

탄소섬유시트로 전단 보강된 철근콘크리트 기둥의 유한요소해석

FEM Analysis of Reinforced Concrete Columns
Shear Strengthened with Carbon Fiber Sheets

이 용 택*
Lee, Yong-Taeg

나 정 민**
Na, Jung-Min

이 리 형***
Lee, Li-Hyung

Abstract

In this paper, FEM analysis is performed in order to estimate the behavior of RC columns retrofitted with Carbon Fiber Sheet(CFS). Two node truss element and four node isometric plate bond element are used for modeling the CFS and the adhesion between concrete and CFS, respectively. Five specimens with different quantity of CFS are analyzed and compared with experimental results. From the comparison, analytical results show a good agreement with the test results. Therefore, it is advisable to use the FEM used in this paper to predict the behavior of columns with CFS.

keywords : Reinforced Concrete Column, Shear Strengthening, Carbon Fiber Sheet, Nonlinear Finite Element Method

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 재료적, 시공적, 환경적, 구조적 요인으로 노후화가 진행되어 구조적인 내력이 부족하게 되거나 사용성이 저하되어 보수 및 보강을 필요로 하는 경우가 생기게 된다. 우리나라에서는 70년대 이후의 급속한 경제발전에 더불어 사회간접자본시설과 신도시 개발사업 등의 건설사업이 진행되어 왔

다. 이러한 활발한 건설사업에 힘입어 많은 구조물이 건설되었지만, 구조물의 유지관리 및 보수·보강분야에 상대적으로 소홀하여 지난 몇 년간에 걸쳐 구조물의 붕괴사고 등을 발생시켜 사회적으로 심각한 문제를 일으켰다. 또한, 구조물의 노후화에 따른 내력성능저하로 인해 잠재적인 위험을 갖고 있어 보수 및 보강을 필요로 하는 구조물이 증가하고 있다. 지금까지 기존 RC 기둥을 보강하는 방법은 전통적으로 단면증설법과

* 한밭대학교 건축공학부 교수, 공학박사

** 한양대학교 건축공학부 박사과정

*** 한양대학교 건축공학부 교수, 공학박사

E-mail : ytleee@hanbat.ac.kr 011-274-1656

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2003년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

강판보강법이 주로 사용되어 왔으나, 이러한 보강방법은 구조체의 중량이 증대되고, 작업을 하기 위한 공간 확보가 요구되는 등의 단점이 있다. 최근에는 이러한 단점을 해결하기 위해 탄소섬유시트(Carbon Fiber Sheet, CFS)를 이용한 보강공법이 개발되어 건축구조물이나 토목구조물의 RC 기둥의 전단보강방법으로 널리 사용되어지고 있다. 그러나 CFS의 전단보강효과에 대한 실험연구결과가 많지 않으며, 국외의 설계 지침 또한 이러한 부족한 실험자료에 근거하고 있어 신뢰성이 떨어지고 있다. 따라서 기존 실험연구를 보완하고 보다 명확히 CFS의 전단보강효과를 파악하기 위한 유한요소해석이 필요하다.

이에 본 연구에서는 기존의 CFS로 전단 보강된 RC 기둥의 성능평가 실험연구를 토대로 이에 대한 유한요소해석을 실시한 후, 실험결과와 해석결과를 비교하여 해석모델의 타당성을 분석한다. 또한 전단보강근이 파소 배근된 실제 크기의 RC 기둥에 대하여, CFS의 전단 보강비를 변수로 한 유한요소해석을 실시하여 보강효과를 고찰하여, 향후 신뢰성있는 보강 설계 지침식 마련을 위한 기초적인 자료를 제공하고자 한다.

2. 해석대상 실험체

2.1 해석대상 실험체 개요

해석 모델의 타당성 분석을 위한 해석 실험체는 본 연구자가 기존에 행한 CFS의 보강량을 변수로 한 총 5개의 RC 기둥 실험체¹⁾를 대상으로 한다. Fig. 1에 해석 대상 실험체 형상과 배근 상세를 나타내었고, 실험체의 일람을 Table 1에 나타내었다.

RC1 실험체는 $\Phi 6$ 인 후프근이 13cm간격으로 배근되어 전단보강비가 0.151%인 기준 실험체이다. CF1 실험체와 CF2 실험체는 기준 실험체에 각각 폭 4.0cm, 8.5cm의 CFS를 13cm 간격으로 수평 보강한 실험체로 전체보강비가 각각 0.259%, 0.381%이다.

CF3 실험체와 CF4 실험체는 기준 실험체에 CFS를 각각 수평방향으로 1겹, 2겹 보강하여 전체보강비가 각각 0.503%, 0.856%인 실험체이다.

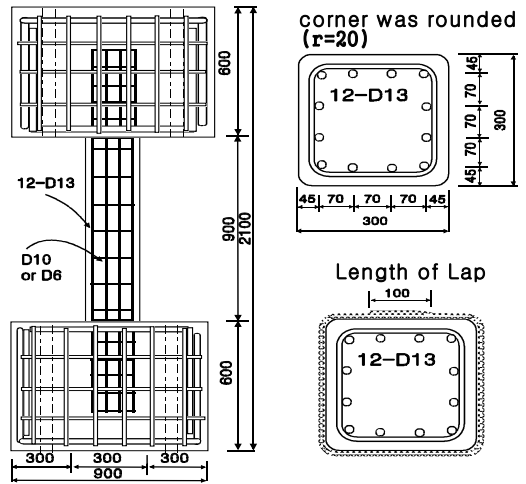


Fig. 1 실험체 형상과 배근상황(단위: mm)

Table 1 실험체 일람표

실험체명	전단보강	전단보강비(%)		
		CFS (sP_w)	전단근 (fP_w)	합계 ²⁾ ($\sum P_w$)
RC1	7- $\Phi 6$ @130	-	0.151	0.151
CF1	7- $\Phi 6$ @130+W40	0.0228	0.151	0.259
CF2	7- $\Phi 6$ @130+W85	0.0484		0.381
CF3	7- $\Phi 6$ @130+1겹	0.0740		0.503
CF4	7- $\Phi 6$ @130+2겹	0.1480		0.856

2.2 재료시험 및 실험체 설치

실험체에서 사용된 각 재료에 대한 재료시험결과는 Table 2에, 실험체 설치상황은 Fig. 2에 나타내었다.

Table 2 실험체 재료의 시험결과

재료	항복강도 (kgf/cm ²)	탄성계수 (kgf/cm ²)	항복변형 (μ)
콘크리트	360 (28일압축)	2.47×10 ⁶	-
철근	$\Phi 6$	7349	1.99×10 ⁶
	D10	4127	1.82×10 ⁶
CFS	35000	2.40×10 ⁶	-

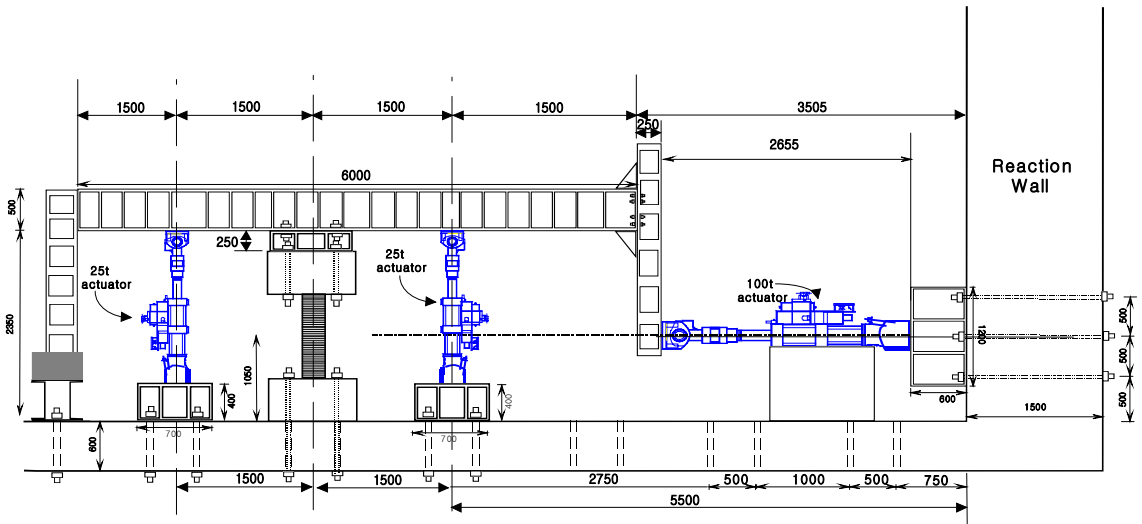


Fig. 2 실험체 설치 상황

2.3 실험결과

각 실험체의 실험결과에 따른 내력 및 변위, 연성비, 변형능력을 정리하여 Table 3에 나타내었다. 표에서 보는 것과 같이 후프근이 과소배근된 RC기둥에 CFS로 진단보강을 한 결과, 최대내력이 13~32%, 연성비가 227~613%, 변형능력이 231~619% 증가하여 그 보강효과를 알 수 있었다.

3. 유한요소해석

3.1 해석방법 및 요소분할

FEM해석은 콘크리트 전용 프로그램인 Total-RC를 사용하였으며 기둥을 Fig. 3에 나타낸 것과 같이 모델링을 하였다. 해석방법은 재료의 비선형성을 고려한 2차원 평면응력해석을 하였다.

Table 3 실험결과에 따른 내력 및 변위, 연성비, 변형능력, 누적에너지 소산 면적

실험체명	Py (tonf) (1)	$\bar{\delta}_y$ (mm) (2)	P _{max} (tonf) (3)	$\bar{\delta}_{max}$ (mm) (4)	$\bar{\delta}_u$ (mm) (5)	연성비	변형 능력	
						(5)/(2)	$\bar{\delta}_u$ (%)	
RC1	(+)	15.4	2.42	20.2	5.865	5.865	2.424	1.30
	(-)	-17.9	-2.665	-22.1	-4.465	-4.465	1.675	0.99
CF1	(+)	21.3	3.000	28.5	8.115	13.525	4.508	3.01
	(-)	-19.4	-3.400	-25.0	-9.025	-13.510	3.974	3.00
CF2	(+)	20.2	3.280	27.6	8.680	18.075	5.511	4.02
	(-)	-19.0	-2.685	-27.8	-13.745	-27.580	10.272	6.13
CF3	(+)	18.4	2.745	25.4	8.800	27.020	9.843	6.00
	(-)	-20.1	-3.595	-26.6	-13.200	-27.775	7.726	6.17
CF4	(+)	21.0	3.545	28.5	-9.070	59.995	16.924	13.33
	(-)	-20.5	-2.775	-29.1	-9.315	-45.100	16.252	10.02

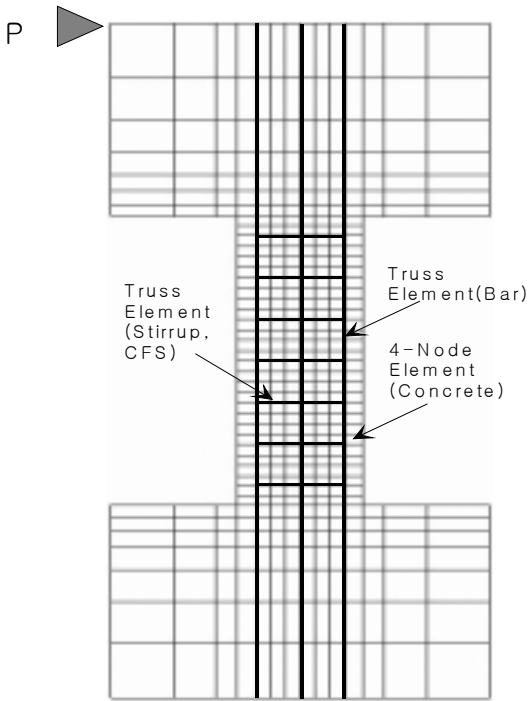


Fig. 3 FEM 해석 기동모델링

3.2 FEM 해석시 사용된 재료구성모델

(1) 콘크리트

콘크리트의 최대압축강도까지는 Kupfer의 이론을 사용하였고 최대압축강도 이후에서는 변형도연화를 고려한 이선형(Bi-linear) 모델을 사용하였다. 인장강도는 균열발생 전까지 선형탄성으로 하고, 균열발생 후에는 지수형의 인장연화를 고려하였다. 콘크리트는 4절점 아이소파라메트릭 평면응력요소로 모델링하였다 (Fig. 4(a), (b) 참조).

(2) 철근

철근은 2절점 트러스 요소로 모델링 하였다. 또한, 항복조건은 Von Mises의 항복조건을 사용하였다(그 Fig. 4(c) 참조).

(3) 콘크리트와 철근의 부착

콘크리트와 철근의 부착은 4절점 아이소파라메트릭 판본드 요소로 모델링 하였다. 이 물성은 기존의 논문 3)을 참고하여 이선형으로 표현하였다(Fig. 4(d) 참조).

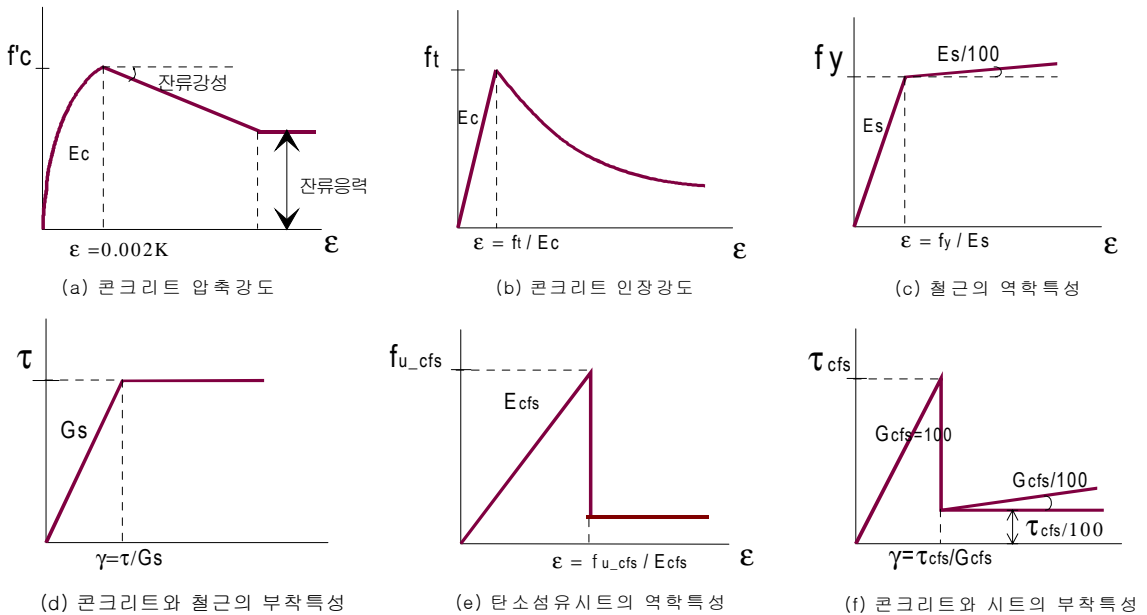


Fig. 4 유한요소해석시 사용된 재료구성모델

(4) CFS

CFS는 2절점 트러스 요소로 모델링을 하였다. CFS가 파단되기 전까지는 탄성체로 표현하였으며, 파단된 후에는 응력을 해방시키고, 동시에 탄성계수를 감소시켰다. 또한 기존 연구결과를 참조하여 CFS 부착량에 따라 인장강도를 저감시켰다(Fig. 4(e) 참조).

(5) 콘크리트와 CFS의 부착

철근의 부착요소와 같은 4절점 아이소파라메트릭 판본드 요소로 모델링하였다. 물성값은 기존의 논문^{3),6)}을 참조하였다. 또한 실험에서의 박리파괴를 표현하기 위해 최대전단강도(τ)에 도달하였을 때 전단응력을 해방시키고, 동시에 전단강성을 감소시켰다(Fig. 4(f) 참조).

4. FEM해석결과와 실험결과의 비교분석

4.1 균열성상 및 주응력분포

CF1 실험체의 최종파괴시 균열성상과 주응력분포를 Fig. 5에 나타내었다. 실험과해석에 의한 균열성상을 비교해 보면 기둥의 양단부에 횡균열과 단부쪽에서 기둥 중앙부로 전단균열과 주근주위의 부착할렬균열이 퍼져나가는 것이 잘 나타나고 있다. 또한, 주응력도에서 보듯이 가력부와 반력부사이에 압축응력의 흐름이

로 압축장이 형성되었음을 알 수 있다.

4.2 하중-변위 곡선비교

반복가력된 각 실험체의 하중-변위 곡선을 포락선으로 나타낸 실험결과와 FEM해석에 의한 해석결과를 비교하여 Fig. 6~8에 나타내었다. 이들 하중-변위곡선에서 해석결과와 실험결과에서 초기 강성의 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다. 이는 실험시 가력장치인 프레임이 완전강체로 작용하지 못하였기 때문에 실험 결과의 강성이 저하되었다고 판단된다.

Fig. 6에서 보는 것과 같이 CFS로 보강하지 않은 RC1 실험체의 경우 실험결과에 의한 최대내력이 20.2 tonf로 해석결과에 의한 최대내력 23.9 tonf 보다 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 CF1과 CF2를 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 CF1 실험체의 실험결과 최대내력은 28.5tonf, 해석결과 최대내력은 27.8tonf으로 그 오차가 2.1%이었으며, 실험과 해석 모두 기둥주근의 항복이 선행되어 휨파괴되었음을 알 수 있다. CF2 실험체의 경우, 실험과 해석결과에서 최대내력이 거의 일치하였으나, 기둥의 주근이 항복을 하여 휨파괴하였으므로 휨내력을 초과하는 전단보강은 최대내력에 영향을 미치지 못하였다는 것을 알 수 있다.

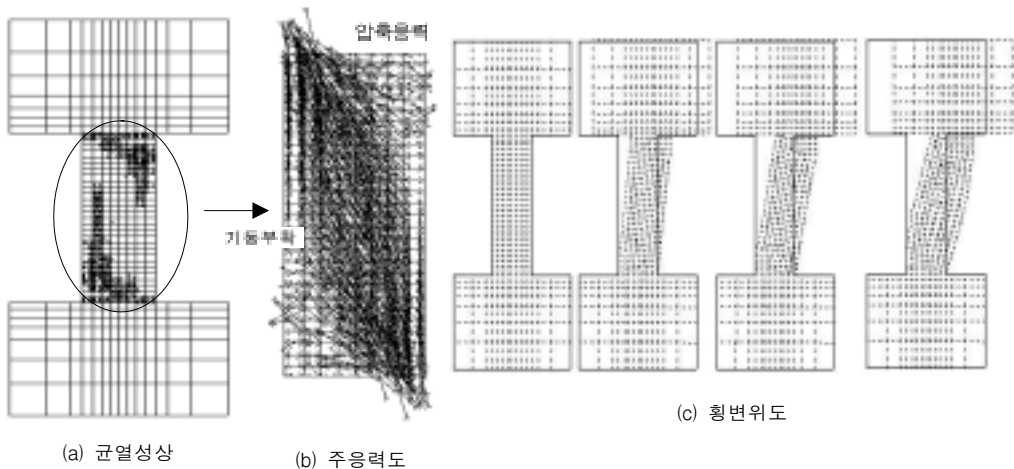


Fig. 5 CF1 실험체의 균열성상, 주응력분포도 및 횡변위도

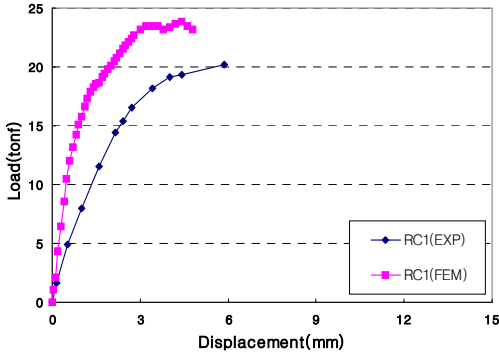


Fig. 6 RC1 실험체의 하중-변위곡선 비교

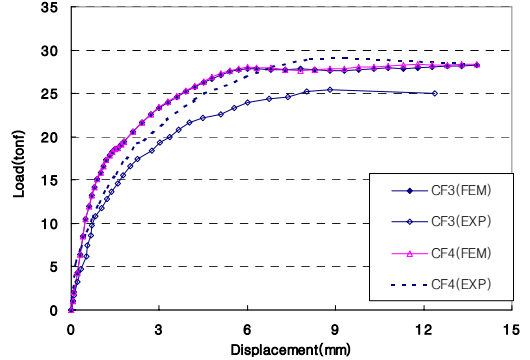


Fig. 8 CF3, CF4 실험체의 하중-변위곡선 비교

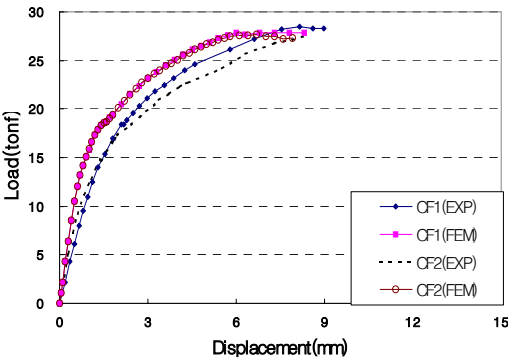


Fig. 7 CF1, CF2 실험체의 하중-변위곡선 비교

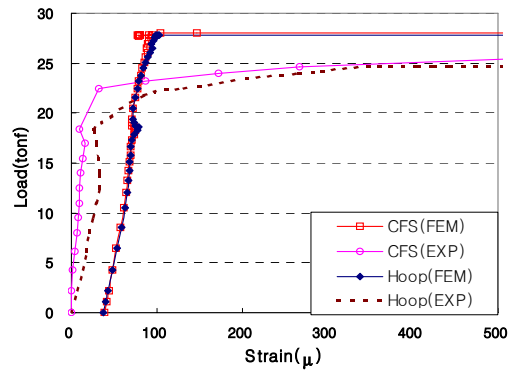


Fig. 9 CF1 실험체에 대한 후프근과 CFS의 하중-변형률 곡선비교

또한, 실험결과에서 CFS로 보강된 실험체의 강성이 약간 증가된 것으로 나타났다. 이는 CFS에 의한 횡구속효과로 판단되며, 해석에서는 횡구속효과가 고려되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 CF3와 CF4를 비교한 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 각 실험체의 실험 및 해석결과에서도 휨내력이 최대내력으로 결정되었으며 증가된 CFS의 전단보강비가 최대내력에는 영향을 미치지 못하였다는 것을 알 수 있다. 그러나 최대내력 이후에 급격한 내력의 감소없이 연성적인 거동에 기여함을 알 수 있었다. 위의 실험과 해석결과로부터 전단보강비가 증가함에 따라 최대내력이 전단내력에서 휨내력으로 바뀌게 되어 연성비의 증가에 기여함을 알 수 있었다. 또한 해석과 실험의 하중-변위곡선에 대한 비교로부터 해석시 사용된 각 재료 구성모델이 적절하였다고 판단된다.

4.3 후프근과 탄소섬유시트의 하중-변형률 곡선

CF1 실험체의 후프근 중 기둥 하단부에서 두 번째의 후프근과 기둥 상단부에서 두 번째의 CFS에 대한 실험 및 해석결과에 의한 하중-변형률 곡선을 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 실험에서는 18.4tonf까지는 콘크리트가 횡하중을 거의 부담하였고, 그 이후의 횡하중부터 후프근의 변형률이 급격히 증가하였다는 것을 알 수 있다. 해석에서는 27.8tonf까지 콘크리트가 횡하중을 거의 부담하였고 그 이후에 급격히 후프근의 변형률이 증가하는 것으로 나타났다. CFS의 변형률은 실험시 22.5tonf에서부터 급격히 증가하였고, 해석에서는 27.8tonf에서부터 탄소섬유시트의 변형률이 급격히 증가하였다.

이는 최대내력 부근 이후의 항하중을 후프근과 전단보강된 탄소섬유시트가 부담하는 것을 나타내므로 RC 기둥의 연성적인 거동을 위하여 전단보강이 필요하다는 것을 증명해준다.

4.4 변수해석

이상의 해석모델을 이용하여 실제크기의 RC 기둥부재 (단면 50cm×50cm, 길이 3.5m, 주철근비 2.054%) 를 모델링하고, 보강되는 CFS의 전단보강비를 변수로 한 FEM 해석을 실시하였다. 해석대상 모델 일람은 Table 4에 나타내었다.

전단보강비를 변수로 한 해석대상 모델의 해석결과에 의한 하중-변위곡선을 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 과소한 후프근만으로 배근되어 전단보강비가 낮은 FEM0 모델은 전단 파괴의 파괴양상을 보였으며, FEM0 모델에 CFS로 전단보강한 FEM1, FEM2, FEM3 모델들은 모두 RC 기둥의 주근 항복으로 휨파괴가 되어 연성적인 거동을 나타내고 있음을 알 수 있다.

대상 모델에 대하여 식 (1)⁶⁾에 의해 전단력을 구한 후 해석결과 값과 비교하여 Table 5에 나타내었다.

$$V_n = b j_t p_w \sigma_{wy} \cot \varphi + \frac{\tan \theta (1 - \beta) b D v \sigma_B}{2} \quad (1)$$

여기서,

σ_B : 콘크리트 압축강도

p_w : 전단보강근 강도

b : 기둥단면 폭

D : 기둥단면 높이

L : 기둥길이

p_w : 전단보강비(탄소섬유시트는³⁾ 기준논문참조)

j_t : 압축강도 유효계수

θ : 콘크리트 압축축 각도

이론식에 의한 실험체 내력값은 해석값에 비하여

Table 4 해석대상 모델 일람

해석대상	배근 및 보강		전단보강비(%)		
	Hoop	CFS	Hoop	CFS	Sum
FEM0	9-D10 @400	-	0.071	-	0.071
FEM1	9-D10 @400	9-W50 @400	0.071	0.011	0.135
FEM2	9-D10 @400	1겹보강	0.071	0.044	0.294
FEM3	9-D10 @400	2겹보강	0.071	0.088	0.587

Table 5 해석대상 모델의 내력값비교

해석대상	전단력(tonf)		단면에 의한 휨내력(tonf)	파괴상황
	(1)식	FEM		
FEM0	27.99	35.7	33.33	전단파괴
FEM1	38.23	37.4	33.33	휨파괴
FEM2	63.67	38.3	33.33	휨파괴
FEM3	110.56	39.3	33.33	휨파괴

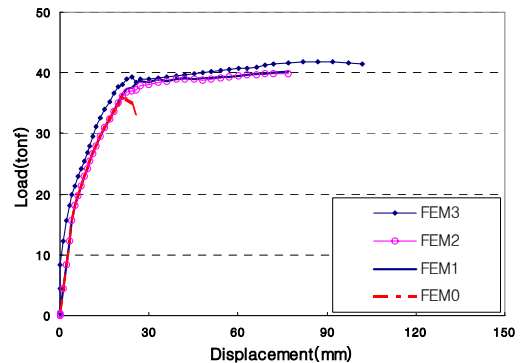


Fig. 10 해석대상체의 하중-변위곡선

12~22% 크게 나타나 안전측으로 평가되었다.

이상과 같은 실제 크기의 RC 기둥 해석에서 일정량의 CFS 전단보강은 전단력을 증가시키는데 기여하지만, 기둥 단면의 휨내력을 초과하는 전단보강은 전단력 증가에 효과가 없음을 알 수 있었다.

5. 결 론

이상과 같이 CFS로 진단보강된 RC 기둥의 비선형 유한요소해석에 관한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 FEM 해석에 필요한 CFS의 재료모델 및 CFS와 콘크리트의 부착요소 모델이 제시되었다.
- 2) CFS로 진단보강된 RC기둥의 실험 및 FEM 해석 결과를 비교한 결과 비교적 잘 일치하여 본 FEM 해석모델이 CFS로 진단보강된 RC 기둥의 거동과 약에 이용될 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) CFS의 보강량에 따른 RC 기둥의 해석으로부터 일정량의 CFS 진단보강은 전단력을 증가시키는데 기여하지만, 기둥 단면의 휨내력을 초과하는 진단 보강은 전단력 증가에 효과가 없음을 알 수 있었다.
- 4) 향후, CFS에 의한 콘크리트 횡구속을 적절히 고려하기 위한 3차원 해석모델 개발이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 '97 산학 협력 연구과제(과제번호:97-2-14-01-01-3)연구비 지원에 의한 연구 결과의 일부이며, 연구에 협력해 주신 한양대 초대형 구조시스템연구센터와 (주)토탈인포메이션서비스에 감사드립니다.

참고문헌

1. 강경완, 하상수, 나정민, 이용택, 이리형, “탄소섬유시트로 진단보강된 철근콘크리트 기둥의 성능평가”, 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제10권 제2호, 1998. 11., pp. 525-528.
2. Takahiro Kataoka 외 4인, “Ductility of Retrofitted RC Columns with Continuous Fiber Sheets”, Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium, Vol.1, Oct., pp. 547-554, 1997.
3. Nobuhiro Araki et. al, “Shear Capacity of Retrofitted RC Members with Continuous Fiber Sheet”, Proceeding of Third International Symposium, Vol. 1, Oct., 1997.
4. Yasuhiro Matsuzaki et. al., “Shear Capacity of Retrofitted RC Members with Continuous Fiber Sheets”, Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium Vol. 1, 1997, pp. 515-522.
5. 李 翰承, 友澤史紀, 野口貴文, “炭素纖維シートによって曲げ補強した梁の有限要素解析”, 콘크리트工学年次論文報告集 Vol. 18, No. 1, 1996. nms Using Carbon Fibers, Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium Vol. 1, 1997, pp. 555-562.
6. 鐵筋콘크리트構造物ノ終局強度型耐震設計指針・同解説, 日本建築學會, 1990.

(접수일자 : 2002년 4월 1일)