



## 프리스트레스를 도입한 FRP 표면매립 보강보의 휨거동에 관한 실험적 연구

홍성남<sup>1)\*</sup> · 박준명<sup>1)</sup> · 박선규<sup>1)</sup> · 박종섭<sup>2)</sup> · 박영환<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>성균관대학교 토목환경공학과 <sup>2)</sup>한국건설기술연구원

## An Experimental Study on Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with Near Surface Mounted Prestressed FRP

Sung-Nam Hong<sup>1)\*</sup>, Jun-Myung Park<sup>1)</sup>, Sun-Kyu Park<sup>1)</sup>, Jong-Sup Park<sup>2)</sup>, and Young-Hwan Park<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, SungKyunKwan University, Suwon 440-330, Korea

<sup>2)</sup>Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-807, Korea

**ABSTRACT** Strengthening concrete structures with fiber reinforced polymer materials have grown to be a widely used method over most parts of the world today, which FRP was developed in 1960. A method to apply prestressing force to FRP is developed newly in these days, which can use the maximum performance of FRP materials. This paper presents the results of a study on improvement in flexural capacities of RC beams strengthened with near surface mounted prestressed CFRP rod and plate. Experimental variables include type of CFRP, prestressing level. Tests show that prestressed beams exhibit a higher crack-load as well as a higher steel-yielding load compared to non-prestressed strengthened beams.

**Keywords** CFRP, prestress, NSMR(near surface mounted reinforcement)

### 1. 서 론

표면매립공법(near surface mounted reinforcement, NSMR)은 콘크리트 부재에 일정 폭과 깊이의 홈을 만들어 에폭시를 충전하고 탄소판 및 탄소바를 매립하여 보강하는 방법으로서, 콘크리트 부재와 에폭시 사이의 계면 부착력이 주부재와 보강재 사이의 응력전달 기구로 작용하도록 하는 콘크리트 부재 보강공법이다<sup>1)</sup>. 이 공법은 1940년대부터 사용된 공법으로 초창기에는 철근을 콘크리트 안의 홈에 매립하여 그라우트 처리하거나 콘크리트 덮개를 추가로 제작하여 사용하였으나<sup>2)</sup>, 철근을 사용한 표면매립공법은 기존 재료에 부착하기가 어렵고 철근의 부식문제가 가장 큰 단점으로 대두되어 철근을 사용한 표면매립공법은 크게 각광받지 못했다. 그러나 1960년대부터 내부식성이 뛰어난 FRP 보강재를 철근대신 사용할 수 있게 되면서 철근의 부식문제를 해결할 수 있게 되었다.

FRP 보강재를 이용한 표면매립공법에 대한 연구는 1990년대 후반부터 이루어지고 있으며<sup>3-5)</sup>, 재료적 측면의 부착거동과 전체적인 휨거동에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 부착거동은 파괴모드에 중점을 두어 사용되는 보강재의 형태 및 접착제의 성능에 따라 어떻게 접착제-보강재 계면 및 콘크리트-접착제 계면 사이의 파괴가 달라

지는지 연구<sup>6,7)</sup>중이며, 휨거동은 쉬트 및 판 부착공법과의 비교와 표면매립공법 사용시 휨 및 전단의 거동효과에 대한 연구<sup>8-10)</sup>가 진행 중이다.

본 연구에서는 표면매립공법을 더욱 개선하고자 CFRP에 긴장력을 도입한 표면매립 보강보의 파괴모드 및 보강성능을 고찰하고, 실험 결과를 분석하여 종합적으로 프리스트레스를 도입한 CFRP 표면매립공법에 의한 보강성능 향상을 실험적으로 평가하고자 한다.

### 2. 실험

#### 2.1 실험 개요

본 실험에서는 긴장력이 도입된 CFRP에 표면매립공법을 적용한 RC보를 대상으로 역학적 거동 특성에 대한 고찰을 통해 보강보의 보강효과 및 파괴모드를 실험적으로 분석하는데 목적이 있다.

실험체는 실험 변수를 Table 1과 같이 보강재의 종류(탄소바/판), 긴장력 도입량으로 총 11개의 실험체를 제작하였다.

#### 2.2 사용 재료

본 실험에서 사용된 콘크리트는 레미콘 제품을 사용하였으며, 설계기준강도 27 MPa을 사용하였다. 실험체의

\*Corresponding author E-mail : cama77@skku.edu  
Received March 5, 2006, Accepted October 10, 2006  
©2006 by Korea Concrete Institute

**Table 1** Specimen details

Specimens	Parameter	
	Material	Jacking force(%)
Control	RC	0
BP-0/10/20/30/50	CFRP plate	0/10/20/30/50
BB-0/10/20/30/50	CFRP bar	0/10/20/30/50

**Table 2** Properties of concrete

Compressive strength(MPa)	Young's modulus(MPa)
27.0	24,422

**Table 3** Properties of reinforcing bar

Bar	Strand diameter (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)
D10	9.53	213.9	426	562	200,000
D13	12.7	380.1	481	608	200,000

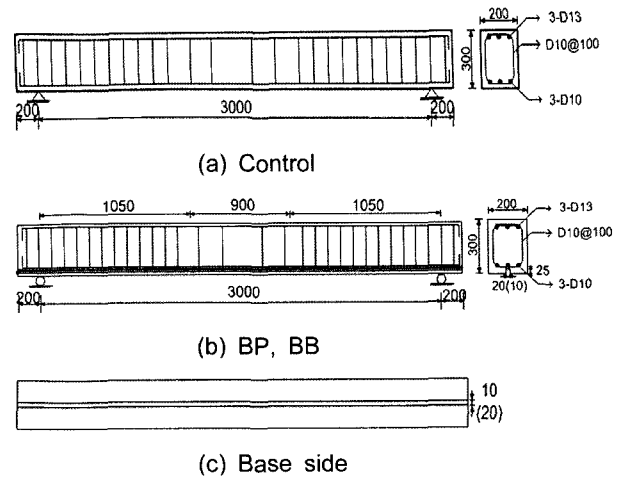
**Table 4** Properties of CFRP

	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (MPa)	Dimension (mm)	
			Width	Thick
Plate	2,857	168,367	25	1.2
Bar	1,878	121,420	Diameter	
			9	

배근에 사용된 철근은 항복강도 426 MPa인 D10 인장철근과 항복강도 481 MPa인 D13 압축철근으로, 항복강도 426 MPa인 D10 전단철근을 사용하였다. 실험에 사용된 각 재료의 물성치는 Tables 2~4와 같다.

**2.3 실험체 제작**

본 실험에서는 긴장력이 도입된 CFRP 표면매립공법에 의해 보강된 보와 기존 보강공법의 보강성능 비교 검토를 위하여 기존 연구에 사용된 실험체와 동일하게 표준 실험체를 Fig. 1과 같이 폭 대 높이가 1:1.5인 단면과 단면높이 대 지간길이의 비가 1:10인 철근콘크리트 보로 제작하였다. 본 실험의 목적은 휨 보강 성능을 검증하는데 있으므로 휨 파괴에 앞서 전단파괴가 발생하는 것을 방지하기 위하여 실험체에는 계수전단력의 2배가 넘는 전단강도를 발현할 수 있도록 D10의 스테럽을 100 mm 간격으로 배치하였다. 인장철근은 D10철근을 세



**Fig. 1** Shape of specimens(unit: mm)

가닥씩 배치하며, 압축철근은 D13 철근 3개를 배치하였다. 하중 재하시 실험체 인장철근과 보강재와의 응력분담률과 인장철근의 항복시점을 파악하기 위하여 콘크리트 타설 전 내부 인장철근의 표면에는 전기 저항식 변형률 게이지를 설치하였다. 매립되어 있는 변형률 게이지가 콘크리트 타설에 의해 손상되는 것을 방지하기 위하여 방수형 코팅제로 도포하여 1차 보호막을 형성하고, 그 위에 방수 테이프를 사용하여 2차에 걸친 보호막을 형성하였다. 각 실험변수별 시험체의 형상 및 제원은 Fig. 1과 같다.

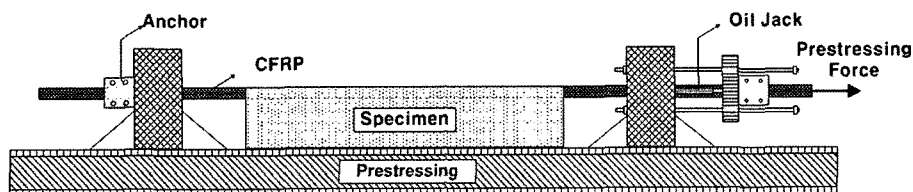
**2.4 긴장력 도입**

CFRP 긴장력 도입을 위해 Fig. 2와 같은 프리스트레싱 반력대를 제작하여 반력대 위에 시험체를 거꾸로 뒤집어 거치시킨 후 CFRP를 긴장하였다. 긴장 전 보 하단 중앙에 만들어진 홈에 에어 브러쉬 등을 사용하여 미세 먼지를 제거하고 홈 안에 프라이머를 도포하여 1일 이상 양생한 후, 각 실험변수에 맞는 CFRP 판과 CFRP 바를 홈 안에 거치하여 긴장하였다. 긴장 이후에 에폭시와 경화제를 2:1비율로 계량하여 홈 안에 충전시키고, 최소 3일 이상 양생한 후 실험을 실시하였다.

CFRP에 대한 프리스트레싱의 양은 프리스트레싱을 도입하지 않은 경우를 0%로 하고, CFRP 인장강도를 기준으로 하여 각각 10, 20, 30 및 50%를 도입하였다.

**2.5 하중 재하 및 측정 방법**

하중 재하는 980 kN 용량의 UTM장치를 사용하여 4점



**Fig. 2** Prestressing bed

재하하였다. 하중은 변위제어로 초기 15 mm 변위 발생 시까지 0.02 mm/sec의 속도로 재하하고, 15 mm 이상의 변위가 발생한 시점부터 파괴시까지 초당 0.05 mm/sec의 속도로 재하하였다. 각종 실험데이터의 계측은 정적 데이터 로거 및 컴퓨터를 이용하였으며, 매 1초 간격으로 측정을 실시하였다. 실험체의 변위를 측정하기 위하여 중앙부와 L/4지점에 변위계(LVDT)를 설치하였으며, 변형률 측정을 위하여 인장, 압축철근의 경간 중앙과 하중재하 위치에 전기저항식 변형률 게이지(측정한계: 10,000  $\mu\epsilon$ )를 매설하였고, 경간중앙의 상단, 중앙과 하단에 콘크리트 게이지를 부착하였다. 또한 경간중앙을 기준으로 225 mm 등간격으로 CFRP에 변형률 게이지를 부착하였다.

### 3. 실험 결과

실험체의 제작에 사용된 콘크리트의 하중재하시 공시체의 강도 측정 결과는 Table 5와 같다. CFRP에 배치한 게이지의 변형률 데이터를 통해 CFRP에 도입한 긴장력을 다음 Table 6과 같이 얻을 수 있었다. Table 7에서 프리스트레스를 도입한 표면매립 CFRP 보강보의 휨 실험 결과의 종합적인 양상을 나타내었고, Figs. 3~4에서는 실험 결과에 따른 보강보의 보강효과를 비교하였다.

Table 5 Property of concrete

Test strength (MPa)	Concrete
Compression strength	27
Tensile strength	1.4

Table 6 Prestressing force

	BP				BB			
	10%	20%	30%	50%	10%	20%	30%	50%
Prestressing force(kN)	9	18	28	46	12	24	35	59

Table 7 Comparisons of strengthening effectiveness

Specimens	Yield			Ultimate		
	Load (kN)	Deflection (mm)	$\frac{P_y}{P_{y-control}}$	Load (kN)	Deflection (mm)	$\frac{P_u}{P_{u-control}}$
Control	43	9.55	-	56.4	76.3	-
BP-0	54.5	13.3	1.27	80	50	1.42
BP-10	64	14.05	1.49	97.8	58.55	1.73
BP-20	65	15.1	1.60	101.2	52.8	1.79
BP-30	69	13.47	1.60	104.5	49.63	1.85
BP-50	77.5	12.9	1.81	107.9	43.82	1.91
BB-0	60	12.74	1.40	90.1	57.83	1.59
BB-10	64.7	13.65	1.50	100.7	59.26	1.79
BB-20	68.4	13.74	1.59	102.5	48.55	1.82
BB-30	75	16.1	1.74	103.8	43.67	1.84
BB-50	80	15.2	1.86	106.2	37.89	1.88

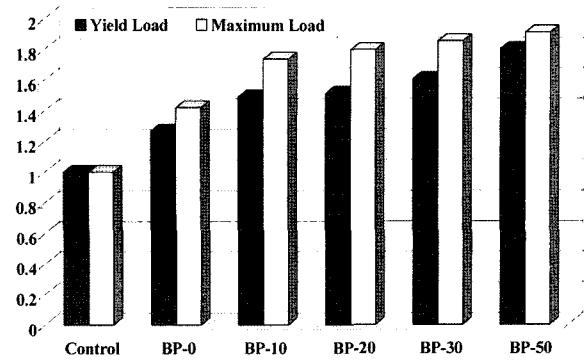


Fig. 3 Load ratio comparisons of BP(plate)

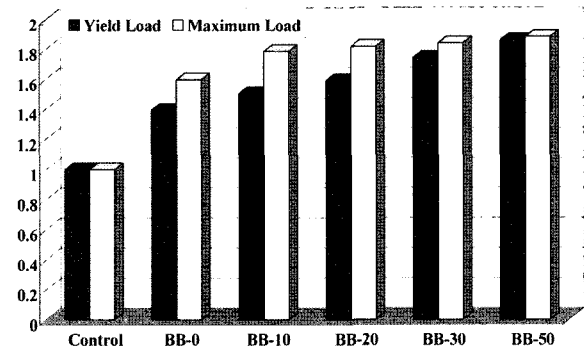


Fig. 4 Load ratio comparisons of BB(bar)

#### 3.1 파괴양상

실험 결과 무보강 실험체(control)는 인장철근 항복 후에 압축파괴로 진행되는 전형적인 휨파괴 형태를 나타냈다. 무긴장 표면매립공법으로 보강한 실험체 BP-0, BB-0은 인장철근 항복후 CFRP 보강재의 최대성능을 발휘하기 전에 에폭시+보강재(CFRP)가 콘크리트 홈에서 탈락되면서 조기파괴되는 파괴양상을 보였다. 한편, 긴장력을 도입한 표면매립공법으로 보강된 실험체는 파괴모드가 두 가지로 나타났다. 두가지 모두 CFRP 보강재의 최대성능을 발휘하고 보강재가 파단되었지만, CFRP 판(plate)은 인장철근 항복 후 CFRP 보강재가 최대 변형률에서 콘크리트 인장부의 피복분리가 일어나며 동시에 파단되었으나, CFRP 바(bar)는 인장철근 항복후 CFRP 보강재가 최대 변형률에 도달하여 에폭시 안에서 파단되며 파괴되었다.

#### 3.2 하중-처짐 관계

긴장력을 도입하지 않은 무긴장 보강 실험체와 긴장력을 도입한 보강 실험체의 하중-처짐 관계를 비교한 그래프를 Figs. 5~6에 나타내었다. 우선, 시험체별로 항복하중을 비교해 보면 긴장력을 도입하지 않은 무긴장 보강 실험체의 경우 무보강 실험체에 비해 27~40%의 보강효과를 보인 것으로 측정되었고, 긴장력을 도입한 긴장 보강 실험체의 경우는 49~86%의 보강효과를 보였다.

극한하중을 비교해보면 무긴장 보강 실험체는 무보강

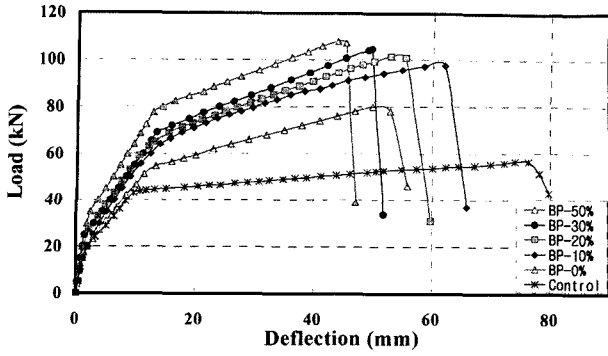


Fig. 5 Load-deflection curves of BP(plate)

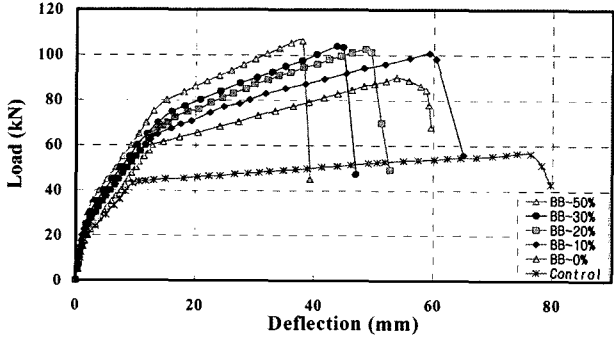


Fig. 6 Load-deflection curves of BB(Bar)

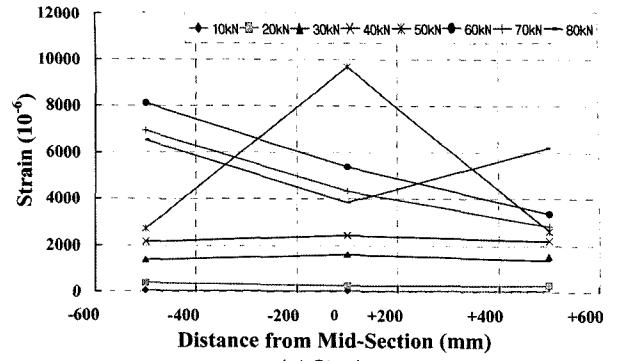
실험체에 비해 42~60%의 보강효과를 보였으며, 긴장 보강 실험체는 73~91%의 보강효과를 보였다. 긴장력의 크기가 클수록 보강효과가 증진되는 것으로 측정되었으나 극한하중에서 급격히 파괴가 발생하는 취성 파괴 현상이 뚜렷이 나타났으며 최대처짐도 감소하는 것으로 나타났다.

### 3.3 변형률-거리(인장철근 및 CFRP) 분포

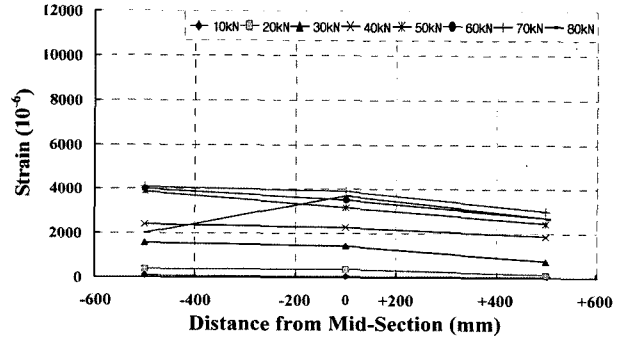
Fig. 7은 긴장력을 도입하지 않은 표면매립 보강보(BP-0)의 인장철근 및 CFRP 보강재의 변형률 분포를 나타내고 있다. CFRP 보강재의 순수 휨 구간에서의 변형률이 증가하다가 최대하중을 이전으로 하여 감소한다. 이것은 인장철근의 항복 이후에도 CFRP 보강재가 계속 응력 분담을 수행하지만, 에폭시+CFRP 보강재가 콘크리트 흠에서 탈락하는 과정에서 오는 결과로 판단된다. Fig. 8은 긴장력을 도입한 표면매립 보강보(BP-50)의 인장철근 및 CFRP 보강재의 변형률을 나타내고 있다. 무긴장 보강보와 달리 인장철근 항복 이후 최대하중까지 CFRP 보강재의 변형률이 파단시까지 계속 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 무긴장 보강보가 에폭시+CFRP 보강재가 조기 탈락되는 것과 달리 CFRP 보강재의 최대성능까지 계속 응력분담을 긴장력을 도입한 CFRP 보강재가 수행하고 있기 때문으로 판단된다.

### 3.4 중앙지간 단면에서의 변형률 분포

Fig. 9에는 무긴장 보강 실험체(BP-0, BB-0)와 긴장 실험체(BP-50, BB-50)에 대해 지간 중앙 단면에서의 주요

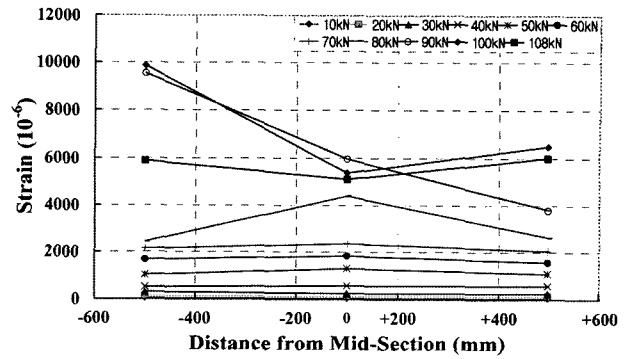


(a) Steel

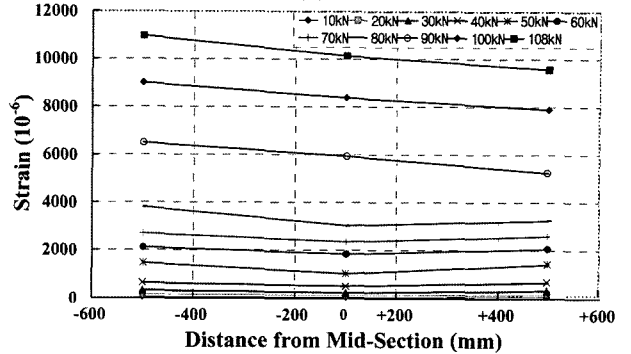


(b) CFRP - plate

Fig. 7 Strain curves of BP-0



(a) Steel



(b) CFRP - plate

Fig. 8 Strain curves of BP-50

하중 단계별 단면내 콘크리트 압축부, 압축철근, 인장철근, CFRP 보강재의 변형률 분포를 나타내었다. CFRP 판(plate)을 긴장재로 사용한 무긴장 보강 실험체(BP-0)와 긴장실험체(BP-50)의 경우에는 인장철근이 약  $255 \mu\epsilon$  ( $f_s = 51 \text{ MPa}$ ) 정도까지만 변형률 분포가 선형을 유지하고 그 이후의 하중증가에 대해서는 인장철근과 CFRP 보강재의 변형

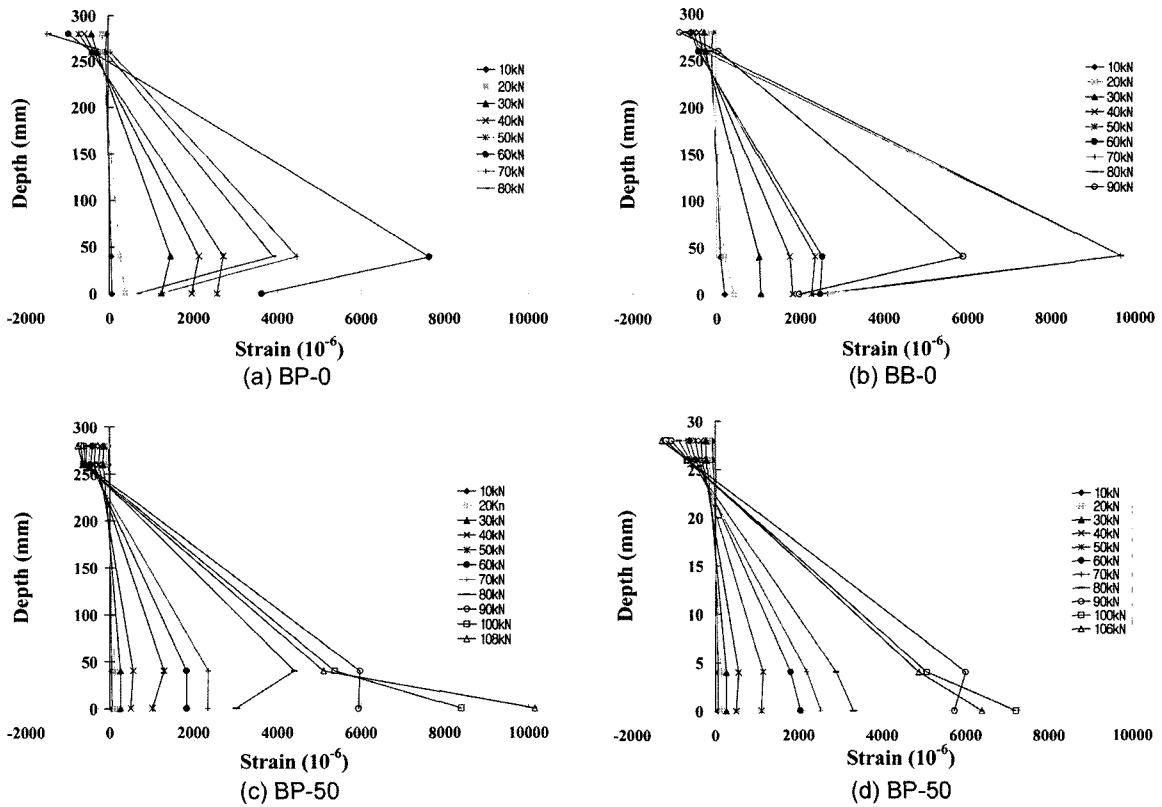


Fig. 9 Change of neutral axis

를 분포가 선형 비례하지 않는 것으로 나타났다. 또한 무긴장 보강 실험체(BP-0)와 긴장 실험체(BP-50)의 인장철근 변형률이 각각  $1,457.6 \mu\epsilon (f_s = 291.5 \text{ MPa})$ ,  $556.6 \mu\epsilon (f_s = 111.3 \text{ MPa})$  단계에서는 CFRP 보강재의 변형율이 인장철근의 변형률보다 작게 측정되었다. CFRP 바(bar)를 긴장재로 사용한 무긴장 보강 실험체(BB-0)의 경우에는 위에서 설명한 실험체의 경우와 동일한 경향을 나타내지만 인장철근과 CFRP 보강재가 선형을 이루지 않는 변형률 단계가 약  $1,018.9 \mu\epsilon (f_s = 203.7 \text{ MPa})$ 로 증가하였고  $2,353.8 \mu\epsilon (f_s = 470.7 \text{ MPa})$ 에서 CFRP 보강재의 변형률이 인장철근의 변형률보다 작게 측정되었다. 긴장 실험체(BB-50)의 경우에는 약  $264 \mu\epsilon (f_s = 52.8 \text{ MPa})$  정도까지 변형률 분포가 선형을 유지하다가  $556 \mu\epsilon (f_s = 111.3 \text{ MPa})$  이후부터  $1,801.9 \mu\epsilon (f_s = 360.4 \text{ MPa})$ 까지는 CFRP 보강재의 변형률이 인장철근의 변형률보다 작게 나타났고 그 이후에는 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 에폭시를 충전한 홈 내부에서 실험체에 재하되는 하중이 증가함에 따라 인장철근 항복 전이라도 CFRP 보강재와 콘크리트와의 계면에서 계면 전단 파괴가 서서히 일어나는 것으로 판단되었다. 그리고, 인장철근의 항복까지는 중립축의 변화가 거의 없는 것으로 나타났으나, 인장철근 항복이후 무긴장 보강 실험체(BP-0, BB-0)는 중립축이 보의 하단에서 약 2,500 mm로 이동하였으며, 긴장 실험체(BP-50, BB-50)는 중립축이 보의 하단에서 약 2,300 mm로 이동하는 것으로 나타났다. 중립축 이동이 약 8%정도 감소되었다. 이는 CFRP 보강재에 긴장력을 도입함으로써 인장측 콘크리트에 프리스트레스가 가해졌으며, 이로 인해 인장측 콘크리트 단

면의 인장저항이 증가한 결과로 판단되었다.

#### 4. 결 론

본 실험에서는 긴장력이 도입된 CFRP에 표면매립공법을 적용한 RC보에 대한 보강성능 실험을 실시하여 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 정적 재하실험 결과에서 시험체별로 항복하중을 비교해 보면 긴장력을 도입하지 않은 무긴장 보강 실험체의 경우 무보강 실험체에 비해 27~40%의 보강효과를 보인 것으로 측정되었고, 긴장력을 도입한 긴장 보강 실험체의 경우는 긴장력에 따라 49~86%의 보강효과를 보였다. 극한하중을 비교해보면 무긴장 보강 실험체는 무보강 실험체에 비해 42~60%의 보강효과를 보였으며, 긴장 보강 실험체는 긴장력에 따라 73~91%의 보강효과를 보였다. 긴장력의 크기가 클수록 보강효과가 증진되는 것으로 나타났다.
- 2) 무보강 실험체는 전형적인 휨 파괴 형태로 파괴가 되었지만, 표면매립공법으로 보강된 실험체는 파괴모드가 두 가지로 나타났다. 두 가지 모두 CFRP 보강재의 최대성능을 발휘하고 보강재가 파단되었지만, CFRP 판(plate)은 인장철근 항복 후 CFRP 보강재가 최대 변형률에서 콘크리트 인장부의 피복분리가 일어나며 동시에 파단되었으나, CFRP 바(bar)는 인장철근 항복 후 CFRP 보강재가 최대 변형률에 도달하여 에폭시 안에서 파단되며 파괴되었다. 긴

장 보강을 통해 콘크리트의 초기균열 발생시점을 지연시켰을 뿐 아니라, 항복하중이 증가하였다. 또한 긴장력을 도입함으로써 기존 CFRP 표면매립공법에서 발생하였던 에폭시+CFRP 보강재가 콘크리트로부터 탈락하는 조기파괴를 막을 수 있는 것으로 판단되었다.

- 3) 긴장력의 크기가 클수록 보강효과가 증진되는 것으로 측정되었으나 극한하중에서 급격히 파괴가 발생하는 취성파괴 현상이 뚜렷이 나타났으며 연성이 급격히 감소하는 것으로 나타났다.
- 4) CFRP 표면매립공법에 비해 CFRP 표면매립공법에 긴장력을 도입함으로써 CFRP 보강재의 조기탈락을 방지하고, 보강재의 재료적 성능을 최대한 발휘할 수 있는 것으로 나타나, 구조물을 능동적으로 보강할 수 있고 CFRP 보강재의 효율을 극대화할 수 있는 것으로 나타났다.

### 참고문헌

1. De Lorenzis, Nanni. and La Tegola, A., "Flexural and Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures with Near Surface Mounted FRP rods", *Proceeding 3rd Iner. Conf. on Advanved Composite Materials in Bridges and Structures*, Canadian Society for Civil Engineering, Ottawa, Canada, 2002, pp.521~528.
2. Asplund, S. O., "Strengthening Bridge Slabs with Grouted Reinforcement", *Journal of the ACI*, Vol. 20, No.6, January, 1949, pp.397~406.
3. Nordin, H. Tljsten, B., and Carolin, A., "Concrete Beams

Strengthened with Prestressed Near Surface Mounted Reinforcement", *FRP Composites in Civil Engineering*, Vol.2, 2001, pp.1067~1075.

4. 강제윤, 박영환, 박종섭, 유영준, 정우태, "NSM 보강 RC 보의 보강 상세에 대한 해석", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 17권 1호, 2005, pp.195~198.
5. 정우태, 박종섭, 유영준, 박영환, 강제윤, "NSM 보강 RC 보의 보강상세에 대한 연구", 구조물진단학회 봄 학술발표회 논문집(1), 17권 1호, 2005, pp.99~102.
6. Hassan, T., Mohamedien, M., Hassan, N., and Rizkalla, S., "Bond Performance of Different FRP Strengthening Systems", *Proceedings of Canada Composites Conference*, Canadian Association for Composite Structures & Materials, Montreal, Canada, 2001, pp.21~24.
7. Blaschko, M., "Bond Behavior of CFRP Strips Glued into Slits", *Proceedings of the 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures(FRPRCS-6)*, Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Singapore, 2003, pp.205~214.
8. 양동석, 박선규, 이용학, "강연선 및 탄소섬유쉬트르 보강된 철근 콘크리트 보의 휨거동 특성", 한국콘크리트학회 논문집, 14권 2호, 2002, pp.216~222.
9. Nordin, H., "Flexural Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Near Surface Mounted CFRP Rods", *Fibre Reinforced Polymers in Civil Engineering*, Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, 2003, pp.29~39.
10. Tan, K. Y., Tumialan, G., and Nanni, A., "Evaluation of Extrenally Bonded CFRP Systems for the Strengthening of RC Slabs", *Proceedings of the 6th International Symposium on FRP Reinforcement for Concrete Structures(FRPRCS-6)*, Non-Metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Singapore, 2003, pp.107~116.

**요 약** 1960년대 내부식성이 뛰어난 FRP가 개발되면서 FRP를 이용하여 콘크리트 구조물을 보강하는 방법은 전 세계적으로 광범위하게 사용되었다. 그리고, FRP의 재료적 성능을 최대한 발휘할 수 있는 것으로 FRP에 긴장력을 가하는 방법이 새롭게 대두 되었다. 본 연구에서는 실험 변수를 긴장재의 종류, 긴장력으로 하여 RC보를 표면매립공법으로 보강하여 휨성능 향상에 대한 실험을 실시하였다. 실험 결과 긴장력의 증가에 따라 균열하중 및 항복하중이 표준실험체에 비해 증가하는 것으로 나타났다

**핵심용어** : CFRP, 프리스트레스, 표면매립공법