{w2})이 상쇄되어 중립축이 GFRP 상단 부분에 위치한 경우에 유도된 식 (6)을 그대로 적용할 수가 있다.

3. 리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널의 휨 특성

리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널의 극한 모멘트는 GFRP 두께가 1.0에서 4.0 mm 로 증가할 때, 리브높이가 2 cm인 경우에는 2,450에서 4,743 N·m로 약 93 % 증가하였고 리브높이가 3 cm인 경우에는 2,852 에서 5,557 N·m로 약 94 % 증가하였으며, 리브높이가 4 cm인 경우에는 3,283에서 6,625 N·m로 약 101 % 증가하여 리브 높이에 관계없이 거의 일정한 증가폭을 보였다.

한편 리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널의 극한 모멘트는 리브 높이가 2.0에서 4.0 cm로 증가할 때, GFRP 층 두께가 1.0 mm인 경우에는 2,450에서 3,283 N·m로 약 34 % 증가하였고 GFRP 층 두께가 2.0 mm인 경우에는 3,381에서 4,733 N·m로 약 40 % 증가하다. 또한 GFRP층 두께가 3.0 mm인 경우에는 4,224에서 5,958 N·m로 약 41 % 증가하였고, GFRP 층 두께가 4.0 mm인 경우에는 4,747에서 6,625 N·m로 약 39 % 증가하여 GFRP 층 두께에 관계없이 거의 일정한 증가폭을 보였다.

Fig. 7 에 GFRP 두께에 따른 리브 높이별 극한 모멘트를 나타내었고, Table 9와 Fig. 8 및 9에는

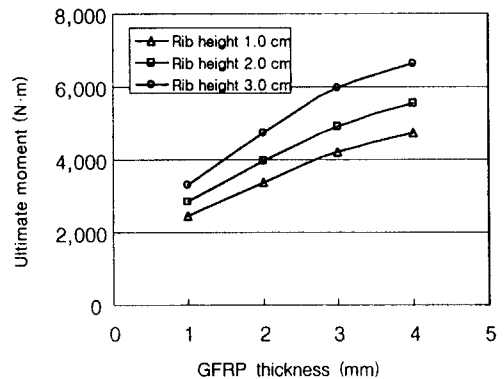


Fig. 7 Ultimate moment according to the GFRP thickness and the rib height

Table 9 Ultimate moment and ultimate load

Specimens	Ultimate moment (N · m)		Ultimate load (N)		GFRP thickness (mm)	Rib height (cm)
	EXP.	PRE.	EXP.	PRE.		
R2-1	2,450	2,509	12,250	12,544	1.0	2.0
R2-2	3,381	3,332	16,905	16,660	2.0	2.0
R2-3	4,224	4,116	21,119	20,580	3.0	2.0
R2-4	4,743	4,851	23,716	24,206	4.0	2.0
R3-1	2,852	2,940	14,259	14,700	1.0	3.0
R3-2	3,969	4,018	19,845	20,090	2.0	3.0
R3-3	4,920	4,880	24,598	24,402	3.0	3.0
R3-4	5,557	5,762	27,783	28,812	4.0	3.0
R4-1	3,283	3,352	16,415	16,758	1.0	4.0
R4-2	4,733	4,851	23,667	24,255	2.0	4.0
R4-3	5,958	6,233	29,792	31,164	3.0	4.0
R4-4	6,625	6,752	33,124	33,761	4.0	4.0

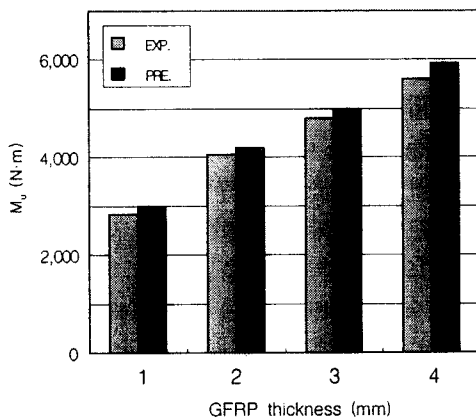


Fig. 8 Ultimate moment according to GFRP thickness (Rib height: 2 cm)

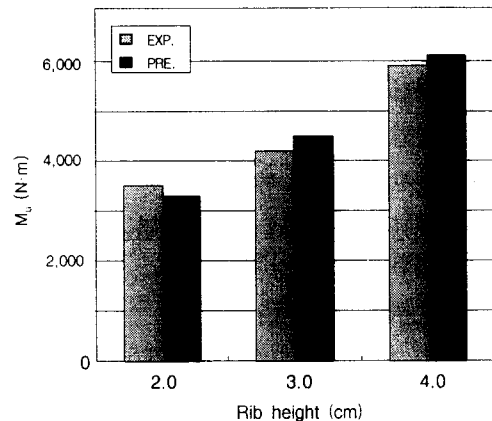


Fig. 9 Ultimate moment according to rib height (GFRP thickness: 3 mm)

각각 GFRP 층 두께와 리브 높이에 따른 폴리머 콘크리트 복합패널의 극한모멘트에 대한 실험값과 이론값을 나타냈는데, 이들 값은 비교적 잘 부합되어 본 연구에서 제시한 단면해석 기법이 리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트의 단면설계에 적용가능 할 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 연구는 리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널의 휨 특성을 실험적으로 구명한 것으로서 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트의 휨파괴 모드 및 단면해석방법을 이론적으로 구명하였던 바, GFRP의 보강효과를 극대화 하기 위해서

는 충분한 접착력을 확보 할수 있는 U형 보강형식이 가장 유리하다.

2. 리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널의 극한 모멘트는 GFRP 층 두께가 1.0에서 4.0 mm 로 증가할 때, 리브 높이에 관계없이 약 93~101 %의 일정한 증가폭을 보였다.

3. 리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널의 극한 모멘트는 리브 높이가 2.0에서 4.0 cm로 증가할 때, GFRP 층 두께에 관계없이 약 35~41 %의 일정한 증가폭을 보였다.

4. 강도설계법에 기초한 극한모멘트 예측식은 실험결과와 잘 부합되어 리브를 갖는 유리섬유보강 폴리머 콘크리트 복합패널의 단면해석이나 설계에 매우 유용하게 사용될 것이다.

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*, Vol. 2, pp.17-34.
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*, U.K., Vol. 23, No. 5, pp.385-398.
3. Jin, N. J., 2004, "Flexural Behaviors of Steel and GFRP Reinforced Polymer Concrete T-Beam", *Ph. D. Dissertation*, Kangwon National University.
4. Ashour, S. A., & Wafa, F. F., 1993, "Flexural Behavior of High-Strength Fiber Reinforced Concrete Beams", *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 3, pp.279-287.
5. Hsu, H. T., 1984, "Flexural Behavior of Polymer Concrete Beams", *Ph. D. Dissertation*, The University of Texas at Austin.
6. Knab, L. I., 1972, "Flexural Behavior of Conventionally Reinforced Polyester Concrete Beams", *Ph. D. Dissertation*, The University of Cincinnati.