

# 기존 실험 자료를 이용한 탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트보의 보강효과

## Retrofitted Effect of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheet using Existing Test Data

이 원 호<sup>\*</sup>      임 재 형<sup>\*\*</sup>      박 인 수<sup>\*\*\*</sup>  
Yi, Waon-Ho    Lim, Jae-Hyung    Park, In-Soo

### ABSTRACT

The objective of this study is to develop a new equation that can predict the flexural capacity in RC beams strengthened with Carbon Fiber Sheets(CFS). To evaluate the influence of each experimental variable, the conducted experimental test data were investigated; the variables that had an effect on the increment of the flexural capacity were the number of plies, the strengthening length, the reinforced type such as U-type after reinforcing the bottom of the beam. The previous equations were compared using the existing experimental test data, then analyzed for the merits and demerits of existing equations, using the coefficient of correlation(R). The proposed equation was derived in such a way that main parameters and their combination were obtained from the analytical study and then their coefficients were determined by regression analysis using the previous test data. As a result, the proposed equation showed the better agreement than the previous equations.

### 1. 서론

기존 콘크리트건물의 보강방법은 일반적으로 철근, PC강재, 강판 등과 같은 각종 보강재에 의하여 보강하거나 단면의 증타설에 의한 보강이 대부분이었다. 이와 같은 방법에 의한 보강은 건물 중량의 증대와 건물 공간 사용의 감소, 시공시 넓은 작업공간 및 많은 공기가 소요되는 등의 단점이 있다. 또한 재료의 가공설치에 따른 시공성 문제 등의 여러 가지 문제가 제기되고 있다.

이와 같은 단점을 보완하고 시공의 편리성을 달성할 수 있는 복합 신소재를 이용한 새로운 보강공법이 개발되었다. 그 중에서도 탄소섬유보강법은 80년대 중반이후 국내에 도입된 신공법으로서 시공의 간편함으로 인하여 최근 선진 외국에서는 건축물이나 토목구조물에 실험결과를 토대로 부분적으로 적용하고 있는 실정이다. 그러나 국내의 경우 탄소섬유쉬트로 보강된 콘크리트 부재의 보강효과에 대한 실험연구가 많이 진행되고 있으며, 또한 그 역학적 특성을 파악하고 실제 적용할 수 있는 이론적 근거를 마련하고는 있으나, 내력평가에 영향을 미치는 주요변수를 고려한 추가적인 연구가 필요한 실정이다.

\* 심회원, 광운대학교 건축공학과 교수, 공학박사

\*\* 심회원, (주)ALT구조 이사, 공학박사

\*\*\* 심회원, 광운대학교 건축공학과 석사과정

따라서, 본 연구에서는 국내에서 수행된 보의 휨보강에 대한 연구결과들을 비교·검토하여 휨보강 효과에 기여할 수 있는 주요 변수들을 찾아내고, 이 변수들을 고려할 수 있는 해석식을 회귀분석에 의해 제안하고자 한다.

## 2. 변수별 영향 분석

기존 실험에서의 변수들은 CFS의 밀면보강길이, 2겹 보강시 1겹의 길이변화, 보강폭, 콘크리트 강도, 균열유무, 균열도입시기, CFS의 단부정착방법, CFS의 단부보강시 보강층의 변화 등이다. 그 중에서 보강효과가 우수한 변수는 CFS를 스패의 0.95~1.0ℓ 보강시 1겹과 2겹을 보강하는 방법, 밀면보강 후 U형으로 단부를 보강하는 경우로 나타났으며, U형보강의 경우 보층의 2/3D이상을 보강하는 것이 효과적으로 나타났다. 각 변수들에 대한 영향을 분석하여 정리하면 다음과 같다. 여기에서 사용된 기존 연구의 실험자료는 37명의 연구자들에 의한 154개의 실험체이다.

표 1 기존 실험결과와 분석결과

변수	보강범위	내용		세부내용	내력증가비*1
보강길이	밀면	0.5~0.93 ℓ		1겹	1.16
				2겹	1.28
				3겹	1.22
		0.95~1.0 ℓ		1겹	1.40
				2겹	1.60
				3겹	1.39
보강폭	밀면	0.5b	0.5 ℓ	1겹	1.10
			1.0 ℓ	1겹	1.11
		1.0b	0.5 ℓ	2겹	1.10
			1.0 ℓ	2겹	1.41
콘크리트강도	-	164kg/cm <sup>2</sup>		-	1.0
		218kg/cm <sup>2</sup>		-	1.04
균열유무	-	무균열		-	1.0
		균열		-	0.99
균열도입시기	밀면	재하후		-	1.0
		재하중		-	1.07
단부U형	유무	무		-	1.0
		유		-	1.32
	보강층	1/3D		-	1.13
		2/3D		-	1.24
		D		-	1.19
앵커볼트	밀면	-		1겹	1.04
				2겹	0.99

주: \*1 기준실험체에 대한 내력의 증가비

## 3. 기존 제안식 분석

기존 연구에서는 실험적 연구뿐만 아니라 이론적인 연구도 진행되었다. 대부분의 이론적 연구는 휨보강된 부재단면의 내력평가 방법이었고, 이에 따라 휨보강된 부재단면의 내력을 평가할 수 있는 해석식을 제안하였다. 기존에 제안된 해석식을 정리하여 표 2에 나타내었다.

표 2 기존 연구자들이 제안한 해석식

제안자(년도)	참고문헌 번호	해석식	사용변수
박칠림(1998. 1)	1	$M_n = A_s f_y (d - \frac{a}{2}) + A_{cf} \epsilon_{cf} E_{cf} (h_{cf} - \frac{a}{2})$	$\epsilon_{cf}$
홍영균(1997. 10)	2	$M_n = 0.85 f_c' ab(x - \frac{a}{2}) + A_s f_y (d - x) + A_{cf} \epsilon_{cf} E_{cf} (h - x)$	$\epsilon_{cf}$
신성우(1998. 5)	3	$M_n = T_s (d - k) + T_{dfs} (h - k)$	$\epsilon_{dfs}$
한만엽(1998. 6)	4	$M_u = \sigma_y (A_s - A_s') (d - \frac{a}{2}) + \sigma_y A_s' (d - d') + \sigma_{cf} A_{cf} (h_{cf} - \frac{a}{2})$	$\epsilon_{cf}$
野口貴文(1996)	5	$M = (0.9 \times a_t \times \sigma_{sy} \times d_s) + (0.9 \times a_f \times \frac{E_f}{E_s} \times \sigma_{cf} \times \frac{1}{2} \times D)$	$\sigma_{cf}$
麗毛忠繼(1998)	6	$M_u = (0.9 \cdot a_t \cdot S_{sy} \cdot d) + (0.9 \cdot a_f \cdot \frac{E_f}{E_s} \cdot S_f \cdot D) \cdot \alpha$	$S_f, \alpha$
木村耕三(1998)	7	$M_u = 0.9 \times a_t \times f_t \times d + (0.15 + 0.069 \times \sigma) T_{max} \times D$	$\epsilon$

기존의 제안식들을 비교하기 위하여 기존의 실험결과로 분석한 후 그 결과를 그림 1~6에 나타내었다. 그림에서 가로축은 실험결과이고 세로축은 예측결과이며, 대각선의 실선은 완전한 상호관계를 나타내는 선이다. 그림에서 알 수 있듯이 모든 제안식들은 적절한 결과를 나타내지 못하고 있음을 알 수 있다.

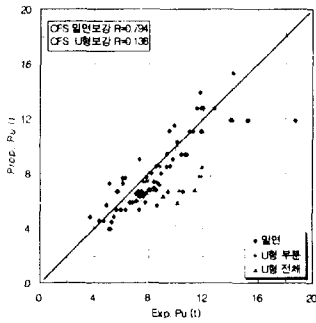


그림 1 麗毛忠繼 제안식에 의한 결과

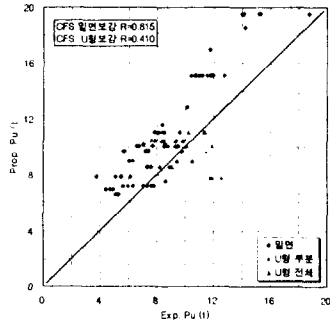


그림 2 木村耕三 제안식에 의한 결과

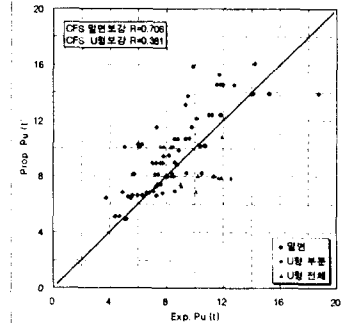


그림 3 한만엽 제안식에 의한 결과

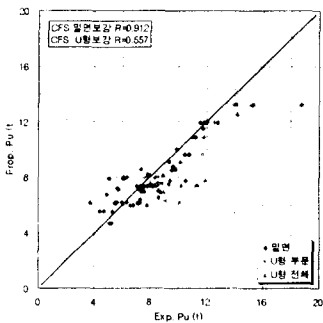


그림 4 신성우 제안식에 의한 결과

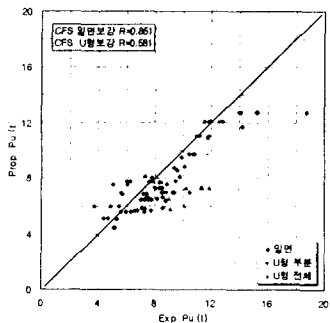


그림 5 박칠림 제안식에 의한 결과

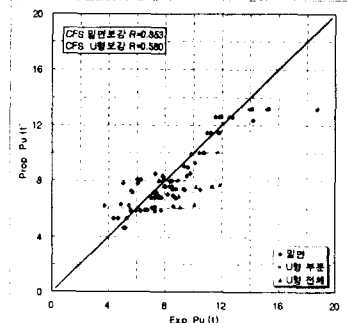


그림 6 홍영균 제안식에 의한 결과

그런데 이와 같은 적절치 못한 결과를 나타내는 것은 표 3에 나타난 특징들 때문인 것으로 사료된다.

표 3 기존 제안식의 특징 및 상관계수 R

제안자	특징	상관계수 R <sup>*1</sup>
박칠립	압축축 철근의 내력을 고려안함	밀면보강 R=0.851, U형보강 R=0.581
홍영균	압축축 철근의 내력을 고려안함	밀면보강 R=0.853, U형보강 R=0.580
신성우	콘크리트의 β 값을 수정함	밀면보강 R=0.912, U형보강 R=0.557
한만엽	압축축 철근의 내력을 고려함	밀면보강 R=0.710, U형보강 R=0.381
野口貴文	σ에 1/2의 계수 사용함	밀면보강 R=0.794, U형보강 R=0.138
麗毛忠繼	α 값에 의해 제안값 비교	밀면보강 R=0.794, U형보강 R=0.138
木村耕三	분석에 의해 ε 값 제안함	밀면보강 R=0.815, U형보강 R=0.410

주: \*1 R은 실험값과 제안값의 상관관계 비율을 나타내는 계수임

#### 4. 내력 평가식의 제안

이상의 결과로부터 기존 제안식들은 주요변수의 영향을 적절히 고려하지 못하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 단점을 보완할 수 있는 새로운 내력 평가식을 제안하고자 한다.

철근콘크리트보의 해석을 위한 기본적인 가정은 다음과 같다.

첫째, 부재 단면의 변형도분포는 중립축으로부터의 거리에 비례한다.

둘째, 보강시 콘크리트와 CFS는 완전부착으로 본다.

셋째, 시공시 에폭시의 두께는 고려하지 않는다.

이와 같은 가정에 의해 그림 7과 같은 단면의 변형도 분포곡선과 내력을 나타낼 수 있다.

$\epsilon_{cu}$ 는 극한하중 상태에서의 콘크리트 압축변형도를 나타내며, 국내 규준에서 기술된 0.003에 따른다. 변형도에 따른 각각의 힘은 다음과 같다.

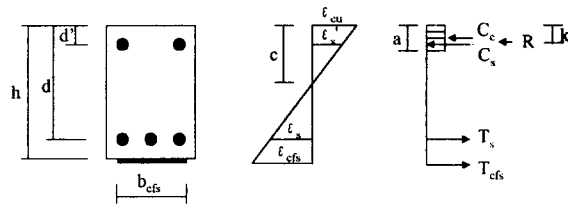


그림 7 단면의 변형도 분포곡선 및 내력

$$\text{압축축 콘크리트의 압축력 } C_c = 0.85 \cdot f'_c \cdot a \cdot b = 0.85 \cdot f'_c \cdot \beta \cdot c \cdot b$$

$$\text{압축축 철근의 압축력 } C_s = \epsilon'_s E_s A'_s = \left(1 - \frac{d'}{c}\right) \cdot 0.003 \cdot E_s \cdot A'_s$$

$$\text{인장축 철근이 인장력 } T_s = \epsilon_s E_s A_s = A_s f_y$$

$$\text{인장축 CFS의 인장력 } T_{cfs} = \epsilon_{cfs} E_{cfs} A_{cfs}$$

힘에 의한 평형 방정식으로부터 극한 모멘트를 구하면 다음과 같다.

$$M_u = T_s(d-k) + T_{cfs}(h-k) \cdot \gamma \quad (1)$$

k :  $C_c$ 와  $C_s$  합력인 R의 압축연단에서부터의 거리

여기에서,  $\gamma$ 는 CFS 보강형태에 따른 계수이며, 이것은 CFS의 보강형태가 내력에 미치는 영향을 고려하기 위해 도입되었다.  $\gamma$ 는 기존 연구결과와 분석에 의해 결정되었는데, 보강길이와 U형보강의 형태로 하였으며, 이것을 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = b_0 + b_1\beta_1 + b_2\beta_2 \quad (2)$$

여기에서,  $\beta_1$  : 보강길이비  
 $\beta_2$  : U형 보강폭비

식 (1)을 회귀분석법으로 적용하기 위한 식으로 전개하면 다음과 같다.

$$\frac{M_u - T_s(d-k)}{T_{cfs}(h-k)} = \gamma \quad (3)$$

여기에서, 보강길이비와 U형 보강폭비는 독립변수  $\beta_1$ 과  $\beta_2$ 가 되고 종속변수는  $\gamma$ 가 되며, 기존의 실험결과를 이용한 회귀분석에 의하여  $b_0, b_1, b_2$ 를 결정하였다.

이때,  $M_u = \phi M_n$  이므로 규준에서 제시한 축하중이 없는 힘의 경우 강도저감계수  $\phi=0.9$ 와 실제 CFS 보강시 여러 가지 조건들에 의해 발생할 수 있는 CFS의 강도저감계수  $\phi_{cfs}$ 를 고려하면 다음과 같다.

$$\frac{(\phi_{cfs} \phi)M_n - T_s(d-k)}{T_{cfs}(h-k)} = \gamma \quad (4)$$

$\phi_{cfs}$ 의 값은 분석에 의해 표준편차의 범위가 안전측에 속하도록 고려된 0.95로 정의되었다. 이와같은 회귀분석에 의해 결정된  $\gamma$  값은 다음과 같다.

$$\gamma = 0.45 + 0.27\beta_1 + 0.86\beta_2 \quad (5)$$

회귀분석에 의해 얻어진 제안식은 다음과 같다.

$$M_u = T_s(d-k) + (0.45 + 0.27\beta_1 + 0.86\beta_2)T_{cfs}(h-k) \quad (6)$$

여기에서,  $\beta_1$  : 보강길이비(보강길이/순지간길이)  
 $\beta_2$  : U형 보강폭비(보강폭/순지간길이)

이 회귀분석식에 의한 각 변수들에 의한 보강효과는 밀면보강의 경우에 제안값/실험값 비가 0.91, 표준편차가 0.13이고 상관계수 R이 0.933이다. 또한 U형 단부보강의 경우는 제안값/실험값의 비가 0.91, 표준편차가 0.07이고 상관계수 R이 0.912로 나타났다. 이것은 기존 제안식에 비해 상관계수가 각각 0.13과 0.51 높고, 표준편차가 적으며 CFS의 보강길이와 단부 U형보강폭의 변화에 대한 내력 예측이 양호한 결과를 얻을 수 있다. 이러한 결과를 그림 8~10에 나타내었다.

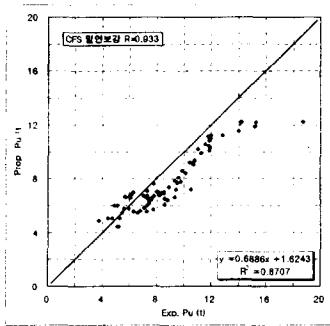


그림 8 식 (6)에 의한 결과(밀면보강)

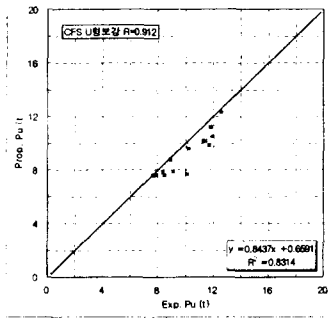


그림 9 식 (6)에 의한 결과(U형보강)

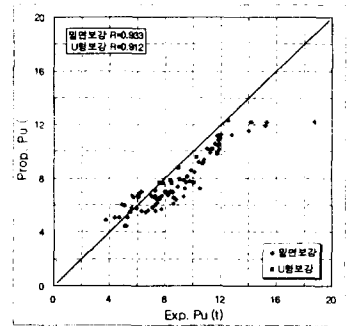


그림 10 식 (6)에 의한 전체 결과

## 5. 결론

- (1) 탄소섬유쉬트로 보강할 경우에 보강효과에 영향을 주는 변수는 보강계수(2겹보강)에 따른 보강길이 (0.95~1.0ℓ) 이상)와 CFS에 의한 U형 단부보강이었다.
- (2) CFS 밀면 보강길이비(보강길이/지간길이)가 0.95이상인 경우는 0.5~0.93인 경우에 비해 123%의 내력 증가를 보였다.
- (3) CFS로 밀면을 보강한 후 U형으로 전구간을 보강한 경우는 밀면만 보강한 경우에 비해 132%의 내력 증가를 보였다.
- (4) 이상의 결과에 의해 본 연구에서 제안한 해석식은 보강길이비( $\beta_1$ )와 CFS U형 보강폭( $\beta_2$ )의 변화에 따른 내력 증감의 효과를 적절하게 예측하고 있으며, 그 결과로 기존의 해석식보다 양호한 결과를 나타내었다.

## 참고 문헌

1. 김지영, 박형철, 김대영, 황진석, 박칠림, 「탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트보의 휨거동에 관한 실험적 연구」, 대한건축학회 논문집, 제14권 1호(통권 제114호), pp. 319~326, 1998. 1
2. 류해준, 홍기섭, 홍영균, 신영수, 최완철, 「탄소섬유쉬트로보강 철근콘크리트보의 구조성능에 관한 연구」, 대한건축학회 학술발표대회, pp. 507~512, 1995. 4
3. 신성우외 5인, 「탄소섬유쉬트의 보강량 및 정착길이가 RC보의 휨거동에 미치는 영향」, 한국 콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제10권 1호, pp. 579~584, 1998. 5
4. 한만엽, 송병표, 「보강재의 변형 부착에 따른 보의 구조적 거동」, 콘크리트학회지, 제10권 3 호, pp. 197~208, 1998. 6
5. 野口貴文, 友澤史紀, 「鐵筋腐食をモデル化したRC梁における炭素纖維シートの曲げ補強効果」, ユンクリート工學年次報告集, Vol. 18. No. 1. pp. 1077~1082, 1996
6. 麗毛忠繼, 梶田佳寛, 「RCはりの CFRP シートによる曲げ補強効果に及ぼす浮きの影響」, ユンクリート工學年次報告集, Vol. 20. No. 1. pp. 425~430, 1998
7. 木村 耕三, 土屋 好男, 「CFRP板の定着方法による補強部材の曲げ性狀」, ユンクリート工學年次報告集, Vol. 20. No. 1. pp. 527~532, 1998