

CFRP Sheet 감싸기로 구속된 원형 콘크리트 기둥의 보강효과에 관한 연구

박상렬 · 김문관 · 고광민 · 홍성룡

제주대학교 해양과학부 토목환경공학전공

Strengthening Effect of Circular Concrete Column Wrapped with Carbon FRP Sheet

Sang-Yeol Park · Moon-Kwan Kim · Kwang-Min Koh and Seong-Yong Hong

Dept. of Civil & Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju-Do 690-756, Korea

This study presents the strengthening effect and the applicability of circular concrete column wrapped with carbon FRP sheet. The increase in axial compression capacity comes from the confinement effect of wrapped CFRP sheet. For the experimental research, four parameters including the number of sheet, the size of column specimen, the ratio of height and width, and the overlapping bond length of sheet were chosen to investigate the strengthening effect of each parameter. The resistance in compression capacity increased by 70% to 200% as the number of bonded CFRP sheet increased from one (1) sheet to three (3) sheets. The strengthening effect of the parameters, the height and the diameter of circular concrete column decreased as they increased. From this experimental study, it was suggested that the wrapping and bonding CFRP sheet around circular concrete column is a very useful and effective strengthening method.

key words : CFRP sheet, strengthening effect, wrapped effect

서 론

철근콘크리트(Reinforced Concrete, RC)는 철근과 콘크리트의 장점을 살리고 단점을 보완하여 우수한 내구성을 갖는 재료로서, 지금까지의 건축물에 광범위하게 적용되어져 왔다. 그러나 철근콘크리트 구조는 콘크리트의 중성화, 철근의 부식 및 하중조건의 변화와 각종 진동으로

인해 구조물의 내력성능이 저하되어 보강대책이 절실히 요구되었다.

내력성능이 저하된 구조물의 보강공법으로 1960년대부터 철근콘크리트 구조체와 강관을 에폭시 수지로 접착하는 강관압착공법, 추가 보혹은 기둥을 증설하는 공법, 기존 구조물 혹은 손상단면을 복구·확대하는 공법이 많이 사용되었다. 그러나 이러한 보강공법은 구조물의 중량

이 증대되고, 넓은 작업공간이 요구되며, 이용공간이 제한되어지는 단점이 있다. 또한 가장 많이 사용되어지는 강판압착공법의 경우, 운반 및 작업시 재료의 중량에 의한 어려움이 있다. 특히 피해가 발생한 구조체에 강판 압착할 경우 충분히 접착되었는지 확인이 불가능하며, 오히려 무거운 강판이 모체에 매달려 있는 상태가 되어 구조적으로 불안정 상태를 가져오는 경우도 있다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위한 방법으로 1980년대에 들어와서 미국, 일본 등과 같은 지진의 영향권에 있는 나라에서는 재료가 경량적이고 비부식이며, 보강 공사기간이 짧고, 보강혼합이 거의 없는 복합섬유와 수지를 이용한 구조물의 보강방법이 제시되었다. 최근 우리나라에서도 탄소섬유강화(Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheet)를 이용한 보강 효과에 관한 실험연구가 활발하게 진행되고 있으나 대부분 휨을 받는 보 부재에 편중되어 있는 실정이며, 압축을 받는 기둥의 보강효과에 대한 연구가 보다 적극적으로 이루어져야 한다.

Fiber Reinforced Polymer 특성

Fiber Reinforced Polymer(FRP)는 일반적으로 강성이 큰 섬유로 보강된 고분자 중합체(Polimer Matrix)로 정의된다. FRP는 Glass, Aramid, Carbon 등과 같은 높은 일축 인장강도를 가지는 섬유(Fiber)들과 이들이 일체가 되어 거동하도록 하는 폴리머를 기지(Matrix)재료로 하여 구성된다. 일반적으로 FRP의 장점으로는 우수한 비부식성, 매우 높은 인장강도, 비자성체이며 비전도체, 경량성 등을 대표적으로 꼽을 수 있다. 반면 단점으로는 철근과 달리 소성거동을 하지 않고, 높은 인장강도에 비해 낮은 전단강도를 지님을 예로 들 수 있다. 또한 높은

인장응력하에서의 응력파손, 강도저하와 같은 현상이 생기며, 기존 철근에 비해 고가이므로 시공비가 상승하게 되는 점도 이에 속한다.

탄소섬유(Carbon Fiber)는 PAN (Polyacrylonitrile) 또는 석유정제 부산물인 Pitch를 약 1000~2500 ℃의 고온에서 탄화시킨 고순도 탄소결정의 섬유를 지칭하며 섬유를 구성하는 탄소원자의 결정구조 때문에 매우 강한 강도를 가지게 된다. 탄소체의 대표적인 탄소섬유는 고강도, 고탄성, 소재로써 경량이면서도 고강도의 구조재, 특히 가공성이 높은 첨단 복합재료의 강화재로서, 항공기의 구조재, 우주 구조물 제조의 핵심소재로 이용되고 있고, 건설재료로의 활용에도 주목받고 있다. 탄소섬유는 FRP의 일반적인 특성 외에도 낮은 열전도율을 나타내고, 내약품성이 뛰어나 매우 안정된 재료로 평가받고 있다.

실험 개요

실험 계획

본 연구에서 선택된 실험변수는 CFRP Sheet로 보강된 원형기둥의 보강 효과에 영향을 미칠 수 있는 것들로 CFRP Sheet의 보강정도, 기둥의 크기, 형상비, CFRP Sheet의 겹이음 길이 등을 선택하였다. 시험체는 통계적 분석을 위하여 변수별로 3개씩 선정하여 총 33개의 시험체를 제작하였다.

D=75~125

H=150~300

Fig. 1. Dimensions of specimen

Fig. 1은 시험체의 형상 및 치수를 나타냈고, Table 1은 본 연구에 사용된 실험변수를 나타냈다.

Table 1. Summary of test parameters

실험 변수	시험체 명	FRP 쉬트 접수	기둥의 크기 (mm)	형상비(H/D), 접이음길이(OL) (mm)	
무보강 시험체	T0	-	D=100 H=200	H/D=2.0	
보강 정도	T1	1겹	D=100 H=200	H/D=2.0 (OL=30)	
	T2	2겹			
	T3	3겹			
기둥의 크기	T4	1겹	D=75 H=150	H/D=2.0 (OL=30)	
	T1		D=100 H=200		
	T5				D=125 H=250
형상비 (H/D)	T4	1겹	D=75 H=150	H/D=2.0 (OL=30)	
	T6		D=75 H=225	H/D=3.0 (OL=30)	
	T7		D=75 H=300	H/D=4.0 (OL=30)	
접이음 길이	T8	1겹	D=100 H=200	H/D=2.0 (OL=0)	
	T9			H/D=2.0 (OL=15)	
	T1			H/D=2.0 (OL=30)	
	T10			H/D=2.0 (OL=45)	

사용 재료

• 콘크리트

시험체 제작에 사용된 콘크리트는 재령 28일 설계강도가 24MPa인 레미콘 제품을 사용하였다. 본 실험에서 사용한 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용했으며, 굵은 골재 최대치수는 25mm이하인 쇄석을 사용하였다.

• 탄소섬유시트(CFRP Sheet)

탄소섬유시트는 접착종이 위에 섬유를 일방향으로 배열시켜 만든 일본 Tonen사의 제품 Forca Tow Sheet를 사용하였다. Table 2는 제조사에서 제공된 탄소섬유시트의 물성치를 나타냈다.

Table 2. Mechanical properties of CFRP sheet

재료명	인장강도	탄성계수	극한변형률 (%)
Forca Tow Sheet	3094.4 MPa	3.555×10 ⁵ MPa	0.87

• 에폭시(Epoxy)

본 실험에서는 Sika사에서 개발한 고탄성, 고강도의 구조물 접착제인 Sikadur-31을 사용하였다. Sikadur-31의 특징으로는 모체가 건조하거나 습한 것에 상관없이 시공이 가능하고, 콘크리트, 나무, 철근 등 건설재료에 대해 접착력이 매우 우수하다는 점이 있다. 뿐만 아니라 고강도, 고탄성, 내마모성, 내충격성이 우수하고 초기 강도 발현이 우수한 점도 이에 속한다. Sikadur-31은 주재(A제)와 경화제(B제)로 나누어져 있고, A제와 B제를 부피비 2:1의 비율로 섞어서 사용하였다. Table 3은 Epoxy의 물리적 특성을 나타냈다.

Table 3. Properties of epoxy

재료명	인장강도 (재령14일)	접착강도 (재령14일)	탄성계수 (재령7일)
Sikadur-31	25 MPa	16.8 MPa	2689.7 MPa

실험 과정

본 연구에서는 M&T사에서 제작된 자동압축강도 시험기(MT-150AC)를 사용하였다. 실험시 시험체의 가로변형과 세로변형을 확인하기 위하여 Fig. 2에서 보는 것과 같이 시험체의 가로와 세로 방향으로 변형 게이지를 부착하였고, 하중

을 정확히 측정하기 위하여 시험체 밑으로 Loadcell을 추가 설치하였다. 시험체가 일점하중을 받는 것을 방지하기 위하여 Capping을 하고 다시 위에 고무판을 대어서 하중이 균등하게 시험체에 전달될 수 있게 하였다.

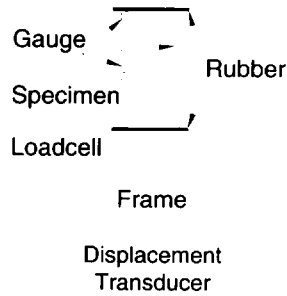


Fig. 2 Test Setup

실험 결과 및 분석

원형기둥 시험체의 압축강도 실험을 통하여 파괴양상, 최대내력, 시험체의 하중-변위 및 응력-변형률 곡선 등을 분석하고 탄소섬유쉬트의 보강효과를 분석하였다.

Table 4는 실험 결과를 요약한 표로서 각 변수별 최대하중, 최대 변형량, 파괴 형태 등을 나타내고 있다.

보강정도에 따른 영향

본 실험의 첫 번째 변수는 CFRP Sheet의 보강량에 따른 보강효과를 파악하는 것이다. D=100 mm, H=200 mm의 표준 시험체에 CFRP Sheet의 겹수를 1겹, 2겹, 3겹 보강하여 이들을 비교하였다. 이들의 비교 분석을 위하여 T0~T3 시험체를 비교 분석하였다.

Table 4. Summary of test results (averages of 3 specimens)

시험 변수	시험체 명	사용 변수	평균 최대하중 ($\times 10$ kN)	평균 최대변형 (mm)	비고
무보강	T0	-	26.668	1.519	-
보강 정도	T1	1겹	58.142	5.178	H/D =2.0
	T2	2겹	75.705	4.818	
	T3	3겹	103.457	9.294	
기둥의 크기	T4	75/150	44.915	3.511	H/D =2.0
	T1	100/200	58.142	5.178	
	T5	125/250	57.733	2.681	
형상비 (H/D)	T4	75/150	44.915	3.511	-
	T6	75/225	35.408	3.179	
	T7	75/300	28.698	2.282	
겹이음 길이	T8	0cm	31.769	2.512	H/D =2.0
	T9	1.5cm	53.244	5.614	
	T1	3.0cm	58.142	5.178	
	T10	4.5cm	53.315	5.546	

Fig. 4는 시험체의 파괴시 모습을 보여주고 있는 사진이다. CFRP Sheet로 보강된 모든 시험체에서 파괴는 겹 이음을 한 곳에서 일어났으며, 가운데의 변형이 먼저 일어나면서 파괴되었다. 파괴 시 CFRP Sheet은 섬유 방향인 가로 방향으로 분리되는 파괴가 일어났다. 기준시험체는 사진에서 보이는 것과 같이 압축에 의한 가로 방향의 인장 응력에 의하여 세로 균열이 발생하고 이에 따른 압축파괴가 일어났다.

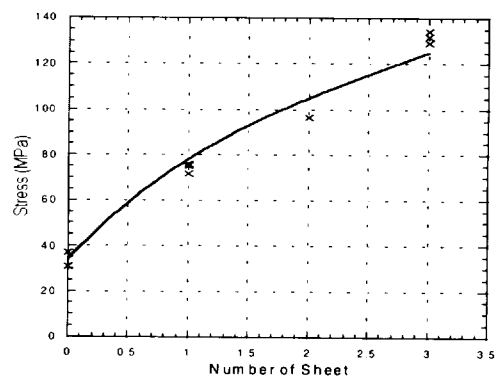


Fig. 3. Relationship of stress and number of FRP sheet

Fig. 3은 CFRP Sheet의 보강량에 따른 최대 압축응력을 그래프로 나타낸 것으로 보강량이 증가함에 따라 보강효과가 증가함을 알 수 있다. 여기서 보강효과는 기준 시험체와 비교한 값들이다.

또한 보강 겹 수가 많을수록 최고 하중이 높아지고 파괴 전까지 처짐도 점점 커지는 것을 알 수 있었다.

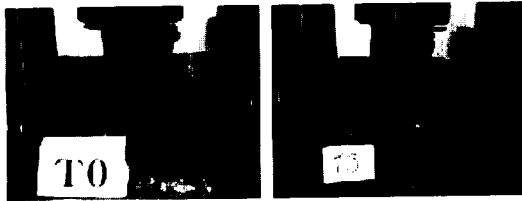


Fig. 4. Failure Mode

기둥의 크기에 따른 영향

실험 연구의 두 번째 변수인 기둥 크기에 대한 보강효과를 분석하였다. 기둥크기에 따른 효과를 검토하기 위해서 시험체의 형상비(높이/지름)은 2.0으로 일정하게 정하여 크기에 따른 구속효과를 분석하였다. 이 변수의 분석을 위하여 T4, T1, T5 시험체를 사용하였다.

Fig. 5는 CFRP Sheet로 보강된 기둥의 크기에 따른 최대 압축응력을 그래프로 나타낸 것으로 기둥 크기가 커질수록 보강효과가 감소됨을 알 수 있고 시험체는 연성구간 없이 바로 취성 파괴를 보여주었다.

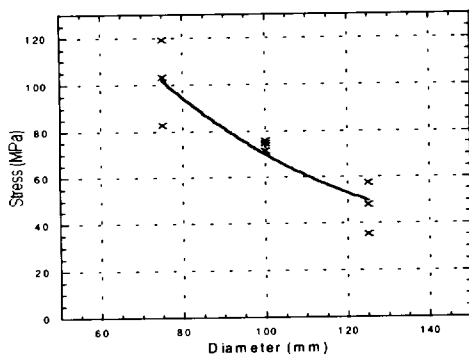


Fig. 5. Relationship of stress and column diameter

Fig. 6은 시험체의 실험 모습과 파괴 시 모습을 보여주고 있는 사진이다. 파괴는 주로 겹 이음 위치에서 일어났으며, CFRP Sheet의 가로 방향으로 파괴가 일어났다.



Fig. 6. Failure Mode

형상비의 영향

실험의 세 번째 변수는 시험체의 형상비(H/D)에 대한 영향이다. 이 실험을 위하여 T4, T6, T7 시험체를 비교 분석하였다.

Fig. 8은 시험체의 형상비에 따른 CFRP Sheet의 보강 효과를 알아보기 위한 곡선이다. 이 그래프에서 형상비가 클수록 기둥이 받는 압축응력은 낮아짐을 보게 되는데 이는 세장비의 영향으로 응력이 감소됨을 알 수 있다.

그리고 하중을 기준으로 변형량을 비교해 보면 형상비가 커짐에 따라 크게 나타났고, 변형량을 기준으로 하중을 비교하면 형상비가 작아짐에 따라 크게 나타났다. 즉, 형상비에 따른 실험 결과는 세장비와 임계응력간의 관계를 그대로 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.

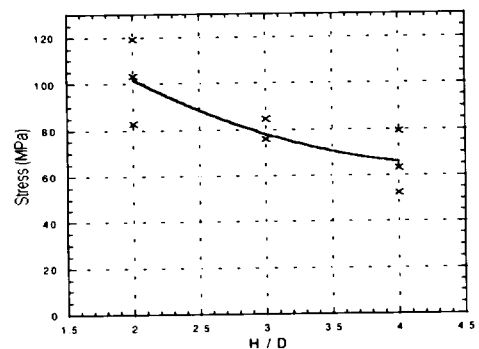


Fig. 7. Relationship stress and H/D ratio



Fig. 8. Failure Mode

접이음 길이의 영향

실험의 네 번째 변수는 시험체의 CFRP Sheet의 접이음 길이를 변화시켜서 접이음 길이가 시험체에 어떤 영향을 주는지 비교하였다. 이번 실험을 위해서 T8 ~ T10, T1 시험체를 비교하였다. 이 실험은 CFRP Sheet의 접이음을 0 mm, 15 mm, 30 mm, 45 mm으로 시험체마다 15 mm의 간격을 두어서 실험하였다.

Fig. 9는 CFRP Sheet의 접이음 길이가 보강 효과에 미치는 영향을 나타내는 그래프이다. 이 그래프에서 보았을 때 0 mm와 15 mm 사이에는 보강효과가 60% 정도 향상되나 15 mm 이상에서는 그 효과가 거의 증가하지 않음을 보게 된다. 즉, 접이음 길이가 일정량 이상이면 그 후에는 접이음 길이가 기둥의 보강효과에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

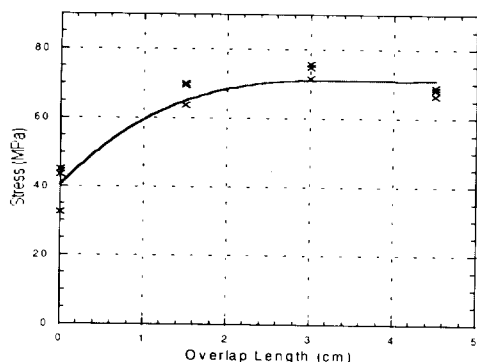


Fig. 9. Relationship of stress and overlap length

Fig. 10은 시험체의 파괴된 형상을 나타내고 있다. T8을 제외한 모든 시험체가 CFRP Sheet의 부착부분에서 파괴가 일어났으며, CFRP

Sheet의 가로 방향으로 파괴가 일어났다. T8의 경우 접이음 길이가 없으므로 접이음 부분에서 구속력을 견디지 못하여 세로 방향으로 파괴가 일어나는 것을 볼 수 있다.

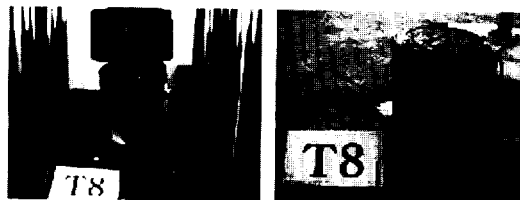


Fig. 10. Failure Mode

결론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) CFRP Sheet로 구속된 원형 기둥의 압축 성능은 Sheet의 구속효과에 의해 약 70%(1겹)~200%(3겹) 범위로 개선되어 콘크리트 원형 기둥의 보강 공법으로서 적용성 확인했다.
- (2) CFRP Sheet의 보강량이 많을수록 구속효과가 증대되어 보강효과 증가됨을 확인했다.
- (3) CFRP Sheet로 감싼 원형 기둥 시험체에서 크기가 클수록 구속효과가 감소되어 보강효과도 감소되나 그 감소 정도는 작아졌다.
- (4) CFRP Sheet로 보강된 원형 기둥에서 기둥의 크기에 비해 높이가 커지는 경우 보강효과가 감소되나 그 정도는 줄어들었다.
- (5) CFRP Sheet의 접이음 길이가 증가됨에 따라 보강효과가 증가되나 일정 정도(지름의 15%) 이상의 접이음 길이의 경우 보강 효과에 대한 영향은 거의 없었다.
- (6) CFRP Sheet 감싸기로 구속된 원형 콘크리트 기둥의 파괴 형태는 갑작스런 취성 파괴를 나타냈다.

참 고 문 헌

- 건설교통부 제정, 1996, "콘크리트 표준시방서"
- 신성우 등. 1998, "탄소섬유시트 보강공법에 사용되는 Epoxy 수지의 특성 및 국내외 동향", 구조물진단학회지, 제 2권, pp.24~36.
- 신영수, 홍기섭, 홍영균, 최완철. 1995. 10, "탄소섬유시트로 횡 보강된 콘크리트의 강도특성", 대한건축학회 논문집, 제 11권 10호(통권 84호), pp.323~328.
- 이한승. 1998.11, "탄소섬유시트의 재료 역학적 특성에 관한 연구"
- 장정수, 조성찬, 주수석. 2001, "탄소섬유시트로 보강된 철근 콘크리트 기둥의 강도 특성에 관한 연구", 한국 구조물 진단학회 논문집, 제 17권 9호, pp 57~63.
1996. 05, "철근, 강관 및 CFRP를 적용한 RC보의 보강효과 비교·연구" 한국콘크리트학회 논문집 제 8권 1호.
- Antoine Naaman, Sang Yeol Park, Maria del Mar Lopez, Paul Stankiewicz. 1997. 08. 21, "Glued-on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Sheets for Repair and Rehabilitation", Report No. UMCEE 9-12.
- Lam, L. and Teng, J. G. (2001a) "Strength models for FRP-confined concrete", Journal of Structural Engineering, ASCE, submitted.
- Xiao, Y. and Wu, H.(2000) " Compressive behavior of concrete confined by carbon fiber composite jackets", Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 12, No. 2, pp. 139~149