

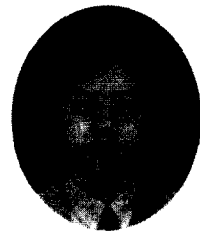
---

## 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트보의 계면박리에 대한 해석적 연구

Analytical Study on Interface Debonding of Reinforced Concrete  
Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheet(CFS)



심 종 성\*  
Sim, Jongsung



배 인 환\*\*  
Bae, Inhwan

---

### ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the interface debonding of RC beams strengthened by carbon fiber sheet(CFS). The behavior of damaged RC beams strengthened with CFS is analytically investigated next using linear elastic fracture mechanics(LEFM) approach and the finite element method. The study includes an investigation of the separation mode by interface fracture of the strengthening materials due to the interfacial shear and normal stresses. The numerical method is presented to obtain the value of interfacial fracture parameter such as the strain energy release rate.

Based on the results of this study, it is found that the critical case occurs when the interfacial cracks occur within a short region of the flexural crack. The CFS strengthening has not an adequate factor of safety against interfacial debonding of CFS. Furthermore, for the thicknesses of the adhesive studied[1mm~3mm], it is no noticeable effect on the strain energy release rate.

**Keywords** : interfacial debonding, damaged RC beam, strain energy release rate, interfacial crack

---

\* 정회원 한양대학교 토목·환경공학과 교수  
\*\* 정회원 한양대학교 산업과학연구소 선임연구원

·본 논문에 대한 토의를 1999년 8월 30일까지 학회로 보  
내 주시면 1999년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

# 1. 서론

구조내력을 회복시키는 에폭시 접착 강판 보강공법은 70년도 이후부터 선진 외국에서 교량 및 건축물 등에 널리 적용되었는데 이는 신뢰성 있는 보강효과를 기대할 수 있을 뿐 만 아니라, 보수시공이 기존의 타 공법에 비해 수월하고 시공 후에도 부재치수의 변화가 적기 때문에 널리 적용되고 있다<sup>(10,14)</sup>. 그러나 장기단 사용환경에 노출된 강판은 부식이 발생되어 다시 시공해야 하는 단점이 있으므로 최근에는 강판대신 내부식성, 내화학적 및 내피로성이 우수한 탄소섬유쉬트를 적용하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

보강재 박리에 의한 부재의 파괴는 강판의 경우와 탄소섬유쉬트의 경우가 전혀 다르게 나타나고 있다. 강판 보강 보는 단부의 응력 집중으로 인해 단부에서 박리가 발생하여 부재가 파괴되는 단부파괴박리(rip-off) 형태를 주로 보이거나<sup>(4,6,9,12)</sup>, 탄소섬유쉬트 보강의 경우에는 내부 휨 균열 끝에서부터 계면 전단 균열이 접착제와 콘크리트 계면사이에서 발생하고 하중의 증가와 함께 단부까지 전파되어 보강재가 박리되는 계면박리(interface debonding or separation)를 보인다<sup>(11)</sup>. 접착제/콘크리트 또는 접착제/CFS사이의 계면 전단 균열이 존재하여 성장하는 파괴 메커니즘을 해석하기 위해서는 단부파괴박리에 대한 해석방법과 다른 접근방법이 요구되며, 본 연구에서는 선형탄성파괴역학과 유한요소법을 적용하여 손상된 보강시험체의 최대 에너지해방률( $G_{max}$ )을 주는 계면 전단 균열의 양상을 컴플라이언스방법을 사용하여 해석하고자 한다. 해석을 위하여 콘크리트 내에 휨 균열과 에폭시/보강재 사이에 계면 전단 균열이 존재하며, 계면 전단 균열이 휨 균열 끝에서 지점방향으로 수평하게 전파된다고 가정한다. 일반적으로 계면 전단 균열은 보강재 시공시 부적절한 접착면, 콘크리트내의 휨 균열 그리고 피로하중 등에 의해 발생하며, 균열 선단에서의 국부적인 응력의 영역은 수직단면의

정확한 위치에 민감하기 않기 때문에, 이와같은 수평 계면 전단 균열이 접착제내 혹은 계면내에 존재하든지 거의 차이가 없게 된다.

보강시험체가 하중을 받을 경우, 보강재는 인장을 받지만 접착제는 보강재와 콘크리트 모체사이의 전단 연결재 역할을 함으로 전단을 받게 된다. 따라서 계면내에 존재하는 균열의 전파는 그림 1과 같이 인장모드(mode I)와 전단모드(mode II)가 함께 존재하는 혼합모드(mixed mode)이나, 전단모드(mode II) 조건이 더 지배적이다.

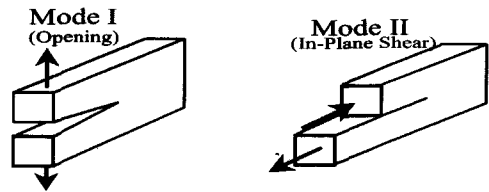


Fig. 1 The modes of loading that can be applied to a crack

특히 피로하중을 받을 경우 탄소섬유쉬트로 보강된 대부분의 시험체가 이와같은 계면박리 모드로 파괴되었다<sup>(1,3)</sup>. 박리에 대한 기존의 연구는 강판 보강의 단부파괴박리(rip-off)에 대하여 이루어졌으며, 계면박리에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 따라서 동적하중을 주로 받는 토목구조물을 탄소섬유쉬트로 보강할 경우, 보강된 구조물은 이와같은 계면박리에 취약하기 때문에 이에 대한 연구가 요망된다.

본 연구의 목적은 탄소섬유쉬트로 보강된 시험체의 주요 파괴모드인 계면박리 모드를 규명하는 것이며, 탄소섬유쉬트로 보강된 시험체의 계면박리 모드를 해석하기 위하여 선형탄성파괴역학(LEFM)의 컴플라이언스법과 엄밀한 유한요소법을 사용하여 계면파괴 역학변수인 에너지해방률(strain energy release rate,  $G$ )을 고찰하였으며, 에너지해방률에 영향을 미치는 계면 전단 균열 및 에폭시 접착제 두께 등에 따른 변수해석을 수행하였다.

## 2. 해석적 모델

### 2.1 균열단면 유한요소 모델

본 연구에서는 선형파괴역학이론과 유한요소법에 기초한 2차원 해석모델이 그림 2와 같이 3점 하중을 받는 단순 지지된 손상된 철근콘크리트 보에 적용되었다. 채택된 무보강 철근콘크리트 보는 총길이 2.2m, 순지간 2.0m, 단면 15x25cm 이며 주철근은 2D13 으로서 저보강 보이다. 손상된 보강구조물의 계면박리를 해석하기 위하여 2차원 평면응력 모델이 사용되었으며, 콘크리트와 접착제에 대하여 4절점과 3절점 솔리드 요소를 사용하였고, 주철근과 탄소섬유슈트에 대해서는 2절점 트러스 요소를 사용하였다. 본 연구에서는 범용해석 프로그램인 ADINA를 사용하

여 해석을 수행하였다.

콘크리트의 손상을 묘사하기 위한 수직 휨 균열( $a_f$ )은 접착제를 뚫고 보강재까지 이어져 있고, 높이는 보 유효높이( $d$ )의 약 반인 113mm로 가정하였다. 휨 균열의 간격은 보 유효높이의 1/5정도인 45mm로 가정하였으며 휨 균열의 개수는 3개로 일정하게 하였다. 또한 계면 전단 균열( $a_s$ )은 접착제/보강재 사이에 존재하며, 그림 2와 같이 계면 전단 균열이 최외단의 휨 균열 끝단에서부터 지점으로 수평하게 전파하여 보강재가 박리되는 것으로 가정하였다.

유한요소의 형상비(폭에 대한 길이비)는 5이하로 정해져야 정확한 해를 얻을 수 있으므로, 접착층의 두께가 1mm~3mm로써 보강구조물의 유한요소 적용시 적절한 요소형상비가 적용되어야

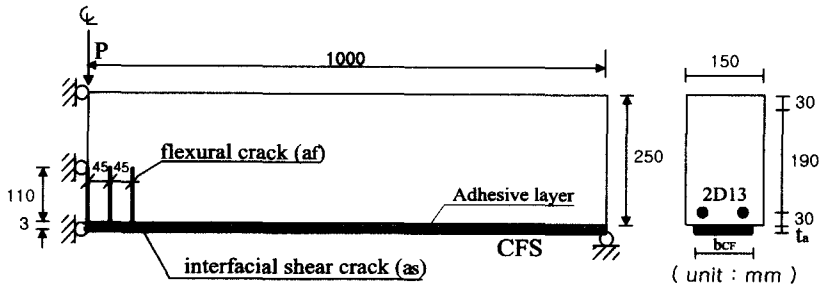


Fig. 2 General view of a half seized RC beam

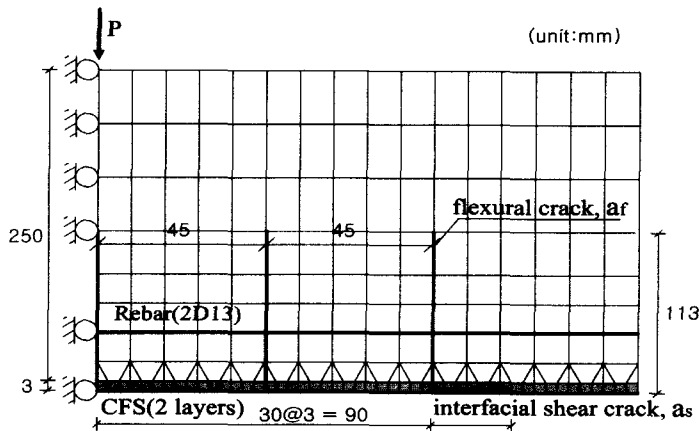


Fig. 3 Finite element model for interface crack analysis

한다<sup>(1)</sup>. 본 연구에서 적용된 유한요소의 형상비는 접착층에서는 최소 1에서 3 이하로, 나머지 콘크리트 부분에서는 5이하로 모델링하였다. 손상 단면부위에 대하여 모델링한 유한요소 형상의 상세는 그림 3과 같으며, 그 나머지 단면은 지점까지 그림과 같이 동일하게 모델링하였다.

## 2.2 적용변수

위의 해석모델을 이용하여 강판 및 탄소섬유쉬트로 보강된 시험체의 에너지해방율( $G$ )에 영향을 미치는 변수에 대한 연구가 수행되었다.

휨 균열의 길이는 113mm 이며, 특히 휨 균열개수와 위치에 따라 최대 에너지해방율( $G_{max}$ ) 값이 다르게 나타나나 본 연구에서는 휨 균열의 개수는 3개로 그리고 위치는 중앙부에서 90mm 범위로 일정하게 하였다. 파괴해석시 적용된 주요 변수는 크게 2가지로서 계면 전단 균열의 길이( $a_s$ )와 에폭시의 두께( $t_a$ )이다. 가상균열 증가방법을 적용할때 계면 전단 균열의 증가길이( $\Delta a_s$ )는 3mm이며 150mm까지 증가시켜 해석하였다. 에폭시 접착두께( $t_a$ )는 강판부착시 일반적으로 적용되는 접착두께인 3mm와 그 이하인 1mm, 2mm 이다. 보강재는 탄소섬유쉬트(FTS-C1)의 물성을 입력자료로 사용하였다. 이들 해석변수를 정리하면 표 1과 같으며, 입력자료를 정리하면 표 2와 같다.

사용된 철근은 항복강도가 392 N/mm<sup>2</sup>인

Table 1 Analysis parameters

해석변수	적용 값
계면 전단 균열 증분길이 ( $\Delta a_s$ )	3mm
에폭시 접착재 두께 ( $t_a$ )	1mm, 2mm, 3mm
사용 보강재	CFS

Table 2 Input data for finite element analysis

입력변수	탄성계수 ( $\times 10^3$ N/mm <sup>2</sup> )	단면적 (mm <sup>2</sup> )
콘크리트	21.3	-
CFS (FTS-C1)	230	286 (0.22 $\times$ 130)
철근	200.1	254
에폭시	2.95	-

D13, D16이며, 탄소섬유쉬트는 공칭강도가 3483 N/mm<sup>2</sup>인 중탄성 섬유가 사용되었다. 적용하중(2P)는 보강보의 정적 휨 파괴실험으로부터 획득된 최대하중의 60%수준인 사용하중으로서 부재가 항복하기 전의 하중인 53KN이 적용되었다<sup>(1,3)</sup>. CFS 보강길이는 전지간(L=2000mm)으로 일정하게 적용하였다.

## 2.3 컴플라이언스 방법

균질한 재료내의 균열에 대한 에너지해방율( $G$ )은 여러 가지 방법으로 결정할 수 있으나, 얇은 접착층을 포함한 보강구조물의 해석에 컴플라이언스방법이 적절한다. Irwin<sup>(8)</sup>은 Griffith 모델과 본질적으로 같은 파괴에 대한 에너지 접근방법을 제안하였으며, 균열길이 2a를 갖는 재료의 평면응력상태에서 표면에너지는 다음과 같다.

$$-\frac{d\Pi}{dA} = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} = G \quad (1)$$

여기서,  $d\Pi$ 는 포텐셜에너지 변화량,  $dA$ 는 균열단면의 변화

탄성체의 포텐셜에너지  $\Pi$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Pi = U - F$$

$$U = \int_0^{\Delta} Pd\Delta = \frac{P\Delta}{2} \quad (2)$$

여기서, 여기서,  $F = P\Delta$  이며,  $U$ 는 탄성체 내에 저장된 변형에너지,  $F$ 는 외부하중에 의한 일

하중 조절 방식에 따른 균열을 가진 탄성체의 하중-변위선도는 그림 4와 같다.

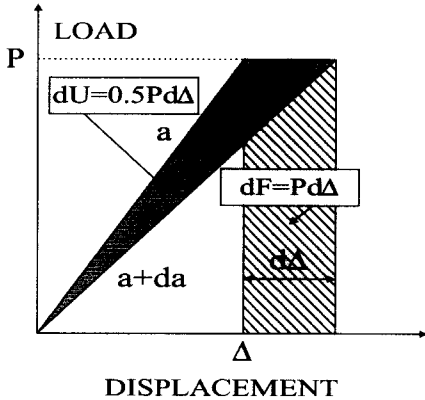


Fig. 4 Load-displacement relation

$$\Pi = F - U = -U \quad (3)$$

$$G = -\frac{d\Pi}{dA} = \frac{1}{B} \left[ \frac{dU}{da} \right]_P \quad (4)$$

여기서 식 5와 같이 부재강성의 역수로서 균열길이의 함수인 구조물의 컴플라이언스( $C$ )를 위 식에 도입하면 다음과 같다.

$$C = \frac{A}{P} \quad (5)$$

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (6)$$

여기서,  $B$ 는 부재의 폭,  $\frac{\partial C}{\partial a}$ 는 컴플라이언스  $C$ 의 변화량

균열에 대한 컴플라이언스의 변화량( $\frac{\partial C}{\partial a}$ )은 직접구할 수 없으며, 가상 균열 증가방법을 사용한 유한요소해석법을 적용하여 균열길이에 따른  $C \sim a$  그래프가 얻어지며, 그 그래프로부터 임의 균열길이에서의 컴플라이언스의 변화량이 수치적으로 얻어질 수 있다.

### 3. 해석결과

#### 3.1 계면의 수직 및 전단응력

에폭시 접착두께가 3mm인 CFS 보강시험체 해석결과, 에폭시/CFS의 계면 전단응력 분포와 수직 응력분포를 살펴보면 각각 그림 5 및 6과 같으며, 해석된 값은 에폭시의 응력이다. 그림내에서 사용된 범례는 휨 균열길이( $l=113\text{mm}$ )에 대한 증분된 계면 전단 균열 길이( $a_s$ )의 비로 나타낸 것이며, Y축은 해석된 계면 전단응력(또는 수직응력)을 균열이 없는 강판 보강시험체 내부의 균일 전단응력( $\tau_o$ )으로 나눈 응력비로서 무차원화 한 값이다. 여기서 내부 균일 전단응력인  $\tau_o$ 는 에폭시 접착두께 3mm, 강판두께 2.3 mm 강판으로 보강된 무손상 보를 공칭강도의 60% (60.6kN) 하중으로 재하하여 얻은 값이다.

계면 전단응력 분포로부터 전단력은 지간중앙에서 지점까지  $P/2$ 로 일정하므로 하중재하 지점에서 단부 근처까지는 거의 일정한 전단응력을 보이나, 그림 5과 같이 전단균열 선단부근에서 큰 전단응력이 발생하며 그 이후에 급격히 줄어들어 일정한 전단응력이 된다. 또한 휨 균열사이에서 계면 전단응력은 거의 선형으로 변화하며 휨 균열 중간에서 부호가 바뀐다. 계면 전단 균열 선단에서의 전단 응력비는 6~8로서 크게 나타났으나, 그림 6과 같이 임의의 전단균열 선단부근에서의 수직 응력의 비는 0.7~0.9로 매우 작게 나타나 전단이 지배적인 mode II의 경우라고 할

수 있으나 순수한 mode II는 아니다. 접착두께가 동일한 경우 강판 보강과 탄소섬유шит 보강에서의 계면 전단응력 분포와 수직응력 분포는 유사하게 나타나나, 탄소섬유шит 보강의 경우가 강판 보강의 경우보다 계면 전단 균열 선단에서의 전단 및 수직응력은 상당히 크고, 계면 균열이 없는 위치에서의 균일 전단응력은 아주 작게 나타난다. 따라서 탄소섬유шит로 보강된 시험체가 균열이 없는 경우에는 거의 0에 가까운 전단응력

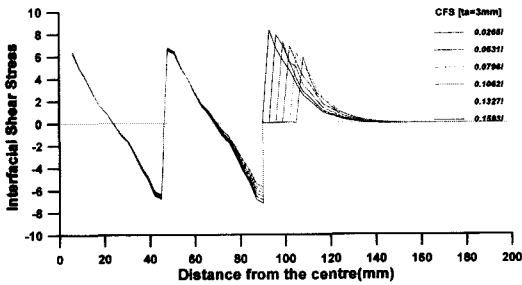


Fig. 5 Shear stress distribution at the CFS/adhesive interface

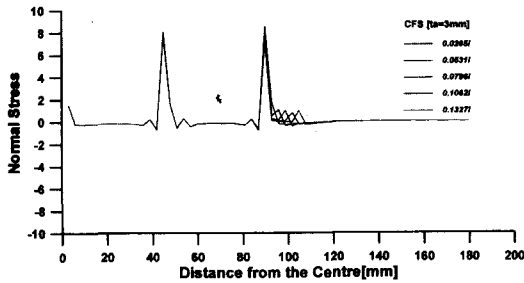


Fig. 6 Normal stress distribution at the CFS/adhesive interface

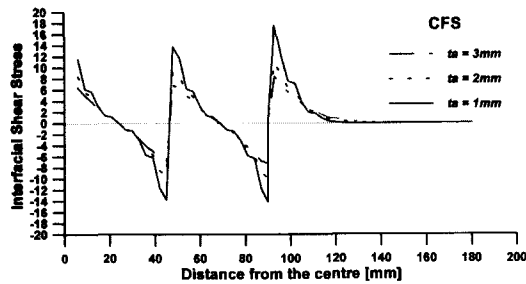


Fig. 7 Shear stress distribution at the CFS/adhesive interface with adhesive thickness

을 보이지만, 휨 및 계면전단 균열이 발생할 경우, 균열선단에서 단부보다 큰 응력의 집중현상이 발생하게 된다. 에폭시 접착두께 1mm, 2mm 및 3mm에 따라 비교하면 그림 7과 같다. 그림으로부터 접착두께가 얇아짐에 따라 계면 전단응력의 크기는 각각 8.3, 11.0 및 17.5로 크게 나타났다.

### 3.2 에너지해방률 해석

일반적으로 에너지해방률은 하중의 위치와 휨 균열유무 또는 개수에 따라 달라지게 된다. 특히 휨 균열이 없는 경우와 많은 경우에는 에너지해방률은 줄어들게 되는데 이것은 계면 전단 균열의 전파에 대한 위험성이 크게 줄어드는 것을 의미한다.

에너지해방률을 계산하기 위하여 계면 전단 균열성장률에 따른 컴플라이언스 변화량( $\frac{dC}{da}$ )을 먼저 해석해야 하는데, 본 연구에서는 가상균열 증가방법을 사용하여 균열길이에 따른 컴플라이언스(C)~계면 전단 균열( $a_s$ ) 관계부터 임의 균열길이에서의 컴플라이언스 변화량을 수치적으로 얻었다.

계면 전단 균열에 따른 보강시험체의 무차원화된 에너지해방률의 해석결과는 그림 8과 같다. 그림으로부터 에너지해방률은 초기에 급격히 증가하다가 최대점에서 다시 급격하게 줄어들면서 임의 전단 균열길이에서부터 일정한 경향을 보였다. 최대값 이후에 해석치가 진동하는 경향을 나타내었는데, 이는 모델링에 기인한 것이다. 또한 최대값 이후 줄어드는 것은 계면 전단균열이 길어짐에 따라 균열선단에서의 전단응력이 작아지는 것을 의미한다. 보의 중앙에 존재하는 휨 균열에서 매우 짧은 계면 전단 균열이 발생하였을 경우에 최대 에너지해방률( $G_{max}$ )이 발생하게 되며, 본 연구에서 적용된 보강시험체의 해석결과 임계 전단 균열은 약 18mm 인 것으로 나타났다.

또한 접착제의 두께가 증가함에 따라  $G$ 값은 줄어드는 경향을 보였으나, 그 차이는 크지 않았다.  $G$ 값은 접착두께에 민감하게 변화되지 않았으므로 접착두께는 계면박리에 중요한 변수가 아닌 것으로 나타났다. 따라서  $G$ 와 접착두께의 관계는 전반적인 구조물의 거동에 의존하며 계면 균열 선단의 조건에 의존하지 않는다.

설계 및 해석을 위하여 에너지해방율을 무차원화시키는 것이 도움이 된다. 따라서 지간 중앙에 집중하중  $2P$ 를 받는 경우, 식 7을 무차원으로 만들면 식 8과 같이 된다. 본 연구에서는 식 8에 따라 해석된 에너지해방율을 임계 계면 전단 균열 길이( $l$ )를 유효높이( $d$ )로 가정하여 그림 8과 같이 무차원화 시켰다.

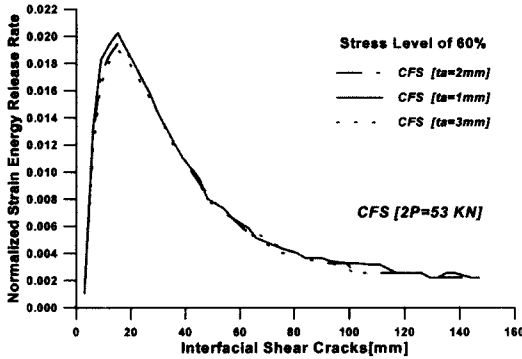


Fig. 8 Variation of normalized strain energy release rate with adhesive thickness

$$\text{normalized } G = \frac{Bl}{Pu_0} G = \alpha G \quad (8)$$

여기서,  $\alpha = \frac{Bl}{Pu_0}$   
 $u_0 = \frac{(2P)L^3}{48(E_c I_e)}$  로서 하중 ( $2P$ )에 대한 처짐

여기서 탄소섬유쉬트에 대한  $\alpha$ 는 0.05285로 나타났다. 따라서 임의 단면 및 지간을 가진 보강 구조체에 대한 설계 및 해석을 수행할 수 있게 된다.

### 3.3 계면박리 강도

보강단면의 파괴해석의 목적은 임의 사용하중 조건에서 안전성을 확보하기 위한 것이다. 파괴해석은 먼저 안전성을 확보하기 위하여 임의 하중에서 보강 파괴되기 전까지 허용할 수 있는 계면 균열의 길이, 즉 임계 균열길이  $a_{cr}$ 를 결정하고, 구조물 내에 임의 길이의 계면 균열이 존재하고 있다고 가정한 후 구조물의 안전을 검토하게 된다. 최대하중의 60%인 사용하중을 적용하여 해석한 결과, 그림 9로부터 탄소섬유쉬트 보강에 따른 무차원화된 최대 에너지해방율은 각각 다음과 같다.

탄소섬유쉬트: Normalized  $G = 0.0203$

식 8로부터 탄소섬유쉬트 보강시험체의 계면박리 강도를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Normalized } G &= 0.0203 = \frac{Bl}{Pu_0} G \\ &= \frac{(0.13m)(0.22m)}{P(2P)(2m)^3} G \quad (9) \\ &= \frac{0.0286}{48 \times 1.76 \text{ MN} \cdot m^2} G \end{aligned}$$

$$G = 33.6 \times 10^{-9} (2P)^2 \quad (10)$$

계면박리 모드의 조건은  $G \geq G_C$ 로서, 식 10의 에너지해방율이 임계 에너지해방율( $G_C$ )과 같을 때이며, 혼합모드에서 임계 에너지해방율은  $G_C = G_{IC} + G_{IIC}$ 로서 인장모드와 전단모드의 합이다. 계면박리 강도( $P_{sep}$ )를 구하기 위하여서는 에폭시 접착제/보강재 계면에서의 임계 에너지해방율을 실험적으로 구해야 한다. 본 연구에서는 문헌고찰로부터 두 종류의 에폭시 접착제의 접착계면에 대한 실험결과를 참고하였으며, 인장모드인 mode I의 임계 에너지해방율은 각각  $200 \text{ J/m}^2$ 와  $500 \text{ J/m}^2$ 이다<sup>(5)</sup>. Mode II는 계면 균열 선단에서 순수 전단조건으로부터 실험적

으로 얻어야 하므로  $G_{IIC}$ 를 얻는 것은 어려우므로  $G_{IC}$ 만을 고려하였다. 위의 참고문헌으로부터 획득된 계면에서의 임계 에너지해방율인  $200 J/m^2 \sim 500 J/m^2$  범위에서 계면박리 강도를 식 10에 적용하여 구하면 표 3과 같다.

탄소섬유쉬트의 파괴모드를 규명하기 위하여 주어진 보강재료에 따른 단면의 휨 강도( $P_n$ ) 및 단부파괴박리 강도( $P_{rip-off}$ )를 각각 구하여 정리하면 표 4와 같으며, 수록된 단부파괴박리 강도는 수정된 Roberts식으로 계산하였다<sup>(2)</sup>.

Table 3 The interface debonding strength

(단위: KN)				
$G_{IC}$	500	400	300	200
보강재료	$J/m^2$	$J/m^2$	$J/m^2$	$J/m^2$
CFS	122.0	109.1	94.5	77.2

표 4에서 괄호안의 수자는 강도비로서 계면박리 강도( $P_{sep.}$ ) 및 단부파괴박리 강도( $P_{rip-off}$ )를 휨 강도( $P_n$ )로 무차원화한 값이다. 탄소섬유쉬트 보강시험체의 단부파괴박리의 강도비는 2.65배로서 계면박리의 강도비인 0.88~1.39보다 상당히 크기 때문에 단부에서 보강재가 박리되지 않고 부재 내부로부터 계면박리가 발생되어 파괴될 것으로 해석이 되었으며, 이는 실제 실험결과와 같은 양상이다. 따라서 탄소섬유쉬트로 구조물을 보강할 경우 계면박리 강도를 휨 강도보다 크

게 함으로써 갑작스런 파괴를 방지해야 하며, 보강구조물의 허용하중은 식 11과 같이 제한되어야 한다.

$$P_{allow} = \min. of \left\{ \begin{matrix} P_{sep.} \\ or \\ P_n \end{matrix} \right. \quad (11)$$

#### 4. 결론

탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트보의 계면박리 모드 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 손상된 보강보에 대한 파괴 해석결과, 최대 에너지해방율은 변수에 관계없이 최외단 휨 균열 근처에서 초기에 발생하였고, 본 연구에서 적용된 접착두께 1mm~3mm는 에너지해방율에 거의 영향을 미치지 않아 계면박리의 주요 인자가 아닌 것으로 나타났다.
- 2) 적용된 에폭시 접착제에 대한 강도 해석결과, 전지간으로 보강된 탄소섬유쉬트 보강시험체는 단부박리나 휨 파괴보다 계면박리에 대한 안전여유가 부족한 것으로 나타났다. 일반적으로 피로하중을 받을 경우 접착제의 강도는 저하되므로 계면박리를 방지하기 위하여 높은 임계 에너지해방율의 접착제를 사용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구에서 적용된 컴플라이언스 방법과 엄밀한 유한요소법은 탄소섬유쉬트로 보강된 보

Table 4 Analytical results of the strengthened RC beams

(단위 : KN)

강도	$P_{sep.}$ $G_{IC} (J/m^2)$				$P_{rip-off}$	$P_n$
	500	400	300	200		
보강재료					수정된 Roberts식	USD
CFS	122.0 (1.39)	109.1 (1.25)	94.5 (1.08)		231.5 (2.65)	87.3 (1.0)

여기서, ( )는 강도비로서 ( $P_{sep}$  또는  $P_{rip-off}$ ) /  $P_n$  ; ■는 계면박리에 의한 부재 파괴



시험체의 계면파괴 거동을 해석하는데 적합한 방법인 것으로 사료되며, 부분적으로 계면균열이 발생된 보의 계면파괴 거동은 접착제의 파괴인성, 휨 균열의 개수, 계면 전단균열의 위치, 하중의 종류 및 위치 그리고 보강재료 등 상당히 많은 인자에 영향을 받으므로, 현재까지 이들 인자들 모두에 대한 정량적인 평가는 어려운 실정이며 이에 대한 연구가 요망된다.

### 참고문헌

1. 심종성, 배인환, 박성재, "손상된 R/C보의 보강후 피로거동에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, 제16권 제1~2호, 1996. 3, pp. 135~142
2. 심종성, 배인환, "강판 및 탄소섬유로 보강된 철근콘크리트보에 대한 해석적연구", 콘크리트학회지, 제9권6호, 1997.12, pp.129~137
3. 심종성, 배인환, 장상훈, "강판 및 탄소섬유 Sheet로 보강된 철근콘크리트보의 피로 해석", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제9권2호(통권 제17집), 1997. 11, pp. 703~708
4. 오병환, 강동욱, 조재열, "강판휨보강된 철근콘크리트보의 파괴기구 및 박리하중산정이론연구", 한국콘크리트학회지, 제9권6호, 1997. 12, pp. 243~254
5. Anandarajah,A.,and Vardy,A.E., "A theoretical investigation of failure of open sandwich beams due to interfacial shear failure", The Structural Engineering, Vol.63B, No.4, Dec. 1985, pp.85~92
6. Haji-Kazemi H., and Roberts T.M., "Theoretical Study of the Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates", The Structural Engineering Group, Part 2, 87, March 1989, pp. 39~55
7. Hamoush,S.A.,and Ahmad,S.H.. "Debonding of Steel Plate-Strengthened Concrete Beams." J. of Structural Engineering. Vol.116, No.2, Feb., 1990, pp. 356~371
8. Irwin,C.A.K.. "The strengthening of concrete beams by bonded steel plates",TRRL Report, 160 UC,1975
9. Jones R., Swamy R.N., and Charif A., "Plate separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-bonded Steel Plates", The Structural Engineer, Vol. 67, No. 12, 21 June 1988, pp. 187~194
10. MacDonald,M.D.,and Calder,A.J.J., "Bonded steel plateing for stregthening concrete structures," Int. J. Adhes. Adhes., 2(2), 1982, pp.119~127
11. Marco,Arduini, Angelo,Di Tommaso,and Antonio Nanni,"Brittle Failure in FRP Plate and Sheet Bonded Beams",ACI Struc. J., Vol.94, No.4, July-Aug.,1997, pp.363~370
12. Roberts T.M., "Aproximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams", The Stuctural Engineer, Vol. 67, No. 12, 20 June 1989, pp. 229~233
13. Swamy R.N., Jones R., & Charif A., "The Effect of External Plate Reinforcement on the Strengthening of Structurally Damaged RC Beam", The Structural Engineer, Vol. 67, No. 3, 7 February 1989, pp. 45~54
14. Urs Meir and Hanspeter Kaiser, "Strengthening of Structures with CFRP Laminates," ASCE, Advanced Composites Materials, 1991, pp.224~232

## 요 약

본 연구의 목적은 탄소섬유쉬트로 보강된 시험체의 주요 파괴모드인 계면박리 모드에 의한 부재의 파괴를 규명하는 것이다. 탄소섬유쉬트로 보강된 손상된 보시험체의 계면박리 모드를 해석하기 위하여 선형탄성파괴역학(LEFM)의 콤플라이언스법과 유한요소법을 사용하여 계면파괴 역학변수인 에너지해방율(strain energy release rate,  $G$ )을 고찰하였다.

손상된 단순 보시험체의 해석결과, 최대 에너지해방율( $G_{max}$ )은 에폭시 접착두께에 관계없이 바깥 휩 균열에서 시작된 계면 전단 균열 길이가 18mm 부근에서 발생하였다. 보강보의 강도 해석결과, 극한강도 설계법에 따른 단면의 공칭 휩 강도에 대한 계면박리 강도의 비인 안전여유는 불충분한 것으로 해석되어, 단면의 휩 공칭강도를 발휘하기 전에 계면박리에 의해 부재가 파괴되는 것으로 해석되었다. 또한 적용된 접착두께 1mm~3mm는 에너지해방율에 거의 영향을 미치지 않아 계면박리의 주요 인자가 아닌 것으로 나타났다.

(접수일자: 1998. 11. 11)