



유리섬유시트로 휨보강된 RC보의 부착파괴 방지 상세에 관한 실험적 연구

유영찬^{1)*} · 최기선¹⁾ · 김궁환¹⁾

¹⁾한국건설기술연구원 건축연구부

An Experimental Study to Prevent Debonding Failure of RC Beams Strengthened with GFRP Sheets

Young-Chan You^{1)*}, Ki-Sun Choi¹⁾, and Keung-Hwan Kim¹⁾

¹⁾Building Structure & Material Research Div., Korea Institute of Construction Technology, Koyang 411-712, Korea

ABSTRACT This study investigates the failure mechanism of RC beams strengthened with GFRP (glass fiber reinforced polymer) sheets. After analyzing failure mechanisms, the various methods to prevent the debonding failures, such as increasing bonded length of GFRP sheets, U-shape wrappings and epoxy shear keys are examined. The bonded length of GFRP sheets are calculated based on the assumed bond strengths of epoxy resin. The U-shape wrappings are either adopted at the end or center of the GFRP sheets bonded to the beam soffit. The epoxy shear keys are embedded to the beam soffit to provide sufficient bond strength. The end U-wrappings and the center U-wrappings are conventional, while epoxy shear keys are new details developed in this study. A total six half-scale RC beams have been constructed and tested to investigate the effectiveness of each methods to prevent debonding failure of GFRP sheets. From the experimental results, it was found that increasing bonded length or end U-wrappings do not prevent debonding failure. On the other hand, the beams with center U-wrappings and shear keys reached an ultimate state with their sufficient performance. The center U-wrappings tended to control debonding of the longitudinal GFRP sheets because the growth of the longitudinal cracks along the edges of the composites was delayed. In the case of shear keys, it was sufficient to prevent debonding and the beam was failed by GFRP sheets rupture.

Keywords : GFRP, debonding failure, U-shape wrapping, epoxy shear key

1. 서 론

FRP 복합체를 이용한 구조물의 휨보강 설계에서는 통상적으로 FRP 복합체의 파단강도를 근간으로, 소정의 안전율을 고려하여 설계인장강도로 사용하고 있다. 이러한 설계 조건은 FRP 복합체가 파단될 때까지 콘크리트와의 부착이 유효함을 전제로 한다. 그러나 기존 실험 결과에 의하면 FRP 복합체로 보강된 RC 휨 부재에서는 FRP 복합체가 파단강도에 도달하기 전에 조기 부착파괴가 발생할 수 있으며, 특히 보강량 및 부재의 크기가 증가할수록 또한, 전단경간이 짧아질수록 이러한 경향이 지배적인 것으로 보고되고 있다^{1,5,6)}. 이러한 부착파괴의 경향 및 이에 영향을 미치는 요인에 대해서는 많은 연구 결과가 보고되고 있으나, 아직까지 설계에 적극적으로 반영되고 있지 못한 실정이다. 이러한 이유는 부착파괴를 유발하는 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하기 때문에 정확

한 부착파괴 시점을 예측하기 어렵기 때문이다. 따라서 비교적 명확한 파괴시점을 예측할 수 있도록 보강재의 파단을 유도하는 것이 바람직하며, 이를 위해서는 전통적인 단순 부착식 보강 방법을 개선하여 부착파괴를 방지할 수 있는 방안이 필요하다.

선행 연구¹⁾에서 실물 모형을 대상으로 탄소섬유시트의 조기 박리파괴를 방지하기 위하여 부착길이 및 U형 보강 상세에 대하여 검토하였다. 본 연구에서는 선행 연구에서 입증된 중앙부 U형 보강 상세의 유용성을 유리섬유시트를 대상으로 검증함과 동시에 섬유시트와 콘크리트와의 부착 성능을 향상시켜 조기 박리파괴를 방지할 수 있도록 본 연구진에 의하여 개발된 에폭시 전단키 보강 상세의 적용성을 검증하고자 한다.

2. 연구 내용 및 방법

2.1 FRP 휨보강 부재의 파괴 양상에 대한 고찰

ACI 440-2R²⁾ 및 ISIS CANADA³⁾에서는 FRP로 휨보강

*Corresponding author E-mail : ycyou@kict.re.kr

Received September 8, 2006, Accepted September 10, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

된 부재의 파괴 양상을 5가지로 정의하고 있으며, 다음과 같이 1), 2) 철근항복 유·무에 따른 콘크리트 압괴와 3) FRP의 파단 및 4) 콘크리트 계면과 5) 피복면에서의 부착파괴로 구분하고 있다. 여기서 콘크리트 압괴, FRP 보강재의 파단은 각각의 구성 재료가 극한응력에 도달하여 파괴되는 경우로 기존의 설계식으로 충분히 예측이 가능하다. 반면, FRP 보강재의 부착파괴는 부착길이, 보강재의 강성, 전단경간 비, 시공환경 등 다양한 요인에 의해 영향을 받으며, 상호 복합적으로 작용하기 때문에 박리 시점을 예측하기가 매우 어렵다. 따라서 보강 설계에서는 극한강도의 예측이 가능하며, 재료의 효율성 측면에서 FRP 보강재의 파단을 유도하는 것이 가장 이상적일 수 있다.

Gangaroo⁴⁾ 등은 변형을 적합 조건을 이용하여 FRP로 보강된 부재의 파괴모드를 c/D (중립축/보깊이)의 함수로 나타내며, 압축 콘크리트의 압괴와 인장 보강재의 파단을 예측하였다. 즉, $c/D > 0.17$ ($\epsilon_f = 0.015$)일 때 압축 콘크리트 파괴가 발생하며, $c/D < 0.17$ 일 때 보강재의 인장 파단이 선행된다고 보고하였다.

Hollaway⁵⁾ 등은 보강된 부재의 전단경간/보깊이의 비에 따라 초기 부착파괴 양상을 Fig. 1과 같이 크게 두 가지 형태로 구분하였다. 즉, 전단경간/보깊이의 비가 3 이하일 경우에는 Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이 FRP 부착 단부에서 발생한 전단 또는 휨균열로부터 인장철근 하부의 피복 콘크리트가 탈락되는 파괴 양상을 나타낸다.

반면, 전단경간/보깊이의 비가 3.5 이상일 때는 주로 휨-전단균열에 의해 박리가 발생되며, 전단경간/보깊이의 비가 증가할수록 박리 발생 지점은 단부로부터 가력점 쪽으로 이동하기 때문에 Fig. 1(b)와 같이 중앙부에서 단부로 콘크리트 계면에서의 박리가 진행되어 최종 파괴되는 경향을 나타낸다. 또한, 전단경간/보깊이의 비에 상관없이 보강재의 강성이 크고 부착길이가 부재의 균열모멘트 이내 구간에 위치하도록 짧게 부착된 경우에도 Fig. 1(a)의 파괴가 발생할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

Rahim⁶⁾ 등은 보강재의 두께가 얇을수록 전단경간 내의

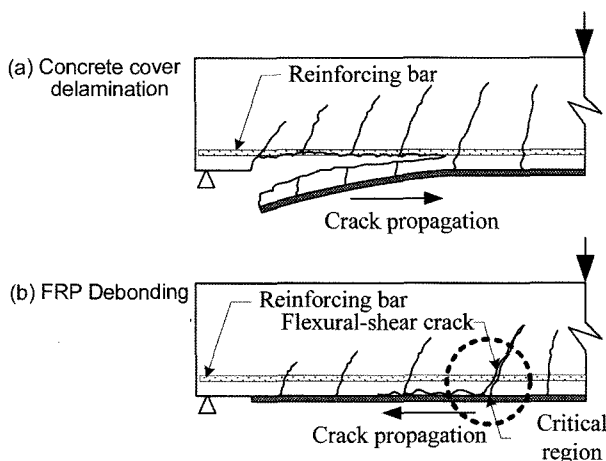


Fig. 1 Premature debonding failure modes of RC beams strengthened with FRP

하중 가력점 인근에서 박리가 발생하며, 보강재의 강성 ($t_f \cdot E_f$)이 증가할수록 단부의 전단 및 수직응력의 증가로 인해 박리 발생 지점은 단부로 이동한다고 보고하였다.

ACI 440-2R에서는 FRP 보강재의 부착파괴를 고려하여 유효변형률 (ϵ_{fe})을 제안하였으며, FRP의 강성 (n : 보강 매수, E_f : FRP 탄성계수, t_f : FRP 두께)에 영향을 받는 식 (2)의 k_m 값으로 제한하였다.

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq k_m \epsilon_{fu} \quad (1)$$

$$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60\epsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360,000} \right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f \leq 180,000 \\ \frac{1}{60\epsilon_{fu}} \left(\frac{90,000}{nE_f t_f} \right) \leq 0.90 & \text{for } nE_f t_f > 180,000 \end{cases} \quad (2)$$

또한 부착파괴를 방지하기 위한 정착 상세로 보강재의 정착 길이를 균열모멘트 지점으로부터 d 만큼 확보하고 매 보강 매수 증가마다 150 mm 이상씩 정착길이를 증가하도록 하였으며, 전단균열에 의한 단부탈락을 방지하기 위하여 보강재 단부에서의 전단력이 $2/3V_c$ 를 초과할 경우 정착 단부에 기계적 앵커를 도입하여 탈락을 방지하도록 제안하고 있다.

2.2 다양한 부착파괴 방지 상세

본 연구에서는 유리섬유시트로 보강된 실험체의 파괴 양상을 분석하고 기존에 제시된 다양한 부착파괴 방지 상세의 효율성을 검토함으로써, 합리적인 부착파괴 방지 상세를 제안하고자 하였다.

2.2.1 기존 부착파괴 방지 상세

1) 부착길이 확보

통상적으로 FRP를 이용한 보강 공법에서는 에폭시수지를 접착제로 사용하여 RC 부재와 FRP가 일체로 거동하도록 하며, 궁극적으로 FRP가 극한 재료강도에 이르러 파단될 때까지의 충분한 부착력을 확보하도록 부착길이를 산정한다. 이와 같은 방법에 기초하여 일본토목학회⁷⁾에서는 탄소섬유시트와 콘크리트와의 부착강도를 $\tau_f = 0.44$ MPa로 가정하고, 식 (3)에 의하여 부착길이를 산정하도록 제안하고 있다. 그러나 상기 방법에 의하여 충분한 부착길이를 확보한 상태에서도 Fig. 1(b)와 같이 최대모멘트와 전단력이 작용하는 부위에서는 휨-전단균열에 의한 수직 변위차에 의해서 박리가 발생하며, 특히 탄성계수가 작은 유리섬유시트나 실물 부재에서는 이러한 파괴 양상이 지배적인 것으로 보고되고 있다^{1,8)}.

본 연구에서는 기존 연구 결과를 바탕으로 유리섬유시트와 콘크리트의 설계용 부착강도를 각각 $\tau_f = 0.44$ MPa과 $\tau_f = 0.6$ MPa⁹⁾로 가정하고, 식 (3)에 의해 유리섬유시트의 부착길이를 산정하여 실험하였다.

$$L_1 = \left(\frac{A_f \times f_f}{\tau_f \times b_f} \right) \times 2 : L_f \geq L_1 \text{ 시트 파단} \quad (3)$$

여기서, f_f : FRP 보강재 공칭인장강도

t_f : FRP 보강재와 콘크리트의 부착강도

A_f : FRP 보강재 단면적

b_f : FRP 보강재 폭

L_f : FRP 보강재 부착길이

2) 단부 U 보강 상세

식 (3)에 의하여 계산된 에폭시수지의 부착력만으로 유리섬유시트의 박리파괴를 억제할 수 없을 때에는 추가적인 부착파괴 방지 상세의 도입이 필요하다. 기존 연구에서는 이러한 부착파괴 방지 상세에 대한 다양한 연구¹⁰⁻¹⁴⁾가 보고되고 있으며, 대표적으로 단부 U 보강 상세가 폭넓게 사용되고 있다.

단부 U 보강은 Fig. 2(a)와 같이 보강재 단부를 유리섬유시트로 감싸는 방법으로 단부 정착 효과에 의해서 박리파괴를 방지하는 상세이다. 그러나 단부 U 보강 상세는 중앙부에서 발생하는 박리를 원천적으로 방지할 수 없기 때문에 박리 발생 후에는 보강재가 비부착 상태로 전환되어 극한내력은 감소한다.

3) 중앙부 U 보강 상세

본 연구에서는 선행 연구¹⁾의 탄소섬유시트 보강 효과 검증 실험에서 효용성이 입증된 중앙부 U 보강에 대해서 검토하였다. 중앙부 U 보강 공법은 박리가 시작되는 가력점 인근의 위험 단면을 보강함으로써 박리를 근본적으로 억제하기 때문에 완전 합성 상태를 유지한 상태에서 보강재의 파단을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2.2 본 연구에서 제안하는 부착파괴 방지 상세

1) 에폭시 전단키 상세

부착파괴를 방지 또는 지연시키기 위하여 적용되는 U 보강 공법은 웹면이 없는 슬래브나, 부재 등에서는 적용이 불가능하다. 따라서 본 연구진에서는 보다 일반적으로 적용할 수 있는 부착파괴 방지 상세를 개발하고자 하였다. 유리섬유시트의 접착제인 에폭시수지의 부착 특

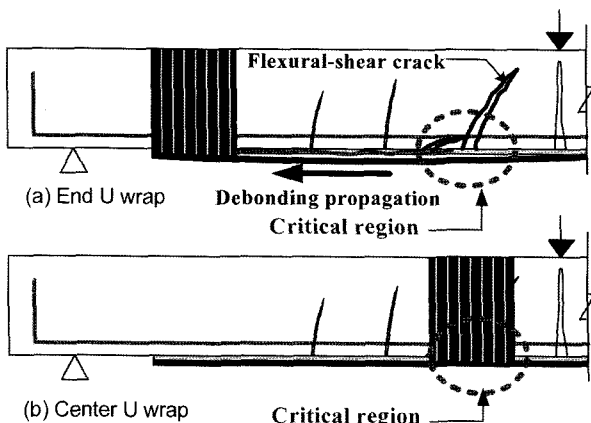


Fig. 2 Details of U wrappings to prevent debonding failure

성을 나타내는 인장전단접착강도는 대략 10 MPa 내외이지만, 콘크리트와의 접착 계면에서는 1.0~2.0 MPa로 부착력이 현저히 저하된다¹⁵⁾. 따라서 본 연구진은 순수 에폭시수지의 인장전단접착강도를 유지하고, 접착 계면에서의 부착파괴를 지연할 수 있는 에폭시수지 전단키를 고안하였다.

본 연구진에 의해서 개발된 에폭시 전단키는 Fig. 3과 같이 콘크리트 부착면에 에폭시 전단키를 형성하여 부분적으로 부착력의 증가를 유도하였다. 즉 Fig. 4와 같이 보 하부의 부착면에 100 mm 간격으로 폭 20 mm의 에폭시 전단키를 매입하였을 때, Table 1에서 계산된 것과 같이 폭 100 mm 당 콘크리트와의 계면 부착력은 4.8 kN인데 반하여 에폭시 전단키에서의 부착력은 20 kN으로 약 4배 이상의 부착력을 확보할 수 있다.

에폭시 전단키의 제작 과정은 Fig. 5와 같이 유리섬유시트가 부착된 콘크리트 하부에 일정 간격으로 콘크리트를 오목하게 파취하고 이를 고점도의 에폭시수지로 충전시켜 전단키를 형성한 후에 유리섬유시트를 부착한다.

3. 실험

3.1 재료 실험

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계압축강도 24 MPa의 레미콘이며, 인장, 압축 및 전단철근은 항복강도가

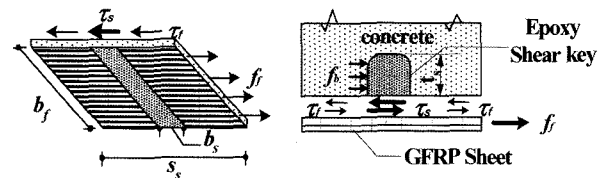


Fig. 3 Stress acting on the concrete soffit adjacent to epoxy shear key

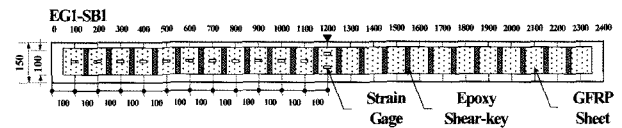


Fig. 4 Dimension and details of epoxy shear keys

Table 1 Bond strength of epoxy shear key

t_s (mm)	b_s (mm)	s_s (mm)	τ_f (MPa)	τ_s (MPa)	V_f (kN)	V_s (kN)	V_s/V_f
20	20	100	0.6	10	4.8	20	4.17

t_s : Thickness of shear key

b_s : Width of shear key

s_s : Space of shear key

τ_f : Bond strength between FRP sheet and concrete

τ_s : Bond strength between epoxy shear key and FRP sheet

V_f : Shear strength provided by epoxy-concrete interface (80 mm × 100 mm)

V_s : Shear strength provided by epoxy shear key (20 mm × 100 mm)

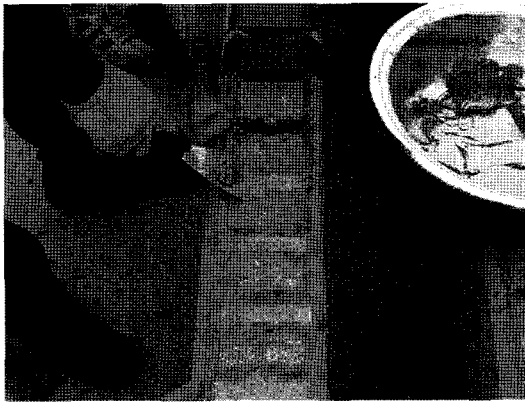


Fig. 5 Application of the epoxy shear keys

400 MPa인 D10, D13 철근을 사용하였다. 보강재로 사용된 유리섬유복합체와 함침용 에폭시수지의 재료 시험 결과는 Tables 2 및 3과 같다.

3.2 가력 및 측정

유리섬유시트의 휨보강성능 실험을 위하여 Fig. 6과 같이 가력. 골조를 설치하고 250 kN 용량의 액츄에이터로 3점 가력하였다. 액츄에이터의 제어 방법은 변위량의 증가에 따라 변위 제어 방식을 단계별로 채택하였다. 변위 및 변형률의 측정 부위는 최대 모멘트가 발생되는 중앙부에서의 측정을 원칙으로 하였으며, 각각 콘크리트의 압축 연단, 인장·압축철근 및 유리섬유 복합체의 변형률을 측정하였다.

Table 2 Material properties of GFRP composite

FRP	THK (mm)	Tensile strength (MPa)		Modulus of elasticity (GPa)		Failure strain
		Nominal	Test	Nominal	Test	
GFRP	1.0	560	657.1	25.2	29.5	0.019

Table 3 Material properties of epoxy resin

FRP	Compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Tensile lap-shear strength (MPa)
GFRP	105.2	58.4	155.5	12.5

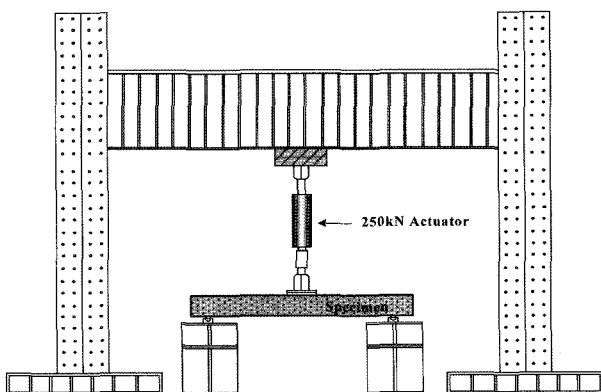


Fig. 6 Test set-up

3.3 실험체 개요

실험체의 단면 치수는 폭 150 mm, 높이 250 mm로, 인장축과 압축축 피복두께를 30 mm로 하였으며, 지점 길이 2,400 mm, 전체 실험체 길이 3,000 mm로 계획하였다. 일반적인 철근콘크리트 보에서는 인장철근의 단면적이 압축철근 단면적보다 큰 것이 정상이나 유리섬유로 보강된 축소 모형 실험체에서는 유리섬유시트가 파단변형률에 이르기 전에 콘크리트가 압축극한변형률 ($\epsilon_{cu} = 0.003$)에 도달하게 된다. 따라서 본 실험에서는 유리섬유시트의 보강으로 인한 콘크리트 연단에서의 압괴를 방지하기 위하여 축소모형 실험체의 압축철근으로 2-D13, 인장철근을 2-D10으로 배근하였다. 전단보강근은 휨 파괴를 유도하기 위하여 D10 철근을 100 mm 간격으로 배근하였다. 각 실험체의 형상 및 치수는 Fig. 7과 같다. 실험체는 총 6개로 기준 실험체인 무보강 실험체와 순수 유리섬유시트의 부착길이를 변수로 하는 B1, B2 실험체, 중앙부 가력점에서 100 mm 떨어진 위치에 폭 200 mm의 유리섬유시트를 이용하여 U 보강한 UCB2와 보강재 단부에 폭 200 mm로 U 보강한 UEB2 실험체 및 Fig. 4와 같이 에폭시 전단키를 100 mm 간격으로 보강면에 매립한 SB1 실험체로 구성된다. Table 4에서 기준 실험체인 EC 실험체는 무보강 실험체이며, EC를 제외한 실험체는 유리섬유시트 1매를 식 (3)에 의해 산정된 부착길이를 보강하고, 각 변수에 따른 정착 상세를 적용하였다.

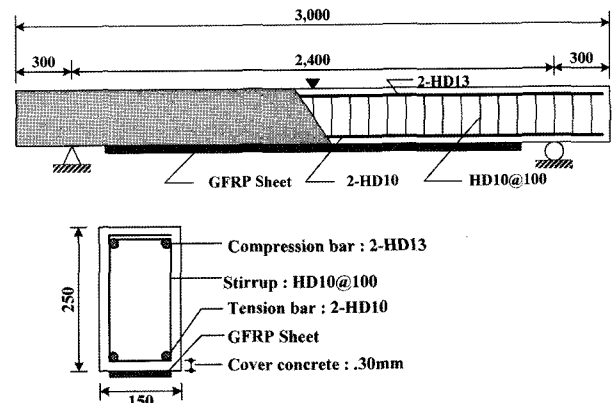


Fig. 7 Dimensions and details of test beam

Table 4 Details of test specimen

Specimen	τ_f^* (MPa)	Bond length (mm)	Strengthening	
			Flexural	Anchorage
EC	-	-	-	-
EG1-B1	0.44	2,300	Soffit	-
EG1-B2	0.60	1,900	Soffit	-
EG1-UCB2	0.60	1,900	Soffit	Center Uwrap
EG1-UEB2	0.60	1,900	Soffit	End U wrap
EG1-SB1	0.44	2,300	Soffit	Shear key

* τ_f : Bond strength between GFRP sheet and concrete

4. 실험 결과 분석

4.1 파괴 양상

정착 상세를 적용하지 않고 유리섬유시트를 단순 부착한 실험체에서는 유리섬유시트의 부착길이에 상관없이 모두 박리파괴되었다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 중앙부 하중가력점 부위의 휨-전단균열로부터 최초 박리가 발생하였으며, 하중의 증가에 따라서 발생한 박리는 단부 쪽으로 진행되어 최종 파괴되었다.

이러한 부착파괴를 방지하기 위하여 기존의 보강재 단부를 U형으로 감싸는 정착 상세를 적용한 실험체는 단순부착 실험체와 마찬가지로 중앙부에서 발생한 박리가 단부로 진행되는 과정은 동일하게 나타나며, 단부 U형 정착에 의해 일시적으로 박리의 진행이 억제되었으나, 유리섬유시트가 U 정착에서 이탈되면서 Fig. 9와 같이 최종적으로 박리파괴되었다.

이에 대하여 중앙부를 U 보강한 실험체(Fig. 10)는 가력점 하부에서 최초로 박리가 발생되었으며, 중앙부 U 보강에 의해서 박리의 진행이 효과적으로 억제되었다. 그러나 최대 하중이 항복하중의 약 2배 이상으로 증가됨에 따라 보의 소성영역이 지점쪽으로 확장되면서 중앙부 U 보강면을 지나쳐 새로운 박리가 발생하였으며, 이와 같이 시작된 박리가 단부로 진행되면서 최종 파괴에 이르렀다.

반면, 본 연구에서 제안한 에폭시 전단키를 매립하고 유리섬유시트 1매를 보강한 EG1-SB1 실험체는 하중 가력점 부위에서 국부적인 박리가 발생하였으나, 인접한 에폭시 전단키에 의해서 박리의 진행이 효과적으로 억제되었으며, 하중의 증가에 따라 단부로 확장되는 휨-전단균열에 의한 추가적인 박리도 길이 방향으로 매설된 에폭

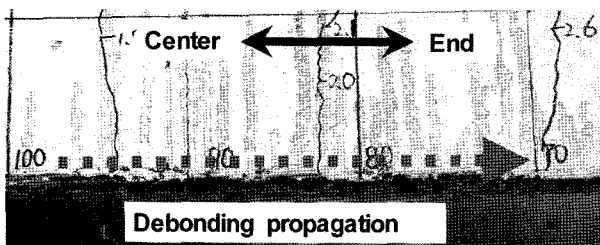


Fig. 8 Debonding failure of RC beams strengthened with simply bonded GFRP sheet

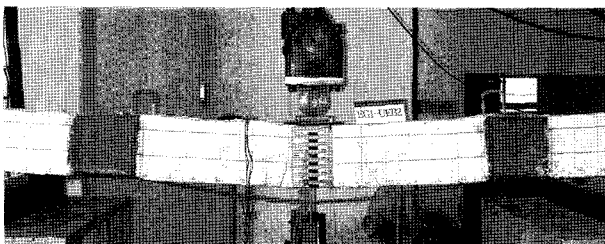


Fig. 9 Debonding failure of strengthened RC beam with end U wrapping

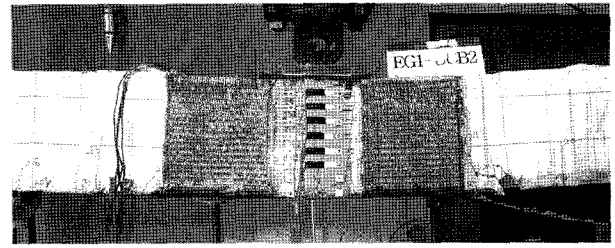


Fig. 10 Debonding failure of strengthened RC beam with center U wrapping

시 전단키에 의해 방지되었다. 따라서 Fig. 11에 나타난 바와 같이 유리섬유시트가 파단될 때까지 박리에 의한 파괴는 발생하지 않았으며, 전단키의 파괴도 발생하지 않았다.

4.2 하중-변위 관계

4.2.1 단순부착 실험체

유리섬유시트를 단순 부착한 실험체의 하중-변위 관계는 Fig. 12에 나타난 바와 같이 철근이 항복한 이후 유리섬유시트가 하중을 부담함에 따라 보강된 실험체에서 추가적인 내력의 증가가 나타나며, 중앙부에서 박리가 발생하고 단부 쪽으로 점진적으로 박리가 진행되는 동안에는 더 이상의 내력 증가는 나타나지 않았다. 결국 이어지는 섬유시트의 박리에 의해 최종 파괴 되었으며, 이때 부착길이 변화에 따른 파괴 양상 및 최대 내력의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 즉, 단순 부착된 유리섬

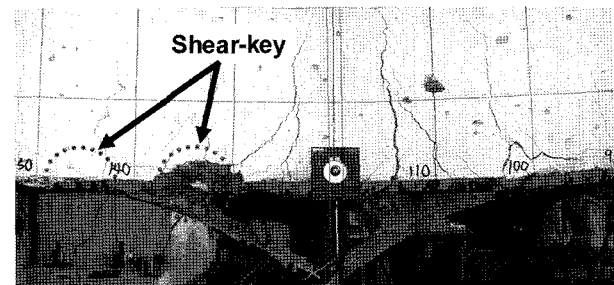


Fig. 11 GFRP rupture failure of strengthened RC beam with epoxy shear keys

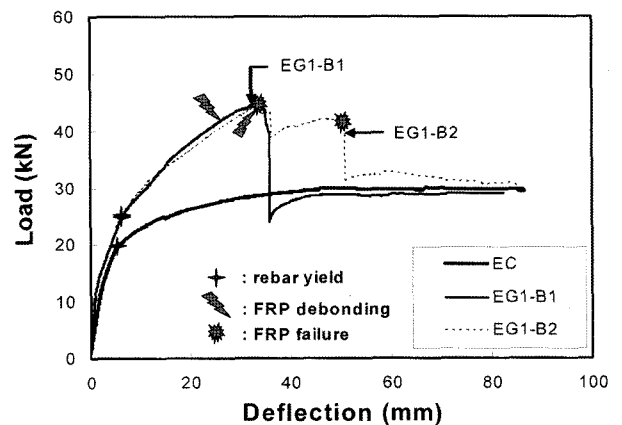


Fig. 12 Load-deflection curves for specimens with different bond lengths

유시트는 부착길이에 관계없이 박리파괴에 의해 지배되며, 중앙부 박리가 발생하는 경우 부착길이의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 유리섬유시트의 부착길이를 확보함으로써 부착파괴를 방지하는 기존의 설계용 부착강도 개념은 유리섬유시트의 경우에는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

4.2.2 U형 정착 상세 적용 실험체

유리섬유시트로 정착 단부를 U 보강한 EG1-UEB2 실험체는 Fig. 13에 나타난 바와 같이 중앙부에서 박리의 시작과 함께 강성이 급격히 저하되고, 이후 단부쪽으로 박리가 진행되는 동안에는 하중-변위 곡선이 완만한 기울기를 나타내면서 상당히 연성적인 거동을 나타낸다. 이에 대하여 유리섬유시트로 중앙부를 U 보강한 EG1-UCB2 실험체는 박리 발생이 예상되는 가력점 주변을 U형으로 보강함으로써 초기 박리를 효과적으로 억제하기 때문에 강성 저하 없이 최대 하중에 도달하며, 단부 U 보강에 비하여 최대 하중이 증가하였다. 아울러 단부 U 보강 실험체는 U 보강을 실시하지 않은 실험체에 비하여 변형능력이 증가되는 경향을 나타내었으나, 섬유시트의 박리가 중앙부에서부터 단부까지 광범위하게 진행되므로 구조물 내력 측면에서는 바람직하지 못한 것으로 판단된다.

4.2.3 에폭시 전단키 매립 실험체

에폭시 전단키를 매립하고 유리섬유시트 1매를 보강한 실험체를 동일한 부착길이를 갖는 단순 부착 실험체와 비교하면 Fig. 14와 같다. 그림에서 나타난 바와 같이 에폭시 전단키에 의해 초기 박리의 발생과 진행이 효과적으로 억제되었기 때문에 박리에 의한 하중의 감소나 휨강성의 저하 없이 유리섬유시트의 파단하중까지 도달하였다. 따라서 에폭시 전단키에 의한 보강 상세는 유리섬유시트의 부착파괴를 방지할 수 있는 매우 효율적인 방법으로 판단된다.

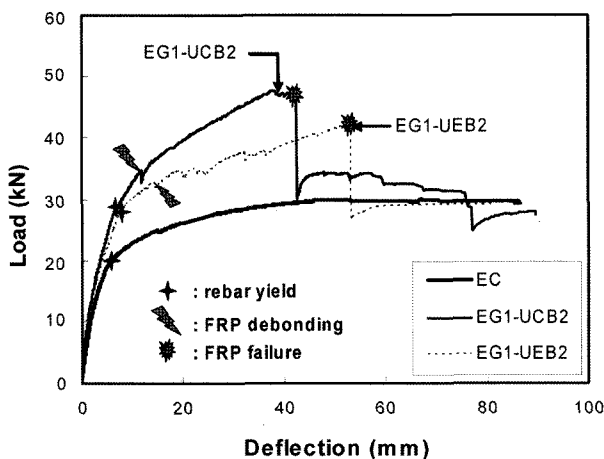


Fig. 13 Comparison of specimens strengthened with center and end U wrappings

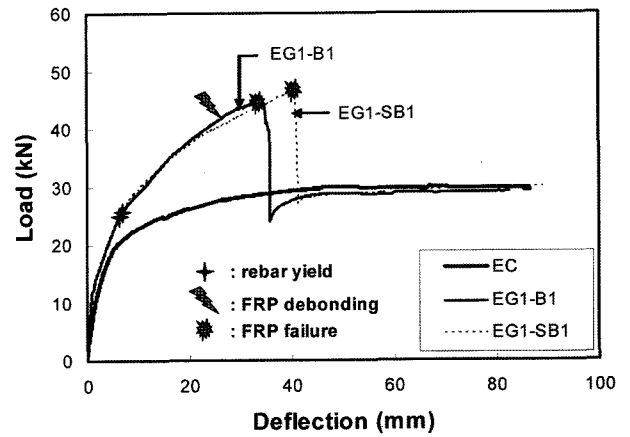


Fig. 14 Comparison of specimens with and without shear key

4.3 유리섬유시트의 유효 변형률

일반적으로 RC부재의 휨강도는 실험값이 이론값을 초과하며, 이를 고려하지 않을 경우, 보강된 부재에 대한 휨보강 성능을 평가할 때 Fig. 15의 ΔP_{RC} 만큼 과대평가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 RC 부재의 강도 여유분을 제외한 순수 유리섬유시트의 보강 성능을 평가하기 위하여 최대 하중과 보강 효과가 상실된 후의 하중 차이 (ΔP_f)로부터 유리섬유시트의 유효 변형률을 계산하도록 하였다. Table 6에서 초기 부착파괴가 발생한 단순 부착 실험체와 기존 단부 U 보강 실험체는 유리섬유시트의 유효 변형률이 재료 변형률의 60~70% 정도에서 파괴되며, 휨보강 성능의 저하가 뚜렷하게 나타났다. 반면 유리섬유시트가 파단된 SB1 실험체와 중앙부 U 보강에 의하여 초기 박리가 억제된 UCB2 실험체는 대략 재료 변형률의 80% 이상 발휘하는 것으로 나타났다. 따라서 박리파괴를 기준으로 하여 보강 설계를 실시할 경우에는 유리섬유시트의 60%까지 강도 저하를 고려하여야 하며, 본 연구에서 제안하는 바와 같이 부착파괴 방지 상세를 적용할 경우에는 유효 변형률로 80%의 감소 계수를 고려하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

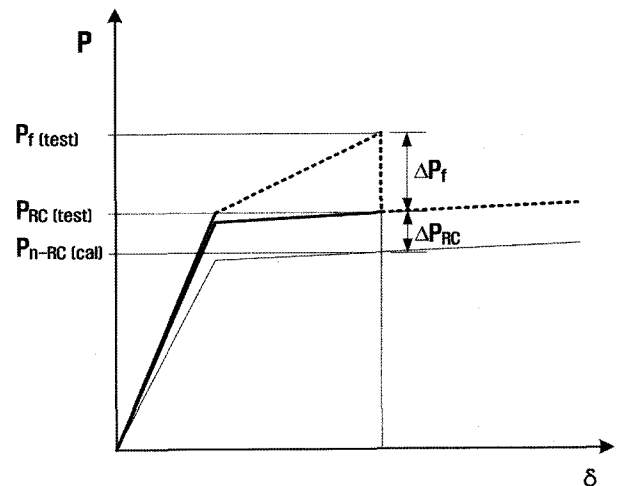


Fig. 15 Strengthening effects of GFRP sheet

Table 5 Test results

Specimens	Yielding		Debonding		Ultimate						Failure mode
	Cal (kN)	Exp (kN)	Exp (kN)	ϵ_f (μ)	Cal _n (kN)	Cal _u (kN)	Exp (kN)	δ (mm)	ϵ_c (μ)	ϵ_f (μ)	
EC	19.0	21.5	-	-	20.4	25.7	29.4	41.43	3,000	-	Concrete crushing after steel yielding
EG1-B1	21.0	24.9	41.9	14,803	40.9	50.3	44.6	32.74	2,329	18,420	GFRP debonding at midspan after steel yielding
EG1-B2	21.0	24.6	44.7	28,842	40.9	50.3	44.7	50.58	4,219	-	GFRP debonding at midspan after steel yielding
EG1-UCB2	21.0	28.2	34.8	8,743	40.9	45.9	47.6	42.30	3,207	19,254	GFRP debonding at midspan after steel yielding
EG1-UEB2	21.0	28.1	32.7	9,511	40.9	45.9	42.2	52.96	4,907	-	GFRP debonding at midspan after steel yielding
EG1-SB1	21.0	25.9	-	-	40.9	49.3	46.6	40.46	3,726	18,160	GFRP rupture after steel yielding

Cal_n (calculated nominal value): calculated by nominal strength of each materials

Cal_u (calculated ultimate value): calculated by experimentally measured strength of each materials

Exp (experimental value): experimentally measured value

Table 6 Tensile stress and strain of GFRP sheet

Specimens	P _u (kN)	P _{fail} (kN)	ΔP_f (kN)	ΔM_f (kN-m)	ΔT_f (kN)	f _f (MPa)	ϵ_{fe} (μ)	$\epsilon_{f(test)}$ (μ)	$\epsilon_{fe}/\epsilon_{fn}$
EG1-B1	44.6	28.5	16.1	9.69	41.29	412.9	16,384	18,420	0.74
EG1-B2	44.7	28.5	16.1	9.67	41.55	415.5	16,488	-	0.74
EG1-UCB2	47.6	29.5	18.1	10.88	46.59	465.9	18,487	19,254	0.83
EG1-UEB2	42.2	28.7	13.5	8.10	34.46	344.6	13,673	-	0.62
EG1-SB1	46.6	28.2	18.4	11.02	47.39	473.9	18,804	18,160	0.85

P_u: maximum load

P_{fail}: decreased load after failure

ΔP_f : P_u - P_{fail}

ΔM_f : moment increment

ΔT_f : tensile force increment

f_f: tensile stress of GFRP sheet

ϵ_{fe} : effective strain of GFRP sheet

$\epsilon_{f(test)}$: measured strain of GFRP sheet

ϵ_{fn} : nominal strain of GFRP sheet based on material test

5. 결 론

본 연구에서는 유리섬유시트로 휨보강된 RC 보의 부착파괴를 방지하기 위한 기존의 보강 상세 및 본 연구에서 제안된 전단키 보강 상세에 대한 실험적 연구를 수행하였으며, 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 유리섬유시트의 부착길이를 변수로 한 실험체에서는 부재의 전 길이를 부착한 실험체에서도 중앙부에서 발생하는 박리균열에 의해 초기 부착파괴가 발생하였다. 따라서 유리섬유시트로 휨보강된 실험체에서는 충분한 부착길이를 확보하여도 박리파괴를 방지할 수 없을 것으로 판단된다.
- 2) 박리파괴를 방지하기 위하여 기존에 제안되었던 ‘단부 U 보강’ 상세는 단부에서 최종 박리파괴를 일부 지연시킬 수 있으나, 중앙부로부터 발생되어 단부로 진전되는 유리섬유시트의 박리를 근본적으로 억제할 수는 없는 것으로 나타났다.
- 3) 중앙부 U 보강 상세는 중앙부에서의 초기 박리를 효과적으로 억제하여 충분한 보강 성능을 발휘하면서 최대 하중에 도달하였다. 따라서 중앙부 U 보강 상세는 섬유시트의 박리를 억제·방지할 수 있는 유용한 보강 방법으로 판단된다.
- 4) 예폭시 전단키에 의한 부착파괴 방지 상세는 중앙부에서의 초기 박리 및 박리의 진행을 지속적으로

억제하며, 최종적으로는 섬유시트가 파단되는 가장 이상적인 파괴 양상을 나타내었다. 따라서 본 연구에서 제시하는 예폭시 전단키형 정착 상세는 유리섬유시트의 부착파괴 방지 상세로 적용 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2001 건설핵심기술연구개발사업 (제안D-04) 철근콘크리트 건축물 보강 공법의 개발 및 성능 평가의 일부분으로 수행된 연구임을 밝히며, 관계 제위께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 유영찬, 최기선, 김공환, “An Experimental Study to Prevent Debonding Failure of Full-Scale RC Beam Strengthened with Multi-Layer CFS”, 콘크리트학회논문집, 16권 6호, 2004, pp.867~874.
2. ACI 440.2R-02, *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, ACI, 2002, pp.21~22.
3. ISIS CANADA, *Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers*, Design Manual No.4, ISIS Canada, 2001, 4.8pp.
4. GangaRao, Hota V. S. and Vijay, P. V., “Bending Behavior of Concrete Beams Wrapped with Carbon Fabric”, *Journal*

- of Structural Engineering, ASCE, Jan. 1998, pp.3~10.
5. Holloway, L. C. and Leeming, M. B., *Strengthening of Reinforced Concrete Structures*, Woodhead Publishing Ltd. 2000, 94pp.
 6. Rahimi, Hamid and Hutchinson, Allan, "Concrete Beams Strengthened with Externally Bonded FRP Plates", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Feb. 2001, pp.44~56.
 7. 土木學會콘크리트위원회, 콘크리트 구조물의 보강지침 (案), 土木學會, 1999, 94pp.
 8. 최기선, 유영찬, 이진용, 김광환, "유리섬유시트로 휨보강된 RC 보의 부착파괴 방지 상세에 관한 실험적 연구", *복합재료학회논문집*, 한국콘크리트학회, 15권 1호, 2003., pp.531~536.
 9. (주)한국화이버/한국카본, 탄소섬유시트 공법 기술자료 (II), 해림, 1998, 52pp.
 10. Spadea, G., Bencardino, F., and Swamy, R. N., "Structural Behavior of Composite RC Beams with Externally Bonded CFRP", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Aug. 1998, pp.132~137
 11. Arduini, Marco, Tommaso, Angelo Di, and Nanni, Antonio, "Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams", *ACI Structural Journal*, Jul.-Aug. 1997, pp.363~370.
 12. Brena, Sergio F., Bramblett, Regan M., Wood, Sharon L., and Kreger, Michael E., "Increasing Flexural Capacity of Reinforced Concrete Beams Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Composites", *ACI Structural Journal*, Jan.-Feb. 2003, pp.36~46.
 13. Sharif, Alfarabi, Sulaimani, G. J. Al, Basunbul, I. A., Baluch, M. H., and Ghaleb, B. N., "Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates", *ACI Structural Journal*, Mar.-Apr. 1994, pp.160~168.
 14. Lamanna, Anthony J., Bank, Lawrence C., Scott, David W., "Flexural Strengthening of Reinforced Concrete Beams by Mechanically Attaching Fiber-Reinforced Polymer Strips", *Journal of Composites for Construction*, ASCE, May-Jun. 2004, pp.203~210
 15. 건설교통부, 한국건설교통기술평가원, 철근콘크리트 건축물 보강 공법의 개발 및 성능 평가, 건설핵심연구개발 사업 최종보고서, 2003, pp.162~184.

요 약 본 연구에서는 유리섬유시트로 휨보강된 RC 보의 파괴 양상을 분석하고, 부착파괴를 방지하기 위한 실험 연구를 수행하였다. 부착파괴를 방지하기 위한 방법으로 부착길이를 증가시키는 방법과 U형 보강 방법 및 에폭시 전단키 보강 상세에 대하여 검증하였다. 유리섬유시트의 부착길이는 콘크리트 계면과 보강재 사이의 부착강도를 가정하여 계산하였다. U형 보강 방법은 콘크리트 밑면에 부착된 유리섬유시트의 단부 혹은 중앙부를 U형으로 감싸서 보강하였다. 콘크리트 하부에 매립된 전단키는 유리섬유시트의 인장력에 대하여 충분한 부착력을 제공하도록 하였다. 단부 U 보강과 중앙부 U 보강은 부착파괴를 방지하기 위해 기존에 제안된 방법이며, 에폭시 전단키는 본 연구에서 제시된 새로운 방지 상세이다. 유리섬유시트의 부착파괴 방지 상세에 대한 효과를 검증하기 위하여 총 6개의 실험체를 제작·실험하였다. 본 실험 결과에 의하면 부착길이 및 단부 U 보강 상세를 적용하는 방법은 조기 부착파괴를 억제하지 못하는 것으로 나타났다. 반면 중앙부 U 보강 상세는 보강재를 따라 발생하는 박리균열의 진행을 억제시키기 때문에 부착파괴를 지연하는 효과가 있으며, 전단키의 경우는 부착파괴를 충분히 방지하며 유리섬유시트의 파단을 유도하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 유리섬유시트, 부착파괴, U 보강 상세, 에폭시 전단키