

## 탄소섬유막대로 보강한 철근콘크리트 보의 보강효과에 관한 실험적 연구

### An Experimental Study on the Strengthening Effect of Reinforced Concrete Beams Strengthened by CFRP Rod

박 성 무\*                      김 재 훈\*                      박 광 섭\*  
Park, Sung - Moo              Kim, Jae - Hun              Park, Kwang - Seob

#### 요 약

최근 FRP(fibre-reinforced plastic)를 이용하여 기존 RC구조물을 보수보강하는 방법이 각광받고 있다. CFRP plate나 sheet의 형태로 외부에 부착하는 방법이 FRP보강의 주류를 이루어 왔으나, 판단부에서 발생하는 응력집중으로 부착판이 박락하여 조기 파괴되는 경우가 많은 연구를 통해서 밝혀졌다. 따라서 기존 콘크리트구조물에 홈을 형성하여 FRP막대의 형태로 외부에 매립함으로써 이러한 조기파괴의 개선하려는 공법이 개발되었다.

본 실험은 이러한 매립형공법의 보강효율을 조사하고, 각국에서 제시하고 있는 기존 휨 이론에 대한 적용여부를 검토함에 그 목적이 있다.

#### Abstract

Rehabilitations of reinforced concrete(RC) structures using advanced fibre-reinforced plastic(FRP) composites has become very popular in last few years.

Typical method of strengthening strategy using FRP composite is bonding the CFRP plate or sheet on the surface of existing concrete structures. Many researches, however, have shown that bonding FRP plate or sheet on the surface of concrete has tendency to debond prematurely induced by stress concentrations at the end of the plate. In order for overcoming the premature failure, the filling-up method which places FRP-rod into the existing concrete sawing groove has been developed.

Through filling-up test results, aims of this research is to investigate the efficiencies of the filling-up method and is to determine the availabilities of traditional flexural theories that has provided all over the world.

**키워드:** 철근콘크리트보, 탄소막대, 보수보강, 매립형

**keywords :** Reinforced Concrete beams, CFRP-Bar, Flexural behavior

## 1. 서 론

손상된 철근콘크리트 구조물의 보수·보강 방법으로 강판 및 섬유 보강판의 접착공법이 일반적이다. 이러한 접착공법은 보강된 부재의 내력 요약증가에 아주 효과적이거나 강판의 경우는 무거운 철판

으로 인한 인건비, 철판연결의 어려움, 부식문제 등으로 그 사용이 제한적이다. 따라서 최근에는 철판 사용으로 인한 단점을 극복할 수 있는 FRP (Fiber-Reinforce Polymer) 쉬트나 판을 이용한 연구가 다양하게 진행되어 왔다. FRP 쉬트나 판으로 보강하였을 경우 대표적인 파괴양상으로 FRP가 가지고 있는 성능을 모두 발휘하기 전에 조기 박락과 취성 파괴를 나타내는 것을 앞선 여러 연구자들에 의해 규명되어졌다. 조기파괴의 양상은 주로 보강재의 중앙부 또는 단부에서의 응력집중으로 인하여 시작되는 수평균열이 급속도로 진전되어 최종적으로 보

\* 정희원, 영남대학교 건축학부 교수, 공학박사  
Tel : 053-810-2428, Fax : 053-815-1566

\*\* 정희원, 영남대학교 건축학부 박사수료  
E-mail : caw44@yumail.ac.kr

\*\*\* 정희원, 영남대학교 건축학부 석사  
E-mail : seoba@hanmail.net

강판이 탈락하는 양상을 보인다.

본 연구에서는 조기 박락과 취성파괴라는 단점을 보완할 수 있는 탄소섬유 막대(CFRP-Rod)를 철근콘크리트 구조물에 매입 보장하여 휨 내력의 정량적인 증가와 연성능력을 규명하고자 한다.

## 2. 휨 내력 설계

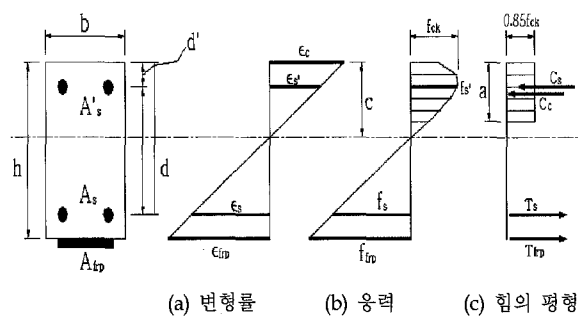
### 2.1 휨 내력 설계시 기본가정

CFRP를 이용한 휨 내력 설계는 극한강도 설계법을 근거로 하여 보장된 보의 항복하중과 최대하중을 산정한다.

휨 보강 이론에서 각 재료에 발생하는 변형률은 중립축에 대해 선형 비례한다(보강재 및 철근은 콘크리트와 일체로 거동하는 것으로 가정한다). 이론식의 유도는 콘크리트 구조설계기준의 휨 이론 기본가정과 사전가력으로 인한 잔류응력의 영향을 무시하고 보강재는 완전 탄성 거동하는 것으로 가정한다.

### 2.2 휨 내력 설계

이론식은 그림 1의 변형률과 응력 관계를 이용하며, 그때의 항복하중과 최대하중 산정은 인장 철근이 항복할 때의 모멘트를 항복모멘트, 압축 콘크리트 연단부의 변형률이  $\epsilon = 0.003$  또는 FRP가 파괴 변형률  $\epsilon_{frp, rup} = f_{frp} / E_{frp}$ 에 도달할 때의 모멘트를 최대모멘트로 간주한다.



〈그림. 1〉 보강된 복근보의 변형률 및 등가응력분포

$A'_s$ ,  $\epsilon'_s$ ,  $f'_s$ ,  $C_s$ 와  $d'$ 는 각각 압축철근의 면적,

변형률, 압축철근의 응력, 압축철근에 작용하는 압축력의 크기, 압축연단에서 압축철근의 중심까지의 거리이다. 중립축  $c$ 의 위치는 변형률 및 힘의 평형 방정식을 이용하여 산정할 수 있다.

$$\frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_s}{d-c} = \frac{\epsilon_{frp}}{h-c} = \frac{\epsilon'_s}{c-d'} \quad (1)$$

$$C_s = f'_s \cdot A'_s$$

$$0.85f_{ck}ab + f'_s A'_s = f_s A_s + E_{frp} \epsilon_{frp} A_{frp} \quad (2)$$

FRP 보강된 보의 모멘트 다음 식에 의해 구한다.

$$M_n = C_c \left( d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') + T_{frp} (h - d') \quad (3)$$

파괴 형태가 압축파괴 즉 콘크리트의 압괴에 의한 경우는 콘크리트의 변형률이 극한 변형률  $\epsilon_{cu} = 0.003$ 에 도달하며 식 (1)의  $\epsilon_c$  대신에  $\epsilon_{cu}$ 를 대입하여 산정한다.

인장파괴의 경우는 FRP가 파단 될 때이며, 이때 인장철근은 항상 항복 ( $\epsilon_s \geq \epsilon_y$ )한다.

## 3. 실험

### 3.1 실험계획

본 연구에서는 탄소섬유 막대로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 거동을 고찰하기 위해 총 9개의 철근콘크리트 보 실험체를 제작하였다.

실험체의 단면은 200mm(폭)×300mm(높이), 지점간 거리는  $L = 2400$ mm로 하고 150mm씩 돌출시켜 전체 길이는 2700mm로 하였다. 콘크리트의 설계기준강도는  $270 \text{kgf/cm}^2$ 으로 콘크리트 재령 28일 압축강도는  $279 \text{kgf/cm}^2$ 로 나타났다. 철근은 하부에 2-HD16, 상부에 2-HD16을 배근 하였고, 배근량은 최대 철근비 ( $P_{max} = 0.0293$ )의 약 50%로 배근하였다.

보의 휨 보강 효과를 평가하기 위해 보의 전단보 강근은 D10@100 간격으로 배근하였다.

본 연구에 사용된 탄소판 및 탄소막대의 물성치는 표 1에, 주요 실험 변수는 표 2에, 표 3은 실험체 일람표, 그림 2~3은 실험체 보강형상과 실험체 설치 및 가력 시스템이다.

〈표 1〉 탄소판 및 탄소막대의 재료 물성

종 류	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
CFRP	1.53×10 <sup>6</sup>	16,700

〈표 2〉 실험 변수

S	T	1	1
보강재 단면형상 P : PLATE N : 탄소막대 표준형 (단면적 : 0.84m <sup>2</sup> ) S : 탄소막대 소형 (단면적 : 0.35m <sup>2</sup> )	보강위치 T : 보 밀면	보강개수 1 : 1EA 2 : 2EA	보강길이 1 : 0.9L 2 : 0.8L 3 : 0.7L 4 : 0.6L 5 : 0.5L

〈표 3〉 실험체 일람표

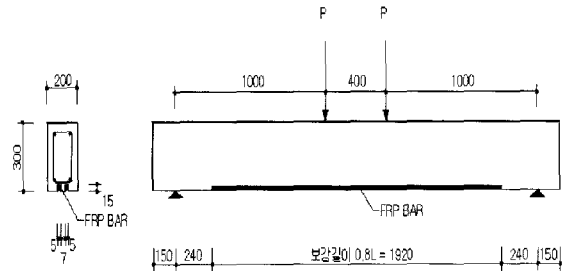
No	시험체명	보강위치	보강재종류	개수	길이	
1	NB	-	-	-	-	
2	NPT1-2	보 밀면	PLATE	1	0.8L	
3	NN1-2		탄소막대-A형	1	0.8L	
4	NST1-1		탄소막대-B형		1	0.9L
5	NST1-2					0.8L
6	NST1-3					0.7L
7	NST1-4					0.6L
8	NST1-5					0.5L
9	NST2-2		2	0.8L		

### 3.2 실험방법

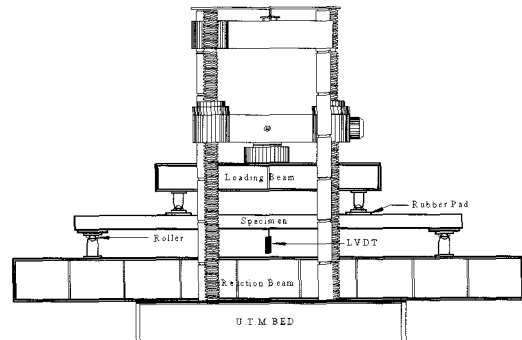
단순지지 조건하에 대칭으로 2점 가력 하여 수행 하였으며, 각 실험체의 하중상태에 따른 처짐은 DT-100A를 실험체의 중앙부에 설치하여 처짐량을 측정하였다.

주근의 휨 변형 상태를 알아보기 위하여 실험체의 중앙부와 단부의 철근에 1방향 스트레인 게이지 (FLA-5-1L)를 부착하였다. 또한 콘크리트 표면에는 이론식에 의해 계산된 중립축과 압축연단 및 인장

연단의 위치에 1방향 스트레인 게이지(PL-60)를 부착하여 하중상태에 따른 변형도를 측정하였다. 하중제하에 따른 변위 및 변형도는 DATA LOGGER (TDS-601)를 사용하여 측정하였다.



〈그림. 2〉 NST2-2 실험체의 보강형상



〈그림. 3〉 실험체 설치 및 가력시스템

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 실험결과

기준 실험체와 보강 실험체의 실험 결과 및 이론 값을 표 4에 비교하여 나타내었다.

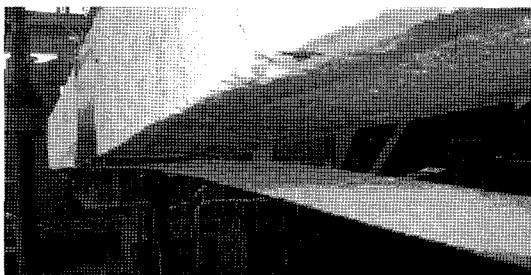
본 실험결과 탄소섬유판의 경우 부착 단부에서 접착제와 콘크리트 사이의 부착이 완전하지 못하여 보강재가 충분한 내력을 발휘하지 못하고 단부 계면에서의 박리파괴가 주된 파괴 양상을 나타내었다. 탄소섬유막대로 휨 보강한 경우 보강재의 파괴로 인한 휨 파괴와 보강재 단부에 발생한 응력 집중현상으로 보강재가 단부에서 콘크리트를 물고 떨어지는 rip-off 파괴가 주된 파괴양상으로 실험 결과 확인 되었다.

표 4에서 측정값에 대한 이론값의 비는 탄소판 부착인 NPT 시리즈 실험체의 경우 항복하중은 0.99~1.04배로 큰 차이를 보이지 않았으나, 최대하

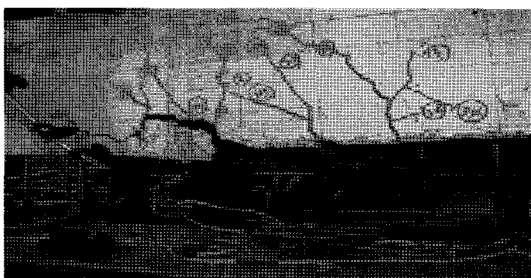
〈표 4〉 항복하중 및 최대하중의 이론값 및 측정값

실험체명	항복하중				최대하중				연성비 $\mu_r$	적합성 계수 $k$	파괴양상
	이론값 (tf)	측정값 (tf)	치 짐 (mm)	비 교 (2)/(1)	이론값 (tf)	측정값 (tf)	치 짐 (mm)	비 교 (4)/(3)			
	(1)	(2)			(3)	(4)					
NB	8.06	8.04	16.05	0.998	8.04	9.18	26.71	1.142	1.66	-	휨 파괴
NPT1-2	10.08	10.01	7.83	0.993	21.72	12	11.67	0.552	1.49	0.206	계면박리
NNT1-2	9.6	9.1	8.55	0.948	15.1	15.59	31.3	1.032	3.66	0.908	휨 파괴
NST1-1	8.7	8.79	8.99	1.010	12.84	13.55	31.89	1.055	3.55	0.910	휨 파괴
NST1-2		8.57	9.53	0.985		13.87	31.51	1.080	3.31	0.977	휨 파괴
NST1-3		8.29	8.43	0.953		13.24	30.28	1.031	3.59	0.846	휨 파괴
NST1-4		8.1	8.64	0.931		13.19	32.19	1.027	3.73	0.835	rip-off
NST1-5		8.72	8.06	1.002		12.59	24.01	0.981	2.98	0.710	rip-off
NST2-2		9.34	9	9.27		0.964	14.52	15.46	30.26	1.065	3.26

중에 대해서는 0.56~0.59배로 이론값의 절반정도의 하중을 받는 것으로 측정되었다. 하지만 탄소막대를 매입한 NST 시리즈 실험체는 항복하중 0.93~1.01배, 최대하중은 0.93~1.08배로 큰 차이를 보이지 않고 유사하게 나타났다. 이는 탄소판 부착의 경우는 인장 철근의 항복 이후 보강재 조기탈락이 원인인 것으로 보이며, 기존 보강 설계에 있어 탄소판 부착의 조기 탈락에 대해 충분한 검토가 이루어져야한다고 판단된다. 탄소막대 매입형의 경우는 적절한 강도감소계수를 고려한다면 보강설계에 있어 기존 극한강도 설계법의 적용이 가능한 것으로 판단된다.



〈그림 4〉 NPT 실험체의 단부 박락



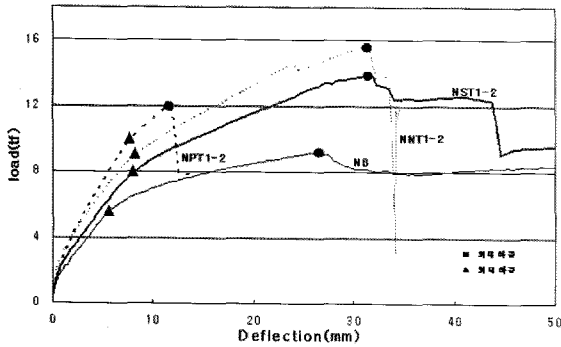
〈그림 5〉 NST 실험체의 rip-off

### 3.2 보강유형에 따른 보강효과

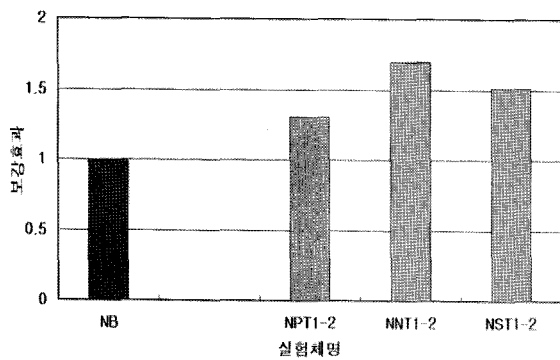
그림 6은 보강유형에 따른 하중-변위곡선으로 CFRP Rod 매입공법으로 보강한 실험체 NNT시리즈와 무 보강 NB 실험체의 그래프는 유사한 형상을 나타내지만, 최대내력에 있어 NNT1-2의 경우 1.7배, NST1-2의 경우 1.51배로 상당한 내력 증가를 보인다. 또한 최대내력 이후 어느 정도 하중 증가 없이 변위만 계속되다가 급격한 내력 저하를 보이는데 반해, CFRP Plate 부착공법으로 보강한 실험체는 최대내력에서 NB 실험체 보다 약 1.31배의 내력증가를 보이지만 최대내력 이후 급격한 내력 저하를 보인다.

특히 CFRP Plate로 보강한 NPT1-2 실험체의 경우 초기강성이 1.28로 CFRP Rod로 보강한 NNT1-2(초기강성 ; 1.06), NST1-2(초기강성 ; 0.9) 실험체보다 큰 것으로 나타난다. 하지만, 철근의 항복이후 실험체 중앙부에서 실험체와 보강재의 사이에 발생한 수평균열 진전으로 인하여 탄소판이 조기 탈락함에 따라 보강재가 가지고 있는 보강 강도를 다 발휘하지 못하고 파괴에 이르렀다.

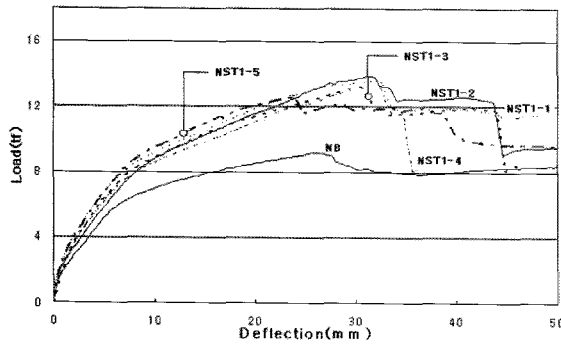
따라서, CFRP Rod 매입공법의 경우 보강재와 콘크리트 사이의 부착력이 CFRP Plate 부착공법보다 유리하게 작용하여 내력증가 및 연성적인 면에서 효과가 더 큼을 알 수 있다.



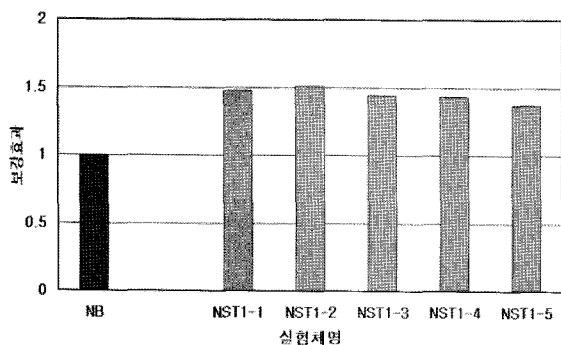
〈그림 6〉 보강유형별 시험체의 하중-처짐



〈그림 7〉 보강유형별 시험체의 보강효과



〈그림 8〉 보강 길이별 시험체의 보강효과



〈그림 9〉 보강길이별 시험체의 보강효과

### 3.3 보강재 길이에 따른 보강효과

보강길이에 따른 NST시리즈의 시험체의 경우에는 무 보강 실험체 NB 보다, 보강 길이가 각각 0.9L일 때 약 1.48배의 내력증가를, 0.8L일 때 약 1.51배, 0.7L과 0.6L일 때 약 1.44배, 0.5L일 때 약 1.37배의 내력증가를 보였다.

보강길이가 0.9L일 때의 내력증가가 0.8L일 때의 내력보다 적게 나타나는 것은 보강 시 시공 잘못된 것으로 판단되며, 보강길이가 0.8L보다 작은 경우 보강재 단부에 발생하는 응력집중 및 휨 균열의 진전으로 인해 보강효과가 떨어짐을 알 수 있다.

### 3.4 보강 실험체의 연성 평가

처짐 연성 지수(Displacement Ductility Index)를 사용하여 실험체의 연성을 평가하였으며, 이를 통해 비교한 실험체의 연성능력은 그림 10과 같다.

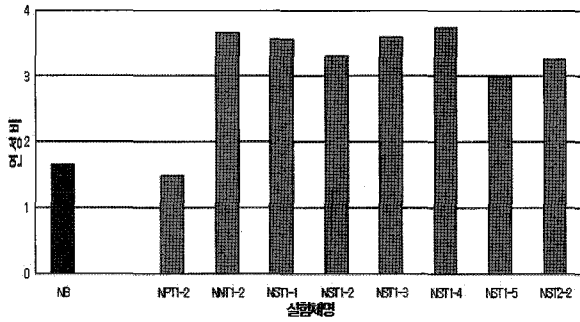
$$\mu_r = \frac{\delta_r}{\delta_y} \quad (4)$$

여기서,  $\delta_r$ : 보강재의 박리 및 파괴 시 변위

$\delta_y$ : 실험체의 항복 시 변위

CFRP Plate의 경우 보강재 박리 이후를 실험체가 파괴된 것으로, FRP Rod의 경우는 최대내력에서 보강재가 파단된 것으로 보고, 실험체 최대내력시의 변위를 항복 시 변위로 보았다. 각 실험체들의 연성비는 표 4에 나타내었다.

CFRP Plate로 보강한 NPT1-2 실험체의 경우 연성지수가 1.49로 나타나 보강하지 않은 NB 실험체(연성지수, 1.66) 보다 낮게 나타났으며 탄소막대로 보강한 실험체는 연성지수가 2.98~3.66으로 NB 실험체 보다 높게 나타났다. 특히 NST1-2(연성지수, 3.55) 실험체가 NPT1-2(연성지수, 1.49) 실험체의 약 2.38배 정도로 높은 연성지수를 보인다. 이는 매입공법은 CFRP Rod가 콘크리트와 일체로 거동을 나타내는 반면, 부착공법은 CFRP Plate 부착면 단부 또는 중앙부에서 발생한 수평균열의 진전으로 인한 보강재의 박리로 취성파괴가 일어났기 때문으로 판단된다.



〈그림 10〉 실험체의 연성비

### 3.5 보강 실험체의 적합성 평가

보강 실험체의 적합성 평가는 실험값과 이론값의 비로, 다음 식에 의해 산정하였다.

$$k = \frac{M_{N,exp} - M_{NB,exp}}{M_{N,pre} - M_{NB,pre}} \quad (5)$$

여기서,  $M_{N,exp}$ : 보강 실험체 실험값

$M_{NB,exp}$ : 무 보강 실험체 실험값

$M_{N,pre}$ : 보강 실험체 이론값

$M_{NB,pre}$ : 무 보강 실험체 이론값

계수  $k$ 값이 1에 가까울수록 현재 2장에 나타낸 극한강도 설계법에 따른 설계식을 이용하였을 경우, 하중 계수 등 적절한 계수값을 적용한다면 충분히 활용할 수 있다고 판단된다.

NST1 시리즈에서 보강 길이 0.8L의 경우  $k$ 값이 0.977로 1에 가장 근접하였다. 보강면적이 증가한다 하더라도, 적합성 평가에 있어서 계수값은 약 0.9이상으로 큰 차이가 나타나지 않으며, 오히려 보강면적이 적은 NST1-2가 가장 1에 근접하였다.

CFRP Plate 보강한 NPT1-2 실험체는 적합성 계수값이 약 0.206으로 아주 작게 나타났으며, 이는 앞에서 얘기한 단부 박리에 의해 보강 강도를 다 발휘하지 못했기 때문으로 판단한다.

## 4. 결론

철근 콘크리트 보에 FRP Rod를 매입하여 보강한 방법의 보강효과를 파악하기 위하여 휨 실험을

실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. CFRP Rod를 매입하여 보강한 경우 보강재의 파단으로 인한 휨 파괴를 보이며, CFRP Plate를 부착하여 보강한 보의 경우 계면박리로 인한 조기탈락을 보이고 있다. 이는 매입형 탄소 막대가 부착형 탄소섬유판보다 부착성능이 우수한 것으로 판단된다.
2. 탄소판 부착 보강한 NPT1-2의 경우 무 보강 실험체 NB와 비교 하였을 경우 1.31배의 내력증가가 있었으며, 탄소막대를 매입한 NST1-2의 경우 1.51배의 내력증가를 보였다. 따라서, 매입공법의 경우 보강재와 콘크리트 사이의 부착력이 부착공법보다 유리하여 내력증가의 효과(약1.16배)가 더 큼을 알 수 있다.
3. 보강길이를 0.8L로 했을 경우 내력증가가 약 1.51배로 보강효과가 가장 크게 나타났으며, 보강길이가 0.8L의 경우보다 적을 경우 보강재 단부에 발생하는 응력집중 및 휨 균열의 진전으로 인해 보강효과가 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 본 실험에서는 보강 설계 시 유효보강길이는 0.8L이 적절한 것으로 판단된다.
4. 보강 실험체의 연성도는 NST1-2의 경우 약 3.31, NPT1-2의 경우 약 1.49로 탄소막대 매입형의 경우가 훨씬 높게 나타났다. 이는 탄소봉 매입공법으로 보강한 경우 실험체와 일체적인 거동을 나타내는 반면, 탄소판 접착공법으로 보강한 경우 보강재의 박리로 인해 취성파괴가 일어났기 때문으로 판단된다.
5. NST 시리즈의 경우 최대하중의 이론값을 기준으로 측정값은 약 0.98 ~ 1.08배, NPT의 경우 약 0.55배로 보강내력을 충분히 발휘하지 못하였다. 이는 보강재의 조기탈락으로 판단되며, 탄소판 부착 보강 설계 시 조기탈락에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다고 판단된다.
6. NPT1-2는 적합성 평가에 있어 약 0.552, NST 시리즈의 경우 약 0.710~0.977로 나타났으며, 그 중 0.8L로 보강한 NST1-2는 약 0.977로 1에 근접하였다. CFRP Rod로 매입 보강한 경우 적절한 계수값을 고려한다면 기존의 극한강도 설계법의 적용이 가능한 것으로 판단된다.

7. 본 실험 결과, 탄소막대를 매입한 시험체가 탄소판을 부착한 실험체보다 휨 내력 향상이나 연성 능력 면에서 우수하지만, 시공이 탄소판의 경우보다 어려운 단점이 있다. 또한 매입시 탄소막대간 간격이나, 철근비에 따른 보강비 산정, 저강도 콘크리트 부재의 보강에 관한 연구가 더욱 진행되어야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 논문은 2002년 학년도 영남대학교 학술연구 조성비 지원에 및 (주)한보 엔지니어링의 연구비 지원에 의해 연구되었음. 본 연구가 이루어지도록 지원하여준 영남대학교 및 (주)한보엔지니어링에 대단히 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 이리형, 이용택, 하상수, "FRP로 보강된 R/C 보의 휨내력 향상효과에 관한 실험연구," 대한건축학회 학술발표논문집, 제19권, 1호, pp. 119-122, 1999.
2. 한만엽, 이원창, "사용중 보강되는 부재의 보강 설계법 연구," 콘크리트학회 논문집, 제11권, 3호, 1999.
3. 한만엽, 송병표, "보강재의 변형 부착에 따른 보의 구조적 거동," 콘크리트학회지, 제10권, 3호, pp. 197-207, 1998.
4. 정상모, 이차돈, 원종필, 황윤국, 김정호, "FRP 보강근을 이용한 표면매립 및 단면확대공법의 실험적 성능평가," 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제 15권, 1호 pp.549-554, 2003.
5. 오병환, 조재열, 강동욱 "강판 휨 보강된 철근 콘크리트 보의 구조적 거동," 한국 콘크리트학회지, 제9권 5호, pp.233-244, 1997.
6. 이수진, "FRP로 외부 보강된 철근 콘크리트 보의 보강 변수 영향에 관한 연구," 이화여자대학교 과학기술대학원, 2000년, 11월
7. 프리믹스형 보수재료를 적용한 R/C 구조물의 보수 및 섬유보강공법 개발, 건설교통부, 1998

년, 11월

8. S. T. Smith., J. G. Teng., "FRP-strengthened RC beams. I : review of debonding strength models," Engineering Structures 24, pp. 385-395, 2002.
9. S. T. Smith., J. G. Teng., "FRP-strengthened RC beams. II: assessment of debonding strength models," Engineering Structures 24, 2002, pp. 397-417
10. M. S. Mohamed Ali., Deric, J. Oehlers and Sung-Moo Park., "Comprison between FRP and steel plating of reinforced concrete beams," Composites, Part A 32, 2001, pp. 1319-1328
11. Hayder, A. Rasheed., Shariq, Pervaiz., "Closed form equations for FRP flexural strengthening design of RC beams," Composites, Part B 34, pp. 539-550, 2003.
12. Zhishen, Wu., Jun Yin., "Fracturing behaviors of FRP-strengthened concrete structures," Engineering Fracture Mechanics 70, pp. 1339-1355, 2003.
13. Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers, ISIS CANADA, 2001.
14. Andre Picard., Bruno Massicotte and Eric Boucher., "Strengthening of reinforced concrete beams with composite materials : theoretical study," Composite Structures 33, pp. 63-75, 1995.
15. H. Saadatmanesh., A. M. Malek., "Design Guidelines for Flexural Strengthening of RC beams with FRP Plates" Journal of composites for construction, pp. 158-164, 1998.
16. Grace. N. F., Soliman A. K., Abdel-Sayed. G. and Saleah. K. R., "Behavior and Ductility of Simple and Continuous FRP Reinforced Beams," Journal of Composites for Construction. Vol. 2, No. 4, pp. 186-194, 1998.