

# 강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트 보의 탄소섬유쉬트 보강에 관한 연구

## A Study on Carbon Fiber Sheet Rehabilitation of High Strength Reinforced Concrete Beams Mixed Steel Fibrous

곽 계 환<sup>\*</sup>                      곽 경 현<sup>\*\*</sup>                      정 태 영<sup>\*\*</sup>                      고 성 재<sup>\*\*\*</sup>  
Kwak, Kae Hwan              Kwak, Kyung Hern              Jeong, Tae Young              Go, Sung Jae

### ABSTRACT

In recent years, the research and development about the new material proceed rapidly and actively in the building industry. As building structures become bigger, higher and more specialized, so does the demand for material with higher strength. In the future, we will need to research repair and rehabilitation to make high strength concrete mixed steel fibrous building safe. The carbon fiber reinforced plastic bonding method is widely used in reinforcing the existing concrete structure among the various methods. The repair of initiate loaded reinforced high-strength concrete beams mixed steel fibrous with epoxy bonded Carbon Fiber Sheets(CFS) was investigated experimentally. The CFS thickness and length were varied to assess the peel failure at the curtailment of CFS. The behaviour of the repaired beams was represented by load-longitudinal steel strain relation and failure modes were discussed. The test results indicate that CFS is very effective for strengthening the demand beams and controlling deflections of reinforced high strength concrete beams mixed steel fibrous happen diagonal crack, the increase in the number of CFS layers over two layers didn't effect the increase in the strength of beams.

### 1. 서 론

우리나라의 건설산업은 70년대의 고도성장기 이래 구조물의 대형화와 함께 재개발사업과 신도시개발 등의 대규모 건설산업이 단기간에 양적으로 급속히 팽창되었다. 이에 따라 건자재 파동, 인력난 및 건설원가 부담에 따른 품질관리 부족 등 부실구조물이 양산될 잠재적 원인이 내재되어 왔다. 또한 경제성장과 더불어 교통량의 증가 및 공해발생 등의 영향으로 구조물의 성능저하, 손상속도가 가속화되어 구조물의 수명이 현저히 단축되는 현상이 도처에 발생됨으로서 이에 대한 안전진단과 체계적인 보

\* 정회원, 원광대 토목환경공학과 교수  
\*\* 정회원, 원광대 토목환경공학과 박사과정  
\*\*\* 정회원, 원광대 토목환경공학과 석사과정

수·보강의 필요성이 최근 들어 급속히 요청되고 있다. 따라서 본 연구에서는 강섬유 혼입 고강도 콘크리트에 대한 관심의 고조와 접목하여 탄소섬유쉬트 접착공법에 관한 실내시험을 실시하였다. 강섬유 혼입 고강도 콘크리트에 대한 탄소섬유쉬트 보수·보강실험은 다음과 같은 방법으로 진행하였다. 첫째, 시편을 만들어 탄소섬유로 보강한 후 일반적인 정적실험을 통해 개략적인 구조적 거동과 파괴양상을 파악한다. 둘째, 시편에 일정하중을 재하하여 균열진전을 미리준 후 탄소섬유로 보수하고 정적실험을 실시하여 결과를 비교, 검토한다. 셋째, 일정하중을 재하한 후 탄소섬유의 겹수를 증가시켜 탄소섬유 겹수에 따른 파괴거동 및 파괴양상을 파악하여 결과를 비교, 검토한다. 이러한 실험으로부터 강섬유 혼입 고강도 철근 콘크리트 탄소섬유쉬트 보강 보의 전단거동, 휨균열 및 사인장 균열이 발생하였을 때 탄소섬유쉬트의 보강효과와 탄소섬유쉬트 부착에 따른 역학적 거동을 파악하고 실제 구조물의 수명을 연장할 수 있는 유용한 방법을 연구하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

본 연구에서는 강섬유를 혼입한 고강도콘크리트 보의 거동특성을 파악하기 위하여 적절한 워커빌리티를 갖는 배합설계를 실시한 후 시편을 설계, 제작하였으며 기본물성실험과 탄소섬유쉬트의 부착겹수를 달리하여 정적실험을 실시하였다.

### 2.1 배합설계

본 연구에서는 강섬유를 혼입한 고강도 콘크리트의 제조를 위하여 수차례의 시험배합을 수행하여 최적배합을 얻었으며 이에 대한 배합설계의 결과는 표 1과 같다.

표 1 Concrete mix proportion

Max size (mm)	Slump (cm)	W/C+SF (%)	S/a (%)	Replacement proportion of SF (%)	Mix proportions (kg/m <sup>3</sup> )						
					W	C	SF	S	G	SP (%)	V <sub>f</sub> (%)
19	10±2	18	35	15	160	750	132.3	512	949	2.0	1.5
		22.5		10	150	600	66.0	581	1087	1.5	
		27		10	160	533	59.2	610	1133	1.0	

SF : Silica fume. SP : Superplasticizers. V<sub>f</sub> : Steel Fiber.

### 2.2 사용재료

고강도 콘크리트를 제조하기 위해서 본 실험에서 사용한 콘크리트는 국내 D사 제품인 보통 포틀랜드 시멘트였다. 잔골재는 충남 금강에서 채취된 강모래로써 비중은 2.62, 조립율은 2.75를 나타냈고, 굵은골재는 전북 익산시 낭산산으로 최대치수가 19mm인 쇄석을 사용하였다. 또한 혼화재로써 실리카 흙을 사용하였으며 사용한 제품은 노르웨이산 Elkem microsilica 초미분말 실리카 제품이다. 또한 적절한 워커빌리티를 얻기 위하여 암갈색의 액상으로 비중이 1.21, PH 8.0인 고성능 감수제(Power Con 100)를 사용하였다. 본 연구에 사용된 강섬유는 벨기에 H사의 제품으로서 박판절삭법으로 냉간 가공

한 길이 60mm, 직경 1.0mm 및 형상비 60의 고품질의 강섬유를 사용하였다. 탄소섬유쉬트는 일본에서 개발한 일방향성 탄소섬유의 일종인 중탄성 CF NAC-700을 사용하였으며 Sheet의 크기는 20×50cm, 인장강도는 460kgf/mm<sup>2</sup>, 파단시 신율 1.5%인 제품이다.

### 2.3 시편제작

콘크리트 혼합은 용량 100ℓ의 강제식 믹서를 사용하였으며 재료는 잔골재, 굵은골재, 및 시멘트, 실리카 흙 순으로 투입하고 진비빔을 실시한 후 고성능 감수제를 첨가한 혼합수를 천천히 투입하여 콘크리트를 충분히 혼합하였고 최종적으로 강섬유를 손으로 뿌려서 투입하여 최장 5분 정도 혼합하였다. 강섬유를 투입한 후 너무 장시간 혼합하게 되면 화이어 볼(Fiber Ball) 현상이 일어났으며 적합한 혼합시간은 강섬유 투입 후 3~4분 정도였다. 시편의 특성은 표 2와 같고 단면형상, 치수, 게이지 부착위치 및 탄소섬유 부착위치는 그림 1과 같다.

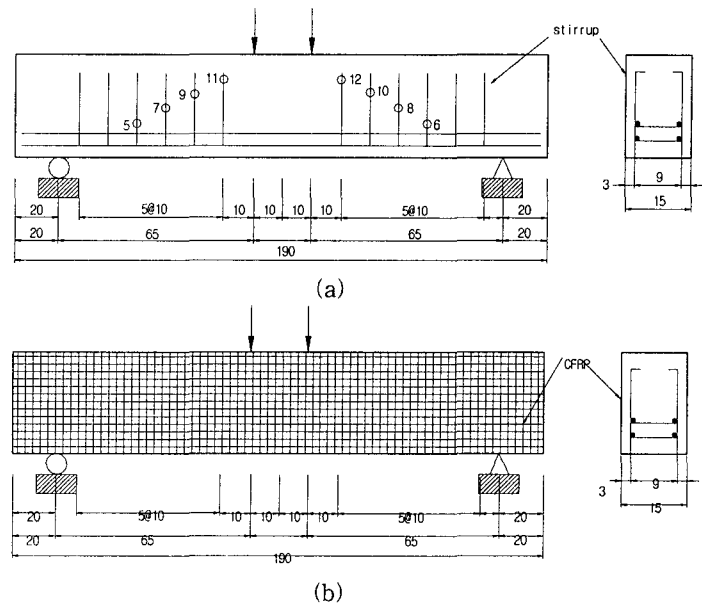


그림 1 Cross-section of static test beams and loading arrangement

표 2 Details of test specimen

Beams	Beam size (cm)	Tensile steel bars (mm)	Vertical steel bars (mm)	Shear span ratio (a/d)	Carbon sheet Repair, Rehabilitation
SFB1	15×30×190	∅ 19×4	∅ 10 (12EA)	2.8	None
CSF1	15×30×190	∅ 19×4	∅ 10 (12EA)	2.8	2 Sheet Rehabilitation
CSF2	15×30×190	∅ 19×4	∅ 10 (12EA)	2.8	2 Sheet Rehabilitation
CSF3	15×30×190	∅ 19×4	∅ 10 (12EA)	2.8	2 Sheet Repair
CSF4	15×30×190	∅ 19×4	∅ 10 (12EA)	2.8	2 Sheet Repair
CSF5	15×30×190	∅ 19×4	∅ 10 (12EA)	2.8	4 Sheet Repair
CSF6	15×30×190	∅ 19×4	∅ 10 (12EA)	2.8	4 Sheet Repair

SFB1 : High strength reinforced concrete beam mixed steel fibrous.

CSF1~6 : High strength reinforced concrete beams mixed steel fibrous of carbon sheet repair and rehabilitation.

#### 2.4 정적실험

본 연구의 정적실험에서 시편제의 지지조건은 단순보로 하였으며 4점 재하방식으로 중앙부에서 연직하중을 가하였다. 이 하중은 미국 SATEC사의 최대 200ton 용량의 전기유압식 만능시험기(UTM)를 이용한 하중조절방식에 의하여 가력하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 정적실험

본 연구에서는 각각의 시편에 대하여 초기 휨균열, 초기사인장 균열 및 극한하중을 관찰하였고 그 결과는 표 3과 같다.

표 3 Static test results

Name of beams	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	Stirrup spacing(cm)	Shear span ratio(a/d)	P <sub>fc</sub> (ton)	P <sub>cr</sub> (ton)	P <sub>u</sub> (ton)	Failure mode
SFB1	1044	10	2.8	4.8	15.1	28.1	Flexure
CSF1	970	10	2.8	·	·	50.5	Flexure
CSF2	970	10	2.8	·	·	49.1	Flexure
CSF3	1044	10	2.8	·	·	43.8	Flexure
CSF4	1044	10	2.8	·	·	37.9	Flexure
CSF5	1180	10	2.8	·	·	46.7	Flexure
CSF6	1180	10	2.8	·	·	37.1	Flexure

f'c : Compressive strength of concrete. P<sub>fc</sub> : First flexural cracking load.  
P<sub>cr</sub>: First diagonal cracking load. P<sub>u</sub> : Static ultimate load to failure.

#### 3.2 균열형태 및 파괴양상

본 연구에서 동일한 전단지간·깊이비를 가진 강섬유 혼입 고강도 철근 콘크리트 보(SFB1)와 탄소섬유쉬트를 부착한 강섬유 혼입 고강도 철근 콘크리트 보(CSF1~6)의 파괴양상은 휨-압축파괴로 유사한 경향을 보였으나 균열의 진전은 상당한 차이를 나타냈다. 또한 탄소섬유쉬트를 2겹으로 보강한 시편과 사인장균열을 일으킨 후 2겹으로 보수한 시편 그리고 2겹으로 보강하고 일정한 하중을 재하한 후 2겹으로 보수한 시편의 균열진전은 거의 유사한 상태를 보였다.

##### 3.2.1 강섬유 보강 시편(SFB1)의 균열 및 파괴양상

본 연구에서 사용된 강섬유 보강 시편(SFB1)의 경우 휨균열은 하중재하 초기에 순수휨 구간에서 발생하여 하중을 증가시킴에 따라 계속 성장하였다. 사인장 균열은 복부중앙에서 갑작스럽게 발생하거나 중앙에서 1.0d~1.5d 만큼 떨어진 지점에서 발생한 보의 휨균열이 중립축과 약 40°~45°각도를 이루며 성장하였다. 전단보강철근과 혼입된 강섬유가 초기 사인장 균열의 발생과 폭을 제어하여 내력이 제분배 됨으로서 다시 2, 3차의 사인장 균열을 형성하였다. 그리고 시편은 압축부에서 파괴가 일어나 콘

크리트 압축파괴를 보였으며 시편파괴시 고강도 콘크리트에서 나타나는 취성파괴가 일어나지 않고 연성적인 파괴양상을 나타내었다.

### 3.2.2 탄소섬유쉬트 2겹 보강한 시편(CSF1,2)의 균열 및 파괴양상

탄소섬유쉬트로 2겹 보강한 시편(CSF1,2)의 경우 균열이 거의 하중을 직접 받는 중앙부에 발생하였으며 미세균열이 적었고, 극한하중이 탄소섬유쉬트로 보강하지 않은 시편보다 2배 가까이 높았다. 지점부 부근과 복부부분에 사인장 균열이 발생하지 않은 것으로 보아 탄소섬유쉬트가 사인장 균열의 억제에 효과적이라는 것을 알 수 있다.

### 3.2.3 탄소섬유쉬트 2겹 보수한 시편(CSF3,4)의 균열 및 파괴양상

사인장 균열을 발생시킨 후 2겹 보수한 시편(CSF3, 4)은 각각 14ton과 20ton의 하중을 가력하였다. 파괴양상은 휨-압축파괴였으며 파괴시 극한하중이 각각 43.8ton과 37.9ton으로 손상을 가하지 않은 시편인 SFB1보다는 높은 하중에서 파괴되었다.

### 3.2.4 사인장균열을 발생시킨 후 4겹 보수한 시편(CSF5,6)의 균열 및 파괴양상

사인장균열을 발생시킨 후 4겹 보수한 시편(CSF5,6)은 각각 14ton과 20ton의 하중을 가력하였다. 파괴양상은 휨-압축파괴였으며 파괴시 극한하중이 각각 46.7ton과 37.1ton으로 사인장 균열 보수 후 보수한 시편인 CSF3, 4와 비슷한 극한하중에서 파괴되었다. 이러한 결과는 탄소섬유쉬트의 겹수가 증가한다 하더라도 보수효과는 증가된 겹수에 따라 커지지 않는다는 것을 알 수 있다.

## 3.3 탄소섬유쉬트의 파괴양상

부착된 탄소섬유쉬트의 파괴양상을 비교하면 CSF5는 콘크리트 피복이 박리되며 파괴된 피복박리파괴가 발생(그림 2)하였고 이 시편을 제외한 나머지 시편에는 탄소섬유쉬트와 콘크리트간의 부착이 급격히 저하되면서 파괴되는 순수부착파괴가 발생하였다. 특히 순수부착파괴에서는 탄소섬유쉬트가 한꺼번에 부착파괴로 떨어지지 않고 부재의 종방향으로 찢어지면서 단계적으로 박리되어 파괴되었다.

## 3.4 하중-중앙처짐관계

본 연구를 통하여 탄소섬유쉬트를 부착한 시편의 중앙처짐은 극한하중에 도달하기 전까지 하중이 증가함에 따라 선형적으로 증가함을 알 수 있었다. SFB1의 중앙처짐은 탄소섬유쉬트를 부착한 시편보다 상당히 크고 연성적인 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 각각의 처짐값의 크기를 재하하중 20ton을 기준으로 정리하면 CSF3(14ton 재하 후 2겹 보수)<CSF4(20ton 재하 후 2겹 보수)<CSF1(2겹보강)<CSF2(2겹보강)<CSF6(14ton 재하 후 4겹보수)<CSF5(20ton 재하 후 4겹보수)<SFB1 순서로 관측되었다. 일정한 하중을 가력한 후 보수한 시편인 CSF3, 4, 5 및 6은 CSF1, 2(2겹보강)와 처짐량이 크게 차이나지 않고 있다. 이것은 탄소섬유부착시 콘크리트 표면에 도포하는 에폭시계의 접착제가 어느 정도 균열의 성장을 감소시켜 주는 것으로 사료된다.

## 3.5 하중-변형을 관계

### 3.5.1 주인장철근의 하중-변형을 관계

탄소섬유쉬트를 부착시킨 시편의 경우 직선의 초기부분에서 인장철근은 콘크리트와 동일한 변형율로 거동하며 콘크리트에 균열이 발생된 이후에도 강섬유와 탄소섬유의 영향으로 변형율의 기울기가

크게 증가하지 않고 있음을 알 수 있다. 탄소섬유쉬트를 부착하지 않은 시편 역시 콘크리트 내의 강섬유 구속능력으로 인하여 휨균열이 발생되더라도 변형율의 기울기는 큰 변화가 없었고 탄소섬유쉬트 겹수 사이에 따른 변형율도 항복점에 도달하기 전까지는 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 인장철근이 항복점을 넘어 극한점에 이르러서도 탄소섬유쉬트의 작용으로 변형율이 계속적으로 증가하는 양상을 볼 수 있다.

### 3.5.2 전단보강철근의 하중-변형율 관계

전단철근의 변형율 값은 다양한 형태로 나타난 것을 알 수 있다. 사인장 균열이 발생하기 전까지 거의 변형율의 변화가 없다가 사인장 균열 직후에 증가한 것으로 보이며 탄소섬유쉬트가 부착된 시편의 초기 사인장 균열은 19~20tonf 사이에 발생된 것으로 사료된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 강섬유를 혼입한 고강도 철근 콘크리트 보를 탄소섬유쉬트로 보수·보강한 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 탄소섬유쉬트로 보수·보강한 시편은 무보강 시편보다 미세균열이 상당히 적으며 사인장 균열의 억제에 효과적이라는 것을 알 수 있었다.
- (2) 시편을 2겹으로 보강한 시편은 무보강 시편에 비해 극한하중이 1.77배 높았으며 사인장 균열이 진전된 시편을 탄소섬유쉬트로 2겹과 4겹으로 보수한 경우도 무보강 시편보다 극한하중이 각각 1.46배와 1.49배 높았다.
- (3) 일정한 하중을 주어 사인장 균열을 가한 시편에 각각 2겹과 4겹으로 보수·보강하여 실험한 결과 비슷한 극한하중에서 파괴되었다. 이는 탄소섬유쉬트의 겹수가 증가하더라도 이것에 따라 보수·보강효과는 커지지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉, 탄소섬유쉬트의 2겹에 의한 보수·보강이 가장 경제적이고 보수·보강효과가 양호함을 알 수 있었다.
- (4) 탄소섬유쉬트의 파괴양상은 콘크리트 피복이 떨어져 나가는 피복박리파괴(CSF5)와 탄소섬유쉬트와 콘크리트간의 부착이 급격히 감소하며 파괴되는 순수부착파괴로 파괴되었다. 특히 순수부착파괴는 탄소섬유가 한꺼번에 떨어지지 않고 부재의 종방향으로 찢어지면서 단계적으로 파괴되고 있음을 확인 할 수 있었다.(CSF1,2,3,4,6)
- (5) 전단보강철근의 변형율 변화로 미루어보아 탄소섬유쉬트로 보수·보강된 시편의 초기 사인장 균열하중은 19~20tonf 정도인 것을 알 수 있었다. 즉, 탄소섬유쉬트로 보수·보강하지 않은 시편은 14ton에서 초기 사인장 균열이 발생하므로 약 30%의 증가상태에서 사인장 균열이 일어남을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. ACI Committee 363, "State of the Art Report on High-Strength Concrete", ACI Journal, Vol.81, No.4, July-August 1984, pp.364 ~ 411.
2. ACI Committee 215, "Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Static Loading", ACI Journal, ACI 215R-74, Vol.71, No.3, March 1974, pp.97 ~ 121.
3. K. H. Kwak, J. Suh and C. T. T. Hsu, "Fatigue Strength of Steel Fiber Reinforce Concrete Beams", Second CANMET/ACI International Concrete on Durability of Concrete, Montreal Canada, 1991, pp.369-384.
4. T. Chang and C. E. Kesler, "Fatigue Behavior of Reinforced Concrete Beam" Journal of ACI, Vol.55, August 1958, pp.245 ~ 254.