

# 탄소섬유시트 보강 철근콘크리트보의 계면박리에 관한 연구

## Interface Debonding of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Carbon Fiber Sheets

박주현\*      이우철\*\*      정진환\*\*\*      조백순\*\*\*\*  
Park, Ju Hyun    Lee, Woo Cheol    Cheung, Jin Hwan    Cho, Baik Soon

### ABSTRACT

The strengthening method with CFS(Carbon Fiber Sheet) to reinforced concrete structures has a fatal defect. Strengthened beams have been almost failed far below their ultimate strength due to interface debonding failure between the surface of concrete and CFS.

The purpose of this study is to investigate the failure mechanism and failure behavior of strengthened RC beam using CFS.

### 1. 서론

철근콘크리트 구조물은 건설당시의 시공적 요인과 시간의 경과에 따른 노후화, 사회적·경제적 환경의 변화, 부적절한 유지관리 등으로 인하여 구조내력이 저하되어 구조물의 안전성에 많은 문제점을 야기시킨다. 이에 대한 대책으로, 내력증진이 요구되는 철근콘크리트 구조물에 대한 효과적인 보강공법이 사용되고 있다. 그 중 CFS 보강공법은 역학적, 내구적으로 많은 장점을 가지고 있지만, 불충분한 합성거동으로 인하여, 보강된 CFS가 콘크리트 모체로부터 박리됨으로써, 보강효과를 상실하는 문제점도 가지고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해, 보강이 필요한 구간 외측으로 20cm를 추가적으로 보강하여 CFS가 정착되도록<sup>1)</sup> 시공하고 있지만, 그럼에도 불구하고 여러 실험결과<sup>2)</sup>는 CFS의 부착파괴(계면박리파괴)가 계속해서 발생하는 것을 보여주고 있다. 한 예로 김희규 등(1997)<sup>2)</sup>에 의하면, CFS(폭:20cm, 두께:0.0165cm)로 보강된 보(단면치수: 20cm(B)×30cm(H), 인장철근:2-D13)의 예상 최대하중은 6.2tonf이지만, 실험에서는 최대하중이 5.4tonf

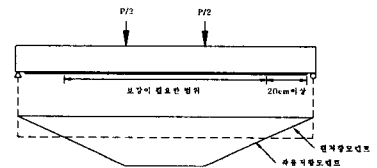


그림 1. CFS의 정착길이

\* 정회원 · 부산대학교 토목공학과 · 석사과정  
\*\* 정회원 · 부산대학교 토목공학과 · 박사수료  
\*\*\* 정회원 · 부산대학교 토목공학과 교수  
\*\*\*\* 정회원 · 인제대학교 토목공학과 조교수

이었다. 이는 보강범위 외측으로 20cm이상의 정착길이를 보유하고 있음에도 불구하고, 섬유가 탈락하여 예상 최대하중에 도달하지 못하고 파괴된 결과를 보여주고 있다. 그리고, 기존의 섬유시트 보강보의 실험데이터를 조사해본 결과, 보강보 163개 중 101개가 섬유의 탈락에 의해 파괴된 것으로 나타나고 있어, 섬유시트 부착에 앞서 계면박리파괴에 관한 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 CFS로 휨보강한 철근콘크리트보에 발생하는 계면박리파괴의 원인을 규명하고, 기존의 정착개념을 적용한 시공방법의 사용 여부를 검토하고자 한다.

## 2. 보강된 섬유시트의 계면박리파괴에 관한 원인분석

조영홍 등(2000)<sup>3)</sup>에 의하면, 그림 2와 같은 실험체를 가지고 부착강도시험을 한 결과 각 위치에서의 변형률이 그림 3과 같이 나타났다. 전체길이 변화에 대한 변형률 분포를 살펴보면, 부착된 섬유에 인장력이 전체적으로 작용하는 것이 아니라, 국부적으로 작용하는 것으로 판단된다. 인장력을 받으면 그림 2의 5번 위치에서만 섬유의 변형률이 증가하여 응력이 발생하고, 그 값이 부착응력보다 커지면, 섬유는 탈락하게 된다. 4번 위치에서의 섬유는 5번 위치의 섬유가 탈락한 뒤에 인장력을 받기 시작하여 변형률이 증가하게 된다. 이 과정이 단계별로 진행되어 섬유가 완전히 탈락하게 된다.

이 실험결과를 토대로, 섬유시트 보강보의 휨실험에서 섬유의 탈락에 의해 발생하는 계면박리파괴를 3단계로 구분하여 설명할 수 있다.

I 단계는 균열부의 섬유가 콘크리트로부터 분리되는 단계로, 휨실험에서 휨모멘트가 균열모멘트  $M_{cr}$ 에 도달되면, 그림 4(a)와 같이 섬유의 변형률과 인장축 콘크리트의 변형률은 콘크리트의 인장파괴 변형률  $\epsilon_r$ 과 같고, 인장축 콘크리트에는 균열이 발생한다.

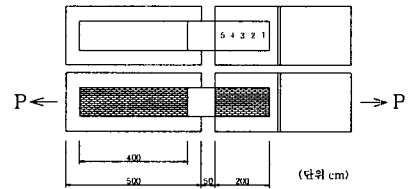


그림 2. 실험체의 모양과 gage 부착위치

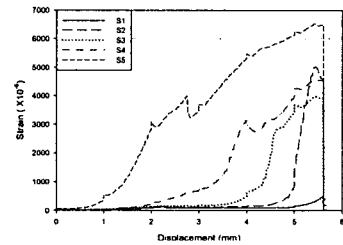


그림 3. 각 위치의 변형률

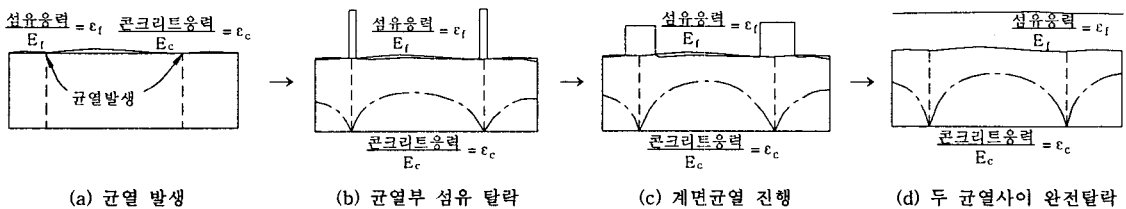


그림 4. 계면박리의 진행에 따른 변형률상태

II 단계는 균열부 섬유의 응력집중에 의한 계면균열이 발생하는 단계로, 균열부의 섬유에 응력집중 현상이 발생하기 때문에, 그림 4(b)와 같이 섬유의 변형률이 급격히 증가하여 섬유와 콘크리트의 변형

를 차이가 커지게 된다. 이 차이로 인해 발생하는 응력이 에폭시의 부착응력보다 커지면 섬유가 콘크리트에서 탈락되어, 두 재료 사이에 계면균열이 발생한다. 그리고, 계면균열이 발생된 부분의 섬유는 그림 4(c),(d)와 같이 평균변형률을 가지게 된다. 변형률 상태에 따른 섬유와 콘크리트의 부착상태를 그림 5에 나타내었다.

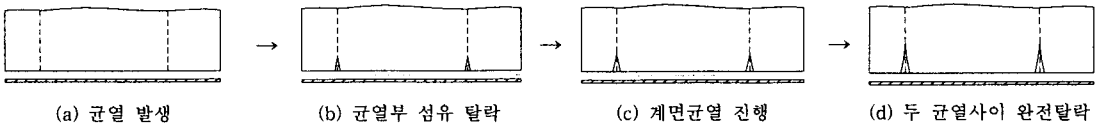


그림 5. 계면바리의 진행에 따른 부착상태

Ⅲ단계는 섬유가 최종탈락되는 단계로, 계면균열이 휨균열을 기준으로 좌우 양쪽으로 진행되어, 인접한 휨균열에서 진행된 계면균열과 만나게 되면, 두 휨균열 사이의 섬유시트가 콘크리트로부터 분리되기 때문에, 최종적으로 균열발생이 없는 보의 단부만 부착상태를 유지하게 된다(그림6 참고). 하중에 의한 단부의 섬유변형률은 극히 작지만, 계면바리가 진행되면서 보의 중앙부와 단부의 섬유가 평균변형률을 가지게 되어, 상대적으로 단부의 섬유변형률이 증가하게 된다. 결국, 섬유와 콘크리트의 변형률 차이에 의해 발생하는 응력  $(\bar{\epsilon}_f - \epsilon'_f)G$ 이 에폭시의 부착응력보다 커지면, 섬유 전체가 탈락하게 된다(여기서,  $\epsilon'_f$ 는 균열발생 후 콘크리트의 인장변형률). 보강길이가 비교적 짧아 섬유의 끝단에서 휨균열이 발생하는 경우에는 균열 사이의 탈락 메카니즘인 단계Ⅱ에서 섬유가 완전히 탈락된다.

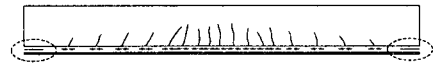


그림 6. 단계Ⅱ 이후의 섬유의 부착상태

### 3. 해석결과

Ⅲ단계에서 섬유와 콘크리트의 변형률 차이에 의해 발생하는 응력을 부착응력과 비교함으로써, 계면바리파괴 발생시 하중을 계산할 수 있다. 하지만, CFS의 부착응력이  $9.68\text{kgf/cm}^2 \sim 47.72\text{kgf/cm}^2$ 으로<sup>4)</sup> 광범위하여, 부착응력에 따른 최대하중을 계산할 수 없었다. 따라서, 본 논문에서는 계면바리파괴가 발생한 실험자료를 이용하여, 최대하중에 대한 CFS의 부착응력을 계산하였다.

계산과정에서 콘크리트의 인장변형률을 고려해야 한다. 조백순 등(2002)<sup>5)</sup>에 의하면 콘크리트 하단의 평균 인장응력을  $0\%f_r$ ,  $10\%f_r$ ,  $20\%f_r$ 로 가정하여 휨해석한 결과,  $10\%f_r$ 로 가정한 해석값이 실험값과 가장 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다. 따라서, 본 논문에서는  $\epsilon'_f = 10\%\epsilon_r$ 로 가정하였다.

식  $M = T_{c1} \left( \frac{2\epsilon_f}{3\epsilon_c} + 1 - \beta \right) c + T_{c2} \left[ c - \beta c + \frac{\epsilon_f}{\epsilon_c} c + \beta \left( h - \left( 1 + \frac{\epsilon_f}{\epsilon_c} \right) c \right) \right] + T_s(d - \beta c) + T_f(h - \beta c)$ 를 이용하여 최대하중이 재하되는 상태의 섬유의 변형률을 산출하고, 산출된 변형률을 평균하여  $\bar{\epsilon}_f$ 를 계산하였다. 그리고 에폭시의 전단탄성계수  $G$ 를  $(\bar{\epsilon}_f - 10\%\epsilon_r)G$ 에 대입하여, 단부의 섬유와 콘크리트 계면에 발생하는 응력을 계산하였다(표 2 참고).

표 2. 최대하중에 따른 부착응력

	실험체명	최대하중(tonf)		부착응력 ( kgf/cm <sup>2</sup> )
		실험값	해석값	
김지영 등(1998) <sup>9)</sup>	BCFCB	32.47	34.29	39.89
송성용 등(1988) <sup>1)</sup>	BC2a	9.59	10.03	61.79
김규선 등(1999) <sup>8)</sup>	CP10-N5	10.15	11.48	38.22
	CP10-N10	13.3	13.78	42.59
김정섭 등(1999) <sup>9)</sup>	CF2	12.89	13.43	39.48

#### 4. 결론

본 연구는 CFS로 보강된 RC보에서 발생하는 계면박리파괴에 관한 해석으로, 기존의 정착개념을 적용한 시공방법의 사용 여부를 검토하였다. 본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) CFS로 휨보강한 보에서 섬유와 콘크리트의 변형률 차이에 의해 계면박리파괴가 발생하기 때문에, 20cm이상으로 정착길이를 확보하더라도 계면박리파괴는 발생할 것으로 판단된다.
- 2) 계산된 부착응력의 대부분이 국내에서 조사된 범위 9.68kgf/cm<sup>2</sup> ~ 47.72 kgf/cm<sup>2</sup> 안에 드는 것으로 나타났으며, CFS의 정확한 부착응력을 구할 수 있다면, 계면박리파괴가 발생될 때의 하중을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.
- 4) CFS로 휨보강한 보의 계면박리파괴를 방지하기 위해, 정착장치가 필요한 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. (주)대우건설기술연구소, “한국카본 탄소섬유슈트 보강보의 성능평가실험”, 1997년도 11월.
2. 김희규, 신영수, 최완철, 홍기섭, 홍영균, “유리섬유와 탄소섬유로 보강한 합성보의 실험 및 비교분석 연구”, 대한건축학회 1997년도 가을 학술발표회 논문집.
3. 조영홍, 이우철, 김동환, 김성도, 정진환, “탄소섬유 보강부재의 단부탈락 방지 방안에 관한 실험”, 한국콘크리트학회 2000년도 가을 학술발표회 논문집.
4. 정우태, 박종섭, 유영준, 박홍석, “콘크리트와 탄소섬유슈트의 부착파괴 거동에 관한 실험적 연구”, 한국구조물진단학회 2001년도 가을 학술발표회 논문집.
5. 조백순, 정진환, 김성도, 박대효, 이우철, “강도설계법으로 산정된 탄소섬유시트 보강 철근콘크리트 보의 공칭 휨모멘트”, 한국콘크리트학회 2002년도 가을학술발표회 논문집.
6. 김지영, 박형철, 김대영, 황진석, 박칠림, “탄소섬유슈트로 보강된 철근콘크리트보의 휨거동에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 1998년도 1월.
7. 송성용, 나정민, 이용택, 이리형, “탄소섬유시트로 보강한 철근콘크리트 보의 휨거동에 관한 실험연구”, 대한건축학회 1998년도 가을학술발표회 논문집.
8. 김규선, 심종성, “보강판으로 성능개선된 RC보의 조기파괴거동”, 대한토목학회논문집 1999년도 7월
9. 김정섭, 김하진, 강연구, 조철희, “탄소섬유판으로 휨보강된 철근콘크리트 보의 구조성능평가에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회논문집 1999년도 5월.