

# 다방향 채널형 단부정착장치를 이용한 CFRP판 보강 RC 보의 휨거동

## Flexural Behavior of RC Beams Strengthened with CFRP Plate Using Multi-directional Channel-type Anchorage System

홍 기 남\*                      한 상 훈\*\*  
Hong, Ki Nam                Han, Sang Hoon

### Abstract

The aim of this paper is to clarify the structural performance of RC beams strengthened with Carbon Fibre Reinforced Polymer(CFRP) plates using channel-type anchorage system. Twelve RC beams were specifically designed without and with a channel-type anchorage system, which was carefully detailed to enhance the benefits of the strengthening plates. All the twelve beams were identical in terms of their geometry but varied in their internal reinforcement, concrete strength. All the beams were tested under four point bending and extensively instrumented to monitor strains, cracking, load capacity and failure modes. The structural response of all the twelve beams is then critically analyzed in terms of deformability, strength and failure processes. It is shown that with a channel-type anchorage system, a brittle debonding failure of a strengthened beam can be transformed to an almost ductile failure with well-defined enhancement of structural performance in terms of both deformation and strength.

### 요 지

본 논문의 목적은 채널형 단부정착장치를 사용하여 CFRP판으로 보강한 철근콘크리트 보의 구조적 거동을 평가하는 것이다. 총 12개의 시험체를 제작하였으며, 이 중에는 보강판의 효율성을 높이기 위해 채널형 단부정착장치를 사용한 시험체와 사용하지 않은 시험체가 있다. 모든 시험체의 단면 크기는 동일하며, 주철 근량과 콘크리트의 강도를 변화시켰다. 하중재하는 모든 시험체에서 4점 휨시험으로 진행되었으며, 각 재료의 변형률, 균열, 하중, 및 파괴모드가 시험 중에 측정되었다. 모든 시험체의 시험결과는 변형, 강도, 그리고 파괴모드 측면으로 분석되었다. 실험결과에 대한 분석을 통해서 채널형 단부정착장치를 사용한 RC보는 그 파괴모드가 급작스런 부착파괴에서 변형이나 강도적 측면에서 구조적 성능이 매우 향상된 연성적 파괴모드로 전환되는 것을 확인할 수 있었다.

**Keywords :** CFRP plate, Channel-type anchorage system, Debonding failure, Ductile failure

**핵심 용어 :** 탄소보강판, 채널형 단부정착장치, 부착파괴, 연성파괴

\* 정희원, 충북대학교 토목공학과 전임강사, 공학박사

\*\*\* 정희원, 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사

E-mail : hong@chungbuk.ac.kr 010-4466-3478

•본 논문에 대한 토의를 2008년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 2008년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

철근콘크리트 구조물은 시간이 지남에 따라 구조적 또는 환경적인 요인으로 인한 노후화로 인해 구조물의 성능이 저하되는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 구조물을 재시공하는 경우에는 대규모의 공사와 막대한 재정이 요구되기 때문에 구조물의 내하력과 내구성을 효율적으로 증대시키기 위한 보수 보강 공법이 개발되고 실용화 되고 있다. 최근에는 역학적인 특성과 내구성이 우수한 보강섬유가 개발되면서 이를 이용한 섬유보강합성체(fiber reinforced polymer, FRP)가 강판 대용으로 보강을 위해 사용되는 사례가 증가하고 있다. 그러나 CFRP판을 이용한 보강 방법은 주로 표면부착을 통해 보강이 수행되므로 이러한 표면부착 방법은 보강재 단부에서의 응력 집중과 환경적 요인(통기성, 수분 접촉 등)에 의해 부식 및 탈락이 발생하여 CFRP판이 충분한 성능을 발휘하기도 전에 조기 파괴되는 문제점을 안고 있다. (1)(5)(6)(8)(9)

이에 복부정착과 단부정착장치를 이용하여 조기파괴를 방지하려는 연구가 국내외의 몇몇 연구자들에 의하여 수행되었다. 박상렬<sup>(3)</sup>은 CFRP판을 인장면에 부착하여 휨보강하고 CFRP판을 탄소섬유슈트로 복부에 정착하여 휨시험을 실시하였다. 실험결과 탄소섬유슈트로 복부정착된 보들은 극한하중과 최대처짐이 FRP판의 휨 부착길이의 증가에 따라 증가하였다고 발표하였다. 또한, 박상렬 등<sup>(4)</sup>은 복부정착위치, 복부정착길이, 복부정착량, 그리고 복부정착섬유의 방향을 실험변수로 하여 CFRP판으로 보강된 RC보에 대한 휨시험을 실시하였고, 탄소섬유슈트의 복부정착효과는 하중재하부에서 일정거리만큼은 상당한 정착효과를 발휘하나 단부근처에서는 정착효과가 미미하다고 발표하였다. 김형진 등<sup>(2)</sup>은 알루미늄으로 제작된 단부정착장치를 사용하여 CFRP판을 단부정착한 보에 대한 휨시험을 실시하여 단부정착은 조기파괴를 방지할 수 있으며 연성증가 및 하중증대 효과가 매우 우수하다고 발표하였다.

그러나, 박상렬 등이 제안한 탄소섬유를 이용한 복부정착방법은 보에 적용하기에는 적합하나 슬래브에

적용하기에는 여러 문제가 있다. 또한 김형진 등이 제안한 알루미늄 단부정착장치를 이용하는 방법은 구조물에 앵커링에 위한 손상을 가하게 되며, 그 시공이 매우 어려워 실제 현장에서 적용하기에는 무리가 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 철근콘크리트 모체에 손상을 주지 않고 보나 슬래브에 모두 적용이 가능한 다방향 보강섬유로 제작되는 단부정착장치를 개발하였으며, 이를 적용한 RC보의 휨성능 개선효과를 평가하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 사용재료

본 연구에서는 시험체 제작을 위해 시멘트는 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 굵은골재는 25mm 이하를 사용하였다. 콘크리트의 목표압축강도는 24MPa과 32MPa로 설계하였으나,  $\varnothing 100 \times 200$ mm 크기의 공시체를 제작하여 수중양생한 후 재령 28일에 측정된 압축강도는 각각 23MPa과 29MPa로 나타났다. 인장철근은 KS D 3504의 이형철근으로 SD400을 사용하였다. 또한, 압축철근과 전단철근은 D10 철근을 사용하였으며, 그 재료 특성값은 Table 1과 같다.

실험에 사용한 CFRP판은 스위스 S사에서 개발된 제품으로서 두께는 1.4mm이며 철근과 비교하여 탄성계수는 3.5GPa 작지만 인장강도는 약 5배인 재료이며, CFRP판의 부착에 사용된 에폭시는 같은 회사에서 생산된 제품으로서 재료 특성값은 각각 Table 2, 3과 같다.

Table 1 철근의 재료 특성값

철근치수	탄성계수 (MPa)	인장강도 (MPa)	항복강도 (MPa)	신장율 (%)
D10mm*	2×10 <sup>5</sup>	626.2	500.7	17.8
D13mm*		622.2	498.7	20.0
D16mm*		732.1	476.2	16.3
D19mm*		683.1	465.8	16.4

\* KS D3504 SD400, INI Steel Company

Table 2 CFRP판의 재료 물성값

제품명	탄성계수 (MPa)	극한강도 (MPa)	극한변형율 (%)
S & P Laminate (150/2000)	165,000	2,700~3,000	1.2

Table 3 에폭시의 재료 물성값

제품명	압축강도 (MPa)	휨강도 (MPa)	부착강도 (MPa)	경도
Epoxy resin200	80.3	42.2	3.0	84

## 2.2 다방향 CFRP판 정착장치 제작

본 연구에서 개발된 채널형 단부정착장치는 Fig. 1과 같이 상부채널, 하부채널, 그리고 CFRP판으로 구성된다.

상·하부 채널은 수지침투시킨 유리섬유(Glass Prepreg) 2장 및 수지침투시킨 탄소섬유(Carbon Prepreg) 5장으로 구성된다. 수지침투시킨 유리섬유는 양쪽 표면에 각각 1장씩 적층되어 나중에 일방향 CFRP판과 우수한 접착력을 유지하기 위하여 적용되었다. 상·하부 채널은 콘크리트에 삽입되어 하중을 받을 때 플랜지 부위의 전단력을 강화시키기 위하여 0° (Glass) / +45° (Carbon) /

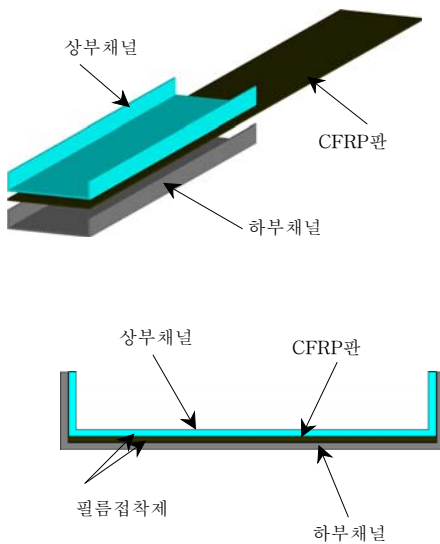


Fig. 1 단부정착장치 개요



Fig. 2 완성된 채널형 단부정착장치

-45° (Carbon) / 90° (Carbon) / -45° (Carbon) / +45° (Carbon) / 0° (Glass)로 적층하였다. 채널의 두께는 약 1.6~1.7 mm 정도이며 상·하부 채널이 접착되면 약 3.2~3.5 mm 정도의 두께가 되며, 콘크리트 홈에 삽입되는 플랜지의 깊이는 20mm이다. 단부정착장치는 일방향 CFRP판을 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 상부채널과 하부채널 사이에 넣고 접착필름을 사용하여 접착하여 제작하였다. 접착에 사용된 접착필름의 겹침전단강도(Lap shear strength)는 50MPa이며, 접착작업이 현장에서 원활하게 수행될 수 있도록 작업장비도 함께 개발하였다.

## 2.3 시험체 제작

### 2.3.1 시험체 제작

채널형 정착장치를 적용한 CFRP판 보강 휨부재의 휨성능 개선효과를 분석하기 위해 Fig. 3과 같은 시험체를 12개 제작하였다. 시험체의 크기는 길이 3300mm, 폭 400mm, 높이 220mm의 사각형 단면을 갖는 보로 제작하였다. 이때 시험체 단부에는 휨파괴나 CFRP판의 파괴가 발생하기 전에 전단파괴가 발생하는 것을 방지하기 위해 전단철근을 150 mm 간격으로 배근하였다.

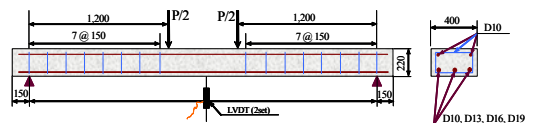


Fig. 3 시험체 상세(단위: mm)

Table 4 시험체 상세

시험체	콘크리트강도 (MPa)	보강 길이	최대철근비 (%)	철근비 (%)	정착판길이 (mm)
MIII-U	23.0	-	1.40	0.86	-
MIII-S	23.0	0.8L	1.40	0.86	0
MIII-1	23.0	0.8L	1.40	0.86	300
MIII-2	23.0	0.8L	1.40	0.86	350
MIII-3	23.0	0.8L	1.40	0.86	400
MI-1	23.0	0.8L	1.40	0.30	300
MII-1	23.0	0.8L	1.40	0.55	300
MIV-1	23.0	0.8L	1.40	1.26	300
HI-1	29.0	0.8L	1.76	0.30	300
HII-1	29.0	0.8L	1.76	0.55	300
HIII-1	29.0	0.8L	1.76	0.86	300
HIV-1	29.0	0.8L	1.76	1.26	300

M II - 3

① ② ③

- ① : 콘크리트 압축강도(M:23MPa, H:29MPa)
- ② : 인장철근비, (I=0.30%, II=0.55%, III=0.86%, IV=1.26%)
- ③ : 정착판 길이, (U=무보강, S=표면부착, 1=300mm, 2=350mm, 3=400mm)

실험변수로는 Table 4에 나타난 것과 같이 콘크리트강도(23, 29MPa), 철근비(0.30, 0.55, 0.86, 1.26%), 단부정착장치 길이(300, 350, 400mm), 보강방법(표면부착, 단부정착)을 고려하였다.

### 2.3.2 CFRP를 이용한 휨보강

표면부착 시험체는 에폭시 A제와 B제를 4:1의 비율로 핸드믹서를 이용하여 5분정도 잘 혼합 후 CFRP 판과 콘크리트에 고르게 도포 후 2~3mm정도의 두께를 유지하여 그대로 압착시켰다. 체널형 단부정착장치를 이용하여 휨보강하는 시험체들은 정착판을 삽입시킬 위치를 선정하고 Fig. 4와 같이 H사의 홈파기를 이용하여 깊이 20mm, 폭 6mm의 홈을 형성하였다. 그리고 에폭시를 도포한 이후에 CFRP판을 부착하고 정착장치를 홈에 삽입하는 방법으로 보강하였다.

### 2.4 하중재하 및 측정방법

하중재하는 Fig. 5에 나타난 것과 같이 500KN 용



Fig. 4 보강섬유 정착판 시공순서

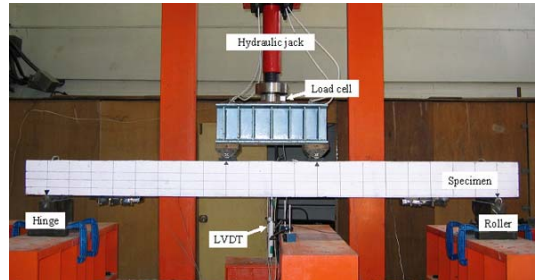


Fig. 5 실험전경

량의 유압잭을 통해 4점 재하 하였다. 하중은 예상 최대하중 80%까지는 하중제어방식, 그 이후부터는 변위 제어 방식으로 작용시켰다. 각 하중단계에서의 철근과 CFRP판의 변형률을 측정하기 위해서 보 중앙부의 인장철근에 3개와 CFRP판에 5개의 변형률 게이지를 부착하였다. 보의 중앙부에서의 처짐을 측정하기 위해서는 최대 150mm의 변위까지 측정이 가능한 LVDT 2개를 설치하였다. 실험 중에는 육안으로 시험체의 초기균열과 균열진행상황, CFRP판의 탈락 등을 확인하여 기록하였으며, 실험 종료 후에도 각 시험체의 파괴모드를 사진촬영하고 균열도를 작성하였다.

## 3. 실험결과 및 분석

기준시험체(MIII-U)의 파괴형태는 인장철근 항복 이후 휨균열이 압축부로 성장하면서 압축부 콘크리트가 압괴되는 전형적인 휨파괴 거동을 나타내었다. CFRP판을 표면부착한 시험체(MIII-S)는 초기균열하중은 기준시험체보다 다소 증가하였으나 최대하중 이후 휨균열 폭이 성장하면서 CFRP판이 급격하게 탈락하는 계면박리가 발생되어 보가 파괴되었다. 한편, CFRP판을 단부정착한 시험체들은 중앙부의 CFRP판

Table 5 시험결과

공시체	균열하중 Pcr (kN)	항복하중 Py (kN)	박리하중 Pb (kN)	최대하중 Pmax (kN)	파괴하중 Pf (kN)	최대하중시 처짐(mm)	파괴모드
MIII-U	12.6	48.3	73.7	74.3	64.2	47.2	휨파괴
MIII-S	17.2	88.3	98.4	98.4	98.4	49.2	단부부착파괴
MIII-1	20.1	102.2	112.3	120.3	110.8	44.3	단부정착파괴
MIII-2	15.3	92.9	111.9	115.1	92.9	68.4	단부정착파괴
MIII-3	18.3	104.3	118.2	122.2	121.6	60.6	단부정착파괴
MI-1	15.9	56.3	67.9	83.5	79.8	64.8	단부정착파괴
MII-1	16.9	76.5	89.3	100.1	97.9	49.2	단부정착파괴
MIV-1	18.7	121.5	129.1	136.9	126.7	63.1	단부정착파괴
HI-1	15.3	58.4	74.6	87.6	87.6	65.3	단부정착파괴
HII-1	14.7	80.2	90.0	103.4	93.1	72.2	단부정착파괴
IIII-1	17.3	96.7	116.6	118.1	109.3	39.7	단부정착파괴
HIV-1	19.0	106.6	134.6	140.1	133.4	44.8	단부정착파괴

이 부분적으로 박리된 이후에도 하중이 계속 증가하다가 갑자기 전체적으로 CFRP판이 박리하였으나, 단부 정착장치로 인해 하중을 유지하면서 처짐이 점차 증가하다가 단부정착장치가 매립된 부분의 콘크리트를 같이 몰고 떨어지는 단부정착파괴 거동을 나타내었다. 모든 시험체의 시험결과를 정리하여 Table 5에 나타내었다.

### 3.1 보강방법에 따른 영향

Fig. 6에 보강방법에 따른 하중-변위관계를 비교하여 나타내었다. Fig. 6에서 무보강은 MIII-U 시험체

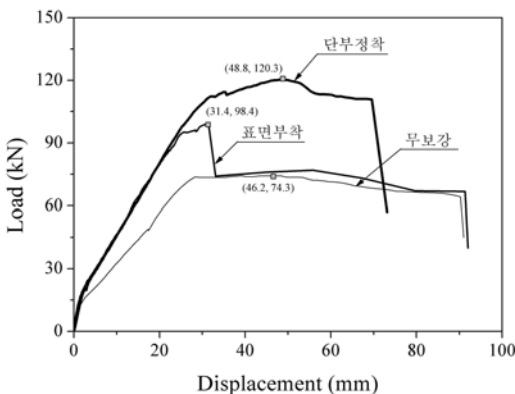
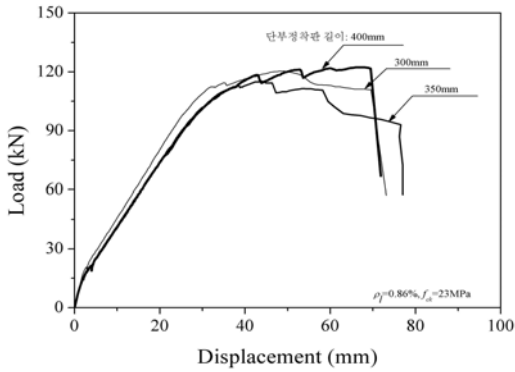


Fig. 6 보강방법에 따른 하중-변위관계 비교

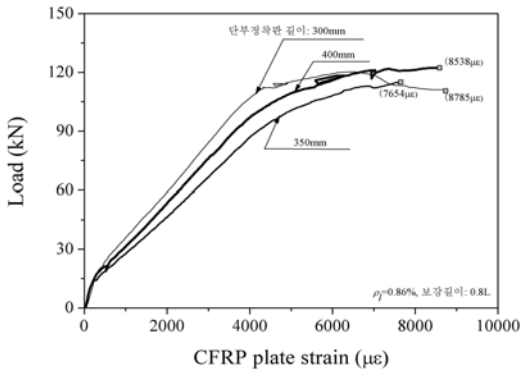
결과를 나타낸 것이며, 표면부착과 단부정착은 각각 MIII-S와 MIII-1 시험체의 실험결과를 나타낸 것이다. 이 3개 시험체의 철근비, 콘크리트 압축강도는 각각 0.86%, 23MPa로 모두 동일하다. 무보강 시험체는 주철근의 항복이후 처짐이 크게 증가하는 전형적인 휨파괴 거동을 보였다. 표면부착 보강한 MIII-S 시험체는 하중이 98.4kN에 도달하는 동시에 단부부터 CFRP판이 박리되면서 하중이 급격하게 감소하였으며, 그 이후부터는 무보강 시험체와 거의 유사한 거동을 보였다. 한편 양 단부를 채널형 단부정착장치로 보강한 MIII-1 시험체는 약 30mm 처짐이 발생한 이후부터 CFRP 보강판이 중앙부에서 박리하기 시작하였으나 단부정착으로 인해 계속해서 48.8mm의 처짐이 발생할 때까지 하중이 계속적으로 증가하는 거동을 보였다. 특히, 표면부착한 MIII-S 시험체에 비해 최대하중이 120.3kN으로 약 22% 증가하였으며, 파괴시의 처짐이 2.2배 증가할 정도로 큰 연성증대 효과를 보였다. 즉, 본 연구에서 개발한 채널형 단부정착장치를 적용함으로써 CFRP판으로 보강된 구조물의 보강성능 및 연성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

### 3.2 단부정착판 길이의 영향

단부정착판 길이의 영향을 평가하기 위하여 단부정착판의 길이를 300mm, 350mm, 400mm로 변화시



(a) 하중-변위 관계



(b) 하중-CFRP변형률 관계

Fig. 7 단부정착판 길이에 따른 거동비교

킨 MIII-1, MIII-2, 그리고 MIII-3 시험체의 거동을 Fig. 7에 비교하여 나타내었다. 이 시험체들의 철근비, 콘크리트 압축강도는 각각 0.86%, 23MPa로 모두 동일하다.

Fig. 7(a)는 단부정착판 길이의 변화에 따른 시험체의 하중-변위거동을 제시한 것이다. Fig. 7(a)는 단부정착판의 길이가 50mm씩 증가할 때 각 시험체의 최대하중이 크게 변화되지 않음을 보이고 있다. 또한, 최대하중 이후의 거동에 있어서도 크게 단부정착판 길이의 영향을 받지 않는다는 것을 알 수 있다. Fig. 7(b)에는 MIII-1, MIII-2, 그리고 MIII-3 시험체의 하중과 CFRP판 변형률의 관계를 나타내었다. CFRP 판의 변형률은 보의 중앙부에 부착한 게이지로부터 얻어진 값이다. Fig. 7(b)는 MIII-1과 MIII-3 시험체의



(a) 정착부 콘크리트파괴 (MIII-1 우측단)



(b) 정착판 슬립 (MIII-1 좌측단)

Fig. 8 단부정착판 파괴모드

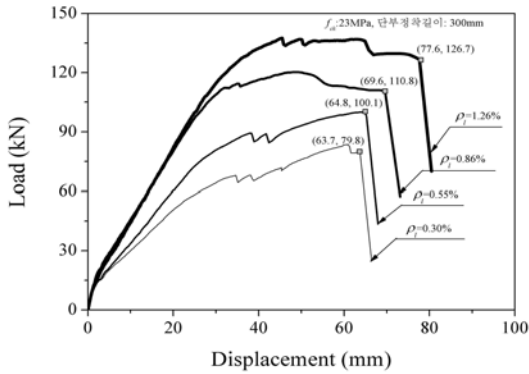
파괴시 CFRP변형률이 각각 8785 $\mu\epsilon$ 와 8538 $\mu\epsilon$ 로 크게 나타남을 보이고 있다. 한편, MIII-2 시험체의 경우에는 실험 중에 최대변형률이 발생한 위치의 스트레인게이지에 이상이 발생하여 파괴단계에서의 최종변형률을 측정하지 못하였다.

Fig. 8에는 단부정착된 시험체의 대표적인 파괴모드를 나타내었다. 단부정착판 길이에 관계없이 모든 시험체들은 최대하중이후 계속적으로 하중을 유지하면서 처짐만이 크게 증가하는 연성거동을 나타내다가 단부 한쪽에서 Fig. 8(a)에 나타낸 것과 같이 정착판이 매입된 부근의 콘크리트에 균열이 발생하기 시작하여 정착판이 덮개콘크리트를 완전히 묻고 떨어지면서 반대쪽 정착판에 슬립이 발생하는 거동을 나타내었다.

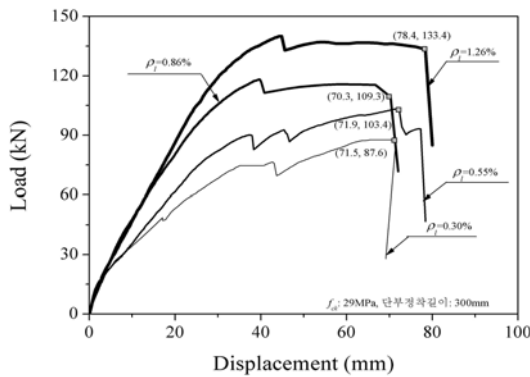
본 연구에서는 정착판깊이를 CFRP판의 파단하중까지 정착판과 보강재사이에 부착파괴가 일어나지 않도록 하기 위하여 300mm에서 400mm까지 증가시켰다. 그러나 위에서 언급한 바와 같이 모든 시험체는 CFRP판이 인장파단되기 이전에 정착장치를 매입한 부분의 콘크리트가 박락하면서 파괴되었으며, 최대하중 및 그 이후의 거동에 있어서도 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 사용한 CFRP판의 재료성능을 100% 활용하기 위해서는 콘크리트에 삽입되는 정착판 플랜지의 깊이를 더욱 증가시켜야 할 것으로 사료된다.

### 3.3 철근비 변화에 따른 영향

Fig. 9는 철근비에 따른 하중-변위관계 비교를 나



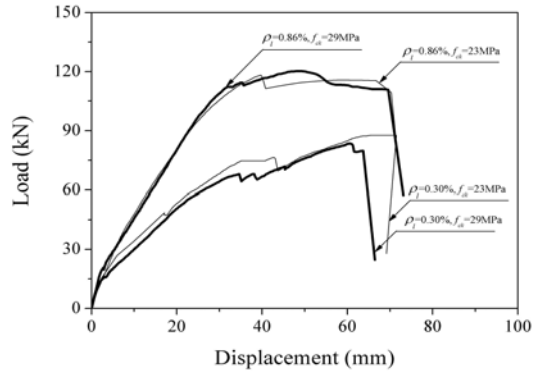
(a) 콘크리트 압축강도 23MPa



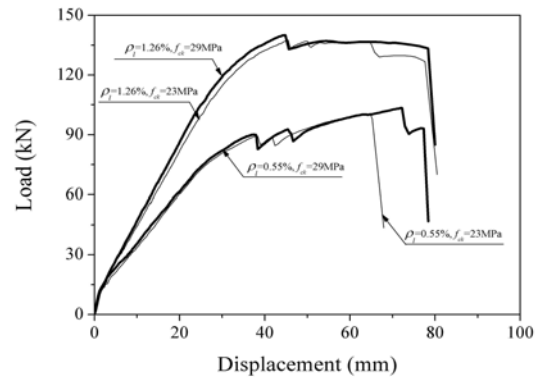
(b) 콘크리트 압축강도 29MPa

Fig. 9 철근비에 따른 하중-변위관계 비교

타낸 것이다. Fig. 9(a)는 콘크리트 압축강도가 23MPa인 시험체의 실험결과이며, Fig. 9(b)는 29MPa인 시험체의 실험결과를 나타낸 것이다. 콘크리트 압축강도에 관계없이 철근비가 0.3%와 0.55%인 시험체는 중앙에서 CFRP판이 탈락한 이후에도 계속해서 하중이 증가하는 거동을 보이고 있다. 한편 철근비가 0.86%와 1.26%로 증가한 시험체는 최대하중 이후 CFRP판이 탈락하게 되고 계속해서 변위만이 증가하는 거동을 보이고 있다. 또한, 거의 모든 시험체가 콘크리트 압축강도와 철근비에 관계없이 처짐이 30~40mm 정도 발생할 때 CFRP판이 탈락하는 것을 확인할 수 있다. 시험체가 파괴되는 시점은 약간의 오차는 있지만 철근비가 증가할수록 파괴시점에서의 처짐이 증가하는 경향을 보이고 있음을 Fig. 9를 통해서



(a) 철근비 0.30%와 0.86%



(b) 철근비 0.55%와 1.26%

Fig. 10 압축강도에 따른 하중-변위관계 비교

확인 할 수 있다. 또한 철근비가 0.30%에서 1.26%로 증가함에 따라 콘크리트 강도가 23MPa인 시험체는 파괴시 하중이 79.8kN에서 126.7kN로 증가하였으며, 콘크리트 강도가 29MPa인 시험체는 87.6kN에서 133.4kN로 증가하였다.

### 3.4 콘크리트 압축강도에 따른 영향

Fig. 10(a)에 철근비 0.30%와 0.86%를 갖는 시험체의 콘크리트 압축강도에 따른 하중-변위관계를 나타내었으며, Fig. 10(b)에는 철근비 0.55%와 1.26%를 갖는 시험체의 콘크리트 압축강도에 따른 하중-변위관계 비교를 나타내었다. Fig. 10에 나타낸 것처럼 CFRP판으로 휨보강하여 단부를 정착한 시험체에서 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 최대하중이 다소 증가하나, 휨거동에 있어서는 콘크리트 압축강도에 따른 영향이 크게 나타나지 않았다. 특히, CFRP판의 탈락시점은 콘크리트 압축강도의 영향보다는 철근비의 영향이 크게 작용함을 알 수 있다.

## 4. 휨강도 해석

우상균 등(우상균 등, 2007)은 CFRP판으로 프리스트레싱 보강된 RC보의 휨강도를 콘크리트와 CFRP 판이 완전부착이라고 가정하여 간단하게 계산할 수 있는 예측식을 제안하였다. 본 연구에서는 우상균 등이 제안한 식을 기초로 휨강도를 계산하여 실험결과와 비교하였다. 예측식에서 그들은 과다보강보와 과소보강보를 평가할 수 있는 균형보강비 평가식으로 식(1)을 제안하였다.

$$\rho_{fb} = 0.85 \beta_1 \frac{f_{ck}}{f_f} \left( \frac{0.003}{0.003 + \epsilon_3} \right) - \rho_{sl} \frac{f_y}{f_f} \quad (1)$$

여기서,  $\rho_{sl} = A_s / bd_f$  : 인장철근의 철근비이며, 보강비  $\rho_f = A_f / bd_f$ 가 평형보강비  $\rho_{fb}$ 보다 작으면 콘크리트보다 CFRP판의 파단이 먼저 발생하는 과소보강보가 되고, 보강비  $\rho_f$ 가 평형보강비  $\rho_{fb}$ 보다 크면 압축단 콘크리트가 먼저 파괴되는 과다보강보가

된다. 과소보강보의 경우 CFRP판의 인장응력을 식(2)와 같이 재료의 한계변형률을 이용하여 계산하는 것이 가능하며, 과다보강보의 경우 콘크리트 압괴파괴 시의 실제 CFRP판의 변형률을 단면해석을 통해 도출하여 식(3)을 통해서 인장응력을 산정하도록 하고 있다.

$$f_f = E_f \epsilon_{fu} \quad (2)$$

$$f_f = E_f \epsilon_f \quad (3)$$

보의 공칭 휨강도  $M_n$ 은 식 (4)와 (5)를 통하여 산정한다.

$$M_n = A_f f_f \left( d_f - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (4)$$

$$a = \frac{A_f f_f + A_s f_y}{0.85 f_{ck} b} \quad (5)$$

Table 6에 모든 시험체의 식(1)로부터 얻어진 판정결과를 나타내었다. MVI-1 시험체를 제외한 모든 시험체가 과소보강보로 나타나 CFRP판의 한계변형률을 적용하여 휨강도를 예측할 수 있음을 Table 6을 통해서 알 수 있다. 그러나 3.2절에서 설명한 바와 같이 CFRP판이 인장파단되기 이전에 모든 시험체에서 정착부 파괴가 발생하여 실험적으로 구한 CFRP판의 유효변형률은 한계변형률보다 매우 작게 나타났다. 이에 본 연구에서는 모든 시험체의 최대하중시 CFRP판에 발생한 유효변형률의 평균값 7500 $\mu\epsilon$ 를 재료의 한계변형률 대신에 식(2)~식(5)에 적용하여 휨강도를 예측하였다. 예측결과를 Table 6과 Fig. 11에 나타내었다. Table 6과 Fig. 11은 실험결과와 식(1)~(5)를 통해서 예측된 결과가 매우 정확하게 일치함을 보이고 있다.

이상의 결과로 판단할 때 본 논문에서 제시한 채널형 정착장치는 보강재에 약 173kN(=  $A_f \cdot E_f \cdot \epsilon_f$ ) 정도의 인장력이 작용할 때까지 정착장치로서의 역할을 수행할 수 있는 것으로 나타났다. 채널형 정착장치의 성능을 보다 향상시켜 CFRP판의 재료성능을 100% 활용하기 위해서는 콘크리트에 삽입되는 정착판 플랜지의 깊이를 더욱 증가시켜야 할 것으로 사료된다.



Table 6 휨강도의 비교

실험 체명	보강비 $\rho_f(\%)$	철근비 $\rho_{sl}(\%)$	평형보강비 $\rho_{fb}(\%)$	관정	파괴시 CFRP판 응력 (MPa)	공칭휨강도 (kN·m)	
						계산치 $M_{n,cal}$	실험치 $M_{n,exp}$
MIII-1	0.159	0.432	0.165	과소보강	1,237	69.545	72.181
MIII-2	0.159	0.432	0.165	과소보강	1,237	69.545	69.063
MIII-3	0.159	0.432	0.165	과소보강	1,237	69.545	73.322
MI-1	0.159	0.243	0.305	과소보강	1,237	48.848	50.103
MII-1	0.159	0.432	0.244	과소보강	1,237	58.164	60.062
MIV-1	0.159	0.977	0.092	과다보강	1,237	79.541	82.147
HI-1	0.159	0.243	0.405	과소보강	1,237	49.680	52.564
II-1	0.159	0.432	0.344	과소보강	1,237	59.447	62.048
III-1	0.159	0.677	0.265	과소보강	1,237	71.555	70.861
IV-1	0.159	0.977	0.168	과소보강	1,237	85.533	84.068

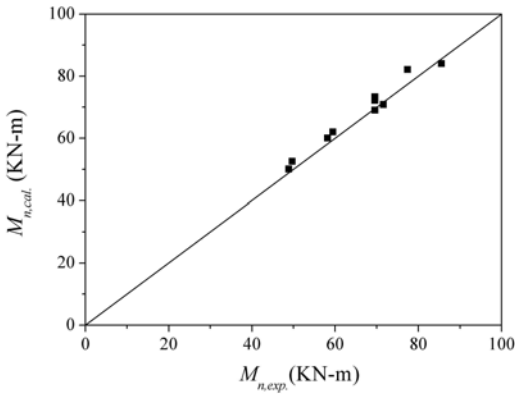


Fig. 11 휨강도 비교

## 5. 결론

본 연구를 통해서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 채널형 단부정착장치를 사용한 시험체는 CFRP 판을 표면부착한 시험체에 비해 최대하중이 약 22% 증가하였으며, 파괴시의 처짐이 2.2배 증가할 정도로 큰 연성증대 효과를 보였다. 즉, 본 연구에서 개발한 다방향 CFRP 단부정착판을 적용함으로써 CFRP판으로 보강된 구조물의 보강성능 및 연성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.
- 2) 정착판 길이를 CFRP판의 파단하중까지 정착판과 보강재사이에 부착파괴가 일어나지 않도록 하기 위

하여 300mm에서 400mm까지 증가시켰다. 그러나 정착판 길이에 관계없이 모든 시험체에서 CFRP판이 인장파단되기 이전에 정착장치를 매입한 부분의 콘크리트가 파괴되는 단부정착파괴가 발생하였으며, 최대하중 및 그 이후의 거동에 있어서도 정착판 길이에 대한 영향이 명확하게 나타나지 않았다.

- 3) CFRP판으로 휨보강하여 단부를 정착한 시험체에서는 콘크리트 압축강도의 영향이 크게 나타나지 않았다. 특히, CFRP판의 탈락시점은 콘크리트 압축강도의 영향보다는 철근비의 영향이 크게 작용하는 것으로 나타났다.
- 4) 본 논문에서 제시한 채널형 정착장치는 보강재에 약 173kN 정도의 인장력이 작용할 때까지 정착장치로서의 역할을 수행할 수 있는 것으로 나타났다. 채널형 정착장치의 성능을 보다 향상시켜 CFRP판의 재료성능을 100% 활용하기 위해서는 콘크리트에 삽입되는 정착판 플랜지의 깊이를 더욱 증가시켜야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

이 연구는 2006년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 수행되었음(This work was supported by Chungbuk National University Grant in 2006).

---

## 참고문헌

1. 김태우, "FRP보강 RC보의 조기파괴기준", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집, 제17권 2호, 한국콘크리트학회, 2005. 11, pp. 137-144.
2. 김형진, 홍기남, 한상훈, "CFRP판을 단부정착한 RC보의 휨성능 개선에 관한 실험적 연구", 한국구조물진단학회, 제10권 4호, 2006. 7, pp. 167-174.
3. 박상렬, "부착길이와 복부정착이 CFRP판으로 보강된 RC보의 휨 보강효과에 미치는 영향", 콘크리트학회논문집, 제14권 5호, 2002. 10, pp. 645-651.
4. 박상렬, 김태우, "CFRP판으로 부착된 R.C 보의 복부정착 형태에 따른 보강효과", 대한토목학회논문집, 제23권 64호, 2003. 11, pp. 1113-1121.
5. 박종섭, 정우태, 유영준, 박영환, "탄소섬유쉬트에 의해 휨보강된 RC보의 휨거동 추정", 콘크리트학회 논문집, 제17권 2호, 2005. 4, pp. 213-220.
6. 심종성, 문도영, 박철우, 박성재, 최광민, "CFRP로 성능향상된 철근콘크리트 보의 Rip-off 파괴메카니즘 고찰", 콘크리트학회논문집, 제17권 6호, 2005. 12, pp. 993-1000.
7. 이상균, 홍기남, 한상훈, 송영철, "CFRP판으로 프리스트레싱 보강된 RC 보의 휨강도 해석", 한국구조물진단학회, 제11권 제1호, 2007. 1, pp. 181-192.
8. Garden, H. N., and Hollaway, L. C., "An Experimental Study of the Failure Modes of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Prestressed Carbon Composite Plates", Composites Part B. Vol. 29, 1998, pp.411-424.
9. Triantafyllou, T. C., Deskovic, N., and Deuring, M., "Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Fiber Reinforced Plastic Sheets", ACI Structural Journal, Vol. 89, No. 3, 1992, pp. 235-244.

(접수일자 : 2007년 10월 1일)