

# 유리섬유보강 Epoxy-Panel로 보강된 철근콘크리트보의 거동해석

## Analysis of Behavior in RC Beams Strengthened by Glass-Fiber Reinforced Epoxy-Panel

이 창 훈\*  
Lee, Chang-Hoon

송 하 원\*\*  
Song, Ha-Won

변 근 주\*\*\*  
Byun, Keun-Joo

### ABSTRACT

The Glass-Fiber Reinforced Epoxy-Panel(GFREP) is a composite material developed for repairing and strengthening of RC structures. The objective of this study is to verify the applicability of finite element modeling technique to analyze behaviors of RC beams strengthened by the GFREP. In this study, the basic material properties obtained by experiments on the GFREP and the reinforced concrete constitutive models were considered and the comparison between analyses and experiments of RC beam specimens strengthened by the GFREP was made. Although analysis method in this paper was reasonably good, the necessities which can consider the effect of plate-end shear and plate separation were recognized.

### 1. 서 론

유리섬유보강 Epoxy Panel은 철근콘크리트 구조물의 보수 및 보강을 위하여 개발된 복합재료이다. 이제까지 국내에서는 건축 및 토목구조물의 보수·보강공법으로 강판, 탄소섬유쉬트, 탄소섬유판을 주로 사용하여 왔고, 이러한 보강공법들에 대한 실험 및 해석적 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 연구들과 실제 적용사례들을 통하여 각 보강공법에 따른 장단점이 밝혀지고 있으며, 이는 상황에 알맞는 경제적 보수·보강재료와 공법의 개발을 요구하게 되었다. 본 연구에서는 내구성 및 내화학성이 우수하고 보수와 보강을 동시에 만족시킬 수 있는 신소재로서 유리섬유보강 Epoxy Panel을 이용한 판접착공법으로 보강된 철근콘크리트보에 대한 거동을 분석하고자 한다. 이를 위하여 유리섬유보강 Epoxy Panel과 접착제로 사용되는 에폭시수지의 기초물성시험을 통하여 재료모델링을 수행하였고, 유한요소해석 모델링기법을 이용하여 섬유보강 Epoxy Panel로 보강된 철근콘크리트보의 거동을 해석하였다.

\*정회원, 연세대학교 토목공학과 석사과정

\*\*정회원, 연세대학교 토목공학과 부교수

\*\*\*정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

## 2. 재료모델

### 2.1 GFREP 재료모델

유리섬유보강 Epoxy-Panel(GFREP)이란 기지재(Matrix)로서 에폭시 모르타(Epoxy Mortar)를 사용하고 보강재(Reinforcement)로서는 유리섬유(Glass Fiber)를 사용하는 복합재료(Composite Material)이다. GFREP의 표준규격은 두께 1cm에 Glass-Fiber Mesh 3Ply의 구조를 가진다(그림 1). GFREP의 재료특성은 GFREP 10개 시편에 대해 기초물성시험을 실시한 결과의 평균값을 기준으로 하여 인장탄성계수는  $34,000\text{kg/cm}^2$ , 인장강도는  $340\text{kg/cm}^2$ , 포아송비는 0.22의 값을 구하였다.<sup>1)</sup> 그림 2에서 볼 수 있듯이 GFREP의 인장응력-변형률 관계는 비선형 거동을 보이지만, 해석의 편의를 위하여 극한 변형률인 0.01까지 선형탄성거동을 하는 것으로 가정하여 식 1의 응력-변형률관계를 제안하였다.

$$\sigma_p = E_p \epsilon_p \quad (1)$$

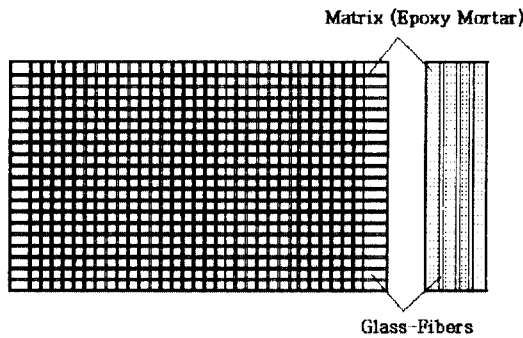


그림 1 GFREP의 구성

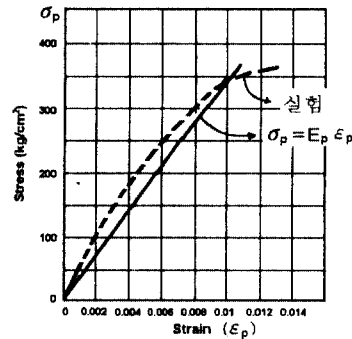


그림 2 GFREP의 응력-변형률 관계

### 2.2 철근콘크리트 재료모델

압축을 받는 콘크리트에 대한 구성방정식은 콘크리트를 연속체적 파괴와 탄소성으로 모델링하는 Okamura, et.al.<sup>2)</sup>에 의하여 제안된 모델을 사용하였고, 인장과 전단을 받는 콘크리트에 대해서는 그림 3에서 보여주는 것처럼 크게 인장연화모델, 인장경화모델, 전단전달모델등으로 구성될 수 있다. 콘크리트내에 있는 철근의 평균응력-평균변형률은 그림 4와 같이 평균항복응력과 항복후 경화률로 나타낼 수 있다.

### 2.3 에폭시수지의 재료모델

일반적으로 서로 다른 두 부재 사이의 경계층에서 발생하는 응력-변형관계는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>3)</sup> 에폭시 층은 interface 요소로 이루어지기 때문에 수직강성도  $D_{11}$ 과 전단강성도  $D_{22}$ 가 필요하다. 접착제로 사용되는 에폭시수지의 탄성계수는  $27,500\text{kg/cm}^2$ 이고, 포아송비는 0.35로 가정하였다. 에폭시수지의 두께를 1.5mm라고 가정하면  $D_{11} = 183,000\text{kg/cm}^3$ ,  $D_{22} = 68,000\text{kg/cm}^3$ 이다.

$$\begin{bmatrix} t_n \\ t_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $t_n, t_t$ 는 수직과 수평방향의 표면응력을 의미하고,  $\Delta u_n, \Delta u_t$ 는 수직과 수평방향의 변위를 나타낸다.

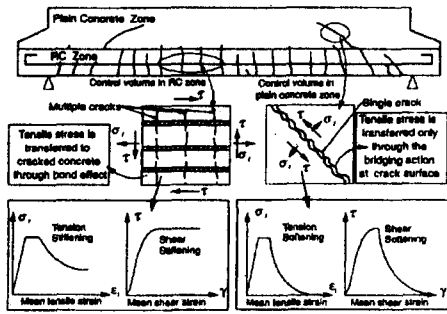


그림 3 철근콘크리트의 구성방정식

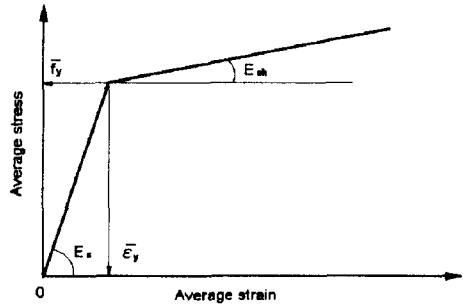


그림 4 콘크리트내의 철근의 평균응력-평균변형을 관계

### 3. 유한요소법에 의한 해석

#### 3.1 구조모형시험

철근콘크리트보에서의 GFREP의 보강효과를 알아보기 위하여 일정한 제원 및 철근비를 가지는 철근콘크리트보를 이용하여 휨시험을 실시하였다. 모형은 무보강 철근콘크리트보(BR0), 부분보강 철근콘크리트보(BR1), 전면보강 철근콘크리트보(BR2)로 나누어 보강한 후 시험하였다. 시험에 사용된 철근콘크리트보의 규격과 철근을 배근한 모습은 그림 5와 같고, 그림 6은 부분보강보를 그림 7은 전면보강보를 보여주고 있다. 강도등급 SD30, D25의 이형철근을 주철근으로, D10의 스티럽을 콘크리트 표준시방서 규정에 따라 7cm의 등간격으로 보 중앙부를 제외한 양쪽 전단지간에 배근하였다. 철근콘크리트보의 제작에 사용된 콘크리트의 배합표는 표 1과 같고, 콘크리트의 압축강도 실험결과  $327\text{kg/cm}^2$ 의 평균압축강도를 얻을 수 있었고, 철근콘크리트보의 주철근(SD30, D25)의 인장강도 실험결과  $3443.0\text{kg/cm}^2$ 의 인장강도를 얻을 수 있었다.

표 1 철근콘크리트보 제작에 사용된 콘크리트의 배합표

설계 강도 ( $\text{kg/cm}^2$ )	굵은골재최대 치수	슬럼프 (cm)	W/C (%)	잔골재율 (%)	C (kg)	W (kg)	G (kg)	S (kg)
350	25	6+1	34.9	58.7	516	180	1066	626

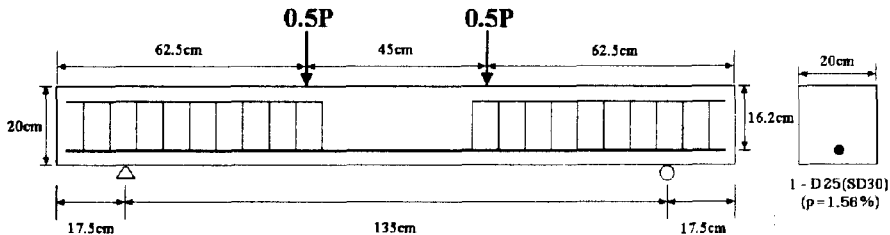


그림 5 무보강 철근콘크리트보

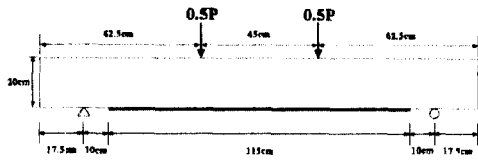


그림 6 부분보강 철근콘크리트보

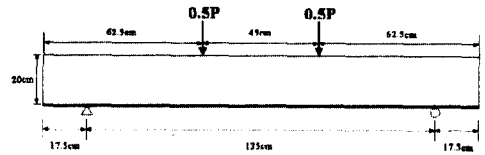


그림 7 전면보강 철근콘크리트보

### 3.2 유한요소해석

그림 8은 GFREP로 보강된 철근콘크리트보를 해석하기 위한 유한요소모델을 도시한 것이다. 철근콘크리트는 8절점을 가지는 2차원 평면응력요소로 나타내고, GFREP는 역시 8절점의 2차원 평면응력요소로서 탄성거동을 하는 것으로 가정된다. 콘크리트와 GFREP사이의 접촉계면은 6절점의 interface(경계)요소로 표현된다. 철근콘크리트는 다시 RC 영역과 PL 영역으로 나누어지는데, 이는 철근직경, 인장강도, 콘크리트의 인장강도 및 덮개콘크리트의 두께에 의하여 결정된다. RC 영역에서 콘크리트는 인장경화거동을 하고, PL 영역에서는 인장연화거동을 한다.<sup>2)</sup>

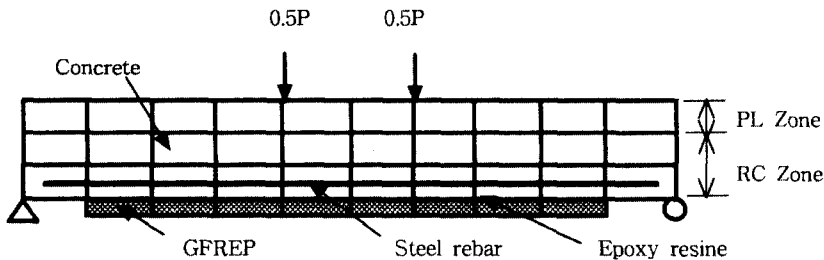


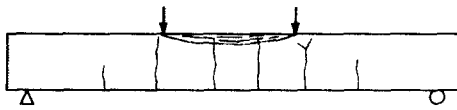
그림 8 유한요소해석모델

구조모형을 그림 8과 같은 방법으로 요소분할하여 모델링한 후 해석을 실시하여 실험결과와 비교하였다. 해석에서 보강보의 파괴는 GFREP의 최대응력이 인장강도에 도달하는 시점으로서, 그 때의 재하하중을 최대하중으로 정하였다. GFREP의 휨강도 보강효과 및 실험값과 해석값의 차이를 표 2에 나타내었다. GFREP의 보강효과는 부분보강보의 경우 20.1%, 전면보강보의 경우 16.7%의 강도증가를 보여주었고, 각 구조모형의 실험값과 해석값의 차이는 2.8%~4.2%로서 제안된 유한요소해석방법에 의하여 GFREP로 보강된 보의 휨강도를 비교적 정확하게 예측할 수 있었다.

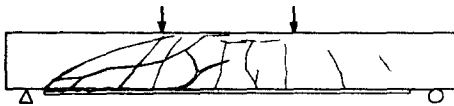
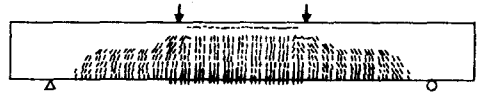
표 2 철근콘크리트 보모형에 대한 GFREP의 휨강도 보강효과

	무보강보(BR0)		부분보강보(BR1)		전면보강보(BR2)	
	실험	해석	실험	해석	실험	해석
최대하중(ton)	14.4	14.0	17.3	18.0	16.8	17.5
보강효과/오차(%)	-	2.8	20.1	2.9	16.7	4.2

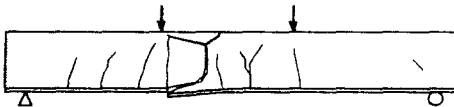
그림 9(a)~(c)는 철근콘크리트보의 실험에 의한 파괴양상과 해석에 의한 파괴양상을 비교하여 보여주고 있다. 무보강보는 실험에서 전형적인 휨파괴양상을 보여주었고, 해석에서도 역시 휨파괴를 나타내었다. 실험에서 부분보강보는 판단부에서의 전단균열이 크게 발전되다가 판분리에 의해서 급격히 파괴되는 취성파괴를 보여주었고, 전면보강보는 휨균열이 발전하다가 재하위치 하부의 보강판이 파단되면서 급격히 파괴되는 취성파괴를 보여주었다. 하지만 해석에서는 전면보강보와 부분보강보의 파괴양상의 차이가 거의 없었고, 단지 보의 중앙부에 비하여 하중이 재하되는 위치의 하부에서 휨균열이 크게 발달하는 경향을 보여주었다. 이러한 경향은 전면보강보의 실험에서 보강재의 파단이 하중재하위치의 하부에서 발생하는 현상과 일치하는 것이다. 실험에서 부분보강보의 전단균열이 크게 발전하는 것은 보강판 단부에서의 응력집중현상에 기인하는 것으로 판단된다.<sup>4)</sup>



(a) 무보강보



(b) 부분보강보



(c) 전면보강보

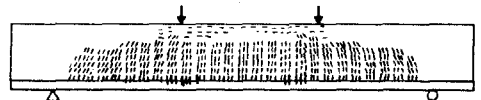


그림 9 철근콘크리트보 모형의 파괴형상 (좌 : 실험결과, 우 : 해석결과)

그림 10은 무보강 철근콘크리트보(BR0)에 대한 해석을 실시하여 하중-처짐관계를 실험값과 비교한 것으로서 최대하중이전의 강성에서 차이가 조금 있지만 실험값과 해석값이 거의 일치함을 보여준다. 그림 11은 부분보강보(BR1)의 하중-처짐 곡선으로서 실험에서는 최대하중까지 강성의 저하가 별로 없지만 해석에서는 최대하중이전에 강성 저하가 두드러짐을 보인다. 그림 12는 전면보강보(BR2)에 대한 하중-처짐곡선으로서 최대하중까지 실험과 해석의 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 그림 13은 각 구조모형에 대한 실험에 의한 휨-처짐곡선을 비교하여 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 부분보강보의 강성이 전면보강보에 비하여 크게 나타나는데, 이는 보강판 단부전단균열의 발달로 인하여 보의 처짐이 균일하지 않고 한쪽으로 치우쳐 상대적으로 처짐측정 중앙부의 처짐이 낮게 나왔고, 균열이 전면보강의 경우보다 분산 발생하여 처짐이 낮아진 것으로 판단된다.

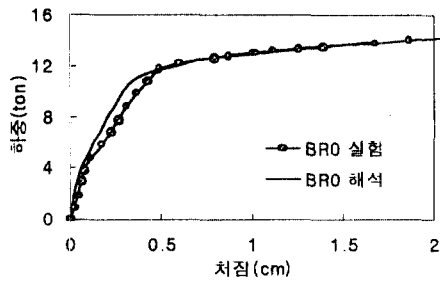


그림 10 무보강보의 하중-처짐곡선

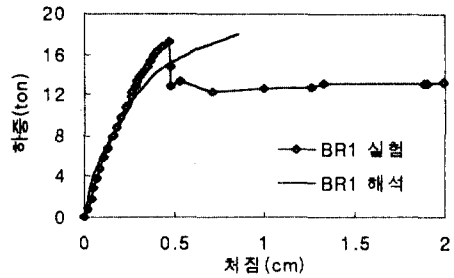


그림 11 부분보강보의 하중-처짐곡선

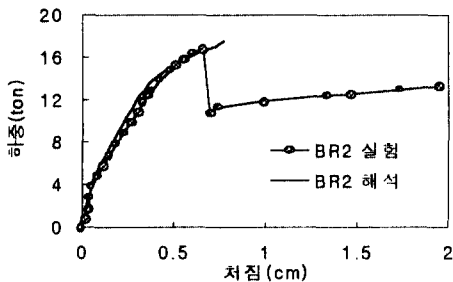


그림 12 전면보강보의 하중-처짐곡선

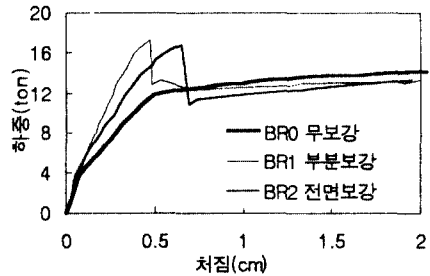


그림 13 하중-처짐곡선의 실험값 비교

#### 4. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) GFREP로 보강된 철근콘크리트보의 유한요소해석모델을 제안하고 해석을 수행하여 실험값과 비교한 결과 휨강도는 비교적 정확히 예측함을 보여주었다.
- 2) GFREP로 보강된 철근콘크리트보의 파괴양상은 부분보강의 경우 보강판 단부에서 전단균열이 발전하며 판분리에 의해 급격히 파괴되는 취성파괴를 보여주며, 전면보강의 경우 휨에 의한 보강판의 파단으로 급격히 파괴되는 취성파괴를 보여주었다. 해석에서는 전면보강의 경우 실험에서의 파괴양상을 비교적 잘 나타내지만 부분보강보에서의 판단부전단이나 판분리를 확인할 수 없었다.
- 3) 실제 구조물은 대부분 전면보강이 아니라 부분보강이기 때문에 이를 해석하기 위하여 판단부전단과 판분리를 고려할 수 있는 해석기법이 필요함을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

1. 연세대학교 재해연구소, "섬유보강 Epoxy Panel을 이용한 콘크리트 구조의 보수 및 보강 기법에 관한 해석 및 실험적 연구", 1998
2. 岡村甫, 前川宏一, "鐵筋コンクリートの非線形解析と構成則", 1991
3. Jansze, W., "Strengthening of Reinforced Concrete Members in Bending by Externally Bonded Steel Plates", 1997
4. 숭실대학교 생산기술연구소, "에폭시접착 강판보강 철근콘크리트보의 역학적 거동에 관한 연구", 1994