



프리스트레스트 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 거동 및 해석

양동석^{1)*} · 박준명²⁾ · 유명찬³⁾ · 박선규²⁾

¹⁾셀부룩대학교 토목공학과 ²⁾성균관대학교 토목환경공학과 ³⁾한국건설기술연구원 건축연구부

Flexural Behavior and Analysis of RC Beams Strengthened with Prestressed CFRP Plates

Dong-Suk Yang^{1)*}, Jun-Myung Park²⁾, Young-Chan You³⁾, and Sun-Kyu Park²⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Sherbrooke University, Quebec, J1K 2R1, Canada

²⁾Dept. of Civil Engineering, SungKyunKwan University, Suwon 440-746, Korea

³⁾Building Research Dept., Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-807, Korea

ABSTRACT In this paper, a total of 13 beams with bonding, anchorage system, amount of prestressing and span length as variables of experiment were tested in flexural test and analyzed in finite element analysis; one control beam, two simplified FRP-bonded beams, four prestressed FRP-unbonded beams and four prestressed FRP-bonded beams. Also, a nonlinear finite element analysis of beams in the flexural test is performed by DIANA program considered material nonlinear of concrete, reinforcement and the interfacial bond-slip model between concrete and CFRP plates. The failure mode of prestressed CFRP plated-beams is not debonding but FRP rupture. RC members strengthened with external bonded prestressed CFRP plates occurred 1st and 2nd debonding of the composite material. After the debonding of CFRP plates occurs in bonded system, behavior of bonded CFRP-plated beams change into that of unbonded CFRP-plated beams due to fix of the anchorage system. Also, It was compared flexural test results and analytical results of RC members strengthened with CFRP plates. The ductility of beams strengthened by CFRP plates with the anchorage system is considered high with the ductility index of above 3. Analysis results showed a good agreement with experiment results in the debonding load, yield load and ultimate load.

Keywords : anchorage system, CFRP plate, ductility, finite element analysis, flexural test

1. 서 론

강판 부착 공법은 수 십년 전에 철근콘크리트 구조물 보강 공법으로 가장 많이 사용되는 보강 공법이었다. 최근에는 강판 대신에 FRP 복합재료를 이용한 연구가 활발히 진행되면서 사용량이 급격히 증가하였다. 특히, FRP는 토목 구조물의 외부 보강 재료로서 확대되어 사용되어왔다¹⁻⁵⁾.

철근콘크리트 구조물의 보강에 주로 적용되는 공법은 탄소섬유, 아라미드, 유리섬유 등의 복합재의 부착 공법^{6,7)}과 기존 80년대에 많이 사용된 강판 보강 공법과 강연선(텐던)을 이용한 외부 프리스트레싱 보강 공법 등이 있다⁸⁾.

복합재의 부착 보강 공법은 보강재의 부착 특성이 보강 성능에 크게 좌우되어 보강 재료가 충분한 인장강도에 이르기 전에 조기에 박리 파괴되는 단점을 지니고 있다. 기존에 발표된 문헌에 의하면 강판으로 보강된 시

험체는 보강재 (강판) 항복강도의 약 50% 정도에서 단부의 박리 파괴 등의 취성적인 파괴 양상을 보이고 있는 것으로 알려져 있고, 탄소섬유나 유리섬유 등의 복합재료로서 보강된 경우에는 보강재 인장강도의 약 20~50% 정도까지 재료성능을 발휘하지 못하는 것으로 나타났다^{9,10)}.

본 논문에서는 일반적으로 사용되는 FRP 부착 공법과 프리스트레싱 보강 공법을 이용하여 새롭게 탄소섬유판을 긴장하여 보강된 철근콘크리트 보의 휨 성능 실험을 수행하였고, 콘크리트의 비선형과 탄소섬유와 콘크리트와의 계면 특성을 고려한 비선형 프로그램인 DIANA를 이용하여 실험 결과와 해석 결과를 비교 분석하였다. 부착 유무, 정착장치 유무, 긴장량 등을 실험 변수로 하여 총 13개의 시험체를 제작하였다. 실험 변수에 따른 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 실험값과 해석값에 대한 보강 효과, 파괴 양상, 하중과 처짐 관계 및 하중과 탄소섬유판 변형을 관계를 고찰하였고 각 시험체에 대한 항복 처짐과 극한 처짐의 비율로서 연성을 평가하였다.

*Corresponding author E-mail : yds0619@dreamwiz.com

Received December 4, 2006, Accepted May 18, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

2. 탄소섬유판으로 보강된 RC보의 휨 실험

2.1 실험 변수 및 시험체

본 논문에서 사용된 실험 변수는 Table 1과 같이 부착 유무, 정착장치, 긴장량, 보강량 (1매, 2매), 경간 길이 (2,400 mm, 4,500 mm, 6,000 mm) 등을 선택하여 휨 성능을 실험하였다¹¹⁾. 보강하지 않은 표준시험체, 단순 부착 시험체, 긴장력을 도입한 시험체 등 총 13개 시험체를 제작하였다. 특히, 긴장량은 탄소섬유판 인장강도의 0%, 20%, 40%, 60%를 도입하여 긴장량 변화에 따른 역학적 거동을 파악하였다.

시험체는 200 mm(b)×300 mm(h)인 직사각형 단면으로 인장측과 압축측 피복두께를 30 mm로 하였으며, 총 길이는 2,700 mm, 4,800 mm, 6,300 mm로 하여 시험체를 제작하였다. 본 실험에서는 탄소섬유판의 보강으로 인한 콘크리트 연단에서의 압축파괴를 방지하기 위하여 압축철근으로 3-HD13, 인장철근으로는 3-HD10을 배근하였다. 또한, 전단철근으로는 전단파괴를 방지하기 위하여 HD10철근을 100 mm 간격으로 배근하였다. 시험체의 형상 및 제원을 나타내면 Fig. 1과 같다.

2.2 실험 재료

기존 콘크리트 구조물에 보강 공법을 적용할 경우에는 콘크리트의 노후화로 인하여 강도 저하가 발생할 수 있어, 본 논문의 콘크리트 배합설계는 28일 기준으로 18.0 MPa인 레미콘 제품을 사용하였고, 실제 28일 압축강도는 16.4 MPa이었다. 시험체 제작에 사용된 HD10, HD13 철근의 항복응력은 각 475.2 MPa, 466.2 MPa이다. 보강재

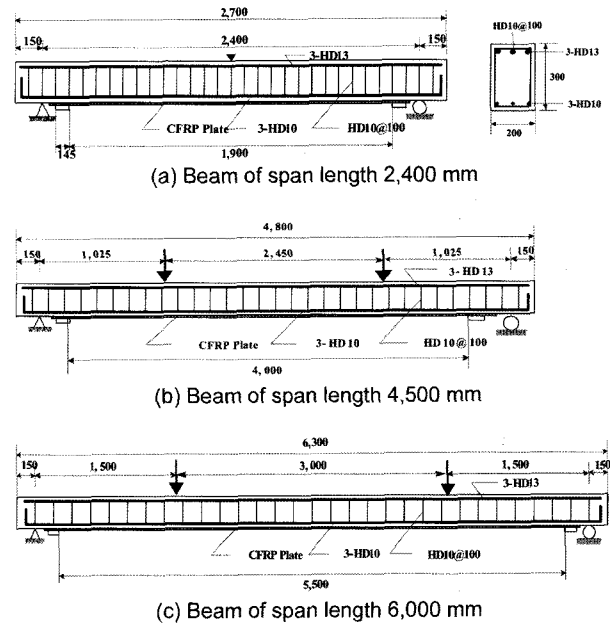


Fig. 1 Shape of beams (unit: mm)

로 사용된 탄소섬유판은 일방향 탄소섬유판의 쪼개짐을 방지하기 위하여 2방향 탄소섬유 직물을 매립한 제품으로 재료적 특성은 Table 2와 같다.

2.3 정착장치 및 긴장력 도입

긴장력을 도입한 탄소섬유판으로 보강된 RC 부재에서 인장측에 긴장력이 도입된 탄소섬유판을 고정·정착시킴으로서 보강 성능을 향상시키는 정착장치가 필요하다. 그러므로 Fig. 2와 같이 정착장치의 표면에 거친면 처리를 하고, 부재의 인장측 콘크리트 단부에 앵커볼트를 이용하여 고정하였다. 탄소섬유판은 정착 장치에 의한 응

Table 1 Details of tested beams

Beams	Variables		Content	Span length (mm)	
Control			Not strengthened	2,400	
NFCB1	Not anchorage system		1 ply		
NFCBW2			2 plys of width direction		
PFCU1-0R	Prestressing	Unbond	Prestressing 0% + Anchorage		
PFCU1-2R			Prestressing 20% + Anchorage		
PFCU1-4R			Prestressing 40% + Anchorage		
PFCU1-6R			Prestressing 60% + Anchorage		
PFCB1-0R			Bond		Prestressing 0% + Anchorage
PFCB1-2R					Prestressing 20% + Anchorage
PFCB1-4R	Prestressing 40% + Anchorage				
PFCB1-6R	Prestressing 60% + Anchorage				
PFCU1-6L2	L/h _f		Unbond + Prestressing 60% + Anchorage		4,500
PFCU1-6L3			Unbond + Prestressing 60% + Anchorage		6,000

Table 2 Material properties of CFRP plates

	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Remarks
CFRP plate	2,350	1.73×10^5	Width : 50 mm Thickness: 1.3 mm
Epoxy resin	33.5	1,500 ~ 3,500	Bond strength : 4.3 MPa

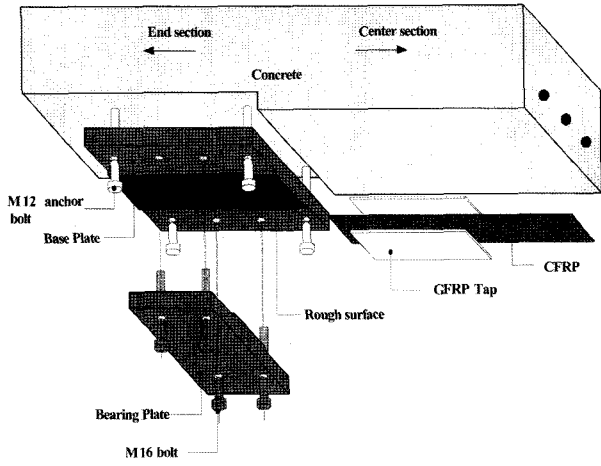


Fig. 2 Shape of anchorage system

력 집중을 방지하기 위하여 GFRP 탭을 부착하였다. 또한, 본 연구에서 탄소섬유판에 긴장력을 도입하기 위하여 시험체에 대한 긴장력 도입 장치는 Fig. 3과 같다.

2.4 하중재하 및 변형률게이지 측정 위치

긴장력이 도입된 탄소섬유판으로 보강된 휨부재의 보강 성능 실험을 위하여 경간 길이가 2,400 mm인 시험체는 액츄에이터 (actuator)을 이용하여 경간 중앙에 가력하는 1점 재하를 수행하였지만 시험체의 경간 길이가 4,500 mm, 6,000 mm인 경우에는 2점 재하를 수행하였으며, 하중 가력 방식은 모든 단계를 변위제어 방식으로 하중을 재하하였다.

측정 장치는 중앙부 처짐을 측정하기 위하여 중앙부에 200 mm LVDT 2개를 설치하고 각 위치의 변위값을 비교·보정할 수 있도록 하였다. 또한, Fig. 4와 같이 보강된 시험체에서의 탄소섬유판의 변형률을 측정하기 위하여 경간 중앙에서 지점쪽으로 150 mm 간격으로 변형률 게이지를 부착하였다. 또한, 경간 중앙의 인장철근과 압축철근에 게이지를 부착하여 변형률을 측정하였다.

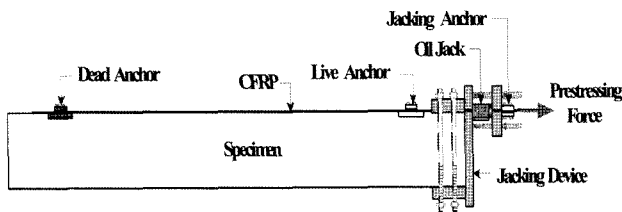


Fig. 3 Prestressing device

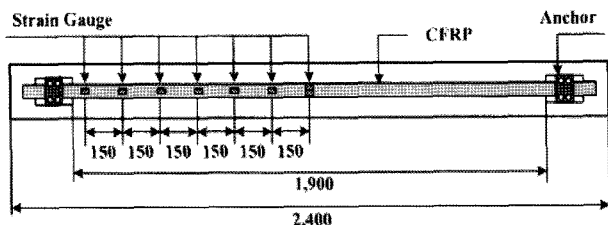


Fig. 4 Location of strain gauges (CFRP plates)

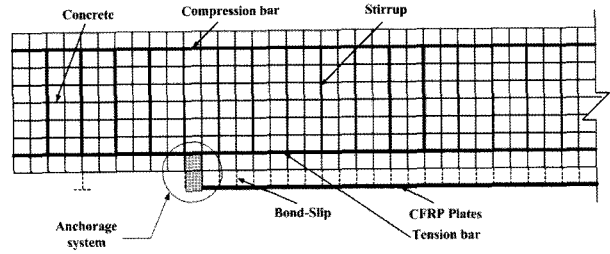


Fig. 5 Finite element model of beam with prestressed CFRP plates

3. 비선형 유한요소해석

3.1 해석 개요

본 논문에서는 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 유한요소해석을 DIANA 프로그램을 이용하여 2차원 해석으로 수행하였다. 특히, 실험 결과와 해석 결과를 비교 검증함으로써 긴장력을 도입한 탄소섬유판 보강 공법의 역학적 거동을 구명하고자 하였다. Fig. 5에서 콘크리트 해석 모델은 압축 축을 전통적인 Drucker-Prager 소성 모델로 구성하고, 인장축은 미세균열을 가정된 smeared crack 모델을 조합하는 방법으로 사용하였으며. 콘크리트와 탄소섬유판의 접착층은 계면 요소를 사용하여 전단응력과 수직응력이 서로 연계되어 있다.

전체적인 유한요소 모델은 다음과 같으며, 본 연구에서는 철근-콘크리트의 본드-슬립은 고려하지 않았다. 콘크리트는 평면 응력 요소, 탄소섬유판 보강재는 트러스 요소 및 평면응력 요소, 철근은 rebar 요소, 콘크리트-CFRP 부착층은 계면 요소 (interface element)로 모델링 하였다.

3.2 해석 재료 모델

콘크리트는 일반적인 압축부 소성 모델¹²⁾과 미세균열을 추정하는 smeared crack 모델을 조합하여 해석을 수행하였다. 또한, 철근은 embedded rebar 요소를 사용하였으며 von Mises 항복 조건을 가지고, 2%의 hardening을 갖는 탄소성 bilinear 모델을 적용하였다. 그리고, 탄소섬유판은 완전 탄성체로서 파괴시까지 선형 증가한다고 가정하여 트러스 요소를 사용하였다. 탄소섬유판과 콘크리트의 계면은 Fig. 6과 같이 수직 방향의 2개 절점의 위치가 같은 가상의 절점을 이용한 4절점 요소를 사용하였다. 계면 요소를 사용하면 접착제의 접착 방향에 평행한 수평전단응력과 이에 수직인 수직 방향의 인장응력 또는 압축응력이 산정될 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 결과 비교

휨 성능에 대한 모든 시험체의 실험 및 해석 결과를 종합적으로 나타내면 Table 3과 같다.

휨 실험 및 해석 결과에서 탄소섬유판 1매 (폭 50 mm)로 단순 보강된 시험체는 표준시험체보다 약 40~60%의 하중 증가가 나타났으며, 탄소섬유판 2매 (폭 100 mm)로 보강된 시험체는 표준시험체 보다 약 100% 이상 증가되었다. 이것은 보강재의 부착으로 인장강도가 증가하였기 때문이다. 그리고, 긴장력을 도입한 탄소섬유판으로 보강된 시험체는 긴장력이 증가할수록 초기균열하중은 크게 증가하는 것으로 측정되었다.

긴장력을 도입한 탄소섬유판으로 보강된 시험체의 극한하중은 복합재료의 부착 여부와는 상관없이 거의 일정한 것으로 나타났다. 이는 시험체의 최종 파괴 양상이 박리에 의한 파괴가 발생하는 것이 아니라 복합재료의 파단으로 파괴가 진행되기 때문으로 판단된다. 에폭시를 이용하여 부착된 복합재료는 합성단면을 구성하여 강성이 증가되기 때문에, 긴장력을 도입한 탄소섬유판 부착 보강된 시험체는 부착되지 않은 시험체보다 균열하중과 항복하중 (인장철근이 항복할 때 시험체의 하중)이 더 증가하였다.

Table 3에서 보는 바와 같이, 항복하중에서의 실험값과 해석값의 평균비율은 1.05, 변동계수는 4.07%이다. 그리

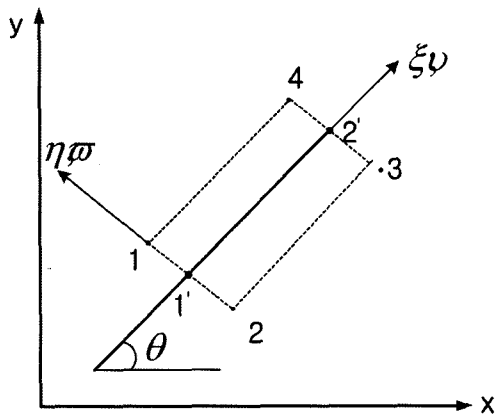


Fig. 6 Interface element (4-nodes)

고, 극한하중에서는 평균비율은 1.00, 변동계수는 5.95%이다. 그러므로, 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 해석 결과는 항복하중과 극한하중에서 실험 결과와 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다.

4.2 파괴 양상

탄소섬유판으로 보강된 시험체의 균열 발생 상황을 나타내면 Fig. 7과 같다. 탄소섬유판 1매 (폭 50 mm)를 긴장력을 도입하지 않고 부착하여 휨보강된 시험체 (NFCB1)는 탄소섬유판 변형률이 약 65,000~7,000 μ 정도에 중앙부로부터 단부로 취성적 박리 파괴가 발생되었다. 그리고, 단순 부착으로 2매 (폭 100 mm) 보강한 시험체 (NFCBW2)는 탄소섬유판의 최대 변형률이 약 5,200 μ 으로 1매 보강한 시험체보다 작은 변형률에서 단부 박리 파괴가 발생하여, 보강 효과면에서 복합 재료 1매로 보강한 것이 더 좋은 것을 알 수 있다.

무보강인 표준시험체는 최대 모멘트가 작용하는 구간에서 비교적 폭이 큰 균열이 다수 발생하는 것을 알 수 있다. 이에 대하여 탄소섬유판을 부착한 상태에서 긴장력을 도입한 시험체는 균열의 형태는 유사하지만, 긴장력이 적을수록 균열 폭이 증가되는 경향을 나타내고 있다. 따라서, 긴장력을 도입한 탄소섬유판으로 보강된 시험체는 단순 부착된 시험체 보다 긴장력 도입으로 인한 압축응력 작용으로 보강 효과가 균열 제어 측면에서 좋은 것으로 판단된다.

4.3 긴장력을 도입하지 않은 탄소섬유판으로 보강된 시험체

무보강 시험체인 표준시험체 (control)와 긴장력을 도입하지 않은 부착된 탄소섬유판 보강된 시험체의 실험값과 비선형 유한요소해석을 수행하여 구한 하중과 처짐

Table 3 Result comparison of RC beams strengthened with CFRP plates

Beams	Cracking load (kN)	Yield load			Ultimate load		
		Test (a) (kN)	Analy. (b) (kN)	(b)/(a)	Test (c) (kN)	Analy. (d) (kN)	(d)/(c)
Control	18.2	40.4	41.0	1.01	49.4	49.5	1.00
NFCB1	13.7	56.3	59.0	1.05	77.0	83.4	1.08
NFCBW2	-	98.4	99.5	1.01	98.4	104.0	1.06
PFCU1-0R	18.9	43.0	47.4	1.10	115.0	114.2	0.99
PFCU1-2R	33.5	56.4	61.0	1.08	119.8	112.6	0.94
PFCU1-4R	47.0	75.9	83.9	1.11	120.7	124.2	1.03
PFCU1-6R	54.1	83.6	92.6	1.11	122.5	123.6	1.01
PFCB1-0R	24.5	55.4	56.4	1.02	121.5	117.8	0.97
PFCB1-2R	26.4	71.6	75.5	1.05	123.0	108.0	0.88
PFCB1-4R	42.4	85.2	91.6	1.08	125.2	114.8	0.92
PFCB1-6R	51.8	100.5	105.9	1.05	122.8	121.7	0.99
PFCU1-6L2	25.7	101.3	98.4	0.97	121.4	125.5	1.03
PFCU1-6L3	33.6	62.4	65.0	1.04	71.8	76.8	1.07
Mean				1.05			1.00
COV (%)				4.07			5.95

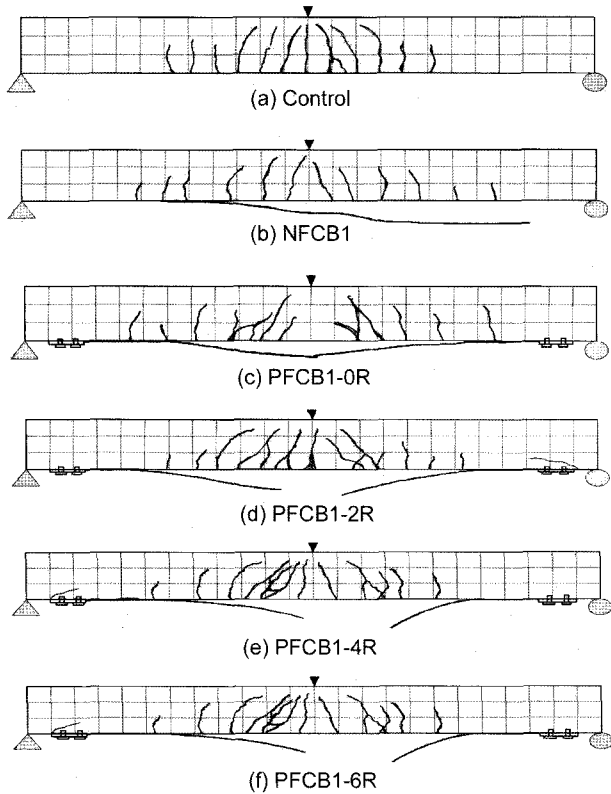
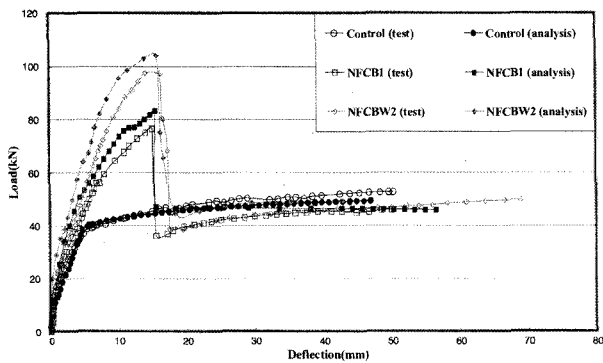


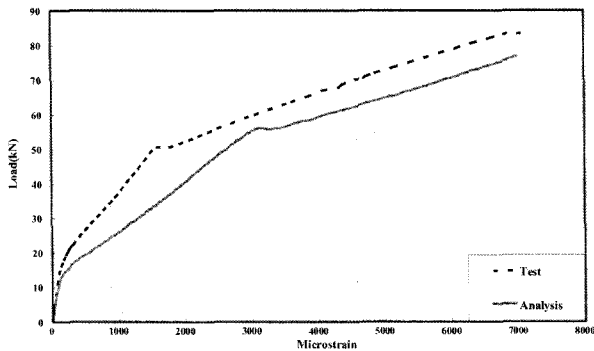
Fig. 7 Crack modes of beams

관계를 나타내면 Fig. 8(a)와 같다.

실험 결과와 해석 결과를 비교해보면, 무보강된 표준 시험체의 경우에는 해석과 실험값이 거의 일치하는 것으로 나타났지만, 긴장력을 도입하지 않은 탄소섬유판으로



(a) Relation of load and deflection



(b) Relation of load and CFRP plates strain

Fig. 8 Result comparison of RC beams strengthened with bonded CFRP plates

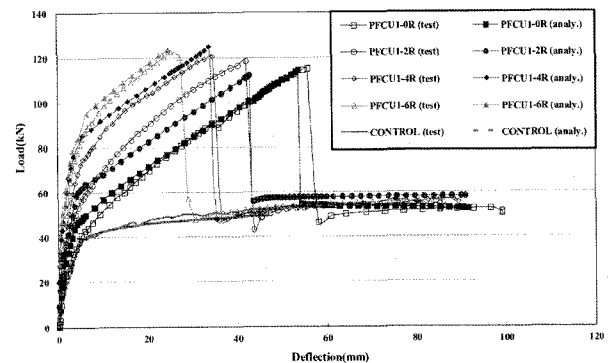
보강된 시험체 (NFCB1, NFCBW2)에는 실험값보다 해석값이 약 5~10% 정도 강도 (strength)나 강성 (stiffness)면에서 크게 해석되었다. 그러나 탄소섬유판을 1매와 2매로 보강한 시험체의 박리될 때의 처짐은 해석과 실험값이 거의 일치하는 것으로 나타났다.

Fig. 8(b)는 NFCB1 시험체의 탄소섬유판 변형률에 대한 해석값과 실험값을 나타낸 것이다. 균열 발생 전에는 실험값과 해석값의 변형률 차이가 비슷하지만, 균열 발생 이후에서 항복하중 단계까지 변형률 차이가 많이 나타났다. 그리고, 해석 및 실험 결과에서 철근이 항복하는 약 50 kN에서 보강제인 탄소섬유판의 변형률이 급격히 증가하였다.

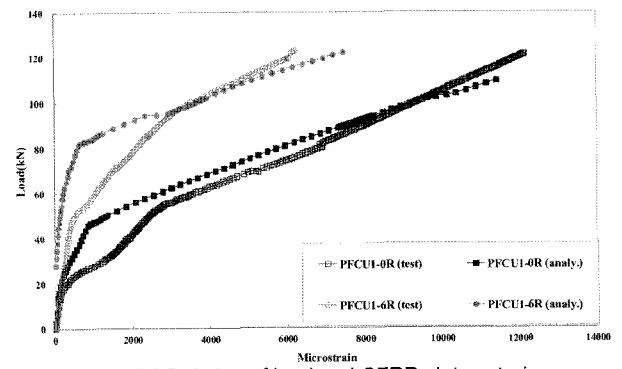
4.4 긴장력 도입된 탄소섬유판으로 비부착된 시험체

Table 3에서 나타난 바와 같이 균열하중에서 표준시험체와 긴장력이 도입되지 않은 시험체가 거의 비슷하게 나타났지만, 긴장량이 증가할수록 표준시험체보다 최대 200%까지 높게 측정되었다. 긴장력이 도입된 시험체의 항복하중에서는 긴장량에 따라 표준시험체보다 약 10~100% 정도까지 증가하는 것으로 나타났지만, 극한하중에서는 표준시험체보다 약 130~150%까지 높게 측정되어 긴장량에 관계없이 거의 비슷한 값을 나타내고 있다.

Fig. 9(a)에서 긴장력을 도입하지 않은 시험체 (PFCU1-0R)는 초기하중에서 강성 차이가 많이 발생되지만 균열 발생 후의 강성 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. PFCU1-4R과 PFCU1-6R 시험체의 경우에는 전체적으로 해석값



(a) Relation of load and deflection



(b) Relation of load and CFRP plates strain

Fig. 9 Result comparison of unbonded prestressed CFRP plated beams

의 강성이 실험값보다 크게 나타났지만 PFCU1-2R 시험체는 극한하중에 도달할수록 해석값의 강성이 작은 것으로 해석되었고, 보강재의 파단 후에는 표준시험체와 같은 거동양상을 보이는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9(b)는 긴장력이 도입 (0%, 60%)된 외부 비부착인 시험체에 대한 중앙부의 탄소섬유판에 대한 하중과 변형을 관계를 나타낸 것이다. PFCU1-0R과 PFCU1-6R 시험체가 균열발생 전에는 실험값과 해석값의 변형을 차이가 비슷하지만, 균열발생 이후부터 항복하중까지 변형률 차이가 많이 발생되었다. 그러나 항복하중 이후에는 해석값이 실험값에 점차적으로 접근하는 것을 알 수 있었다.

4.5 긴장력 도입된 탄소섬유판으로 부착된 시험체

Table 3에서 나타난 바와 같이 균열하중에서 외부 부착이면서 긴장력이 도입되지 않은 시험체는 외부 비부착한 시험체와는 달리 표준시험체보다 약 35% 정도 증가하는 것으로 나타났고, 긴장력을 도입하면 표준시험체보다 최대 180%까지 균열하중이 증가하는 것을 알 수 있었다. 시험체는 1차, 2차 박리가 진행된 후, 정착장치의 복합재료의 고정에 의해 비부착 시험체와 같은 거동을 하는 것으로 나타났다. 항복하중에서는 긴장량에 따라 표준시험체보다 약 35~150% 정도까지 증가하는 것으로 나타났지만, 극한하중에서는 외부 비부착 시험체와 거의 같은 하중에서 탄소섬유판이 파단되는 것으로 나타났다.

Fig. 10(a)의 모든 시험체가 1차 및 2차 박리가 발생하여 최종적으로 탄소섬유판의 파단에 의해서 최종 파괴가

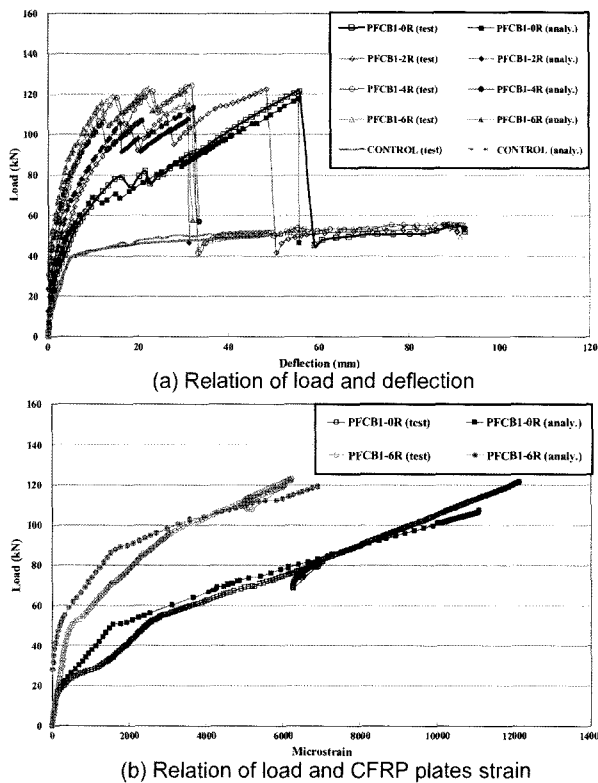


Fig. 10 Result comparison of bonded prestressed CFRP plated beams

진행되었다. PFCB1-0R 시험체는 전체적인 초기강성이 유사하지만 부착으로 인한 1차 박리 시의 하중과 처짐이 실험값보다 먼저 발생하는 것으로 나타났으며 1차 및 2차 박리 후의 하중 증가비도 실험값보다 해석값이 작은 것으로 나타났다. 긴장력이 도입된 시험체의 경우에는 20%가 도입된 시험체를 제외하곤 초기강성과 보강재의 파단시의 하중과 처짐이 거의 일치하는 것으로 나타났다. 그러나, 20%가 도입된 시험체의 경우에는 초기강성은 거의 비슷하지만 보강재 파단시의 처짐은 차이가 많은 것으로 나타났다.

Fig. 10(b)은 외부 부착이면서 긴장력이 도입된 시험체의 탄소섬유판 변형률을 나타낸 것이다. 두 시험체 모두 초기의 강성과 보강재의 박리하중에서의 변형률의 차이는 약 15% 정도 발생되지만, 보강재의 1차와 2차 박리 후에는 거의 실험값과 유사한 것을 알 수 있다.

4.6 L/d_p 영향에 따른 탄소섬유판으로 보강된 시험체

시험체 크기에 따른 하중과 처짐 곡선을 나타내면 Fig. 11(a)와 같다. 긴장력이 60%가 도입되고 경간 길이가 4,500 mm인 시험체 (PFCU1-6L2)의 해석 결과에 의하면 탄소섬유판의 파단시의 처짐은 약 10 mm 정도 차이를 보이고 있지만 초기강성과 극한하중은 거의 같은 것으로 나타났다. 그리고, 긴장력이 60%가 도입되고 경간 길이가 6,000 mm인 시험체 (PFCU1-6L3)는 해석값이 실험값보다 초기강성과 보강재의 파단시까지 10% 정도 전체적으로 높게 나타났지만, 파단시의 처짐은 거의 일치하는

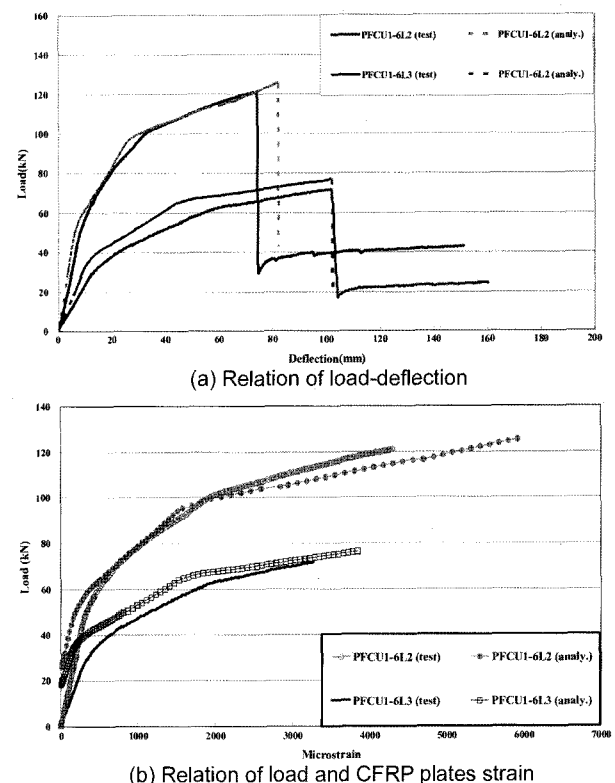


Fig. 11 Result comparison of CFRP plated beams in terms of L/d_p effect

것으로 해석되었다.

Fig. 11(b)는 탄소섬유판의 변형률에 있어서 해석값과 실험값을 비교한 것이다. 위에서 언급한 다른 시험체와 거의 같은 양상으로 두 시험체 모두 해석값의 초기강성은 조금 높게 나타났지만 하중이 증가함에 따라 실험값과 유사한 거동을 하는 것으로 알 수 있었다.

4.7 하중-탄소섬유판의 변형률 관계

부착 시스템과 비부착 시스템으로 보강된 시험체의 하중변화에 따른 탄소섬유판의 변형률 분포를 나타내면 Fig. 12(a), (b)와 같다.

Fig. 12(a)와 같이 부착된 탄소섬유판의 변형률이 전 구간에 걸쳐 선형적으로 증가하였으며, 하중이 증가함에 따라 탄소섬유판의 하중에 대한 분담률이 증가하여 변형률의 기울기도 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나 비부착 시스템에서는 Fig. 12(a)에서 나타난 것과 같이 부착 길이에 걸쳐 거의 일정한 변형률이 나타났으며 하중이 증가하여도 거의 비슷한 양상을 유지하였다.

4.8 연성 평가

본 연구에서는 부재의 안전성을 평가하기 위해서 실험과 해석 결과에 대한 연성지수를 평가하였다. 연성을 평가하기 위하여 항복하중에서의 처짐과 극한하중에서의 처짐의 비로 나타내었다. Table 4에서 보는 바와 같이, 탄소섬유판을 단순 부착하여 보강된 시험체 (NFCB1, NFCBW2)는 취성적인 탄소섬유판의 박리 파괴가 발생되어 연성지수 3이하로, 표준시험체에 비하여 연성도가 낮은 것으로 나타났다.

또한, 긴장력을 도입한 탄소섬유판으로 보강된 시험체에서는 긴장력이 60%가 도입된 시험체 (PFCB1-6R,

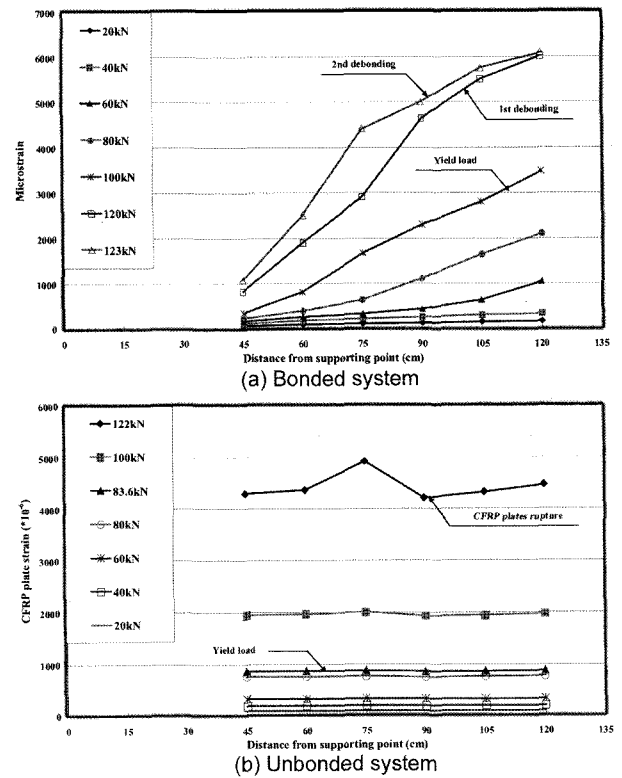


Fig. 12 Relation of load and CFRP plates strain

PFCU1-6R)를 제외하곤 표준시험체 이상의 연성을 가지며, 긴장력 도입량이 적을수록 연성도는 높은 것으로 나타났다. 그러나, 정착장치가 도입된 모든 시험체의 경우에는 연성지수가 3이상 나타나 충분한 연성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 일반적으로 비부착 보강된 시험체가 부착시험체 보다 연성지수가 큰 것으로 나타났다. 앞에서 설명했듯이, 부착시험체는 에폭시 부착에 의해 합성 단면을 구성하므로 항복하중과 처짐이 비부착시험체 보다 크기 때문으로 판단된다.

항복하중과 극한하중의 처짐에서 실험값과 해석값의

Table 4 Estimation of ductility

Beams	Deflection of yield load			Deflection of ultimate load			Ductility index	
	Test (a) (mm)	Analy. (b) (mm)	(b)/(a)	Test (c) (mm)	Analy. (d) (mm)	(d)/(c)	Test	Analy.
Control	5.7	5.4	0.95	33.6	34.7	1.03	5.89	6.43
NFCB1	7.2	6.5	0.90	15.4	15.5	1.01	2.14	2.38
NFCBW2	7.8	7.4	0.95	16.2	15.6	0.96	2.08	2.11
PFCU1-0R	5.8	4.7	0.81	55.7	53.7	0.96	9.60	11.43
PFCU1-2R	4.9	4.8	0.98	43.3	43.1	1.00	8.84	8.98
PFCU1-4R	5.8	4.5	0.78	34.4	34.5	1.00	5.93	7.67
PFCU1-6R	5.3	5.5	1.04	29.5	24.8	0.84	5.57	4.51
PFCB1-0R	6.5	6.0	0.92	58.0	55.5	0.96	8.92	9.25
PFCB1-2R	7.2	7.0	0.97	49.3	31.1	0.63	6.85	4.44
PFCB1-4R	5.9	7.5	1.27	32.4	34.4	1.06	5.49	4.59
PFCB1-6R	8.3	8.9	1.07	32.0	30.4	0.95	3.86	3.42
PFCU1-6L2	9.8	8.0	0.82	73.8	82.0	1.11	7.53	10.25
PFCU1-6L3	12.8	12.6	0.98	102.0	102.1	1.00	7.97	8.10
Mean			0.96			0.96		
COV (%)			13.33			12.30		

평균비율은 각각 0.96, 0.96이고, 변동계수는 각각 13.33%, 12.30%이다. 그러므로, 하중에 대한 처짐과 연성지수 평가에서 탄소섬유 판으로 보강된 시험체의 해석 결과는 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 논문에서 긴장력을 도입한 탄소섬유판으로 보강된 시험체의 휨 성능 실험과 DIANA 프로그램을 이용한 비선형 유한요소해석을 수행하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 긴장력을 도입한 탄소섬유판으로 보강된 철근콘크리트 보의 휨 실험을 수행하였다. 정착장치가 있는 시험체의 최종 파괴가 조기 박리 파괴에서 발생하는 것이 아니라 복합재료의 파단에 의해서 진행되는 것이 아니라, 시험체의 극한하중은 부착 여부와 긴장량에 관계없이 거의 일정한 것으로 나타났다.
- 2) 긴장력을 도입한 탄소섬유판으로 부착보강된 시험체는 1차, 2차 박리가 진행된 후, 정착장치의 복합재료 고정에 의해 비부착시험체와 같은 거동을 하는 것으로 나타났다. 그러나, 에폭시를 이용하여 부착된 복합재료는 합성 단면을 구성하여 강성이 증가되기 때문에, 부착보강시험체는 비부착보강시험체보다 균열하중과 항복하중이 더 증가하였다.
- 3) 콘크리트 소성, 콘크리트와 복합재료의 계면 요소를 고려한 DIANA 프로그램을 이용하여 탄소섬유판으로 보강된 시험체의 유한요소해석을 수행하였다. 박리하중, 항복하중, 극한하중에 대하여 해석 결과는 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다.
- 4) 부재의 안전성을 평가하기 위해서 실험과 해석 결과에 대한 연성지수를 평가하였다. 탄소섬유판을 단순 부착하여 보강된 시험체는 취성적인 탄소섬유판의 박리 파괴가 발생되어 연성지수 3이하로, 표준 시험체에 비하여 연성도가 낮은 것으로 나타났다. 긴장력을 도입한 탄소섬유판으로 보강된 모든 시험체는 연성지수가 3이상 나타나 충분한 연성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

1. Fanning, P. J. and Kelly, O., "Ultimate Response of RC Beams Strengthened with CFRP Plates", *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol.5, No.2, 2001, pp.122~127.
2. Mohamed, M. S., Ali, D. J., and Oehlers, M. A., "Debonding of Steel Plates Adhesively Bonded to the Compression Faces of RC Beams", *Construction and Building Materials*, Vol.19, 2005, pp.413~422.
3. Rahimi, H. and Hutchinson, A., "Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Plates", *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol.5, No.1, 2001, pp.44~56.
4. Ritchie, P. A., Thomas, D. A., Lu, L. W., and Connelly, G. M., "External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics", *ACI structural Journal*, Vol.88, No.4, 1991, pp.490~500.
5. Shahawy, M. A., Arockiasamy, M., Beitelman, T., and Sowrirajan, R., "Reinforced Concrete Rectangular Beams Strengthened with CFRP Laminates", *Composite Part B: Engineering*, 27B, 1996, pp.225~233.
6. Jones, R., Swamy, R. N., and Charif, A., "Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Epoxy-Bonded Steel Plates", *The Structural Engineer*, Vol.66, No.5, 1980, pp.85~94.
7. Nguyen, D. M., Chan, T. K., and Cheong, H. K., "Brittle Failure and Bond Development Length of CFRP-Concrete Beams", *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol.5, No.1, 2001, pp.12~17.
8. 양동석, 박선규, 이용학, "강연선 및 탄소섬유쉬트로 보강된 철근 콘크리트 보의 휨거동 특성", 콘크리트학회 논문집, 14권 2호, 2002, pp.216~222.
9. Chen, J. F. and Teng, J. G., "Anchorage Strength Models for FRP and Steel Plates Bonded to Concrete", *Journal of Structural Engineering*, Vol.127, No.7, 2001, pp.784~791.
10. Teng, J. G., Smith, S. T., Yao, J., and Chen, J. f., "Intermediate Crack-Induced Debonding in RC Beams and Slabs", *Construction and Building Materials*, 2003, pp.447~462.
11. 한국건설기술연구원, 외부프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강공법 개발, 건설교통부연구개발사업, E01-01, 2004~2005.
12. Mander, J. B., Priestley, M. J., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.114, No.8, 1988, pp.1804~1849.

요 약 본 논문에서는 부착 유무, 정착장치 유무, 긴장량, 경간 길이 등을 실험 변수로 하여 총 13개의 시험체를 제작하여 휨 성능 실험과 유한요소해석을 수행하였다. 1개의 표준시험체, 2개의 긴장력을 도입하지 않는 보강시험체, 4개의 긴장력을 도입한 비부착보강시험체, 4개의 긴장력을 도입한 부착시험체와 2개의 경간 길이가 다른 보강시험체를 제작하였다. 또한, 콘크리트의 비선형, 철근 및 탄소섬유와 콘크리트와의 계면 특성을 고려한 DIANA 프로그램을 이용하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 긴장력을 도입한 보강된 시험체는 박리 파괴가 아닌 FRP 파단에 의하여 최종파괴가 되었다. 특히, 긴장력을 도입한 부착시험체는 1차, 2차 박리가 발생 후, 정착장치의 고정으로 인하여 부착시스템에서 비부착시스템으로 전환되었다. 또한, 탄소섬유판으로 보강된 시험체의 해석 결과와 실험 결과를 비교 분석하였다. 긴장력을 도입한 탄소섬유판으로 보강된 모든 시험체는 연성지수가 3이상 나타나 어느 정도 이상의 연성을 확보하고 있는 것으로 알 수 있었다. 그리고 박리하중과 항복하중 및 극한하중에서 실험값과 해석값이 잘 일치하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 정착장치, 탄소섬유판, 연성, 유한요소해석, 휨 실험