

섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트 기둥의 전단강도 예측에 관한 연구

A Study on Shear Strength Prediction of RC Columns Strengthened with FRP Sheets

변재한^{*} 권성준^{**} 송하원^{***} 변근주^{***}
Byun, John Kwon, Seung Jun Song, Ha Won Byun, Keun Joo

ABSTRACT

This paper describes a model on shear strength of RC columns strengthened with FRP sheets. In this study, we propose a confined concrete strength model of RC columns confined by transverse reinforcement as well as FRP sheet by introducing corresponding effective confinement coefficient for each confined concrete area. Then, a shear strength model of the confined RC columns is proposed by lower and upper bound limit analysis which are based on the truss-arch model theory and shear band failure theory, respectively. Along with shear test data obtained from strengthened column specimens, the developed analytical models are verified. The comparison shows that the proposed model can be used effectively for the prediction of both ultimate strength and required amount of strengthening in retrofit design for RC columns.

1. 서론

RC 기둥의 취성적인 전단파괴는 구조물 전체의 심각한 성능저하를 유발할 수 있기 때문에 적절한 보강공법을 이용하여 충분한 강도를 확보할 수 있도록 하며 실질적으로 구조물의 수명을 증가시키는 개선작업이 필요하다. 본 연구는 섬유쉬트로 보강된 RC 기둥 전단강도의 정량적 예측에 관한 연구로서, 먼저 섬유쉬트 및 횡방향 철근에 의한 콘크리트 강도의 구속효과를 보강재의 면적비에 따른 구속효과계수를 도입한 구속된 콘크리트 모델을 제안하였으며, 또한 소성이론을 바탕으로 트러스-아치 기구에 따른 하한계 해석 및 기둥의 파괴기구에 따른 상한계 해석의 수행을 통하여 RC 기둥의 전단강도 예측모델을 제안하였다.

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 석사
** 정회원, 연세대학교 토목공학과 박사과정
*** 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

2. 보강된 RC 기둥의 거동 모델링

2.1 섬유쉬트로 구속된 콘크리트 구성재료 모델

보강된 기둥의 극한거동에 대하여 구속된 코어 및 구속되지 않은 덮개 콘크리트가 기여하는 성분은 콘크리트의 최대 응력 및 변형률을 재현하므로써 결정할 수 있다. 구속된 콘크리트의 최대응력은 보강비와 횡구속비 사이의 관계를 나타내는 보강재의 횡구속력을 도입하여 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$f_{cc} = \begin{cases} f_{co} + f_{l,tot} \\ f_{co} + [f_{ls} + f_{k(f_s)}] \end{cases} = f_{co} + [k_1 f_{ls} + k_2 f_{k(f_s)}] \quad (1)$$

여기서, f_{cc} 및 f_{co} 는 각각 구속된 콘크리트 및 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도이며, $f_{l,tot}$ 는 횡방향 철근 및 섬유쉬트에 의한 유효 횡구속력을 나타낸다. 원주방향에 따라 균일한 구속력이 발생하는 원형 단면과는 달리, 사각형 단면의 경우에는 구속력이 균일하지 않기 때문에 횡방향으로 지지되는 모서리 사이에서 최소압력이 작용하고 주철근에 의해 지지되는 단면의 모서리에서 최대 구속력이 발생하게 된다. 한편, 횡방향 철근에 의한 횡구속력에 섬유쉬트에 의한 구속효과를 추가하였고, 기둥의 축력에 기여하는 성분 역시 포함하였다. 또한, 콘크리트 덮개 역시 섬유쉬트에 의해 구속되며 이를 축력의 계산시 고려하였다. 따라서, 다음의 그림1로부터 단면의 자유물체도에서 힘의 평형관계를 고려하여 횡방향 철근 및 섬유쉬트에 의한 유효 횡구속력을 식(2) 및 식(3)과 같이 산정할 수 있다.

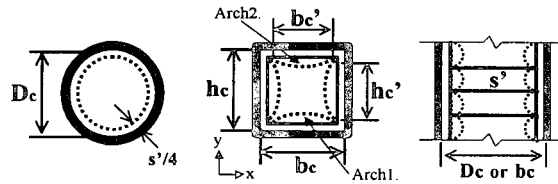


그림 1 보강재에 의해 구속된 코어 콘크리트의 유효 구속면적

$$f_{ls} = k_1 f_{ls} = \begin{cases} \left[\frac{\pi(D_s - \frac{s'}{2})^2}{\pi D_s^2 - 4n_{st}A_{st}} \right] \left[\frac{2A_{st}f_{ys}}{sD_s} \right] & : \text{원형 기둥} \\ \left[\frac{(b_c h_c - \sum_{i=1}^n \frac{(b'_c)^2}{6}) (1 - \frac{s'}{2b_c}) (1 - \frac{s'}{2h_c})}{b_c h_c - n_{st}A_{st}} \right] \left[\frac{\sum A_{st} f_{ys}}{s b_s} \right] & : \text{사각형 기둥} \end{cases} \quad (2)$$

$$f_{k(f_s)} = k_2 f_{k(f_s)} = \begin{cases} \left[\frac{(D_c - \frac{s'}{2})^2}{D_c^2} \right] \left[\frac{2n_{fs} f_{fs}}{D_c} \right] & : \text{원형 기둥} \\ \left[\frac{b_c h_c - \left\{ \sum_{i=1}^2 2 \int_0^{b_c/2} (-1)^{i+1} \left(\frac{h_c}{2} - y_i \right) dx + 2 \left(\frac{h_c^2}{6} \right) - 2 \int_0^{x_1} (y_2 - y_1) dx \right\}}{b_c h_c} \right] \left[\frac{2n_{fs} f_{fs}}{D_c} \right] & : \text{사각형 기둥} \end{cases} \quad (3)$$

또한, Saatcioglu와 Razvi¹⁾는 횡방향으로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 통합 모델에서 구속된 콘크리트의 최대 변형률을 다음 식(4)와 같이 제안하였다.

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}(1+5K), K = \frac{f_{L,ult}}{f_{co}} \quad (4)$$

여기서, ϵ_{cc} 및 ϵ_{co} 는 각각 구속된 콘크리트 및 구속되지 않은 콘크리트의 압축변형률을 나타내며, K 는 유효 구속비로서 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도에 대한 유효 횡구속력과의 비이다.

본 연구에서는 식(4)의 수정된 유효구속비 K 를 도입하여 콘크리트의 거동해석을 위한 수정된 구성 모델을 제안하였다. 구속된 콘크리트의 경우에는 횡방향 철근 및 섬유쉴트에 의한 보강 체적비의 증가와 더불어 횡구속력이 동시에 증가하게 되며, 이때의 응력-변형률 관계는 최대 응력 전·후의 거동에 따라 각각 다음의 식(5) 및 식(6)과 같이 표현할 수 있으며, 여기서 ϵ_{cu} 는 구속된 콘크리트의 극한 변형률을 나타낸다.

$$f_c = f_{cc} \left[2 \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \right)^2 \right]^{1/(1+2K)} \quad (0 \leq \epsilon_c < \epsilon_{cc}) \quad (5)$$

$$f_c = f_{cc} - 0.15 f_{cc} \left[\frac{\epsilon_c - \epsilon_{cc}}{\epsilon_{cc} - \epsilon_{cu}} \right]^{1/(1+2K)} \quad (\epsilon_{cc} \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cu}) \quad (6)$$

2.2 휨-전단을 고려한 RC 기둥의 거동해석 모델

섬유쉴트로 보강된 RC 기둥의 휨 및 전단 거동을 예측하기 위하여 그림2와 같은 하중조건을 가정하여 횡방향 하중을 식(7)과 같이 산정할 수 있으며, 변위 거동의 경우에는 휨, 부착-미끄럼 및 전단에 의한 변형을 고려하여 총 횡방향 변위를 식(8)과 같이 가정하였다.

$$V = \frac{2M}{L_c} \quad (7)$$

$$\Delta = \Delta_f + \Delta_{slip} + \Delta_s \quad (8)$$

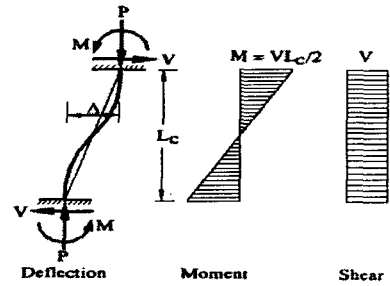


그림 2 전단보강 기둥의 하중조건

2.3 보강된 RC 기둥의 전단강도 예측모델

2.3.1 하한계 트러스-아치 모델

본 모델은 축력 및 전단력을 고려하여 보강된 RC 기둥에 대하여 그림3과 같이 Nielsen²⁾이 제안한 강도 하한값을 바탕으로 하한계 이론의 도입시 기둥에 작용하는 축력에 대하여 콘크리트가 분담하는 압축응력이 유효 압축강도 이상이 되지 않도록 하는 과정에서 트러스와 아치의 경사각이 이루는 차이를 무시함으로써 발생하는 전단강도의 증가를 초래하는 기존의 모델과 차별화 하였다. 즉, 아치 기구에 의한 전단강도를 0으로 가정하여 트러스 작용에 의한 콘크리트 스트럿의 응력을 유효 압축강도로 간주함으로써 콘크리트의 총 분담내력이 이미 소모된 것으로 가정하면 아치 기구에 의한 전단강도를 산정하지 않아도 된다.

그러므로, 전단철근 및 섬유취트의 보강량을 합하여 총 전단보강량을 도입하고, 축력이 전단강도에 기여하는 성분을 경사압축 스트럿의 거동을 이용하여 독립적으로 산정하여 트러스 모델로부터 산정한 전단강도와 합하여 보강된 RC 기둥의 전단강도 하한값을 그림4의 트러스-아치 기구에 따른 매크로 모델에서의 부재내 성분력과 변형도를 고려한 평형조건으로부터 식(9) 및 식(10)과 같이 산정할 수 있다. 여기서, V_t 및 V_p 는 각각 트러스 및 축력을 고려하여 경사 스트럿을 형성하는 아치 기구에 의한 전단성분이며, ϕ 는 전단보강비를 나타낸다.

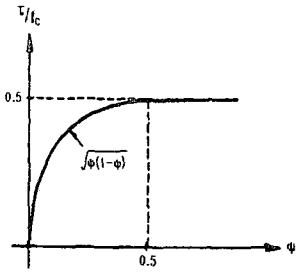


그림 3 전단강도 하한값²⁾

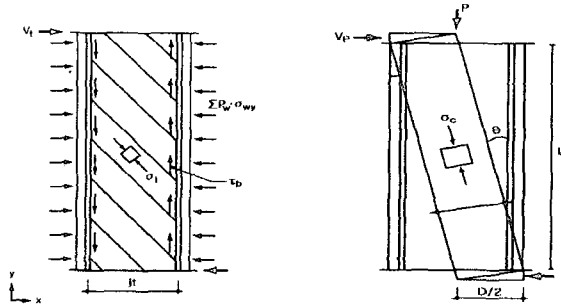


그림 4 하한계 트러스-아치 모델 개념도

$$V_n = \begin{cases} V_t + V_p \\ b \cdot jt \cdot \sqrt{\phi(1-\phi)} \cdot f_c + 0.5 \cdot \frac{P \cdot D}{L} & , \quad \phi \leq 0.5 \\ 0.5 \cdot b \cdot jt \cdot f_c + 0.5 \cdot \frac{P \cdot D}{L} & , \quad \phi > 0.5 \end{cases} \quad (9)$$

$$\phi = \frac{\sum(P_w \cdot f_{wy})}{f_c} = \frac{P_{u(s)} \cdot f_{wy(s)} + P_{u(fs)} \cdot f_{wy(fs)}}{f_c} \quad (10)$$

2.3.2 상한계 전단파괴 모델

하한값이 단순한 하중체계를 지닌 부재에 용이한 반면에, 보다 복잡한 하중조건 하에서는 상한값을 이용하여 좀더 쉽게 적용이 가능하다. 본 모델은 축력 및 전단력을 받는 보강된 RC 기둥의 파괴 형태를 나타내는 그림5와 같이, 섬유취트와 전단철근이 동일하게 거동하여 일정한 전단보강비를 지니고 중앙부에 수평변위가 발생하는 단순한 변위장을 가정하여 전단강도 상한값을 식(11)과 같이 산정할 수 있다.

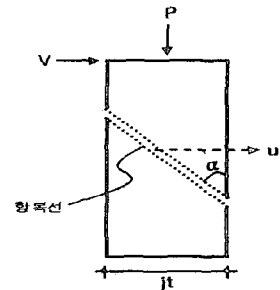


그림 5 전단파괴 모델 개념도

$$V = \tau \cdot b \cdot jt = b \cdot jt \cdot \left[\phi \cdot \cot \alpha + 0.5 \cdot (1 - \cos \alpha) \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \right] \cdot f_c \quad (11)$$

3. 보강된 RC 기둥 모델의 검증

문헌조사를 통해 얻은 Seible 등³⁾의 기둥 실험결과와 본 연구에서 제안한 모델을 적용한 보강된 원형 및 사각형 RC 기둥의 거동 해석결과를 비교하여 해석 알고리즘의 타당성을 검증하였다. 우선 기존 콘크리트 구속모델과 비교하기 위하여 하중-변위 곡선, 최대 전단하중, 그리고 극한 변위 및 연성의 항목을 이용하여 검토하였고, 또한 제안된 최대 전단강도 예측식을 적용한 강도 하한값 및 상한값을 Fukuyama 등⁴⁾ 및 Yamakawa 등⁵⁾의 실험결과와 비교하여 정확성을 평가하였다. 따라서, 해석결과를 통해 보강된 기둥 시험체는 작용된 연성을 고려하여 설계 요구치를 만족하는 것으로 판단할 수 있고, 섬유유틸에 의한 소성형지 영역의 구속 및 전단보강을 통해 기존 취성적 전단파괴에서 휨 연성파괴 형태로 전환됨을 확인할 수 있었다.

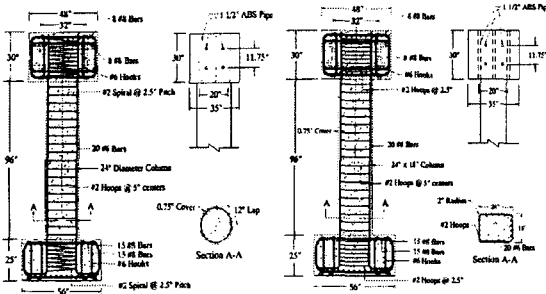


그림 6 해석대상 원형 및 사각형 보강 기둥시편의 개요³⁾

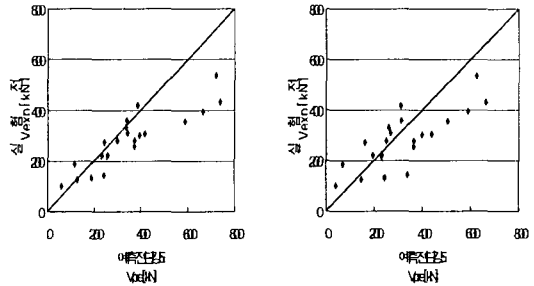


그림 7 하한계 및 상한계 해석에 의한 전단강도비 비교

표 1 원형 보강기둥 실험 및 해석결과

시편 구분	$V_{u(exp)}$ (kN)	$\Delta u(exp)$ (mm)	$\mu \Delta (exp)$	$V_{u(pre)}$ (kN)	$\Delta u(pre)$ (mm)	$\mu \Delta (pre)$
CS-R1	497.38	81.03	11.40	491.97	74.82	9.26
CS-R2	507.75	89.41	12.10	390.58	78.98	9.73
CS-R3	740.93	103.38	4.50	713.81	134.26	8.98
CS-R4	684.86	71.12	4.10	656.63	58.25	4.01

표 2 사각형 보강기둥 실험 및 해석결과

시편 구분	$V_{u(exp)}$ (kN)	$\Delta u(exp)$ (mm)	$\mu \Delta (exp)$	$V_{u(pre)}$ (kN)	$\Delta u(pre)$ (mm)	$\mu \Delta (pre)$
RS-R1	558.48	95.76	9.70	594.13	126.50	16.50
RS-R2	559.37	103.63	9.90	600.18	121.35	15.92
RS-R3	570.05	109.73	9.70	607.73	150.11	19.72
RS-R4	581.62	78.49	9.20	605.85	98.11	16.55

표 3 원형 기둥의 최대 전단하중비

구속 모델	시편 구분			
	CS-R1	CS-R2	CS-R3	CS-R4
Mander	0.842	0.848	0.827	0.925
Samaan	0.828	0.845	0.872	0.863
Hoppel	0.851	0.870	0.910	0.860
Toutanji	0.843	0.850	0.844	0.941
제안 모델	0.972	0.988	0.988	1.019

표 4 원형 기둥의 극한 변위비

구속 모델	시편 구분			
	CS-R1	CS-R2	CS-R3	CS-R4
Mander	0.638	0.635	0.445	0.935
Samaan	0.384	0.409	0.418	0.447
Hoppel	0.357	0.390	0.408	0.354
Toutanji	0.571	0.561	0.429	0.948
제안 모델	1.083	1.132	0.770	1.221

표 5 원형 기둥의 극한 연성비

구속 모델	시편 구분			
	CS-R1	CS-R2	CS-R3	CS-R4
Mander	0.728	0.701	0.295	0.791
Samaan	0.438	0.452	0.273	0.376
Hoppel	0.383	0.406	0.248	0.277
Toutanji	0.625	0.592	0.272	0.776
제안 모델	1.231	1.244	0.501	1.024

표 6 사각형 기둥의 최대 전단하중비

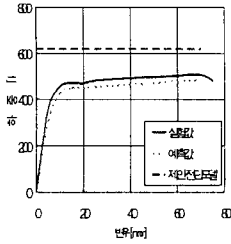
구속 모델	시편 구분			
	RS-R1	RS-R2	RS-R3	RS-R4
Mander	0.797	0.800	0.807	0.831
제안 모델	0.888	0.882	0.878	0.908

표 7 사각형 기둥의 극한 변위비

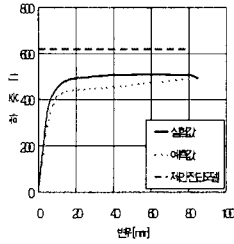
구속 모델	시편 구분			
	RS-R1	RS-R2	RS-R3	RS-R4
Mander	0.458	0.526	0.531	0.535
제안 모델	0.757	0.854	0.731	0.800

표 8 사각형 기둥의 극한 연성비

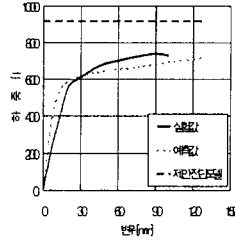
구속 모델	시편 구분			
	RS-R1	RS-R2	RS-R3	RS-R4
Mander	0.371	0.400	0.374	0.386
제안 모델	0.588	0.622	0.492	0.566



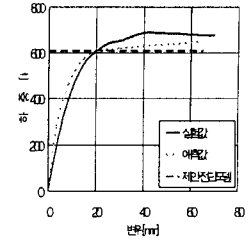
(1) CS-R1



(2) CS-R2

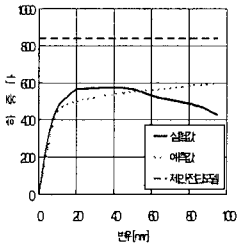


(3) CS-R3

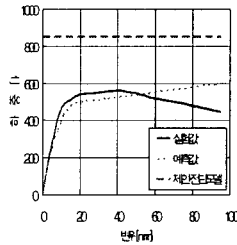


(4) CS-R4

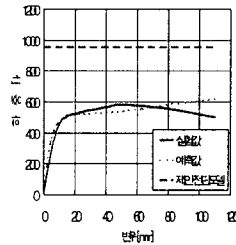
그림 8 원형 보강 기둥의 전단강도 곡선 비교



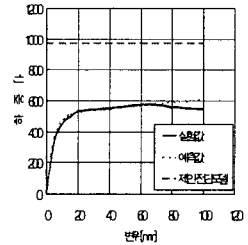
(1) RS-R1



(2) RS-R2



(3) RS-R3



(4) RS-R4

그림 9 사각형 보강 기둥의 전단강도 곡선 비교

4. 결론

- 1) 섬유쉴트로 보강된 RC 기둥의 전단보강 효과를 검증하기 위하여 하한계 트러스-아치 기구 및 상한계 전단파괴 기구를 이용하여 최대 전단강도 예측모델을 제안하였고, 제안된 모델은 RC 기둥 시험체의 실험결과를 비교적 잘 예측하여 보강 전·후 거동의 예측에 활용이 가능함을 보였다.
- 2) 섬유쉴트로 보강된 RC 기둥의 전단성능을 예측하기 위하여 제안한 변위모델은 사각형 기둥 보다 원형 기둥의 거동 예측에 비교적 정확성을 나타내었고, 콘크리트 구속모델 역시 기존 모델 보다 원형 및 사각형 기둥 모두에 비교적 정확히 적용이 가능한 것으로 평가되었다.
- 3) 본 연구를 통해 제안된 해석모델은 섬유쉴트의 보강효과를 고려한 RC 기둥의 설계시 극한강도의 정량적인 예측과 보강재의 소요 보강량을 결정하는데 유용할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Saatcioglu, M. and Razvi, S. (1992), "Strength and Ductility of Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 6, pp. 1590-1607.
2. Nielsen, M. P. (1998), *Limit Analysis and Concrete Plasticity*, CRC Press, pp. 373-386.
3. Seible, F., Priestley, M. J. N. and Innamorato, D. (1995), *Earthquake Retrofit of Bridge Columns with Continuous Fiber Jackets*, Report No. ACTT-95/08, UCSD, La Jolla, California, pp. 80-133.
4. Fukuyama, K., Higashibata, Y. and Miyauchi, Y. (2000), "Studies on Repair and Strengthening Methods of Damaged Reinforced Concrete Columns," *Cement and Concrete Composites*, Elsevier Science Ltd., Vol. 22, pp. 81-88.
5. Yamakawa, T., Zhang, A. and Satoh, H. (2001), "Study on Seismic Behavior of RC Columns Retrofitted by Aramid Fiber Polymer Sheets," *Journal of Structural and Construction Engineering*, AIJ, No. 545, pp. 111-117.