

# CFRP로 매립 보강된 RC보의 전단 보강 효과에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Shear Resisting Effect of  
Reinforced Concrete Beams Filling-up Carbon Fiber Rod Plastic.

김 영 식\*  
Kim, Young-Sik

이 형 석\*\*  
Lee, Hyung-Seok

박 성 무\*\*\*  
Park, Sung-Moo

## Abstract

The purpose of this study is to investigate experimentally the shear resisting behavior of the reinforced concrete beams strengthened with reinforcement materials. Seven specimens were manufactured and tested under static monotonic loading. The main variables in the test were the method and direction of reinforcement. This research is about the experiment of shear capacity of reinforced concrete beams strengthened with CFRP-rod, in the filling-up method. The test result indicated that the method of CFRP increase significantly the ultimate shear strength of a reinforced concrete beam.

## 요 지

이 연구의 목적은 보강재로 보강된 철근콘크리트 보의 전단저항거동을 실험적으로 연구하는데 있다. 7개의 시험체를 제작하여 정적하중을 단조재하 하에 실험하였다. 실험의 주된 변수는 보강재의 보강방법 및 방향을 사용하였다. 본 연구의 목적은 CFRP-rod를 사용한 매립공법에 의한 전단보강효과를 파악하고자 한다. 이 실험의 결과는 CFRP로 보강된 철근콘크리트 보의 극한 전단강도가 현저히 증가하는 것을 나타내고 있다.

**Keywords :** Carbon Fiber Rod Plastic, Shear Capacity, Strengthened Effect

**핵심 용어 :** 탄소섬유플라스틱 막대, 전단능력, 전단효과

\* 대구과학대학 건축과 조교수

\*\* 영남대학교 건축학부 공학박사

\*\*\* 영남대학교 건축학부 교수

E-mail: yosikim@tsc.ac.kr, 053-320-1182

• 본 논문에 대한 토의를 2005년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2006년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 그 사용연한이 반영구적인 것으로 알려져 왔으나, 급속한 기후변화, 공해 등의 환경적 요인과 유지 관리 소홀 등의 인위적 요인에 의해 구조물의 노후화 및 성능저하가 발생되고 구조물의 사용변경으로 인한 성능향상의 필요성 등의 이유로 기존 철근콘크리트건물에 대한 보수/보강의 요구가 증가되고 있다. 이에 외부부착공법 중에서 강판을 이용한 접착공법이 주류를 이루어 왔으나 강판이 지닌 부식의 문제, 고정하중 증가, 중량으로 인한 시공성의 어려움 등에 따른 문제점들이 대두되어 부식저항성과 강도, 가공성 및 시공성, 내구성 등에서 탁월한 재료적 성능을 가지는 FRP(Fibre Reinforced Polymer/Plastic)의 출현과 아울러 FRP 플레이트, 스트립, 바를 이용하여 기존 철근콘크리트 구조물을 보강하는 방법이 강판 외부 부착 공법의 대안으로 널리 사용 되고 있다.

캐나다(2001), 미국, 일본, 유럽(2002) 등 선진국에서는 FRP보강기법 및 강도설계법에 근거한 제안식과 FRP보수 보강의 현장적용에 대한 설계지침을 제시하고 있으나, 아직까지 국내에서는 FRP제품의 연구개발의 양적증가에 비해 FRP보수보강에 대한 설계 개념의 미비 등 적절한 설계지침을 마련하지 못하고 있는 실정이다.

그러나 FRP 부착공법의 경우, 보강판의 단부 및 콘크리트 균열부에서 발생하는 응력집중으로 접착제와 인접한 콘크리트 면에서 시작된 균열이 보 시험체의 중앙부로 진전하여 종국적으로 보강판이 탈락함으로 보강재로서의 성능을 충분히 발휘되기 전에 조기 박락 파괴에 이르는 경우가 많다. 단부에 정착물을 설치하는 등 조기파괴를 제어하기 위한 대안이 개발되어 있으나, 정착물의 변형 및 파단 등의 2차 파괴가 보고 되고 있다<sup>(4)</sup>.

FRP의 탁월한 재료적 성능에도 불구하고 보강재의 조기박락 등의 약점으로 건축분야에서의 현장적용은 아직도 미미하다. 따라서 이러한 FRP plate 부착공법의 한계를 극복하고 부착성능을 개선하려는 노력의 일환으로 역사다리꼴 탄소섬유막대(Carbon Fibre Rod Plastic, CFRP)의 형태로 보강모체에 매립함으로써, 외

부부착공법의 단점으로 지적되고 있는 박락 등의 조기 파괴를 방지하고, 보강재의 성능이 충분히 발휘되도록 유도하려는 공법들이 제시되고 있다. FRP 시트, FRP 판 부착공법과 비교하여 외부 매립공법은 향상된 파괴 에너지를 가지며, 단부 부착파괴에 대한 저항성이 커지는 것으로 알려져 있다<sup>(4)</sup>. 또한 화재나 외부충격에 좀더 안전하고, 마모에 대한 내구성도 커지는 부가적인 효과를 기대할 수 있다.

이에 본 연구는 CFRP의 매립공법으로 전단 보강된 철근콘크리트 보에 대한 실험을 수행하여 전단보강에 있어 부착공법과 매립공법의 보강효과를 비교하고, 매립공법의 CFRP 섬유방향에 따른 전단보강효과를 연구하여 현실적으로 적용할 수 있는 자료를 확보하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 사용재료 및 시험체 제작

#### 2.1.1 콘크리트 및 철근의 물성

시험체 제작에 사용된 콘크리트는 20.60MPa의 설계 기준강도를 목표로 굵은 골재 최대치수 25mm, 슬럼프 150mm인 레미콘 제품을 사용하였고 채령 28일 압축강도는 설계기준강도와 다소 차이가 나는 20.31MPa로 측정되었으며, 압축철근은 HD16(SD24)을 인장철근은 HD22(SD40)을 사용하였다.

#### 2.1.2 보강재

본 실험에서 보강재로 사용된 CFRP와 탄소섬유시트는 국내회사에서 개발된 제품으로서 역학적 성질은 Table 1~Table 2과 같다. 또한 CFRP 부착에 사용된 전용접착제와 에폭시 프라이머의 재료적 특성은 Table 4~Table 5와 같다.

Table 1 탄소막대 및 탄소섬유판의 재료적 특성

종 류	탄성계수(MPa)	인장강도(MPa)
CFRP	0.15×10 <sup>6</sup>	1638.27

Table 2 탄소섬유쉬트의 재료적 특성

종 류	탄성계수(MPa)	인장강도(MPa)
탄소섬유쉬트	$0.23 \times 10^6$	3482.55

Table 3 강판의 재료적 특성

종 류	탄성계수(MPa)	인장강도(MPa)
SS400	$0.21 \times 10^6$	235.44

Table 4 전용접착제(C.E-33)의 재료적 특성

측정항목	단 위	결과치	시험방법
부착강도	(MPa)	3.54	KSF 4715
압축강도	(MPa)	109.87	KSM 3015
굴곡강도	(MPa)	62.49	KSM 3015
샤르피충격강도	(MPa)	0.44	KSM 3015

Table 5 전용 에폭시 프라이머(C.E-33P)의 재료적 특성

측정항목	단 위	결과치	시험방법	비 고
점 도	(cP)	193	KSM 3705	혼합시
고형분	(%)	55	KSM 5000	
비 중	주제	1.02	KSM 5000	25℃
	경화제	0.90	KSM 5000	25℃
가사시간	(시간)	2.0	KSM 5307	25℃

Table 6 시험체변수 및 시험체명

시험체명	전단스팬 비	보강공법	보강재료	보강방향	전단 보강근 비	보강재 보강 비	두께(mm)
C150N	1.6	-	-	-	0.0037	-	
C150RV		매립공법	탄소섬유막대	수직방향	0.0037	0.00448	
C150RH		매립공법	탄소섬유막대	수평방향	0.0037	0.00448	
C150RD		매립공법	탄소섬유막대	45°방향	0.0037	0.00448	
C150PH		부착공법	탄소섬유판	수평	0.0037	0.0048	1.5
C150SW		부착공법	탄소섬유쉬트	wrapping	0.0037	0.0088	0.167
S150PH		부착공법	강판	수평	0.0037	0.016	4

### 2.2.3 시험체 제작

본 연구에서 시험체는 전단 보강된 보에 대한 전단 보강효과를 검토하기 위하여 휨 파괴가 억제되도록 설계하였으며, 사용된 시험체 단면과 배근상세는 아래의 Fig. 1과 같다.

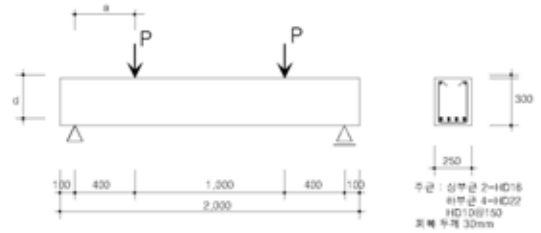


Fig. 1 시험체 상세

## 2.2 실험변수

본 연구의 실험변수는 보강재료와 보강방법 그리고 보강방향이고 전단스팬 비(a/d)가 1.6인 보 시험체를 총 7개 제작하여 실험하였다. Fig. 2(a)-Fig. 2(f)와 같이 보강재료와 보강방법은 탄소섬유쉬트, 탄소섬유판, 탄소섬유막대, 강판으로 하여 부착공법과 매립공법의 보강효과를 비교 및 검토하고 보강방향은 탄소섬유막대 매립공법에서 수평보강, 수직보강, 45° 경사보강방향으로 하여 보강효과를 비교 검토하였다. 시험체변수 및 시험체 전단 보강량은 Table 6과 같다.

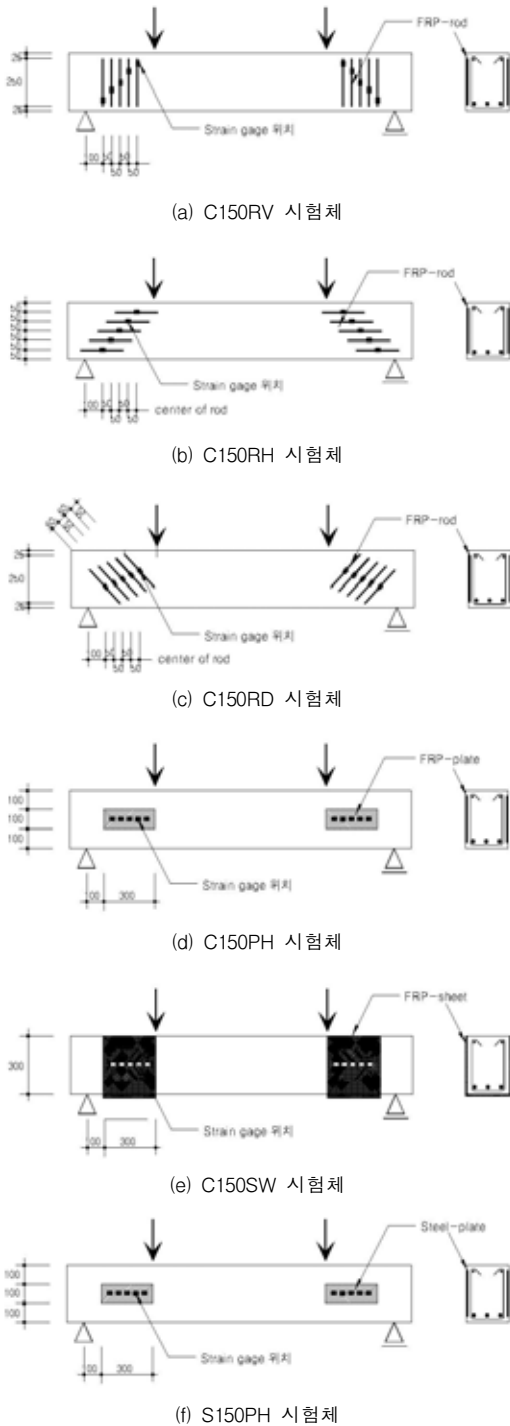


Fig. 2 시험체별 보강상세

## 2.3 재하방법 및 측정항목

시험체의 전장은 2000mm, 순 스패น 1800mm, 가력 점은 양 지점으로부터 각각 400mm의 위치에서 2점 가력하였다. 단순보 지지조건을 만족시키기 위해 지지점과 가력지점에 핀 경계조건을 설치하였으며, 가력장치로는 981kN 용량의 유압식 U.T.M을 사용하여 실험초기에는 일정하게 하중을 증가시키는 하중제어방식으로 그 후에는 시험체 중앙에 설치된 변위측정기의 처짐을 관측하면서 변위조절방식에 의해 가력하였다. 측정항목은 하중, 부재의 처짐, 보강재 및 철근의 변형률, 콘크리트의 변형률로서 콘크리트 균열상태를 육안으로 관찰하였고, 파괴에 이르는 과정을 하중상태 및 처짐량과 균열발생순서에 따라 순차적으로 기록하였다. 시험체 중앙부 하단과 가력점의 1개소에 LVDT를 설치하여 처짐량을 측정하였다. 철근의 압축 및 인장 변형률을 체크하기 위하여 시험체의 중앙 하부 및 상부의 2개소와 전단 늑근 변형률을 알아보기 위해서 단부 스티럽에 각각 1방향 스트레인 게이지를 부착하였다.

그리고 탄소보강재의 최대변형률을 조사하기 위해 보강재마다 각각 스트레인 게이지를 설치하였다. 또한 콘크리트의 압축 및 인장변형률과 중립축 위치를 알아보기 위해 시험체의 중앙부 표면에 콘크리트 게이지를 부착하여 하중상태에 따른 변형률을 측정하였다. 시험체의 표면은 하중상태에 따른 균열위치 및 균열 진전 상황을 쉽게 파악하기 위해 백색 수성페인트를 도포하고 일정한 간격의 그리드를 그렸다. 또한 시험체에 하중에 의한 균열이 발생함에 따라 초기전단하중 및 최대하중에 따른 균열의 진전 상황을 유성펜으로 표시하고, 각각의 하중을 표시하였다. 실험에서의 변위 측정기(LVDT)의 변위와 철근 및 보강재의 변형률을 데이터 자료 습득기(TDS-601)를 통하여 습득하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 파괴상황

시험체는 전체적으로 전단압축파괴의 양상을 나타내었으며, 대표적인 파괴 및 균열의 형태는 Fig. 3~Fig. 6과



Fig. 3 C150RH 파괴양상



Fig. 4 C150RV 및 C150RD  
파괴양상



Fig. 5 C150SW 파괴양상



Fig. 6. C150PH 및 S150PH  
파괴양상

같다. 보강재의 형태에 따른 결과를 살펴보면, 탄소판을 수평으로 보강한 경우는 초기전단균열이 발생하는 하중이 기준 시험체와 별 차이를 나타내지 않았으나, 최대 전단내력은 약 20%정도 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 탄소판이 콘크리트 표면으로부터 아무런 영향 없이 떨어지는 양상을 나타내었다.

탄소시트로 보강한 경우는 초기 전단균열이 발생하는 것을 재료 특성상 확인 할 수는 없었으며, 전체적인 전단내력에 있어서는 약 23% 높게 나타났지만 이는 상대적으로 보강량이 많은 원인으로 보여지며, 최대내력에 이르러 시트가 찢어지면서 파괴되는 양상을 나타내었다.

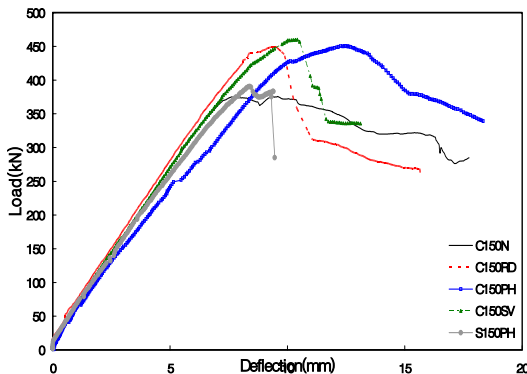


Fig. 7 보강 재료별 하중-처짐 곡선

CFRP로 보강한 경우에는 초기 전단균열은 약 7%~17% 높게 나타났으며, 최대 전단내력에 있어서는 수평보강의 경우는 거의 차이가 없는 반면에 수직이나 대각선으로 보강한 경우는 약 23%정도 높게 나타났다. 그러나 전체적인 파괴양상과 최대 내력을 살펴보면, 탄소판 및 시트의 경우는 초기 전단균열이 발생한 후에 단부가 박리되는 양상을 나타내었다.

CFRP로 수직 및 대각선으로 보강한 경우에는 초기 휨 균열 후 사인장 균열이 발생하고, 최대 내력에 이르러 보강재 콘크리트를 피복두께까지 물고 떨어지는 양상을 보이는 반면에, 수평으로 보강한 경우는 초기 거동의 형태는 비슷하나 최종적으로 콘크리트 모체로부터 피복을 물고 떨어지는 것이 아니라 보강재가 사인장 균열에 의해서 종방향으로 절곡되는 변형을 하는 것으로 나타났다. 따라서 전단보강 효과는 수평 보강을 제외하고 CFRP를 가지고 보강하는 것이 전단 보강량이 타 재료에 비해 적음에도 불구하고, 균열형태, 파괴양상 및 최대내력 등 전체적으로 좋은 것으로 나타났다.

### 3.2 하중처짐곡선

시험체의 전체적인 하중-처짐 곡선은 아래 Fig. 7과 8에서 보는 바와 같이 나타났다. 그중에서 보강재료별에 따른 시험체의 하중-처짐은 Fig. 7에 보듯이 탄소섬유막대, 탄소판 및 탄소섬유시트는 거의 유사한 거동을 하는 것으로 나타났으나, 강판으로 보강된 경우에는 전단보강효과가 거의 없는 것으로 나타났다.

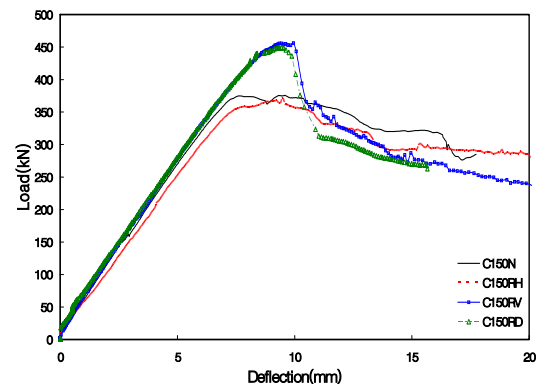


Fig. 8 보강 방법별 하중-처짐 곡선

보강방법에 따른 탄소섬유막대의 하중-처짐의 양상은 Fig. 8에서 보는 바와 같이 수평으로 보강하는 경우는 전단보강효과가 거의 없으며, 연성을 좀 더 확보하는 것으로 나타났다. 그러나 탄소섬유막대를 수직 또는 45° 방향으로 보강한 경우는 전단보강효과가 뛰어난 것으로 나타났으나, 최대 전단내력이후에 탄소섬유막대가 피복두께를 물고 떨어지면서 급격한 하중 감소현상을 나타내었고, 그 후 무보강 시험체와 같은 변형을 하는 것을 볼 수 있었다.

### 3.3 전단 보강근 및 보강재 변형률

탄소섬유시트로 감싼 시험체와 수평으로 보강된 시험체의 최대 하중시의 늑근 변형률은  $2102 \sim 2172 \times 10^{-6}$ 로 나타났으며, 45° 및 수직방향으로 보강된 시험체는 상대적으로 늑근 변형률이 각각 12%, 26.5%

감소하였다.

시험체의 하중에 대한 전단 보강근 및 보강재의 변형률 곡선을 살펴보면, Fig. 10, 11에서와 같이 탄소섬유막대의 경우는 수평 및 45° 방향으로 보강한 경우보다 수직으로 보강한 경우가 보강재의 변형률이 높은 것으로 나타났다. Fig. 12와 같이 탄소섬유시트로 보강한 경우는 단면 전체를 감싸는 형태의 특성으로 인하여 보강재의 변형률이 균열이 발생한 이후에 급격하게 증가하는 것으로 사료된다.

Fig. 14, 15에서와 같이 탄소 섬유판 및 강관으로 보강한 경우는 보강재의 변형률이 적은 것으로 볼 수 있는데, 이 양상에서 탄소판을 보강한 경우에는 보강재의 변형률은 적으나, 전단보강효과는 크게 나타나고 있는데 이에 대한 전단늑근과 보강재의 하중저항능력에 대한 이유를 분석할 필요가 있다.

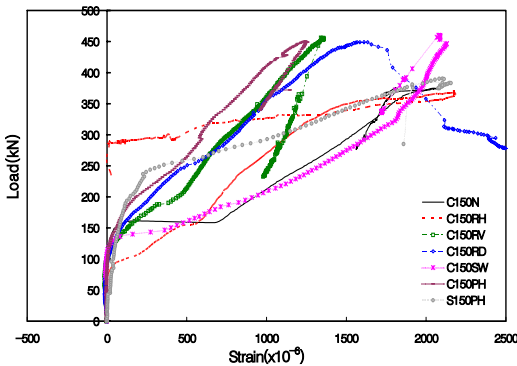


Fig. 9 C150시리즈 하중-늑근 변형률 곡선

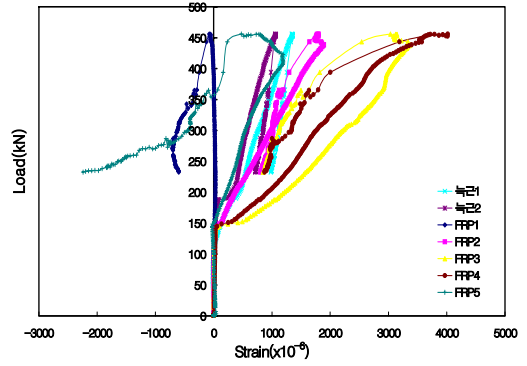


Fig. 11 C150RV 하중-늑근 및 보강재 변형률 곡선

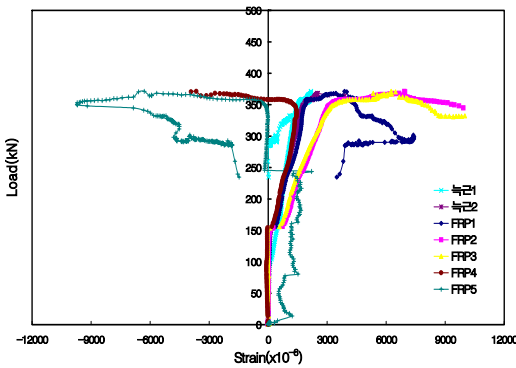


Fig. 10 C150RH 하중-늑근 및 보강재 변형률 곡선

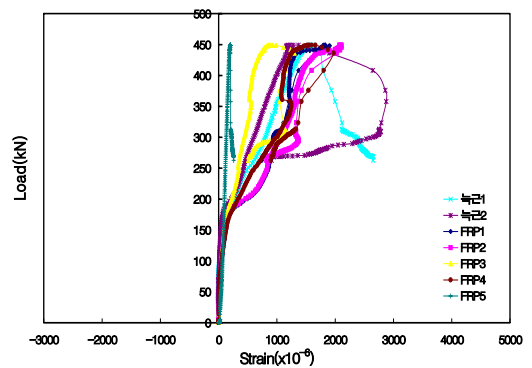


Fig. 12 C150RD 하중-늑근 및 보강재 변형률 곡선

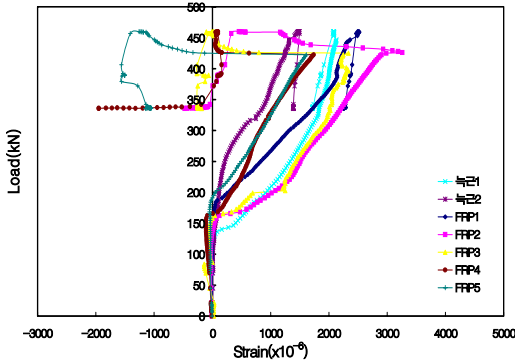


Fig. 13 C150SV 하중-극근 및 보강재 변형률 곡선

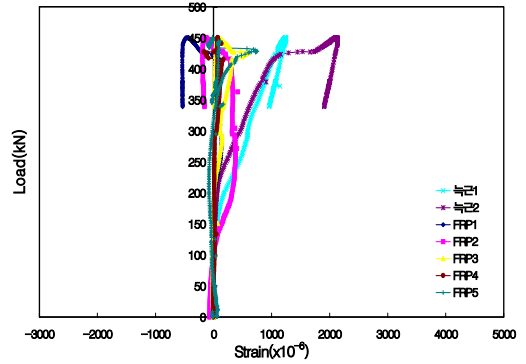


Fig. 14 C150PH 하중-극근 및 보강재 변형률 곡선

반면에 강판으로 보강한 경우는 Table 7과 같이 전단보강효과는 거의 없는 것으로 나타났다.

### 3.4 보강재의 강도 평가

결과에서 나타난 바와 같이 전단 보강근이 있는 철근 콘크리트 보를 탄소섬유막대로 외부 전단 보강하면, 보강효과는 있는 것으로 나타났다. 그러나 기존의 실험적 연구에서 나타난 바와 같이 탄소섬유로 전단 보강된 보의 파괴는 주로 콘크리트와 보강재 계면에서 발생하는 콘크리트 탈락현상으로 보강재가 가지고 있는 강도를 발휘하지 못한다. 따라서, FRP의 보강효과의 평가는 보강재의 유효 변형률, 강도저감계수 등을 적용하여 전단강도 평가를 예측하고 있다.

따라서, 본 연구의 시험체에서 나타난 실험결과를 토대로 CFRP 보강재의 전단강도를 확인하고자 한다.

철근 콘크리트 규준에서 규정한 전단강도 식을 제안

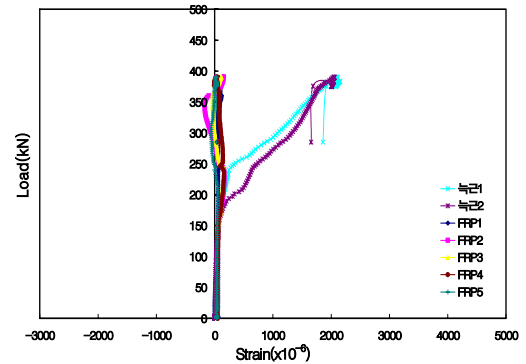


Fig. 15 S150PH 하중-극근 및 보강재 변형률 곡선

하면 다음과 같다.

$$V_n = V_C + V_S + V_{cfrp} \quad (1)$$

식 (1)에서  $V_{cfrp}$  에 대한 전단강도를 전통적인 트러스 이론을 적용한  $V_S$ 의 식을 그대로 적용하면 다음

Table 7 시험체 실험결과

시험체명	전단 스패น (a/d)	최대하중 $P_{max}$ (kN)	초기 전단균열 $V_i$ (kN)	전단강도 $V_u$ (kN)	보강재 강도 $V_{frp}$ (kN)	최대처짐 $\delta_{max}$ (mm)	극근변형률 $\epsilon_s$ (x10 <sup>-6</sup> )	보강재 평균변형률 $\epsilon_{cfs,max}$ (x10 <sup>-6</sup> )	파괴모드	비고
C150N	1.6	375.72	80.64	187.86	-	9.59	1820	-	전단파괴	
C150RH		381.02	89.17	190.51	2.65	9.46	2172	751	전단파괴	
C150RV		456.07	86.03	228.08	40.22	9.95	1339	1783	전단파괴	
C150RD		449	94.47	224.55	36.69	9.44	1610	1747	전단파괴	
C150SW		459.99	-	230.04	42.18	10.42	2079	651	전단파괴	
C150PH		450.48	81.23	225.24	37.38	12.46	2116	94	전단파괴	
S150PH		390.54	94.67	195.22	7.4	8.39	2102	95	전단파괴	

식 (2)와 같다.

$$V_{cfs} = \rho_{v, cfrp} f_{v, cfrp} (\sin \beta + \cos \beta) b_w d \quad (2)$$

여기서,  $\rho_{v, cfrp}$  : CFRP 전단보강 비  
 $f_{v, cfrp}$  : CFRP의 응력도  
 $\beta$  : 보의 재축과의 CFRP 각도  
 $b_w$  : 보의 폭  
 $d$  : 보의 층

단, FRP 전단보강 비는 띠 형식으로 보강된 경우로 생각하여  $\rho_{v, cfrp} = \frac{2A_{cfrp}}{b_w S_{cfrp}} \frac{h_d}{d}$ 가 된다. 단  $A_{cfrp}$ 와  $h_d$ 는 탄소섬유막대 1개의 단면적과 길이이다.

외부 전단 보강된 보는 탄소섬유막대가 인장강도에 도달하는 경우에 인장파괴가 발생하거나 인장강도에 도달 전에 탈락현상이 발생하게 된다. 이 경우 전단강도의 평가를 위해서는 실제 탄소섬유막대에서 발생하는 응력상태에 대한 평가가 대단히 중요한 역할을 한다. 즉,  $f_{v, cfrp}$ 는 실제 발생하는 변형률  $\epsilon_{cfrp}$ 에 비례하므로, 탄소섬유막대의 실제  $f_{v, cfrp}$  값은 식 (3)와 같다.

$$f_{v, cfrp} = \epsilon_{cfrp} E_{cfrp} \quad (3)$$

식 (1)에서 탄소섬유막대의 전단강도는

$$V_{cfrp} = \rho_{v, cfrp} \epsilon_{cfrp} E_{cfrp} (\sin \beta + \cos \beta) b_w d \quad (4)$$

위 식에 의해 수직으로 보강된 C150RV에 대한 실제 변형률을 가지고 전단강도를 평가하면,  $V_{cfrp}$ 는 75.05kN으로 평가된다. Table 7에 나타난 전단강도와는 다소 차이를 보이나, 이는 전단보강근의 변형률이 27% 정도 감소하여 이로 인하여 전단 보강근의 보강효과가 C150N 시험체보다 28.94kN 차이를 나타내는데 그 값을 더하면 CFRP의 전단강도는 적절하게 평가된다.

#### 4. 결 론

- 1) 보강재료별 전단보강효과는 강판을 제외하고는 큰 차이가 없으나, 보강량을 비교할 때 CFRP를 보강하였을 때 가장 효과적이다.
- 2) CFRP의 보강방향별에 따른 전단보강효과는 수평으로 보강하는 것보다는 수직 및 45°로 보강하는 것이 더 효과적인 것으로 나타났다.
- 3) 수직 보강된 CFRP의 전단강도는 보강재인 탄소섬유막대의 항복강도를 탈락시 변형률을 고려하여 적용할 경우에 전단 보강근에 대한 식을 적용하여도 적절할 것으로 사료된다.
- 4) 초기 탈락과 단부박리가 억제되는 CFRP의 전단보강효과에 대한 연구는 탈락시 CFRP의 변형률과 전단보강근비에 따른 상관관계에 중점을 두고 더 진행하면 적절한 전단내력 예측식을 제안할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

이 논문은 2004학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원에 의한 것임.

#### 참고문헌

1. 심종성, 김규선, "FRP로 보강된 RC보의 전단보강효과 비교연구", 콘크리트학회지 제10권 4호, 1998. 8, pp.101~111.
2. 신영수, "탄소섬유슈트에 의한 철근콘크리트 보의 전단보강효과", 대한건축학회 논문집, 15권 9호, 1999. 9, pp. 11~18.
3. 이원호, 임재형, 백영수, "탄소섬유시트로 전단보강된 철근콘크리트 보의 보강효과", 대한건축학회 논문집, 17권 12호, 2001. 12, pp.27~34.
4. Teng, J.G., Chen, J.F., Smith, S.T. and Lam, L. "FRP Strengthened RC Structure", John Wiley & Sons, LTD, 2001.
5. Deric J. Oehlers, Sung-Moo Park, M.S. Mohamed Ali, "A structural engineering approach to adhesive bonding longitudinal plates to RC beams and slabs", Composites, part A 34 : applied science and manufacturing, pp.887~897.

(접수일자 : 2004년 9월 9일)