

CFS로 횡보강된 철근콘크리트 기둥의 역학적 특성에 관한 연구

A Study on Mechanical Characteristics of Reinforced Concrete Columns Confined with Carbon Fiber Sheet

권 영 웅* 정 성 철**
Kwon, Young-Wung Chung, Sung-Chul

ABSTRACT

Recently new rehabilitation techniques have been proposed with advanced composite materials like carbon fiber, aramid, glass fiber sheet and so forth. The purpose of this paper is to investigate the mechanical characteristics of reinforced concrete columns confined with carbon fiber sheet and evaluate the degree of their strengthening effect.

For the test, the specimen size of column is 15cm×15cm×90cm reinforced with 4 number of main bars of 10 mm diameter, tied bars of 6 mm diameter and slenderness ratio 20.

Columns were wrapped with carbon fiber sheet along the column length. It is necessary to make some assumption regarding the confinement of carbon fiber sheet to apply to reinforced concrete columns under concentric loads. The strength gain effect of columns confined with carbon fiber sheet could be predicted using the proposed equation.

key word : strength gain effect, column, carbon fiber sheet, confinement.

1. 서 론

일반적으로 철근콘크리트 기둥에 대해 구조내력의 회복 또는 증진이 필요할 경우에 사용되고 있는 보수·보강방법에는 단면증대방법이나 강판보강 및 복합재료를 이용한 방법들이 있다. 특히 탄소섬유나 유리섬유 및 아라미드섬유 등과 같은 고성능 복합재료(Advanced Composite Material)는 시공성과 일체성 확보면에서 기존의 방법보다 우수하기 때문에 그 사용이 증가하고 있는 추세이다. 하지만 횡구속보강제에 의한 보강효과는 보강정도에 대한 계산의 어려움과 구속효과에 대한 해석이 난이(難易)하여 그 보강효과를 정량화하는 것은 어려우며, 이에 대한 지속적인 연구를 필요로 하고 있다.

본 연구에서는 탄소섬유시트로 전면 보강한 철근콘크리트 기둥에 대하여 보강재료의 체적비를 증가시킴으로써 나타나는 보강기둥의 강도와 연성 및 파괴양상 등을 파악하고자 하였다.

* 정회원, 인천대학교 건축공학과 교수, 공학박사

** 정회원, 인천대학교 대학원 졸업

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험변수

실험체는 무보강 철근콘크리트 기둥을 탄소섬유시트로 전면보강한 형태로서, 탄소섬유시트의 겹수를 각각 1겹, 2겹, 3겹과 4겹으로 하여 보강하였다. 보강체적비(ρ_r)는 기둥전단면적(A_g)에 대한 탄소섬유의 단면적(A_r)의 비로 나타냈으며, 실험변수에 대한 자세한 내용은 아래의 table 2.1과 같다.

Table 2.1 - Test variables for repaired columns reinforced with steel plate and carbon fiber sheet

Test Specimen	Materials	Materials Amount	Type	Reinforcing Volume Ratio(ρ_r)
GA-PT	ProtoType	-	-	-
GA-CF1	Carbon Fiber sheet	1 ply	All length	0.0028
GA-CF2		2 ply	All length	0.0056
GA-CF3		3 ply	All length	0.0084
GA-CF4		4 ply	All length	0.0112

2.2 사용재료

본 연구에 사용된 콘크리트는 물시멘트비(w/c) 0.58, 슬럼프 21cm, 평균압축강도 320kg/cm^2 그리고 평균 변형도가 $4500\mu\epsilon$ 였다. 탄소섬유시트와 에폭시 제품의 재료적 성질은 table 2.2, table 2.3과 같다.

Table 2.2 - Properties of carbon fiber sheet for test specimen

Product	Type	Weight (g/m^2)	Specific Gravity (g/cm^3)	Thickness (mm)	Tensile Strength (kg/cm^2)	Elastic Modulus (kg/cm^2)	Fracture Strain (%)
FTS-C1-20	High Strength	200	1.80	0.11	35500	2.35×10^6	1.5

Table 2.3 - Properties of Epoxy Resin Adhesive for test specimen

Product	Viscosity ($\text{mPa} \cdot \text{sec}$)	Specific Gravity	Setting Time(hr)	Pot Life(min)
FR-E3P (Fiber)	29,900	1.17	11	54
	Tensile Strength (kg/cm^2)	Compressive Strength (kg/cm^2)	Flexural Strength (kg/cm^2)	Shear Strength (kg/cm^2)
	431	924	692	135

2.3 기본시험체의 제작

실험체의 크기는 $150 \times 150 \times 900\text{mm}$ (세장비 20)이며, 주철근은 4-D10(평균항복강도: 4000kg/cm^2), 띠철근은 D6(평균항복강도 : 4203kg/cm^2)을 사용하였다. 띠철근의 간격은 중앙부 150mm, 단부는 75mm로 하였으며, 콘크리트의 피복두께는 주철근 중심으로부터 25mm로 하였다. 시험체의 상·하 단부에는 주철근에 힘이 균일하게 전달될 수 있도록 두께 15mm의 가력강판을 사용하였고, 주철근과 용접하여 고정시켰다. 용접시 주철근에 좌굴이 발생하지 않도록 주의하여 실험체를 제작하였다.

2.4 보강시험체의 제작

보강시험체는 먼저 모서리 부분(R=10mm)을 그라인딩하여 모재와 완전히 접착할 수 있도록 하였다. 탄소섬유와 콘크리트의 접착성능을 향상시키기 위하여 표면에 프라이머를 도포하였으며, 프라이머의 경화이후에 실링제로 표면의 높이를 고르게 하였다. 일정한 두께로 레진(ER-E3P)을 도포하기 위하여 브러쉬(bush)를 사용하였다. 레진을 도포한 이후에 탄소섬유의 방향이 기둥부재와 직각을 이루는 횡방향으로 접착시켰으며, 이어 레진을 표면에 함침시켜 탄소섬유시트를 완전히 접착하였다. 2겹은 함침한 레진이 경화(7시간)되고 난 이후에 접착하였으며, 3겹은 48시간의 양생이후에, 4겹은 3일간의 양생 후에 각각 접착하였으며, 에폭시의 접착성능이 충분히 발현될 수 있도록 작업완료일 이후에 6주 이상 실험실에서 양생하였다.

2.5 실험장치 및 가력방법

탄소섬유시트로 횡보강된 철근콘크리트 기둥에 중심축하중을 가력하기 위해서 최대stroke 25cm, 최대하중 250 ton 용량의 만능시험기(Closed-Loop Servo-Hydraulic Dynamic Material Testing System : Instron 8506)를 사용하였다.

가력강판의 평활정도에 따른 응력집중을 방지하고 시험체에 축력이 균일하게 작용할 수 있도록 구면좌(Spherical Seat)와 두께 4mm의 압축고무판을 사용하였으며, 기둥의 축방향변위를 측정하기 위하여 변위계(Displacement Transducer)를 단부에 설치하였다. 콘크리트의 변형도와 철근의 변형도 및 보강재료와 콘크리트간의 변형일체성을 살펴보기 위해 시험체(주철근 2개소, 띠철근 2개소) 및 보강재료의 외부에 횡방향과 종방향 스트레인 게이지를 부착하였다.

하중이 보강재료에 직접적으로 작용하지 않도록 단면이 145×145mm인 중간가력판을 시험체의 가력강판과 구면좌 사이에 설치하였다. 가력속도는 초기에 0.48mm/min, 변형증가부분은 0.24mm/min로서 변위제어(stroke control)를 통해 시험체에 하중이 가력되었다. 하중의 크기와 변위 및 변형률은 보조 데이터로거(Kowya - UCAM 70A - Sub-Indicator)와 컴퓨터(Main-Indicator)를 통해 데이터를 자동으로 처리하여 얻을 수 있게 하였다.

3. 실험결과

3.1 파괴양상과 강도 및 변위특성

Fig. 3.1와 3.2에 나타난 것처럼 탄소섬유시트 1겹(ply)으로 보강한 GA-CF1 시험체는 최대하중에 이른 후에 하중이 감소하면서 취성파괴를 보였으나, GA-CF2, GA-CF3와 GA-CF4 시험체는 하중이 점차 증가하다가 최대하중에 이른 후에 급격한 취성파괴를 나타내었다.

탄소섬유시트의 겹침수가 증가할수록 연성효과 및 에너지흡수능력이 크게 나타나며, 탄소섬유의 인장파괴이후의 하중감소폭은 크지 않았다. 이는 보강체적비가 증가할수록 취성파괴 모드에서 연성파괴 모드로 전환되는 것으로 볼 수 있다. 탄소섬유의 인장파괴는 겹침수가 적을 경우 기둥폭만큼만 파괴였으나, 겹침수가 증가할수록 국부적인 파괴를 보였다.

Table 3.1 - Test results of columns reinforced with carbon fiber sheet

Test Specimen	Maximum Strength (ton)	Displacement(mm) at P _{MAX}	A/B*	Distributed Amount (ton)	
				Steel	Concrete
GA-PT	62	3.5	1	11.4	50.6
GA-CF1	76.46	6.15	1.75	11.4	65.06
GA-CF2	78.42	15.33	4.38	11.4	67.02
GA-CF3	98.07	19.15	5.47	11.4	86.67
GA-CF4	105.94	23.87	6.82	11.4	94.54

* A/B : displacement GA-CF/ GA-PT at maximum strength

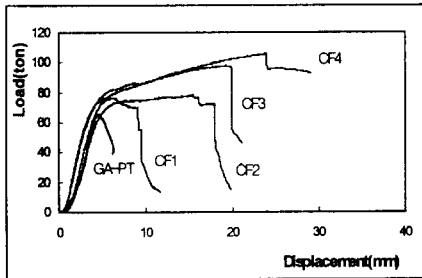


Fig. 3.1 - Load-displacement relationships of columns due to the effect of amounts of carbon fiber sheet

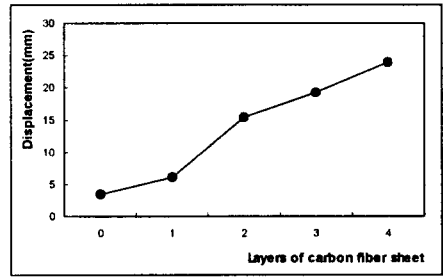


Fig. 3.2 - Displacement tendency of columns confined with carbon fiber sheet under maximum load

4. 실험결과와 분석 · 고찰

4.1 Sheikh & Uzumeri의 제안

Sheikh와 Uzumeri는 일반 띠철근기둥의 띠철근 배근내에서의 구속효과를 아래의 Fig. 4.1과 4.2와 같이 제안하였다.

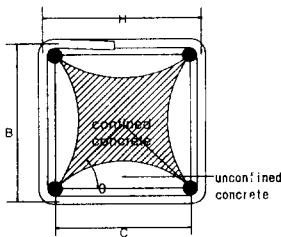


Fig. 4.1 - Approximate area of confined and unconfined concrete

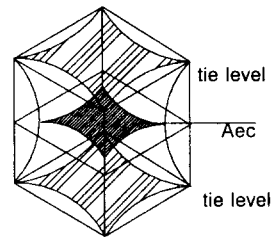


Fig. 4.2 - Confined concrete model of the critical section in tied columns

4.2. 일반기둥의 강도증가계수 K_s 의 결정

띠철근 배근내에서 띠철근의 구속효과에 의한 강도증가계수 K_s 는 코어콘크리트의 분담하중 $P_{oc}=0.85$

$f_c(A_{cv} - A_{st})$ 과 띠철근의 구속효과에 의한 증가하중 부분 즉, $P_{add} = A_{ec}\beta(\rho_{yh} f_{yh})^\gamma$ 의 관계로 표현되며 다음과 같다.

$$K_s = \frac{P_{occ} + P_{add}}{P_{occ}} = 1 + \frac{A_{ec}}{P_{occ}} \beta (\rho_{yh} f_{yh})^\gamma$$

$$= 1 + \frac{\lambda}{P_{occ}} (B - 0.5 \tan \theta)(H - 0.5 \tan \theta) \beta (\rho_{yh} f_{yh})^\gamma$$

만약 B=H인 정사각형 기둥인 경우, 위의 식은 다음과 같이 표현된다.

$$K_s = 1 + \frac{1}{P_{occ}} \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{C_i^2}{\alpha A_{co}} \tan \theta\right) (B - 0.5 \tan \theta)(H - 0.5 \tan \theta) \beta (\rho_{yh} f_{yh})^\gamma$$

$$= 1 + \frac{1}{P_{occ}} \left(1 - \sum_{i=1}^n \frac{C_i^2}{\alpha B^2} \tan \theta\right) (B - 0.5 \tan \theta)^2 \beta (\rho_{yh} f_{yh})^\gamma$$

4.3 횡보강 콘크리트기둥으로의 확대·적용

Sheikh와 Uzumeri의 제안식을 탄소섬유시트와 같이 횡구속보강재를 사용하여 전면보강한 철근콘크리트 기둥에 대해 확대·적용하기 위하여 구속효과에 영향을 미치는 일부사항을 가정하였다.

4.3.1 확대·적용시의 가정사항

1. 주철근의 배근형태에 의한 횡구속효과와 모재띠철근의 체적비와 항복강도에 의한 횡구속효과는 무시한다.
2. 임계단면적은 보강기둥의 전체길이에 대해 동일하며, 내부각 θ 는 0° 로 한다. (Fig. 4.3b)
3. 외부보강재에 의한 유효구속단면적의 내부각은 띠철근 배근단면에서의 유효단면적을 결정하는 내부각 $\theta (= 45^\circ)$ 와 같다.(Fig. 4.3a)
4. 횡구속에 의한 강도증가계수를 결정하는 실험상수로 $\alpha=5.5$, $\gamma=0.5$ 를 적용하고, β 는 단위환산값 (10.295: kg, cm단위)을 적용하고, 내부지지거리(C)와 외부보강재의 중심간 거리(B)는 같다. (B=C)

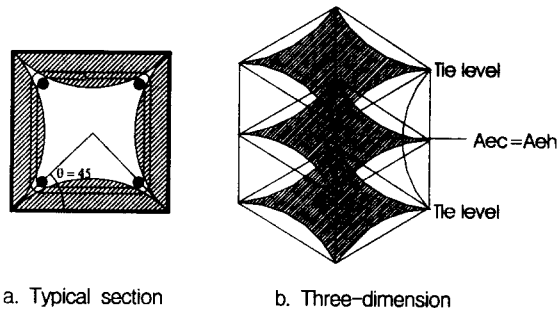


Fig. 4.3 - Proposed model for confined concrete columns

4.3.2 보강기둥의 강도추정

가정사항을 적용한 보강기둥의 강도증가계수는 정사각형 단면(B=H)을 가진 철근콘크리트에서는 다음과 같이 간략하게 표현된다.

$$K_r = 1 + \frac{2.8}{0.85f'_c(B^2 - A_{st})} \sqrt{\rho_r f_r}$$

여기서 f'_c 는 콘크리트의 압축강도(kg/cm²), B 는 철근콘크리트 기둥의 한변 길이(cm), A_{st} 는 주철근의 전 단면적(cm²), ρ_r 는 횡보강재료의 보강체적비(A_r/A_g) 그리고 f_r 는 횡보강재료의 항복강도(kg/cm²)를 나타낸다.

따라서 탄소섬유시트로 횡보강된 철근콘크리트 기둥의 최대강도는 식 $P_u = 0.85f'_c K_r (A_g - A_{st}) + A_{st}f_y$ 에 대입하여 추정할 수 있다.

4.4. 실험값과 제안값의 비교

탄소섬유시트를 이용하여 횡보강한 철근콘크리트 보강기둥의 실험값과 가정사항을 적용한 제안값을 비교하였다.

Table 4.1 - Test results compared with proposed model

Test Specimen	Reinforcing Volume Ratio	Maximum(P _{max})			Strength Gain Factor(K _r)		
		Test	Proposed	Test/Proposed	Test	Proposed	Test/Proposed
GA-CF1	0.0028	76.46	94.75	0.80	1.08	1.38	0.78
GA-CF2	0.0056	78.42	104.42	-	-	1.54	-
GA-CF3	0.0084	98.07	111.67	0.88	1.43	1.66	0.86
GA-CF4	0.0112	105.94	117.71	0.90	1.56	1.76	0.89

1겹 보강시에는 실험값/제안값이 0.8로 제안값이 크게 나타나지만, 탄소섬유의 겹침수를 증가할수록 차이가 줄어드는 것으로 나타났다. 이는 보강체적비가 적을수록 모서리에서의 응력집중현상이 조기화되어 보강재료가 지닌 항복강도를 충분히 발휘하기 전에 파괴에 이르나, 보강체적비를 증가시키면 응력집중의 조기화현상이 완화되는 것으로 볼 수 있다. 따라서 보강설계시에 기둥모서리의 응력집중현상을 고려하여 탄소섬유의 항복강도를 낮게 설정하거나, 모서리 반지름에 따른 탄소섬유의 굴곡강도에 대한 추가적인 연구를 통해 실제거동에 가까운 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

탄소섬유시트로 횡보강한 철근콘크리트 기둥의 실험결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 탄소섬유시트로 횡보강된 철근콘크리트 기둥의 강도와 연성은 상당한 증가를 가져왔으며, 특히

Sheikh & Uzumeri의 띠철근에 대한 횡구속 제안식을 확대·적용하여 최대강도를 예측할 수 있다.

(2) 횡보강을 하더라도 탄소섬유시트의 파괴는 띠철근의 구속효과가 상대적으로 작게 나타나는 임계단면(critical section), 즉 모재내부의 띠철근 배근간격 내에서 일어났다. 이것은 띠철근이 배근된 단면에서는 모재의 띠철근과 보강재료에 의한 이중구속효과가 나타나며 이로 인해 임계단면보다 높은 구속력을 갖기 때문인 것으로 생각된다.

(3) 탄소섬유시트는 기둥모서리에서 응력집중현상이 발생하기 때문에 충분한 횡구속력을 발휘하기 전에 조기파단되었을 가능성이 높으며, 이로 인해 제안값과 차이를 보인 것으로 판단된다.

(4) 보강체적비가 증가할수록 최대강도이후의 파괴모드는 취성파괴양상(brittle failure mode)에서 국부적인 연성파괴양상(ductile failure mode)로 유도되며, 섬유파단이후의 하중감소폭은 줄어드는 것으로 나타났다.

(5) 탄소섬유의 보강체적비가 증가할수록 응력집중에 의한 조기파괴현상이 완화됨으로써 가정사항을 적용한 제안값에 근접하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Murat Saatcioglu, Salim R. Razvi, "Strength and Ductility of Confined Concrete", ASCE Vol. 118, No.6, June, 1992
2. K.Sakai, "Intergated Design and Environmental Issues in Concrete Technology", proceedings of the international workshop 'Rational Design of Concrete Structures under Severe Conditions', 1995.
3. Shamim A. Sheikh, S. M. Uzumeri, "Analytical Model for Concrete Confinement in Tied Columns", ASCE Vol. 108, No. ST12, December, 1982.
4. 권영웅, "골재요소와 횡구속의 영향을 고려한 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구", 서울대 박사학위 논문, 1988.
5. 홍남표, "내력 및 내진성능 향상을 위한 철근콘크리트 기둥의 보강에 관한 연구", 서울대 박사학위 논문, 1997.
6. 대한건축학회, "콘크리트 구조물의 보수 보강", 기술보고서, 1997
7. 이리형, 윤승조, 김성수, 이용택, "중심축력을 받는 고강도 콘크리트 기둥에서의 띠철근의 구속효과에 관한 연구", 대한건축학회 논문집 11권 4호, 1995.
8. 천성철, 박형철, 안재현, 박철립, "탄소섬유로 횡구속된 콘크리트의 강도특성에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 가을학술발표회 논문집 18권 2호, 1998.