

GFRP로 보강된 RC보의 휨특성에 관한 실험적 연구

A Experimental Study on the Flexural Characteristics of RC Beams Strengthened by GFRP

심종성^{*}
Sim, Jongsung.

김규선^{**}
Kim, Gyuseon

이석무^{***}
Lee, Seokmoo

김경민^{****}
Kim, Kyoungmin

ABSTRACT

Flexural tests on 2.4m long reinforced concrete beams with epoxy-bonded GFRP plates are reported in these tests. The selected experimental variables are strengthening plate length, plate thickness, plate width and the method of anchoring the plate ends. The effects of these variables in overall behavior are discussed. The results generally indicate that the flexural strength of strengthened beams is increased. The ductile behavior of tested beams is inversely proportional to the plate thickness, plate width. The use of an U-jacket plate provided a proper anchorage system and improved the ductility of beams.

1. 서론

손상된 콘크리트 구조물을 보강재를 이용하여 보강하는 방법으로는 강판 또는 연속섬유보강판의 부착, 그리고 섬유판의 외부 포스트텐셔닝(post-tensioning) 등이 있으며 이 방법은 구조물의 내하력을 증가시키는데 성공적으로 적용되어 왔다^[1]. 특히 강판부착공법은 지난 20여년동안 검증된 보강효과와 시공성 때문에 실 구조물에 폭 넓게 적용되어왔지만 강판의 과도한 크기와 자중으로 인한 시공상의 문제점, 콘크리트부재의 철근과 콘크리트와 비교해 떨어지는 합성작용(composite action), 온도변화, 부식과 같은 내구성 문제 등이 결함으로 노출되면서 이 결함을 보완할 수 있는 신소재를 이용한 보강공법이 많은 관심을 끌고 있다^[1-4].

현재 국내에서는 이러한 신소재 중 탄소섬유시트(Carbon Fiber Sheet : 이하 CFS)나 탄소섬유판(Carbon Fiber Reinforced Plastics : 이하 CFRP) 등을 이용하여 구조물의 내력을 증진시키는 공법과 관련된 많은 실험과 이론적 연구가 수행중에 있으며 실제 실구조물에 시공하고 있는 단계에 있다^[6]. 그러나 탄소섬유시트나 탄소섬유판의 경우 재료적 물성은 뛰어나지만 비싼 재료비로 인해 경제성에 문제가 되고 있다. 최근 보강재로 국내에 도입된 유리섬유보강판(Glass Fiber Reinforced Plastics : 이

* 한양대학교 토목·환경공학과 부교수

** 한양대학교 산업과학연구소 연구원

*** 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

**** 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정

하 GFRP)경우에는 이러한 결점이 보완되고 기존의 섬유보강판이 가지는 장점을 활용할 수 있으므로 다른 재료에 비해 상대적인 잇점을 가지게 된다.

본 연구에서는 폭넓은 문헌조사를 토대로 유리섬유보강판으로 보강된 RC보의 휨특성을 조사할 수 있는 실험을 수행하였으며 각 실험변수에 따른 보의 거동을 연구함으로써 보강효과 및 거동특성을 분석하였다. 실험변수로는 보강길이, 보강폭, 보강두께가 있으며 단부파괴방지를 위해 보강재의 단부를 U형보강과 앵커를 설치하여 그 효과를 분석하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

본 실험에서 사용한 콘크리트는 설계강도가 240kg/cm^2 으로 설계된 레미콘제품을 사용하였으며 콘크리트의 압축강도는 측정결과 347kg/cm^2 , 슬럼프는 18cm, 굵은골재 최대치수는 25mm이다. 철근의 항복용력은 4650kg/cm^2 인 철근을 사용하였으며 인장축에 2D13, 압축부에 2D10을 배근하였다. 사용재료의 역학적 성질은 다음 표2.1에 나타내었다.

표 2.1 보수시험체에 사용된 재료의 역학적 성질

재료	물성	항복강도 (kg/cm^2)	압축강도 (kg/cm^2)	인장강도 (kg/cm^2)	탄성계수 (kg/cm^2)
콘크리트		-	347	34	2.49×10^5
철근		4650	-	6700	2.04×10^6
GFRP		4500	-	4500	2.27×10^9

2.2 실험변수

본 연구에서는 실험변수로서 보강길이, 보강폭, 보강두께 및 단부보강을 고려하였으며 이를 토대로 11개의 시험체를 제작하였다. 각각의 실험변수 및 실험결과를 표2.2에 나타내었다.

표2.2 실험변수 및 실험결과

보강 재료	보강 길이(L)	단부보강	보강폭 (b:cm)	두께 (t:cm)	초기박리 하중(ton)	초기rip-off 하중(ton)	항복하중 (ton)	파괴하중 (ton)	파괴모드	시험체명
Control	-	-	-	-	-	-	5	6.3	휨 파괴	CON
GFRP	1.0L	-	15	0.14	-	-	8	10.4	박리파괴	G10-N15
		-	15	0.14	7.7	8.42	8.02	9.57	박리파괴	G8-N15
		-	10	0.14	7.4	8.2	7.01	9	박리파괴	G8-N10
	0.8L	-	10	0.07	-	-	5.01	7.9	휨 파괴 (GFRP항복)	1G8-N10
		-	10	0.21	7.5	8.3	8.71	9.4	박리파괴	3G8-N10
		-	5	0.14	-	-	6.51	7.3	박리파괴	G8-N5
	0.6L	U형보강	15	0.14	-	-	7.48	9.33	사인장파괴	G8-U15
		-	15	0.14	-	4.5	7.26	8.5	rip-off파괴	G6-N15
		U형보강	15	0.14	-	8.3	8.01	9.5	사인장파괴	G6-U15
	앵커처리	15	0.14	-	5.5	7.61	8.83	rip-off파괴	G6-A15	

2.3 시험체 제작

철근 콘크리트 보시험체의 단면치수 및 배근상세는 그림 2.1과 같다. 보의 폭 및 높이는 각각 15cm 및 25cm이며 지간 길이는 200cm, 총길이는 240cm이다. 철근량은 평형철근비의 33%를 배근하였고 시험체의 전단파괴를 막기 위하여 D10 스티럽을 10cm 간격으로 설치하였다.

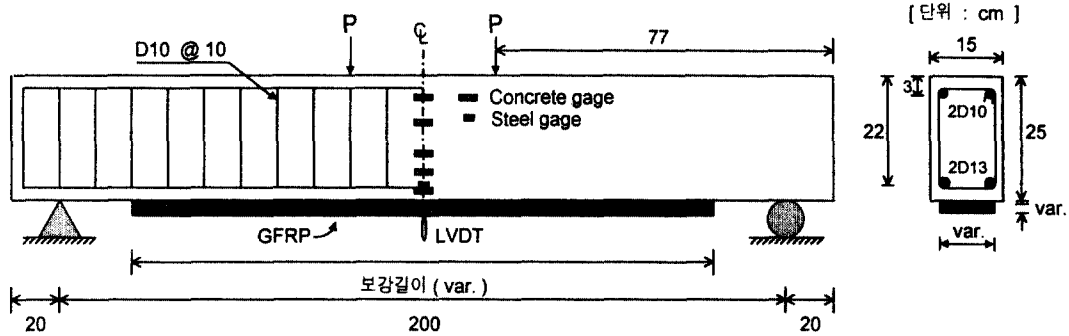


그림 2.1 시험체 형상 및 제원

2.4 하중재하 및 측정 방법

본 실험에서는 시험체의 휨성능평가를 위한 하중재하는 200t 규모의 만능시험기를 사용하여 4점 재하를 실시하였으며 재하하중량을 측정하기 위하여 로드셀을 설치하였다. 보시험체의 변위를 측정하기 위하여 중앙부에 변위계를 설치하였으며, 인장철근의 항복여부를 판단하기 위해 중앙부에 strain gage를 주철근에 2개씩 타설전에 설치하였다. 보강재와 콘크리트 사이의 부착특성을 고찰하기 위하여 보시험체 측면에 보의 하부로부터 3cm, 7cm, 10cm, 16cm, 23cm의 위치에 콘크리트 게이지를 부착하였다. 이와 같이 설치한 센서로부터 나오는 데이터는 TDS601로 받아들여 컴퓨터를 이용하여 정리하였다.

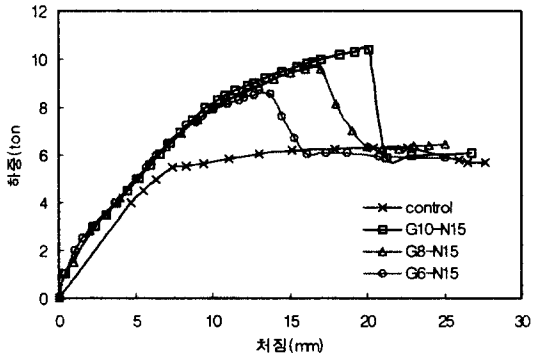
3. 실험결과 및 고찰

3.1 파괴양상

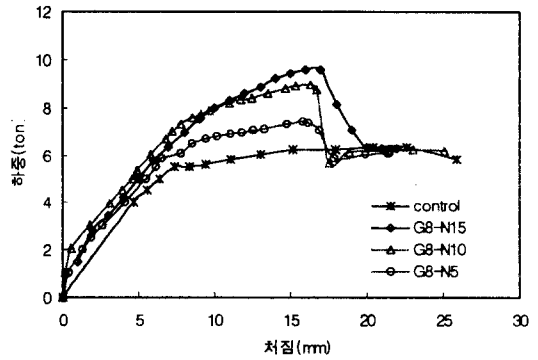
시험결과 대부분의 GFRP 보강시험체가 휨균열에 의해 보중앙부에서 발생한 콘크리트와 GFRP계면에서의 균열이 단부로 진행되어 파괴되는 박리파괴를 나타내었으며, 보강길이비가 0.6L인 시험체(G6-N15)와 앵커처리를 한 시험체(G6-A15)는 보강단부에 발생한 응력집중현상으로 보강재가 단부에서 콘크리트를 물고 떨어지는 rip-off 파괴를 나타내었다. 그러나 GFRP를 한겹으로 보강한 보강길이비가 0.8L인 시험체(1G8-N10)는 시험체 중앙에서 보강재가 항복한 후 파단되는 전형적인 휨파괴양상을 보였다. 그리고 단부를 보강하기 위하여 U형으로 보강재 단부를 감싼 보강길이비가 0.8L인 U형 보강시험체(G8-U15)는 좌측하면의 보강재가 중앙부에서 박리되기 시작하면서 U형 보강재 모서리부분을 찢어버린 후 파괴되었고, 보강길이비 0.6L인 U형 보강시험체(G6-U15)는 보강재는 박리되지 않고 단부 보강부위에서 rip-off 균열이 진전되면서 사인장파괴의 양상을 보였다.

3.2 결과고찰

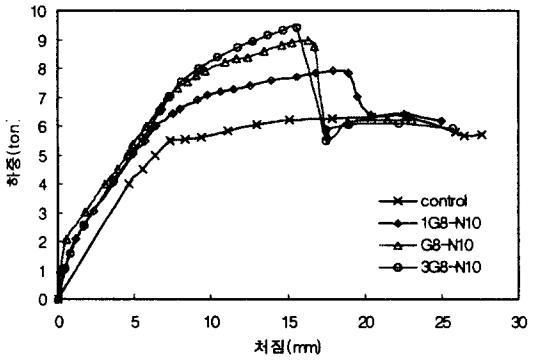
그림 3.1과 3.2에는 실험변수별 하중-처짐곡선과 보깊이별 변형을 분포를 나타내었다. 그림에서 알



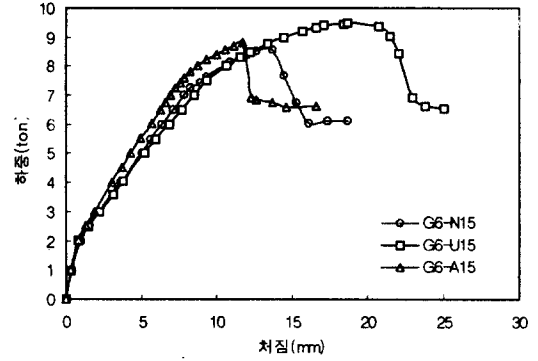
a) 보강길이별



b) 보강폭별



c) 보강두께별



d) 단부보강별

그림 3.1 보강시험체의 하중-처짐선도

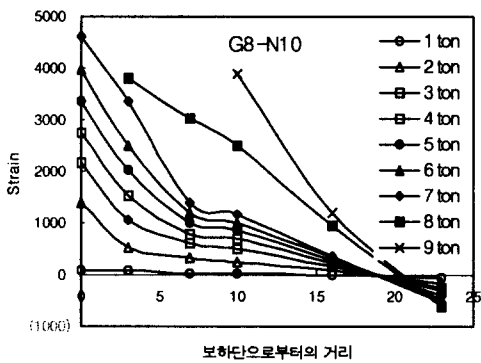


그림 3.2 보강길이별 변형률 분포

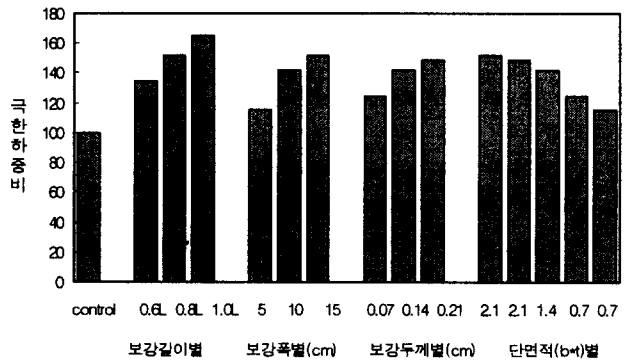


그림 3.3 각 변수별 극한하중비에 미치는 영향

수 있듯이 RC보는 강성과 강도면에서 상당한 증가를 나타내었고, 파괴시까지의 GFRP와 콘크리트 사이에는 완전한 합성거동을 나타내고 있다.[그림 3.2 참조] 또한 강성과 강도가 향상된 대신 연성손실로 인하여 취성파괴하는 것이 전형적인 GFRP로 보강된 보의 파괴양상으로 나타나고 있다. 또한 초기강성의 증가로 인하여 초기 휨균열이 제어되는 효과가 있다.

i) 보강길이의 영향

GFRP로 보강된 RC보의 경우 보강길이가 짧아짐에 따라 극한 하중이 일정하게 감소한다[그림 3.3 참조]. 문헌^[5,7]에 따르면 강판으로 보강된 경우에는 보강길이가 전지간에서 감소함에 따라 극한하중이 급격히 감소되고 있는 것으로 보고되고 있는데 이는 이두가지 보강재료의 지배적인 파괴메카니즘이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 강판으로 보강된 보의 경우는 보강길이가 큰 영향을 미치는 단부에서 콘크리트를 물고 떨어지는 파괴(rip-off failure)가 지배적이며 GFRP의 경우에는 가력점 하단 인장부위에서 발생한 휨균열로 인해 유발되는 계면균열이 단부로 진전되면서 부착면적의 부족으로 부착파괴되는 형태이기 때문에 보강길이에 따른 영향이 강판에 비해 크지 않다고 여겨진다. 그러나 보강길이가 0.6L인 경우에는 GFRP로 보강한 경우에도 rip-off파괴가 발생하였다. 또한 보강길이가 보의 항복강도에 미치는 영향 또한 다른 변수의 영향에 비해 그다지 크지 않다[그림 3.4 참조].

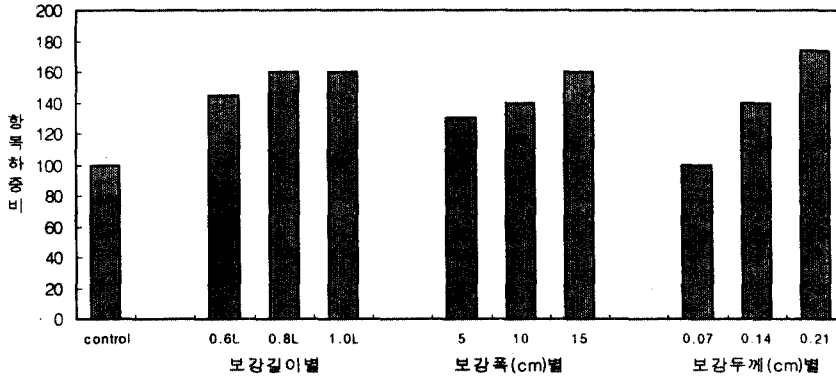


그림 3.4 항복하중에 미치는 각 변수들의 영향

ii) 보강재 단면적의 영향

보강재 면적의 영향은 보강재 폭의 영향과 두께의 영향으로 나누어 검토하였다. 보강폭은 두께를 GFRP를 2점 즉 0.14cm로 일정하게 하고 폭을 5, 10, 15cm로 변화시켰으며, 보강두께는 보강폭을 10cm로 일정하게 하고 GFRP 1점에서 3점까지 증가시키면서 그 영향을 분석하였다. 보강폭과 보강두께 모두 변수가 증가하면서 파괴하중이 증가하는 비례관계를 가졌다. 여기서 동일한 단면적을 가질 때 보강재폭과 두께 중 지배적인 인자를 검토해 보면 그림 3.3에서 알 수 있듯이 동일한 단면적에서 폭을 넓게하여 보강한 시험체(2G8-N10, 1G8-N10)는 두께를 크게한 시험체(3G8-N10)보다 보강효과가 조금 더 우수한 것을 알 수 있다. 이는 GFRP로 보강된 RC보의 파괴가 부착파괴로 인한 박리파괴가 지배적이므로 보강재의 부착면적이 상대적으로 넓은 시험체가 보강효과가 우수하게 된다. 따라서 동일한 단면적일 경우 두께를 크게하는 것보다 부착면적을 키우는 것이 역학적으로 유리하다.

iii) 단부보강효과

단부에 발생하는 응력 집중 현상으로 인하여 조기파괴되는 현상을 방지하기 위하여 단부에 U형으로 단부를 감아서 보강하거나 GFRP용 앵커를 사용하여 단부에 앵커를 고정하는 방법을 사용하였다. U형으로 단부를 보강하는 방법은 파괴하중 및 연성측면에서 상당히 효과적이었지만 앵커를 보강한 경우에는 rip-off파괴를 제어하지 못하였다. 그러나 보강길이가 긴 경우 중앙부위에 앵커를 적용할 경우 GFRP의 부착 및 중앙부에서 발생하는 균열의 억제 및 진전을 제어하는 효과를 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

iv) 각변수에 따른 강성 및 연성의 변화

GFRP로 보강된 RC보의 극한강도에 이르기까지 휨거동을 살펴보면 근사적으로 tri-linear 곡선으로 구성된다[그림 3.1참조]. 1단계로 초기균열이 발생하기 전과 주철근이 항복할 때까지의 2번째 단계 그리고 다음은 GFRP의 내력으로 저항하는 극한하중까지로 이루어지는 3번째 단계로 구성된다. 1단계의 강성을 초기강성 2단계를 항복 전 강성 3단계를 항복 후 강성으로 정의하고 이를 각 변수에 따른 영향으로 표 3.1에 정리하였다. 표 3.1에 따르면 GFRP로 보강할 경우 주로 초기균열에 영향을 미치는 초기강성과 철근항복 후 GFRP에 의해 내력이 상승되는 항복 후 강성이 큰 증가를 나타냄을 알 수 있다. 또한 항복강도시 처짐에 극한강도시 처짐의 비를 연성의 정도를 나타내는 연성지수로 정의하고 각 변수에 따른 영향을 살펴보면 보강길이는 길수록, 폭은 좁을수록, 두께는 얇을수록 연성지수는 증가함을 알 수 있다. 이는 연성지수가 클수록 보강재의 변형과 보의 처짐이 크게 발생하며, 보강재가 효율적으로 사용된다는 것을 의미한다.

표3.1 강성 및 연성에 미치는 각변수의 영향

변수 시험체	초기강성(t/mm)		항복강도 전 강성(t/mm)		항복강도 후 강성(t/mm)		연성지수
	강성	비율	강성	비율	강성	비율	
CONTROL	0.83	100%	0.78	100%	0.08	100%	
G10-N15	1.28	154%	0.84	107%	0.23	287%	2.12
G8-N15	1.5	180%	0.84	107%	0.21	262%	1.79
G8-N10	3.52	424%	0.93	119%	0.196	245%	2.08
1G8-N10	1.83	220%	0.99	127%	0.14	175%	3.10
3G8-N10	1.99	239%	0.94	121%	0.25	313%	1.93
G8-N5	1.56	188%	0.89	114%	0.16	200%	2.46
G8-U15	1.74	210%	0.84	108%	0.16	200%	2.25
G6-N15	1.96	236%	0.87	102%	0.24	300%	1.66
G6-U15	2.54	306%	0.80	103%	0.21	263%	1.99
G6-A15	2.54	306%	0.99	127%	0.35	437%	1.61

4. 결론

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. GFRP로 철근콘크리트 보를 보강한 경우 각 변수별로 20%~70% 정도의 향상을 보였으며 적절한 보강효과를 나타내었다. 특히 초기강성 및 주철근 항복 후 강성이 향상되었다.
2. GFRP의 보강길이의 변화에 따른 내력감소는 강판과는 달리 급격히 이루어지지 않으며 보강길이가 짧아질수록 파괴모드가 박리파괴에서 rip-off파괴로 변화였다. 특히 이러한 조기 파괴를 방지하기 위하여 U형으로 단부를 감싼 경우 강도나 연성파괴 측면에서 상당한 효과가 있었다.
3. 일반적으로 보강재 단면적이 증가할수록 보강된 RC보의 내력은 향상되고 동일한 단면적일 경우에는 두께가 큰 경우보다 보강폭이 넓은 경우가 보강효과가 더 우수한 것으로 나타났다. 이는 GFRP로 보강된 보의 메카니즘이 주로 부착파괴로 발생하기 때문이다.
4. GFRP로 보강된 보의 연성을 연성지수로 표현할 경우 보강길이는 길수록, 보강폭과 두께는 적을수록 연성지수는 증대하며 주어진 보강재의 성능이 더 효율적으로 활용되어진다.

감사의 글

본 연구는 “97 경기도 산·학·연 지역 컨소시엄의 지원을 받아 수행되었으며, 저자들은 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참 고 문 헌

1. Quantrill, R. J. et. al., “Experimental and Analytical Investigation of FRP Strengthened Beam Response : Part I,” Magazine of Concrete Research, 48, No.177, Dec., 1996, pp 331-342
2. Ritchie, P. A. et. al., “External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics.” , ACI Structural Journal, V.88, No.4 Jul-Aug, 1991, pp 490-500
3. Saadatmanesh, H. et. al., “RC Beams Strengthened with GFRP Plates. I: Experimental Study” , Journal of Structural Engineering, Vol. 117, No. 11, Nov. 1991 pp 3417-3433
4. Sharif, A. et. al., “Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plate.” , ACI Structural Journal, V. 91, No. 2, Mar-Apr, 1994 pp 160-168
5. 심종성의 3명, “강판으로 보강된 RC보의 조기파괴제어에 관한 실험적 연구” , 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제10권 1호, 1998.5.
6. 심종성의 3명, “R/C 라멘교에 적용된 CFRP의 보강효과” , 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제8권, 제1호(통권 제14집), 1996.5, pp328-333
7. 최완철 외3명, “에폭시 접착 강판 보강 철근콘크리트보의 역학적 거동에 관한 연구” , 숭실대학교 생산기술연구소, 1994.10