

# FREP로 보강된 RC보의 보강효과 평가에 관한 기초적 연구

## A Fundamental Study on Reinforcement Effect Estimation of RC Beams Strengthened by FREP.

강성후\*                      박선준\*\*                      김민성\*\*\*  
Kang, Sung Hoo          Park, Sun Joon          Kim, Min Sung

### ABSTRACT

It analyzed the reinforcement effect according to reinforced period for FREP. It found that reinforcement effect of P-Type that was reinforced during the usage decreased compared to I-Type that was reinforced before the usage. So when reinforcing a existing structure that is being used, it should consider the stress that is produced due to the fixed load.

It evaluated bending and shear of RC reinforcing beam based on the test and analytical conditions of this study. It found that stress concentration was concentrated due to rapid change of bending rigidity in reinforced cutting part as a result of excessive reinforcement thickness of FREP. It resulted in rip-off failure. It means that it should evaluate the shear when designing reinforcement.

### 1. 서론

철근콘크리트 구조물은 내적 및 외적요인 등으로 인한 내력손실과 사용하중의 증가로 인한 구조물의 손상이 가속화되어 심각한 균열이나 처짐이 발생하는 등 구조물의 안전성에 대한 문제가 발생되고 있다. 이런 이유로 구조물의 내구성과 내하력을 향상시키기 위한 방법 중 FREP(Fiber-Reinforced Epoxy Panel)를 이용한 보수·보강공법이 사용되고 있으나, 이러한 FREP 보강공법의 적절한 보강설계기법이 아직 명확히 정립되어 있지 않은 상황이다. 본 연구에서는 RC보에 대한 사용 전 FREP 휨보강의 경우와 사용 중 FREP 휨보강의 경우에 대한 휨 보강효과를 평가하기 위해 4절점 휨실험 및 그에 따른 구성방정식을 정립하여 그 차이를 규명하고, 보강재 단부의 응력집중으로 인해 발생하는 단부파괴거동의 역학적 특성을 밝힘으로써 휨 보강효과 성능을 평가하고자 한다.

### 2. 이론적 고찰

#### 2.1. 재료의 구성방정식

콘크리트의 구성방정식은 그림 1의 응력-변형률 선도에서 보는 바와 같이 현재 가정 널리 사용되고 있는 Hognestad에 의해 제시된 모델식인 식 (1)을 사용하였다.

$$f_c = f_{ck} \left\{ 2 \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right\} \quad (\epsilon_c < \epsilon_0), \quad f_c = f_{ck} \left\{ 1 - \frac{0.15}{\epsilon_{cu} - \epsilon_0} (\epsilon_c - \epsilon_0) \right\} \quad (\epsilon_c \geq \epsilon_0) \quad (1)$$

철근의 구성방정식은 그림 2에 제시된 바대로 완전 탄·소성 재료로 가정한 모델식인 식 (2)를 사용하였다.

$$f_s = E_s \cdot \epsilon_s \quad (\epsilon_s < \epsilon_y), \quad f_s = f_y \quad (\epsilon_s \geq \epsilon_y) \quad (2)$$

Epoxy panel의 구성방정식은 그림 3 및 식 (3)과 같다.

$$f_f = f_{fu} \left\{ 2 \frac{\epsilon_f}{\epsilon_{fu}} - \left( \frac{\epsilon_f}{\epsilon_{fu}} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

\* 정회원, 동신대학교 토목공학과 교수

\*\* 정회원, 동신대학교 토목공학과 전임강사

\*\*\* 정회원, 동신대학교 대학원 토목공학과 박사과정

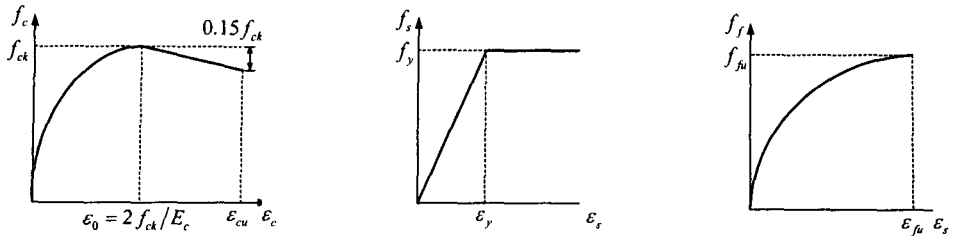


그림 1 콘크리트 응력-변형률 선도    그림 2 철근 응력-변형률 선도    그림 3 FREP 응력-변형률 선도

### 2.3. 강도설계법에 의한 휨 부재의 단면해석기법

철근콘크리트보의 단면거동을 해석하기 위하여 일반적인 Bernoulli-Navier의 가정이 사용되었다. 즉, 보의 단면은 휨변형 후에도 평면을 유지하며 전단변형은 무시한다. 그리고 균열사이의 국부적인 부착슬립은 무시한다. 그림 4와 같은 직사각형 단면에 대한 해석절차를 요약하면 다음과 같다.

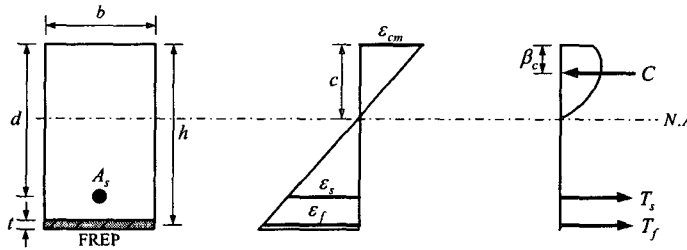


그림 4 하중재하 상태에서의 평형방정식

철근 및 보강재에 작용하는 힘은  $T_s = A_s f_s$  및  $T_f = b t f_f$ 이며, 철근 및 보강재의 변형률 선도로부터 다음과 같다.

$$\epsilon_s = \epsilon_{cm} \frac{d-c}{c}, \quad \epsilon_f = \epsilon_{cm} \frac{h-c}{c}, \quad f_s = E_s \epsilon_s, \quad f_f = E_f \epsilon_f \quad (4)$$

여기서,  $\epsilon_{cm}$ 은 콘크리트 압축연단에서의 변형률,  $d$ 는 압축연단에서 철근 도심까지의 거리,  $h$ 는 압축연단에서 보강재 도심까지의 거리이다. 따라서, 콘크리트의 압축력은 다음과 같다.

$$C = \alpha \cdot f_{ck} \cdot b \cdot c, \quad \alpha = \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} (f_c) d\epsilon_c}{f_{ck} \cdot \epsilon_{cm}} \quad (5)$$

여기서,  $c$ 는 중립축,  $\alpha$ 는 등가직사각형단면으로 환산된 평균압축응력을 위한 계수이다. 또한, 이 압축력은 콘크리트 압축연단에서  $\beta_c$ 만큼 떨어져 있다. 도심계수인  $\beta$ 는 주어진 응력-변형률 선도로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\beta = 1 - \frac{\int_0^{\epsilon_{cm}} (\epsilon_c \cdot f_c) d\epsilon_c}{\epsilon_{cm} \int_0^{\epsilon_{cm}} (f_c) d\epsilon_c}, \quad \beta_c = \beta \times c \quad (6)$$

따라서, 단면내의 힘의 평형에 따른 단면력은 다음과 같다.

$$C - (T_s + T_f) = 0, \quad \alpha f_c b c - (A_s f_s + b t f_f) = 0 \quad (7)$$

중립축 위치는 시산법을 이용하여 식 (7)을 만족할 때 구해진다. 또한, 구해진 중립축 위치  $c$ 를 이용하여 저항 모멘트  $M_n$ 을 다음과 같이 구한다.

$$M_n = T_s(d - \beta_c) + T_f(h - \beta_c) \quad (8)$$

## 3. 실험적 방법

### 3.1. 실험체 제작 및 실험변수

보시편의 설계를 위해서는 “철근 콘크리트 구조설계규준(1999)”을 적용하였고, 그림 5는 보시편의 상세도를 나타낸 것이다. 또한, 실험변수에 따른 실험체 종류는 표 1과 같다.

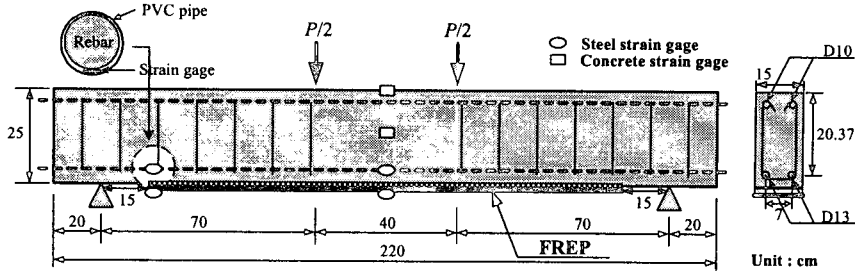


그림 5 보시편 상세도

표 1 보시편의 종류 및 재한단계

Specimen	Pre-loading(%)	비 고
N-Type	-	무보강 기준 실험체로서 타실험체의 비교대상 실험체
I-Type	Load ratio 0	순수 초기보강 실험체(사용 전 보강)
P-Type	$P_{(N-Type)max}$ 의 23%	사용용력을 고려한 보강(사용 중 보강) (loading → fixed loading → FREP보강 → reloading)

### 3.2. 실험결과 분석

기준실험체(N-Type)의 최대하중을 기준으로 사용 전 보강한 실험체(I-Type)는 평균 66.0%, 사용 중 보강한 실험체(P-Type)는 평균 61.1%의 휨내력이 증가하였다. 각각의 실험결과는 표 2와 같다.

표 2 실험체의 파괴모드 및 실험결과

Specimen		Initial Crack		Maximum		Failure mode
		$P_{cr}$ (tonf)	$\delta_{cr}$ (mm)	$P_{max}$ (tonf)	$\delta_{max}$ (mm)	
N-Type	1	1.2	0.55	6.68	22.83	Bending
	2	1.2	0.41	6.58	19.63	
	3	1.4	0.50	6.72	20.54	
	average	1.27	0.47	6.66	21.00	
I-Type	1	3.70	1.30	11.31	9.28	rip-off
	2	2.86	1.02	10.68	9.46	
	3	2.40	0.88	11.19	9.58	
	average	2.99	1.07	11.06	9.44	
P-Type	1	2.20	0.73	10.90	5.78	rip-off
	2	2.70	1.01	10.95	7.44	
	3	2.10	1.02	10.33	6.14	
	average	2.33	0.92	10.73	6.45	

## 4. 수치 해석적 방법

### 4.1. 수치 해석 결과

#### 4.1.1. N-Type 보의 해석

실험시편에서의 항복강도는 5.41~5.50 tonf, 그때의 처짐은 4.7~5.08 mm로 나타났다. 해석결과에서의 항복강도는 4.93 tonf, 그때의 처짐은 4.40 mm로 나타났다. 하중의 증가에 대한 철근의 변형을 또한 실험결과와 해석결과가 거의 일치하는 것으로 판명되었다.

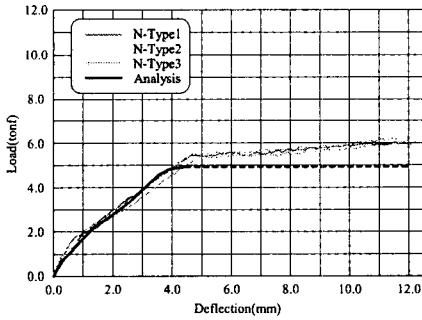


그림 6 N-Type 하중-처짐 곡선

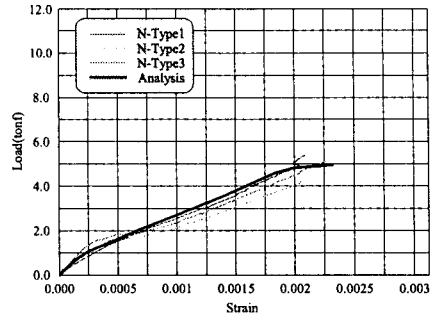


그림 7 N-Type 하중-철근변형률 곡선

#### 4.1.2. I-Type 및 P-Type 보의 해석

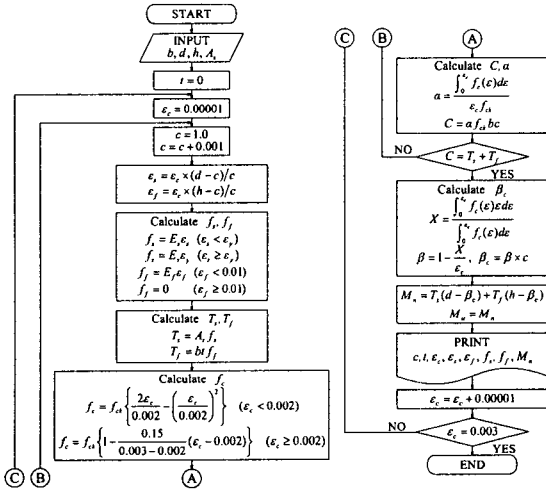


그림 8 I-Type 보의 Flow Chart

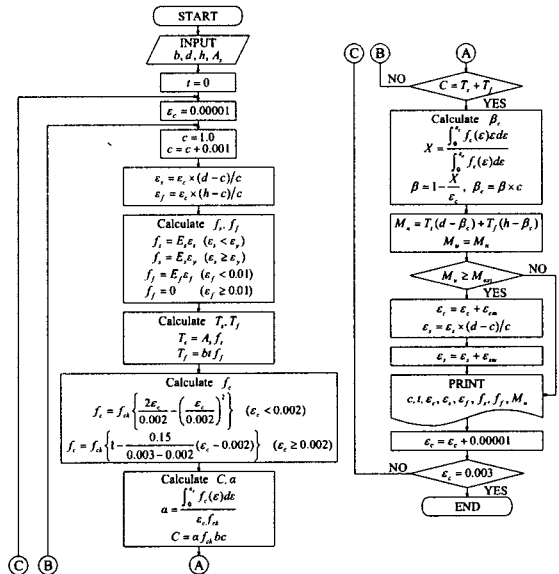


그림 9 P-Type 보의 Flow Chart

I-Type 실험시편에서는 하중이 약 6.9~7.5 tonf에서 보강재 단부쪽에서 사인장 균열이 발생하였고, 사인장 균열은 휨균열에 비하여 빠르게 진전되며 파괴하중인 10.68~11.31 tonf 때까지 계속적으로 증가하였다. 해석결과에서는 압축콘크리트의 변형률이 0.002가 됨으로써 최대하중은 10.30 tonf, 그때의 처짐은 7.48 mm로 나타났다.

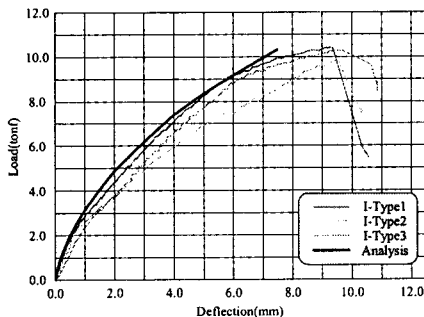


그림 10 I-Type 하중-처짐 곡선

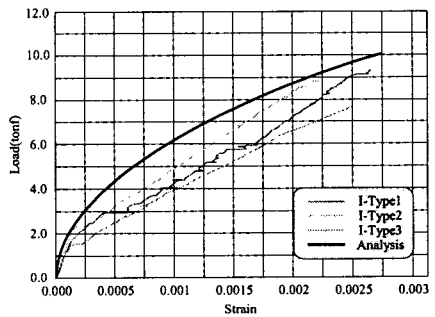


그림 11 I-Type 하중-철근변형률 곡선

P-Type 시험시편에서는 하중이 약 6.7~8.1 tonf에서 보강재 단부쪽에서 사인장 균열이 발생하기 시작하였다. 사인장 균열은 휨균열에 비하여 빠르게 진행해 갔으며 파괴하중인 10.33~10.95 tonf 때까지 사인장균열이 계속적으로 증가하였다. 해석결과에서는 압축콘크리트의 변형률이 0.002가 됨으로써 최대하중은 9.0 tonf, 그때의 처짐은 7.62 mm로 나타났다.

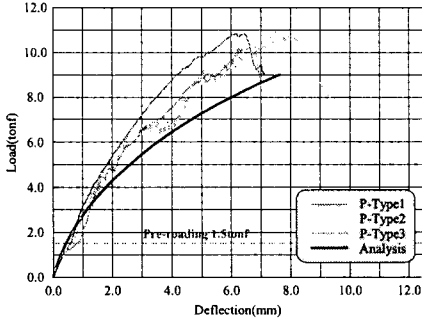


그림 12 P-Type 하중-처짐 곡선

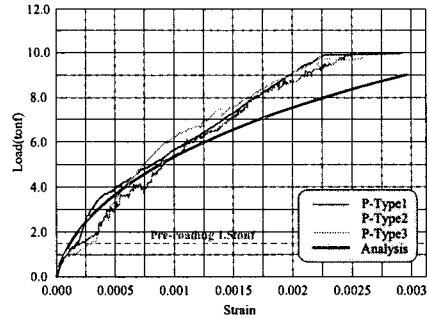


그림 13 P-Type 하중-철근변형률 곡선

#### 4.2. 전단에 대한 해석

보강재의 휨강성이 크고 보강재의 두께가 커질 경우 전단파괴, 즉 조기파괴가 발생한다. FREP와 같은 보강판으로 보강된 구조물에서 많이 발생하는 이러한 조기파괴 양상의 메카니즘을 살펴보면 하중이 증가할수록 보강판의 불연속부에 집중되는 계면응력의 주응력이 점차적으로 커지게 되고 콘크리트의 파괴물성치를 초과하게 되면 단부의 콘크리트 하면에 균열이 발생하게 된다. 이때 단부위치의 콘크리트에서는 휨응력으로 인한 인장응력과 전단응력 및 수직응력이 집중하게 되고 콘크리트의 2축 인장응력상태가 되어 이들 응력의 주응력이 콘크리트에 가장 취약한 단면을 따라 수평방향으로 진전하게 된다.

이러한 철근 콘크리트 부재에서의 전단강도는 콘크리트 구조설계기준에서 전단과 휨만을 받는 부재의 경우에 대한 식에 따라 계산할 수 있다.

$$V_c = \left( 0.5\sqrt{f_{ck}} + 176 \frac{\rho_w V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad (9)$$

### 5. 비교분석

#### 5.1. 보강효과 평가

사용 전 휨 보강한 경우(I-Type)와 사용 중 휨 보강한 경우(P-Type)에 대하여 작용하중의 증가에 따른 전단력 및 휨모멘트 값을 수치해석적으로 구해진 허용값으로 나누어 구해본 결과 그림 14와 그림 15에서와 같이 보강 후 보강효과를 최대 휨모멘트 지점인 중앙단면에 대해서 해석하면 휨 인장파괴를 일으키기 위한 최대하중은 각각 13.1 tonf, 12.7 tonf로 판명되었다. 그러나, 전단력의 증가로 인한 최대 전단력 지점인 보강단부에 대해서 평가한 결과 전단파괴를 일으키기 위한 최대하중은 5.3 tonf로 산정되어 보강단부에서 전단력에 의해 단부부착파괴가 일어남을 알 수 있었다.

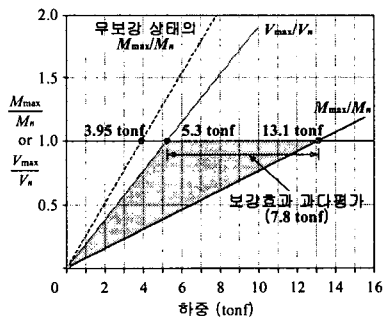


그림 14 I-Type(사용 전 휨 보강) 경우의 해석결과

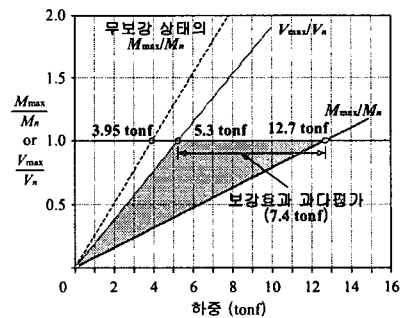


그림 15 P-Type(사용 중 휨 보강) 경우의 해석결과

따라서, 최대 휨모멘트 지점인 중앙단면에 대해서만 평가한다면 7.8 tonf 및 7.4 tonf 만큼의 보강효과가 과다 평가 되는 우려가 있으므로 보강 설계 시 전단에 대한 평가가 반드시 필요하다고 판단된다.

## 5.2. 보강단면 재설정

FREP 보강단면의 과다로 보강 후 보의 거동이 단부부착파괴(rip-off failure)의 형태를 나타내었다. 따라서, 이러한 단부부착파괴 방지를 위해 보강단면의 두께( $t$ )를 변경시켜 휨 인장파괴를 유도해 보았다. 그림 16에서 보는 바와 같이 FREP 보강두께를 2.14 mm 이하로 하였을 경우 중앙단면에서 최대하중이 5.3 tonf 이하로 판명되어 휨 인장파괴를 유도할 수 있으며, 보강효과는 34.2%로 판명되었다.

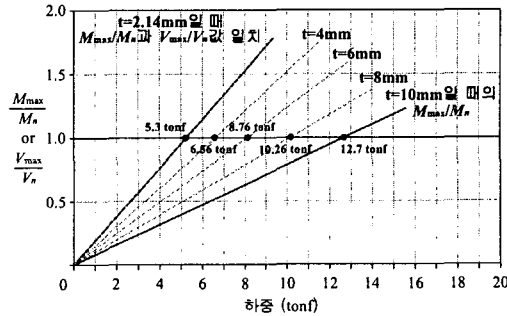


그림 16 보강두께 변경

## 6. 결론

본 연구에서는 FREP 보강공법의 보강설계이론에 대한 수치적 모델을 정립하였고, 그 계산결과를 4점 휨실험을 통한 실험결과와 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서는 FREP 휨보강에 따른 RC보의 보강효과를 평가할 수 있는 일련의 수치적 모델을 정립하였다.
- 2) FREP의 보강시기에 따른 보강효과를 분석한 결과 사용 전 보강(I-Type)에 비해 사용 중 보강(P-Type)의 보강효과가 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 기존 구조물과 같이 사용 중인 구조물을 보강하는 경우에는 이미 작용하고 있는 고정하중으로 인한 발생응력을 보강설계 시 고려하여야 할 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구의 실험 및 해석조건을 기준으로 RC 보강보의 휨 및 전단에 대한 평가를 실시한 결과 FREP 보강두께의 과다로 인한 보강단부의 급격한 휨강성의 변화로 응력집중 현상이 발생하여 단부부착파괴가 생긴다는 것을 알 수 있었다. 이는 보강 설계 시 전단에 대한 평가가 반드시 필요하다는 것을 의미한다.
- 4) 본 연구의 실험 및 해석 조건을 기준으로 RC 보강보에 대한 FREP 보강두께를 수치적 방법에 의하여 변화시켜 본 결과 보강두께를 줄임으로써 단부부착파괴를 배제시키고 휨 인장파괴로 유도하였다. 따라서, 현재의 실험조건을 기준으로 보강두께를 10mm에서 2.14mm로 감소시켜도 동일한 보강효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Eivind Hognestad, "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members," Bulletin 399, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Ill., November 1951, pp.128.
2. James G. MacGregor, "Reinforced Concrete", PRENTICE-HALL International, Inc., 1997, pp.90-96.
3. 심중성 (1995). "콘크리트구조물의 보수·보강기법의 최근 연구 동향", 한국콘크리트학회, 1995, pp.64-73.
4. 오병환 등, "보수·보강된 철근 콘크리트 보의 구조적 거동에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 1996, pp.258-263.
5. 한만엽 등, "탄소섬유 보강공법의 조기 탈락 방지 공법 개발 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 2000, pp.61-67.
6. 한상훈 등, "탄소섬유 보강판(CFRP)으로 보강된 철근콘크리트보의 강성예측에 관한 연구", 한국콘크리트학회 논문집, 2000, pp.763-768.