

# CFS로 보강된 RC보의 가력상태에 따른 휨파괴 거동

Flexural Failure Behaviour of RC Beams Strengthened  
by CFS according to Loading Condition

박 성 수\*                      조 수 제\*\*  
Park, Sung-Soo                Cho, Su-Je

## Abstract

The purpose of this research are to investigate experimentally flexural strengthening effects and flexural behaviour of RC beams strengthened by carbon fiber sheet(CFS) with/without superimposed pre-load. Test parameters of experiment are tension reinforcement ratio(0.85, 1.32, 1.91%) and pre-load(80% of yield capacity of unstrengthened beams). The structural behaviour of strengthened beams are compared with in terms of yield load and ultimate load, load-deflection relation, ductility, strengthened efficiency. From the test results, it were shown that ultimate capacity and flexural failure behaviour of RC beams strengthened by CFS changed by initial stresses between original beams and bonded CFS.

## 요 지

본 연구의 목적은 탄소섬유시트(CFS)로 보강된 RC보의 보강시 상재하중의 유무에 따른 보강효과와 휨거동을 실험적으로 고찰하는 것이다. 실험변수는 인장철근비(0.85, 1.32, 1.91%)와 상재하중(무보강보의 항복내력의 80%)으로 한다. 보강보의 구조적 거동을 항복하중과 극한하중, 하중-중앙부 처짐 관계, 연성, 보강 효과의 향으로 비교하였다. 실험결과로부터, CFS로 보강된 RC보의 극한 내력과 휨파괴거동이 원부재와 부착된 CFS 간의 초기응력에 의해 변화하는 것으로 나타났다.

**Keywords** : carbon fiber sheet, flexural strengthening effects, flexural failure behaviour, initial stresses

**핵심 용어** : 탄소섬유시트, 휨보강효과, 휨파괴거동, 초기응력

\* 정희원, 부산대학교 건축공학과 교수, 공학박사  
\*\* 정희원, 부산대학교 건축공학과, 공학박사

E-mail : drjosuje@hanmail.net 051-510-2360

•본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

철근콘크리트 구조물은 시공 중의 설계 변경, 시공상의 불량, 완공 후의 용도 변경, 환경의 변화, 재료의 노후화 등 설계시 반영하기 어려운 원인으로 내구성이 저하되는 경우가 많이 발생한다. 특히 최근에는 철근콘크리트 구조물의 붕괴와 부실사고 등으로 보수·보강공법에 대한 관심이 고조되었다.

또한 보강 공법 중 현재 가장 많이 사용되는 방법은 부착식 보강공법으로, 최근에는 탄소섬유, 아라미드 섬유, 유리섬유 등의 FRP계 신소재에 의한 에폭시 접착 공법이 많이 사용되고 있다.

또한, 현재 국내에서는 보수 및 보강에 대한 일정한 규준이 없는 상태이고, 체계적인 설계법이 정립되지 못한 실정이다. 특히 실제 구조물에 부착식 보강 공법을 적용할 경우, 보강 시의 구조물에 작용하는 하중의 크기와 손상 상태에 따라 보강효과와 거동특성이 달라지므로, 보강설계시 이에 대한 고려가 필요할 것이다.

따라서, 본 연구에서는 항복내력의 80%에 해당하는 하중을 가력한 상태에서 철근콘크리트 보를 탄소섬유시트(Carbon Fiber Sheet, 이하 CFS)로 휨보강한 후, 단조가력에 의한 휨파괴 실험을 수행하였다. 실험결과에 따른 분석내용은 파괴특성, 항복 및 최대내력, 보강효과, 연성효과 등을 분석하여, 보강시 하중 상태에 따른 보강후 거동특성과 보강 효율을 파악하여, 보강시 하중상태를 고려한 합리적인 CFS 휨보강 설계를 위한 기초 자료를 얻는데 본 연구의 목적이 있다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 시험체의 종류 및 형상

본 연구의 가력 실험에 사용된 시험체의 형상 및 치수는 Fig. 1에, 시험체의 종류는 Table 1에 나타내었다. 시험체의 단면치수는  $b \times h = 15\text{cm} \times 25\text{cm}$  ( $d = 20\text{cm}$ ), 지점간 거리는 210cm인 복철근 직사각형보로 제작하였으며, 지점에서의 부착과피를 방지하기 위해 지점에서 10cm씩 돌출시켜 시험체의 전체길이는 230cm로 하였다. 시험체에 사용된 철근은 인장철근으로 2-D13,

2-D16, 2-D19, 압축철근은 2-D10으로 동일하게 배근하였다.

보의 저면에 부착한 CFS의 폭은 12.5cm, 보강접수는 2겹으로 동일하다. 시험체는 인장철근비를 0.85%, 1.33%, 1.91%로 구분하고, 각 인장철근비에 대해 무보강, 가력전 보강, 가력중 보강으로 구분하여 총 9개의 시험체를 제작하였다.

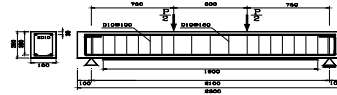


Fig. 1 시험체의 형상 및 치수(mm)

Table 1 시험체의 종류

시험체명	보강시 가력상태	보강접수	인장철근
D13-N	무보강	-	2-D13
D16-N		-	2-D16
D19-N		-	2-D19
D13-0	가력전 보강	2	2-D13
D16-0		2	2-D16
D19-0		2	2-D19
D13-80	가력중 보강	2	2-D13
D16-80		2	2-D16
D19-80		2	2-D19

### 2.2 사용 재료

실험에 사용된 콘크리트는 설계기준강도가  $210\text{kgf/cm}^2$ 인 레미콘 제품을 사용하였으며, 실험결과 나타난 콘크리트의 물성적 성질은 Table 2와 같다. Table 2에서 탄성계수는 실험결과에서 구한 압축강도를 이용하여  $15000\sqrt{f_{ck}}$ 로 계산한 값이다.

Table 2 콘크리트의 물성적 성질

재령 (일)	설계강도 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	압축강도 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	탄성계수 ( $\times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ )
28	210	217	2.21

시험체에 배근된 철근은 SD 400인 D13, D16, D19를 사용하였으며, 물성적 성질은 Table 3과 같다.

Table 3 철근의 물성적 성질

종 류	항복강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 (×10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )
D13	4321	5824	1.83
D16	4436	6432	1.95
D19	4501	6210	2.46

CFS의 물성적 성질을 확인하기 위해 ASTM D 638M의 규정에 따라 시험편을 제작하고 인장실험을 실시하였으며, 재료실험결과와 제조업체에서 제시한 값을 비교하여 Table 4에 나타내었다.

Table 4 CFS의 물성적 성질

	설계강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	설계탄성계수 (×10 <sup>6</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	인장탄성계수 (kgf/cm <sup>폭</sup> )
H 사	35,500	2.35	39,250
본연구	33,210	2.64	31,860

CFS의 접착에 사용된 에폭시 수지는 CFS 접착전 용인 2액형 상온경화용 에폭시 레진을 사용하였으며, 물성적 성질은 제조업체에서 제시한 자료로써 Table 5와 같다.

Table 5 에폭시 수지의 물성적 성질

압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	휨강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	인장탄성계수 (10 <sup>-3</sup> kgf/cm <sup>2</sup> )	포화충비
920	600	950	42	0.35

### 2.3 가력 장치 및 측정 방법

시험체 가력을 위한 가력장치와 시험체의 설치상황은 Fig. 2와 같다. 시험체의 설치는 전단스팬비(a/d) 3.75, 전단스팬거리 75cm로 하여, 2점 재하를 위해 시험체 상부에 가력보를 설치하였다. 하중은 가력펌프(Actuator, 50tonf, MTS 제작)로 가력하였으며, 작용하중에 의한 처짐을 측정하기 위해 보 중앙부에 변위계를 설치하고 균열 및 파괴상황을 관찰하였다.

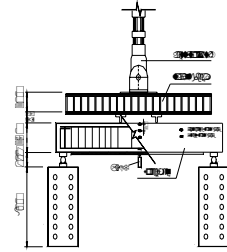


Fig. 2 가력장치 및 시험체 설치상황(mm)

또한 보수·보강실험의 특성상 보강전의 보실험과 보강후 CFS의 양생기간을 거친 후 보수·보강 시험체를 재가력하는 과정으로 실시하였다.

가력중 보강 시험체는 각 시험체별 가력하중(항복하중의 80%)을 가력한 상태에서 보수·보강 작업을 실시하여 7일 이상의 양생기간을 거친 후 재가력하였다. 시험체의 가력제어는 예상 항복하중의 70%까지 0.2tonf씩 하중제어로 실시하였고, 이후 가력하중 0.2tonf의 증가와 중앙부 처짐 2.0mm의 증가 중 먼저 도달하는 것으로 가력을 실시하였다.

인장철근과 CFS의 변형률을 파악하기 위해 인장철근 및 CFS 중앙부에 철근용 변형률 게이지(FLA-3-1L, G.F.=2.14, 동경계측기 제작)를 부착하였으며, 압축측 콘크리트의 압축변형률을 파악하기 위해 콘크리트용 변형률 게이지를 보 상부에서 하부로 20mm 간격으로 3개씩 부착하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 시험체의 균열 및 파괴형태

각 시험체의 실험결과 나타난 파괴모드 및 최대하중시의 CFS의 변형률과 압축연단의 콘크리트 변형률을 Table 6에 나타내었고, 각 시험체의 균열상황과 파괴양상을 보강시 가력상태에 따라 구분하여 Fig. 3~Fig. 5에 나타내었다.

Table 6 각 시험체의 파괴모드

시험체명	콘크리트변형률 ( $\times 10^{-6}$ )	CFS 변형률 ( $\times 10^{-6}$ )	파괴 모드
D13-N	3432	-	인장철근 항복후 휨파괴
D16-N	3306	-	인장철근 항복후 휨파괴
D19-N	3032	-	인장철근 항복후 휨파괴
D13-0	1805	7048	혼합(계면박리+피복분리)
D16-0	3506	4923	단부 계면박리파괴*
D19-0	3642	4144	단부 계면박리파괴*
D13-80	1539	8774	혼합(계면박리+피복분리)
D16-80	3374	5498	단부 계면박리파괴*
D19-80	3433	3836	단부 계면박리파괴*

\*: 콘크리트의 압축파괴가 선행

시험체별 파괴양상은 약간의 차이가 있지만, 전체적으로 중앙부와 가력점 부근의 휨균열의 진행에 의한 인장철근의 항복이 선행하는 연성적인 휨파괴로 나타났으며, 인장철근량과 CFS의 보강량에 따라 인장철근의 항복 이후 콘크리트의 압축파괴가 선행된 시험체도 있으나, 최종적으로는 CFS 단부의 응력집중에 의한 박리파괴로 나타났다.

### 3.1.1 무보강 시험체

무보강 시험체(D13-N, D16-N, D19-N)의 경우, 초기균열은 0.82tonf~1.22tonf 범위에서 중앙 하부에서 발생하여 상부로 진행되었으며, 하중 증가에 따라 좌우 가력점 근처의 하부에서 휨균열이 발생하여 대칭적으로 휨균열이 상부로 진행되었다. 이후 지점에 가까운 부분으로 휨균열이 확대되어 발생되었다.

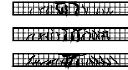
5.82tonf, 8.16tonf, 9.59tonf를 전후로 인장철근의 변형률이 항복변형률을 넘어 인장철근의 항복을 확인하였으며, 이후 가력점 사이의 휨균열이 상부로 진행되며 균열폭 증가와 함께 중앙부 처짐이 현저히 증가하며 최종적으로 콘크리트의 압축파괴로 이어졌다.

### 3.1.2 가력전 보강 시험체

#### 1) D13-0 시험체

철근비가 0.85%(2-D13)이고 가력전 보강한 D13-0 시험체는 초기균열이 1.63tonf에서 중앙 하부에 발생하여 상부로 진행되었고, 2.86tonf를 전후로 하중 증가에 따라 양측 지점부근으로 휨균열의 발생영역이 확대되며 상부로 균열이 진행되었다.

(a) D13-N 시험체



(b) D16-N 시험체



(c) D19-N 시험체

Fig. 3 무보강 시험체의 균열 및 파괴양상

(a) D13-0 시험체



(b) D16-0 시험체



(c) D19-0 시험체

Fig. 4 가력전 보강 시험체의 균열 및 파괴양상

7.55tonf를 전후로 CFS에서 박리음이 나기 시작하며 중앙부 처짐이 현저히 증가하였으며, 최대 내력 10.00tonf에서 최대 처짐 20.69mm를 나타낸 후, CFS의 우측 단부에서 접착면의 계면균열이 진행되며 내력이 감소하여, 9.39tonf를 전후로 가력점 부근에서 피복 콘크리트가 분리되며 최종 파괴되었다.

#### 2) D16-0 시험체

철근비가 1.32%(2-D16)이고 가력전 보강한 D16-0 시험체는 초기균열이 1.22tonf에서 중앙 하부에 발생하여 상부로 진행되었고, 3.27tonf를 전후로 하중 증가에 따라 양측 지점으로 휨균열의 발생영역이 확대되며 상부로 진행되었다. 이후 7.04tonf를 전후로 양측 CFS 단부 부근에서 발생한 휨균열이 전단균열로 이어져 11.22tonf까지 상부로 진행되었으나 균열폭은 증가하지 않았다.

최대 내력 12.65tonf에서 최대 변위 20.04mm를 나타낸 후, 가력점 부근과 중앙부에서 압축측 콘크리트의 압축파괴가 진행되었으나, CFS의 인장저항에 의해 내력의 급격한 감소는 발생하지 않았으며, 중앙부

처짐의 현저한 증가와 함께 서서히 내력이 감소하여 11.84tonf에서 22.18mm의 중앙부 처짐을 나타내며 CFS의 우측 단부에서 발생한 접착면의 계면균열에 의해 계면박리 파괴되었다.

### 3) D19-0 시험체

철근비가 1.91%(2-D19)이고 가력전 보강한 D19-0 시험체는 초기균열이 1.53tonf에서 중앙 하부에 나타났으며, 하중증가에 따라 3.37tonf까지 가력점 사이에서 휨균열의 수가 증가하며 상부로 진행되었다. 이후 6.43tonf를 전후로 양측 지지점과 가력점 사이에서 발생한 휨균열이 사인장균열로 이어져 11.63tonf까지 상부로 진행되었다. D13-0, D16-0 시험체에 비해 전단지간 사이에 발생한 사인장균열의 수가 상대적으로 많고 상부 진행정도가 크지만 균열폭의 증가는 미소하였다.

최대 하중 13.96tonf에서 최대 변위 18.18mm를 나타낸 후, 가력점 부근과 중앙부에서 압축측 콘크리트의 압축파괴가 진행되었으나, CFS의 인장저항에 의해 내력의 급격한 감소는 발생하지 않았으며, 중앙부 처짐의 현저한 증가와 함께 서서히 내력이 감소하여 8.27tonf에서 30.54mm의 중앙부 처짐을 나타내며 CFS의 좌측단부에서 발생한 계면균열에 의해 계면박리 파괴되었다.

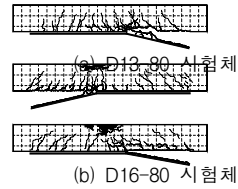
## 3.1.3 가력중 보강 시험체

### 1) D13-80 시험체

무보강 시험체 D13-N의 항복내력의 80%인 4.66tonf를 가력한 상태에서 CFS로 2겹 보강한 D13-80 시험체는 초기균열이 2.04tonf에서 좌측 가력점 하부에서 발생하였으며, 하중증가에 따라 중앙부와 양측 전단지간에 발생한 휨균열이 상부로 진행되었다.

이후 6.22tonf에서 인장철근의 항복이 확인되었고, CFS의 박리음과 함께 중앙부 처짐이 현저히 증가하며, 우측 전단지간의 휨균열과 수평으로 진행된 피복균열이 연결되어 피복분리의 조짐을 나타내었다.

이후 최대내력 9.28tonf에서 최대 처짐 29.99mm를 나타낸 후, CFS의 우측 단부에서 발생한 계면균열과 가력점 부근에서 시작된 피복균열이 연결되어 내력이 급격히 저하되며, 혼합파괴모드의 형태로 CFS가 탈락되며 최종 파괴되었다.



(c) D19-80 시험체

Fig. 5 가력중 보강 시험체의 균열 및 파괴양상

### 2) D16-80 시험체

무보강 시험체 D16-N의 항복내력의 80%인 6.53tonf를 가력한 상태에서 균열을 보수하고, CFS로 2겹 보강한 D16-80 시험체는 초기균열이 1.22tonf에서 중앙부 하부에서 발생하였으며, 8.78tonf까지 가력점 사이 중앙부에서 휨균열이 상부로 진행되었다.

10.20tonf에서 인장철근의 항복을 확인하였고, 이후 양측 전단지간에서 발생한 휨균열이 9.60tonf 이후 다수의 사인장 균열로 연결되었으나 균열폭은 증가하지 않았다. 10.61tonf 이후 중앙부 압축측 콘크리트의 파괴가 진행되었으며, 박리음과 함께 중앙부 처짐이 현저히 증가하여 최대내력 12.14tonf에서 22.32mm의 처짐을 나타낸 후, 11.43tonf에서 CFS의 좌측 단부에서 진행된 계면균열에 의해 CFS가 탈락되며 파괴되었다.

### 3) D19-80 시험체

무보강 시험체 D19-N의 항복내력의 80%인 7.67tonf를 가력한 상태에서 균열을 보수하고, CFS로 2겹 보강한 D19-80 시험체에서 초기균열은 1.53tonf에서 좌측 가력점 하부에서 발생하였다. 이후 중앙부의 휨균열 보다는 양측 전단지간에서의 휨균열이 상부로 진행되어 다수의 사인장균열이 발생하였다.

12.65tonf에서 인장철근의 항복을 확인하였고, 이후 중앙 상부 콘크리트의 압축파괴와 중앙 하부에서 진행된 인장균열이 연결되었다. 이후 중앙부 처짐의 현저한 증가와 함께 최대내력 13.47tonf에서 최대변위 17.33mm를 나타낸 후, 소성변형저항에 의해 서서히 내력이 저하된 후, CFS의 좌측단부에서 발생한 계면균열에 의해 CFS가 탈락되며 파괴되었다.

### 3.2 하중-중앙부 처짐 관계

각 시험체의 실험결과 나타난 초기균열하중, 항복하중, 최대하중 및 각 하중에 대한 처짐을 Table 7에 나타내었으며, 각 시험체의 하중-중앙부 처짐관계를 보강시 하중조건에 따라 구분하여 정리하였다.

Table 7 실험 결과(가력 단계별 하중 및 처짐)

시험체명	초기균열 하중(tonf)	항복 하중(tonf)	항복시 처짐(mm)	최대 하중(tonf)	최대하중시 처짐(mm)
D13-N	0.82	5.82	8.52	6.42	22.68
D16-N	0.92	8.16	11.14	9.61	17.05
D19-N	1.22	9.59	10.93	11.02	14.42
D13-0	1.63	7.55	10.17	10.00	20.69
D16-0	1.22	10.92	11.51	12.65	20.04
D19-0	1.53	13.16	13.55	13.96	18.18
D13-80	2.04(0.61)	6.22	9.01	9.28	29.99
D16-80	1.22(0.61)	10.20	10.45	12.14	22.32
D19-80	1.53(0.82)	12.65	12.54	13.47	17.33

( ) : 선재하시 초기균열하중

#### 3.2.1 가력전 보강 시험체

가력전 보강 시험체의 철근비의 변화에 따른 하중-중앙부 처짐 관계를 Fig. 6에 나타내었다.

인장철근비에 관계없이 초기균열하중 이전의 초기강성은 차이가 없으나, 초기균열하중 이후 곡선의 선형 구간에서는 철근비가 낮을수록 강성의 저하가 크게 나타나며 최대내력에 도달하였다.

철근비가 0.85%인 D13-0 시험체는 압축콘크리트가 압축파괴에 이르기 전에 CFS단부에서의 박리파괴에 의해 취성적으로 보강관이 탈락하며 최대내력이 결

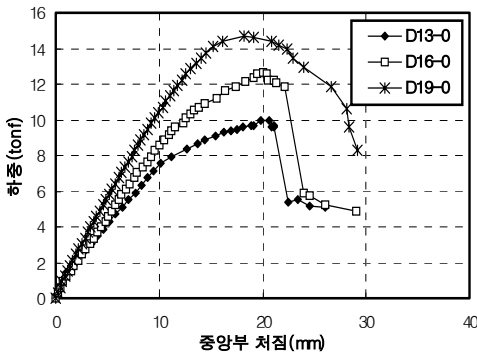


Fig. 6 가력전 보강보의 하중-중앙부 처짐 관계

정되었으나, 철근비가 1.33%, 1.91%인 D16-0, D19-0 시험체는 콘크리트의 압축파괴에 의해 최대 내력이 결정된 후 소성 변형과 함께 내력이 저하된 후, 최종 CFS의 단부박리에 의해 파괴되었다.

#### 3.2.2 가력중 보강 시험체

Fig. 7은 가력전 보강 시험체와 가력중 보강 시험체의 하중-중앙부 처짐 곡선을 비교하여 나타내었다.

가력중 보강 시험체는 모두 가력전 보강 시험체 보다 항복 내력과 최대 내력이 감소하였으며, 가력중 보강보의 파괴모드는 가력전과 동일하게 나타났다.

한편, D13-80 시험체의 파괴시 압축콘크리트의 변형률은 극한변형률 0.003을 넘지 않았으며, D16-80과 D19-80 시험체는 인장철근 항복 후 압축콘크리트의 변형률이 극한변형률에 도달하며 최대내력을 나타낸 후 소성변형저항에 의한 내력의 감소와 함께 큰 처짐의 증가를 나타낸 후, 최종 CFS의 박리에 의해 파괴되었다. 또한 가력중 보강보의 최대 내력시의 중앙부 처짐은 가력전 보강시보다 증가하였으며, 최대 내력시의 처짐은 인장철근비가 적을수록 가력전 보강보에 대한 최대 내력시 처짐의 증가비율이 증가하는 것으로 나타났다.

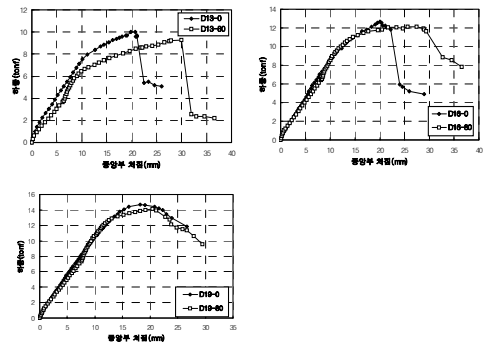


Fig. 7 가력중 보강보의 하중-중앙부 처짐 관계

### 3.3 하중 - CFS 변형률 관계

Fig. 8은 최대내력까지의 하중-CFS 변형률 관계를 가력상태에 따라 비교하여 나타내었다. Fig. 8에서 보이듯이 가력중 보강일 경우, 항복내력시 CFS의 변형률이 감소함을 알 수 있다.

또한 박리파괴가 선행된 D13-80의 경우, 최대내력이 크게 감소한 반면, 최대내력시의 CFS 변형률은 증가하였는데, 이는 보강전 사전 가력에 의해 원부재의 강성이 저하하며 큰 처짐의 증가와 함께 박리시점이 늦어졌기 때문으로 사료된다. 이에 반해 압축파괴가 선행된 D16-80, D19-80 시험체의 최대내력은 가력전 보강과 비교하여 거의 근접하나, CFS의 변형률은 감소하는 것을 알 수 있다. CFS 변형률이 감소한 것은 가력중 보강시 보강시점이 늦어져 항복 후 압축파괴시까지의 CFS 저항구간이 감소하였기 때문이다. 따라서 보강보의 최대내력이 압축파괴로 결정될 경우, 동일한 보강량에 대해 가력중 보강시 CFS의 사용효율이 감소하므로 이러한 효율성을 고려하여 가력상태에 따라 소요 보강량을 산정할 필요가 있을 것으로 판단된다.

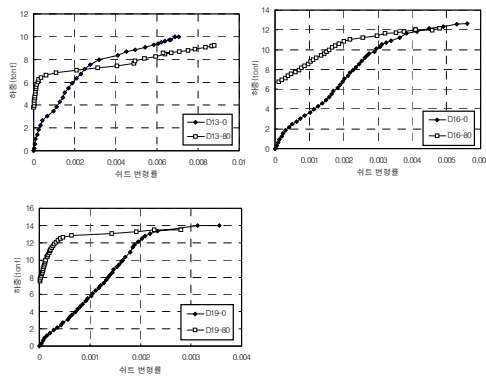


Fig. 8 가력상태에 따른 하중-CFS 변형률 관계

### 3.4 보강 효과

#### 3.4.1 내력 평가

Fig. 9는 무보강 시험체에 대한 가력전 보강 시험체와 가력중 보강 시험체의 항복내력비와 최대내력비를 나타내고 있다. 가력전 보강보는 무보강보에 대해 항복내력과 최대내력이 모두 증가하였으며, 항복내력의 상승비율은 인장철근비가 클수록 증가하나, 최대내력의 상승비율은 감소하였다.

한편, 가력중 보강보의 경우, 가력전 보강보에 대해 항복내력은 82~96%, 최대내력은 93~96%의 수준으로 감소하였으며, 이러한 감소비율은 인장철근비가 낮을수록 높게 나타났다. 따라서 가력중 보강의 경우,

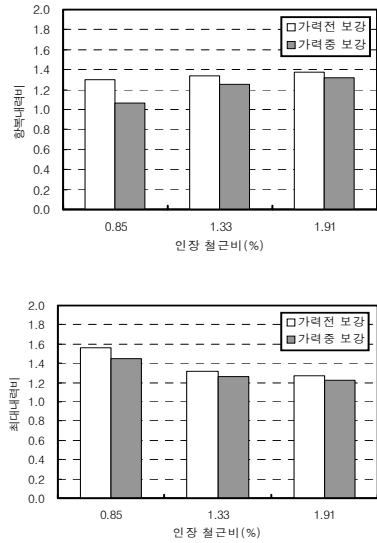


Fig. 9 보강 시험체의 내력비 비교

인장철근과 CFS의 초기변형률 차이에 의해 비가력 보강에 비해 내력에 대한 보강효과는 감소함을 확인할 수 있다.

#### 3.4.2 연성도 평가

Table 8은 보강시험체의 연성지수를 비교하여 나타내었다. Table 8에서 연성지수는 보강보의 항복시 처짐에 대한 최대하중시의 처짐과 CFS의 최종 박리시의 처짐의 비로 정의하였으며, 각각  $\mu_1, \mu_2$  로 나타내었다. 또한 철근비 및 가력상태에 따른 연성지수  $\mu_1$ 의 변화를 Fig. 10에 나타내었다.

Table 10 각 시험체의 연성 지수

시험체명	항복시 처짐 $\delta_y$	최대 내력시 처짐 $\delta_u$	박리 파괴시 처짐 $\delta_f$	$\mu_1$ ( $\delta_u/\delta_y$ )	$\mu_2$ ( $\delta_f/\delta_y$ )
D13-N	8.52	22.68	-	2.66	-
D16-N	11.14	17.05	-	1.53	-
D19-N	10.93	14.42	-	1.32	-
D13-0	10.17	20.69	21.10	2.03	2.07
D16-0	11.51	20.04	22.18	1.74	1.93
D19-0	13.55	20.84	30.54	1.34	2.25
D13-80	9.01	29.99	29.99	3.33	3.33
D16-80	10.45	22.32	29.36	2.14	2.81
D19-80	12.54	17.33	38.30	1.38	3.05

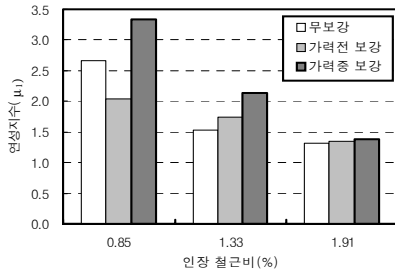


Fig. 10 가력상태에 따른 연성지수의 변화

Fig. 10에서 무보강 시험체는 균형철근비에 대한 인장철근비가 적을수록 연성지수가 증가하여 연성능력이 우수하며, 가력전 보강 시험체는 2.03~1.34의 범위 위로 인장철근비가 증가할수록  $\mu_1$ 은 크게 감소하였으나, 단부 파괴시를 기준으로 한  $\mu_2$ 는 3.33~2.81로 근사한 값을 나타내었다.

가력상태에 따른 연성능력을 비교해보면, 가력전 보강보에 비해 가력중 보강보의  $\mu_1, \mu_2$  모두 증가하였다.  $\mu_1$ 은 D13-80은 63%, D16-80은 23%의 증가를 보인 반면, D19-80은 5%이내의 근사한 연성지수를 나타내어, 인장철근비의 증가에 따라 급격한 증가비율의 감소를 나타내었다.

한편, 박리파괴시를 기준으로 한  $\mu_2$ 는 가력전 보강시  $\mu_1$ 과는 달리 인장철근비에 따라 근접한 값을 나타내었으며, 가력중 보강시는 가력전 보강에 비해  $\mu_2$ 가 증가하였으나, 인장철근비에 따른 일정한 증가경향은 나타나지 않았다. 이러한 결과는 D16과 D19 시리즈의 박리파괴가 압축파괴 이후 발생하여, 소성변형에 의해 처짐이 증가한 후 박리파괴가 발생하여 박리파괴가 압축파괴 보다 선행한 D13시리즈 보다 상대적으로  $\mu_2$ 가 증가하였기 때문이다. 특히 D16시리즈는 박리시 내력이 최대내력의 10%이내의 감소를 보인 반면, D19시리즈는 박리시 내력이 최대내력의 50%이하로 크게 감소하여, 압축파괴에 의해 최대내력을 나타낸 후 박리파괴된 보강보에 대해서는 연성능력의 평가범위를 박리시점까지 포함해서는 안될 것으로 판단된다.

이상의 고찰에서 연성지수  $\mu_1$ 으로 연성능력을 평가하면, 가력중 보강이 가력전 보강에 비해 연성능력에 대한 보강효과가 증가함을 확인하였다.

#### 4. 결 론

CFS로 보강된 RC보의 보강 시의 하중상태(가력전 보강, 가력중 보강)에 따른 휨 파괴 거동과 보강 효과의 변화를 확인하기 위해 CFS 보강보의 단조 가력 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 보강시 가력상태(가력전, 가력중)에 따른 보강보의 인장철근과 CFS의 초기변형률 차이에 의한 거동 변화 및 보강효과의 차이를 실험적으로 확인하였다.
- 2) 항복내력의 80%를 가력한 상태에서 CFS로 보강한 보의 항복내력과 최대내력은 가력전 보강에 비해 각각 82~96%와 93~96%의 수준으로 감소하였으며, 이러한 감소비율은 인장철근비가 낮을수록 증가하였다.
- 3) 최대 내력시 처짐과 항복시 처짐에 의한 연성지수  $\mu_1$ 은 가력전 보강에 비해 가력중 보강의 경우가 63~5%의 증가를 나타내었으며, 인장철근비가 증가할수록 연성지수의 증가비율은 급격히 감소하였다.
- 4) 가력중 보강된 보는 가력전 보강보에 비해 최대 내력이 감소하여 내력의 측면에서는 보강효율이 감소하나, 연성능력의 측면에서 가력전 보강에 비해 보강효율이 증가하는 것으로 나타났다.
- 5) 압축파괴가 선행된 D16-80, D19-80 시험체의 경우, 가력전 보강에 비해 보강시점이 늦어져 최대 내력시 CFS의 변형률이 감소하는 것으로 나타나, 동일한 보강량에 대해 보강시 가력히중을 고려하여 소요보강량을 산정해야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 박성수, 조수제, "RC보의 손상상태를 고려한 CFS의 휨보강 효과", 한국구조물진단학회 제6권 4호, 2002. 10, pp. 157~167
2. 정란 외 4인, "재하상태에서 보강된 철근 콘크리트보의 보강 재료에 따른 구조적 거동", 콘크리트학회지 제11권 1호, 1999. 2, pp. 201~208
3. 김종욱 외 4인, "초기변형율을 고려한 철근콘크리트 보의 강관휨보강 효과에 관한 실험적 연구", 한국구조물진단학회 제5권 제1호, 2001. 1, pp. 228~236
4. 박철림 외 4인, "CFS로 보강된 철근콘크리트보의 부차 파괴거동에 관한 실험적 연구", 콘크리트학회지 제9권 6호, 1997. 12, pp. 157~163

(접수일자 : 2002년 12월 30일)