

## 내부의 주름설치에 따른 탄소섬유튜브 보의 성능에 대한 실험적 연구

### An Experimental Study on the Structural Capacity of Carbon Tube Beams According to the Existence of Corrugation

윤병문\*                      박진영\*\*                      이경훈\*\*\*                      홍원기\*\*\*\*                      김희철\*\*\*\*\*  
Youn Byoung Moon    Park Jin Young    Lee Kyoung Hun    Hong Won Kee    Kim Hee Cheul

---

#### ABSTRACT

An experimental investigation was conducted to estimate the flexural behavior of circular concrete beams confined by carbon sheet tube under the loading and unloading cycles. Six specimens were produced with different layers of carbon sheets and with or without corrugations inside of tubes.

The experimental results represented that the load and displacement capacity are increased in the specimens which have increased layers of tube and have installed corrugations inside of tubes. In order to obtain enough capacity, tubes have to keep tubes at proper layers but it can not affect positively more than certain layers to increase the layers of tube.

Therefore, appropriate estimation of structural member is needed to obtain enough capacity and displacement by means of proper carbon sheet direction and layers of tube.

---

#### 1. 서 론

최근 건설기술의 발달과 더불어 건물이 고층화 및 장경간화되고 있다. 건물의 경간이 길 경우에는 구조부재 특히 보 단면의 크기가 증가하고 특히 철근콘크리트 건물의 경우 건물의 자중도 동시에 증가하게 된다. 이를 해결하기 위하여 많은 연구들이 진행되고 있으며 이들 중에서도 우수한 재료적 성질을 가지고 있는 탄소섬유를 사용한 신 소재의 개발에 대한 연구개발이 활발히

---

\* 학생회원 · 경희대학교 건축공학과, 석사과정  
\*\* 학생회원 · 경희대학교 건축공학과, 박사수료  
\*\*\* 학생회원 · 경희대학교 건축공학과, 박사수료  
\*\*\*\* 정회원 · 경희대학교 건축공학과, 교수  
\*\*\*\*\* 정회원 · 경희대학교 건축공학과, 교수

진행되고 있다.

탄소섬유는 시공이 간편하고 또한 내구성 및 내식성이 우수하며, 탄소섬유튜브를 거푸집 및 영구구조물로 사용할 경우 공사기간 단축에 의한 경제성과 탄소섬유튜브의 구속효과에 의한 부재 단면 감소 및 철근량 감소로 인한 경제성이 우수한 재료이다. 또한 탄소섬유의 중량은 철근의 자중에 비하여 약 23%정도임에도 불구하고 철근의 인장성능보다 약 10배 정도 우수한 인장성능을 보유하여 철근을 대신할 만한 재료이다.

본 연구에서는 가력과 제거를 반복으로 수행하여 원형 탄소섬유튜브로 구속된 보부재에 대한 실험을 통하여 매개변수에 따라 달라지는 시험체의 저항성능과 변형량을 분석하고, 파괴형상에 대해 비교 분석하여 보의 거동특성을 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1 재료의 물성

본 연구에서는 휨 성능을 증가시키기 위하여 보의 길이방향으로 탄소섬유를 배열할 수 있는 일방향 탄소섬유시트를 사용하였다. 시험체 튜브에 사용된 탄소섬유 및 레진의 재료특성은 표 1과 같다.

표 1. 탄소섬유 및 레진의 물성치

| 구분     | 탄소섬유(단위)                                      | 레진(단위)  |
|--------|---|---|
| 인장 강도  | 35,500(kgf/cm <sup>2</sup> )                  | 725.73(kgf/cm <sup>2</sup> )                  |
| 인장 탄성율 | 2.35 × 10 <sup>6</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 3.58 × 10 <sup>4</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| 비중     | 1.82(g/cm <sup>3</sup> )                      | -   |

### 2.2 시험체 개요

본 실험을 수행하기 위하여 탄소섬유시트 장수 및 튜브내 corrugation의 설치 유무를 주된 변수로 총 6개의 시험체를 제작하였다. 시험체의 규격은 총 길이 2.5m, 순지간 2.1m, 직경 30cm이다. 탄소섬유튜브의 보 시험체를 제작하기 위하여 0.5mm 두께의 일방향 탄소섬유시트를 레진으로 접합한 원형튜브를 제작하였다. 탄소섬유튜브의 시트 배열각도는 시험체의 길이방향과 평행(0°)하게 최초의 시트를 배열하였고, 두 번째 시트는 길이방향에 직각(90°)방향으로 배열하였으며, 세 번째 시트 이후는 모두 0° 방향으로 배열하여 휨성능을 증가시켰다.

표 2. 시험체별 매개변수

| 시험체 명 | 탄소섬유시트 |            |            | Corrugation | 콘크리트 압축강도                     | 순지간  |
|-------|--------|------------|------------|-------------|-------------------------------|------|
|       | 시트장수   | 튜브 두께 (mm) | $\rho$ (%) |             |                               |      |
| CB-3C | 3 장    | 1.5        | 2.01       | O           | 270<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 2.1m |
| CB-4C | 4 장    | 2.0        | 2.68       | O           |                               |      |
| CB-5C | 5 장    | 2.5        | 3.36       | O           |                               |      |
| CB-6C | 6 장    | 3.0        | 4.04       | O           |                               |      |
| CB-3  | 3 장    | 1.5        | 2.01       | X           |                               |      |
| CB-5  | 5 장    | 2.5        | 3.36       | X           |                               |      |

$$*ρ = \frac{\text{탄소섬유튜브 단면적}}{\text{콘크리트보 단면적}}$$

탄소섬유튜브와 내부 콘크리트의 slip을 방지하기 위하여, 탄소섬유튜브 내부에 폭 30mm, 간격 150mm 의 Corrugation을 설치하였다. Corrugation의 영향을 평가하기 위하여 Corrugation이 있는 4개의 시험체(1.5mm, 2.0mm, 2.5mm, 3.0mm)와 Corrugation이 없는 2개의 시험체(1.5mm, 2.5mm)에 대한 실험을 수행하였다. 표 2는 각각의 시험체별 매개변수이다.

### 2.3 실험 방법

본 연구에서는 탄소섬유튜브의 두께에 따른 구속효과와 탄소섬유튜브 내부에 설치된 Corrugation의 영향을 평가하기 위하여 그림 1에서와 같이 보의 중앙에서 1점 재하하였다. 시험체에 재하된 하중은 100tonf 용량의 오일잭을 이용하였다. 변위계는 시험체의 중앙 하부에 설치하여 일정변위를 기준으로 가력과 제거를 반복으로 실험을 수행하여 시험체의 응력상태, 균열양상, 영구변위 등을 확인하였다.

그림 2는 시험체에 부착된 게이지의 설치 위치를 나타내고 있다. 보의 축 방향으로 1축 게이지를 사용하였으며 전단변형이 발생할 수 있는 단부는 2축 및 3축 게이지를 사용하였다. 또한 시험체의 단부에는 두 개의 dial gauge를 설치하여 탄소섬유튜브 내부 콘크리트의 slip을 측정하였다.

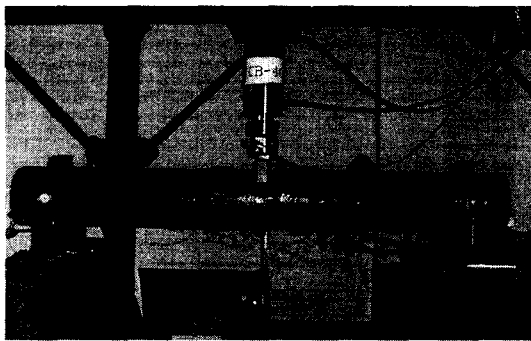


그림 1. 시험체 세팅

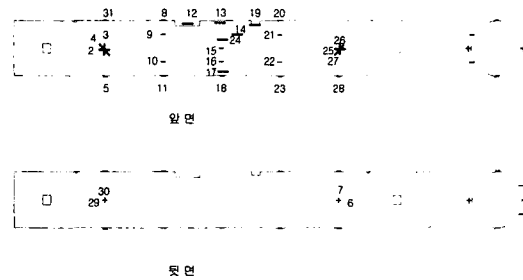


그림 2. 시험체의 게이지 위치

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 하중-변위 관계

탄소섬유튜브 보의 구조성능은 튜브가 파단되어 탄소섬유시트와 콘크리트 모두 구조적인 기능을 상실할 때까지 확보된다고 할 수 있다. 그러나 탄소섬유시트는 파단 직전까지 탄성적 성질을 보이다가 최대강도에 도달하면 갑자기 파단하는 취성적인 재료이고, 최대강도 이후에 탄소섬유튜브를 구성하는 탄소섬유시트와 레진 사이의 부착강도 역시 저하된다.

모든 시험체에서 탄성거동이 일정기간 나타난 후 소성거동을 나타내었다. 또한, 반복가력에 의한 강성저하가 발생하여 변형량의 증가가 나타났다. 각 탄소섬유튜브 시험체의 최대내력은

CB-6C 시험체가 29.7 tonf으로 가장 크게 나타났고, 변위는 CB-3 시험체가 170.3 mm로 가장 크게 나타났다. 그림 3, 4는 각각 CB-3과 CB-3C 시험체의 가력중인 사진을 나타낸 것이다.

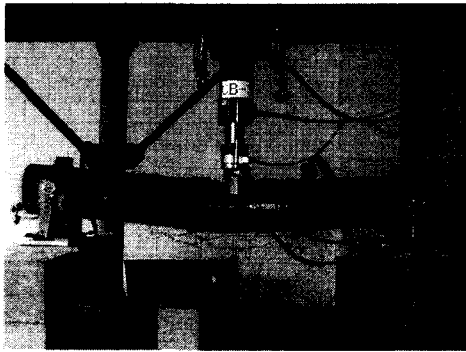


그림 3. CB-3 시험체 실험

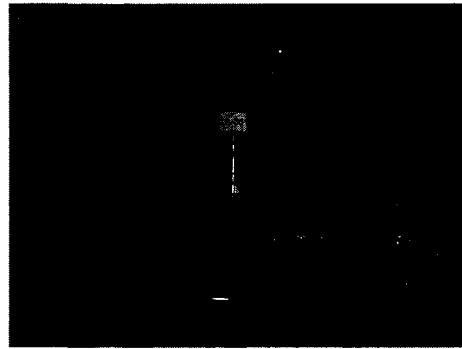


그림 4. CB-3C 시험체 실험

Corrugation이 없는 시험체의 경우 탄소섬유시트 두께가 1mm(2장) 증가할 때 최대내력은 16% 증가하였다. Corrugation이 있는 시험체의 경우에도 탄소섬유시트 두께가 0.5mm(1장), 1.5mm(3장) 증가할 때 최대내력은 각각 35.5%, 40.7%의 최대내력 증가가 나타났다. 따라서, 최대내력의 경우 탄소섬유시트 두께가 증가할수록 내력이 증가하는 것으로 나타났다.

최대변위는 Corrugation이 없는 시험체의 경우 탄소섬유시트 두께가 1mm(2장) 증가할 때 최대변위가 오히려 감소하는 것으로 나타났으며, 내부 콘크리트의 slip 현상과 부재의 항복이 조기에 발생하여 최대내력에 도달하기 전에 항복한 것을 알 수 있었다. Corrugation이 있는 시험체의 경우 탄소섬유시트 두께가 0.5mm(1장) 증가할 때 최대변위가 현저히 증가하는 것으로 나타났지만, 그 이상 탄소섬유시트 두께가 증가하면 최대변위에 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 탄소섬유튜브 시험체의 균열이 실험 진행중 시험체의 길이방향으로 발생하여 일정 두께 이상에서는 탄소섬유튜브 시험체의 전체적인 변형능력을 저하시키는 것이 그 원인인 것으로 사료된다.

탄소섬유시트 두께가 1.5mm 시험체의 경우 Corrugation이 있는 시험체가 Corrugation이 없는 시험체에 비하여 내력은 16.6% 증가하였으며, 최대변위는 오히려 감소한 것으로 나타났다. 탄소섬유시트 두께가 2.5mm 시험체의 경우 Corrugation이 있는 시험체가 Corrugation이 없는 시험체에 비하여 내력의 증가는 없는 것으로 나타났으며, 최대변위는 감소한 것으로 나타났다. 이러한 현상은 CB-5C 시험체의 실험 진행중 조기에 시험체의 길이방향으로 균열이 발생하여 시험체의 전체적인 내력 및 변형능력을 저하시키는 것이 그 원인인 것으로 예측된다.

### 3.2 파괴 양상

그림 3은 각 시험체의 파괴 양상을 그림으로 나타낸 것이다. 파괴 양상은 개구부에서 시작된 수직 균열과 길이방향 탄소섬유시트의 전단 균열로 크게 두가지 양상으로 분류할 수 있다. CB-3C 시험체는 최대내력과 변위가 수직 균열의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

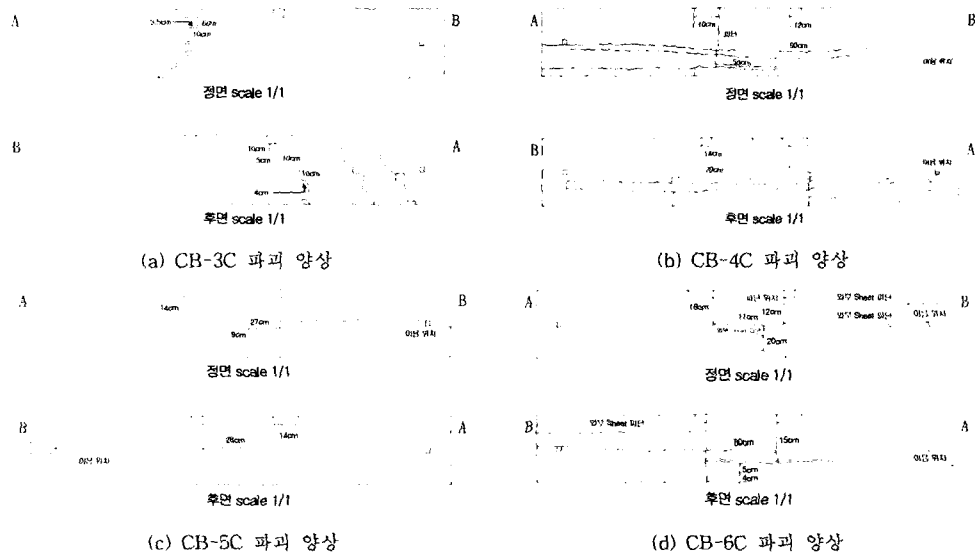


그림 5. 각 시험체별 파괴 양상

CB-4C 시험체는 수직 균열과 길이방향 균열의 영향을 동시에 받는 것으로 나타났다. CB-5C, CB-6C 시험체의 균열양상을 살펴본 결과 내력이 증가함에 따라 전단에 저항하는 90° 방향 시트의 부족으로 인하여 시험체 길이방향의 균열이 조기에 발생하여, 시험체의 전체적인 내력 및 변형 능력을 저하시키는 것으로 나타났다. 그림 9와 10은 각각 CB-3C와 CB-5C 시험체의 균열을 보여주고 있다.

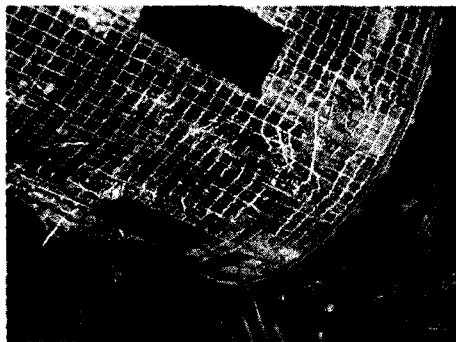


그림 6. CB-3C 시험체 균열

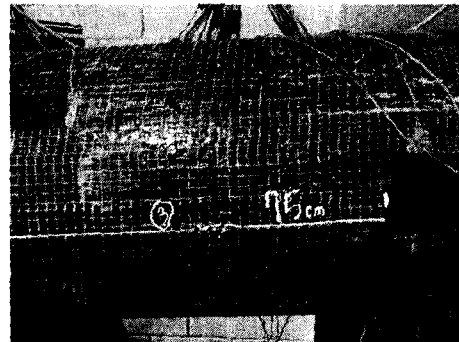


그림 7. CB-5C 시험체 균열

#### 4. 결론

본 연구에서는 탄소섬유시트 두께와 Corrugation의 설치 유무를 주된 변수로 탄소섬유튜브 원형 콘크리트 보 부재의 가력과 제거를 반복으로 실험을 수행하고 이에 따른 결과를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) Corrugation이 있는 시험체의 경우, 탄소섬유시트의 두께가 증가할수록 최대내력이 증가하

는 것으로 나타났으며 CB-6C 시험체의 경우 CB-3C 시험체의 최대내력보다 40.7%의 내력이 향상되었음을 알 수 있다.

(2) Corrugation이 없는 시험체의 경우, 내부콘크리트의 slip과 부재의 항복이 조기에 발생하여 구조부재로서의 사용은 적합하지 않음을 알 수 있다.

(3) 탄소섬유시트의 두께가 일정한 경우, Corrugation이 없는 시험체에 비하여 Corrugation이 있는 시험체의 내력의 증가가 현저함을 알 수 있다.

(4) CB-5C, CB-6C 시험체의 경우, 내력 및 변형량을 저하시키는 원인인 길이 방향의 균열을 방지하기 위하여 전단방향(90°)의 탄소섬유시트가 추가로 요구됨을 알 수 있다.

### 참고문헌

1. 김희철, 홍원기, "Carbon Shell System을 이용한 무근 콘크리트 시스템(보,기둥 및 보-기둥 접합부)의 개발", 2003년 건설교통부 산학연 공동연구 개발사업 2차년도 보고서, 2003.
2. 윤석환, "축하중 및 횡하중에 의한 콘크리트 충전 탄소섬유튜브 기둥의 거동", 박사학위논문, 경희대학교, 2003.
3. 이용택, 나정민, 이리형, "탄소섬유시트 또는 강판으로 휨보강된 철근콘크리트 보의 유한요소해석", 대한건축학회논문집 구조계 제18권, 12호, 2002, pp.11-18.
4. D. Kachlakev, D.D. McCurry, "Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates", Composites Part B Vol.31, 2000, pp.445-452
5. Y. Sato, S. Fujii, Y. Seto, and T. Fujii, "Structural Behavior of Composite Reinforced Concrete Members Encased by Continuous Fiber-Mesh Reinforced Mortar Permanent Forms", Fiber Reinforced Polymer Reinforcements, 1999, pp.113-124
6. A. Mirmiran, M. Shahawy, and C. Ei Khoury, "Failure of Over-Reinforced Hybrid Fiber Reinforced Polymer Concrete Beam Columns", Fiber Reinforced Polymer Reinforcements, 1999, pp.125-134