실물모형 실험에 의한 탄소섬유쉬트 보강 RC 보의 휨 부착거동

Flexural Adhesive Behavior of Full-scale RC Beams Strengthened by Carbon Fiber Sheets

최 기 선* 류 화 성* 최 근 도* 이 한 승** 유 영 찬*** 김 긍 환****

Choi, Ki Sun Ryu, Hwa Sung Choi, Keun Do Lee, Han Seung You, Young Chan Kim, Keung Hwan

ABSTRACT

It is recently reported that bond failure can be initiated in the region where maximum bending moment and shear force is acted by accompanying shear deformation after flexural crack in full-scale RC beams strengthened by CFRP. Such a shear deformation effect causing bond failure is relatively little in the case of small-scale specimens. So, additional reinforcing details to the critical beam section where maximum moment and shear were acted is required to prevent the bond failure caused by the shear deformations.

The U-type wrapping methods by CFRP to the critical beam section is proposed and tested in this paper. Also, the applicability of design bond strength derived from the tests of small-scale beam was investigated by the full-scale RC beam strengthened by CFRP.

1. 서 론

기존 건축물에 대한 보수·보강의 유용성과 경제적 합리성이 입증되면서 탄소섬유쉬트에 의한 보강공사의 수요가 급속히 증가하고 있다. 이에 따라, 일본에서는 이미 80년대 후반부터 탄소섬유를 이용한 보강공법에 대한 꾸준한 연구가 이루어져 체계적인 설계 및 시방지침이 제시된 상태이며, 또한 구미에서도 탄소섬유 보강공법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 경향에 발맞추어 국내에서도 90년대 초반부터 현재까지 많은 분량의 실험적 연구가 다양한 주제에 의하여 진행되어왔다. 기존연구에서 섬유쉬트 보강재에 의해 보강된 휨부재의 파괴모드는 섬유쉬트 보강재의 파단에 의한 파괴, 섬유쉬트 보강재와 콘크리트의 박리파괴 및 보강재의 단부에서 커버콘크리트를 물고 떨어지는 필링(peeling)파괴로 크게 구별될 수 있다. 그러나 이러한 국내·외 실험연구의 대부분은 축소모형의 실험체를 이용한 실험연구에 근간을 이루는 것으로, 실물모형의 실험체에서는 최대모멘트 및 전단력이 작용

* 정회원, 한국건설기술연구원, 연구원

** 정회원, 한양대학교 초대형구조시스템연구센터 연구조교수

*** 정회원, 한국건설기술연구원, 선임연구원

**** 정회원, 한국건설기술연구원, 선임연구부장

하는 부위에서 발생된 휨균열에서 추가로 진행된 전단변형으로 인하여 보강재의 박리가 시작되는 것으로 관측되고 있다. 이 경우 선행연구[1),4)]에서 제시하고 있는 부착응력 및 보강길이에 의한 부착파괴 제어방식은 적합하지 않은 것으로 판단되므로 추가적인 보강방법이 필요할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 탄소섬유로 휨보강된 실물모형의 실험체에 대한 구조실험을 통하여 기존연구에서 제시된 섬유쉬트와 콘크리트와의 박리요인을 파악하고, 이를 방지할 수 있는 배근상세를 제시함으로써 탄소섬유쉬트 보강공법의 설계 및 시공지침의 작성을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구내용 및 방법

탄소섬유쉬트 보강공법에 의해 보강된 휨부재의 파괴유형은 기존의 많은 실험을 통하여 대략 6가지의 형태로 파괴되어지는 것으로 관찰되었다. 이중에서 박리를 유발하는 요인은 전단보강근, 부착길이, 보강재와 접착재 및 콘크리트 사이의 강성에 의해 영향을 받는 것으로 나타났으며,[6)] 강판 보강공법과는 달리 탄소섬유쉬트로 보강된 휨부재에서의 부착파괴는 FRP의 두께가 얇고 FRP의 부착길이가 길수록 단부 Peeling 보다는 중앙부에서의 박리가 선행되어지는 것으로 보고되고 있다.[5),6),7),8)] 그러나, 축소모형 실험에서 확보될 수 있는 보강재의 전단스팬은 한계가 있으며, 기존연구의 대부분이 4점하중에 의한 실험이므로 비교적 중앙부에서의 박리가 관찰되고 있지 않다. 즉, 실물모형 실험체에서는 Fig 1과 같이 최대 모멘트 및 전단력이 작용하는 부위에서 휨균열 발생 후 수반되는 전단변형에 의하여 부재의 길이방향으로 수직단차가 발생하며, 경사진 보강재의 수직분력이 콘크리트 계면으로부터 탄소섬유쉬트의 박리를 유발하는 힘으로 작용하게 된다. 이러한 취약단면은 집중하중을 받는 보에서는 하중점 부위의 임계단면으로 나타나며, 분포하중을 받는 보에서는 모멘트-전단력 관계가 반비례하므로 취약단면은 발생하지 않게 된다.

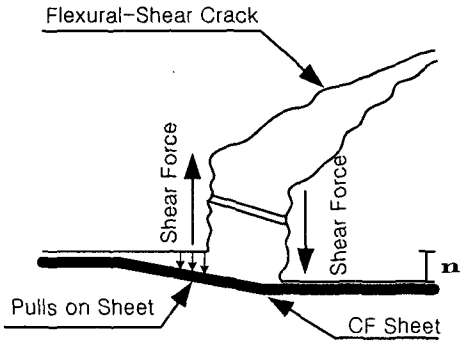

Fig 1 Mechanism of CFS delamination

이와 같이, 슬래브와 보가 일체화된 건축구조물에서의 작용하중은 슬래브를 통하여 보로 전달되므로 보에서는 일반적으로 분포 하중을 받게 된다. 그러나 작은 보에 의해 집중하중이 작용하는 경우와 같이 최대 모멘트와 전단력이 동시에 발생하는 구간에서는 전단변형에 의해 야기되는 박리파괴를 방지하기 위한 보강이 필요하다. 본 연구에서는 중앙부 집중하중을 받는 실물모형 단순보를 대상으로 하여, 중앙부 휨모멘트와 전단변형이 최대가 되는 지점을 U 보강하는 보강상세를 제시하고, 기존연구에서 제시된 보강재의 단부를 U보강하는 보강상세와의 성능을 비교하였다. 또한 선행연구에서 제시된 부착응력 $\tau_a = 6\,\mathrm{kgf/cm^2}$ [2)]과 $\tau_a = 8\,\mathrm{kgf/cm^2}$ [4)]에 의해 산정된 부착길이를 갖는 실험체를 비교하여 부재 스케일 변화에 의한 설계용 부착강도의 적용성을 검토하였다.

3. 실 험

3.1 재료실험

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계압축강도 240kgf/cm^{2}이며, 탄소섬유쉬트는 국내 A사의 고강도 200gf 제품을 사용하였다. 각 재료의 시험 결과는 Table 1~Table 4와 같다.

Table 1 Material properties of concrete

Curing age	Tensile strength (kgf/cm^2)	Compressive strength (kgf/cm^2)	Modulus of elasticity (kgf/cm^2)
7 days	-	162	-
32 days	23.4	327	2.71E5

Table 2 Material properties of reinforcement

Bar type	Yield strength (kgf/cm^2)	Tensile strength (kgf/cm^2)	Modulus of elasticity (kgf/cm^2)	Elongation (%)
D-10	3661	5620	1.76E6	28
D-19	3860	6270	1.46E6	14
D-22	3754	5760	1.59E6	19

Table 3 Material properties of CFS

THK, (cm)	Tensile strength (kgf/cm^2)		Modulus of elasticity (kgf/cm^2)		Failure strain	
	Nominal	Test	Nominal	Test	Nominal	Test
0.0111	35,500	45,134	2.35E6	2.59E6	0.0151	0.017

Table 4 Material properties of Epoxy resin

Classification	Compressive strength (kgf/cm^2)	Tensile strength (kgf/cm^2)	Flexible strength (kgf/cm^2)	Shear strength (kgf/cm^2)
Catalog	700	300	400	100
Test	647	320	490	110

3.2 실험체 개요

실험체는 기준실험체를 포함하여 총 4개를 계획하였다. 기준실험체는 무보강 실험체로, 일반적인 사무실 구조물에서 설계되어지는 보부재의 제원을 대상으로 제작하였다. 즉, 주철근으로는 3-D19 압축철근과 5-D22인장철근을 배근하였으며, 휨파괴를 선행시키기 위하여 D10 스터럽을 100mm 간격으로 배근하였다. 보강실험체는 국내 A사의 고강도 200gf 탄소섬유쉬트 2매를 보 밑면에 부착하였다. Fig 2는 단면의 배근상세와 실험체 형상을 나타내며, Table 5에 실험변수를 정리하였다. RF2-UCB2 실험체는 최대모멘트 및 전단력이 작용하는 단면부위을 탄소섬유쉬트 2매로 U보강하였으며, RF2-UEB2 실험체는 기존 연구에서 제시된 단부응력집중에 대한 보강방법으로 보강재의 단부를 2매 U보강하였다. 상기 두 실험체의 부착강도는 선행연구를 통하여 충분한 부착성능을 가지고 있는 것으로 밝혀진 $\tau_a = 6\,kgf/cm^2$으로 산정하였으며, RF2-B3실험체의 부착강도는 $\tau_a = 8\,kgf/cm^2$으로 하여 부착길이를 산정함으로써 축소모형 실험체에서 얻은 설계용 부착강도의 적정성을 검토하였다.

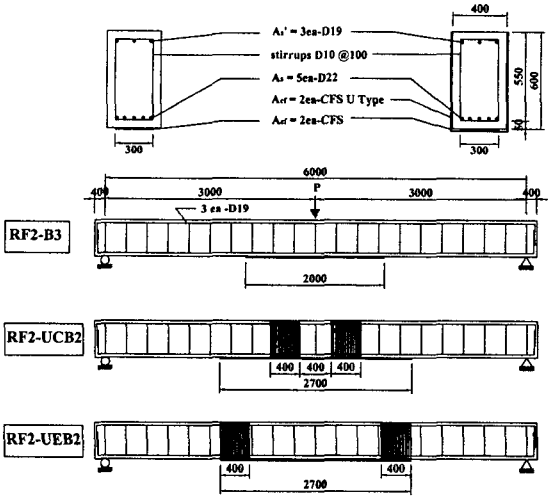

Fig 2 Specimen details and dimensions

4. 실험 결과

탄소섬유쉬트로 보강된 실물모형 실험체의 파괴 메카니즘과 실물모형 실험체에서의 부착강도를 검토하기 위하여 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구는 총 4차의 실험 계획 중 2차와 3차 실험의 일부 변수에 대한 결과로 기준실험체인 RS와 RF2-B3는 2차 실험에서 제작되었으며, RF2-UCB2와 RF2-UEB2는 3차 실험에서 제작된 것이다. 동일한 재료강도로 설계되었으나 레미콘과 철근의 반입경로가 상이한 이유로 인하여 3차 실험체의 내력이 항복하중 기준으로 대략 3tonf 가량 저하되었다.

Table 5 Reinforcement characteristics

Specimen	Reinforcement	Bond stress (kgf/cm^2)	Layer (ply)	Bond length (cm)	L1 (cm)	Remark
RS	ρ/ρ_b=0.3	·	·	·	·	Control
RF2-B3	A'_s=8.61cm^2	8.0	2	200	197	τ_a=8.0
RF2-UCB2	A_s=19.35cm^2	6.0	2	270	263	Center U Type
RF2-UEB2	A_{cf}=0.666cm^2	6.0	2	270	263	End U Type

Table 6 Comparison of calculated and experimental results

Specimen	Yield load (tf)		Maximum load (tf)		Deformation		P_{max}/P_{n-RS}	Failure mode
	Cal	Exp	Cal	Exp	ε_{cf} (μ)	δ (mm)		
RS	25.28	28.45	26.47	36.32	-	327	1.37	Concrete crushing after tensile bar yielding
RF2-B3	26.44	30.89	34.85	34.89	6129	36.06	1.32	Debonding adhesive-concrete interface
RF2-UCB2	26.44	27.06	34.85	34.24	10564	48.84	1.29	CFRP fracture at midspan
RF2-UEB2	26.44	27.81	34.85	34.79	9010	47.00	1.31	Fracture at the end of CFRP sheet after debonding started at midspan

4.1 파괴형상

Fig 3은 각 실험체의 하중-변위 관계를 나타내고 있으며, Table 6은 실험값과 이론값의 비교 및 파괴형상에 대하여 나타내고 있다. 무보강 실험체인 RS 실험체는 철근항복 이후 지속적인 변위의 증가와 함께 인장철근의 항복 후 압축콘크리트의 압괴로 이어지는 전형적인 휨파괴의 양상을 보였다.

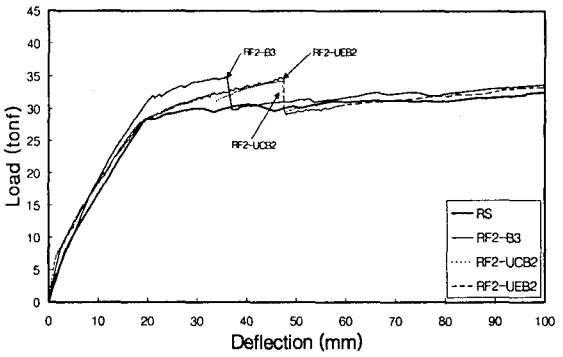

Fig 3 P-δ Curve of test specimens

RF2-B3 실험체는 부착길이가 200cm인 실험체로 중앙부에서 20cm 떨어진 위치에서 휨변형 및 전단변형에 의한 단차에 의해 박리가 시작되었으며, 콘크리트와 탄소섬유쉬트 사이의 박리가 단부로 진행되어 그림 5와 같이 최종파괴되었다. 최종파괴시 탄소섬유쉬트 중앙부의 변형률은 6129로 파단변형률의 40%이며, 최대하중은 34.89tonf으로 보강하지 않은 보의 설계강도를 기준으로 할 때 32%가 증가하였다.

중앙부의 임계단면을 탄소섬유쉬트로 U 보강한 RF2-UCB2 실험체는 28.9tonf에서 U 보강한 탄소섬유쉬트 내부의 시공시 발생한 요철부분에서 최초 들뜸현상이 발생하였으나, U 보강에 의해 박리의 진행이 억제되었으며, U 보강된 임계단면 내에서 종방향으로 보강된 탄소섬유쉬트의 약 10cm 정도가 1차적으로 부분적인 파단이 선행되었지만 큰 내력의 감소는 나타나지 않았다. 그 후, 34.24tonf에서 부착된 탄소섬유쉬트의 나머지 20cm가 최종적으로 파단되어 하중이 급격히 감소하면서 최종파괴에 이르렀다(Fig 6). 탄소섬유쉬트가 파단될 때 중앙부의 쉬트변형률은 10,564로 설계변형률의 64%였으며, 최대하중은 무보강 보의 설계강도에 비하여 29% 증가하였다.

탄소섬유쉬트의 보강단부를 U형으로 감싼 RF2-UEB2 실험체는 31.7tonf에서 260cm~290cm 부위가 실험체 제작시 발생한 요철로 인해 들뜸이 발생하였고, 34.7tonf에서 중앙부에 발생된 박리가 단부로 진행되어 단부 U보강면과 인접한 부위에서 그림7과 같이 최종 파단되었다. 탄소섬유쉬트가 파단될 때의 탄소섬유쉬트 중앙부 변형률은 9010으로 설계변형률의 58%였으며, 최대하중은 무보강 보의 설계강도에 비하여 31% 증가하였다.

4.2 전단변형

기존의 많은 연구에 의하면 보의 단면을 U형태로 감싸는 보강방법은 전단보강 효과가 있는 것으로 입증되었다. 그러나 전단내력이 충분한 보에 대한 휨보강에서도 최대모멘트 및 전단력이 작용하는 부위에서는 휨-전단균열로 인한 박리가 발생할 수 있다는 것이 밝혀졌다. 즉, 충분한 부착길이를 확보하였더라도 취약단면에 대한 별도의 보강이 없다면 부착파괴가 발생할 수 있다. Fig 4는 각 실험체의 최종 파괴시 균열도를 나타낸 것으로, 보의 아랫면에서 하중 작용점으로 이어지는 휨-전단균열의 분포가 나타나며, 이 부위를 U 보강한 RF2-UCB2 실험체가 탄소섬유쉬트의 박리를 억제하는데 효과적인 것으로 밝혀졌다. 탄소섬유쉬트의 단부를 U 보강한 실험체는 비록 탄소섬유쉬트의 박리가 단부에서 억제되어 파단되었지만 부착파괴가 선행되면서 구조물이 불안정한 상태가 되므로 적합하지 못한 것으로 판단된다.

4.3 부착응력

선행연구에서는 설계용 부착강도로서 기존연구에서 제시된 $\tau_a = 4.4\,kgf/cm^2$[23], $\tau_a = 6\,kgf/cm^2$[2] 및 $\tau_a = 8\,kgf/cm^2$[24]까지 안전한 것으로 입증되었다. 본 연구에서는 실물모형 실험체에 대한 설계용 부착강도의 적합성을 평가하기 위하여 후자의 두 경우를 실험하였다. 실험결과, 설계용 부착강도를 $\tau_a = 8\,kgf/cm^2$로 적용한 RF2-B3 실험체는 조기에 부착파괴가 발생하여 충분한 보

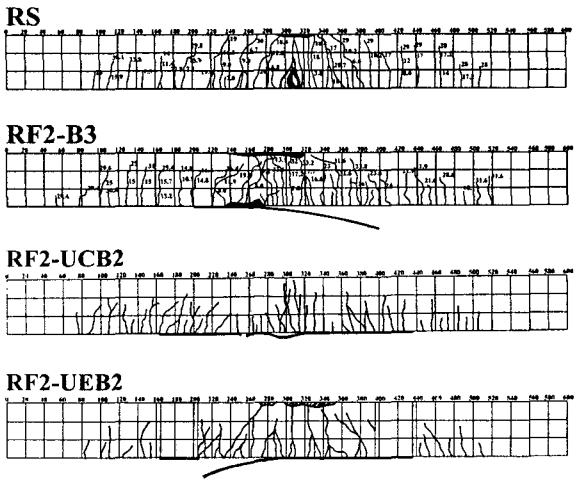

Fig 4 Comparison of crack pattern at Failure

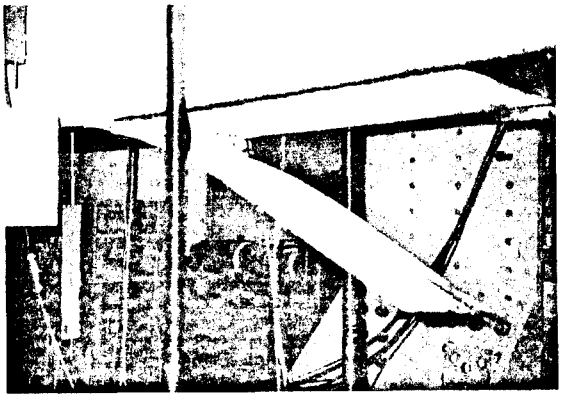

Fig 5 Specimen RF2-B3 at failure (debonding)

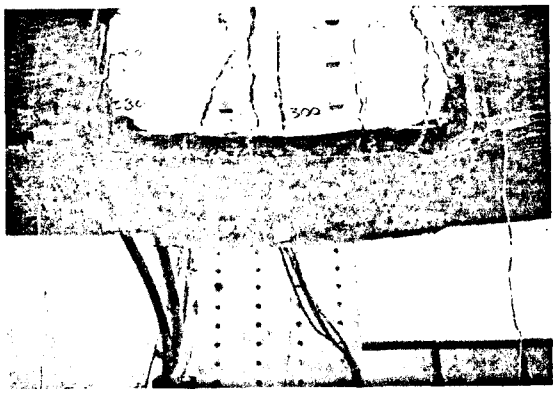

Fig 6 Specimen RF2-UCB2 at failure (Fracture)

강성능을 발휘하지 못하는 것으로 나타났으며, $\tau_a=6\,kgf/cm^2$로 설계된 RF2-UCB2는 탄소섬유쉬트 설계변형률의 64%에서 파단되었지만 조기 부착파괴에 대해서는 안전한 것으로 판단된다.

Fig 7 Specimen RF2-UEB2 at failure (Fracture after debonding at midspan)

5. 결 론

본 연구에서는 탄소섬유쉬트로 휨보강된 실물모형 실험체의 파괴모드와 설계용 부착강도에 대한 적합성을 평가하기 위한 연구를 수행하였다. 본 실험을 통하여 기존의 축소모형 실험체에 대한 실험결과와 비교하였을 때 다음과 같은 의미있는 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 탄소섬유로 보강된 축소모형 실험체에 대한 구조성능 실험결과에서 관찰되는 파괴모드와는 달리 실물모형 실험에서는 최대 휨모멘트 및 전단력이 작용하는 부위에서 발생되는 휨-전단균열 및 전단변형에 의해 중앙부 박리가 유발될 수 있으며, 충분한 부착길이의 확보와 함께 별도의 보강이 필요하다. 이와 같은 경우의 취약단면에 대한 U 보강방법은 휨-전단균열의 억제 및 이로 인한 박리파괴의 제어에 효과적인 것으로 나타났다.

(2) 탄소섬유쉬트의 보강재 단부를 U형으로 보강하는 방법은 단부 불연속면에 대한 Peeling 파괴의 방지에는 효과적이나, 실물모형에서와 같이 충분한 부착길이의 확보가 가능하고, 휨-전단균열에 의한 중앙부의 박리가 선행되는 경우에는 적합하지 않은 것으로 나타났다.

(3) 축소모형 실험체에 대한 실험결과로부터 검토된 최대 설계용 부착강도 $\tau_a=8\,kgf/cm^2$의 실물모형 실험체에 대한 적용성을 검토한 결과, 부착강도 $\tau_a=6\,kgf/cm^2$은 부착파괴에 대하여 안전하지만 $\tau_a=8\,kgf/cm^2$은 적절하지 못한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 최근도, 류화성, 최기선, 이한승, 유영찬, 김긍환, "탄소섬 유쉬트와 콘크리트의 부착", 가을학술발표회논문집, 한국콘크리트공학회, 제12권 2호, 2000, pp.1019~1024
2. (주)한국화이바/한국카본, "탄소섬유시트 공법 기술자료(II)", 해림, 1998, pp.52
3. 土木學會コンクリト委員會,"コンクリト構造物の補强指針(案)", 土木學會, 1999, pp94
4. 건설교통부, 한국건설기술연구원, "철근콘크리트 건축구조물 보수·보강 공법의 성능평가에 관한 연구", 건설교통부 연구과제, 2000. 11, pp.126~135
5. Marco Arduini, Antonio Nanni, "Behavior of Precracked RC Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets", Journal of Composit for Construction, ASCE, May 1997. pp 63~70
6. Oral Buykozturk, Brian Hearing, "Failure Behavior of Precracked Concrete Beams Retrofitted with FRP", Journal of Composit for Construction, ASCE, August 1998. pp 138~144
7. Rahimi, H., Hutchinson, A., "Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Plates", Journal of Composit for Construction, ASCE, February 2001. pp 44~56
8. Wendel M.Sebastian, "Significance of Midspan Debonding Failure in FRP-Plated Concrete Beams", Journal of Structural Engineering, ASCE, July 2001. pp 792~798