

# GFRP rebar로 보강된 콘크리트보의 휨 강도감소계수 보정식 제안

## Calculation for of Strength Reduction Factor for Concrete Beam reinforced with GFRP rebars

심 중 성\*    박 철 우\*\*    박 성 재\*\*\*    강 태 성\*\*\*\*    권 동 욱\*\*\*\*\*    이 용 택\*\*\*\*\*

Sim, Jong Sung    Park, Cheol Woo    Park, Sung Jae    Kang, Tae Sung    Kwon, Dong Wook    Lee, Yong Taek

### ABSTRACT

If the flexural member of concrete is designed using the FRP rebar, suddenly brittleness destruction resulted from the fracture of FRP rebar is generated in the extreme situation because of brittleness characteristics of FRP rebar and concrete when designed to be less than balanced reinforcement ratio, so it is recommended to design the flexural member of concrete to be more than balanced reinforcement ratio. In ACI 440.1R-06 proposes the different bending strength decrease coefficient according to destructive form of concrete flexural member using the FRP rebar. However, ACI 440.1R-06 applies the same strength decrease coefficient to all FRP rebars made of diverse materials. If the same strength decrease coefficient is applied to all FRP rebars, effect of increasing the reinforcement ratio and selection of FRP rebar will be considerably limited. In this regard, we are to propose the formula to calculate the bending strength decrease coefficient in consideration of change in characteristics of FRP rebar and L/D through the reliability analysis in this paper.

### 요 약

FRP rebar와 콘크리트의 취성적인 재료특성때문에 FRP rebar를 사용한 콘크리트 휨 부재는 균형 보강비 이하의 저보강 설계시 극한상태에서 FRP rebar의 파단에 따른 급작스런 취성파괴가 발생한다. 따라서 일반철근콘크리트와 달리 균형보강비 이상으로 설계한다. 또한 부족한 연성을 보완하고 충분한 예비강도를 확보하기 위하여 철근콘크리트보다 안전한 휨 강도감소계수가 요구된다. ACI 440.1R-06에서는 FRP rebar의 사용한 콘크리트 휨 부재의 파괴형태에 따라 서로 다른 휨 강도감소계수를 제안하고 있으며, 또한 다양한 재료로 개발되어진 모든 FRP rebar에 동일한 휨 강도감소계수를 적용하고 있다. 이는 FRP rebar로 균형보강비 이상 보강된 콘크리트 휨부재의 휨 강성 증대효과를 고려하지 못하는 것이며, 다양한 FRP rebar 사용을 제한하는 것이라 할 수 있다. 따라서 다양한 FRP rebar의 종류와 보강비의 변화에 따라 다른 휨 강도감소계수를 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 본 논문에서는 GFRP rebar로 보강된 콘크리트보의 휨 강도감소계수 보정식을 신뢰성해석을 통하여 제안하였다.

- \* 정회원, 한양대학교, 토목공학과, 교수
- \*\* 정회원, 강원대학교, 토목공학과, 교수
- \*\*\* 정회원, 한양대학교, 공학기술연구소, 박사
- \*\*\*\* 정회원, 한양대학교, 콘크리트구조연구실, 박사과정
- \*\*\*\*\* 정회원, 한양대학교, 콘크리트구조연구실, 석사과정
- \*\*\*\*\* 정회원, 한양대학교, 콘크리트구조연구실, 석사과정

# 1. 서 론

ACI 440.1R-06에서는 FRP rebar의 사용한 콘크리트 휨 부재의 파괴형태에 따라 서로 다른 휨 강도감소계수를 제안하고 있으며, 또한 다양한 재료로 개발되어진 모든 FRP rebar에 동일한 휨 강도감소계수를 적용하고 있다. 이는 FRP rebar로 균형보강비 이상 보강된 콘크리트 휨부재의 휨 강성 증대 효과를 고려하지 못하는 것이며, 다양한 FRP rebar 사용을 제한하는 것이라 할 수 있다. 따라서 다양한 FRP rebar의 종류와 보강비의 변화에 따라 다른 휨 강도감소계수를 적용하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 본 논문에서는 GFRP rebar로 보강된 콘크리트보의 휨 강도감소계수 보정식을 신뢰성 해석을 통하여 제안하였다.

## 2. ACI 440. 1R-06 휨강도식 검증

GFRP rebar를 콘크리트보 시험체의 주 보강근으로 사용하여 본 연구의 시험체들과 연구문헌들에서 발췌한 총 40개의 시험체의 실험결과를 ACI 440.1R-06에서의 휨 설계 이론식과 실제 실험결과와의 휨모멘트를 비교하였다. 모든 시험체는 균형보강비 이상으로 설계되었으며, 시험체의 파괴는 상부콘크리트가 압피되는 시점을 파괴한계로 하였다. 그림 1은 본 연구의 시험체들과 연구문헌들에서 발췌된 시험체의 휨모멘트에 대한 실험값과 ACI 440.1R-06으로부터 계산된 이론값을 비교한 결과를 보여주고 있다. 이론식에 대한 실험식의 평균오차는 약 14%인 것으로 나타났다.

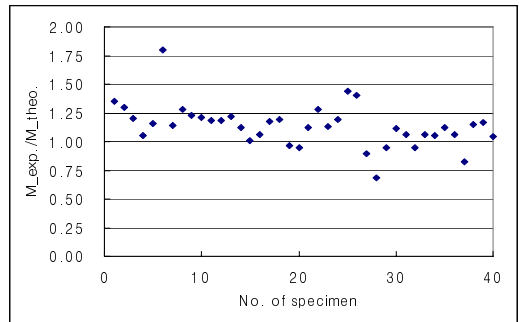


그림 1. GFRP 시험체의 휨모멘트 실험값/이론값[1]

## 3. 휨 강도감소계수 보정식 제안

### 3.1 한계상태함수 설계변수의 불확실성

GFRP rebar로 보강된 콘크리트보 설계변수의 통계적 특성치를 결정하기 위하여, ACI 440.1R-06의 보강된 콘크리트의 휨 강도 예측식에 대한 한계상태함수 모델을 유도하였다. GFRP rebar로 보강된 콘크리트보의 휨강도에 대한 한계상태는 식 1과 같이 표현 할 수 있다. 여기서,  $M_R$ : 콘크리트보의 저항모멘트,  $M_{DL}$ : 외부하중(고정하중과 활하중)에 의한 모멘트이다. 식 1을 설계변수들에 대한 한계상태함수식으로 변형하면, 식 2와 같이 표현할 수 있으며, 표 1은 설계변수들에 대한 정의를 보여주고 있다.

$$G(\bullet) = M_R - M_{DL} \quad (1)$$

$$G(\bullet) = [Z_1 Z_2 (1 - 0.59 \frac{Z_1 Z_2 Z_6}{Z_4 Z_5})] Z_3 Z_6^2 - \frac{1}{8} (Z_8 + Z_9) Z_{10}^2 \quad (2)$$

표 1. 설계변수

Classification	$A_f$	$f_f$	$f_{fn}$	$f'_c$	$b$	$d$	$\epsilon_{fu}$	$\omega_D$	$\omega_L$	$L$
Probability variables	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$	$Z_{10}$

### 3.2 휨강도의 통계적 특성치 결정

ACI 440.1R-06의 휨강도 예측식을 구성하는 주요변수와 주요변수들에 대한 통계적 특성치를 결정하기 위해 임의의 단면들을 가정하였다. 가정된 단면은 단면 폭( $b=20\text{cm}, 35\text{cm}, 50\text{cm}$ )에 대하여 1.5b, 2.0b배의 높이 갖는 단면이며, 보강된 단면에 대한 보강비 영향을 고려하기 위하여 사용된 보강비( $\rho_{fb}$ )는 각 단면의 균형보강비( $\rho_{fb}$ )의 1.4 $\rho_{fb}$ , 2.0 $\rho_{fb}$ , 2.5 $\rho_{fb}$ , 3.0 $\rho_{fb}$ 의 근방의 보강비를 변수로 하였으며, L/D=0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0값을 사용하였다. Monte-Carlo Simulation를 사용하여 해석 모델의 불확실성(P=0.05, 0.10, 0.15)를 고려한 휨강도에 대한 통계적인 특성치를 결정하였다. 결정된 휨강도는 K-S검증법과  $\chi^2$ -test를 통하여 검증하였다. 그림 2는 휨강도의 통계적 특성치 결정 알고리즘을 보여주고 있다. 표 2와 그림 4는 검증결과이며, 휨강도의 분포특성은 Lognormal 분포가 적합한 것으로 나타났다. 표 3은 대표적 단면의 결정된 휨 강도감소계수의 통계적 특성을 보여주고 있다.

### 3.3 휨 강도감소계수의 결정 및 보정식 제안

휨 강도감소계수는 신뢰성지수값에 따라 서로 다른 값을 갖게 되며, 휨 강도감소계수 산정을 위한 수학적 표현은 식 3과 4와 같다. 설계조건은 ACI 440.1R-06에서의 고정하중과 활하중에 대한 하중형식이며, L/D의 변화에 따라 목표신뢰성지수( $\beta_T=3.5$ )에 해당하는 저항 및 하중계수를 산정하였다. 또한 목표신뢰성지수에 대한 저항(휨강도) 및 하중계수를 산정하기 위하여 Rackwitz-Fiessler 알고리즘을 사용하였다[2]. 그림 3은 휨 강도감소계수 결정 알고리즘을 보여주고 있으며, 표 4는 대표적인 단면에서의 보강비와 L/D의 변화에 따라 결정된 휨 강도감소계수를 보여주고 있다.

Design condition :  $\phi R_n \geq \gamma_D D_n + \gamma_L L_n$  (3)

$\phi$  :  $\phi = (\bar{R}/R_n) \times \bar{\phi}$ ,  $\bar{\phi} = 1 - \alpha_R \beta V_R$   
 $\gamma_D$  :  $\gamma_D = (\bar{D}/D_n) \times \bar{\gamma}_D$ ,  $\bar{\gamma}_D = 1 - \alpha_D \beta V_D$   
 $\gamma_L$  :  $\gamma_L = (\bar{L}/L_n) \times \bar{\gamma}_L$ ,  $\bar{\gamma}_L = 1 - \alpha_L \beta V_L$

Find :  $\phi$ ,  $\gamma_D$ ,  $\gamma_L$  (4)

$\bar{R}/R_n$ ,  $\bar{D}/D_n$ ,  $\bar{L}/L_n$  : 저항 및 하중의 공칭비  
 $V_R$ ,  $V_D$ ,  $V_L$  : 저항 및 하중의 COV  
 $\alpha_R$ ,  $\alpha_D$ ,  $\alpha_L$  : 저항 및 하중의 표준편차에 따른 방향여편  
 $\bar{\phi}$ ,  $\bar{\gamma}_D$ ,  $\bar{\gamma}_L$  : 새로운 설계점에 대한 저항 및 하중계수  
 $\phi$ ,  $\gamma_D$ ,  $\gamma_L$  : 목표신뢰성지수에 대한 저항 및 하중계수

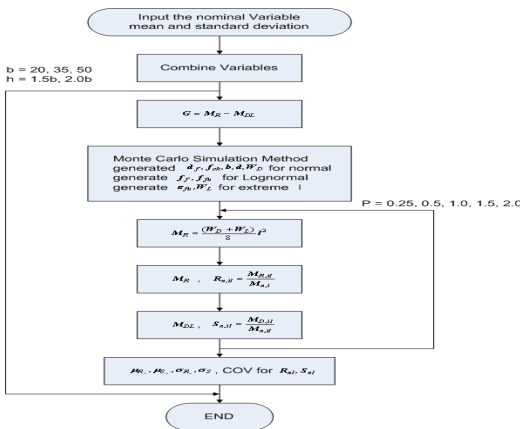


그림 2. 휨강도의 통계적 특성치 결정 알고리즘

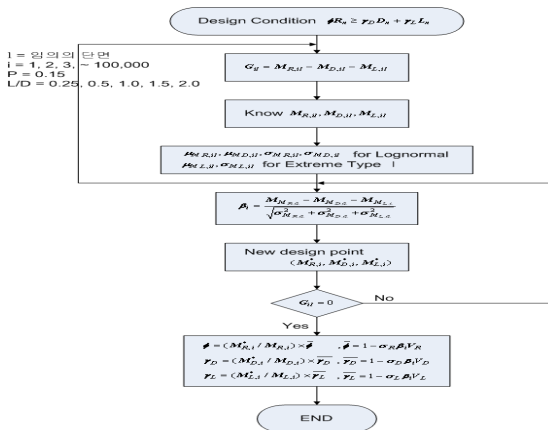


그림 3. 휨 강도감소계수 결정 알고리즘

표 2. K-S test 결과 (unit:E-2)

GFRP	$D_{n, \max}$ , P(0.15)	
	Normal	Lognormal
$b = 20 \text{ cm}, h = 30 \text{ cm}$ $1.46\rho_{fb}$	2.40	1.96
$b = 20 \text{ cm}, h = 40 \text{ cm}$ $2.19\rho_{fb}$	2.40	1.96
$b = 35 \text{ cm}, h = 52.5 \text{ cm}$ $2.38\rho_{fb}$	2.40	1.96
$b = 35 \text{ cm}, h = 70 \text{ cm}$ $1.41\rho_{fb}$	2.40	1.96
$b = 50 \text{ cm}, h = 75 \text{ cm}$ $1.99\rho_{fb}$	2.40	1.96
$b = 50 \text{ cm}, h = 100 \text{ cm}$ $2.45\rho_{fb}$	2.40	1.96

표 3. 휨 강도감소계수의 통계적 특성

$\rho_f$	$b = 35 \text{ cm}$		$h = 52.5 \text{ cm}$			
	P(0.05)		P(0.10)		P(0.15)	
	$\mu$ (kN·m)	C.O.V	$\mu$ (kN·m)	C.O.V	$\mu$ (kN·m)	C.O.V
$1.43\rho_{fb}$	122.673	0.118	122.793	0.147	122.863	0.186
$1.91\rho_{fb}$	139.415	0.117	139.331	0.146	139.678	0.182
$2.38\rho_{fb}$	153.820	0.118	153.760	0.146	153.450	0.186

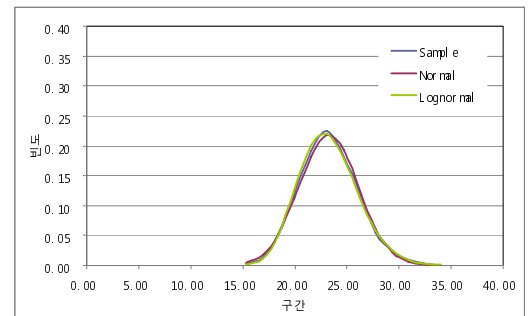


그림 4.  $\chi^2$ -test 결과 ( $b = 20 \text{ cm}, h = 30 \text{ cm}, 1.46\rho_{fb}$ )

일반적으로 휨 강도감소계수의 최적치는 목표신뢰성지수에 대한 저항 및 하중계수의 정의된 함수식을 최소화하는 휨 강도감소계수를 산정함으로 구할 수 있다. 이와 같이 정의된 함수는 식 5와 같다.

표 4. 보강비와 L/D에 따라 결정된 휨 강도감소계수

GFRP											
b = 20 cm						h = 30 cm					
$\rho_f$	L/D	$\phi$	$\gamma_D$	$\gamma_L$	$M_R^*$	$\rho_f$	L/D	$\phi$	$\gamma_D$	$\gamma_L$	$M_R^*$
1.52 $\rho_{fb}$	0.25	0.74	1.09	1.29	236.45	2.45 $\rho_{fb}$	0.25	0.75	1.10	1.30	297.04
	0.5	0.75	1.09	1.37	237.91		0.5	0.76	1.10	1.39	299.51
	1.0	0.77	1.09	1.53	243.56		1.0	0.78	1.10	1.57	308.39
	1.5	0.79	1.09	1.67	251.62		1.5	0.81	1.09	1.72	320.72
	2.0	0.82	1.09	1.78	261.18		2.0	0.85	1.09	1.83	334.31

여기서,  $R_n^*$ 은 목표신뢰성지수에 준하여 설계조건에서 구한 하중계수로부터 계산된 공칭저항치이며,  $R_n$ 은 설계조건에 대해 일정한 하중계수와 저항계수로부터 나타내어지는 설계식에 따른 공칭저항치로서  $R_n = \frac{\gamma_D D_n + \gamma_L D_L}{\phi}$ 로 정의된다. Ellingwood 등은 적용된 L/D의 영향을 고려하여 각 L/D에 따른 가중치  $P_j$ 를 표 5와 같이 제안하였다[3]. Ellingwood의 가중치와 확정된 하중계수( $\gamma_D = 1.2$ ,  $\gamma_L = 1.6$ )를 사용하여 GFRP rebar로 보강된 콘크리트보의 휨 강도감소계수의 최적치를 결정하였으며 그 결과는 표 6에 나타내었다. 이로부터 결정된 휨 강도감소계수를 회귀분석하여 식 6과 같이 GFRP rebar로 보강된 콘크리트보의 휨 강도감소계수 보정식을 제안하였다.

$$\text{Minimize } I(\phi, \gamma) = \sum_j P_j (R_{n,j}^* - R_{n,j})^2 \quad (5)$$

표 5. L/D에 따른 가중치  $P_j$

L/D	0.25	0.5	1.0	1.5	2.0
$P_j$	0.10	0.45	0.30	0.10	0.05

표 6. 하중조합(D+L)에 따른 강도감소계수

Specimen	$\rho_f$	$\phi$	Specimen	$\rho_f$	$\phi$	Specimen	$\rho_f$	$\phi$
b = 20 cm, h = 30 cm	1.46 $\rho_{fb}$	0.65	b = 35 cm, h = 52.5 cm	1.43 $\rho_{fb}$	0.66	b = 50 cm, h = 75 cm	1.52 $\rho_{fb}$	0.67
	2.19 $\rho_{fb}$	0.68		1.91 $\rho_{fb}$	0.68		1.99 $\rho_{fb}$	0.69
	2.92 $\rho_{fb}$	0.74		2.74 $\rho_{fb}$	0.69		2.45 $\rho_{fb}$	0.71
b = 20 cm, h = 40 cm	1.64 $\rho_{fb}$	0.67	b = 35 cm, h = 70 cm	1.41 $\rho_{fb}$	0.64	b = 50 cm, h = 100 cm	1.49 $\rho_{fb}$	0.63
	2.19 $\rho_{fb}$	0.68		1.97 $\rho_{fb}$	0.69		1.93 $\rho_{fb}$	0.67
	2.74 $\rho_{fb}$	0.70		2.50 $\rho_{fb}$	0.70		2.45 $\rho_{fb}$	0.71

$$\phi_{GFRP} = 0.64 + 0.7 \left( \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} - 1.4 \right), \quad 1.50 \leq \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \leq 2.75 \quad (6)$$

#### 4. 결론

본 연구에서는 GFRP rebar로 보강된 콘크리트보의 휨 강도감소계수 보정식을 제안하고자 하였으며, 연구를 수행하면서 도출된 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) GFRP rebar로 보강된 콘크리트보의 설계에 사용된 보강비는 균형보강비의 1.50~2.75배로 제한하여 보강비에 따라 GFRP rebar로 보강된 콘크리트보의 휨 강도감소계수 보정식을 제안하였다.
- 2) 제안된 휨 강도감소계수 보정식은 향후 연구수행될 다양한 FRP rebar의 휨 강도감소계수의 산정과 활용에 대한 기반으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 박성재. “신뢰성해석에 기초한 FRP rebar로 보강된 콘크리트보의 휨 강도감소계수 보정,” 한양대학교 박사학위논문, 2008.
2. Rackwitz, R. and Fiessler, B., “Structural Reliability Under Combined Random Load Sequences,” Computers & Structures, Vol. 9, 1978, pp.489~494
3. Ellingwood, B., Development of a Probability Based Load Criterion for American National Standard A58, Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures, National Bureau of Standard, SP-577, p.222