

탄소섬유쉬트로 횡보강된 콘크리트 압축부재의 보강성능에 관한 연구

Reinforcement Efficiency of Concrete Compressive Members Confined with Carbon Fiber Sheet

성 시 문^{*} 강 상 용^{*} 임 재 형^{**} 이 원 호^{***}
Sung, Si Moon, Kang, Sang Yong, Lim, Jae Hyung, Yi, Waon Ho

Abstract

The purpose of this study is to analyze the reinforcement effect of the RC compressive member confined with carbon fiber sheets and to suggest better transverse confinement coefficient(k_t) than one's in the existing analysis equations. Showing amounts of CFS in terms of ratio of transverse reinforcement to cross-section, it comes to be possible to calculate the objective and quantitative reinforcement amounts and to estimate the overlapping length of CFS that can influence on all its confinement effect. The previous parameters were compared using the existing experimental test data, then analyzed for the merits and demerits of existing parameters through the coefficient of correlation(R). The proposed parameters were derived in such a way that established parameters and their combination were obtained from the analytical study and then determined by regression analysis using the previous test data.

키워드 : CFS 보강량, 횡구속계수(k_t)

Keywords : Amounts of CFS, Transverse confinement coefficients(k_t)

1. 서론

철근콘크리트 구조물의 결함 및 노후화로 인한 축내력의 부족이나, 증축 및 설계변경에 따른 기둥 내력의 증가는 필수적이다. 지금까지 철근콘크리트 압축부재의 보강방법으로 콘크리트에 의한 단면증대, 강판의 부착 등이 사용되었고, 최근에는 탄소섬유쉬트(CFS), 아라미드섬유(AF), 유리섬유(GFS) 등의 복합 소재를 이용한 새로운 보강공법이 사용되고 있다. 그 중에서 CFS 횡보강방법은 편리한 시공성, 강재와 유사한 역학적 특성, 경량이며 부식의 문제가 없는 등의 장점에 의해 사용이 증가하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 섬유접착 보강방법중의 하나인 탄소섬유쉬트(CFS) 접착공법으로 콘크리트 압축부재를 횡보강할 때 필요한 CFS보강량과 회귀분석을 통한 횡구속계수(k_t) 등을 제안하여 CFS를 이용한 압축부재의 내력을 보강하는 보강방법 수립에 기초적 자료를 제공하고자 한다.

* 정회원, 광운대 건축학부 석사과정

** 정회원, 우송공업대 건축디자인과 교수, 공학박사

*** 정회원, 광운대 건축학부 교수, 공학박사

2. 기존연구

2.1 연구현황

CFS로 확보강된 압축부재의 연구현황과 각 연구별 실험변수는 표 1과 같으며, 주 실험변수는 CFS 보강량(면적비), CFS폭, 확보강간격, CFS 겹침길이 등이었다. 이들 연구에서는 주변수가 압축부재의 내력증가에 미치는 영향을 검토하였다.

표 1 기존 연구자료 및 사용된 변수

발표 년도	연구자	보강방법			실험변수							시험체 형태 (cm)	시 험 체 수	
		전면 보강	테입 형태	섬유 방향	보강량	CFS폭 (cm)	보강간격 (cm)	겹침 길이	f_{ck} (kgf/cm ²)	모서리 각정리	CFS 두께			
1995	최완철	○	×	○	○	전면보강	×	○	×	×	×	Φ10×20	15	
1996	외 ^{1),2)}	○	×	×	○	전면보강	×	○	×	○	×	10×10×20	16	
1997	정 란	×	○	×	○	2.5, 5.0	2.5-7.5	○	×	×	×	Φ15×60	10	
1998	외 ^{3),4)}	×	○	×	○	2.5, 5.0	2.5-12.5	○	×	×	○	Φ15×30	10	
												Φ15×60	10	
1999	박철립 외 ⁵⁾	○	×	×	○	전면보강	×	×	×	×	×	Φ15×30	6	
												Φ15×60	6	
												20×20×60	7	
1999	김윤일 외 ⁶⁾	×	○	×	○	2.5	×	×	×	×	×	15×15×55	12	
1999	장일영 외 ⁷⁾	○	×	○	○	전면보강	×	×	250 400	×	×	Φ15×30	8	
												15×15×30	8	
												Φ15×30	8	
												15×15×30	8	
1999	권영웅 외 ⁸⁾	○	×	×	○	전면보강	×	×	×	×	×	Φ10×20	5	
계		5	3	2	9	4	3	4	1	1	1	계		129
비율(%)		62.5	37.5	8	36	16	12	16	4	4	4			

2.2 연구결과 분석

국내 실험에서 사용된 변수로는 CFS보강재를 전면 또는 테입형태로 보강한 경우로 크게 구별할 수 있는데, 각각의 경우에 대해서도 CFS보강접수(보강량), 보강간격, CFS 폭, 겹침길이, 모서리각정리(각형 Rectangle) 등의 변수를 포함하고 있다.

- 1) 전면 보강의 경우에는 CFS 섬유방향과 보강접수를 주변수로 하는 실험이 수행되었다. CFS 섬유방향이 부재수직면과 이루는 각도를 0°, 45°, 90°, 0° + 90°로 실험한 기존 연구자료를 회귀분석한 결과, 0°, 45°로 확보강한 시험체의 압축강도 증가량이 표준시험체보다 20% 내로 증가하여 보강효과가 낮은 것을 알 수 있었으며, 2점으로 보강한 0° + 90°와 90° 실험체들은 압축강도 증가량의 차이가 10% 내로 나타났다.^{1),7)} 그러나 콘크리트 압축강도가 400kgf/cm² 이상에서는 압축강도 증가량의 차이가 18% 이상으로 나타났다.
- 2) 테입형태 보강에서는 CFS 폭, 보강간격(0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5cm)^{3),4)}, CFS보강접수 등을 주 변수로 하는 실험이 진행되었다. 그 결과 보강재의 폭과 보강간격이 다르더라도 확보강단면의 보강량이 같으면 확보강효과는 거의 비슷한 것으로 나타났다.
- 3) 겹침길이는 6cm~72cm로 3cm 모듈^{1),3)}을 사용하였으며, 실험결과 시험체 둘레의 0.5배 이상 필

요한 것으로 나타났다.

- 4) 각형부재의 경우에는 모서리각정리(1.5cm, 3cm)가 실험의 변수였는데, 정리한 모서리 넓이가 클수록 압축강도는 증가하였으나, 모서리를 정리하지 않은 시험체와 압축강도 증가량 차이는 10% 내외로 나타났다.²¹⁾

따라서, CFS횡보강시 주변수는 CFS보강량, 겹침길이며, 각형부재에 대한 CFS 횡보강은 모서리부분의 응력집중을 방지하기 위하여 모서리부분을 라운드(Round)로 만들어 줄 필요는 있다고 판단된다.

3. 횡보강효과 모델 제안

3.1 횡구속효과

2축 또는 3축으로 압축력을 받는 콘크리트의 압축강도는 1축보다 높다. 그 이유는 횡방향으로의 인장변형 때문이다. 따라서, 압축강도의 증진은 횡구속에 의하여 기대할 수 있다.

횡구속은 외부에서 덮는 수동의 형태이거나, 횡보강에 의하여 구속되며, 구속원리는 콘크리트 팽창에 의한 인장과 구속된 부재의 팽창을 억제하는 방사성 강성(radial stiffness)¹²⁾ 등의 두 힘으로 구성된다. 따라서, 코어(core)와 외부(shell)의 변위가 항상 같아야 한다. 횡구속된 자유 물체도 그림 1-(A)를 식(1)로 표현 할 수 있다. 그림 1-(B)는 Mander, et al¹⁴⁾이 제안한 각형(Rectangle)부재의 횡보강에 의한 유효횡구속면적으로, 각면 중앙에서 0.25D 깊이 지점을 꼭지점으로 하는 2차 포물선 영역을 제외한 가운데 부분만이 유효하게 구속된다. 단면형상계수(k_s)는 전체단면적과 횡구속되는 면적의 비로 원형(Circular)은 1.0이며, 각형(Rectangle)은 0.33이며, 식(2)는 단면형상계수를 식(1)에 적용한 것이다.

또한, 횡구속에 의한 최대압축강도는 식(3)과 같다. 그리고 기존 연구자들이 제안한 횡구속계수(k_t)를 표 2에 나타내었다.

표 2 기존 연구자에 따른 횡보강 유효계수(k_t)

연구자	횡보강 유효계수(k_t)
Richart, et al ⁹⁾	4.1
Razvi ¹⁰⁾	$6.7 f_l^{0.17}$
Ahmad ¹²⁾	$4.2556 \left(\frac{f_l}{f_{co}} < 0.68 \right)$
Newman, et al ¹⁴⁾	$3.7 \left(\frac{f_l}{f_{co}} \right)^{-0.14}$

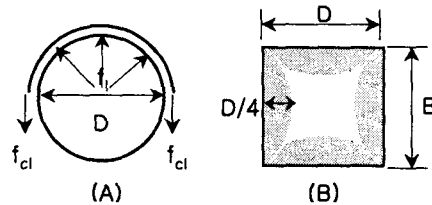


그림 1 횡구속압의 정리

$$f_l = \frac{2 A_{cl} f_{cl}}{d_c S} = \rho_{cl} \times f_{cl} \dots\dots\dots(1)$$

$$f_l = \frac{2 A_{cl} f_{cl}}{d_c S} \times k_s = \rho_{cl} \times f_l \times k_s \dots\dots\dots(2)$$

$$f_{cc} = f_{co} + k_t f_l \dots\dots\dots(3)$$

- f_{cc} : 횡보강된 콘크리트의 압축강도 f_{co} : 횡보강되지 않은 콘크리트의 압축강도 f_l : 횡구속력 k_t : 횡구속계수
 f_{cl} : 보강재의 인장강도 A_{cl} : 보강재의 단면적 S : 보강재의 중심간격(cm) ρ_{cl} : 보강재의 횡보강단면적비
 A_f : 횡보강단면적 d_c : 횡보강 콘크리트의 단면적 지름 k_s : 단면형상계수 (횡구속면적/전체단면적 원형: 1.0, 정사각형: 0.33)
 γ : 횡구속효과(f_{cc}/f_{co}) α : 횡구속비(f_l/f_{co}) A : 횡구속계수(k_t) ρ_s : 띠철근비 f_y : 띠철근의 인장강도

3.2 CFS 횡구속 단면적비

기존의 연구들에서는 CFS보강량을 겹수(Ply)로 나타내고 있기 때문에 횡보강효과를 객관적이고, 정량적인 CFS보강량으로 분석할 수 없었다. 이는 역학적 성질인 CFS 인장강도(f_c)은 제품마다 상이하여 동일한 보강겹수에서도 보강효과 차이가 나기 때문이다. 기존 연구결과들을 분석한 결과, 전면보강 또는 CFS폭 및 보강간격이 다르더라도, 그림 2와 같이 횡구속 단면적비(ρ_{cl})가 같을 경우 비슷한 압축강도증가량을 나타내었다.

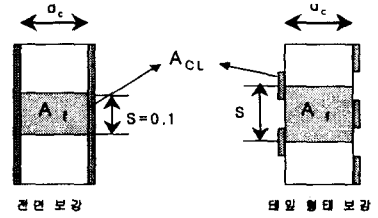


그림 2 횡보강단면적

따라서 본 연구에서는 CFS 보강량을 겹수가 아닌, CFS 횡구속 단면적비로 나타내어, 식(4)로 정량적인 보강량을 나타내고자 한다.

CFS 보강량산정은 기존의 원형(Circular)부재 80개에서 불합리한 시험체 21개¹⁷⁾를 제외한 59개 실험체를 회귀분석에 사용하였으며, 횡구속비(f_i/f_{co})에 대한 횡구속효과(f_{co}/f_{co})를 그림 3에 나타내었다. 횡구속효과는 x축인 횡구속비가 증가할수록 일정증가비율로 증가해야 하지만 횡구속비가 0.53을 기점으로 횡구속비가 증가하여도 횡구속효과는 감소한다. 따라서 최대 횡구속효과가 2.81을 나타내는 곳의 횡구속비 0.53을 CFS 최대 횡구속 단면적비로 판단하였다. 그리고, 식(7)로 CFS 역학적 성질(f_c)과 콘크리트 강도에 따른 압축강도 증가량에 맞는 일정량의 CFS 횡구속단면적비를 구할 수 있다. 이와 같은 방법으로 기존의 각형(Rectangle)부재 51개 중에서 불합리한 18개를 제외한 33개의 부재를 사용하여 CFS 횡구속 단면적비를 구하였다.

$$\rho_{cl} = \frac{2 A_{cl}}{A_f} = \frac{2 A_{cl}}{S \times d_c} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{f_{co}}{f_{co}} = 1 + k_i \frac{f_i}{f_{co}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{f_i}{f_{co}} = X \quad [\text{식(1)을 대입}] \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\rho_{cl} = \frac{X \times f_{co}}{f_{cl}} \quad \dots\dots\dots(7)$$

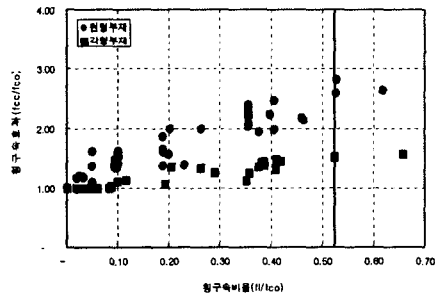


그림 3 횡구속효과와 횡구속비

3.3 횡구속 계수

기존의 연구자들은 횡구속 계수(k_i)에 대하여 다양한 값으로 제안하였다. 그러나, 기존의 제안된 횡구속계수들은 원형부재와 각형부재에 모두 적용할 경우, 두 부재중 한 부재는 적용하기에 적합하지 않은 결과를 나타내었다. 따라서, 기존 실험자료를 회귀분석으로 원형 및 각형부재에 적합한 횡구속계수를 각각 제안 하였다.

- 1) 식(5)로부터 횡구속효과(f_{co}/f_{co})와 횡구속비(f_i/f_{co})를 각각 y, x로 하는 식(8)을 얻는다. 횡구속계수는 식(8)의 기울기이다.
- 2) 횡구속계수는 그림 4 및 그림 5에서 알 수 있듯이, 원형부재에서는 3.17이고 각형부재에서는 0.95이다.

3) 원형부재 및 각형부재의 CFS 횡보강에 의한 압축강도 추정식은 각각 식(9)와 식(10)과 같으며, 각형부재의 추정식에서는 횡보강근의 횡구속력이 고려되었으며, 횡구속계수(k_t)는 단면형상계수(k_s)를 포함하고 있다.

$$y = Ax + 1 \quad \dots\dots\dots(8) \quad f_{cc} = f_{co} + 3.17 f_t \quad \text{원형부재} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$f_{cc} = f_{co} + 0.95(\rho_{cfs} \times f_{cfs} + \rho_s \times f_y) \quad \text{각형부재} \quad \dots\dots\dots(10)$$

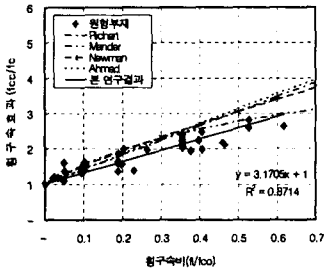


그림 4 각 연구자들의 횡구속계수(k_t)의 비교(원형)

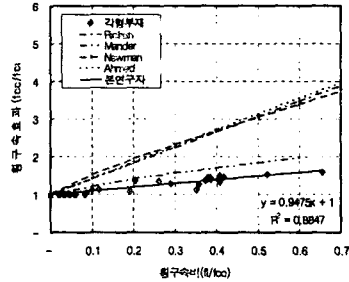


그림 5 각 연구자들의 횡구속계수(k_t)의 비교(각형)

3.4 기존 연구결과와 비교

표 3에 나타난 것과 같이 여러 연구자들이 제안한 횡구속계수(k_t)를 기존연구의 시험체에 적용하여 각각의 계산값을 구하고, 그 결과를 실험값과 비교한 결과, 원형부재의 경우에 Mirmiran과 Mander를 제외한 각 연구자들의 상관계수(R)는 0.952이상, 표준편차는 0.09~0.16으로 실험값과 가장 근사한 값을 나타냈으며, 각형부재에서는 Mander, Mirmiran, 본 연구의 결과 값이 양호하게 나타났다.

표 3 여러 제안자들의 제안값과 실험값의 비교

연구자	Richart ⁹⁾		Razvi ¹⁰⁾		Mirmiran ¹¹⁾		Ahmad ¹²⁾		Mander ¹³⁾		Newman, et al ¹⁴⁾		본 연구 결과	
	원형	각형	원형	각형	원형	각형	원형	각형	원형	각형	원형	각형	원형	각형
평균값 (실험값/계산값)	0.96	0.70	1.02	0.79	1.43	1.04	0.91	0.69	0.80	0.88	0.93	0.73	1.04	0.99
표준편차 (σ)	0.12	0.18	0.09	0.18	0.33	0.1	0.90	0.18	0.23	0.11	0.11	0.23	0.1	0.005
결정계수 (R ²)	0.917	0.663	0.934	0.719	0.701	0.89	0.916	0.652	0.294	0.787	0.923	0.631	0.923	0.962
상관계수 (R)	0.957	0.814	0.96	0.84	0.83	0.943	0.957	0.807	0.54	0.887	0.96	0.74	0.96	0.98

4. 결론

이상의 연구결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 횡보강에 미치는 영향이 큰 변수는 CFS보강량, 겹침길이로 사료된다.

- 2) CFS 횡보강비로 $\rho_{cl} = \frac{R \times f_{co}}{f_{cl}}$ 을 이용하면 정량적인 보강량을 구할 수 있다고 판단된다.
- 3) 횡구속계수(k_1)는 원형부재에서 3.17, 각형부재에서 0.95가 적절하다고 판단된다.
- 4) 본 연구에서 제안한 제안식은 CFS로 횡보강한 부재의 최대압축강도를 적절히 예상하고 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2001년도 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터 연구비 지원에 의한 결과의 일부이며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 신영수, 홍영균, 홍기섭, 최완길, "탄소섬유쉬트로 횡보강된 콘크리트강도의 강도 특성", 대한건축학회논문집 제 11권 10호, 1995년 10월, pp.323-328.
2. 신영수, 홍영균, 홍기섭, 최완길, "탄소섬유쉬트로 횡보강된 사각형단면의 콘크리트 압축강도 특성", 대한건축학회논문집 제12권 12호, 1996년 12월, pp.197-203.
3. 정란, 이회경, 김성철, 유성훈, 김중구, "탄소섬유판으로 횡보강된 콘크리트 압축부재의 보강성능" 콘크리트학회지 제10권 6호, 1998년 12월, pp.345-352.
4. 이회경, 김성철, 유성훈, 김중구, 정란, "탄소섬유판으로 보강된 콘크리트의 횡보강용력의 산정" 한국콘크리트학회 1998년 봄학술발표회 논문집, pp.593-600.
5. 천성철, 김지영, 박형철, 박칠립, "탄소섬유쉬트로 횡구속된 콘크리트의 응력-변형도 모델에 관한 연구", 대한건축학회논문집 제15권 1호, 1999년 1월, pp.27-37.
6. 김명성, 박인철, 김윤일 "중심축하중을 받는 철근콘크리트 단주의 탄소섬유쉬트 횡보강 효과" 대한건축학회 학술발표회논문집 제19권 2호, 1999년 10월, pp.438-443.
7. 장일영, 이상호, 박훈규, 나혁중 "CFS보강 콘크리트 기둥부재의 응력-변형률 거동에 관한 실험적 연구" 한국콘크리트학회 1999년 가을학술발표회 논문집, pp.509-513.
8. 권영웅, 정성철 "CFS로 횡보강된 철근콘크리트 기둥의 역학적 특성에 관한 연구" 한국콘크리트학회 1999년도 봄학술발표회 논문집, pp.743-749.
9. Richart, F.E, Brandtzege, A., and Bown, R, "A study of the failure of concrete under combined compressive stresses" Experimental Station Bulletin No. 185, University of Illinois, 1928.
10. Saatcioglu, M, and Razvi, S. R, "Strength and Ductility of Confined Concrete" Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No. 6, 1992, pp.1590-1607.
11. Mirmiran, A. et al, " Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites" Journal of Structural Engineering, ASCE, May 1997, pp.583-590.
12. Ahmad, S. H. and Shah, S. P, "Complete triaxial stress-strain curves for concrete" Journal of Structural Engineering, ASCE, 108(4), April 1982, pp.728-742.
13. Mander, J. B. et al, "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete" Journal of Structural Engineering, ASCE, 114(8), August 1988, pp.1804-1826.
14. Newman, K. and Newman, J. B, "Failure theories and design criteria for plain concrete" Pro., Int. Civ. Wiley Interscience, New York, NY, 1971 pp.936-995.