

# 사전균열로 손상된 RC 보의 탄소섬유시트 보수 후의 균열성장 및 박락거동

## Crack Growth and Debonding Behaviors of the Pre-cracked RC Beams Repaired with Carbon Fiber Sheets

김 충 호\*      고 신 응\*\*  
Kim, Chung Ho   Ko, Sin Woong

### Abstract

This study look into the mechanisms of growth and magnification of the cracks and delamination in the pre-cracked RC beams repaired with carbon fiber sheets. The experimental parameters were loading type, loading speed and crack. In the experiments, it was confirmed that a failure of beams began with development and propagation of the stepped delamination in the below the loading point due to the rapid change of shear force, but mechanisms of the failure were not influenced with loading type, loading speed and pre-cracks. Particularly, in the case of beams having the pre-cracks, growth of crack concentrated at the special crack below the loading point and led to failure of the beam by delamination due to magnification of crack.

### 요 지

본 연구는 균열이 발생한 R/C보를 탄소섬유시트(Carbon fiber sheet)로 보수했을 경우 시트의 박락과 균열의 확대 및 성장 메커니즘을 조사한 것이다. 실험변수는 하중형식, 재하속도, 사전균열 유무 등이다. 실험에서, 보의 파괴는 전단력 급변에 의한 재하점 직하부의 단차박리의 발전과 전파로 시작됨이 확인되었지만, 파괴기구는 하중형식, 재하속도, 사전균열 유무 등에 영향을 받지 않았다. 특히, 사전균열을 갖는 보의 경우, 균열의 성장은 재하점 직하의 특정한 균열에 집중되고, 이 균열의 확장에 의한 탈착이 보의 파괴를 이끌었다.

**Keywords** : Pre-Crack, Mechanism of the failure, Stepped delamination, Loading speed,

**핵심 용어** : 사전균열, 파괴기구, 단차박리, 재하속도

\* 경성대학교 건설환경공학부 교수, 공학박사

\*\* 경성대학교 토목공학과 대학원 석사과정

E-mail : chkim@ks.ac.kr 051-620-4751

•본 논문에 대한 토의를 2006년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 2007년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

탄소섬유시트(Carbon Fiber Sheet: CFS)로 보수 또는 보강된 보가 CFS의 파단변형률에 도달하기 전에 CFS 박리에 의해 보수효과 또는 보강능력을 상실하여 파괴되는 것은 널리 알려져 있다.<sup>(1),(6)</sup> 이러한 파괴 형태는 보수 및 보강보의 계산된 공칭강도보다 낮은 값에서 파괴됨을 의미하므로, 보수 및 보강보의 실제적인 파괴강도를 평가하기 위해서는 CFS 박락시의 균열발생, 균열성장과 분포 등을 파악하여 파괴기구를 설정하는 것이 필요하다. CFS의 박리 및 박락에 관한 연구는 많지만<sup>(3)-(5)</sup> 기존의 연구는 접착재료, 단부 정착형식, 부착 길이 등에 관한 것들이 주류를 이루고 있고, 보수된 보의 균열 발생, 성장, CFS의 박락거동 등의 상호관계에 의한 보수된 보의 거동 및 파괴기구를 실제 보의 재하상태와 유사한 반복하중 재하로서 조사한 연구는 적다.<sup>(2)</sup>

본 연구에서는 공용중인 실제의 보에서 발생하는 균열과 손상을 모사하기 위해서 항복강도의 70%에 대응하는 변위를 가하여 사전균열을 발생시켜 CFS로 보수한 후 재하속도를 달리하는 반복하중 재하시험을 수행하여 기존균열의 성장, 확대, 전파, CFS박락 등

의 상관관계와 파괴기구를 규명하였다. 또한 사전균열이 없는 보의 단조증가 재하실험을 수행하여 보수 전 균열유무의 영향과 반복하중과 단조증가하중간의 차별성도 조사하였다.

## 2. 보강보의 실험

### 2.1 실험보의 제작 및 재료특성

RC 실험보는 치수 2.4m× 0.15m× 0.25m의 직사각형 복철근 보로 제작되었다. 사인장파괴를 방지하기 위하여 전단력 작용구간은 0.1m, 휨 구간은 0.2m 간격으로 스티럽(D10)을 배치하였다. 구체적인 치수와 형상은 Fig. 1(a)과 같다. CFS는 보의 하측에 길이 1.9m 폭 0.13m로 섬유길이 방향과 보축을 일치시켜 2점으로 부착하였고, CFS와 콘크리트 모체간의 부착 성능을 확보하기 위하여 보의 단부에 폭 0.2m의 U-Jacket 형태로 보강하였다. 실험보의 CFS 부착형태는 Fig. 1(b)와 같다. 한편, 하중형태, 재하속도, 사전균열 유무에 따른 실험체의 명칭일람표는 Table 1과 같다.

콘크리트는 일반성을 확보하기 위해서 레미콘을 사

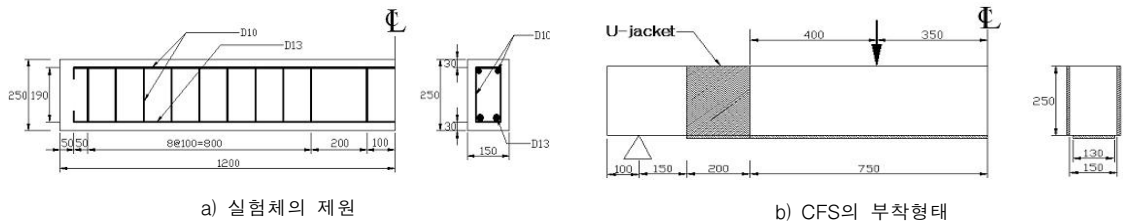


Fig. 1 보강보의 단면과 배근도 및 보강형태

Table 1 실험체 명칭 일람표

재하 형태	실험체명	재하속도 (mm/min)	사전균열	개수
단조 증가	SD02	2	무	2
	SD10	10	무	2
	SD20	20	무	1
반복 재하	RTS02	2	무	1
	RTC02	2	유	2
	RTC10	10	유	2
	RTC20	20	유	3

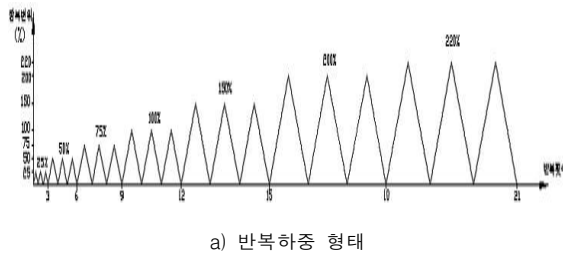
Table 2 실험보에 사용된 구성재료의 재료특성

구성재료	재료특성	
콘크리트	압축강도	25.69 MPa
	탄성계수	13.93×10 <sup>3</sup> MPa
철근 (D10,D13)	항복강도	343.23 MPa
	인장강도	3.48×10 <sup>3</sup> MPa
탄소섬유시트 (CF730)	탄성계수	23.04×10 <sup>4</sup> MPa
	파단변형률	0.021
	설계두께	0.167 mm

용하였고, CFS는 상품명 CF730을 사용하였다. 합침에 사용된 에폭시 수지의 인장전단 부착강도는  $11.38\text{ MPa}$ , 인장강도는  $51.19\text{ MPa}$  이었다. 실험보에 사용된 각종 재료의 특성을 정리하면 Table 2와 같다.

## 2.2 하중가력 및 측정

500 KN 용량의 가력기(MTS)를 사용하여 4점 휨 실험을 변위제어 방식으로 실시하였다. 재하속도(2, 10, 20 mm/min), 하중형태(단조증가재하, 반복하중재하), 사전균열 유무 등이 실험변수로 사용되었다. 반복하중 실험의 변위제어는 단조증가 재하 실험에서 획득한 항복하중에 대응하는 항복변위를 기준으로 하였다. 반복하중 재하는 Fig. 2(a)와 같이 항복변위의 25%, 50%, 75%, 100%, 150%, 200% 의 변위를 각각 3회씩 재하하고, 200% 이후에는 20%씩 증가하여 섬유시트의 박락으로 보가 파괴될 때까지 실험을 계속하였다.



a) 반복하중 형태

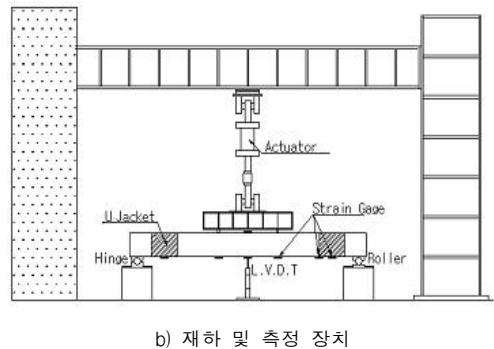
철근 변형을 게이지는 보 중앙부의 인장 및 압축철근, 콘크리트 게이지는 보의 중앙부 상부 콘크리트, 섬유시트 변형을 게이지는 가력점 직하와 U-Jacket의 하측에 설치하였다. 보의 중앙부 처짐은 LVDT를 사용하였다. 재하용 프레임 및 측정 장치의 배치는 Fig. 2(b)와 같다.

## 3. 시험결과 및 고찰

### 3.1 하중처짐 곡선

Table 3 과 Table 4는 단조증가 재하실험과 반복하중 재하실험 결과를 정리한 것이고, Fig. 3은 이들 실험에 대한 하중-처짐 관계를 그린 것이다.

Fig. 3에서 굵은 실선은 단조증가 재하실험을 나타낸다. 모든 보는 재하형태, 사전균열의 유무, 재하속도와 관계없이 최대하중까지는 균열과 항복이 분명한 RC보의 전형적인 3직선거동(trilinear behavior)을 하였다.



b) 재하 및 측정 장치

Fig. 2 하중재하방법(변위제어)및 실험설비

Table 3 단조증가하중 재하실험

공시체명	균열확대				탈락			
	하중 (KN)	$\delta$ (mm)	재하점 변형율 ( $\times 10^{-6}$ )	중앙부 변형율 ( $\times 10^{-6}$ )	하중 (KN)	$\delta$ (mm)	재하점 변형율 ( $\times 10^{-6}$ )	중앙부 변형율 ( $\times 10^{-6}$ )
SD02-1	92.5	18.8	1414	2602	92.5	18.8	1414	2602
SD02-2	77.6	11.2	4220	2472	82.4	16.8	4690	2774
SD10-1	80.8	11.6	4680	3379	89.6	15.8	5905	4546
SD10-2	75.6	11.8	2241	7549	79.4	14.4	2095	7804
SD20-1	77.7	11.8	1622	3409	80.7	14.6	1243	3648
RTS02	110	28.1	6557	10150	109.6	29.3	6689	10142

Table 4 반복하중 재하실험

공시체명	균열확대				탈착			
	하중 (KN)	$\delta$ (mm)	재하점 변형율 ( $\times 10^{-6}$ )	중양부 변형율 ( $\times 10^{-6}$ )	하중 (KN)	$\delta$ (mm)	재하점 변형율 ( $\times 10^{-6}$ )	중양부 변형율 ( $\times 10^{-6}$ )
RTC02-1	111.2	25.0	6344	5120	111.2	25.0	6344	5120
RTC02-2	104.6	20.6	9202	6250	108	24.8	10181	6574
RTC10-2	75.6	11.1	2460	2792	74.3	18.4	2308	2477
RTC10-3	98.3	21.1	4311	5290	98.3	21.1	4289	5290
RTC20-1	107.5	21.7	6086	8926	107.3	23.4	6086	8926
RTC20-2	105.9	22.6	6793	8398	104.5	22.4	6596	8137
RTC20-3	106.7	21.1	5101	11173	109.7	24.2	5330	12011

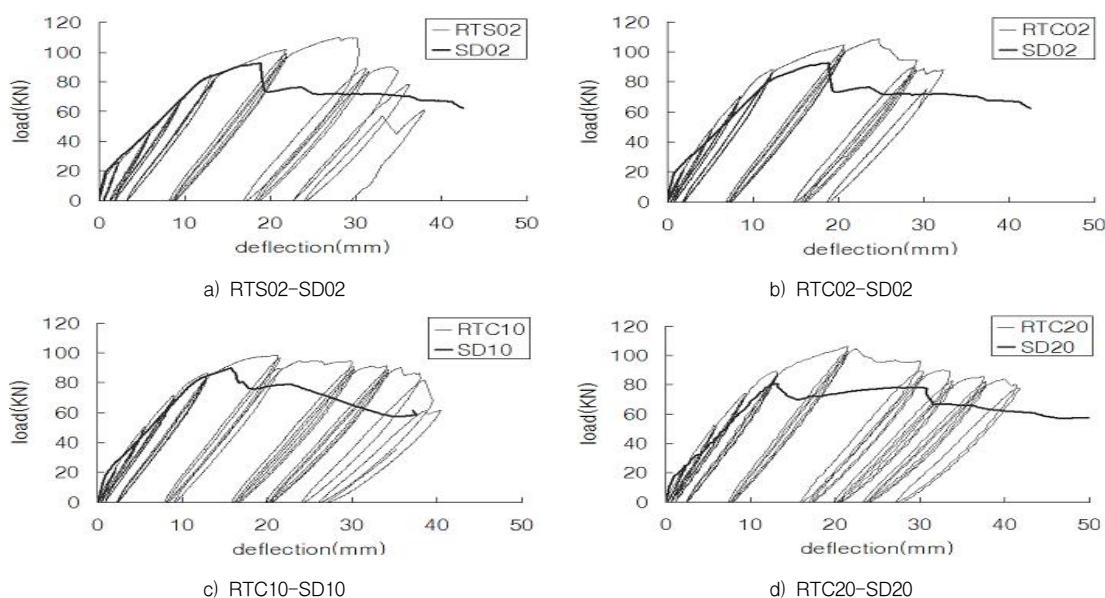


Fig. 3 하중-처짐곡선

균열의 확대와 박락이 시작되는 하중의 크기는 사전 균열의 유무와 무관하게 단조중가 재하실험의 경우보다 반복하중 재하실험의 결과가 크게 관측되었다. 이것은 낮은 하중(항복변위의 25%변위)에서 시작되는 반복재하가 특정부위의 응력집중을 분산시키는 효과 때문으로 생각된다.

사전균열이 없는 단조중가 재하실험에서, 실험보는 재하속도에 무관하게 균열확대 및 박락이 시작되는 강도와 중앙부 처짐은 거의 일정하였다. 따라서 단조중가 재하실험에서 재하속도는 실험보의 거동에 영향을 주지 못하는 것으로 판단 할 수 있다. 그러나 최대하

중 이후의 잔류강도는 균열이 없는 단조중가재하의 경우가 큰 것으로 관측되었다.

사전균열이 있는 반복하중 실험에서 큰 처짐의 발생은 항복변위의 75%에 해당하는 변위재하에서 시작되는 것을 알 수 있다. 즉, 사전균열을 발생시킨 하중의 크기와 같은 하중에서 사전균열이 열리기 시작하는 것을 의미하고, 균열보를 보수하였다더라도 최초균열을 발생시켰던 하중근처에서 보에 큰 변위가 발생하면서 박락이 시작함을 의미한다. 한편, 사전균열의 열림은 재하속도가 클수록 빠르고, 사전균열이 없는 보의 균열확대에 의한 박락은 최대하중 부근에서 시작되었다.

### 3.2 에너지 저장능력 저하곡선

Fig. 4는 재하 사이클에 대한 저장 에너지를 하중 단계별로 표시한 것이다. 에너지 저장능력의 저하는 첫 사이클에서 두 번째 사이클로 이행될 때 가장 크고 두 번째 사이클 이후의 저하량은 무시할 수 있을 정도로 작았다. 한편, 사전균열의 유무는 저장 에너지 저하 특성에 영향을 미치지 않았지만, 하중이 클수록 처음 두 사이클 간의 손실량이 큼을 확인할 수 있었다. 이것은 하중이 클수록 영구균열의 크기가 확대되면서 보의 에너지 저장능력이 현저히 떨어지기 때문이고, 균열발생에 의한 에너지 발산은 첫 사이클에서 대부분 일어남을 알 수 있다. 또한, 반복하중 실험에서 각 하중단계별 반복회수는 3회가 적절한 것으로 판단할 수 있다.

### 3.3 균열 발생과 성장

Fig. 5에서 좌측 스케치는 실험에서 관측된 균열을

그린 것이고, 우측의 사진은 균열확대와 단차에 의한 CFS의 박락양상을 나타낸 것이다. 반복하중 실험에서, a) RTS02 보의 경우 초기균열의 크기가 균일하게 발생한 후 최대하중 근처에서 재하점 직하의 특정한 균열이 성장하고 확대되는 반면, b) RTC02 보의 경우 균열은 일부의 사전균열로 집중되어 균열의 수는 작고, 사전균열을 발생시킨 하중근처에서 재하점 직하의 특정균열이 재하와 더불어 빠르게 성장하고 확대되었다. 재하속도가 빠를수록 균열성장속도도 빨랐다 ((b)(c)(d)). 두 경우에 보의 파괴에 영향을 미치는 균열의 발생위치와 전파양상은 같았지만, 균열선단에 발생하는 응력집중에 의한 균열폭의 크기와 진행속도는 사전균열의 영향을 크게 받는 것으로 생각된다.

한편, 사전균열이 없는 단조증가 재하의 경우, CFS 보강으로 인한 인장측 콘크리트와 CFS의 합성효과에 의한 인장강도 유지효과로 인하여 CFS 박락과 동시에 재하점 부근의 상부콘크리트의 압착파괴가 발생하는 것이 관측되었다.

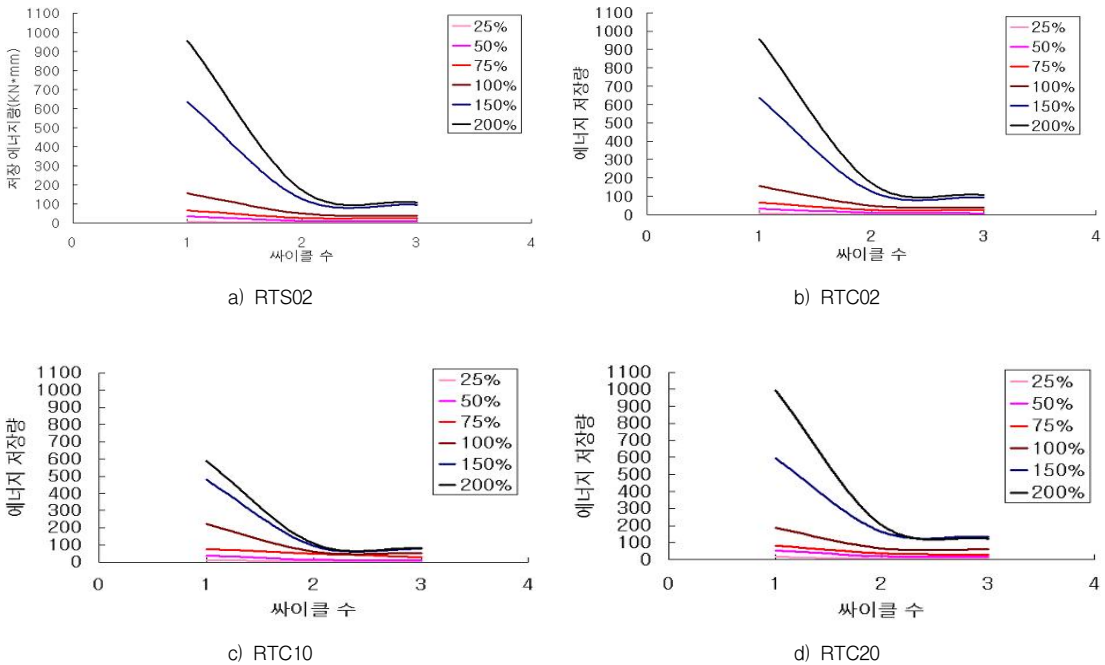


Fig. 4 에너지 저장능력 저하곡선

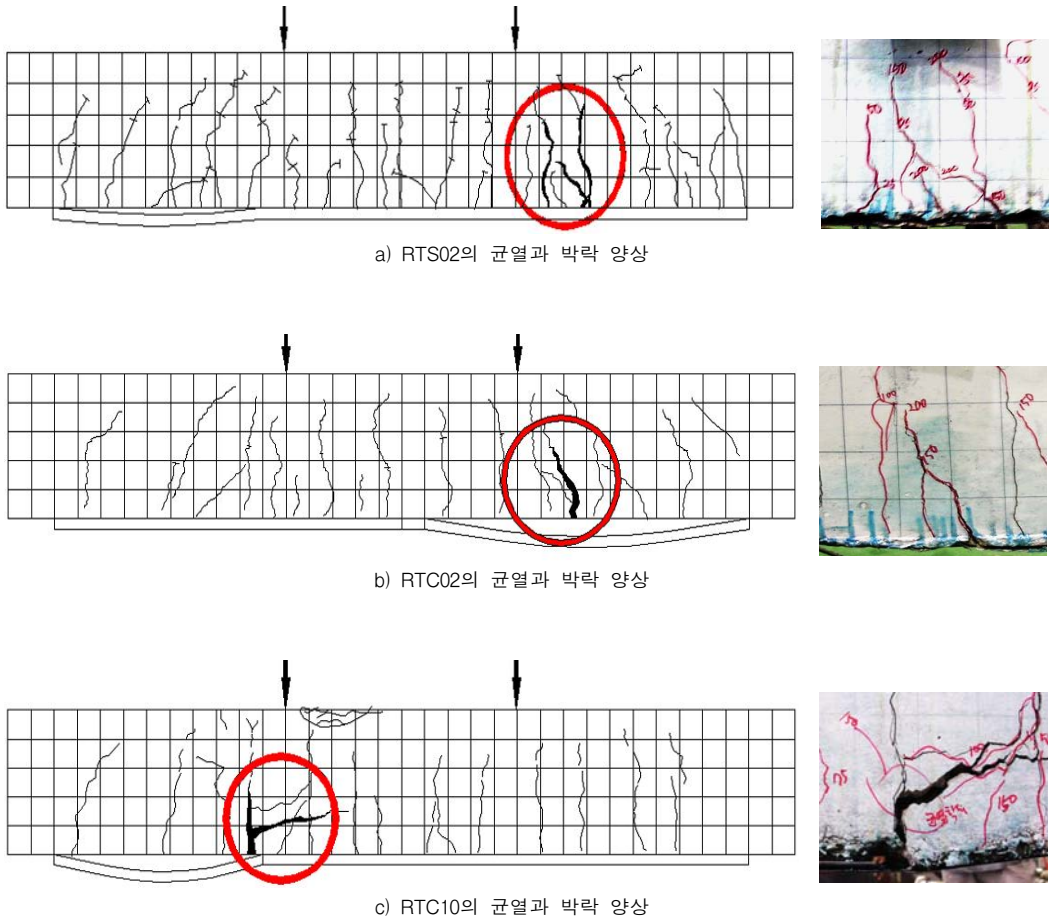
### 3.4 박리 전파와 파괴메커니즘의 고찰

Fig. 5(c)(d)와 3.3절에서 알 수 있듯이, 보수보의 균열 성장과 확대는 사전균열발생 하중근처에서 기존 균열들이 열리면서 시작하며, 보강보의 균열성장과 확대는 최대하중 근처에서 시작된다. 이들 균열 중에서 전단력이 급변하는 재하점 직하의 특징한 균열이 빠르게 성장하고 확대되면서 전단력에 의한 단차가 형성된다. 이 단차는 균열폭 만큼 분리된 CFS의 끝단을 콘크리트 모체로부터 박리시킨다. 이러한 박리는 하중의 증가와 더불어 확대되는 균열에 의하여 단부의 U-Jacket부로 급속히 전파되어 보가 파괴되는 직접적인 원인이 되는 것으로 관측되었다.

단순 지지되는 RC보의 인장파괴가 지간중양부의 소성힌지 발생에 의한 것임에 반해서, CFS 보강 및 보수보의 파괴는 재하점 직하의 단차균열에 의한 CFS의 박리 및 전파에 의한 것으로서 두 보의 파괴특성은 차이가 있음을 알 수 있다.

### 4. 결론

재하형태(단조증가하중, 반복하중), 재하속도(2mm/s., 10mm/s., 20mm/s.), 사전균열 유무 등의 실험변수를 갖는 CFS로 보수 및 보강된 RC보의 실험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.



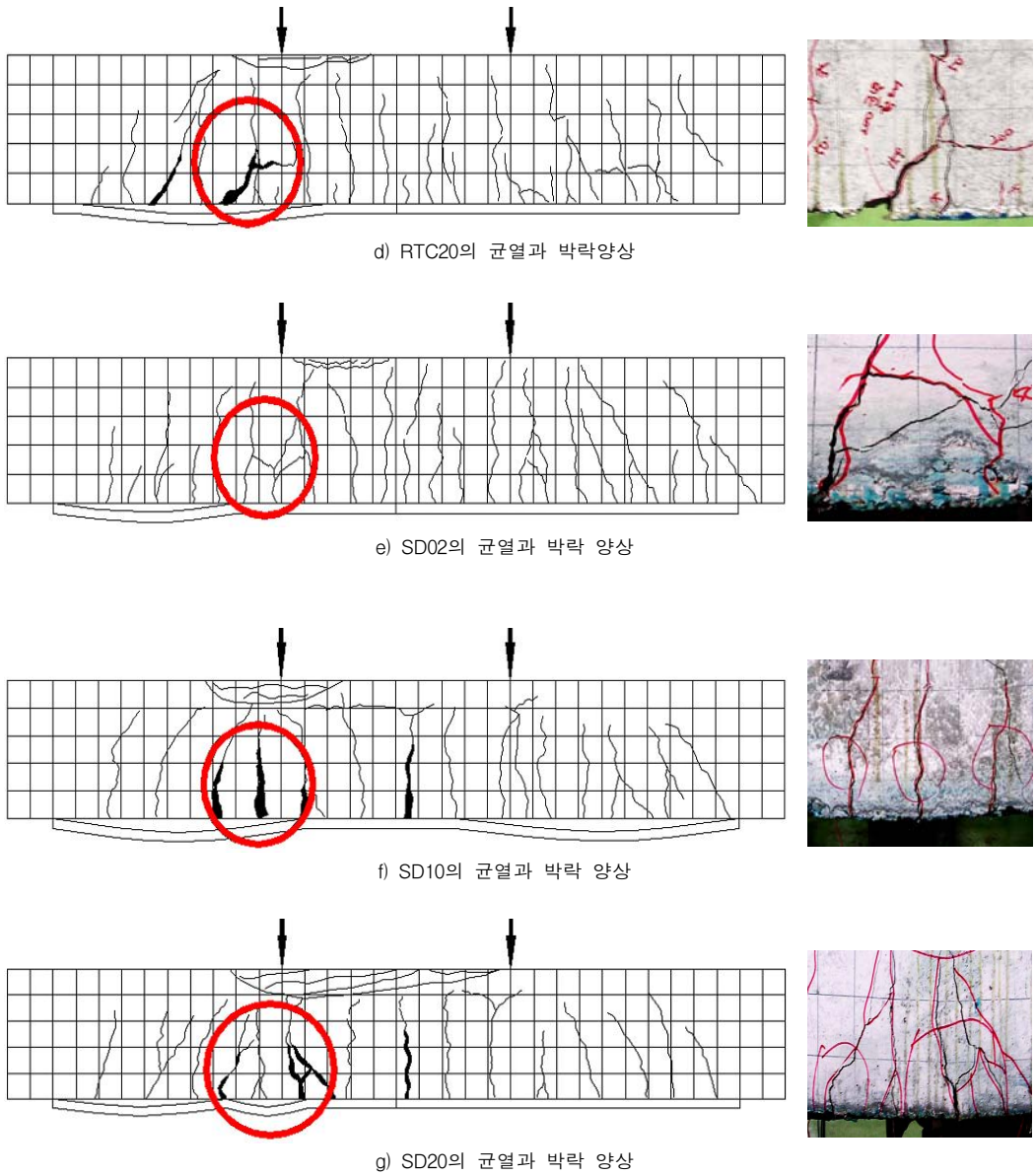


Fig. 5 시험체별 균열 및 박락 양상

1) 재하형태, 사전균열의 유무, 재하속도 등의 실험변수에 무관하게, 보의 파괴의 시작은 전단력이 급변하는 재하점 직하의 단차균열에 의한 CFS의 박리이고, 보의 파괴는 균열의 확대와 박리의 전파에 의한 CFS의 박락에 있음을 알 수 있었다. 실

험변수가 보의 파괴양상에 큰 영향을 미치지 못하는 것은 재하점 직하의 최대모멘트와 전단력 급변에 의한 단차발생에 이들이 영향을 미치지 못하기 때문이다. 한편, 단차균열에 의한 박리하중과 박락이 전파되면서 정착부 U-Jacket를 박락시키는 하

중과는 큰 차이가 없었다.

- 2) 반복하중 재하실험체의 균열확대 및 탈착에 대응하는 하중의 크기가 단조증가 재하실험체의 경우보다 컸다. 이것은 낮은 하중에서부터 시작되는 반복하중이 특정한 균열점으로 응력이 집중되는 것을 분산시키기 때문인 것으로 판단된다.
- 3) 반복하중 재하실험에서 보의 사전균열의 열림은 실제의 손상을 모의하기 위해서 발생시킨 사전균열 하중의 크기에서 시작되었고, 재하속도가 클수록 낮은 하중에서 균열의 열림이 시작되는 경향을 보였다.
- 4) 반복하중 재하실험에서, 사전균열이 없는 보강보의 균열은 미세균열이 균등하게 분산되어 발생하고 사전균열을 가진 보수보의 경우는 전단력 급변점인 재하점 직하에 있는 특정한 사전균열을 중심으로 균열이 집중되어 빠르게 성장하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 보수되는 보의 파괴는 보수 전에 발생된 균열의 성장과 확대에 의한 CFS의 박락에 의해서 발생할 것으로 예측할 수 있다.
- 5) 반복하중 실험에서 균열의 발생에 의한 보의 에너지 소산은 각 하중단계의 첫 사이클에서 대부분 발생하고 이후는 적으므로, 반복하중의 반복횟수는 3회가 적절함을 확인 할 수 있었다.
- 6) 단순지지된 RC보의 파괴는 지간중양부 인장철근의 항복에 의한 인장파괴인데 반해, CFS로 사전균열

이 보수된 보의 파괴는 집중하중을 받는 재하점 직하의 전단 단차균열에 의한 CFS의 박락과 박락에 의한 파괴로서 두 보의 파괴메커니즘에 차이가 있다.

#### 참고문헌

1. 유영찬 외 4명, "탄소섬유쉬트와 콘크리트의 부착강도 실험연구", 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 13, No.2, pp 168-174, 2001.
2. 김충호, 장종완, "반복하중을 받는 CFS로 보강된 R/C 보의 휨강성 평가", 한국구조물 진단학회 논문집, 8권,2호, pp.231-238, 2004.
3. 박칠림 외 3명, "탄소 섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트보의 부착파괴거동에 관한 실험적 연구", 콘크리트학회지 제9권 6호 pp157~164, 1997.
4. 정진환 외 3명, "탄소섬유시트로 보강된 RC 보의 공칭휨모멘트 실험적연구-1", 대한토목학회 논문집, 23권, 5A호, pp. 921-929, 2003.
5. 이우철, "탄소섬유시트로 보강된 RC 보의 휨거동 특성에 관한 연구", 부산대학교 대학원 박사학위 논문, 2005.
6. chajes, M. J., Finch, W.W., Januszka, T.F., & Thomson, T. A., "Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to concrete", ACI Structural Journal, Vol. 93, No. 2, pp.208~217, March~April, 1996.

(접수일자 : 2005년 12월 29일)