

실험에 의한 피로하중을 받는 FRP패널 보강 RC보의 부착성능

The Bond Performance of RC Beams Strengthened for FRP Pannel deal with Fatigue Loadings through Experiments

이 창 규*
Lee, Chang Gyu

정 영 배**
Chung, Yung Bea

Abstract

Repair and Reinforcement are subjected change to increasing of remodelling. The usage of carbon fiber sheets is increasing for the strengthening of reinforce concrete structures. Therefore experimental and analytical studies are carry out to investigate the flexural behaviors of the strengthened RC structures by the external bonding of the new reinforcement method. Also the aim of this study is to investigate reinforcing method of FRP panel deal with fatigue loading through experiments.

요 지

리모델링의 증가로 보수보강에 대하여 많은 관심을 갖게 되었다. 탄소섬유시트의 사용은 철근콘크리트 구조의 강성을 증가시키기 위하여 많이 쓰이고 있다. 따라서 새로운 보강방법으로 외부 부착에 의한 강성이 증가된 RC구조의 휨거동을 알아보기 위하여 실험과 분석 연구를 수행하였다. 또한 본 연구는 실험에 의한 피로하중을 받도록 한 FRP패널 보강방법에 대하여 살펴보는데 그 목적이 있다.

Keywords : Repair and Reinforcement, FRP panel, Fatigue loading, Bond performance

핵심 용어 : 보수보강, FRP, 패널, 피로하중, 부착성능

* 정화원, (주)거봉엔지니어링 대표이사, 건축사공기기술사

** 정희원, 진주국제대학교 실내건축학과 조교수, 공학박사

E-mail : changgyukr@yahoo.co.kr 051-335-3001

•본 논문에 대한 토의를 2007년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2007년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

1.1 연구의 목적

철근콘크리트 구조물은 내구성, 내화성, 시공성, 치수형상성이 우수하고 강성이 크므로 수평하중 및 변형에 대한 저항력이 크며, 유지관리 비용도 적게 들어 경제성이 높은 구조물로 인식되어 있어 지금까지도 많이 사용되고 있다. 그럼에도 불구하고 철근콘크리트 구조물도 시공 중의 오류 및 건물의 용도변경, 반복하중, 시간의 경과에 따른 재료특성의 변화, 환경의 변화 등으로 인하여 내구성을 약화시켜, 균열, 강도저하, 변형 등을 일으키므로, 내력이 저하되거나 사용성에 문제가 제기되었다.

최근에 발생한 철근콘크리트 구조물의 부실사고 등으로 인해 보강방법에 대한 관심이 높아지고 여러 공법이 사용되고 있으나, 구조물의 내력을 향상시키는 보강설계 및 보강공법에 대해서는 일정한 기준이 없는 상태이며, 보강에 필수적인 접착제나 보강 재료의 선택이 보강업체 또는 설계자의 경험에 의해 이루어지고 있다. 철근콘크리트 구조물의 보강공법에는 단면 증대공법, 포스트 텐션공법, 강판 부착공법, 그리고, 최근에는 탄소, 아라미드, 유리등의 신소재를 섬유(Fiber) 형태로 가공한 탄소섬유시트(Carbon Fiber Sheet), 아라미드섬유시트(Aramid Fiber Sheet), 유리섬유시트(Glass Fiber Sheet) 등의 에폭시(Epoxy) 접착 보강공법들이 있다. 단면 증대공법은 부재의 강성을 증가시키나 단면증가에 따른 자중이 증가, 작업 공간 확보 및 이용 공간이 제한되는 단점이 있으며, 강판부착공법은 부재 단면 크기의 변화가 거의 없고 시공이 간편한 반면, 취급이 불편하고 부식 및 내화성능이 취약하며, 취성적인 보강판 탈락현상을 보인다. 섬유시트를 이용한 철근콘크리트 보강공법은 경량이고, 부식의 염려가 없으며 작업성 및 내구성이 우수한 공법이나 주근의 위치에서 피복콘크리트를 물고 떨어지는 계면 부착파괴 및 시간의 경과에 따른 접착제의 부착력 약화 가능성이 높아 구조물의 내구성에 문제점이 있다. 따라서 철근콘크리트 구조물에 사용되고 있는 각종 보강공법의 문제점을 보완하여 부착성능이 우수

한 FRP 패널(Fiber Reinforced Polymer Panel)을 기존의 철근콘크리트 부재에 보강함으로써 구조적 성능뿐 아니라 부착성능이 우수한 휨부재의 보강공법의 개발이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 보다 합리적인 철근콘크리트 부재의 휨보강 공법을 개발하기 위한 방법의 일환으로서 FRP 패널을 이용하는 보강공법에 대하여 보강재와 콘크리트간의 부착성능을 파악하는 것을 주된 목적으로 한다.

1.2 연구의 방법 및 절차

본 연구의 대상이 되는 보강보는 보 밑면에 에폭시 모르타르와 탄소섬유시트로 제작한 FRP 패널로 보강한 철근콘크리트 보로 한다.

본 연구의 진행과정을 고려하여 정리 하면 아래와 같다. 먼저 본 연구를 시작하기 전에 현재 사용하고 있는 각종 보강공법에 대한 고찰을 행하였고, 사용되는 재료인 규사의 입도 및 물성을 파악하여 적절한 에폭시 모르타르의 배합비를 결정하였으며, 이것을 토대로 FRP 패널을 제작하였다. 한편, 보강재가 철근콘크리트 구조물에 보강된 경우 보강 구조물이 최대 내력에 도달할 때까지 효율적인 보강효과를 발휘하기 위한 필수조건은 보강재와 콘크리트의 일체화 거동이다. 탄소섬유시트(CFS), 에폭시(Epoxy)의 물성을 알아본 후, 일체화 거동을 알아보기 위해 부착 길이를 변수로 5개의 시험체를 제작하여 50tonf 용량의 만능시험기(Universal Testing Machine)를 이용하여 부착시험을 행하였다.

부재의 부착성능을 알아보기 위해, 단순가력실험 및 피로가력실험에서 3종류의 인장철근비(1.75%, 1.03%, 0.31%)를 실험 변수로 하여 총 9개의 시험체를 제작하였다. 시험체가 안정적으로 피로하중을 받도록 하기 위하여 하중 반복회수 10회까지 정적으로 재하 하였으며, 진동수는 1Hz, 하중은 정적최대하중의 70%를 최대하중으로 하고, 최소하중은 최대하중의 10%로 하여, 50tonf 용량의 액츄에이터(Actuator)를 사용하여 주기적으로 반복하여 재하 하였다. 실험결과로부터 실험변수에 따른 부착강도 및 파괴형상을 파악하고,

정적 및 피로 시험체의 균열형상, 하중-처짐 관계 등을 비교·분석한다.

2. 에폭시 모르타르의 적정 배합비

2.1 개요

에폭시 모르타르의 적정 배합비를 결정하기 위해서 규사의 입도 조정을 통해 적정 입도비를 알아보고, 규사인 60목과 4호의 배합비를 달리한 공시체를 제작하여 각각의 압축 및 인장 실험을 실시한다.

2.2 규사의 입도 조정

FRP 패널에 사용된 규사는 60목과 4호이다. 각각의 규사는 입도의 측면에서 검토하기 위한 시험으로 건축공사 표준시방서에 표시된 KS F 2502⁽¹⁾에 준하여 적당한 배합설계를 하기 위해서는 골재의 체가름 시험방법을 실시하였고, 시험을 통해 얻은 결과를 Table 1에 나타내었다. 체가름 분석시험 결과는 시료 전 중량에 대하여 백분율로 표시하며 각 체를 통과하는 백분율(통과율 %), 각체에 잔류하는 백분율(잔류율 %) 또는 연속한 각 체 간에 잔류하는 백분율 등을 보고한다. 보고하는 백분율은 이것에 가장 가까운 상수로 고친 것으로 한다. 통과율은 각 체마다 다음 식에 의해서 표시된다.

$$w_1[\%] = \frac{W - W_1}{W} \times 100 \quad (1)$$

$$w_2[\%] = \frac{W - (W_1 + W_2)}{W} \times 100 \quad (2)$$

$$w_n[\%] = \frac{W - \sum W_n}{W} \times 100 \quad (3)$$

W : 시료의 전 중량

W₁, W₂ ... W_n : 체눈이 큰 것부터 1, 2, ... n번째, 체에 잔류하는 중량

Table 1 규사의 체가름 시험결과
(a) 4호인 경우

체의 치수 (mm)	2	1.18	0.85	0.425	0.3	계
각체 잔류량 (g)	0	421	474	65	5	965
각체 잔류율 (%)	0	43.63	49.1	6.74	0.53	100
누가 잔류율 (%)	0	43.63	92.73	99.47	100	100
통과율 (%)	100	56.37	7.27	0.53	0	100

(b) 60목인 경우

체의 치수 (mm)	1.18	0.85	0.425	0.3	0.15	계
각체 잔류량 (g)	0	0	167	708	123	1000
각체 잔류율 (%)	0	0	16.7	70.8	12.3	100
누가 잔류율 (%)	0	0	16.7	87.5	99.8	100
통과율 (%)	100	100	83.3	12.5	0.2	100

Table 2 잔골재의 표준입도

체의 치수 (mm) 종류	체통과 중량 백분율(%)				
	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15
모래	80-100	50-90	25-60	10-30	2-10

골재의 입도를 표시하는 방법으로 조립률이 있다. 조립률은 골재의 굵기를 표시하는 계수이나 동일한 조립률로 표시되는 골재의 입도는 무수히 많으므로 체가름곡선과 같이 정확히 입도분포를 표시하는 것은 아니다. 골재의 입도의 변화를 알고 싶을 때 이용할 수 있고 입도의 간단한 표시법으로도 편리하다. 건축공사 표준시방서⁽²⁾에 의한 잔골재의 표준입도는 Table 2에 표시하며, 규사인 60목과 4호의 표준입도와 60목과 4호의 배합비를 변수로 시험하여 얻은 표준입도를 Table 3에 나타내었고, 규사의 체가름 시험결과를 Fig. 1에 나타내었다.

Table 3 규사의 체가름 시험결과

체의 치수 (mm) 골재종류	체통과 중량 백분율(%)					
	2	1.18	0.85	0.43	0.3	0.15
60 목	100	100	100	83.30	12.50	0.20
4 호	100	56.37	7.27	0.53	0.00	0.00
1:1 혼합시	100	78.18	53.63	41.91	6.25	0.10
1:2 혼합시	100	70.90	38.18	28.12	4.20	0.06
1:1.5 혼합시	100	73.82	44.36	33.64	5.00	0.08
1:3 혼합시	100	67.27	30.45	21.22	3.12	0.05

(60목:4호 기준)

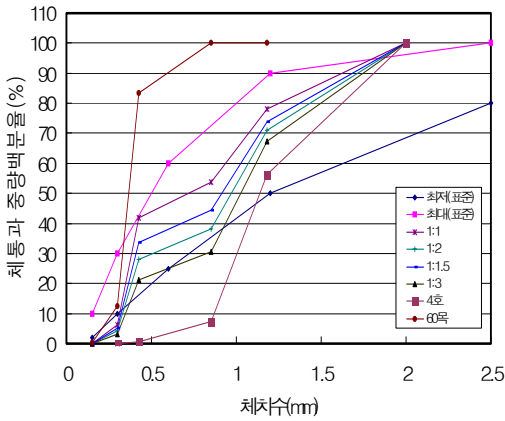


Fig. 1 규사의 체가름 시험 결과

3. 에폭시 모르타르의 물리적 특성

3.1 개요

FRP 패널에 사용된 에폭시 모르타르는 규사인 60목과 4호를 적정 배합비에 따라 충분히 혼합한 후 에폭시 레진을(주제:경화제=1:4)을 첨가하여 충분히 비벼 제작한 것이다. 에폭시 모르타르의 적정한 배합비를 결정하기 위해 규사인 60목과 4호의 배합비와 에폭시 레진과 규사의 배합비를 변수로 공시체 20개 제작하였다. 공시체는 단순 재하 하여 압축 및 인장 시험을 행하였고, 그 결과에 따라 에폭시 모르타르의 적정 배합비를 결정하였다.

3.2 압축 및 인장 시험

본 시험에 사용된 시험체는 총 20개이며, 시험체는 콘크리트공시체의 규격인 높이 20cm, 지름 10cm의 실린더형 몰드에 넣어서 제작하였다. 에폭시 모르타르의 물성을 알아보기 위한 시험의 변수는 규사인 60목과 4호의 배합비는 1:1.5와 1:3으로 구분하였고, 에폭시 레진과 규사의 배합비를 1:3과 1:4로 두었다. 시험체의 양생은 타설 후 24시간 이후에 탈형을 하였고, 일주일 대기 양생시켰다. 압축강도는 시험체 3개의 평균값으로 하고 인장강도는 시험체 2개의 평균값

Table 4 에폭시 모르타르의 재료 물성

물성 종류	A 레진:혼합 잔골재 =1:4	B 레진:잔골재 =1:4	C 레진:잔골재 =1:3	D 레진:혼합잔 골재 =1:4
비중	1.90	1.88	1.80	1.82
압축강도 (kgf/cm ²)	637.0	417.2	484.4	538.4
인장강도 (kgf/cm ²)	95.2	81.6	74.0	97.6

으로 하였다. 강도 측정은 100tonf 용량의 만능시험기(UTM)를 사용하였고, 에폭시 모르타르의 재료물성을 Table 4에 나타내었다. 여기서 혼합잔골재는 규사의 배합비를 달리하여 제작한 것으로서, A의 경우 60목:4호=1:3으로 하였고 D의 경우 1:1.5로 두었고, 잔골재는 4호만을 사용하여 제작하였다.

3.3 에폭시 모르타르의 배합비 결정

규사의 체가름 시험을 통해 시험한 결과, 규사인 60목과 4호를 1:3으로 배합한 것이 가장 경제적이며, 타당한 것으로 사료된다.

규사의 배합비와 에폭시와 규사의 배합비를 변수로 4가지 경우를 시험한 결과, 잔골재인 4호만 사용하였을 경우는 60목과 4호를 혼합하여 사용한 경우보다 압축강도가 200kgf/cm² 정도 차이가 났다. 또한, 60목과 4호를 혼합하여 사용한 혼합잔골재의 경우에는 배합비를 1:3으로 배합한 것이 1:1.5로 배합한 것보다 압축강도가 약 100kgf/cm² 정도 더 높게 나왔다. 인장강도의 경우에는 B, C 보단 A, D 시험체가 약 20kgf/cm²정도 더 나왔다. 에폭시와 잔골재의 배합비를 다르게 하였을 경우, 배합비가 1:3보다 1:4의 배합비율이 더 높은 강도를 나타내었다.

또한, 잔골재를 사용한 것이 혼합잔골재보다 인장 및 압축강도 측면에서 떨어짐을 알 수 있었다. 혼합잔골재를 비교해 보면, 60목과 4호를 1:3으로 혼합한 것이 1:1.5로 혼합한 것보다 강도가 더 많이 나왔고, 인장강도에는 별 차이가 없었다. 또한, 1:3으로 혼합한 것이 경제적으로 유리하다.

그러므로 본 실험에서 사용할 에폭시 모르타르의 배

합비는 60목과 4호를 1:3의 배합으로 하였고, 레진과 혼합잔골재의 배합은 1:4로 정하여, FRP 패널을 제작하기로 결정한다.

4. 패널과 콘크리트와의 부착시험

4.1 개요

보강재가 철근콘크리트 구조물의 인장 측에 보강된 경우 보강 구조물이 최대 내력에 도달할 때까지 효율적인 보강효과를 발현하기 위한 필수조건은 보강재와 콘크리트의 일체화 거동이다. 즉, FRP 패널이 파단 될 때까지 콘크리트와 FRP 패널 계면에서 부착파괴가 발생되지 않도록 부착력이 충분히 확보되어야 한다. 이러한 부착성을 알아보기 위해 탄소섬유시트와 에폭시의 재료적 특성을 제시하고, 에폭시 모르타르의 적정 배합비로 부착 길이를 변수로 하여 총 5개 시험체를 제작하였다. 시험체는 만능시험기를 이용하여 가력하였고, 재하시의 부착응력과 파괴형상을 알아보았다.

4.2 탄소섬유시트와 에폭시

본 실험에서 사용된 탄소섬유시트는 국내 H사 제품인 일방향 고강도 탄소섬유시트로서 고강도이며, 에폭시의 침투성이 좋은 제품⁽³⁾을 사용하였다. 이 제품에 대한 역학적 성질은 다음 Table 5와 같다.

Table 5 탄소섬유시트의 재료 물성

섬유 종류	고강도 탄소
섬유 중량(gf/m ²)	300
시트치수(Wcm×Lm)	100×50
섬유 비중	1.82
설계 두께(mm)	0.167
표준 시공 두께(mm)	0.60
인장강도(kgf/cm폭) (설계 강도, kgf/cm ²)	590 (35500)
인장탄성률(kgf/cm폭) (설계 탄성률, kgf/cm ²)	39250 (2.35×10 ⁶)
파단 시 변형률(%)	1.5

Table 6 에폭시 수지의 재료 물성

압축강도 (kgf/cm ²)	인장강도 (kgf/cm ²)	휨강도 (kgf/cm ²)
1672	338.5	627

탄소섬유시트 함침용 에폭시 수지는 재료시험을 행하지 않고 제조업체에서 제시한 자료⁽⁴⁾를 따랐으며, 재료적 특성은 Table 6과 같다.

4.3 시험체 제작

본 시험은 12cm×12cm×12cm 크기의 콘크리트 직육면체에 콘크리트 한 측면을 보강재 부착면적으로 계획하였고, 6cm×60cm×1cm인 FRP 패널을 시험체에 3cm, 4.5cm, 6cm, 9cm, 12cm 길이로 부착하여 제작하였다.

4.3.1 패널 제작

규사인 60목과 4호를 1:3으로 배합비에 따라 충분히 혼합한 후 주재:경화제를 1:4로 배합하여 혼합한 에폭시 레진을 첨가하여 레진과 혼합잔골재의 비율을 1:4로 하여 충분히 비빈다. 비빔이 완료된 레진 모르타르를 폭 6cm, 길이 60cm, 높이 1cm 로 제작된 패널 거푸집에 패널의 절반 정도의 두께로 1차 타설한 후 탄소섬유시트를 함침 시키고, 다시 그 위에 절반의 두께로 2차 타설하여 제작하였다. 패널에 사용된 레진 모르타르의 압축강도는 675.6kgf/cm², 인장강도는 100.3kgf/cm²이었다.

4.3.2 콘크리트

본 시험에서는 가로×세로×높이가 12cm×12cm×12cm 크기의 콘크리트 직육면체에 콘크리트를 제작하였다. 콘크리트는 설계강도가 240kgf/cm²가 나오도록 배합설계를 하였고, Table 7과 같다.

Table 7 콘크리트의 배합설계

콘크리트 설계강도 (kgf/cm ²)	시멘트 (kgf/m ³)	잔골재 (kgf/m ³)	굵은 골재 (kgf/m ³)	물시멘트비 (%)
240	380	842	910	49.2

시험체 6개는 28일간 대기 양생시켰으며, 레진 모르타르 시험에 사용한 동일한 만능시험기(UTM)를 사용하여 하중을 가력 하였다. 압축시험 결과 시험체 6개의 평균 압축강도는 270kgf/cm²로 측정되었다.

3) 패널과 콘크리트와의 접착

콘크리트 표면과 FRP 패널의 접착에 사용된 에폭시는 탄소섬유시트 접착전용인 2액형 상온경화용 에폭시 레진을 사용하였고 재료적 물성은 Table 8과 같다. 에폭시 레진은 주재 : 경화제를 1:4의 비율로 혼합하여 믹서기계를 이용하여 충분히 혼합시킨다. 혼합시킨 에폭시를 FRP 패널을 부착할 콘크리트 면에 붓으로 칠하고 굳기 전에 FRP 패널을 붙인 다음, 일주일간 대기에서 양생시켰다.

Table 8 에폭시의 재료적 물성

압축강도 (kgf/cm ²)	인장강도 (kgf/cm ²)	휨강도 (kgf/cm ²)	인장탄성계수 (kgf/cm ²)	포아송비
920	600	950	42	0.35

4.4 부착시험

시험체의 가력 및 측정방법은 다음과 같다. 100 tonf 용량의 만능시험기를 사용하여 밑단에 콘크리트를 고정시켰으며, FRP 패널을 인장용 척에 장착한 후 일방향 단조가력을 실시하였다. 부착시험의 시험체 형상 및 가력 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

시험결과 파괴양상은 부착파괴이며, 부착응력은 평균적으로 38kgf/cm² 정도이었다.

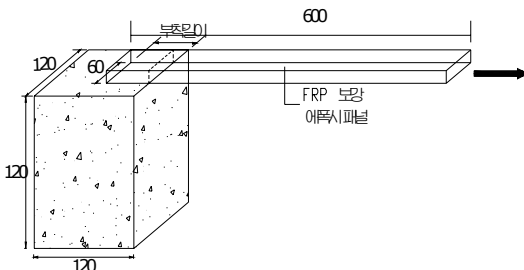
5. 보강 RC보의 피로가력실험

5.1 개요

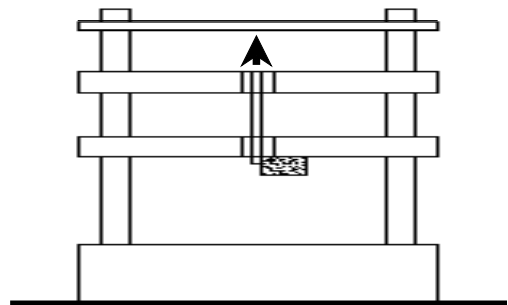
철근콘크리트 구조물은 사용연수에 따라 재료 및 구조적 요인으로 구조물이 내구연수를 채우지 못하고 균열이 발생하는 성능저하 현상이 발생하고 있다. 따라서 내구성저하 및 변형이 발생하여 구조물에 구조적인 손상이 있거나 예상되는 구조물에 대해서 효과적이고 시공성이 용이한 보강 대책을 수립하여 구조물이 충분한 기능을 발휘할 수 있도록 보강해야 한다.

구조물에 작용하는 반복하중은 콘크리트 구조물의 피로 성능저하 요인이므로 내구성의 문제라고 볼 수 있다. 이러한 내구성의 문제를 해결하기 위해 FRP 패널로 보강된 철근콘크리트 보를 피로가력실험을 통해 인장 철근비를 변수로 하여 피로거동을 파악함으로써, 보강설계시 기초 자료로 활용할 수 있도록 한다.

본 연구에서는 피로가력실험에 앞서 정적 실험체를 인장철근비의 변수에 따라 FRP 패널을 보강하지 않은 무보강 시험체 3개와 보강량이 20%인 FRP 패널을 보강한 시험체 3개를 제작하여 단조가력실험을 수행하였다. 단조가력 실험 결과로부터 피로하중의 응력수준의 70% 및 하중재하 속도를 결정하였다. 피로가력실험은 수행하기 위해 인장철근비에 따른 동적 시험체를 3개를 제작하여 보강된 철근콘크리트 보의 반복하중에 따른 내력 증가 및 피로거동 특성을 파악하기 위해 다음과 같은 피로가력실험을 실시하였다.



(a) 부착시험 단면도



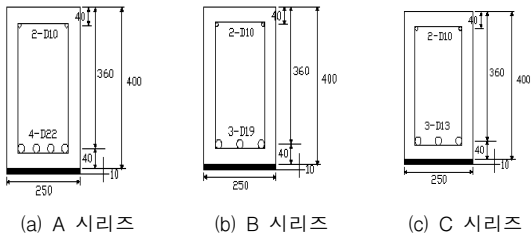
(b) 부착시험 가력장치

Fig. 2 보강재와 콘크리트와의 부착시험

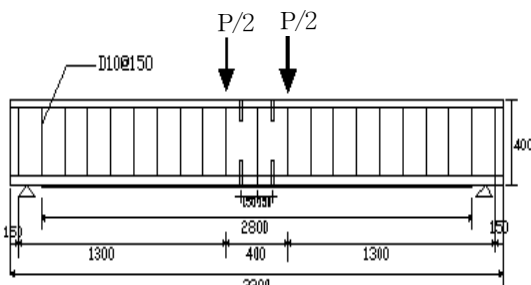
5.2 시험체 제작

본 실험에 사용된 시험체는 총 9개이며, 인장철근비 ($\rho_{max} \cdot (\rho_{max} + \rho_{min}) / 2$, ρ_{min})에 따라 3종류로 구분하였다. 시험체는 총길이 3.3m, 순지간 3m, 단면 크기 25cm×40cm인 장방형 단면의 복근보 시험체를 제작하였다. 철근콘크리트 부재의 휨보강에 사용되는 FRP 보강 패널의 보강량은 무보강 시험체의 공칭강도에 대하여 20%로 보강하였으며, 보강 폭은 25cm, 보강길이는 280cm로 일정하게 하였다. 본 실험에 사용된 시험체의 형상 및 치수는 Fig. 3과 같다.

시험체는 극한강도 설계법⁽⁵⁾을 이용하여 시험구간의 배근을 설계하였으며, 시험체에 사용된 철근은 인장철근은 3-D13, 3-D19, 4-D22, 압축철근은 2-D10으로 동일하게 배근하였다. 또한 전단파괴를 방지하기 위해 D10을 사용하여 가력점에서 양쪽지점까지 15cm 간격으로, 순수 휨구간 40cm를 제외하고 배근하였으며, 손상을 입히지 않은 보부재 하부 인장면에 FRP 보강 패널을 부착하여 보강하였고, Table 9에 나타내었다.



(a) A 시리즈 (b) B 시리즈 (c) C 시리즈



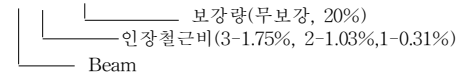
(d) 배근 (일면)

Fig. 3 시험체의 형상 및 치수

Table 9 시험체 일람

시험체명	철근비 (주근)	전단 보강근	보강량 (%)	실험 방법
A 시리즈	B3-0	ρ_{max} (4-D22)	0	단순가력
	B3-2		20	단순가력 피로가력
B 시리즈	B2-0	$\frac{\rho_{max} + \rho_{min}}{2}$ (3-D19)	0	단순가력
	B2-2		20	단순가력 피로가력
C 시리즈	B1-0	ρ_{min} (3-D13)	0	단순가력
	B1-2		20	단순가력 피로가력

B 1 - 0 <- 시험체의 표기 예



5.3 가력 및 측정 방법

시험체의 가력을 위한 가력장치 및 설치상황을 Fig. 4에 나타내었다. 양쪽 단부에서 각각 15cm 떨어진 점에 강재 로울러를 설치하여 수평방향 변위와 회전에 대한 구속이 없도록 하였다. 또한 가력점 사이에 전단력에 존재하지 않고 휨모멘트만이 작용하도록 하기 위해 순수 휨구간이 40cm가 되도록 가력보를 설치하였다. 단순가력실험은 가력기(Actuator)에 부착된 로드셀(인장, 압축 50tonf, MTS 제작)을 사용하여 4점 휨실험으로 실시하였으며, 가력 중심은 추를 띄워 유지하였고, 수평기를 이용하여 시험체의 수평을 유지하여 보부재의 편심이 발생하지 않도록 가력하였다. 작용하중에 대한 처짐은 보부재의 중앙부에 설치된 변위계(L.V.D.T.)를 사용하여 측정하고, 균열의 진행상황과 파괴상황을 관찰하였다. 인장철근과 압축철근의 변형률을 파악하기 위하여 철근 조립시 중앙부에 철근용 변형률 게이지를 부착하였고, 보강된 탄소섬유시트의 변형률은 보부재 밑면의 중앙부에 부재 축방향으로 콘크리트용 변형률 게이지를 부착하여 측정하였다. 또한 압축측 콘크리트의 압축변형률과 인장측 콘크리트의 인장변형률을 파악하기 위해 콘크리트용 변형률 게이지를 보부재 상단과 하단 중앙부에 부착하였다. 하중과 처짐의 변형률 등은 데이터 로거(Data Logger)에 저장한 후 컴퓨터로 처리하였다.

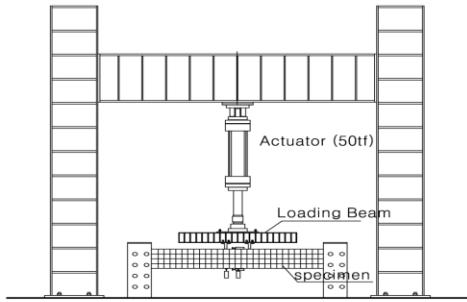


Fig. 4 가력장치 및 시험체 설치상황

피로가력실험은 MTS사의 50 tonf 용량의 피로시험기를 사용하였으며, 시험시 하중재하속도는 1Hz의 진동수로 10만 사이클(Cycle)이 될 때까지 일정하게 재하 하였다. 재하 시 반복회수 10회까지는 정적으로 재하 하였으며, 그 이후 주기적으로 반복하중의 최소값과 최대 값을 일정하게 유지하면서 단순재하로 재하 하였다. 피로하중의 반복회수에 따른 철근 및 보강재의 변형률, 그리고 보강 시험체의 피로거동 및 균열진전 상황을 측정하였고, 일정한 회수에 피로 시험기를 정지시켜 균열진전 상황을 표시하였다. 피로하중은 정적 파괴실험으로부터 정적극한강도의 70%로 하였으며, 최소하중은 각 최대하중의 10%로 일정하게 하였다. 인장철근비와 관계없이 각 시험체는 10만 사이클의 반복가력 후에도 보가 파괴되지 않았으며, 단순 가력을 주어 파괴시켰다.

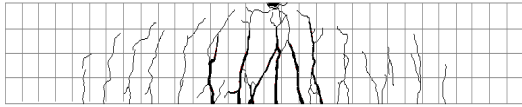
5.4 실험 결과 및 고찰

시험체 균열 및 파괴양상은, 단순가력실험을 실시한 결과, 무보강 시험체는 인장철근이 항복한 후 순수 휨구간의 휨균열이 상부로 진행되며 균열 폭이 증가하여 중앙부 처짐이 증가하였다. 보강 시험체의 파괴양상은 균열정도의 차이는 있지만, 전체적으로 중앙부와 가력점 부근의 휨균열의 진행에 의한 인장철근의 항복이 선행하는 휨파괴로 나타났다. 인장철근비가 1.75%인 A시리즈 시험체들은 하중을 가함에 따라 휨인장 균열이 진전되면서 압축 균열과 연결되어, 최종적으로 압축파괴가 발생하였다. 인장철근비가 1.03%, 0.31%

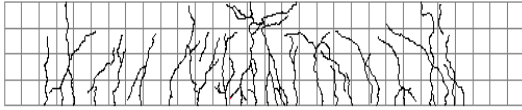
의 B, C 시리즈는 인장철근 항복 후 압축콘크리트의 압축 파괴로 이어지는 전형적인 휨파괴로 나타났다.

무보강 시험체의 초기균열은 중앙하부에서 발생하였으며, 초기균열하중은 인장철근비가 1.75%인 B3-0 시험체는 3.0tonf, 인장철근비가 1.03%인 B2-0 시험체는 2.6tonf, 인장철근비가 0.31%인 B1-0 시험체는 2.27tonf로 나타나 인장철근비가 많을수록 초기 균열에 대한 억제능력이 높게 나타났다. 중앙하부에서부터 휨균열이 나타나기 시작하여 차츰 상부로 진전되면서 좌우 가력점 근처의 하부에서 휨균열이 발생하여 상부로 진행되었으며, 지점에 가까운 부분으로 휨균열이 확대되어 발생하였다. 이후 완만한 증가와 함께 초기 균열의 폭이 커지다가, 최대하중 부근에 이르러서는 처짐이 급속도로 증가하였다. 그리고 최대하중 이후 압축 측 콘크리트에 균열이 발생하는 전형적인 휨 파괴의 현상을 나타내었다. 전체 보강 시험체의 파괴모드는 크게 2가지 형태로 나타난다. 인장철근비가 1.75%인 A 시리즈 시험체는 인장철근 항복 후 콘크리트가 먼저 압축 파괴되는 형태를 보인 반면, 인장철근비가 1.03%, 0.31%인 B, C 시리즈는 인장철근 항복 후 FRP 보강 패널의 탄소섬유시트가 파단 되는 보강재의 인장파괴형태를 나타내었다. 시험체의 최종 균열 상황을 Fig. 5와 Photo 1에 나타내었다. 초기 균열의 발생위치는 전체적으로 중앙부 하부 또는 가력점 하부에서 발생하였으며, 초기균열하중은 2.27~3.9tonf 범위로 무보강 시험체에 비해 증가하는 것으로서, FRP 보강 패널에 의한 균열억제효과를 확인할 수 있었다. 보강 시험체의 초기균열하중은 인장철근비가 높을수록 전체적으로 증가하는 경향으로 보였다.

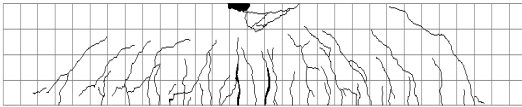
피로가력실험을 실시한 결과, 인장철근비가 1.75%인 시험체는 압축파괴가 일어났으며, 인장철근비가 1.03%, 0.31%인 시험체는 휨파괴가 일어났다. 초기의 반복하중 하에서 상당한 처짐이 발생되어 균열이 진전되었고, 10만 번의 반복하중 가력 후에도 보가 파괴되지 않았으며, 단순가력을 가하여 FRP 패널에서의 탄소섬유시트 파단으로 인해 시험체가 파괴되었다. 보강 시험체에서 FRP 보강재가 부착파괴가 생기지 않았으며, 이는 FRP 패널과 콘크리트의 부착성이 뛰어나다고 사료된다.



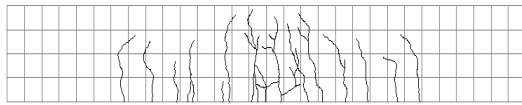
(a) B1-0 시험체



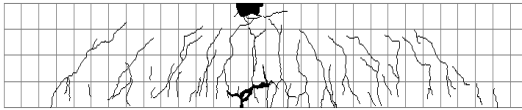
(b) B2-0 시험체



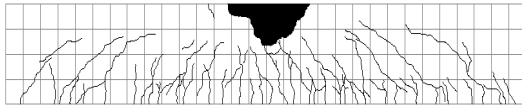
(c) B3-0 시험체



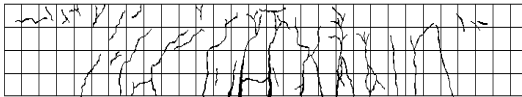
(d) B1-2 시험체



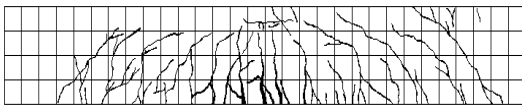
(e) B2-2 시험체



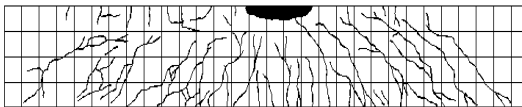
(f) B3-2 시험체



(g) B1-2 피로시험체



(h) B2-2 피로시험체



(i) B3-2 피로시험체

Fig. 5 시험체 최종 균열 상황



Photo 1 피로 가력 실험

5.5 하중-변위 관계

변수인 철근비(ρ_{max} , $(\rho_{max} + \rho_{min})/2$, ρ_{min})를 변화하여 하중-변위 관계를 Fig. 6에 나타낸다. 무보강 시험체의 경우를 살펴보면, 항복하중 이후 하중의 변화 없이 처짐이 점점 증가하다 파괴하중 이후 처짐이 많이 증가하였다. 초기 균열하중은 인장철근비가 높을수록, 미세하지만 증가하였고, 항복시의 처짐도 인장철근비가 높을수록 대체로 증가하였다. B1-0(ρ_{min})의 시험체를 살펴보면, 항복하중시의 처짐은 8.9mm이었으나, 최대하중시의 처짐은 35mm로서 3.94배 정도의 큰 처짐을 보였다. B2-0 ($(\rho_{max} + \rho_{min})/2$)의 경우는 항복하중시의 처짐은 14.9mm이었으나, 최대하중시의 처짐은 22.5mm로 1.50배 정도의 처짐을 보였으며, B3-0(ρ_{max})의 시험체인 경우 항복하중시 처짐은 15.0mm이었으며, 최대항복시의 처짐은 17.0mm로 1.13배 정도의 처짐을 보였다. 인장철근비가 낮을수록 최대하중에서 처짐이 커지는 것을 알 수 있다.

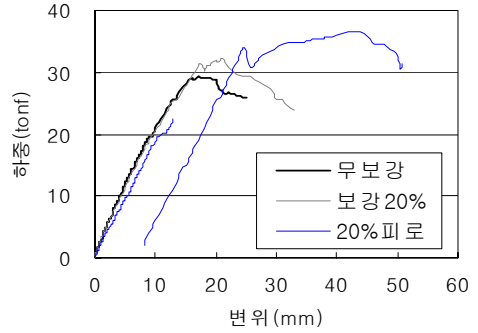
FRP 보강 패널로 휨보강한 시험체들은 최대하중이 상승하였으며, 동일한 하중에 대해 더 많은 하중을 부담하였다. 인장철근비가 증가할수록 항복 하중 시 처짐은 커지나, 최대하중 시 처짐은 작아지는 경향이 나타난다. 동일하중에서는 대체로 인장철근비가 클수록 처짐이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 초기강도는 크게 변하지 않고 비슷하지만, 항복하중 이후는 인장철근비가 클수록 강도가 증대하였다. 하중-처짐 곡선의 기울기는 인장철근비의 변화와는 상관없이 거의 동일하게 나타났다.

피로하중을 받은 시험체의 하중-변위 곡선은 탄성적인 거동을 유지하였으며, 반복회수가 증가함에 따라 처짐이 증가하는 양상으로 나타났다. 이는 최대하중이 기

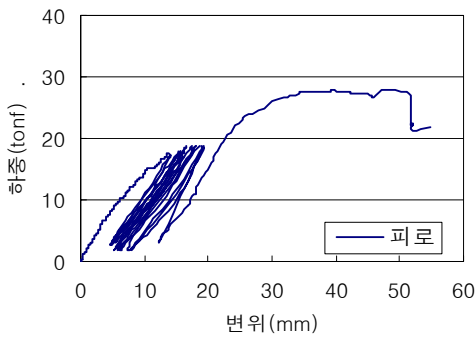
존시험체의 항복강도 수준으로서 철근과 보강재인 FRP 패널이 최대하중을 지지하고 있기 때문에 반복회수가 증가하면서 소성거동을 보여주고 있는 것으로 사료된다.



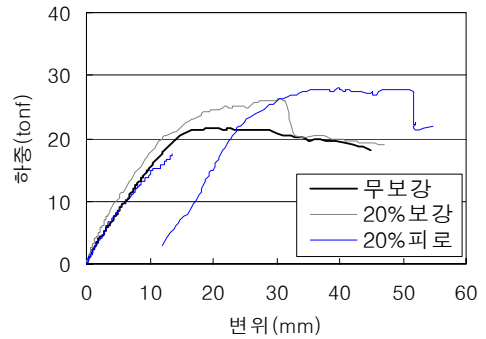
(a) 인장철근비 1.75% 시험체



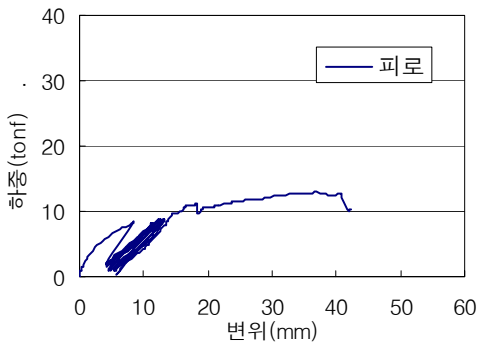
(a) A시리즈



(b) 인장철근비 1.03% 시험체

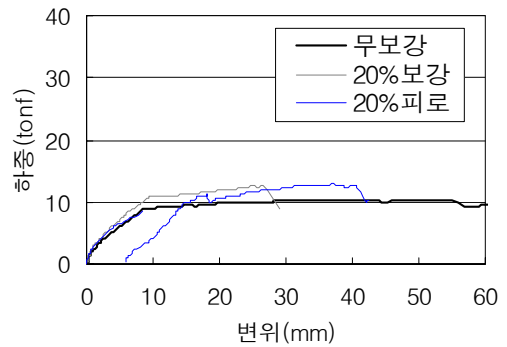


(b) B시리즈



(c) 인장철근비 0.31% 시험체

Fig. 6 반복회수에 따른 하중-변위 곡선



(c) C시리즈

Fig. 7 정적 및 피로 시험체 비교

피로시험을 수행한 보강 시험체는 피로시험을 수행하지 않은 보 시험체와 비교해 볼 때, 항복하중과 최대하중이 비슷하게 나타났으며, 큰 피로내력을 갖는 것을 알 수 있었다. 따라서 FRP 패널을 철근콘크리트 구조물에 보강하면 내구성의 우수한 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 7은 FRP 패널로 보강했을 때의 시험체를 정적하중과 피로하중의 하중-변위 곡선을 비교하여 나타낸 것이다

5. 결 론

본 연구에서는 FRP가 매입된 에폭시 모르타르 패널로 보강된 철근콘크리트 휨부재의 부착성능을 파악하기 위하여, 에폭시 모르타르의 적정 배합비를 결정하고 패널과 콘크리트의 부착시험, 보 부재의 피로가력시험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 에폭시 모르타르의 배합비는 60목과 4호의 비를 1:3, 에폭시와 혼합잔골재의 배합비를 1:4 일 경우가 비중, 강도, 경제성 등에서 가장 우수하게 나타났다.
- 2) 패널과 콘크리트의 부착시험 결과, 시험체의 파괴 형태는 부착 길이비에 관계없이 계면부착파괴가 일어났으며, 평균적인 부착강도는 38kgf/cm^2 정도이었다.

- 3) 1Hz 진동수로 10만 사이클의 피로가력시험 결과, 단순가력의 시험체와 항복하중 및 최대하중이 비슷하게 나타났으며, 패널과 콘크리트간의 부착성능도 양호하였다.

감사의 글

본 연구와 관련하여 일부내용은 휨거동에 대한 주제로 “섬유시트가 매입된 에폭시 패널로 보강한 철근콘크리트 부재의 휨거동에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집에 게재된 바 있으며, 본 논문에서는 피로하중 하에서의 부착성능에 대한 주제로 구성되었음을 밝혀둔다. 부산대학교 건축학부 부교수에게 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. 한국표준협회, “KS F 2502-골재의 체가름 시험 방법”, 한국산업규격 (KS), 1997.
2. 대한건축학회, “건축표준시방서”, 1999.
3. 한국화이바, “99 탄소섬유시트 공법(II)”, 1998, pp.20.
4. 동양에폭시 주식회사, “에폭시”. 2000, pp.34.
5. 대한건축학회 “극한강도설계법에 의한 철근콘크리트 구조설계 기준 및 해석”. 1994.

(접수일자 : 2006년 8월 16일)