

탄소섬유관으로 구속된 무근 원형 보의 휨성능에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Flexural Capacity of Circular Concrete Beam Confined by Carbon Fiber Tubes

이경훈¹⁾ · 김희철²⁾ · 홍원기³⁾ · 이영학⁴⁾

Lee, Kyoung-Hun · Kim, Hee-Cheul · Hong, Won-Kee · Lee, Young-Hak

국문 요약 >> 탄소섬유관으로 구속된 원형 무근콘크리트 부재는 콘크리트에 효과적인 횡구속을 제공하며, 섬유는 우수한 역학적 성질로 인하여 기존의 철근을 대체할 수 있는 우수한 합성부재이다. 본 논문에서는 탄소섬유관으로 구속된 원형 무근콘크리트 보에 관한 실험 및 해석연구를 실시하였다. 실험연구에서 시험체는 두께 1.5mm(3장), 2.0mm(4장), 2.5mm(5장) 및 3.0mm(6장)를 변수로 하여 실험을 실시하였다. 구속된 콘크리트의 압축강도를 예측하는 식을 이용하여 본 연구에서는 탄소섬유 관으로 구속된 원형 무근 콘크리트 보의 휨성능을 예측하는 실험식을 제안하였다.

주요어 탄소섬유관, 무근 콘크리트, 원형 보

ABSTRACT >> Experiments for circular unreinforced concrete beams confined by carbon fiber tubes (CFT) made of carbon fiber sheets were performed. Selected test parameter was thickness of carbon fiber tube: 1.5mm (3 layers), 2.0mm (4 layers), 2.5mm (5 layers), and 3.0mm (6 layers). Based on the test results, an equation for estimating moment capacity of the circular beams confined by carbon fiber tubes was proposed. Comparison results showed good agreement up to 2.5mm (5 sheets) of the CFT thickness.

Key words carbon fiber tube (CFT), unreinforced concrete, circular section beam

1. 서론

탄소섬유시트는 인장강도가 매우 큰 FRP(Fiber Reinforced Polymer)재료로써 철근의 인장강도보다 약 10배 정도 우수한 인장성능을 보유하고 있다. 현재, 탄소섬유시트로 제작된 구조부재를 건물의 신축공사에 적용한 경우는 드물지만 노후 구조물이나 자연재해 등의 피해로 인하여 성능이 저하된 구조물의 보수 및 보강에는 널리 적용되고 있다. 또한, 탄소섬유시트의 우수한 인장성능은 보수 및 보강을 위한 재료로서 뿐만 아니라, 일반합성구조 재료로서의 역할로의 확장 역시 가능하게 한다.

기둥의 횡구속에 의한 압축강도 향상을 평가하는 실험적,

해석적 연구는 많은 연구자들에 의해 수행되어져 왔다. Mander 등⁽¹⁾은 원형기둥의 나선철근이나 띠철근의 횡구속 압에 의한 압축강도 식을 제안하였으며, Saafi 등⁽²⁾은 탄소 섬유와 유리섬유로 횡구속된 실험결과를 회귀분석하여 축 방향 압축강도와 횡구속 압 사이의 관계를 밝히는 새로운 제안식을 발표하였다. 국내에서는 탄소섬유 와인딩공법으로 제작된 탄소섬유관으로 횡구속된 원형기둥의 압축강도 실험을 수행한 후 작성한 실험식이 홍원기와 김희철⁽³⁾에 의하여 제안되었으며, 한상훈과 홍기남⁽⁴⁾은 탄소섬유시트로 횡구속된 각형 RC 기둥의 압축강도 예측식을 제안하였다. 그리고 이경훈 등은 탄소섬유관으로 구속된 원형기둥의 압축 성능 평가실험을 수행하여 구속압으로 향상된 콘크리트의 압축강도를 예측하는 실험식을 제안하였다.⁽⁵⁾ 일반적으로 철근콘크리트 보의 휨성능이 상대적으로 우수하며 콘크리트 타설을 위한 거푸집의 성형이 용이한 각형단면이 원형에 비하여 많이 사용되고 있다. 하지만 탄소섬유시트를 사용할 경우, 시트의 특성상 각형으로 성형하여 콘크리트를 타설하는 것은 그 형상을 유지하기가 어려울 뿐만 아니라 구속효과를

¹⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 연구박사

²⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 교수

(대표저자: kimhc@khu.ac.kr)

³⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 부교수

⁴⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 전임강사

본 논문에 대한 토의를 2007년 4월 30일까지 학회에 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 2. 22 / 심사종료일 : 2006. 10. 24)

크게 기대할 수 없고 또한 원형에 비해 완전한 채움이 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 탄소섬유관으로 구축된 보의 초기실험 연구의 일환으로써, 비교적 성형이 용이하고 상대적으로 우수한 구속효과 등을 기대할 수 있고 또한 뛰어난 인장성능을 지닌 원형 탄소섬유관을 사용하여 원형 보를 제작하여 휨 실험을 수행하였다.

2. 실험

2.1 시험체 계획

원형 탄소섬유관의 제작을 위하여 그림 1(a)와 같이 원형 몰드를 제작한 후 탈형을 용이하게 하기 위한 골판지를 씌운다. 그림 1(b)는 골판지 위에 얇은 필름지를 씌워 골판지에 시트가 달라붙는 것을 방지하며 그 위에 유리보강섬유(Glass fiber reinforced polymer: GFRP) 소재의 주름(corrugation)을 먼저 적층시킨 그림이다. 적층된 주름이 고르게 튜브에 부착될 수 있도록 얇은 FRP 시트 한 장을 그림 1(c)와 같이 적층한 후 그림 1(d)~그림 1(f)와 같은 공정으로 제작하고자 하는 각도에 맞게 시트를 절단하여 적층하고 상온에서 2~3일 정도 양생하여 탄소섬유관을 완성한다. 실제구조물을 축

조하는 경우에는 관을 눕힌 상태에서 콘크리트를 타설해야 하지만 본 실험에서는 제작 상의 편의를 위하여 수직타설 후 가로방향으로 눕혀서 양생을 시켰다.

탄소섬유관 내부에서 콘크리트의 디끄러짐을 방지하기 위한 주름을 그림 2와 같이 설치하는 경우, 콘크리트와 주름의 전단력은 식 (1)과 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

콘크리트의 전단력

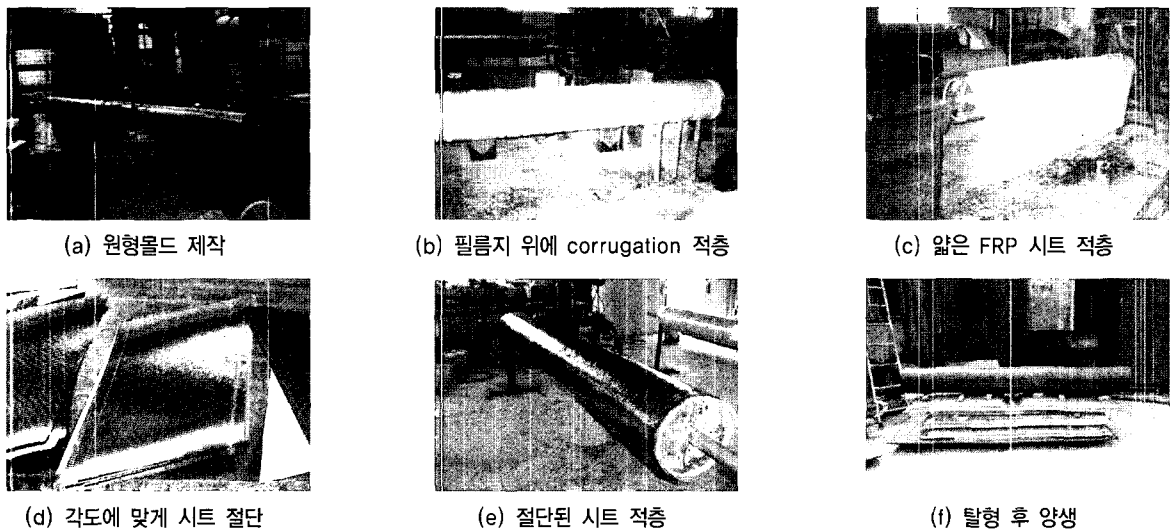
$$V_c = 0.53 \sqrt{f_c'} a_1 (2\pi r_1) \tag{1}$$

주름의 전단력

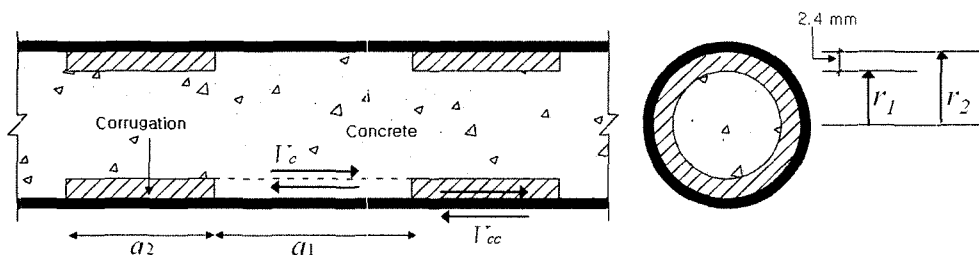
$$V_\alpha = f_{cr} a_2 (2\pi r_2) \tag{2}$$

본 논문에서 사용된 수식의 기호에 대한 설명은 부록에 표기하였다. 주름의 설계는 식 (3)과 같이 하중가력 시 주름 사이의 콘크리트가 전단에 의한 파괴에 도달할 때까지 주름과 탄소섬유관이 서로 이탈되지 않도록 충분한 부착 폭을 확보하였다. 식 (3)의 조건을 만족시키며 시험체제작의 편리성과 안정성을 고려하여 $a_1/a_2=5$ 로 주름을 설계하였으며, 주름의 관 내부에서의 전개 및 단면은 그림 3과 같다.

$$0.53 \sqrt{f_c'} a_1 (2\pi r_1) \leq f_{cr} a_2 (2\pi r_2) \tag{3}$$



〈그림 1〉 카본시트를 이용한 원형튜브의 제작과정

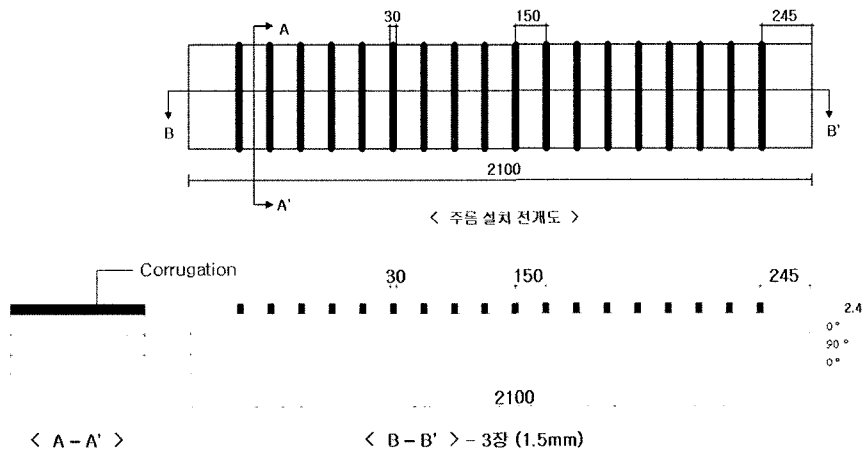


〈그림 2〉 주름과 콘크리트의 전단력

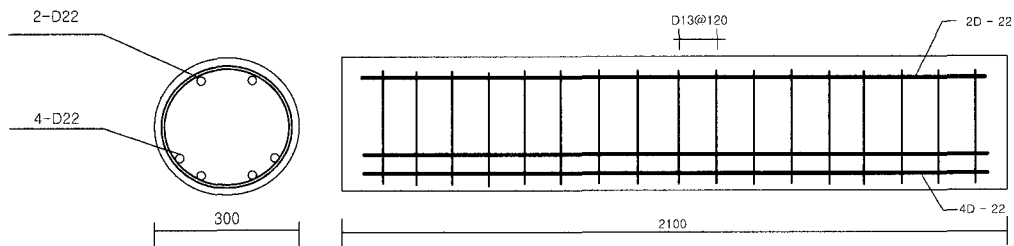
여기서, $\frac{a_1}{a_2} \leq 11.483$ 로 나타낼 수 있다.

보 시험체 제작에 사용된 탄소섬유시트는 섬유가 일 방향으로 배열된 시트를 사용하였으며 탄소섬유관의 두께(시트의 장수)에 따라 $\Phi 30\text{cm} \times 210\text{cm}$ (지름 \times 길이) 크기의 4개의 시험체와 내부주름의 미끄러짐 영향을 비교하기 위하여 내부주름이 없는 2개를 포함하여 전체 6개의 시험체를 제작하였다. 탄소섬유시트의 배열을 보면 최초에는 시험체의 길이 방향(0°)으로 한 장을 배치하고 그 위에 길이방향과 수직인 방향(90°)으로 두 번째 탄소섬유시트를 배열하여 휨과 전단에 저항할 수 있도록 배치한 후, 보의 휨 성능을 극대화시키기 위하여 세 번째 시트부터는 모두 길이방향으로 배치하여

3장, 4장, 5장, 6장의 탄소섬유시트로 구성된 탄소섬유관을 제작하였다. 시험체 제작에 사용된 콘크리트의 공칭압축강도는 26.5MPa 이었다. 또한 탄소섬유관으로 구축된 무근 시험체의 성능을 비교평가하기 위해서 그림 4와 같이 인장측에 4-D22 철근을, 압축측에 2-D22 철근을 배근한 RC 시험체를 제작하였다. 이때 인장측 철근비는 2.2%이며 피철근은 D13 철근을 사용하였다. 시험체의 개요 및 탄소섬유시트의 재료적 특성은 표 1에 정리하였다. 하중은 980kN 용량의 정적가력기를 이용하여 그림 5와 같이 보 중앙부에서 가력하였으며 가력패턴은 최초 10mm를 가력한 후 하중을 제거하고 다음 가력 시 10mm의 증분을 갖는 변위제어 방식을 채택하였다.



〈그림 3〉 탄소섬유관 내부의 주름



〈그림 4〉 RC 시험체 배근도

〈표 1〉 보 시험체의 개요

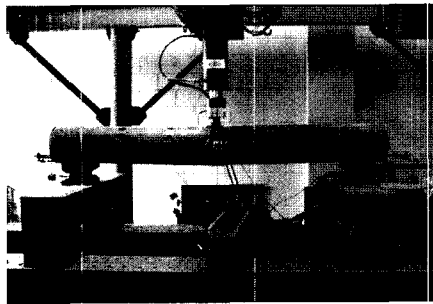
시험체명	탄소섬유관의 두께(시트장수)	콘크리트 압축강도	탄소섬유시트의 인장강도	탄소섬유시트의 인장탄성률	시험체 길이
CB3C	1.5mm(3장)	26.5MPa	4,657.3MPa	1.19×10^6	2.1m
CB4C	2.0mm(4장)				
CB5C	2.5mm(5장)				
CB6C	3.0mm(6장)				
CB3	1.5mm(3장)				
CB5	2.5mm(5장)				
RC	-				

2.2 실험결과

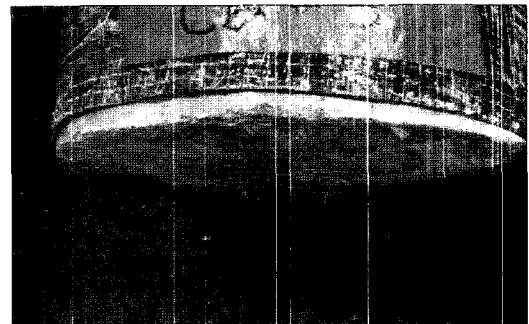
그림 6은 CB4C 시험체의 거동을 나타낸 그래프로써 여섯 번째 사이클인 60mm에 도달할 때까지는 내력이 증가하다가 그 후에는 하중의 증가 없이 변위만 증가하는 소성거동이 매우 뚜렷하게 나타났음을 알 수 있었다. 그림 7은 관내부에 주름이 있는 시험체와 없는 시험체의 거동을 비교하기 위하여 작성한 그래프이다. 그림 7을 비롯한 관내부에 주름이 있는 시험체는 RC 시험체의 최대내력보다 약 10~70% 정도 크게 나타났으며, 변위는 RC 시험체의 최대변위의 약 61~66% 정도 나타난 반면 주름이 없는 시험체의 경우에는 가력초기에 관내부의 콘크리트가 붕괴되어 그림 8과 같이 튜브가장자리에서 밀려나오며 변위만 증가되었을 뿐 내력은 매우 낮게 측정되었다. 그리고 그림 9는 모든 시험체의 하중-변위곡선을 나타낸 그래프로써 관내부에 주름이 없는

CB3 및 CB5 시험체는 RC 시험체의 내력보다 낮게 나타났음을 알 수 있었다. 반면 관내부에 주름이 설치된 시험체들은 철근이 전혀 배근되어있지 않음에도 내부 콘크리트의 미끄러짐을 주름이 적절하게 구속하여 시험체의 내력이 RC 시험체보다 높게 나타났음을 알 수 있었다. 특히 CB4C 시험체의 경우에는 최대변위 또한 RC 시험체보다 14% 증가되는 양상이 나타남으로써 아주 높은 연성능력을 보유하고 있음을 알 수 있었으며 각 시험체의 최대내력 및 최대변위는 표 2와 같다.

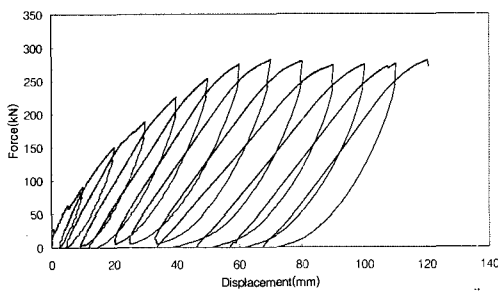
각 적용하중에 대한 변위는 보의 중앙부에 설치된 LVDT를 통하여 측정하였으며, 균열의 진행상황과 파괴상황은 디지털 카메라 및 캠코더를 이용하여 매 사이클마다 촬영하였다. 실험이 진행되는 동안 적용하중과 측정된 변위를 연속적으로 플로팅하면서 하중의 변화 그리고 강도와 강성의 저하 및 최종 파괴상황을 검토하였다. 또한 시험체에 균열이



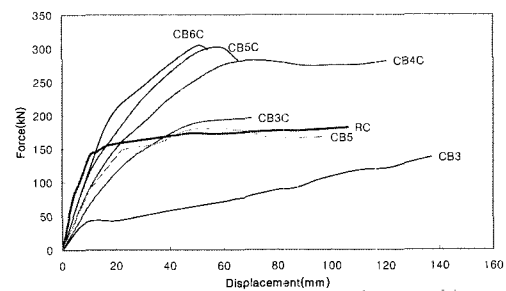
〈그림 5〉 보 실험 전경



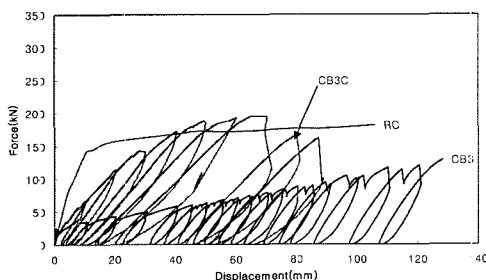
〈그림 8〉 주름 없는 보의 미끌림 현상



〈그림 6〉 CB4C 시험체의 하중-변위 곡선



〈그림 9〉 전체 시험체의 거동 비교



〈그림 7〉 CB3 및 CB3C 시험체의 거동

〈표 2〉 보 시험체의 최대하중

시험체 명	최대내력(kN)	최대변위(mm)
CB3C	195.7	70.2
CB4C	281.0	120.3
CB5C	302.0	65.1
CB6C	304.0	54.1
CB3	128.6	128.2
CB5	177.2	65.6
RC	181.6	106.0

발생하는 시점을 기준으로 다섯 차례 가력을 멈추어 그때의 하중과 변위량 및 균열양상을 관찰하였다.

3. 탄소섬유관으로 구속된 보의 해석

원형 보 단면의 압축응력을 계산하기 위해서는 콘크리트가 탄성범위에 머물러 있는 부분과 균열이 발생한 후의 부분으로 나누어야 한다. 일반적인 콘크리트의 파괴 시의 변형률은 0.003이지만 콘크리트가 최대압축응력에 도달할 때의 변형률은 0.002로써, 하중이 증가하는 이 구간에서의 압축응력은 Popovics에 의해 제안된 식 (4)를 사용하였고, 콘크리트에 균열이 발생한 후 구속에 의한 압축응력의 계산은 구속된 기둥의 실험결과로 제안된 식 (5)⁽³⁾를 사용하여 탄소섬유관으로 구속된 콘크리트의 압축응력을 계산하였다.

$$f_c = f_{co} \frac{xr}{r-1+xr} \quad (4)$$

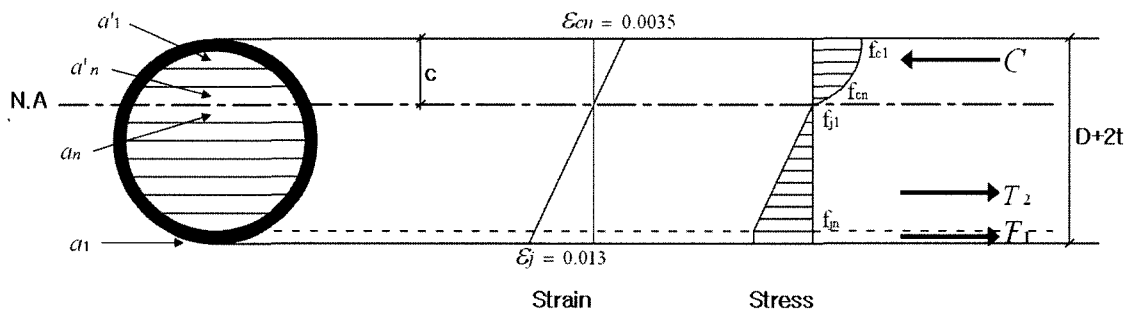
$$f_{cc} = f_{co} \left(1 + 3.34\theta^{0.83} \left(\frac{f_l}{f_{co}}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \quad (5)$$

$$f_l = k_c \left(2 \frac{t_j}{D} f_j\right) \quad (6)$$

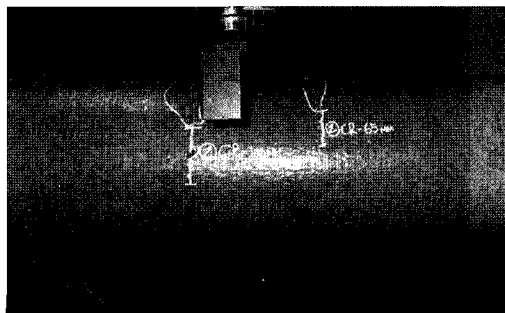
여기서 f_c 는 콘크리트의 압축응력, f_l 은 횡구속압, $x = \epsilon_c / \epsilon_{co}$, $r = E_c / (E_c - E_{sec})$ 을 나타낸다.

실험을 수행하여 작성한 보 단면의 응력 및 변형도는 그림 10과 같다. 본 실험에 앞서 수행되었던 탄소섬유시트의 재료실험을 통하여 얻은 시트의 축방향 인장변형률은 0.013이었다.⁽⁶⁾ 보 시험체 실험결과, 탄소섬유관의 인장축에 균열이 발생하기 전에 그림 11(a)와 같이 가력부위인 압축측에 먼저 균열이 발생하였으며 그림 11(b)와 같이 균열이 진행됨에 따라 시험체의 내력이 감소되었는데, 그때의 압축측 및 인장측 탄소섬유관의 변형률은 각각 0.0035와 0.009였다. 이러한 균열양상은 압축측 탄소섬유관과 콘크리트에 균열이 발생한 후에도 인장측 탄소섬유관은 최대변형률에 도달하지 않아 철근 콘크리트 부재의 전형적인 균열양상과 유사한 거동을 보임을 알 수 있다.

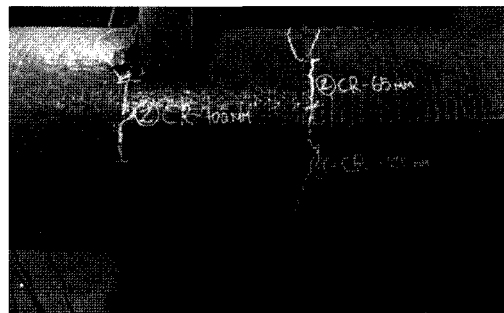
식 (7)은 압축과 인장을 받는 보 단면의 공칭모멘트를 계산하는 일반식이며 식 (8)과 식 (9)는 각각 압축측과 인장측의 모멘트를 구하는 식으로써 계산의 정확도를 높이기 위하여 그림 10의 보 단면을 아주 얇은 n 개의 층(layer)으로 나누어 각 층의 면적에 응력을 곱하여 압축력과 인장력을 계산하였다. 각 층의 중심에서 계산된 힘들은 중립축까지의 거리를 곱하여 그 합을 단면의 공칭모멘트로 산출하였다. 이와 같은 수학적 해법을 통하여 식 (10)과 같이 탄소섬유관으로 구속된 원형 보의 공칭모멘트를 예측하는 식을 마련하였다.



〈그림 10〉 원형 보의 응력과 변형률



(a) 압축측에서 균열발생



(b) 발생된 균열의 진행

〈그림 11〉 시험체의 균열진행

$$M_n = M_c + M_t \quad (7)$$

$$M_c = \int_{D/2-c}^{D/2} \left[y - \frac{D}{2-c} \right] f_c(y) b(y) dy \quad (8)$$

$$M_t = \int_{D/2-c}^{D/2} \left[y - \frac{D}{2-c} \right] f_t(y) t(y) dy \quad (9)$$

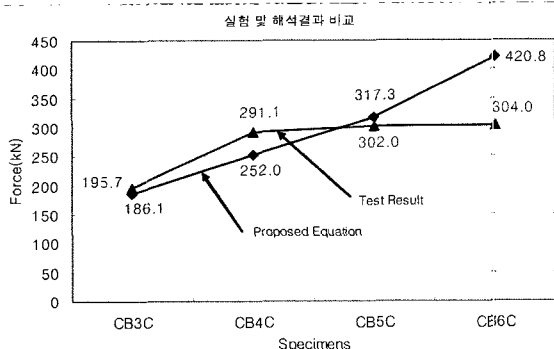
$$M_n = \int_{D/2-c}^{D/2} \left[y - \frac{D}{2-c} \right] f_c(y) b(y) dy + \int_{-(D/2+t)}^{D/2-c} \left[y - \frac{D}{2-c} \right] f_t(y) t(y) dy \quad (10)$$

식 (10)을 이용하여 시험체의 성능을 예측한 결과와 실험 결과를 비교한 그래프를 그림 12와 같이 나타내었다. 그림 12를 살펴보면 시트의 장수가 5장인 경우까지는 예측값과 실험값 사이의 차이가 크지 않은 반면 탄소섬유시트의 장수가 6장인 경우에는 두 값의 차이가 큼을 알 수 있었다. 제안 식 결과는 관의 두께에 따라 그 값이 비례적으로 증가하지만 실제 실험결과를 살펴보면 5장 이후의 경우 내력증가양상이 두드러지게 감소되었다. 시험체의 균열은 전술한 바와 같이 압축측에서 먼저 발생하게 되는데 이때 인장측 탄소섬유가 최대변형률에 도달하지 않았음에도 내력은 증가하지 않고 변위만 증가하는 소성거동이 나타나게 된다. 따라서 탄소섬유시트를 이용하여 무근 보를 제작하는 경우에는 전단보강을 위한 90°방향의 시트 한 장을 포함하여 3장의 탄소섬유시트를 최대유효장수로 사용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

4. 결 언

탄소섬유관으로 구속된 무근콘크리트 원형 보의 실험연구를 통하여 거동 특성을 파악하였으며 연구결과는 다음과 같다.

(1) 탄소섬유관 내부에 주름을 설치하여 제작한 무근 콘크



〈그림 12〉 실험 및 해석결과의 비교

리트 보의 내력은 RC 보의 최대내력 보다 약 1.08~1.67 배 향상되었으며, 철근이 전혀 배근되어있지 않았음에도 CB4C 시험체의 경우에는 RC 보의 최대변위보다 약 1.14 배 정도 향상된 변위가 측정되었다. 이는 기존의 복잡한 철근배근 작업을 간소화하면서도 구조성능은 향상시킬 수 있는 새로운 구조시스템의 장점이라고 할 수 있다.

- (2) 탄소섬유관 내부에 주름이 없는 시험체의 경우에는 미끄러짐 현상으로 인하여 내력증가 없이 가력초기에 변위만 증가하는 현상이 발생했기 때문에 구조부재로 사용하기에는 적합하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 탄소섬유관과 내부의 콘크리트 사이의 미끄러짐을 방지하기 위한 주름의 설치는 필수적이며 본 연구를 통하여 주름의 구조적 기여를 입증하였다.
- (3) 탄소섬유 관으로 구속된 원형 보의 변형률에 따라 구속 효과가 적은 $0 \leq \varepsilon_{cc} \leq 0.002$ 구간에서는 Popovics에 의하여 제안된 식을, 구속효과가 증가되는 $0.002 \leq \varepsilon_{cc} \leq 0.009$ 구간에서는 구속된 원형 콘크리트의 압축강도 식을 이용하여 탄소섬유 관으로 구속된 원형 무근 콘크리트 보의 휨성능을 예측하는 실험식[본문 식 (10)]을 제안하였다.

향후 추가연구과제로는 주름의 간격을 보다 다양하게 제작한 탄소섬유시트를 적용한 시험체를 제작·실험하여, 휨내력에 미치는 주름의 영향을 고려하여 제안된 휨성능 예측식을 보다 발전시켜 다양한 조건에 적용가능하게 하는 것을 들 수 있다. 또한 각형 보에 대한 실험 및 해석에 대한 연구로 발전시켜야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 Brain Korea 21(BK21) 2단계 사업과 2001년도 건설교통부 국책과제인 “Carbon Shell System을 이용한 무근콘크리트 시스템의 개발(2001-자유A-05)” 연구과제의 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- Mander, J.B., Priestley, M.J.N., Park, R. "Theoretical stress-strain model for confined concrete," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, August, 1988, pp. 1804-1825.
- Mohamed Saafi, Houssam A. Toutanji, and Zongjin Li, "Behavior of Concrete Columns Confined with Fiber Reinforced Polymer Tubes," *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 4, July-August 1999, pp. 500-509.

3. Hong, Won-Kee and Kim, Hee-Cheul, "Behavior of concrete columns confined by carbon composite tube," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 31(2), pp. 178-188, 2004.
4. 한상훈, 홍기남, "탄소섬유시트로 구속된 RC 기둥의 일축압축 거동", 구조물진단학회논문집, 제 9권 제 2호, 2005년 4월, pp. 207-216.
5. 이경훈, 김희철, 홍원기, "카본시트튜브로 구속된 압축재의 성능평가", 구조물진단학회논문집, 제 10권 제 3호, 2006년 5월, pp. 152-158.
6. 이경훈, "카본시트튜브로 구속된 원형기둥의 성능평가를 위한 실험연구", 박사학위논문, 경희대학교, 2005년 2월.

부록 : 기호정리

a_1, a_2	: 주름의 순간격 및 폭
E_c	: 콘크리트의 탄성계수
E_j	: 탄소섬유시트의 인장탄성률
E_{sec}	: 콘크리트의 시컨트(secant) 탄성계수
f'_c	: 콘크리트의 압축강도
f_c	: Popovics 의해 제안된 콘크리트의 압축강도
f_{cc}	: 구속된 콘크리트의 압축강도
f_{co}	: 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도
f_{cr}	: 주름과 튜브사이의 부착강도
f_j	: 탄소섬유시트의 인장강도
f_l	: 구속에 의한 횡구속압
k_e	: 유효횡구속압계수(원형, $k_e=1$)
M_c, M_t	: 압축 및 인장측 단면의 공칭모멘트
r_1, r_2	: 주름 및 관의 내경
t_j, D	: 탄소섬유관의 두께 및 내경
V_c	: 콘크리트의 전단력
V_{cc}	: 탄소섬유관과 주름사이의 전단력
ϵ_c	: 축방향 변형률
ϵ_{cc}	: 구속된 콘크리트의 축방향 변형률
ϵ_{co}	: 콘크리트의 최대강도에서의 변형률