

유리섬유쉬트로 휨보강된 RC보의 부착파괴 방지 상세에 관한 실험적 연구

An Experimental Study to Prevent Debonding Failure of RC Beams Strengthened by GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers)

최 기 선* 유 영 찬** 이 진 용*** 김 금 환****
Choi, Ki Sun You, Young Chan Lee, Chin Yong Kim, Keung Hwan

ABSTRACT

It is generally known that RC flexural members strengthened by GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymers) tend to be failed by premature bond failure near the flexural-shear cracks happened at the mid-span of beams. It is therefore strongly recommended that premature bond failure must be avoided to insure the intended strengthening effects sufficiently. The various methodologies such as increasing bonded length of GFRP and bonding details including U-shape wrappings and epoxy shear-keys are examined in this study. The bonded length of GFRP are calculated based on the assumed bond strengths of epoxy saturating resin. Total six half scale RC beam specimens were constructed and tested to investigate the effectiveness of each methodologies to prevent the bond failure of GFRP. Test results of each specimens are discussed in this paper.

1. 서 론

각종 섬유쉬트형 FRP로 구조물을 휨 보강할 경우에는 통상적으로 재료시험을 통하여 얻어진 섬유쉬트 복합체의 설계용 인장강도를 기준으로 하여 보강설계를 실시하게 된다. 이와 같은 방법은 섬유쉬트와 콘크리트와의 부착강도가 충분하여 섬유쉬트가 소정의 설계용 인장강도에 도달할 때까지 부착파괴가 발생되지 않는다는 것을 전제조건으로 하고 있다. 특히 FRP의 취성적 파단현상을 고려할 때 보강된 부재의 파괴하중을 안전측으로 예측하는 것은 구조물의 안전성 확보를 위하여 매우 중요하게 된다. 그러나 기존 연구자의 실험결과에 의하면 유리섬유로 보강된 RC 휨부재에서는 충분한 부착길이를 확보할 경우에도 섬유쉬트복합체가 파단강도에 도달하기 이전에 조기 부착파괴가 발생되는 것으로 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 유리섬유쉬트로 휨보강된 부재의 파괴메카니즘을 분석하고, 유리섬유쉬트의 조기박리 파괴를 방지하기 위하여 기존에 제안되었던 보강상세의 유용성을 검증함과 동시에 섬유쉬트와 콘크리트와의 부착성능을 향상시켜 GREP의 조기 박리파괴를 방지하기 위한 에폭시 전단키 보강상세의 유용성을 검증하고자 한다.

* 정회원, 한국건설기술연구원, 연구원

** 정회원, 한국건설기술연구원, 수석연구원

*** 정회원, (주)콘크리닉, 상무이사

**** 정회원, 한국건설기술연구원, 연구위원

2. 연구내용 및 방법

본 연구에서는 유리섬유쉬트로 휨보강된 철근콘크리트 보에서 GFRP의 부착길이에 따른 박리파괴 메커니즘을 분석하고, 박리파괴를 방지하기 위하여 기존연구^{2),5)}에서 제안되었던 중앙부 및 단부 U형 Wrapping 보강상세의 유용성을 검증하였으며, 위의 실험적 연구를 바탕으로 하여 에폭시 전단키에 의한 박리파괴 방지상세를 제안하고 그 유용성을 검토하였다.

즉, 일반적으로 FRP에 의한 보강공법에서는 에폭시 수지를 접착제로 사용하여 RC부재와 FRP가 일체로 거동하도록 하며, 궁극적으로 FRP가 극한 재료강도에 이르러 파단될 때까지의 충분한 부착력을 확보하도록 부착길이를 산정한다. 이와 같은 방법에 기초하여 일본토목학회⁴⁾에서는 탄소섬유쉬트와 콘크리트와의 부착강도를 $\tau_a = 4.4 \text{ kgf/cm}^2$ 로 가정하여 식 (1)에 의하여 부착길이를 산정하도록 제안하고 있다. 따라서, 본 연구에서도 유리섬유쉬트와 콘크리트에 대한 부착강도 실험을 바탕으로 하여 설계용 부착강도를 각각 $\tau_a = 4.4 \text{ kgf/cm}^2$ 과 $\tau_a = 6.0 \text{ kgf/cm}^2$ 로^{3),4)} 가정하고, 그에 따른 유리섬유쉬트의 부착길이를 산정하였다. 또한, 이와 같은 방법에 의하여 계산된 에폭시 수지의 부착력만으로 유리섬유쉬트의 박리파괴 제어가 불가능할 때에는 추가적인 부착파괴 방지상세의 도입이 필요하며, 본 연구에서는 기존에 제시된 단부 U 보강과 선행연구^{2),5)}에서 효용성이 입증된 중앙부 U 보강에 대해서 추가적으로 검토하였다. 아울러 그림 1에 나타난 바와 같이 유리섬유쉬트가 부착될 콘크리트 부위를 오목하게 파취하고 이를 고정도의 에폭시 수지로 충전시켜 전단키를 형성함으로써 부착력을 증진시키는 방법에 대하여 검토하였다.

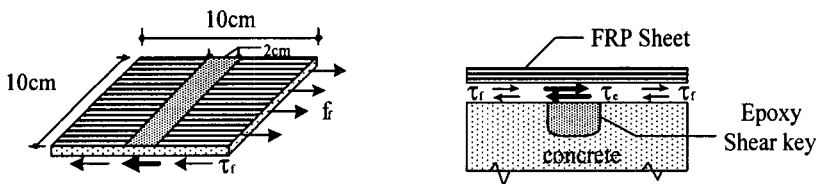


그림 1 에폭시 전단키 매입상세

3. 실험

3.1 재료실험

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계압축강도 240 kgf/cm^2 의 레미콘이며, 인장, 압축 및 전단철근으로는 항복강도가 $f_y = 4,000 \text{ kgf/cm}^2$ 인 D10, D13 철근을 사용하였다. 보강재로 사용된 유리섬유복합체와 함침용 에폭시 수지의 재료시험 결과는 표 1 및 표 2와 같다.

표 1 GFRP의 재료물성

섬유 두께 (cm)	인장강도 (kgf/cm^2)		탄성계수 (kgf/cm^2)		변형률	
	기준치	실험치	기준치	실험치	기준치	실험치
0.1	5,600	6,571	2.50E5	2.95E5	-	0.019

표 2 함침용 에폭시 수지의 재료물성

종류	압축강도 (kgf/cm^2)	인장강도 (kgf/cm^2)	휨강도 (kgf/cm^2)	인장전단 강도 (kgf/cm^2)
	기준치	880	500	800
실험치	1,052	584	1,555	125

3.2 가력 및 측정

유리섬유쉬트의 휨보강성능 실험을 위하여 가력골조를 설치하고 25t 용량의 Actuator로 3점 가력하였다. Actuator의 제어방법은 변위량의 증가에 따라 변위제어방식을 단계별로 채택하였다. 변형률의 측정부위는 최대모멘트가 발생하는 중앙부에서의 측정을 원칙으로 하였으며, 각각 콘크리트의 압축연단, 인장·압축철근 및 유리섬유복합체에 대하여 측정하였다.

3.3 실험체 개요

실험체의 단면치수는 폭 15cm 높이 25cm로, 인장측과 압축측 피복두께를 3cm로 하였으며, 지점길이 2.4m, 전체 실험체 길이 3.0m로 계획하였다. 일반적인 철근콘크리트보에서는 인장철근의 단면적이 압축철근 단면적보다 큰 것이 정상이나 유리섬유로 보강된 축소모형 실험체에서는 유리섬유쉬트가 파단변형도에 이르기 전에 콘크리트가 한계압축변형도($\epsilon_c=0.003$)에 도달하게 된다. 따라서 본 실험에서는 유리섬유쉬트의 보강으로 인한 콘크리트 연단에서의 압

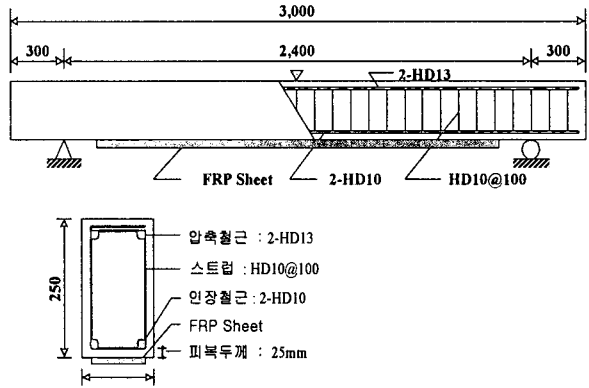


그림 2 실험체 상세

축력을 방지하기 위하여 축소모형 실험체의 압축철근으로 2-D13, 인장철근을 2-D10으로 배근하였다. 전단 보강근은 휨 파괴를 유도하기 위하여 D10 철근을 10cm 간격으로 배근하였다. 각 실험체의 형상 및 치수는 그림 2와 같다. 실험체는 총 6개로 기준실험체인 무보강 실험체와 순수 유리섬유쉬트의 부착길이를 변수로 하는 B1, B2 실험체, 단부와 중앙부에 폭 20cm의 유리섬유쉬트를 이용하여 U 보강한 UCB2, UEB2 실험체 및 그림 1과 같은 에폭시 전단키를 10cm 간격으로 보강면에 매입한 SB1 실험체로 구성되었다. 표 3에서 기준실험체인 EC 실험체는 무보강 실험체이며, EC를 제외한 실험체는 유리섬유쉬트 1매를 식(1)에 의해 산정된 부착길이를 보강하고, 각 변수에 따른 정착상세를 적용하였다.

$$L1 = \left(\frac{A_f \times f_f}{\tau_a \times b_a} \right) \times 2 : L > L1 \text{ 쉬트파단} \quad (1)$$

표 3 실험체 일람표

실험체명	보강량	부착용량 (kgf/cm ²)	보강매수 (ply)	부착길이 (cm)	L1 (cm)	비고
EC	$\rho/\rho_b=0.16$	-	-	-	-	기준실험체
EG1-B1	$A'_s=2.54\text{cm}^2$ $A_s=1.42\text{cm}^2$ $A_{GF}=1.0\text{cm}^2$	4.4	1	230	254	부착길이
EG1-B2		6.0	1	190	187	부착길이
EG1-UCB2		6.0	1	190	187	중앙 U 보강
EG1-UEB2		6.0	1	190	187	단부 U 보강
EG1-SB1		4.4	1	230	254	에폭시 전단키

4. 실험 결과 분석

계획된 각 실험체에 대한 휨보강성능 실험결과에 의하면, 그림 3에서 보는 바와 같이 유리섬유쉬트로 보강된 실험체에서는 부착길이의 확보를 통한 부착파괴의 제어는 적절하지 못한 것으로 나타났다. 또한, 부착파괴를 방지하기 위하여 적용되었던 단부를 U보강하는 상세도 근본적인 박리 발생을 억제할 수 없는 것으로 나타났으며, 중앙부 U보강 상세와 에폭시 전단키에 의한 보강상세가 효과적으로 박리파괴를 억제하여 충분한 보강성능을 발휘할 수 있는 것으로 나타났다.

4.1 부착길이

부착길이를 변수로 한 실험체에서는 그림 3에서 보는 바와 같이, 철근이 항복된 이후 섬유쉬트가 추가적인 하중을 부담함에 따라 보강된 실험체에서 어느 정도 내력의 증가가 관측되었으나, 하중가력점 주변에서 박리가 발생한 후에는 단부 쪽으로 점진적으로 박리가 진행됨에 따라 더 이상의 내력증가는 관측되지 않았으며, 이어지는 섬유쉬트의 단부박리에 의해 최종파괴되는 양상을 나타내고 있다. 이와 같은 부착파괴 양상은 섬유쉬트의 부착길이가 충분할 경우에도 발생하는 것으로서, 섬유쉬트의 부착길이를 확보함으로써 부착파괴를 방지하기 위한 설계용 부착강도 개념은 유리섬유쉬트의 경우에는 적용하기 어려운 것으로 판단된다. 따라서, 유리섬유쉬트로 보강된 실험체의 경우는 별도의 부착파괴 방지를 위한 상세의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

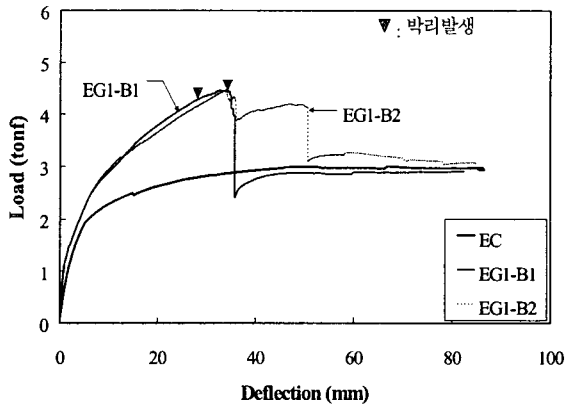


그림 3 부착길이가 변수 실험체 하중-변위 곡선

4.2 U 보강상세

유리섬유쉬트로 정착단부를 U보강한 EGI-UEB2 실험체는 중앙부에서 박리의 시작과 함께 강성이 급격히 저하되고, 이후 단부쪽으로 박리의 진행과 함께 하중-변위 곡선이 완만한 기울기를 나타내면서 상당히 연성적인 거동을 보이는 것으로 관측되었다. 이에 대하여 유리섬유쉬트로 중앙부를 U보강한 EGI-UCB2 실험체는 가력점 하부에서 최초로 박리가 발생되었으나, 중앙부 U보강에 의해서 박리의 진행이 효과적으로 억제되었다. 그러나 최대하중이 항복하중의 약 2 배 이상으로 증가됨에 따라 보의 소성역이 지점쪽으로 이동하면서 중앙부 U보강면을 지나쳐 새로운 박리가 발생하였으며, 이와 같이 시작된 박리가 단부로 확장되면서 최종파괴에 이르렀다. 따라서 중앙부 U보강 상세는 하중 가력점

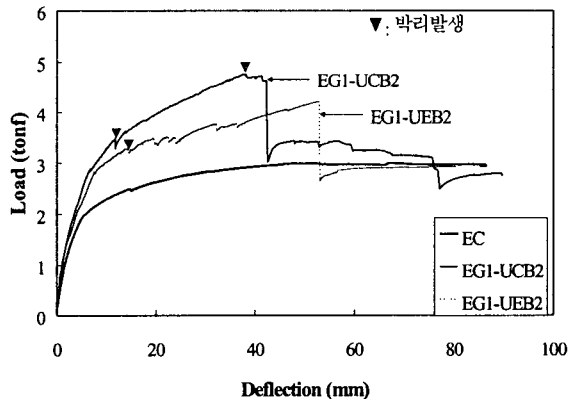


그림 4 U 보강 실험체 하중-변위 곡선

주위에서의 섬유쉬트의 박리현상을 효과적으로 억제하여 최대내력이 증가되는 경향을 나타내는 반면, 단부 U보강 실험체는 U보강을 실시하지 않은 실험체에 비하여 변형능력은 증가되는 경향을 나타내었으나, 섬유쉬트의 박리가 중앙부에서부터 단부까지 광범위하게 진행된 이후에 내력이 증가된 것이므로 구조물 안정성 측면에서는 바람직하지 못한 것으로 판단된다.

4.3 에폭시 전단키 보강상세

유리섬유쉬트로 보강되고, 에폭시 전단키를 매입한 EG1-SB1 실험체는 하중가력점 부위에서 국부적인 박리가 발생되었으나, 에폭시 전단키에 의해서 박리의 진행이 억제되었으며, 최대하중의 증가에 따라 확장된 보의 소성역 부분에서도 에폭시 전단키에 의해 박리의 진행이 효과적으로 억제되었다. 따라서 에폭시 전단키를 추가적으로 성형하여 유리섬유쉬트로 보강한 실험체에서는 섬유쉬트가 파괴될 때까지 박리의 진행이 억제되었으며, 전단키의 파괴도 발생하지 않았다. 또한 그림 5에서 나타난 것과 같이 섬유쉬트의 박리에 의한 하중의 감소나 휨강성의 변화가 거의 없이 최대하중까지 도달하였다. 따라서 에폭시 전단키에 의한 보강상세는 유리섬유쉬트의 부착파괴를 방지할 수 있는 매우 효율적인 방법으로 판단된다. 이에 따라 에폭시 전단키에 의한 박리 파괴 메커니즘을 실용화하기 위하여 전단키의 유효 개수, 성형부위 및 소요 단면적 등에 대한 추가적인 연구가 바람직하다고 판단된다.

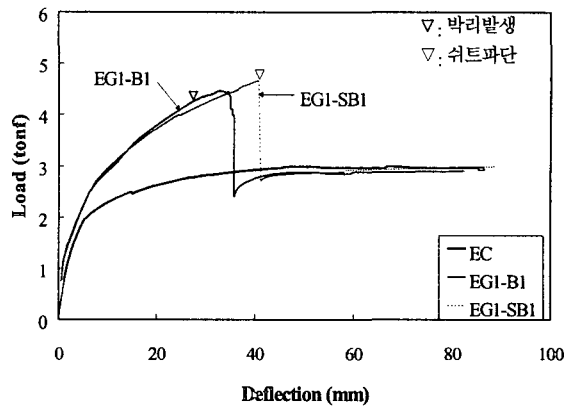


그림 5 전단키 매입 실험체 하중-변위 곡선

표 4 실험결과

실험체명	항복하중 (tonf)		박리발생시		최대하중 (tonf)					최종파괴시			파괴형상
	Cal _n	Exp	P _d	ε _f	Cal _n	Cal _u	Cal _e	Exp	ΔP _f	δ	ε _c	ε _f	
EC	1.90	2.15	-	-	2.04	2.57	-	2.94	-	41.43	3,000	-	휨파괴
EG1-B1	2.10	2.49	4.19	14,803	4.09	5.03	4.31	4.46	2.31	32.74	2,329	18,420	쉬트박리
EG1-B2	2.10	2.46	-	-	4.09	5.03	5.01	4.47	2.32	34.04	3,158	28,842	쉬트박리
EG1-UCB2	2.10	2.82	3.48	8,743	4.09	4.59	4.01	4.76	2.61	42.30	3,207	19,729	쉬트박리
EG1-UEB2	2.10	2.81	3.27	9,511	4.09	4.59	3.80	4.22	2.07	52.96	4,907	17,398	쉬트박리
EG1-SB1	2.10	2.59	-	-	4.09	4.93	4.21	4.66	2.51	40.46	3,726	18,160	쉬트파단

Cal_n (규준치) : 각 재료의 설계용 공칭강도를 기준으로 한 값

Cal_u (해석치) : 재료실험을 통하여 구한 재료강도를 기준으로 한 값

Cal_e (실험 해석치) : 실험에서 측정된 FRP의 변형률을 통하여 구한 인장강도를 기준으로 한 값

Exp (실험치) : 실험을 통하여 얻은 값

ΔP_f : 보강실험체 최대하중 실험값 - 기준실험체 항복하중 실험값

4.4 유리섬유쉬트 보강성능

표 5는 기존연구에서 제안된⁵⁾ 바와 같이 RC 부재의 강도 여유분을 고려하여 최대하중과 유리섬유쉬트가 파괴되는 순간의 하중차이로부터 근사적으로 산출한 유리섬유쉬트의 인장강도를 나타낸 것이

다. 부착파괴가 발생한 실험체는 근사적으로 유리섬유쉬트가 설계강도의 50~70% 정도에서 부착파괴되어 조기부착파괴에 의한 휨보강성능의 저하가 뚜렷하게 나타났다. 반면, 유리섬유쉬트가 파단된 SB1 실험체와 중앙부 U보강에 의하여 조기박리가 억제된 UCB2 실험체는 대략 설계강도의 80% 이상 발휘하는 것으로 나타났다. 따라서, 박리파괴를 기준으로 하여 보강설계를 실시할 경우에는 부분감소계수로서 0.5 정도를 사용하는 것이 안전측일 것으로 판단되며, 본 연구에서 제안하는 바와 같이 부착파괴 방지상세를 적용할 경우에는 부분감소계수로서 0.8 정도를 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

표 5 유리섬유쉬트 인장강도 산정

시험체명	P_u (tonf)	P_{fail} (tonf)	ΔP_f (tonf)	ΔM_f (t · m)	ΔT_f (kgf)	f_f (kgf/cm ²)	ϵ_{f-cal} (μ)	ϵ_{f-sg} (μ)	f_f/f_{fn}
EG1-B1	4.46	2.85	1.61	0.969	4,110	4,110	16,308	18,420	0.73
EG1-B2	4.47	2.86	1.61	0.967	4,104	4,104	16,285	28,842	0.73
EG1-UCB2	4.76	2.95	1.81	1.088	4,617	4,617	18,321	19,729	0.82
EG1-UEB2	4.22	2.99	1.23	0.738	3,131	3,131	12,424	17,398	0.56
EG1-SB1	4.66	2.82	1.84	1.102	4,723	4,723	18,743	18,160	0.84

5. 결론

- 1) 유리섬유쉬트의 부착길이를 변수로 한 실험체에서는 부착길이를 최대한으로 하여도(부착길이 ; 230cm) 조기 박리파괴가 발생하였다. 따라서, 유리섬유쉬트로 휨보강된 실험체에서는 설계용 부착강도에 따라 계산된 부착길이를 확보하여도 박리파괴를 방지할 수 없을 것으로 판단된다.
- 2) 박리파괴를 방지하기 위하여 기존에 제안되었던 '단부 U보강' 상세는 단부에서의 최종박리 현상을 일부 지연시킬 수 있으나, 중앙부로부터 발생되어 단부로 진전되는 섬유쉬트의 박리현상을 근본적으로 억제할 수는 없는 것으로 나타났다.
- 3) 본 연구진에 의해 제시된 중앙부 U보강 상세는 중앙부에서의 초기박리를 효과적으로 억제하여 충분한 보강성능을 발휘하면서 최대하중에 도달하였다. 따라서, 중앙부 U보강상세는 섬유쉬트의 박리파괴를 방지하고 설계용 인장강도를 충분히 발휘할 수 있는 유용한 보강방법이라 판단된다.
- 4) 에폭시 전단키에 의한 부착파괴 방지상세는 중앙부에서의 초기박리 및 박리의 진행을 지속적으로 억제하며, 최종적으로는 섬유쉬트가 파단되는 가장 이상적인 파괴양상을 나타내었다. 따라서, 본 연구에서 제시하는 에폭시 전단키형 부착상세는 유리섬유쉬트의 부착파괴 방지상세로 적용 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 최기선, 최근도, 이한승, 유영찬, 김공환, "탄소섬유쉬트로 보강된 RC 보의 휨 부착성능", 콘크리트학회논문집, 한국콘크리트공학회, 제14권 4호, 2002. 8, pp.549~555.
2. 최기선, 류화성, 최근도, 이한승, 유영찬, 김공환, "실물모형 실험에 의한 탄소섬유쉬트 보강 RC 보의 휨 부착거동", 가솔학술발표회논문집, 한국콘크리트공학회, 제13권 2호, 2001, pp.1003~1008.
3. (주)한국화이버/한국카본, "탄소섬유쉬트 공법 기술자료(II)", 해림, 1998, pp.52.
4. 土木學會 콘크리트委員會, "콘크리트構造物の補強指針(案)", 土木學會, 1999, pp94.
5. 건설교통부, 한국건설기술연구원, "철근콘크리트 건축구조물 보수·보강 공법의 성능평가에 관한 연구", 건설교통부 연구과제, 2001. 11, pp.229~296.