

탄소섬유시트를 이용하여 보강된 철근콘크리트 기둥의
구조성능에 관한 실험연구

An Experimental Study of Reinforced Concrete Columns
Strengthened by Carbon Fiber Sheet

박정우* 이경훈** 홍원기*** 김희철****
Park, Jung-Woo Lee, Kyoung-Hun Hong, Won-Ke Kim, Hee-Cheul

ABSTRACT

Every structure has the expected life span of its own and it has to be rebuilt. New buildings were preferred and put value a quantitative spread of apartment houses because of the rapid growth of national economy. Therefore, the apartment houses were not taken into consideration about maintenances.

Carbon fiber sheet is widely used to strengthen old structural members but it is very rarely applied to a construction field for apartment houses.

The purpose of this study is to develop effective strengthening methods for reinforced concrete columns using carbon fiber sheets. Eight reinforced concrete column specimens confined by carbon fiber sheet of uniaxial direction were tested using 10,000kN universal testing machine (UTM).

1. 서론

건물의 리모델링에 필수적인 공정인 구조부재의 보수 및 보강에 대한 연구는 철판을 비롯한 다양한 재료의 개발을 통하여 진행되어왔다. 탄소섬유시트는 여러 보강 재료들 중에서 성능이 우수하고 시공이 용이하여 미국과 캐나다를 비롯한 유럽의 여러 국가에서는 탄소섬유시트를 이용한 보강 기법들에 관한 연구가 활발히 진행 중이며, 실제 구조물에도 사용되고 있다. 또한 탄소섬유시트를 이용한 wrapping 보강 공법은 재건축에 비하여 공사기간이 매우 짧고 소요되는 인력 및 비용이

* 경희대학교 건축공학과, 박사과정
** 경희대학교 건축공학과, 공학박사
*** 경희대학교 건축공학과, 조교수
**** 경희대학교 건축공학과, 교수

절감되어 많은 경제적인 장점을 얻을 수 있으며, 건축폐자재의 발생을 억제시킴으로써 환경오염을 줄일 수 있다. 탄소섬유시트를 이용하여 구조부재를 보강하는 가장 효과적인 방법은 기둥에 구속력을 가하여 압축강도를 증가시키는 방법이다. 따라서 본 연구에서는 탄소섬유시트의 인장실험을 통하여 재료의 물성치를 파악 후, 다양한 변수를 주어 기둥 시험체를 제작하고 축 하중을 가력하여 탄소섬유시트로 보강된 기둥의 구조적인 성능을 평가하였다.

2. 탄소섬유시트로 보강된 시험체의 개요 및 실험방법

2.1 시험체 개요

시험체는 단면의 형상, 배치 각도, 겹침 폭 그리고 anchorage의 유/무에 따라 모두 8개의 시험체를 제작하였으며, 그 개요는 표 1과 같다. 시험체 명에서 W는 wrapping을 뜻하며, C와 S는 각각 원형(Circular)과 각형(Square)을, A는 축 하중(Axial force)을, 숫자 2와 6은 시트의 겹침 폭을, W(With anchorage)는 시트의 부착성능의 향상을 위한 anchorage가 있는 시험체를 나타낸다. 모든 시험체의 시트의 wrapping 각도는 60°로 일정하게 하였으며, 높이는 600mm이다. 또한 원형 시험체의 단면지름은 300mm, 각형 시험체의 단면은 250mm × 250mm 이다. 그림 1은 시험체의 wrapping 각도, 겹침 폭 및 부착성능향상을 위한 anchorage의 위치를 나타낸 그림이다.

표 1. 축 하중 성능 시험체의 개요

시험체	형상	각도	겹침폭	Anchorage
				유/무
WCA-2	원형	60°	2cm	무
WCA-2W				유
WCA-6			무	
WCA-6W			유	
WSA-2	각형		2cm	무
WSA-2W				유
WSA-6			무	
WSA-6W			유	

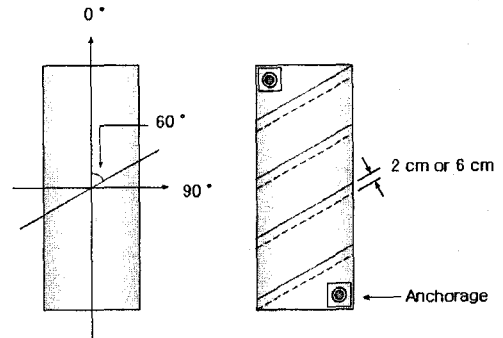


그림 1. wrapping 각도, 겹침 폭 및 anchorage의 위치

2.2 실험 방법

하중의 재하는 정적용량 10,000kN 만능시험기(UTM)를 이용하였다. Load cell에 연결된 data logger의 하중 및 변위 속도계를 기준으로 항복 하중 이전의 가력은 변위제어로 초당 0.05mm로 하중재하 하였으며 항복하중 이후에는 시험체 변위 증가율을 고려하여 초당 0.03mm로 하중재하 하였다. 시험체의 축 방향과 횡 방향의 변형률을 측정하기 위하여 외부의 둘레 방향으로 90° 간격으로

8개의 2축 스트레인 게이지를 부착하여 축 방향과 횡 방향의 변형률을 측정하였다. 또한 전체 길이에 대한 평균 축소량을 측정하기 위하여 그림 2와 같이 시험체 주변에 LVDT를 배치하였다.

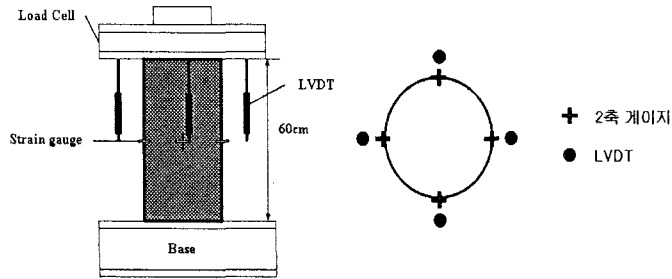


그림 2. LVDT의 배치와 gauge 계획

3. 탄소섬유시트로 보강된 기둥의 축 하중 실험 결과

3.1 탄소섬유시트로 보강된 기둥 시험체의 최대 하중

아래의 그림 3은 모든 시험체에 대한 최대하중을 나타낸다. 무 보강 시험체에 비하여 탄소섬유시트로 보강하였을 때 내력의 향상이 현저함을 알 수 있었다. 표 2의 실험결과를 살펴보면, 원형 기둥 중 WCA-2W 시험체의 최대하중이 165.01ton으로 나타났으며, 각형기둥 중 WSA-6 시험체의 최대하중이 90.03ton으로 나타났다. 또한 무보강 시험체에 비하여 WCA-2W 시험체는 2.41 배, WSA-6 시험체는 2.15배의 압축강도가 향상됨을 알 수 있었다.

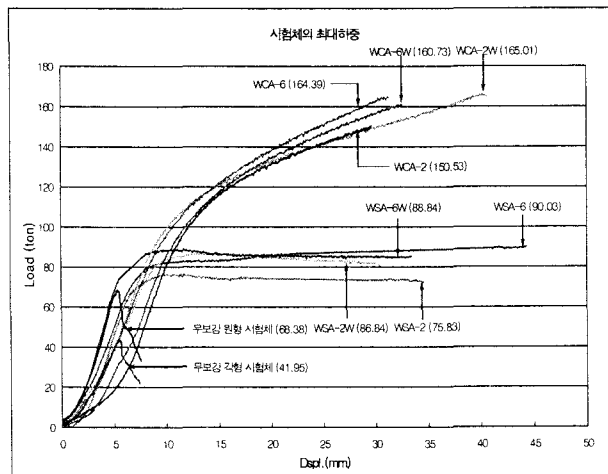


그림 3. 모든 시험체의 최대 하중

표 2. 탄소섬유시트로 보강된 시험체의 최대하중

	시공두께 (0.4~0.6mm/장)	설계두께 (0.167mm/장)	최대하중 (ton)		
			시험체(A)	CON(B)	A/B
WCA-2	0.8~1.2	0.334	150.53	68.38	2.20
WCA-2W	0.8~1.2	0.334	165.01	68.38	2.41
WCA-6	0.8~1.2	0.334	164.39	68.38	2.40
WCA-6W	0.8~1.2	0.334	160.73	68.38	2.35
WSA-2	0.8~1.2	0.334	75.83	41.95	1.81
WSA-2W	0.8~1.2	0.334	86.84	41.95	2.07
WSA-6	0.8~1.2	0.334	90.03	41.95	2.15
WSA-6W	0.8~1.2	0.334	88.84	41.95	2.12

3.2 탄소섬유시트로 보강된 기둥 시험체의 응력-변형률 관계

탄소섬유시트로 보강된 기둥 시험체의 구속력은 수평 팽창에 대한 급속한 증가를 억제하며, 압축 응력과 변형률을 크게 증가시킨다. 탄소섬유시트로 보강된 원형 시험체는 각형 시험체보다 횡 구속효과가 좋으며 압축강도의 차이는 그림 4의 응력과 변형률의 관계로 알 수 있다.

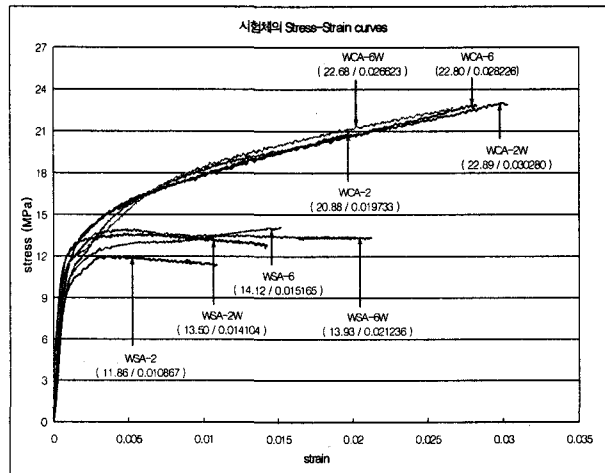


그림 4. 모든 시험체의 응력-변형률 관계 비교

3.2.1 탄소섬유시트로 보강된 원형 기둥 시험체의 응력-변형률 관계

본 연구에 사용된 콘크리트의 150×300mm 공시체의 압축강도는 21MPa이지만, 탄소섬유시트로 구속된 조건과 동일한 조건하에서 양생된 300×600mm 크기의 무보강 콘크리트 기둥 시험체의 압축강도는 공시체 강도보다 낮은 9.48MPa로 측정되었다. 이는 구속에 따른 수분증가 억제현상에서 나타난 강도의 저하로 평가되며, 시험체의 압축강도와 비교된 값을 표 4에 정리하였다.

표 4. 탄소섬유시트로 보강된 원형 시험체의 응력 및 변형률

	시공두께 (mm)	f_{co} (MPa)	f_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f_{cc}/f_{co}	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{0.002}$
WCA-2	0.8	9.48	20.88	0.0197	2.20	9.87
WCA-2W	0.8	9.48	22.89	0.0302	2.41	15.14
WCA-6	0.8	9.48	22.80	0.0282	2.41	14.11
WCA-6W	0.8	9.48	22.68	0.0266	2.39	13.31

표 4를 살펴보면 WCA-2W의 변형률이 0.03으로 측정되어 콘크리트의 극한 변형률인 0.003보다 10배정도 변형 능력이 향상되었음을 알 수 있다. 무보강 시험체에 비하여 압축강도가 2.20~2.41배 정도 향상되었으며, 압축강도의 증가양상은 시험체를 구속하는 탄소섬유시트의 겹침 폭이 길어질수록 증가하는 경향을 보이고 있었다.

3.2.2 탄소섬유시트로 보강된 각형 기둥 시험체의 응력-변형률 관계

표 5를 살펴보면 단면이 각형인 시험체 중에서는 WSA-6 시험체가 약 2.07배의 증가로 가장 큰 압축강도 증가를 보였다. 또한 각형 시험체중에서 가장 연성의 증가율이 높은 시험체는 WSA-6W 시험체로서, 변형률이 약 0.0212로 측정되어 무보강 시험체보다 약 10.6배 연성이 증가되었음을 알 수 있었다.

표 5. 탄소섬유시트로 보강된 각형 시험체의 응력 및 변형률

	시공두께 (mm)	f_{co} (MPa)	f_{cc} (MPa)	ϵ_{cc}	f_{cc}/f_{co}	$\epsilon_{cc}/\epsilon_{0.002}$
WSA-2	0.8	6.81	11.86	0.0109	1.74	5.43
WSA-2W	0.8	6.81	13.50	0.0141	1.98	7.05
WSA-6	0.8	6.81	14.12	0.0152	2.07	7.58
WSA-6W	0.8	6.81	13.93	0.0212	2.05	10.62

위의 내용을 정리하면 강도 및 연성의 증가가 가장 두드러진 시험체는 단면이 원형인 경우의 시험체 중 겹침 폭이 2cm이며 anchorage의 보강이 있는 WCA-2W 시험체에서 나타났다. 단면이 각형인 경우의 시험체 중 겹침 폭이 6cm이며 anchorage의 보강이 없는 WSA-6 시험체에서 압축강도가 가장 많이 증가하였으며, 겹침 폭이 6cm이며 anchorage의 보강이 있는 WSA-6W 시험체에서 변형률이 가장 많이 증가한 것을 알 수 있었다. 따라서 카본시트의 겹침 폭에 따른 강도의 변화는 미약하나, anchorage의 보강 여부는 압축강도 및 연성을 증가시키는 변수임을 본 실험결과 분석을 통하여 파악할 수 있었다.

4. 탄소섬유시트로 보강된 기둥의 축 하중 실험 분석

4.1 탄소섬유시트로 보강된 기둥 시험체의 팽창비

콘크리트의 횡 방향의 거동은 축 방향 거동과의 비율인 포아송 계수로 표현된다. 팽창비는 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$Dilation\ ratio\ (\eta) = \frac{transvers\ strain\ (\epsilon_r)}{axial\ concrete\ strain\ (\epsilon_c)} \quad (1)$$

팽창비는 강성이 증가할수록 감소한다. 탄소섬유시트로 시험체를 보강함으로써 발생하는 횡 구속력은 시험체의 팽창률을 감소시켜 효과적으로 팽창을 제어한다. 따라서 팽창비(dilation ratio)는 탄소섬유시트로 보강된 시험체의 횡구속이 효과적일 수록 감소한다.

4.1.1 탄소섬유시트로 보강된 원형 기둥 시험체의 팽창비 비교

WCA-2시험체에 비하여 WCA-6W시험체는 강성이 월등히 증가함을 그림 5의 원형 시험체의 팽창비를 비교한 그림에서 알 수 있다. 또한 WCA-2 시험체와 WCA-2W 시험체를 비교하여 볼 때 강성의 증가로 인한 팽창비의 감소로 부착성능의 향상을 위한 anchorage의 효과를 볼 수 있었으며, 겹침 폭에 따른 WCA-2 시험체와 WCA-6 시험체의 팽창비를 비교하여 볼 때, 겹침 폭이 길어질수록 강성의 증가와 동시에 횡 구속 효과도 향상됨을 알 수 있었다. 따라서 anchorage의 보강과 6cm의 겹침 폭의 WCA-6W 시험체가 가장 횡 구속 효과가 좋은 것을 알 수 있었다.

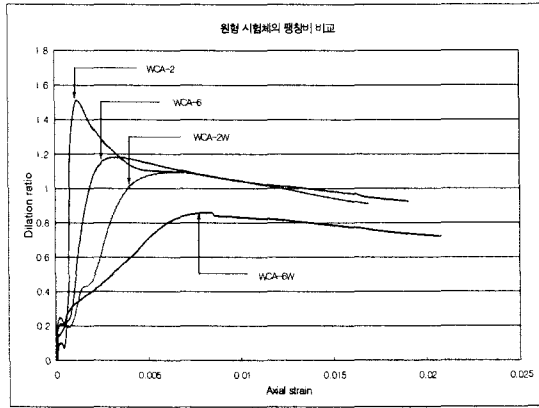


그림 5. 원형 시험체의 팽창비 비교

4.1.2 탄소섬유시트로 보강된 각형 기둥 시험체의 팽창비 비교

시험체가 탄성구간에서 거동하는 변형률이 0.001 일 때 비교하면, 겹침 폭이 6cm 이며 anchorage의 보강이 있는 WSA-6W 시험체의 팽창비가 작게 나타났고 최대강도는 anchorage 보강이 없는 WSA-6 시험체가 높게 나타났지만 탄성구간에서의 팽창효과는 WSA-6W 시험체에 서 더 좋게 나타났다. 하지만 그 차이는 그리 크지 않았다.

겹침 폭이 2cm 일때의 변형률이 0.001에서 비교하면, anchorage의 보강이 있는 WSA-2 시험체의 팽창비가 오히려 WSA-2W 시험체의 팽창비보다 더 작게 나타났지만 변형률이 커질수록 anchorage가 있는 WSA-2W 시험체의 팽창비가 WSA-2보다 더 작게 나타났다.

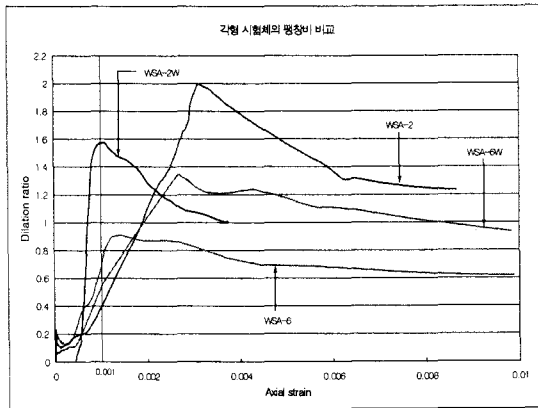


그림 5. 각형 시험체의 팽창비 비교

4.2 탄소섬유시트로 보강된 기둥 시험체의 파괴양상

그림 7과 그림 8은 원형 시험체의 파괴양상을 나타내는 사진이다. 대부분의 시험체의 균열은 보강된 시트의 배열방향인 60°를 따라 나타내었으며, WCA-2 시험체는 시트끼리의 결속력이 타 시험체에 비하여 다소 약하여 국부적인 균열이 곳곳에 나타난 것을 알 수 있었다. 또한 WCA-2W 시험체의 경우 파괴에 도달할 때까지 구속효과로 인하여 체적이 감소하다가 파괴시에는 시험체의 일부인 중앙부분에서 시트가 터지는 파괴양상을 나타내었다.



그림 7. WCA-2 시험체 파괴양상

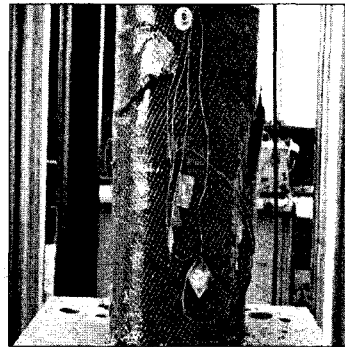


그림 8. WCA-2W 시험체 파괴양상

그림 9와 그림 10은 각형 시험체의 파괴양상을 나타내는 사진이다. WSA-2 시험체는 시트의 상부에서부터 카본시트가 찢어지는 파괴양상을 보였다. WSA-2W 시험체의 파괴양상은 WCA-2W 시험체와 비슷한 파괴양상을 보였는데 파괴에 이르기까지 보강된 시트의 구속효과로 인하여 체적이 감소하다가 중앙부분에서 시트가 터지는 파괴양상을 나타내었다. 이는 anchorage의 보강으로 상부와 하부의 파괴는 유도되지 않은 것으로 보인다.

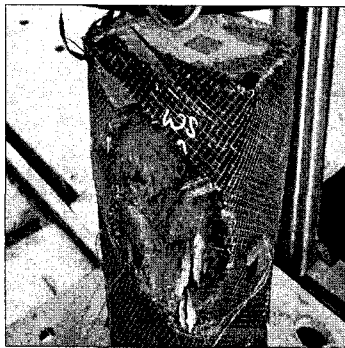


그림 9. WSA-2 시험체 파괴양상



그림 10. WSA-2W 시험체 파괴양상

6. 실험 결과 및 고찰

탄소섬유시트로 보강된 기둥 시험체의 축 하중 성능실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 탄소섬유로 보강된 기둥 시험체의 압축강도는 anchorage의 유/무, 시트의 겹침 폭에 따라 증가 양상이 다르게 나타났지만 그 차이는 그리 크지 않았다. 가장 큰 압축강도의 증가는 WCA-2W 시험체의 압축강도로써 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도인 9.48MPa 보다 약 2.4배 향상된 22.89MPa의 압축강도를 나타내었다.
- (2) 탄소섬유시트로 보강된 시험체의 팽창비는 WCA-2 시험체가 1.5로 가장 큰 값을 보였으며, WCA-6W 시험체인 경우 팽창비가 0.85로 가장 작은 값을 보였다. 따라서 팽창비 값이 가장 작은 WCA-6W 시험체가 효과적으로 횡 팽창을 제어함을 알 수 있었다.
- (3) 기둥 시험체의 압축강도와 변형률을 향상시키는 요인은 부착능력 향상을 위한 anchorage와 탄소섬유시트의 겹침 폭이며, 겹침 폭이 길어질수록 팽창율이 감소하여 구속 효과가 커지고 이에 따른 영향으로 압축강도가 향상되었음을 알 수 있었다.
- (4) 실험 결과를 살펴보면, 탄소섬유시트로 보강된 기둥의 압축강도, 연성도 및 팽창비가 향상되었음을 알 수 있었으며, 기둥보강의 적용 및 활용 방안을 위해서는 더 많은 개체 및 다양한 변수를 고려하여 실험이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Houssam A. Toutanji, Mohamed Saffi, "Durability studies on concrete columns encased in PVC-FRP composite tubes", Composite Structures, Vol. 55, 2001, pp. 27-35.
2. J. G. Teng, J. F. Chen, S. T. Smith(2002), and L. Lam, "FRP Strengthened RC Structures", Jhon Wiley & Sons, Ltd.
3. Won-Kee Hong, and Hee-Cheul Kim, "Behavior of concrete columns confined by carbon composite tube", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 31(2), 178-188, 2004.
4. 윤 석한, "축 하중 및 횡 하중에 의한 콘크리트 충전 탄소섬유튜브 기둥의 거동", 경희대학교 건축공학과 박사학위 논문, 2003.
5. 천 성철, 김 지영, 박 형철, 박 칠립, "탄소섬유로 횡 구속된 콘크리트의 응력-변형도 모델에 관한 연구", 대한건축학 회논문집 15권 1호, 1999.1, pp. 27-36.
6. 이 경훈, "카본시트튜브로 구속된 원형기둥의 성능평가를 위한 실험연구", 경희대학교 건축공학과 박사학위 논문, 2005.
7. 한 상훈, 홍 기남, "탄소섬유시트로 구속된 RC 기둥의 일축압축 거동", 한국 구조물진단학회 논문집, 제9권 2호, 2005, pp. 207-216