

시멘트계 충전제의 접착 성능 및 보강 두께에 따른 GFRP 보강 RC보의 휨 성능에 대한 연구

A Study on Bond Strength of Cement-Based Filler and Flexural Strength of RC Beam Strengthened with GFRP by Filler Thickness

최 하 진¹⁾* 최 영 웅¹⁾ 박 종 철¹⁾ 정 시 영¹⁾ 최 완 철²⁾
Choi, Ha Jin Choi, Young Woong Park, Jong Chul Jung, Si Young Choi, Oan Chul

Abstract

In this study, cement-based filler is used as an adhesive instead of organic adhesive, epoxy because there were problems under wet condition. First, the bond strength of cement-based filler was measured and the result was satisfied with KS F 4716. However, in case of wet condition, bond strength of epoxy adhesive decreased $0.73N/mm^2$ in 7 days and $0.84N/mm^2$ in 14 days from pilot test. This implies that there would be a problem on reinforced concrete structure in wet condition, such as tunnel and sewage box. In the second experiment, the flexural strength of RC beams with GFRP using different thickness of cement-based filler was investigated, and the result was indicated 113%, 66%, 75% increase in 10mm, 20mm, 30mm thickness, respectively. From the result, it was known that 10mm filler thickness produces stable bond performance.

Keywords : GRFP, Cement-based filler, Saturation, Bond strength

1. 서론(Introduction)

본 연구는 콘크리트 구조물의 GFRP 판넬(Glass Fiber Reinforced Composites Polymer) 보강 시 콘크리트와 GFRP 접합에 관한 연구로, 기존에 사용되어온 접착제를 사용하여 FRP판넬을 콘크리트에 부착시켜 보강하는 EB-FRP 공법(Externally Bonded FRP)과 콘크리트 못이나 앵커를 이용하여 FRP판넬을 고정, 보강하는 MF-FRP공법(Mechanical Fastened FRP)을 개량하기 위해 진행되었다. (홍건호, 2003; Lee et al. 2009)

기존 EB-FRP공법은 에폭시 접착제를 주로 활용하여 콘크리트 구조물에 FRP판넬을 보강하였으나 하수암거, 터널, 수로 등 결로 및 누수가 있는 곳에서 에폭시 수지와 콘크리트 구조물 사이에 부착성이 떨어지는 현상이 발생하였다. 따라서 구조물의 습윤 상태 시 에폭시의 문제점을 개선할 수 있는 새로운 접착제에 관한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구는 접착제에 의한 1차적 화학적 접착과 앵커를 이용한 2차 기계적 접합을 활용하여 FRP판넬로 콘크리트 구조물을 보강하는 HB-FRP공법(Hybrid Bonded FRP)을 개발하기 위한 기초단계로써, 기존에 사용되어 오던 에폭시 접착제 대신 시멘트계 충전제(무기계)를 사용하여 습윤상태에서의 부착성능을 개선하고자 하였다. 더불어 시멘트계 충전제의 사용은 콘크리트와 열팽창계수가 유사하여 보수 보강 후 장기적인 거동 측면에서 사용성이 우수할 것으로 판단되기 때문에 최근 ACI 440위원회에서도 사용이 권장된 상태이다.(ACI 440, 2002)

먼저, 포화율에 따른 시멘트계 충전제의 접착성능을 측정하여 에폭시 수지와 비교 분석하였다. 또한, 시멘트계 충전제의 두께에 따라 달라지는 GFRP 보강 RC보의 휨 성능을 측정하여 이상적인 최대 부착 성능이 발휘될 수 있는 충전제의 두께를 확인하고자 하였다. 본 연구는 차후 습윤 상태에서 콘크리트 구조물의 효율적 보강 및 내구성 향상을 위한 공법을 개발의 기초 연구로 활용될 것이다.

1) 정회원, 숭실대학교 건축학부 대학원생
2) 정회원, 숭실대학교 건축공학과 교수

* Corresponding author : burgeonism@ssu.ac.kr 011-718-7805

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 Mix Proportion of Cement-Based filler

Substance	Mix Proportion (wt%)
Cement	24
Inflating agent	6
slag powder	12
Melamin superplasticizer	1.0
Quality improver(aluminium powder, ethylcellulose)	0.8
Acrylic fiber	1.2
Grading control silica (6,7 silica, weight ratio 4:6)	55

Table 2 Properties of Epoxy Adhesive

Physical State	Specific Gravity (g/ml)	Viscosity (cps)
Yellowish Paste	1.4	160,000

2. 부착강도 실험

2.1 시멘트계 및 유기계 접착제 특성

현재 콘크리트 구조물의 보수보강 공법으로 많이 사용되고 있는 EB-FRP공법은 접착제로 유기계 접착제인 에폭시 수지를 사용하여 콘크리트와 판넬을 일체화하는 공법이다. 기존 연구에 따르면, 모체인 콘크리트 표면이 건조 상태일 경우 에폭시 접착제는 충분한 부착강도를 확보하지만, 콘크리트 표면이 젖어있는 경우 에폭시 접착제의 부착강도는 현저히 저하되어 접착제로서의 성능을 나타내지 못하는 것으로 조사되었다(Wu, 2008).

따라서 본 연구에서는 콘크리트 표면의 수분에 대한 대응방안으로 수분으로 인한 영향이 적은 시멘트계 충전제를 사용하였다. 무기계인 시멘트계 충전제의 경우 시멘트의 특징과 같이 습윤상태인 콘크리트 표면의 수분을 함유하여 수화 반응을 일으키므로 도포 후 콘크리트 모재와의 일체화를 기대할 수 있다. 하지만 유기계인 에폭시 접착제의 경우는 고르지 않은 콘크리트 표면의 수분을 함유하지 못하고 그 위에서 경화되게 된다. 이에 따라 실질적인 부착면적의 감소가 발생하여 부착력이 저하되는 현상이 나타나게 된다. (김현중, 2001; 김성룡, 2003;) 습윤상태에서 각각의 부착특성을 모식도로 Fig. 1에 나타내었다.

기존의 에폭시 수지와 부착강도를 비교하기 위하여, 포화율에 따라 'KS F 4716 시멘트계 바탕 바름제' 규격에 의한 부착강도 실험을 수행하여 부착성능을 분석하였다. 본 실험에 사용된 시멘트계 충전제와 에폭시 수지의 제원

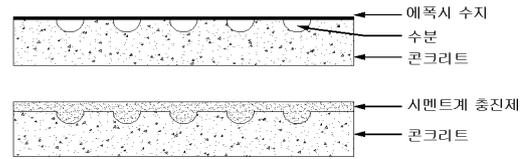


Fig. 1 Bond Process under Wet Condition

은 각각 Table 1, 2와 같다.

2.2 부착강도 시험체 제작

부착강도 시험을 위해 300mm×300mm×45mm 블록 시험체를 'KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법'을 참조하여 제작하였으며, 제작한 시험판 위에 각각 시멘트계 충전제 10mm, 에폭시 접착제 1mm 두께가 되도록 도포한 후 쇠퇴손 또는 주걱을 사용하여 윗면을 평탄하게 마무리하여 성형하였다. 기존 에폭시 접착제의 경우는 접착제의 특성상 거의 두께가 없이 콘크리트 표면에 도포되지만, 시멘트계 충전제는 분말 형태로서 물과 혼합되어 수화반응을 거쳐 굳어지게 되므로 일정한 두께를 가지고 도포되는 것이 추후 FRP와 결합할 때 타당하다고 사료된 바 두께를 10mm로 지정하였다. 충전제의 두께에 따른 부착 영향은 FRP로 보강된 휨강도 실험체에서 확인할 수 있었다.

블록 시험체는 양생실 내에서 재령 28일 까지 양생시켰으며, 압축강도는 17.84N/mm²로 나타났다. 28일 양생된 시험체는 오븐에 24시간 가열하여 절대 건조 상태로 만든 후, 중량을 측정하고 물속에 24시간 침수시켰다. 침수된 시험체 무게를 각각 측정된 후 자연 건조하여 수분 포화율 100%, 90%, 85%, 80%, 75%, 63%의 실험조건을 맞췄다. 부착강도 밀판 시험체를 수평하게 놓고, 시멘트계 충전제 및 에폭시 접착제를 시험체에 도포하여 7일 및 14일 양생 후 40×40mm의 강철로 된 인장용 지그(Attachment)를 부착한다.

2.3 함수율 측정

'KS F 2550 골재의 함수율 및 표면 수율 시험 방법' 규격에 따라 함수율 측정을 하였으며, 실험용 밀판의 각 상태별 무게 및 포화 함수율을 Table 4, 5에 나타내었다.

2.4 부착강도 시험방법

Table 3 Standard of Bond Strength by KS F 4716

Bond Strength(N/mm^2)	
Standard curing	Low Temperature Curing
1.1	0.8

Table 4 Weight and Saturation of Cement-Based filler Specimens in Different Wet Condition

Specimen	Saturated surface dry weight (kg)	Oven dry weight (kg)	Wet weight (kg)	The percentage of water content (%)	The percentage of saturation (%)	Weight by the percentage of saturation (kg)
M-100	10.086	9.660	10.486	8.55%	100%	10.486
M-090	10.282	9.830	10.680	8.64%	89.29%	10.589
M-085	10.659	10.214	11.106	8.73%	84.33%	10.967
M-080	10.443	9.994	10.805	8.11%	80.62%	10.648
M-075	-	9.597	10.404	8.41%	75.38%	10.205
M-063	-	9.816	10.657	8.57%	63.36%	10.349

Table 5 Weight and Saturation of Epoxy Adhesive Specimens in Different Wet Condition

Specimen	Saturated surface dry weight (kg)	Oven dry weight (kg)	Wet weight (kg)	The percentage of water content (%)	The percentage of saturation (%)	weight by the percentage of saturation (kg)
E-100	10.841	10.353	11.214	8.55	100	10.486
E-90	9.834	9.821	10.688	8.63	89.29	10.595
E-85	10.683	10.195	11.092	8.73	84.33	10.897
E-80	9.834	9.389	10.175	8.11	80.62	10.018
E-75	-	10.126	11.013	8.41	75.38	10.791
E-63	-	9.930	10.823	8.57	63.36	10.493

시험방법은 Table 3에 나와 있는 KS F 4716 규격에 따라 수행하였으며, 시멘트계 충전제와 에폭시 접착제 도포 후 7일과 14일에 시편의 함수율 별로 3번씩 부착강도를 측정하였다.

인장용 지그를 Photo 1과 같이 시료면에 대하여 수직 방향으로 인장력을 가해 최대 인장 하중을 구하였다. 하중 속도는 매분 25~33N이었으며, 공시체의 연직 방향으로 재하 하여 최대 하중을 구한 후, 최대하중을 접착시험편의 단면적으로 나누어 부착강도를 계산하며, 각 시험체의 파괴 상황을 기록하였다.

2.5 부착강도 시험결과

2.5.1 시멘트계 충전제 부착강도 시험결과

시멘트계 충전제 시편별 부착강도 실험 결과는 Table

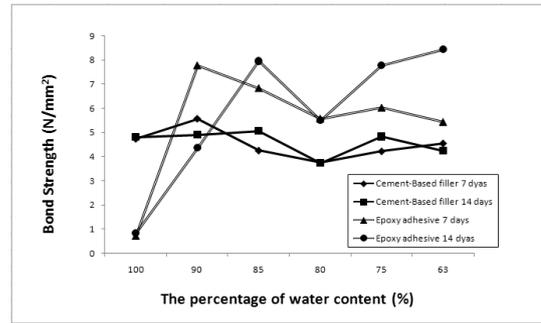


Fig. 2 Bond Strength of Cement-Based filler and Epoxy adhesive at 7 days and 14 days

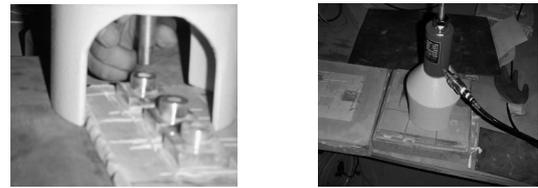


Photo 1 Attachment and Test of bond strength

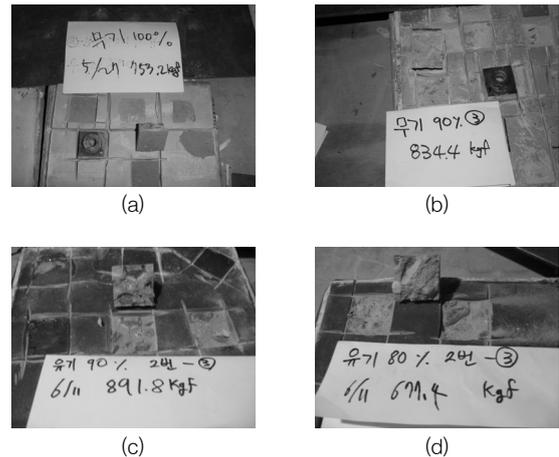


Photo 2 Bond strength test of cement-based filler and epoxy adhesive

6, 7과 같다. 대체적으로 4~5 N/mm^2 의 일정한 부착강도를 보였으며, 포화율 90%~85%에서 최고의 부착강도를 나타내었다. 이는 포화율이 낮을 경우 시멘트계 충전제의 경화 시 수화작용에 필요한 수분이 콘크리트 모체에 흡수되어 충전제의 수화작용을 저감시켰기 때문으로 사료된다. 또한, 포화율 100%에서 시멘트계 충전제를 타설할 경우 모재내의 물이 모재와 무기계 충전제 사이의 표면으로 상승하여 부착면의 W/C 비를 증가시켜 최대 접착강도보다 다소 감소하는 것으로 사료된다(Photo 2 a, b).

일반적으로 시멘트계열의 압축강도를 계산할 때 수화반응적 측면에서 7일 강도가 28일 강도의 70% 정도로

Table 6 Bond strength of cement-based at 7 days(N/mm^2)

Specimen	7-1		7-2		7-3		Mean
	Bond strength	Separate condition	Bond strength	Separate condition	Bond strength	Separate condition	
M-100	-	-	4.87	Surface	4.61	Surface	4.74
M-090	4.76	Matrix	6.21	Surface	5.17	Matrix	5.57
M-085	4.65	Surface	5.61	Matrix	2.48	Surface	4.25
M-080	2.87	Surface	-	Surface	4.63	Matrix	3.75
M-075	4.61	Surface	4.03	Surface	4.03	Surface	4.22
M-063	4.32	Matrix	5.55	Surface	3.77	Surface	4.55

Table 7 Bond strength of cement-based at 14 days(N/mm^2)

Specimen	14-1		14-2		14-3		Mean
	Bond strength	Separate condition	Bond strength	Separate condition	Bond strength	Separate condition	
M-100	5.81	Matrix	4.14	Surface	4.51	Surface	4.82
M-090	5.11	Matrix	4.49	Matrix	5.11	Matrix	4.90
M-085	5.77	Surface	5.95	Matrix	3.48	Surface	5.06
M-080	-	Surface	3.83	Matrix	3.65	Matrix	3.74
M-075	5.22	Surface	4.01	Surface	5.26	Matrix	4.83
M-063	3.36	Matrix	3.57	Surface	5.81	Surface	4.25

생각하기 때문에, 수화반응이 부착력에 직접적으로 영향을 미치는 본 실험에 사용된 충전제의 경우도 7일과 14일 부착강도로 28일 접착강도를 추정할 수 있다. (ASTM C 917) 7일과 14일의 접착강도 평균은 $4.5 N/mm^2$ 이며 추정된 28일 부착강도는 $6.43 N/mm^2$ 으로 Table 3에 나와있는 KS F 4716의 기준을 모든 포화율 상태에서 충분히 만족시키고 있다.

2.5.2 에폭시 접착제 부착강도 시험결과

에폭시 접착제 시편별 부착강도 실험 결과는 Table 8, 9와 같다. 에폭시 접착제는 포화율 90%, 85%, 80%, 75%, 65%에서 대부분 Photo 2 c, d와 같이 모재를 물고 떨어졌다. 이는 에폭시 접착제의 부착강도가 시편 모재의 표면 강도 보다 높기 때문이다. 하지만, 포화율 100%에서 7일 부착강도가 $0.73 N/mm^2$, 14일 부착강도는 $0.84 N/mm^2$ 로 매우 떨어졌다. 이 결과는 하수박스, 터널 등 콘크리트 구조물에 누수 및 결로현상이 있을 때, 즉 함수율이 100%일 때 부착력이 매우 저감되는 것을 의미한다. 시멘트계 충전제와 에폭시 접착제의 포화율에 따른 접착강도를 Fig. 2에 나타내었다.

Table 8 Bond Strength of epoxy adhesive at 7 days(N/mm^2)

Specimen	7-1		7-2		7-3		Mean
	Bond strength	Separate condition	Bond strength	Separate condition	Bond strength	Separate condition	
E-100	0.73	Surface	0.72	Surface	0.74	Surface	0.73
E-090	8.54	Matrix	7.02	Matrix	-	Matrix	7.78
E-085	7.36	Matrix	6.31	Matrix	-	Matrix	6.84
E-080	5.40	Matrix	5.89	Matrix	5.46	Matrix	5.58
E-075	5.89	Matrix	5.13	Matrix	7.07	Matrix	6.03
E-063	6.42	Matrix	-	Matrix	4.46	Matrix	5.44

Table 9 Bond strength of epoxy adhesive at 14 days(N/mm^2)

Specimen	14-1		14-2		14-3		Mean
	Bond strength	Separate condition	Bond strength	Separate condition	Bond strength	Separate condition	
E-100	0.86	Surface	0.84	Surface	0.81	Surface	0.84
E-090	-	Matrix	3.27	Matrix	5.46	Matrix	4.37
E-085	7.02	Matrix	8.43	Matrix	8.43	Matrix	7.96
E-080	7.14	Matrix	5.22	Matrix	4.15	Matrix	5.50
E-075	8.88	Matrix	-	Matrix	6.68	Matrix	7.78
E-063	-	Matrix	8.66	Matrix	8.22	Matrix	8.44

* Matrix: 모재파괴, Surface: 계면파괴

3. GFRP 보강 RC보의 휨 성능 실험

3.1 실험 개요

시멘트계 충전제로 인한 1차적 화학적 접합과 앵커에 의한 2차 기계적 접합을 혼합한 HB-FRP공법으로 RC보강 실험체를 제작하였다. 본 실험은 최종적으로는 HB-FRP공법의 보강 효율을 판단하기 위한 연구이지만, 먼저 1차적 시멘트계 충전제의 접합성능이 부착 강도 실험에서와 같이 RC보의 휨 성능에서도 만족할만한 효과를 보이는지에 대한 검증에 초기 목적을 둔 실험적 연구이다.

본 실험에는 GFRP와 콘크리트를 일체화시키는 접착제로서 앞서 부착강도 시험에서 사용한 시멘트계 충전제를 이용하여 보강된 RC보의 휨 성능을 측정하였다. Fig. 3과 같이 $150mm \times 250mm \times 2400mm$ 크기의 보강 RC보를 제작하였으며, 시멘트계 충전제의 두께에 따른 부착력과 휨보강 성능을 확인하기 위하여, 변수는 충전제의 두께로 각각 10mm, 20mm, 30mm로 제작하였다. 앵커 간격은 200mm로 동일하며 일반적인 후설치 앵커인 12mm 세트앵커를 사용하였다.

또한 추가로 동일한 무보강 실험체를 제작하여 보강효과를 분석하고자 하였다.

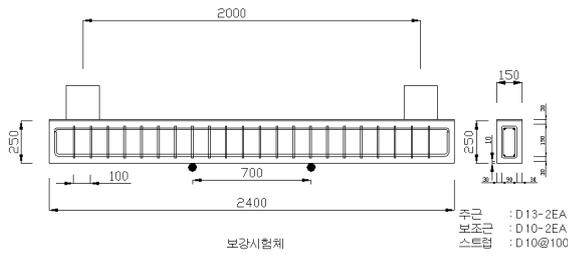


Fig. 3 Reinforcing details of Specimens

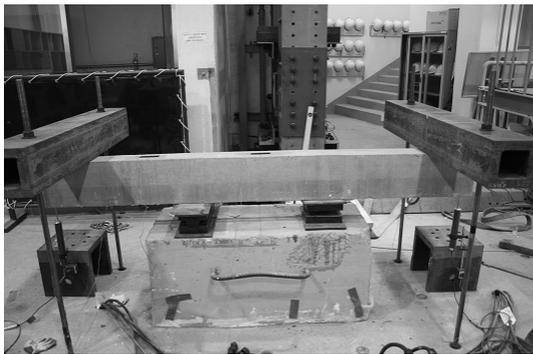
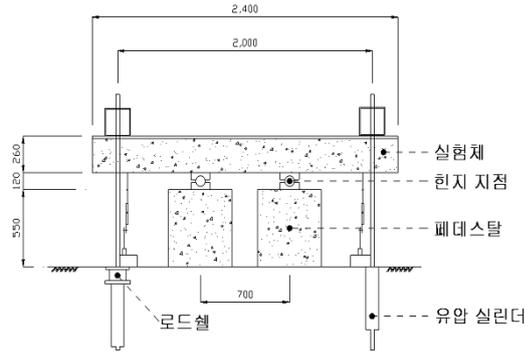


Fig. 4 Four Point Bending System(mm)

가력시스템은 Fig. 4와 같이 GFRP와 콘크리트 부착면의 파괴양상 및 균열을 보다 확실히 파악하기 위하여 보를 뒤집어 4점 가력하는 시스템을 이용하였다. 하중은 로드셀을 반력바닥과 실린더 사이에 설치하여 측정하였으며 실린더와 연결되어 실험체에 하중을 가하는 4곳의 강봉에 strain gauge를 설치하여 변형률 측정하였다. 설치된 strain gauge를 통해 가력 초기 4곳에서 동일한 하중이 작용되도록 제어하였다. 가력은 300kN 유압실린더 4개를 강봉으로 체결한 후 각관에 연결 시켜 보의 양단부에서 위에서 아래로 가력 하였다. 실험체의 거동을 분석하기 위하여 실험체의 단부 가력점에서 변위를 측정하여 중앙부 변위를 계산하였으며 각 하중 별 균열을 측정하였다.

Table 10 Concrete Properties

f_{ck} (MPa)	Water Cement Ratio (%)	Maximum coarse aggregates (mm)	Slump (mm)	air content (%)	etc.
27	55.0	25	150	4.5±1.5	Fly Ash 13%

Table 11 Mechanical properties of reinforcing bars

Specimen Standard	Normal diameter (mm)	Cross section (mm ²)	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (MPa)
SD400	D10	9.53	400	560	2.06 × 10 ⁵
	D13	12.7			

Table 12 Properties of GFRP

Tensile Strength (MPa)	Thickness (mm)	Young's Modulus (MPa)	Ductility (%)
560	3	7.2 × 10 ⁵	12.9

3.2 실험 재료

3.2.1 콘크리트 제원

콘크리트의 강도는 실험의 주요 변수로 작용하기 때문에 정확한 콘크리트 강도를 발현하기 위해 레디믹스트 콘크리트를 사용하였다. 콘크리트의 제원은 규격번호 KS F 4009에 준하며 28일 압축강도와 슬럼프는 Table 10과 같다.

3.2.2 철근의 기계적 성질

철근은 'KS D 3504 철근 콘크리트용 봉강'에 규정된 국내산 철근 SD400을 사용하였으며 주근에는 D13을, 스티럽과 상부철근은 D10 철근을 사용하였으며 스티럽 간격은 휨 인장 파괴를 유도하기 위하여 100mm로 배근하였다. 철근의 제원은 다음 Table 11과 같다.

3.2.3 GFRP의 재료 특성

FRP로 보강된 RC보의 휨 인장강도 실험에는 연속성형법으로 제조된 유리섬유보강판(GFRP)을 사용하였다. 실험의 주요 변수는 시멘트계 충전제의 두께이기 때문에 GFRP의 제원은 Table 12와 같다.

3.3 실험체 제작

실험체의 제작 및 실험은 본교의 구조실험실에서 수행하

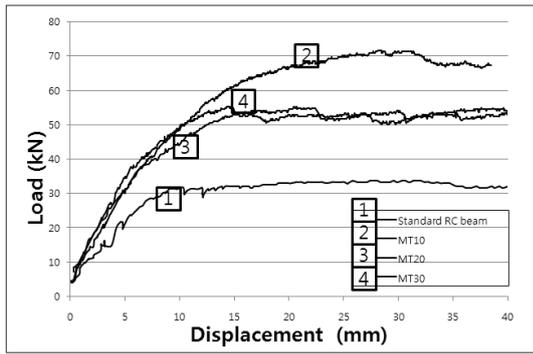


Fig. 5 Load-displacement curve in different filler thickness

였으며, 아래의 Table 13과 같이 실험체를 제작하였다. 재령 28일의 RC보에 200mm 간격마다 구멍을 뚫고 앵커를 설치한 후, 물청소를 하여 콘크리트 윗면의 표면을 깨끗한 상태에서 건조시켰다. 앵커 설치 후 실험 변수인 시멘트계 충전제의 두께에 맞는 거푸집을 각각 설치하였다. 또한, 충전제를 도포하기 전에 다시 적당량의 물을 뿌려 습윤 상태를 유지하였다. 도포가 끝나면 미리 앵커 간격에 맞게 구멍을 낸 GFRP를 앵커에 체결하면서 GFRP의 밀면이 충전제에 충분히 함침 될 수 있도록 앵커볼트를 조여준다.

Table 13 Specimen

Specimen	Beam Section (mm ²)	Cement-Base dFiller Thickness (mm)	Anchor dimension (mm)	GFRP Length (mm)	GFRP Section (mm ²)
Standard	150×250	—	—	—	—
MT10	150×260	10	200	2400	390
MT20	150×270	20		2400	390
MT30	150×280	30		2400	390

4. 실험 결과 분석

4.1 실험 결과

4.1.1 파괴 양상

시험 결과 Photo 4, a와 같이 무보강 실험체의 경우 인장측의 휨 인장균열로 인한 전형적인 인장파괴가 일어났다. GFRP로 보강된 실험체의 경우도 인장측에서 균열이 먼저 시작되었으나, 항복 하중을 넘어선 후 균열이 증가함에 따라서 시멘트계 충전제와 GFRP 보강판 부착면에서 slip이 진행되었다. (Photo 4, b) 특히, 충전제 두께가



(a)



(b)



(c)



(d)

Photo 4 Fracture behavior of RC beam specimens

증가할수록 인장부 휨 균열의 영향으로 인해 콘크리트와 충전제 계면에서의 부착면적이 감소되어 silp현상이 증가하였다.

GRFP로 보강된 RC보의 최종적인 파괴형태는 Photo 4, c, d에서 보여지는 것처럼 앵커에 의해 GFRP 보강판이 찢어지는 지압파괴이다. 이는 기존 FRP보강 RC보의 휨강도 실험이 보강재와 콘크리트 일부가 모재로부터 분리되는 박락파괴나 부착면에서 떨어지는 접착파괴를 보인 것과는 다른 결과로써, 총 접착력이 증가함에 따라 접합부 주변 주응력의 크기가 증가하는 것을 앵커와 충전제가 잡아주기 때문에 부착면에서 먼저 파괴가 일어나지 않은 것으로 사료된다(박성호, 1990; 김규선, 1999).

4.1.2 하중-변위 곡선

Fig. 5의 하중-변위 곡선에서 가력 초기 실험체의 강성이 증가하는 것을 알 수 있다. 당초 단면 증가율에 비례하여 가장 많은 하중을 받을 것이라고 예상했던 시멘트계 충전제의 두께가 30mm인 실험체의 경우는 다른 실험체에 비해서 항복 후 하중의 감소가 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 시멘트 충전제의 두께가 10mm인 실험체는 세 실험체 중에서 가장 휨성능이 크게 나타났으며, 그 이상의 두께 증가는 충전제의 단면 증가에 따른 휨 성능 향상효과 보다 부착 성능 저하 효과가 더 크게 발생하는 것을 알 수 있었다.

4.1.3 휨 강도 비교

Table 14의 실험 결과 무보강 실험체의 휨 강도는 20.8 KN·m이었으며 GFRP 보강 실험체에서는 시멘트계 충전제 두께가 10mm일 때 44.2 KN·m로 최대 보강효과를 얻을 수 있었다.

FRP보강 RC보 휨 강도의 내력 산정식은 기존 연구자들이 제안하고 있는 다음 식에 근거한다. (Bank, 2007; Lee et al. 2009)

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) + A_f f_f \left(h_f - \frac{a}{2}\right) \quad (1)$$

본 연구의 실험 결과와 기존 제안식과의 계산결과를 비교해 보면 Fig. 6과 같으며 이론적 제안식은 실제 휨내력을 지나치게 과대평가 하고 있음을 알 수 있다. 식(1)은 FRP가 RC보에 완전 접합이 되어 일체거동을 한다는 가정 하에 사용할 수 있기 때문에 FRP의 휨 강도를 나타내는 두 번째

Table 14 The flexural strength of RC beam specimens

Specimen	Mn (KN·m)	Test result		Mtest/Mn	Reinforced ratio
		Ptest (KN)	Mtest (KN·m)		
Standard	21.3	32.0	20.8	0.98	1.00
MT10	59.9	68.0	44.2	0.74	2.13
MT20	61.9	53.0	34.5	0.56	1.66
MT30	63.9	56.0	36.4	0.60	1.75

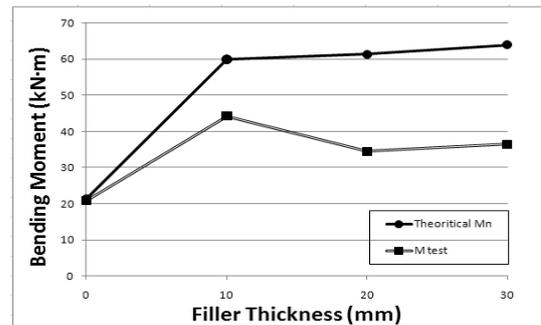


Fig. 6 Load-displacement curve in different filler thickness

항에 적당한 강도 감소계수를 적용하는 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다(홍건호, 2003; Lee et al. 2009).

하지만, 본 연구에서 주목하여야 할 점은 충전제의 두께에 따른 FRP의 접착 효과로써, 제안식은 충전제의 두께가 늘어남에 따라 휨 내력이 증가하지만 실제 휨 강도는 그렇지 않다(Fig. 6). 즉, 충전제의 두께가 증가할수록 단면증가효과에 따른 휨 강도 증가 효과보다 FRP와 콘크리트 계면에서의 접착력이 감소되는 효과가 더 큰 것으로 확인되었다.

4.1.4 강성 및 처짐량 비교

시멘트계 충전제와 앵커를 이용하여 GFRP로 보강된 RC보의 경우 Fig. 5의 하중-변위 곡선에서 알 수 있듯이 강성이 크게 증가하였다. 당초 강성의 증가량은 시멘트계 충전제의 두께 증가에 따른 단면 2차 모멘트의 증가율만큼을 예상하였으나, 단면 증가 효과보다는 GFRP의 강성이 보다 우세한 영향을 미쳐 세 개의 실험체가 비슷한 강성 증가율을 보였다(Table 15). 보강 실험체의 강성 증가에 따라 동일 하중에서 보강보의 처짐이 작게 나타나 처짐 성능이 크게 향상되었음을 알 수 있었다. 이 결과로 미루어 보아 시멘트계 충전제를 FRP와 RC보의 접합에 사용함에 있어서 안정적인 보강 효과를 기대할 수 있음을 알 수 있다.

Table 15 Stiffness of Specimen

Specimen	Stiffness	Reinforced ratio
Standard	3.14	1.00
MT10	5.00	1.59
MT20	5.06	1.61
MT30	5.32	1.69

5. 결론

기존 RC보의 FRP의 보강공법에 접착제는 주로 에폭시 수지를 사용하였으나, 습윤 상태에서는 기존 콘크리트와 보강재 사이에 부착력을 충분히 발휘하지 못하여 보강 구조물의 내력저하 등 문제점이 발생하였다. 이러한 문제점을 보완하고자 본 연구에서는 에폭시 수지 대신에 시멘트계 충진제를 이용하여 수분에 따른 부착성능 변화를 줄이고자 하였다.

더불어, 최종적으로 접착제의 1차적 화학적 접합과 앵커를 이용한 2차 기계적 접합을 접목시킨 HB-FRP 공법의 효율성을 확인하고자 하였다. 그에 대한 기초 연구로써 접착 강도 실험을 실시하여 콘크리트와 시멘트계 충진제 사이의 부착강도를 파악하였고, 충진제의 두께를 달리 사용하여 GFRP로 보강된 철근 콘크리트 보의 휨 거동 특성과 최대 휨 강도를 증가시킬 수 있는 충진제의 보강 두께를 분석하고자 하였다. 연구결과의 요약은 다음과 같다.

- 1) 시멘트계 충진제의 시편별 포화율에 따른 접착강도 실험 결과는 함수율 90%~85%에서 최고의 부착강도를 나타내었으며, 모든 포화율에서 KS F 4716 시멘트계 바탕 바탕재 접합강도 품질규정(표준양생 시 $1.1N/mm^2$)에 만족하고 있음을 알 수 있었다.
- 2) 에폭시 접착제의 시편별 포화율 90%, 85%, 80%, 75%, 63%에 따른 부착강도 실험결과, 대부분 모재를 물고 떨어져 부착강도가 아주 우수한 것으로 나타났다. 하지만 포화율이 100%인 시편에서는 7일 접착강도가 $0.73N/mm^2$, 14일 $0.84N/mm^2$ 로 KS F 4716 규정을 만족하지 못하여 습윤 상태에서의 접착 성능에 문제점을 나타내었다.
- 3) GFRP로 보강된 RC보 실험체에서 파괴 양상은 1차 콘크리트와 무기계 충진제 사이에 slip현상이 발생하였고, 2차 앵커에 의한 GFRP 지압 파괴가 발생하였다. 시멘트계 충진제의 화학적 접합 파괴로 볼 수 있는 slip 현상은 충진제의 두께가 증가할수록

인장부에서 휨 균열의 폭이 증가하는 영향을 많이 받아, 얇은 두께의 보강 실험체보다 접착력이 감소하는 것을 알 수 있었다.

- 4) 시멘트계 충진제 두께의 변수에 따른 GFRP보강 보의 시험의 휨 강도는 충진제 두께가 10mm일 때 $44.2 KN \cdot m$ 로 가장 큰 보강효과를 나타내었다. 이는 기존 설계 제안식에 따라 계산한 예상 변화추이와 다른 결과값으로, 충진제 두께 증가에 따른 단면증가 효과 보다 균열의 영향으로 인한 접착성능의 저하가 휨 강도에 보다 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.
- 5) GFRP판넬 보강 효과결과 실험체의 최대 69% 강성 증가가 뚜렷이 나타났으며 이에 따라 보강 구조물의 처짐 성능에도 큰 효과가 있었음을 알 수 있었다.
- 6) 추후 시멘트계 충진제 두께를 10mm로 고정하고 앵커개수를 변수로 실험을 진행하여 HB-FRP공법을 이용한 RC보의 보강에 최적의 앵커 개수를 파악하고자 하며, 더 나아가 화학적 접합과 기계적 접합을 추정할 수 있는 설계식 제안까지 연구가 진행될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 (주)리페어기술의 연구 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김규선, 심종성, "GFRP로 보강된 RC보의 계면박리파괴 해석 모델" 한국 콘크리트학회 논문집 제11권 3호, 1999, pp69-80
2. 김성룡, 이호영, "접착력의 측정" 접착 및 계면 기술강좌 제4권 3호, 2003, pp.21-32
3. 김현중, 김대준, "에폭시 수지 접착제의 특성과 응용" 접착 및 계면 기술강좌 제2권 2호, 2001, pp.35-47
4. 미국재료시험학회, ASTM C 917 Standard Test Method for Evaluation of Cement Strength Uniformity From a Single Source, 2005
5. 미국콘크리트학회, ACI 440.2R Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, 2002
6. 박성호, "유리섬유 보강콘크리트(GFRP)의 특성 및 이용" 한국 콘크리트학회 논문집 제2권 2호, 1990, pp26-33
7. 지식경제부 기술표준원, KS D 3504 철근 콘크리트용 봉강, 2009
8. 지식경제부 기술표준원, KS F 2476 폴리머 시멘트 모르타르의 시험 방법, 2007
9. 지식경제부 기술표준원, KS F 2550 골재의 함수율 및 표면수율 시험 방법, 2002

-
10. 지식경제부 기술표준원, KS F 4009 레디 믹스트 콘크리트, 2006
11. 지식경제부 기술표준원, KS F 4716 시멘트계 바탕 바름제, 2001
12. 지식경제부 기술표준원, KS L 5105 수경성 시멘트 모르타르의 압축 강도 시험 방법, 2007
13. 홍건호, 신영수, "RC 구조물에 적용된 부착식 휨보강공법의 보강성능 평가" 한국 콘크리트 학회 논문집 제15권 1호, 2003, pp78-86
14. Jae Ha Lee et al., "Slip effects in reinforced concrete beams with mechanically fastened FRP strip" Cement & Concrete Composites 31, 2009, pp496-504
15. Lawrence C. Bank, Dushyant Arora, "Analysis of RC beams strengthened with mechanically fastened FRP(MF-FRP) strips" Composite Structures 79, 2007, pp180-191
16. Z. Wu, Y. Shao, "Wet-Bond of Concrete to FRP Formwork using Epoxy Adhesive" ACI Material Journal, October 1, 2008. pp171-182
- (접수일자 : 2010년 3월 22일)
(수정일자 : 2010년 6월 7일)
(심사완료일자 : 2010년 6월 30일)

요 지

콘크리트 구조물의 FRP를 이용한 보수보강 시 유기계 접착제인 에폭시 수지를 활용한 부착 공법이 일반적으로 사용되고 있으나 터널이나 하수박스 같은 습기가 많은 지역에서는 부착력이 발휘되지 못하여 구조물의 보강 및 내구성에 문제가 있는 것으로 나타나고 있다. 이에 본 연구에서는 시멘트계 충전제를 사용하여 습윤 상태에서 콘크리트 구조물을 보강하고자 하였다. 먼저, 각각의 부착력을 알기 위하여 직접 부착실험을 실험을 통해 무기계 충전제가 습윤상태에서도 KS F 4716 규정에 만족함을 알 수 있었다. 반면, 에폭시 접착제는 포화율 100%에서 부착강도가 $0.73N/mm^2$, 14일 $0.84N/mm^2$ 로 습윤 상태에서의 부착성능에 문제점을 나타내었다. 또한 2차 실험으로 진행된 충전제 두께별 GFRP보강 보의 휨 강도측정에서는 충전제 두께가 10mm, 20mm, 30mm일 때 각각 113%, 66%, 75%의 보강효과를 보였다. 이에 따라 충전제의 두께가 10mm일 때 안정적인 부착성능을 발휘하는 것을 알 수 있었다.

핵심 용어 : GRFP, 시멘트계 충전제, 함수율, 부착력