

# 연속섬유 시트로 보강된 RC 부재의 모서리 형상에 따른 보강 효율에 관한 연구

## Strengthening Efficiency for the Various Corner Shapes of RC Member confined with Continuous Fiber Sheets

고 훈 범\*      이 진 섭\*\*  
Ko, Hune-Bum      Lee, Jin-Seop

### Abstract

Recently, fiber reinforced polymers(FRP) composite materials are used extensively in the rehabilitation of concrete structural members. A main application is to wrap beams and columns using the continuous fibers sheets to improve their strength and ductility. The corner chamfering affects significantly the performance of the continuous fibers sheets, and could lead to environmental problem with waste and dust. The main purpose of this paper is to verify the effect of corner conditions on the strength of the continuous fiber sheets, and to introduce new attached components which can avoid environmental problem. A total of 15 specimens were tested and carefully checked for three types of continuous fiber sheets(carbon, glass, and aramid) and three types of corner conditions(non-chamfering, chamfering, and device attaching). It is proved that the devices proposed in this research have some capabilities to use for RC member. But additional research will be needed for commercializing.

키워드 : 연속섬유시트, 전단보강, 응력 전달, 모서리 가공

Keywords : continuous fiber sheet, shear reinforcement, stress distribution, corner chamfering

### 1. 서 론

콘크리트 건축물은 시간의 경과에 따라 크던 작던 성능저하의 과정을 겪으며 노후화될 수밖에 없다. 하지만 이런 노후 건축물들도 새로운 기능을 추가하거나 용도를 변경하기 위한 리모델링을 실시하면, 수명을 2~3배 연장시킬 수 있다. 리모델링을 위해서는 기존 건축물의 골조를 보강하는 것이 필수적이라 할 수 있으며, 이를 위한 보강공법으로 현재 가장 널리 쓰이고 있는 것이 연속섬유를 사용한 공법이다.

고강도·고탄성·고경량의 특성을 가진 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드 섬유 등의 연속섬유는 항공우주산업, 스포츠레저산업 및 기타 첨단산업에 주로 사용되어 왔으며, 80년대 중반 이후 유럽과 일본에서 건설현장에 도입하기 시작하여 철판압착 대체 공법으로서 일반화되고 있다. 섬유시트 보강공법은 콘크리트 구조물의 내하력 증진 및 내진보강에 뛰어난 성능을 가지고 있으며 그 편리한 시공으로 인해 토목, 건축분야 콘크리트 구조물 보강에 다양하게 적용되고 있다. 그러나 장방향 보나 기둥 등 기존 부재를 섬유시트로 보강할 때는, 어떤 방법으로

든 각 모서리를 감싸야 하며, 이 모서리 형상은 보강 효율에 크게 영향을 준다(Xiao, 2000). 보강이 필요한 부재의 모서리 면취(chamfering)에는 필연적으로 대량의 그라인딩 작업이 수반될 수밖에 없으며, 공기의 지연, 사용의 제한 및 분진, 건축 부산물에 의한 환경적 문제 등을 야기하게 된다. 따라서 이러한 문제의 발생 우려가 없는 재료 및 공법을 사용하여 환경폐기물의 발생을 최소한으로 줄이고, 시공도 간편한 친환경적 섬유보강공법의 개발이 필요하다.

이러한 관점에서 이 연구에서는 탄소섬유, 유리섬유 및 아라미드 등 각기 다른 섬유 종류와 모서리 형상을 변수로 하여 모두 15개의 시험체를 제작하였다. 모든 시험체는 실제 콘크리트 부재의 모서리에 부착된 조건과 동일하도록, 90°로 꺾인 상태에서 인장시험을 실시하였다. 이 시험을 위해 특별히 전용 가력장치가 제작되었으며, 각 시험체의 시험을 통해 각 구조변수에 따른 내력 및 파괴 양상 등의 변화를 고찰하고 비교하였다.

### 2. 관련 연구의 고찰

첨단재료중의 하나인 연속섬유는, 1990년대 중반부터 철근

\* 인하공업전문학교 건축과 교수, 정희원

\*\* Aseismic Devices Co., Ltd, 기술고문, 정희원

콘크리트 구조 또는 프리스트레스트 콘크리트 구조부재의 우수한 보강 재료로서 인식되기 시작하였다 (Nanni, 2000). 일반적인 공법은 휨과 전단보강 또는 구속효과를 위해 섬유시트를 외부 표면에 부착시키는 방법인데, 휨 보강은 부재의 길이방향으로 섬유를 부착시키고, 전단 보강 및 구속효과를 위해서는 부재 길이의 직각방향으로 부재 전체를 감싸며 부착하게 된다.

초기에는 모서리에서의 응력전달에 관한 연구 자료가 없어 연속섬유시트에 의한 보강은 원형 및 타원형 단면으로 국한되었었다 (Prestley 1995). 이후 일련의 연구결과로 인해, 연속 섬유로 보강되는 부재에 있어 모서리의 형상은 보강 효율에 크게 영향을 주며, 특히 모서리를 원형으로 가공하는 것은 보강섬유와 콘크리트 사이의 부착을 개선시켜 주고, 섬유시트의 응력집중을 막아주며, 보강섬유와 콘크리트 사이에 공극이 발생하는 것을 방지하는 효과가 있는 것으로 밝혀졌다(Xiao 2000, Yang 2001).

특히 Yang 등은 CFRP를 대상으로 0 mm에서 50.8 mm에 이르기까지 일정한 반지름을 갖도록 시험체를 제작하였고, 이를 위한 재하 장치 및 연속 사용이 가능한 부속 등을 개발하여 실험하였다. 이들의 실험결과 및 기존의 연구 성과를 참조하여 ACI 440.2-02에서는 모서리 가공의 최소 반경을 12.7 mm(1/2 in)로 하고 있으며, 국내의 실제 공사에서는 모서리가 20 mm이상의 반경을 갖도록 권장되고 있다.

### 3. 시험체 및 실험 계획

#### 3.1 시험체 계획

시험체는 섬유의 종류와 모서리의 형상을 주요 구조 변수로 하여 제작하였는데, 섬유의 종류는 현재 시중에서 쉽게 구입이 가능한 재료인 탄소섬유(A계열), 유리섬유(B계열) 및 아라미드 섬유(C계열)를 대상으로 하였다. 표 1은 시험체의 종류 및 변수를 나타내었다. 모서리의 형상은 모서리 반경이 0 mm 즉, 직각인 것(X형)과 그림 1(a)와 같이 일반적인 내부 면취반경 30 mm를 갖는 시험체(Y형), 그리고 그림 1(b)와 같이 면취를 위한 그라인딩을 생략할 수 있도록 모서리 외부에 쥘대형 부속을 부착한 시험체(Z형)로 구분될 수 있다. Z형 시험체에서 외부에 부착된 쥘대형 부속은, 보강부재의 모서리에 부착되어 외부로 볼록하게 되는 형태로서, Y형 시험체와 마찬가지로 반경 30 mm를 갖도록 고안되었으며, 재질은 SM400의 일반 강재이다(대량제작시 플라스틱으로 가능). 여기에 사용되는 쥘대형 부속은 그림 2와 같은 치수를 가진다.

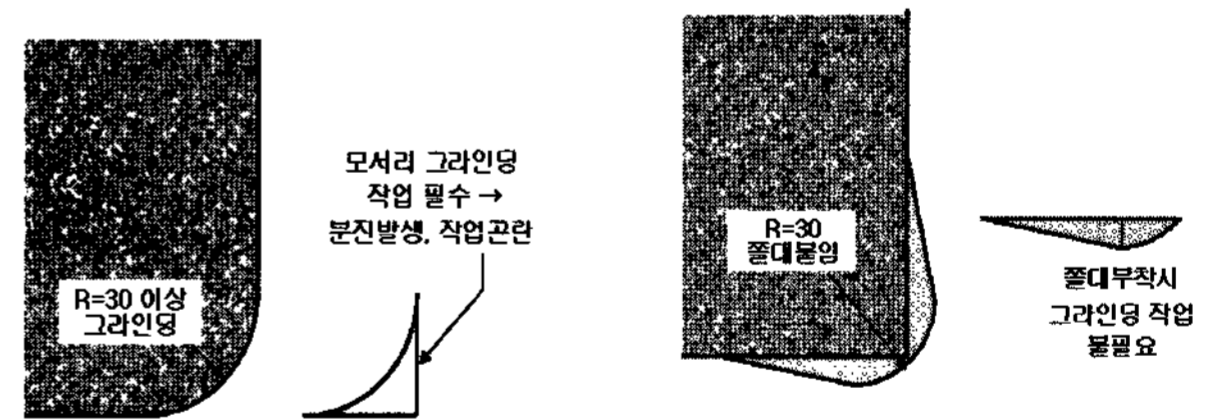
#### 3.2 시험체의 제작

섬유시트로 보강되는 부재의 모서리 반경에 따른 영향과 새

로이 고안된 쥘대형 부속의 보강효과를 검증하기 위해서는, 실제 부재의 상태와 거의 동일하게 시험체를 제작하여 그 인장 내력을 확인하는 것이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 실제의 현장에서와 마찬가지로  $f_{ck} = 30$  MPa의 모재 콘크리트를 150×150 mm 크기로 제작하여 양생한 후에, 각종 보강섬유를 부착하여 총 15개의 시험체를 제작하였다. 먼저 모재 콘크리트의 모서리는 시험체의 변수에 따라 면취가 필요한 시험체는, 그림 3과 같이 핸드그라인더를 이용하여 반경이 30mm가 되도록 가공하였다. 이후에는 표준시공 순서에 따라 프라이머 도포, 섬유시트의 재단, 함침용 에폭시의 도포, 섬유시트 부착, 2차 에폭시 함침의 순으로 시험체를 제작하였다. 이 때 시험체에 부착된 각 섬유의 폭은 탄소섬유와 유리섬유가 60 mm, 아라미드는 45 mm로 하였다. 실험에 사용된 각 섬유시트의 재료 특성은 다음의 표 2와 같다.

표 1 시험체의 종류 및 변수

시험체 계열	섬유의 종류			모서리 형상		
	탄소섬유 (A)	유리섬유 (B)	아라미드 섬유 (C)	무가공 (X)	반경 30mm (Y)	쥘대 부착 (Z)
AX	○			○		
AY	○				○	
AZ	○					○
BX		○		○		
BY		○			○	
BZ		○				○
CX			○	○		
CY			○		○	
CZ			○			○



a) Y형 시험체 및 면취 방법 b) Z형 시험체 및 시공 방법

그림 1. 시험체의 형상 및 모서리의 취부

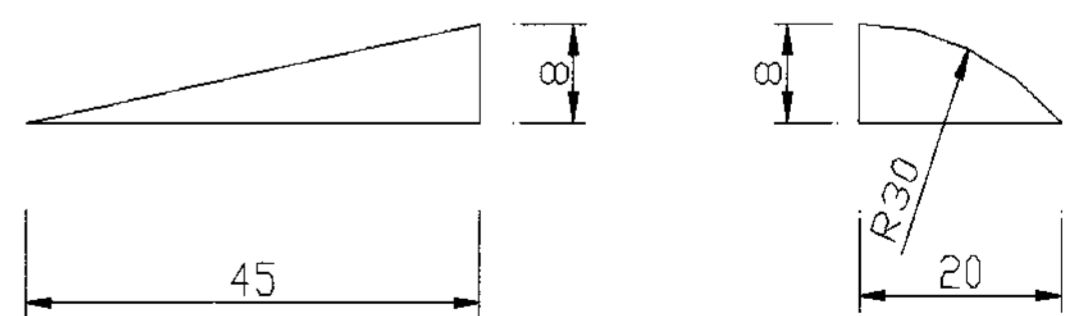


그림 2. 쥘대형 부속의 치수

표 2. 연속섬유의 재료특성

시트 종류	규격인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	설계두께 (mm)
탄소섬유	3,550	$2.35 \times 10^5$	0.167
유리섬유	607	$3.19 \times 10^4$	0.77
아라미드	2,060	$1.18 \times 10^5$	0.286

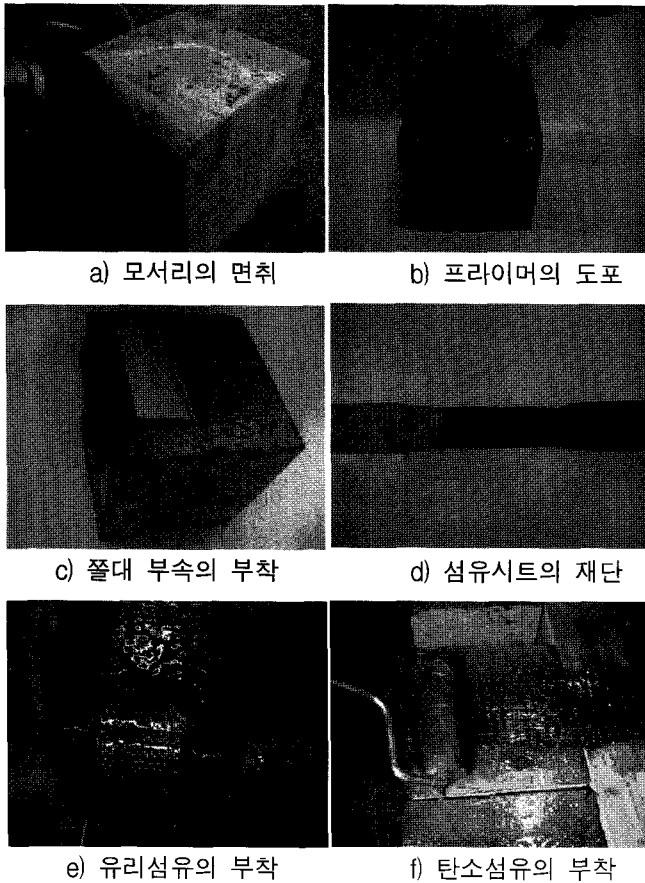


그림 3. 시험체의 제작과정

### 3.3 가력 및 측정장치

모재 모서리의 가공 형상에 따른 섬유시트의 인장내력 변화를 알아보기 위해, 그림 4와 같이 가력용 프레임 및 치구 등을 제작하여 설치하였으며, 가력용 오일잭은 2000 kN 용량이며, 로드셀은 500 kN 용량의 제품이 사용되었다. 실험 방법은 90°로 깎여진 보강섬유 시험체의 양단을, 그림 5에서 보이는 것처럼, 특별히 제작된 치구에 단단히 물린 다음, 오일잭을 통해 한 쪽의 섬유에 인장력을 점증 단조 가력하였다. 각 시험체에는 밀면과 직각면에 각각 1개씩 2개의 와이어 스트레인게이지를 부착하여 각 하중단계마다 섬유시트의 변형도를 측정하면서 섬유가 파단될 때까지 가력하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 실험 결과

표 3은 총 15개 시험체에 대한 실험 결과를 요약하여 보여주고 있다. 모재인 콘크리트의 모서리가 면취되지 않은 X형 시험체의 경우에는, 섬유의 종류 및 인장내력의 크기와는 관계없이, 모든 파단이 모서리부분에서 발생하였다. 그러나 모서리를 반경 30 mm로 면취한 Y형 시험체와 외부에 쥘대형 부속을

부착시켜 섬유를 부착한 Z형 시험체는 모두 모서리에서 50~100 mm상부인 모재의 중앙부분에서 파단되었다. 그림 6은 모서리가 면취되지 않은 X형 시험체와 면취된 Y, Z형 시험체의 전형적인 파괴형태의 예를 보여주고 있다.

그림 7~그림 9에서 보이는 바와 같이, 탄소섬유시트가 부착된 A계열 시험체의 경우에는 모서리의 형상에 따라, AX 시험체 27.6 kN, AY 시험체 36.2 kN, AZ 시험체 38.0 kN의 평균 파단하중을 보여, 모재 모서리가 면취되지 않은 X형 시험체에 비해 32~38%의 내력 증가를 보이고 있다. 유리섬유시트가 부착된 B계열 시험체의 경우에는 모서리가 면취되지 않은 BX 시험체가 29.6 kN, 면취 및 쥘대 부속을 부착한 BY 및 BZ 시험체가 각각 39.7 kN, 38.3 kN의 평균 파단하중을 보여, 모재 모서리의 가공 효과가 무가공 시험체에 비해 29~34%에 이르는 것으로 나타났다. 아라미드 섬유시트의 경우에도 다른 시험체와 마찬가지로 모서리의 가공 상황에 따라 55~84%의 내력 증가를 보였다.

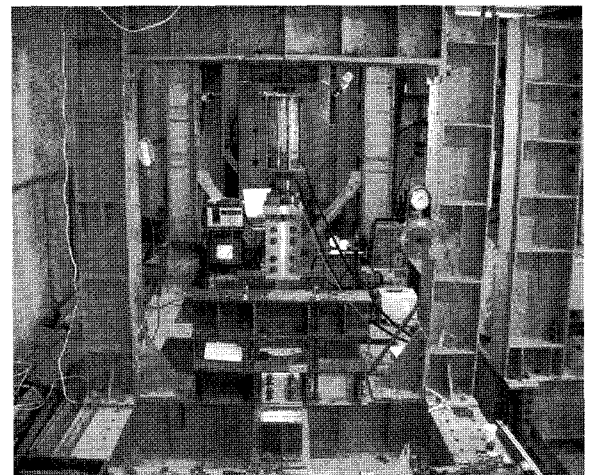
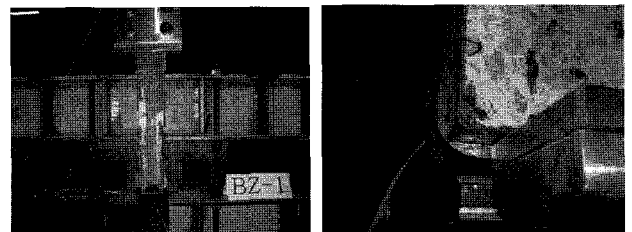
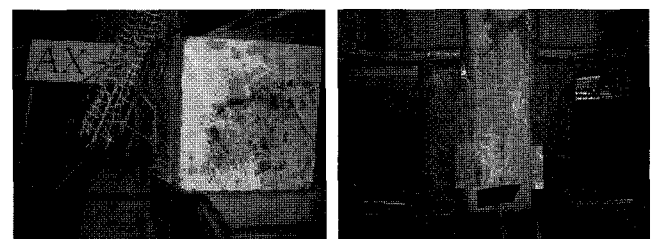


그림 4. 실험용 가력 장치



a) 시험체의 셋팅      b) 모서리에 부착된 쥘대형 부속

그림 5. 시험체의 설치상황



a) 탄소섬유 시험체(AX)      b) 유리섬유 시험체(BZ)

그림 6. 시험체의 파괴형태

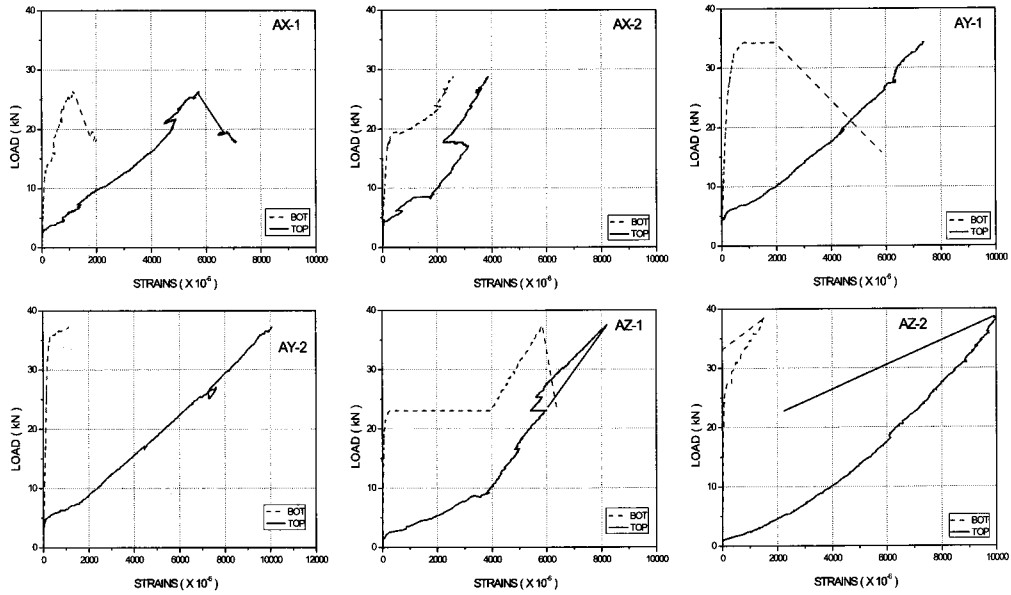


그림 7. 탄소섬유보강 시험체의 시험 결과

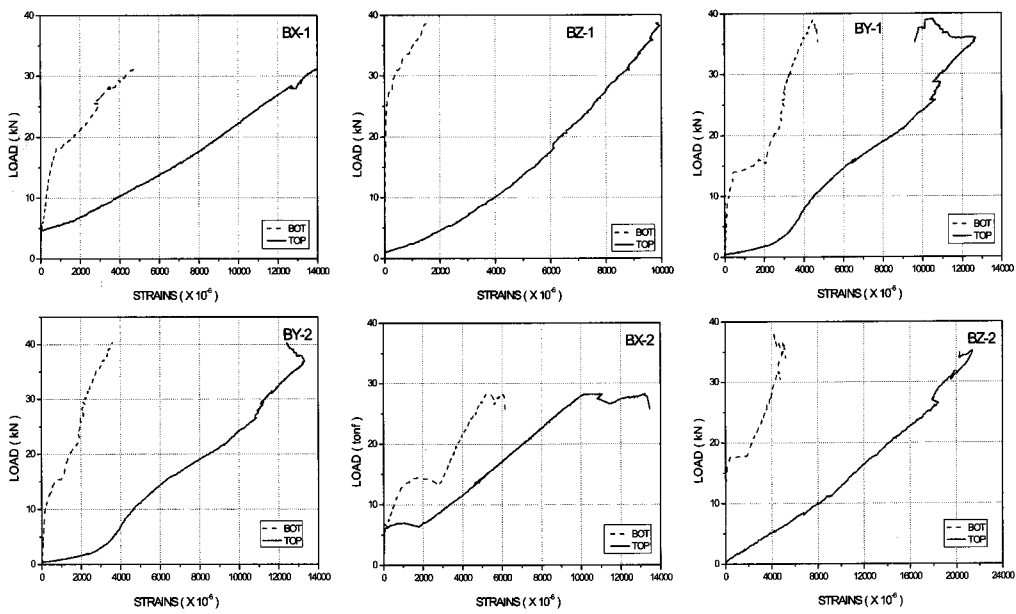


그림 8. 유리섬유 보강 시험체의 시험 결과

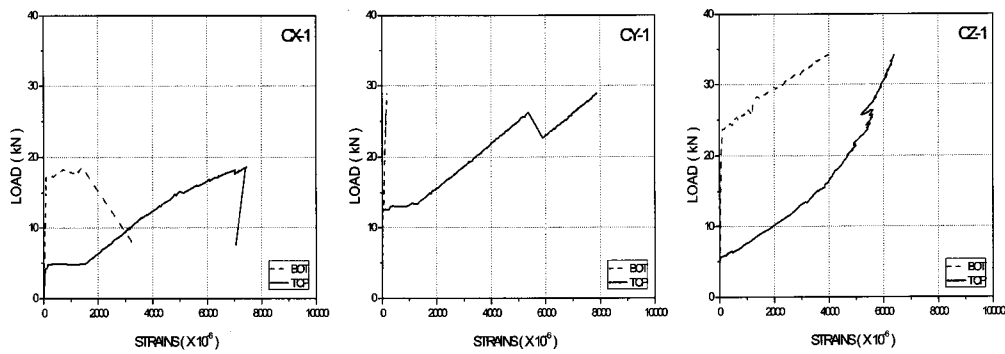
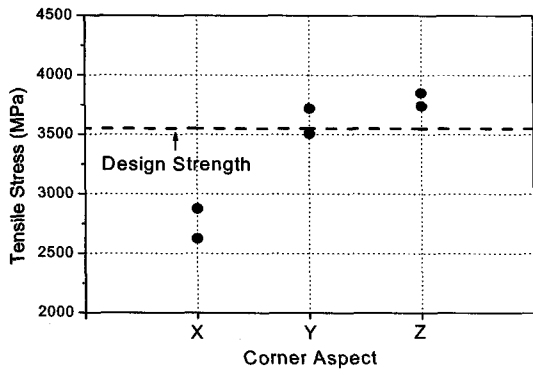


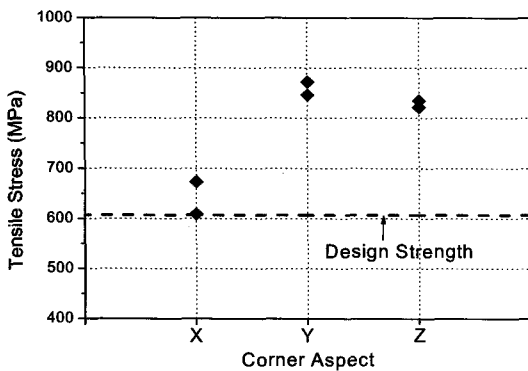
그림 9. 아라미드섬유 보강 시험체의 시험 결과

표 3. 실험 결과의 요약

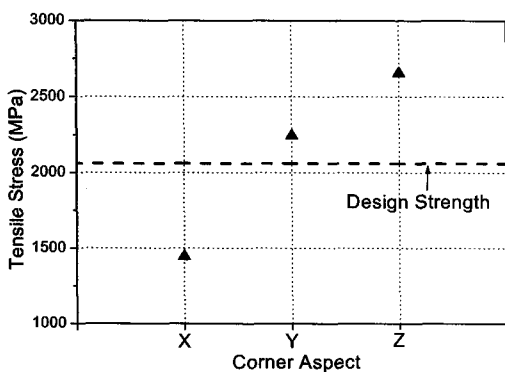
섬유 종류	모서리 가공 상태								
	모서리 무가공 (90°)			모서리 면취 (30 mm)			폴대 부착 (30 mm)		
	시험체	T <sub>max</sub> (kN)	파괴점	시험체	T <sub>max</sub> (kN)	파괴점	시험체	T <sub>max</sub> (kN)	파괴점
탄소섬유	AX-1	26.31	모서리	AY-1	35.13	중앙부	AZ-1	37.48	중앙부
	AX-2	28.81	모서리	AY-2	37.26	중앙부	AZ-2	38.59	중앙부
유리섬유	BX-1	31.09	모서리	BY-1	39.10	중앙부	BZ-1	38.59	중앙부
	BX-2	28.15	모서리	BY-2	40.28	중앙부	BZ-2	38.00	중앙부
아라미드	CX-1	18.60	모서리	CY-1	28.87	중앙부	CZ-1	34.18	중앙부



a) 탄소섬유 시험체



b) 유리섬유 시험체



c) 아라미드섬유 시험체

그림 10. 각 시험체의 응력 비교

### 4.2 결과의 고찰 및 분석

탄소섬유시트 시험체의 경우 그림 10(a)에서 보이는 바와 같이, AX 시험체는 섬유 제조사가 제시하고 있는 설계규격강도의 77 %에서 파단이 발생하였으며, AY 시험체와 AZ 시험체는 각각 설계규격강도의 102 %와 107 %에서 파단이 발생하였다. 유리섬유시트 시험체인 B계열 시험체는 그림 10(b)에서 보이는 바와 같이 BX 시험체, BY 시험체, BZ 시험체가 각각 설계규격강도의 106 %, 142 %, 137 %에서 파단되어, 섬유시트 중에서 모서리 면취의 영향을 가장 덜 받는 것으로 나타났다. 아라미드섬유시트 시험체의 경우에는 CX 시험체가 설계규격강도의 70 %에서 파단이 발생하였으며, CY 시험체와 CZ 시험체는 각각 설계강도의 109 %와 129 %에서 파단이 발생하였다(그림 10(c)).

총 15개의 시험체에 대한 실험결과, 모서리가 면취되지 않은 시험체는 섬유의 종류에 관계없이 가장 낮은 하중에서 파괴되어, 모서리 가공의 중요성이 확인되었다. 또한 모서리의 면취 대신에 폴대 부속을 사용하여 제작된 시험체는 현행 30 mm 반경 면취공법과 비교할 때, 96 %~118 %의 인장내력을 보이고 있어, 철근콘크리트 보 또는 기둥의 보강시, 외부 폴대형 보강공법의 적용 가능성이 확인되었다.

하지만 실용화에 앞서 몇가지 검토해야 할 사항이 있다. 이번 실험에 확인된 사항은 모서리의 형상차이를 단순 인장시험에 의하여 인장내력 확보여부만을 확인하였다. 그렇지만 인장내력만으로는 보강공법의 유효성을 확인하기 어려운 점이 있다. 첫 번째는 전단보강의 대상이 되는 콘크리트 부재는 변형률의 한계를 고려해야 하기 때문이다. 하지만 변형률을 고려하기 위해서는 부재실험을 실시하여야 하며 최대 전단내력과 최대 변형률을 측정하고 그 값이 허용값 범위내에 위치하는지를 검증해야만 한다. 두 번째는 FRP 섬유시트를 이용하여 콘크리트 부재를 보강하는 경우 보에 대한 보강이 많은 편이며, 3가지 방법(전면보강, U자보강, 측면 보강)으로 보강이 이루어지지만 본 실험에 사용된 시험체는 전면보강 방법을 전제로 한 쪽 면을 완전 고정하는 방법을 적용하여 실험을 실시하였으므로 다른 2가지 방법에 대한 고려가 되어 있지 않다고 할 수 있

다. 세 번째는 쫄대의 형상에 관한 내용인데 형상이 역학적으로 적절하느냐 하는 문제이다. 즉 쫄대의 높이나 길이 등에 대한 이론적 뒷받침이나 실험결과가 없다는 것이다. 이러한 문제점은 후속 연구과제를 통하여 해결하고자 한다. 부재실험을 통해서 변형률에 대한 부분과 보강방법에 따른 차이점을 명확히 하고 쫄대에 대한 부분은 구조해석을 통하여 적절한 높이와 길이를 산정하고 몇가지 적정한 안을 가지고 기초적인 실험을 실시하고자 한다.

본 실험을 통해서 FRP 시트를 사용하여 철근콘크리트 보나 기둥을 보강을 하는 경우의 공기연장과 건축 부산물에 의한 환경적 문제점을 야기시키는 부재의 모서리 면처리방법에 대한 한 가지 대안을 제시하는데 의의를 두고자 한다.

## 5. 결 론

이 연구에서는 탄소섬유, 유리섬유 및 아라미드 섬유시트 등 각기 다른 섬유 종류와 모서리 형상을 변수로 하여, 실제 콘크리트 부재의 모서리에 부착된 조건과 동일하도록, 90°로 꺾어진 상태에서 인장시험을 실시하였다. 각 시험체의 실험을 통해 구조변수에 따른 내력 및 파괴 양상 등의 변화를 고찰하고 비교하였다. 또한 콘크리트 분진 및 폐기물의 발생을 야기하는 모서리 면취 작업을 생략할 수 있도록 외부 쫄대형 보강공법의 보강 효율성 등을 실험을 통해 검토하였다. 이 실험연구를 통해 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 모재 콘크리트의 모서리가 면취되지 않은 X형 시험체의 경우에는, 섬유의 종류 및 인장내력의 크기와는 관계없이, 모든 파단이 모서리부분에서 발생하였으며, 모서리를 면취한 Y형 시험체 및 외부 쫄대형 부속이 부착된 Z형 시험체는 모서리에서 50~100 mm 떨어진 모재 중앙부분에서 파단되었다.
- 2) 모서리가 면취되지 않은 시험체인 AX, BX, CX 시험체는, 섬유 제조사가 제시하고 있는 설계규격강도에 대해, 각각 77%, 106%, 70%에서 파단되어, 모서리 가공의 중요성이 확인되었으며, 모서리가 30 mm 반경으로 면취되어 있거나 외부 쫄대 부속이 부착된 경우에는 설계규격강도에 대해 102%~142%의 인장 내력을 나타내고 있다.
- 3) 모서리의 면취 대신에 쫄대 부속을 사용하여 제작된 시험체는 현행과 같이 30 mm 반경을 갖도록 면취된 시험체와 비교하여, 96%~118%의 인장내력을 보이고 있어, 구형 철근콘크리트 보나 기둥의 보강 시, 외부 쫄대형 보강공법의 적용 가능성이 확인되었다.
- 4) 이 공법의 상용화 및 일반화를 위해서는, 쫄대형 부속의 재질 및 형상에 관한 후속 연구와 더불어, 다양한 부재의 종류, 크기 및 모서리 보강 방법 등에 대한 실험 및 이론 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 양동석, 고병순, 박선규, 유영찬, 콘크리트와 탄소섬유판 계면의 본드-슬립모델 산정, 한국 콘크리트 학회 가을 학술발표회 논문집, Vol.16, No.2, pp.635-638, 2004
2. 정명채, 박종원, FRP部材의 부착거동 특성 및 부착모델, 대한건축학회논문집 구조계, Vol.19, No.12, pp.105-112, 2003
3. Brosens, K. and Van Gemert, D., Anchoring Stresses between Concrete and Carbon Fiber Reinforced Laminates Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, V.1, Japan Concrete Institute, Japan, 271-278, 1997
4. Brosens, K. and Van Gemert, D., Anchorage Design for Externally Bonded Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates. Proceedings of the FRPRCS-4, SP-188, ACI, pp. 635-645, 1999
5. Izumo, K., Asamizu, T., Saeki, N. and Shimura, K. Bond Behavior of Aramid and Carbon Fiber Sheet, Concrete Research and Technology, JCI, Vol.9, No.2, pp.1-7(in Japanese), 1998
6. JCI (Japan Concrete Institute), Technical Report on Continuous Fiber-Reinforced Concrete. Japan Concrete Institute, TC952, pp. 116-124, 1998
7. J. F. Chen and J. G. Teng, Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete, Journal of Structural Engineering, Vol. 127, No.7, pp. 784-791, 2001
8. JSCE (Japan Society for Civil Engineers), Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheets. pp. 116-133, 2001
9. Nakaba, K., Kanakubo, T., Furuta, T., and Yoshizawa, H., Bond Behavior between Fiber-Reinforced Polymer Fibers and Concrete. ACI Struct. J., pp. 359-367, 2001
10. Nanni, A., Carbon Fibers in Civil Structures: Rehabilitation and New Construction, Proc., the Global Outlook for Carbon Fiber 2000, Intertech, San Antonio, TX, 2000
11. Maeda, T., Asano, Y., Sato, Y., Ueda, T., and Kakuta, Y., A Study on Bond Mechanism of Carbon Fiber Sheet. Proceedings of Third International Symposium of Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, V.1, pp. 279-286, 1997
12. MBrace TM, Composite Strengthening System, Engineering Design Guideline, 2nd Ed., Master Builders Technologies, Inc., Cleveland, OH. 1998
13. Priestley, M.J. N., Seible, F., and Calvi, M., Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp. 672, 1995
14. Sato, Y. and Vecchio, F. J., Tension Stiffening and Crack Formation in Reinforced Concrete Members with

- Fiber-Reinforced Polymer Sheets. ASCE J. Struct. Engrg., 129(6), 717-724, 2003
15. Ueda, T., Sato, Y., and Asano, Y., Experimental Study on Bond Strength of Continuous Carbon Fiber Sheets. Proceedings of the FRPRCS-4, SP-188, ACI, pp. 407-416, 1999
  16. Xiao, Y. and Wu, H., Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets, J. Mat. Civil Engrg, ASCE, 12(2), pp. 139-146, 2000
  17. Yang, X., A. Nanni, and G. Chen, Effect of Corner Radius on the Performance of Externally Bonded FRP Reinforcement, Non-Metallic Reinforcement for Concrete Structures-FRPRCS-5, Cambridge, July 16-18, pp. 197-204, 2001
  18. Yang, X., Nanni, A., Haug, S., and Sun, C. L. Strength and Modulus Degradation of CFRP Laminates from Fiber Misalignment, J. Mat. Civil Engrg, ASCE, 14(4), pp. 320-326, 2002