

## 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 연성거동에 관한 실험적 고찰

### Experimental Study on the Ductile Behavior of Reinforced Concrete Beams with Carbon Fiber Sheets

박 현 정\*                      박 성 수\*\*  
Park, Hyun-Jung              Park, Sung-Soo

#### Abstract

Recently, the need for strengthening reinforced concrete(R.C.) structure has been increased, particularly when there is an increase in load requirements, a change in use, a degradation problem, or design/construction defects. The use of composite materials for structural repair presents several advantages and has been investigated all over the world. It is well known that the incorporation of carbon fiber sheet(CFS) with concrete is one of the most effective ways to strengthen the R.C. structure.

In this papers, experimentally investigated the ductile behavior of the R.C. beams strengthened with CFS, and provided the basic data for design of R.C. beams strengthened with CFS. Tests were carried out with 15 beams (20cm×30cm×240cm) reinforced with CFS, and with parameters including and the ratio of tensile reinforcement to that of balanced condition and number of CFS. The results show that strengthened and non-strengthened beams exhibit different ductile behavior. Non-strengthened beams showed increase of ductility as amount of the tensile reinforcement decreased. However, bearing capacity of the CFS-strengthened beams are dictated by the strength of the CFS layers that a very high ductility is indicated for the beams with large number of CFS.

**keywords** : ductility, CFS, strengthening, the ratio of tensile reinforcement to that of balanced condition, number of CFS

\* 정회원, 부산대 건축공학과 박사과정 수료

\*\* 정회원, 부산대 건축공학과 교수, 공약

• 본 논문에 대한 토의록 2001년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2002년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서론

최근 국내는 물론 국외에서도 균열이 발생하거나, 내력이 저하된 철근콘크리트 보의 보강 방법으로 탄소, 유리, 아라미드 등의 섬유시트 부착공법이 증가 추세에 있으며, 이에 대한 연구도 다각도로 진행중에 있다. 기존의 연구를 살펴보면 보강재의 종류, 보강길이, 보강두께, 단부정착 유무, 하중재하 유무 등을 변수로 한 실험을 통하여, 탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 파괴시 거동, 하중-처짐관계, 그리고 휨보강 효과 등을 고찰, 분석<sup>(6),(9),(10)</sup>하였고, 연성지수를 사용하여 보강된 보의 연성거동에 대해 연구하였다<sup>(10)</sup>.

보에 있어서의 연성거동이라 함은, 보가 받을 수 있는 최대강도에 도달한 이후 하중의 증가는 둔화되더라도 변형은 계속적으로 증가하므로, 그 부재가 더 이상의 구조적인 힘을 발휘할 수는 없지만 변형은 수용할 수 있어서 보가 최종 파단될 때까지 지속적으로 견딜 수 있는 능력을 의미하는 것이라 할 수 있다. 이는 탄소섬유시트 등으로 보강된 보에서도 역시 마찬가지이므로, 보강된 보는 최대내력에 이르기까지 충분한 연성을 확보하여 구조물의 취성파괴를 방지하여야 하므로, 연성점도를 바탕으로 적절한 보강량을 보강함으로써 연성파괴를 유도하도록 설계하는 것은 아주 중요한 의미를 갖는다고 할 수 있겠다. 이러한 연성거동을 정확히 규명하기 위해 가장 선행되어야 할 것은 보강재가 그 역할을 충분히 발휘해야 된다는 것이다. 그러나, 탄소섬유시트로 보강된 보의 보강보의 휨강도에 도달되기 이전에 보강재가 탈락되어 휨 성능을 제대로 발휘하지 못하는 경우가 허다하기 때문에 정확한 연성효과를 규명하기에는 미흡하였다.

따라서, 본 연구에서는 보강된 보가 완전한 휨거동을 하고 그 강도에 도달될 때까지, 보강재가 보강보 전체에 대해 어느 정도의 연성거동을 해줄 수 있는가를 실험을 통해 고찰하고, 하중-처짐 곡선과 연성지수를 사용한 분석을 통하여 보강설계시 활용할 수 있는 기초자료로 삼고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 시험체 계획

본 연구에 사용된 시험체의 설계는 건설교통부 제정 "콘크리트 구조설계기준"(1999)을 적용하였다. 균형철근비에 대한 인장철근비( $\rho/\rho_b = 16.3\%, 25.6\%, 36.7\%$ )와 보강결수(1결~4결)를 변수로 하여 총 15개의 시험체를 제작하였으며, 단면의 크기는 20cm×30cm(유효깊이 25cm), 경간은 240cm(순경간 220cm)로 하며, 인장측에는 2-D13, 2-D16, 2-D19의 3경우를 배근하고, 전단보강근은 D10을 10cm 간격으로 순수 휨구간을 제외한 전 구간에 배근하였다. 압축측에 철근을 배근하지 않은 이유는, 콘크리트 단면의 유효깊이(d)가  $\rho_{max}$  이하의 철근비로 유도하기에는 너무 작아서 압축철근의 효과를 무시하기에는 이론적으로 맞지 않기 때문이다. 따라서, 압축철근을 보강하지 않은 단근보를 제작하였으며, 전단철근을 확실히 위치시키기 위해 인장철근에 용접으로 부착하였다. 시험체

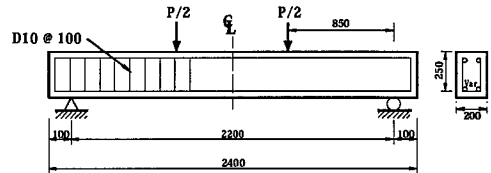


Fig. 1 시험체 형상

Table 1 시험체명 및 변수

시험체명	인장철근비	보강결수
B1-D13-0	$\rho = 0.51$ ( $\rho/\rho_b = 16.3\%$ )	0
B1-D13-1		1
B1-D13-2		2
B1-D13-3		3
B1-D13-4		4
B2-D16-0	$\rho = 0.80$ ( $\rho/\rho_b = 25.6\%$ )	0
B2-D16-1		1
B2-D16-2		2
B2-D16-3		3
B2-D16-4		4
B3-D19-0	$\rho = 1.15$ ( $\rho/\rho_b = 36.7\%$ )	0
B3-D19-1		1
B3-D19-2		2
B3-D19-3		3
B3-D19-4		4

의 형상은 Fig. 1에, 시험체의 종류 및 변수는 Table 1에 나타내었다.

## 2.2 시험체 보강

손상을 입지 않은 보 하부 인장면에 탄소섬유시트를 폭 15cm, 길이 180cm로 부착하였다. 또 탄소섬유시트의 단부에 폭 50cm, 높이 30cm(보의 높이)만큼 U형 밴드를 감아 정착시켰다.

U형 밴드의 폭을 크게 한 이유는 여러 번의 시행착오를 겪어 시도한 것으로, 단부정착으로 인한 탈락방지 목적 외에도, 휨 보강이 증대할 수록 상대적으로 지점부의 수평전단이 취약점으로 나타나 지점부의 파괴파괴가 발생하여 완전한 휨파괴 거동을 유도할 수 없었기 때문에, 전단을 받는 구간에 충분한 보강을 함으로써 지점부의 균열 진행을 막아 안정적인 휨파괴도 유도하기 위함이다. 보강된 시험체의 형상은 Fig. 2와 같다.

## 2.3 사용재료

### 2.3.1 콘크리트

본 실험에서 사용된 콘크리트는 설계기준강도가 240kgf/cm<sup>2</sup>인 레미콘 제품으로, 시험체 타설시 온도는 30℃였고, 타설한 지 1주일 후에 거부집 및 모올드를 제거하고, 대기 중에서 기건양생하였다. 압축강도 실험 결과 나타난 재료의 특성은 Table 2와 같다.

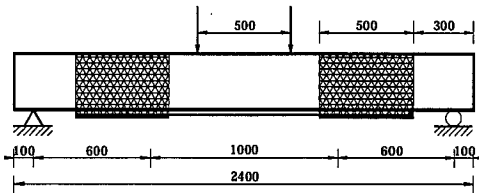


Fig. 2 보강 시험체 형상

Table 2 콘크리트의 재료적 특성

설계강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )
240	249	2.37×10 <sup>5</sup>

실험결과로부터 얻은 압축강도를 이용하여  $15000\sqrt{f_{ck}}$ 로 탄성계수를 구하였다.

### 2.3.2 철근

철근은 SD35인 D10, D13, D16, D19를 사용하였으며, 항복강도  $f_y=3500\text{kgf/cm}^2$ 이고, 탄성계수  $E_s=2.0\times 10^6$ 을 사용하였다.

### 2.3.3 탄소섬유시트

보강재로 사용한 탄소섬유시트는 S사의 고강도 탄소섬유로서, 제조업체에서 제시한 설계 두께는 0.11mm이며, 재료적 특성은 Table 3과 같다.

### 2.3.4 접착제(에폭시)

콘크리트와 탄소섬유시트리는 완전히 다른 두 개의 이종 재료가 하나의 구조체로서 성능을 발휘하기 위해서는 무엇보다도 강력한 접착능력이 확보되어야 한다. 보통 탄소섬유시트 접착전용으로 2액형 상온경화용 에폭시 레진을 쓰는데, 이 때 주제와 경화제의 배합이 적절하게 이루어져야 한다. 접착제의 재료적 특성은 Table 4와 같다.

## 2.4 측정 방법 및 가력장치

시험체는 양쪽 단부에서 각각 10cm 떨어진 지점에 강제 로울러를 설치하여 회전에 대한 구속이 없도록 하였으며, 가력력 사이에 전단력이 존재하지 않고 휨 모멘트만이 작용하도록 하기 위하여 순수 휨구간이

Table 3 탄소섬유시트의 재료적 특성

섬유중량 (g/m <sup>2</sup> )	표준시공 두께 (mm)	인장강도 (kgf/cm 폭)	설계강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )
200	0.45	390	35500	2.35×10 <sup>6</sup>

Table 4 접착제의 재료적 특성

압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	인장강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	굴곡강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	전단점착력 (kgf/cm <sup>2</sup> )
620	450	110	95

50cm가 되도록 가력법을 설치하고, 50ton 용량의 액츄에이터(actuator)를 사용하여 4점 휨실험으로 실시하였다. 가력방법은 변위제어방식(displacement control)으로 하였고, 가력속도는 1.0 mm/min으로 하였으며, 탄소섬유시트가 파단되면 가력을 중지하였다.

인장수근의 변형률을 파악하기 위하여 수근 중앙부에 철근용 변형률 게이지(steel strain gauge-5mm) 각각 1개씩을 콘크리트 타설 전에 부착하였고, 보강된 탄소섬유시트의 변형률은 인장측 중앙부에 1개 부착하여 측정하였다. 압축측 콘크리트의 변형률을 파악하기 위하여 콘크리트용 변형률 게이지(concrete strain gauge-60mm)를 압축측 중앙부에 부착하였다. 처짐은 보의 인장측 중앙부에 변위계를 설치하여 측정하였다.

### 3. 연성(Ductility)

ACI 규준은 취성재료인 콘크리트에 철근을 넣음으로써, 인장측 철근의 연성효과를 이용하여 구조물의 파괴형태를 연성으로 유도함을 주 목적으로 하고 있다. 규준에 적합하게 설계된 철근콘크리트 보는 파괴에 도달하기 전에 인장측 철근이 먼저 항복함으로써 연성적인 파괴형태를 나타내게 된다. 따라서, 연성이라는 말은 하자가 발생했을 때 파열이 없이 대변형을 수용할 수 있는 부재의 능력을 나타내는 것이라고 할 수 있다.

연성의 장점은 재료의 강도에 거의 도달되었을 때 눈에 보이는 변형 및 균열 등이 발생하여, 실제 파단이 발생하기 이전에 사전징후를 인식하고 사전조치를 할 기회를 부여함으로써 급작스러운 파괴에 대한 방지책을 수립할 수 있는 것이라고 볼 수 있다. 이러한 이유로 연성이 큰 재료는 파괴 이전에 상당한 변형을 허용할 수 있으므로 많은 양의 내부 에너지를 흡수할 수가 있으며, 이는 하중-처짐의 곡선에서 그 단면적을 구함으로써 알 수 있는 양이다.

본 연구에서 사용한 탄소섬유시트는 일반적으로 변형이 큰 재료라 해서 연성이 큰 재료라고 생각될지 몰라도, 실재는 취성적인 성질이 아주 큰 재료라 할 수 있다. 그 이유는 파단이 되기 직전까지 계속적으로 탄성의 성질을 보이다가, 최대강도에 도달했을 때는 갑

자기 파단이 발생하므로 사전 징후를 보일 수 있는 소성영역이 존재하지 않는 재료이기 때문이다. 이러한 재료를 연성거동을 하는 철근콘크리트 구조물에 완전 일체화시킴으로써 보강 구조물 전체의 연성거동을 규명하는 것은 중요하다고 할 수 있겠다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 파괴 및 균열형상

본 실험에서는 보강보에서의 비람직한 파괴형태인 휨파괴를 성공적으로 유도하였으며, 실험 결과 나타난 파괴형태를 분류하면 다음과 같다.

첫째, 압축측 콘크리트가 파괴시 변형률에 도달하지 못한 상태에서 보강재가 파단 변형률에 도달함으로써, 보강재가 전디지 못하고 파단되는 보강재의 인장파괴, 둘째, 압축측 콘크리트가 파괴시 변형률에 도달한 후에 보강재가 파단되어 최종적으로는 콘크리트의 압괴를 수반하는 휨파괴, 셋째, 보강재 단부에서 보강재가 괴복콘크리트를 몰고 떨어지는 박리파괴 등의 3가지이다. 세 번째의 경우는 한 시험체에서만 나타난 경우로서 전형적인 휨파괴는 아니라고 보여진다.

먼저, 보강을 하지 않은 기준 시험체인 B1-D13-0, B2-D16-0, B3-D19-0의 경우에는 보의 중앙부 근처에서부터 휨 균열이 나타나기 시작하여 차츰 상부로 진전되면서 종립축 위치까지 성장하였으며, 중앙부의 처짐도 서서히 증가하였다. 거의 동시에 하중 재하점 아래에 휨 균열이 발생하였고, 하중의 완만한 증가와 함께 초기 균열의 폭이 커지다가, 최대하중 부근에 이르러서는 처짐이 급속도로 증가하였다. 그리고, 최대하중 이후 압축측 콘크리트에 균열이 발생하는 전형적인 휨파괴의 현상을 나타내었다. 하중의 증가와 함께 초기에 생긴 균열의 폭은 계속 증가하나, 미소 균열은 거의 발견되지 않았다.

위에서 언급한 첫 번째의 파괴형태를 보인 시험체는 균형철근비에 대한 인장철근비가 작은 시험체로서, B1-D13-1, B1-D13-2, B1-D13-3이며, 두 번째의 파괴형태를 보인 시험체는 인장철근비와 보강접수가 상대적으로 많은 시험체로서, B1-D13-4, B2-D16-1,

B2-D16-2, B3-D19-1, B3-D19-2, B3-D19-3, B3-D19-4이다. 세 번째의 박리파괴는 B2-D16-4로서, 지점부에서의 보강이 상대적으로 문제가 있는 것으로 보여진다. 그리고, B2-D16-3의 시험체는 실험의 착오로 자료로 사용할 수 없었다.

이들 시험체에서 균열의 발생순서는 무보강 시험체와 거의 유사하나, 균열의 형태는 조금 다른 경향을 보였다. 무보강 시험체에서는 균열이 발생하면, 그 균열이 발전되고 균열 폭이 증가하는 반면, 보강 시험체는 초기 휨 균열의 폭은 증가의 경향이 무보강 시험체에 비해 적다가, 새로운 미세 균열이 기존의 균열 중간 중간에 계속 발생하게 되며, 균열의 길이 또한 짧았다. 이는 보의 인장면에 부착된 탄소섬유시트 등의 보강재가, 인장철근이 항복을 하더라도 휨 보강재의 역할을 함으로써 균열을 억제하며, 보의 강도와 하중에 대한 저항력을 향상시키는 것으로 판단된다.

## 4.2 하중-처짐 곡선에 의한 연성거동 고찰

### 4.2.1 인장철근비의 변화에 따른 연성거동

보강을 하지 않은 기준 시험체의 하중-처짐 곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보이듯이, 항복하중 이후 재하하중은 크게 증가하지 않지만 최대처짐은 항복시의 처짐에 비해 상당히 증가했음을 알 수 있고, 특히  $\rho/\rho_t$ 가 16.3%일 때 처짐의 증가율이 가장 큼을 알 수 있다. 따라서, 무보강 보에서는 균형철근비

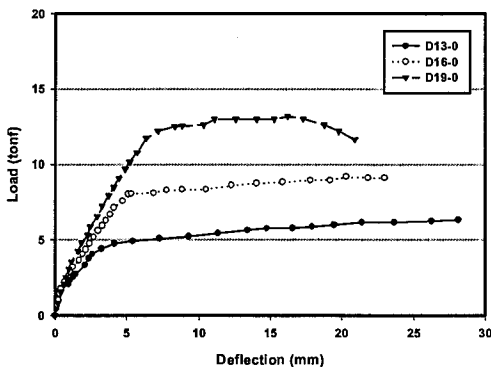


Fig. 3 기준 시험체의 하중-처짐 곡선

에 대한 인장철근비가 작을수록 연성은 증가한다.

Fig. 4 ~ Fig. 7은 인장철근비의 변화에 따른 하중-처짐 곡선을 보강접수별로 나타낸 것이다.

Fig. 4의 1접 보강, Fig. 5와 2접 보강인 경우는 인장철근비가 작을수록 연성적인 거동을 함을 알 수 있다. 그러나, Fig. 6, Fig. 7의 3접과 4접 보강인 경우는 인장철근비가 증가할수록 최대하중 이후 하중이 감소하는 구간이 확실히 나타나고 있고, 처짐 또한 증가하고 있다. 따라서, 최대하중시까지를 기준으로 한다면 인장철근비가 증가할수록 연성은 감소하지만, 탄소섬유시트로 보강된 보에서 실질적인 보강성능은 탄소섬유시트가 파단되는 순간까지 유효하므로, 탄소섬유시트의 파단 시점을 기준으로 한다면 인장철근비가 증가할수록 연성능력은 향상됨을 알 수 있다.

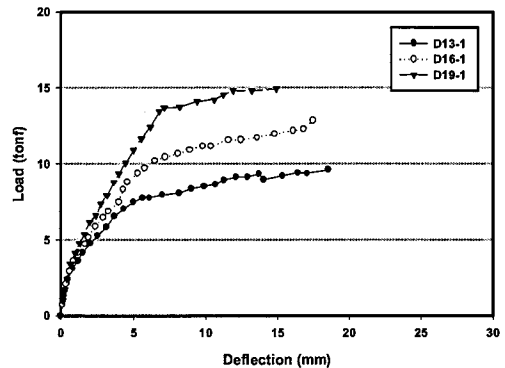


Fig. 4 1접 보강 시험체에서의 하중-처짐 곡선

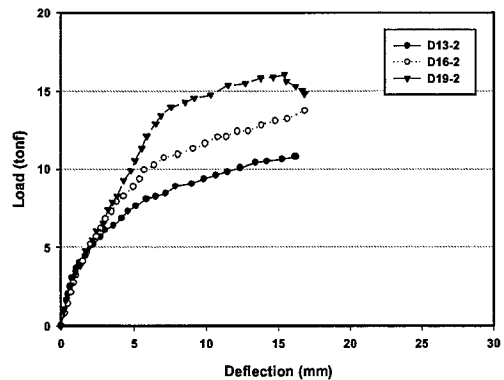


Fig. 5 2접 보강 시험체에서의 하중-처짐 곡선

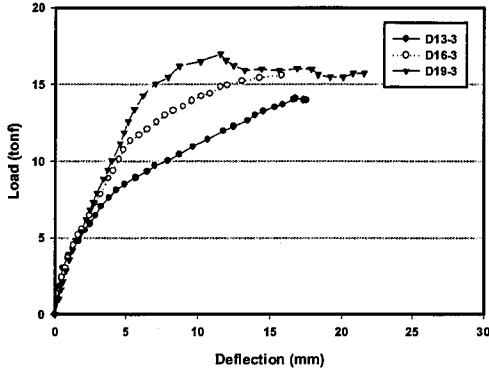


Fig. 6 3겹 보강 시험체에서의 하중-처짐 곡선

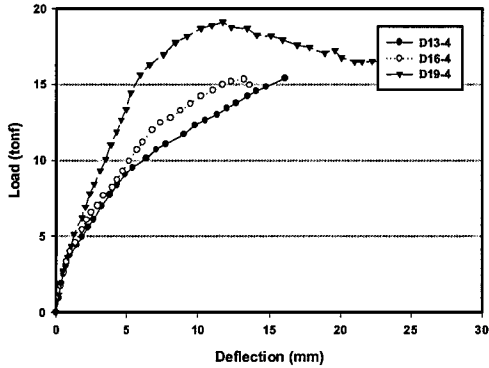


Fig. 7 4겹 보강 시험체에서의 하중-처짐 곡선

이상에서 볼 때, 어느 정도의 인장철근비 이상이 되면 인장철근비가 증가할수록 보강된 보는 무보강 보에 비해 연성능력이 향상됨을 알 수 있었지만, 인장철근비가 낮은 경우에는 인장철근비의 증가에 따른 확실한 연성의 효과는 기대할 수 없는 것으로 나타났다. 이는 보의 파단시 콘크리트의 압축축 변형률이 파괴 변형률보다 작을 때(인장철근비가 낮은 경우)는 보강보가 받을 수 있는 강도를 충분히 발휘하지 못하였다고 할 수 있고, 반면 보의 파단시 콘크리트의 압축축 변형률이 파괴 변형률보다 크거나 같을 때는 보강보로서의 역할을 충분히 다 하였다고 볼 수 있기 때문이다.

#### 4.2.2 보강접수의 변화에 따른 연성거동

Fig. 8 ~ Fig. 10은  $\rho/\rho_b$ 가 16.3%(B1), 25.6%(B2), 36.7%(B3)인 경우, 탄소섬유시트를 1겹~4겹

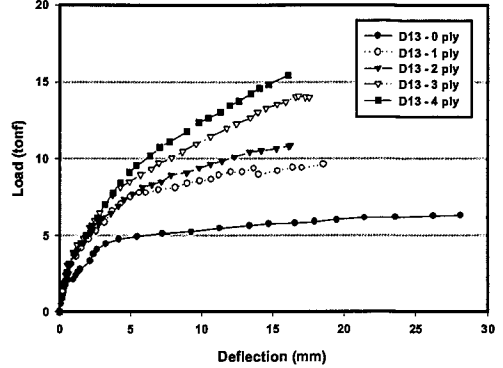


Fig. 8 하중-처짐 곡선 ( $\rho/\rho_b=16.3\%$ )

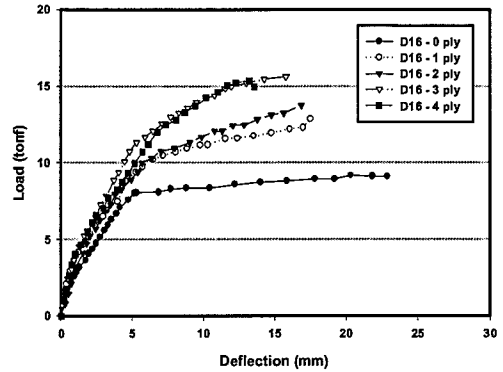


Fig. 9 하중-처짐 곡선 ( $\rho/\rho_b=25.6\%$ )

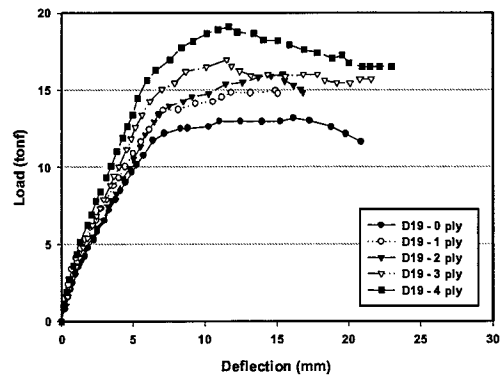


Fig. 10 하중-처짐 곡선 ( $\rho/\rho_b=36.7\%$ )

으로 보강했을 때의 하중-처짐 곡선을 탄소섬유시트 파단시까지 나타낸 것이다.

보강접수에 따른 연성효과를 살펴보면, Fig. 8의  $\rho/\rho_b$ 가 16.3%인 경우는 무보강 시험체의 연성이 이주 크기 때문에, 무보강 시험체에 비해 보강 시험체의 연성효과가 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나, Fig. 10에서 확실히 나타나는 바와 같이,  $\rho/\rho_b$ 가 36.7%인 경우는 보강접수가 늘어날수록 최대하중 이후의 거동은 보다 연성적이다. 특히 1점 보강 시험체는 항복 시부터 최대하중시까지의 처짐량보다 최대하중시부터 탄소섬유시트 파단시까지의 처짐량이 더 큰 것이 나타나고 있으며, 이는 보다 연성적인 거동을 함을 보여주고 있다.

기존의 연구결과<sup>(22),(29),(32)</sup>, 일반적으로 보강접수가 증가할수록 연성의 효과는 감소한다고 보고되고 있지만, 이는 보강보의 보강 분담이 충분하지 않은 경우라고 판단되어진다. (탄소섬유시트와 콘크리트와의 조기 탈락이나, 지점부 근처의 진단에 의한 파단 등의 경우로 보강보로서의 역할을 충분히 다하지 못한 경우)

따라서, 보강보가 그 강도에 충분히 도달된 이후에는 보강접수가 늘어날수록 연성능력이 향상된다고 볼 수 있다.

### 4.3 연성지수에 의한 고찰

탄소섬유시트로 보강된 보의 보강 성능은 탄소섬유시트가 파단되거나 탈락되기 전까지 확보된다고 볼 수 있다. 따라서, 부재의 변형능력을 평가하기 위하여 탄소섬유시트가 파단되기 전 최대하중에 도달할 때와 파단 순간으로 나누어 보의 연성거동을 파악해 보았다.

탄소섬유시트가 파단되기 전의 연성거동을 알아보기 위하여 보강보의 항복시 처짐( $\Delta y$ )에 대한 최대하중시 처짐( $\Delta u$ )의 비를 연성지수  $\mu_1 (= \Delta u / \Delta y)$ 이라 두었다. 그리고, 탄소섬유시트가 파단될 때의 연성거동을 알아보기 위하여 보강보의 항복시 처짐( $\Delta y$ )에 대한 탄소섬유시트 파단 순간의 처짐( $\Delta f$ )의 비를 연성지수  $\mu_2 (= \Delta f / \Delta y)$ 라 두었다. 각각의 경우에 대해 연성지수를 구한 뒤 Table 5에 나타내었고, 인장철근 비와 보강접수에 따른 연성지수의 변화는 Fig. 11, Fig. 12에 나타내었다.

실험 결과로부터 알 수 있듯이, 무보강 시험체에서

Table 5 연성지수 (Ductile Ratio)

시험체명	항복하중 시 변위 $\Delta y$ (mm)	최대하중 시 변위 $\Delta u$ (mm)	시트파단 시 변위 $\Delta f$ (mm)	$\mu_1 (= \Delta u / \Delta y)$	$\mu_2 (= \Delta f / \Delta y)$
B1-D13-0	3.85	24.62	-	6.39	-
B1-D13-1	5.74	14.80	15.11	2.58	2.63
B1-D13-2	-	-	-	-	-
B1-D13-3	4.95	14.63	15.79	2.96	3.19
B1-D13-4	4.80	16.09	16.15	3.35	3.36
B2-D16-0	5.32	18.10	-	3.40	-
B2-D16-1	6.08	17.48	17.48	2.88	2.88
B2-D16-2	6.03	16.85	16.85	2.79	2.79
B2-D16-3	5.22	12.02	16.97	2.30	3.25
B2-D16-4	-	-	-	-	-
B3-D19-0	6.70	16.18	-	2.41	-
B3-D19-1	6.89	14.91	15.11	2.16	2.19
B3-D19-2	7.28	15.43	16.82	2.12	2.31
B3-D19-3	6.18	11.56	22.74	1.87	3.68
B3-D19-4	5.57	10.23	22.44	1.84	4.03

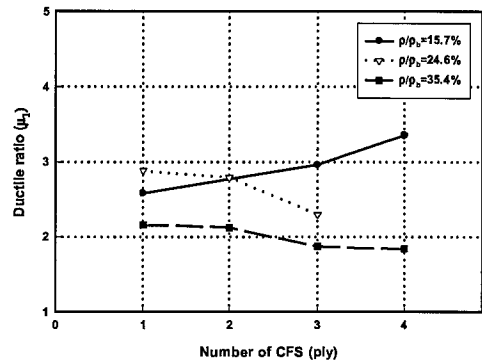


Fig. 11 연성지수  $\mu_1$

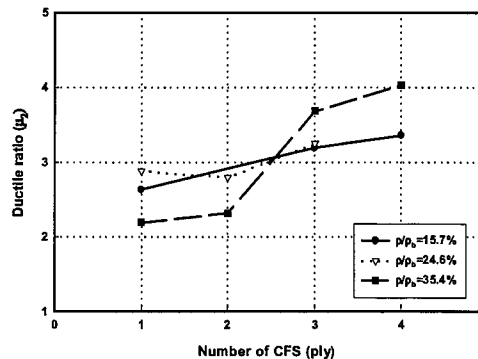


Fig. 12 연성지수  $\mu_2$

는 인장철근비가 작을수록 연성능력이 우수함을 확인할 수 있다.

보강 시험체에서 인장철근비와 보강접수에 대한 연성 정도를 분석해 보면,  $\rho/\rho_b$ 가 16.3%인 경우는 보강접수가 증가할수록  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  모두 점차 증가하는 경향을 보였다. 보강접수가 증가할수록 항복하중과 최대하중이 모두 상승하지만, 항복 하중의 증가비율보다 최대하중의 증가비율이 더 크고, 최대하중시와 탄소섬유시트 파단시가 거의 동일하므로  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  모두 증가하고 있다. 그러나,  $\rho/\rho_b$ 가 25.6%인 경우는 보강접수가 증가할수록  $\mu_1$ 은 감소하였고,  $\mu_2$ 는 4겹 보강 시험체의 측정에 실패하여 단정할 수는 없지만 증가하는 경향을 보였다. 특히, 3겹 보강부터는 하중 감소 구간이 나타나므로 탄소섬유시트 파단 시점에서 보면 연성이 증가했음을 알 수 있다. 인장철근비가 가장 높은  $\rho/\rho_b$ 가 36.7%인 경우는 보강접수가 증가할수록  $\mu_1$ 은 감소하고  $\mu_2$ 는 증가하였으며,  $\rho/\rho_b$ 가 25.6%인 경우와 같은 경향을 보이고 있다.

따라서, 보강보는 무보강보와 비교했을 때 연성거동이 달리짐을 알 수 있었다. 무보강보는 인장철근비가 커질수록 연성능력은 감소하였다. 그러나, 보강보는 인장철근비가 작은 경우에는 탄소섬유시트의 파단 전이나 파단 순간 모두 보강접수가 증가할수록 연성효과가 향상되었지만, 인장철근비가 커질수록 탄소섬유시트 파단 전 최대하중을 나타낼 때까지는 연성효과가 감소함을 알 수 있었다. 즉, 보강접수가 증가할수록 처짐소멸 효과가 커지므로, 항복하중시 변위와 최대하중시 변위는 줄어들이 결국 연성지수  $\mu_1$ 도 작아지게 된다. 그러나, 탄소섬유시트로 보강된 보의 실질적인 보강성능은 탄소섬유시트가 파단되는 순간까지 유효하므로, 이 경우에는 보강접수가 증가할수록 연성지수  $\mu_2$ 는 증가하여 더 연성적인 거동을 하는 것으로 보인다. 즉, 인장철근비가 클 때 보강접수가 증가할수록 연성이 더 향상됨을 알 수 있으며, 이는 하중-처짐 곡선에서의 경향과도 잘 일치하고 있다.

#### 4.4 하중-처짐 곡선의 면적에 의한 고찰

탄소섬유시트 파단시 하중-처짐 곡선의 면적을 부채

항복시 하중-처짐 곡선의 면적으로 나눈 값을 연성지수  $\mu_3$ 이라 할 때, 이 값을 구해보면 Table 6과 같고 Fig. 13에 나타내었다.

Table 6에서 보면, 하중-처짐 곡선의 면적을 이용하여 구한 연성지수  $\mu_3$ 과 항복하중시 처짐에 대한 탄소섬유시트 파단시 처짐의 비로 구한 연성지수  $\mu_2$  (Table 5)가 동일한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 보강된 보에서의 연성은 동일한 인장철근비에서 보강접수가 증가할수록 증가함을 알 수 있다. 그리고, 하중-처짐 곡선의 면적을 이용하여 구한 연성효과도 위의 다른 두 방법으로 구한 연성효과와 일치하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Table 6 하중-처짐 곡선에 의한 연성지수  $\mu_3$

시험체명	항복하중시 면적	최대하중시 면적	시트파단시 면적	연성지수 ( $\mu_3$ )
B1-D13-P0	18.544	128.798	-	-
B1-D13-P1	31.569	109.424	112.319	3.56
B1-D13-P2	-	-	-	-
B1-D13-P3	26.316	134.118	149.624	5.69
B1-D13-P4	27.007	168.199	169.230	6.27
B2-D16-P0	26.147	134.846	-	-
B2-D16-P1	39.223	168.790	168.790	4.30
B2-D16-P2	37.568	167.867	167.867	4.47
B2-D16-P3	34.840	125.197	200.895	5.77
B2-D16-P4	-	-	-	-
B3-D19-P0	46.753	167.094	-	-
B3-D19-P1	56.007	170.557	173.656	3.10
B3-D19-P2	58.532	181.481	202.816	3.47
B3-D19-P3	49.279	134.660	312.094	6.33
B3-D19-P4	46.744	126.544	343.326	7.34

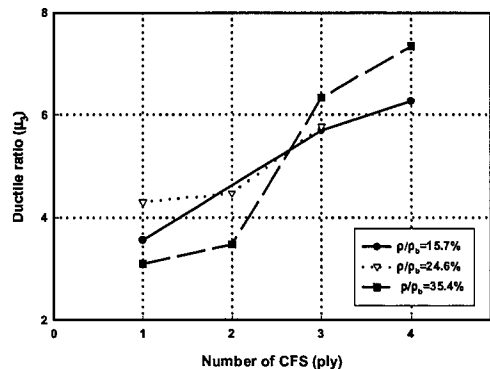


Fig. 13 연성지수  $\mu_3$



## 5. 결론

탄소섬유시트로 보강된 철근콘크리트 보의 거동 중에서 연성에 대한 거동을 실험적으로 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 보강된 보와 보강되지 않은 보는 연성의 측면에서 다른 거동을 한다는 것이 확인되었다.
- 2) 하중-처짐 곡선을 이용하여 인장철근비에 따른 연성거동을 살펴본 결과, 최대하중시까지를 기준으로 한다면 인장철근비가 증가할수록 연성은 감소하였으나, 탄소섬유시트로 보강된 보에서 실질적인 보강성능은 탄소섬유시트가 파단되는 순간까지 유효하므로, 탄소섬유시트의 파단 시점을 기준으로 한다면 인장철근비가 증가할수록 연성능력은 더 향상됨을 알 수 있었다.
- 3) 보강계수에 따른 연성효과를 살펴보면, 인장철근비가 작은 경우에는 보강 시험체의 연성효과가 무보강 시험체에 비해 감소하고 있으나, 인장철근비가 큰 경우에는 보강계수가 늘어날수록 최대하중 이후의 거동은 보다 연성적으로 나타났다.
- 4) 연성지수를 이용하여 탄소섬유시트 파단시까지의 연성거동을 살펴본 결과, 인장철근비가 크고 보강계수가 증가할수록 연성은 더 향상됨을 알 수 있었으며, 이는 하중-처짐 곡선에서의 경향과도 일치하고 있다.
- 5) 하중-처짐 곡선의 면적을 이용하여 구한 연성효과도 위의 다른 두 방법으로 구한 연성효과와 일치하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.
- 6) 향후 인장철근비와 보강계수의 변화에 따른 연성변화의 증감을 정확히 규명하기 위해서는 더 많은 양의 실험이 필요할 것으로 생각되며, 보강보의 휨강도와 연성의 관계를 결정지움으로써 합리적인 보강설계에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. Philip A. Ritchie, David A. Thomas, Le-Wu Lu, and Guy M. Connelly, "External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics", ACI Structural Journal July-August 1991, pp. 490-500
2. Y. N. Ziraba, M. H. Baluch, I. A. Basunbul, A. M. Sharif, A. K. Azad, and G. J. Al-Sulaimani, "Guidelines toward the Design of Reinforced Concrete Beams with External Plates", ACI Structural Journal November -December 1994, pp. 639-646
3. Hota V. S. GangaRao, and P. V. Vijay, "Bending Behavior of Concrete Beams Wrapped with Carbon Fabric", Journal of Structural Engineering, January 1998, pp. 3-10
4. Alfarabi Sharif, G. J. Al-Sulaimani, I. A. Basunbul, M. H. Baluch, and B. N. Ghaleb, "Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates", ACI Structural Journal, March-April 1994, pp.160-168
5. Blume, J. A., Newman, M. M., and Corning L. H., "Design of Multi-Story Reinforced Concrete Buildings for Earthquake Motions", Portland Cement Assn., 1961
6. 신영수, 홍기선, 최완철, 홍영균, "탄소섬유시트로 밀면 보강된 철근콘크리트보의 구조적 거동", 대한건축학회논문집 11권8호 통권82호 1995년 8월, pp. 249-257
7. 오용복, "철근콘크리트 보의 외부보강된 접착으로 인한 보강효과에 관한 연구", 서울대 대학원 박사학위논문, 1997. 8
8. (주) 대우건설기술연구소, "한국카본 탄소섬유시트 보강보의 성능평가실험", (주) 한국카본, 1997. 11.
9. 신성우, 반병렬, 안종문, 조인철, 김영수, 조삼재, "탄소섬유시트의 보강량 및 정착길이가 RC보의 휨거동에 미치는 영향", 한국콘크리트학회 1998년 봄 학술발표회 논문집 pp. 579-584
10. 이원호, 구은숙, 이리형, "탄소섬유시트로 휨보강한 RC보의 거동에 관한 실험적 고찰", 대한건축학회논문집 14권6호 통권116호 1998년 6월, pp. 77-84

(접수일자 : 2001년 3월 30일)