

# 탄소섬유쉬트로 횡구속된 콘크리트의 강도 증진에 관한 연구

## A Study on the Enhancement of Strength of Laterally Confined Concrete by Carbon-Fiber Sheet

정 신 옥<sup>\*</sup>      류    천<sup>\*\*</sup>      김 의 성<sup>\*\*\*</sup>      김 화 일<sup>\*</sup>      김 상 섭<sup>\*\*\*\*</sup>  
Jeong, Sin-Uk    Ryu, Cheon    Kim, Eu-Sung    Kim, Wha-Il    Kim, Sang-Seup

---

### ABSTRACT

In this study, we studied the compression test of laterally confined concrete cylinder by the carbon-fiber sheet(CFS), and compared the test results with previous test results and relationships by other researchers. Our objectives is to find the stress-strain characteristics and the enhancement of strength of the confined concrete to the lateral pressure offered by CFS.

---

### 1. 서 론

#### 1.1 배경 및 목적

철근 콘크리트 구조물은 오랫동안 인간활동의 바탕이 되는 건물을 이루는 재료로 사용되어 왔다. 그러나, 최근들어 재료적, 시공적, 환경적 요인에 의해 구조물의 내력이 부족한 경우가 발생되어 구조물의 보수 및 보강이 점차로 늘어나는 추세이다.

기존의 보강 공법으로는 강판 접착 공법 및 콘크리트 증타설 공법 등이 사용되었으나, 시공의 불편함, 접착 및 정착 방법, 그리고 지속적인 통제 및 공사 기간의 장기화로 인한 사용자의 불편함이 문제점으로 지적되어 왔다. 따라서 보다 간편하고 안전하게 건물을 보수, 보강할 수 있는 방법으로 탄소섬

- 
- 1) \* 동부건설(주) 기술연구소 사원
  - 2) \*\* 정회원, 동부건설(주) 기술연구소 과장
  - 3) \*\*\* 정회원, 동부건설(주) 기술연구소 이사
  - 4) \*\*\*\* 정회원, 한국기술교육대학 조교수

유쉬트(Carbon Fiber Sheet, CFS)를 사용한 보강 방법이 대두되고 있다. 하지만, 이 공법에 대한 기존의 연구는 철근콘크리트보의 역학적 특성과 휨에 대한 성능을 파악하기 위한 실험이 대부분이었다.

따라서, 본 논문에서는 탄소섬유쉬트에 의해 보강된 기둥의 압축성능을 파악하기 위한 예비실험으로 탄소섬유쉬트에 의해 횡구속된 콘크리트 공시체의 압축강도 실험을 실시하고, 기존의 3축 응력을 받는 콘크리트의 거동 특성을 연구한 실험들과 비교, 분석하여 탄소섬유쉬트의 횡구속 효과에 의한 콘크리트 압축강도의 증진 효과를 알아보았다.

## 1.2 기존 연구 고찰

많은 구조적 상황들 속에서 콘크리트는 여러 방향에서 작용하는 수직응력도와 전단응력도를 받지만, 이러한 복합적인 응력 상태는 서로 수직인 면에 작용하는 세 개의 주응력도로 감소하여 3축응력상태에 놓이게 된다. 일반적으로 횡구속에 의해 3축 압축상태에 놓인 콘크리트의 강도와 콘크리트는 1축 압축상태의 콘크리트보다 상당히 증가하는 것으로 밝혀졌다.

Richart, Brandtzaeg와 Brown<sup>2)</sup>은, 낮은 압력 범위에서 유압에 의해 횡구속된 원주형 콘크리트의 압축 강도 시험을 통하여, 축방향 압축강도와 횡구속압 사이에, 계수비가 4.1인 선형 관계가 있음을 밝혀내었고, 이 식은 나선철근에 의해 횡구속된 콘크리트에도 근사적으로 적용할 수 있음을 보여주었다.

Balmer<sup>5)</sup>는 보다 높은 압력 범위까지의 유압에 의해 횡구속된 원주형 콘크리트의 압축 강도 시험을 통하여, 선형식은 축방향 압축강도와 횡구속압 사이의 관계를 정의하는데 적절하지 못하며, Mohr원의 파괴 곡선(failure envelope)를 설명하기 위해 멱함수식을 제안하였다. 또한 높은 압력에 의한 횡구속의 경우, 최대 강도 이후의 변형연화구간을 보이지 않고, 일축압축강도 이후 지속적인 경화구간을 거쳐 파괴시 최대 강도에 도달함을 보여주었다.<sup>3)</sup>

Iyengar<sup>6)</sup>는 철근에 의해 횡구속된 다양한 형태의 콘크리트 압축 강도 시험에 의해, 나선 철근에 의해 횡구속된 원주형 콘크리트는 유압에 의해 횡구속된 콘크리트의 거동과 유사하다는 결론을 얻어냈으며, 선형관계식에서 횡구속압을 위한 계수로 4.6을 제안하였다.

Park 등에<sup>2),6)</sup> 의하면, 나선철근에 의한 횡구속은 1축 압축 강도 이전에는 콘크리트에 거의 영향을 주지 않고, 그 이상의 응력에서 큰 영향을 주는 수동적 구속(passive confinement)을 보여준다. 또한, 수동적 구속은 강도보다는 변형도에서 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

지금까지 알아 본 바와 같이, 횡구속의 콘크리트 강도에 대한 영향을 밝히고자 하는 연구들은 유압에 의한 횡구속과 횡방향 철근에 의한 횡구속을 중심으로 이루어졌다. 따라서, 본 논문에서는 CFS에 의한 횡구속 콘크리트의 역학적 성능에 미치는 영향을 알아보고, 기존의 3축 응력 상태의 모델들과의 비교, 분석을 통하여 강도의 증진 효과를 알아보려고 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 계획 및 시험체 제작

CFS로 횡보강된 콘크리트의 최대강도, 변형도, 연성 등을 알아보기 위해, CFS의 횡보강 매수를 변수로 하여 총 40개의 100×200mm 원주형 공시체를 제작하였다. 이때, CFS의 보강 매수는 실제 철근콘크리트 구조부재의 국내의 보수, 보강의 일반적인 사례를 고려하여 3매까지로 하였다. 그리고, 콘크리트 타설 과정에서의 변수를 고려하여, 배치 횟수와 타설일자도 고려하여 공시체를 제작하였다. 이렇게 계획된 시험체의 종류는 표4, 표5와 같다.

콘크리트 공시체를 제작하기 위한 콘크리트 배합비는 1회의 시험배합을 실시하여 표1과 같이 계획하

였으며, 시멘트는 국내 S사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를, 세골재로는 대평리산 강모래, 조골재로는 추부산 쇠석 10mm를 사용하였다. 또한 소요 슬럼프를 확보하기 위해 나프탈렌계의 고성능감수제를 사용하였다.

공시체의 보강을 위해 사용된 CFS는 일본 미쯔비시사의 REPLARK 제품 20KR 타입으로, 역학적 성질은 표2과 같으며, 부착재료인 에폭시 레진과 프라이머도 미쯔비시사에 의해 제공되었다. CFS의 인장시험결과, 인장강도는  $41.186\text{kgf/cm}^2$ , 탄성계수는  $2.72 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ , 연신율은 1.544%로 미쯔비시 측이 제공한 자료보다 모두 상회하는 것으로 나타났다.

표1. 콘크리트 배합비

W/B (%)	조골재 최대치수 (mm)	목표 슬럼프 (cm)	SP (%)	S/A (%)	W (%)	절대용적 ( $\ell/\text{m}^3$ )			단위중량 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )		
						C	S	G	C	S	G
50	10	12±3	0.2	40	190	121	272	407	380	699	1,050

표2. 탄소섬유슈트(CFS)의 역학적 성질

인장강도 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	인장탄성계수 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	설계용 휨인장 기준강도 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	단위폭당 CF 단면적 ( $\text{cm}^2/\text{m}$ )	허용 휨인장 용력도 ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )	단위면적당 CF 중량 ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )
35,000 이상	$2.4 \times 10^6$	25,000	1.11	11,100	200

CFS 보강 시험체를 제작하기 위해, 소정의 재령까지  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ 의 표준 수중 양생을 거친 공시체는 표3의 공정을 거쳐 CFS로 보강되었다. 이때, 보강을 위한 CFS의 접착이음길이는 기존의 연구결과를 참조하여 10cm로 하였으며, 불연속적으로 보강되는 CFS가 2매 이상인 공시체의 경우에는 접착이음의 위치를 공시체 중심을 기준으로 대각선 위치로 하여 인장력에 취약한 이음부를 고루 분산시켰다.

보강 공정을 거친 공시체는 다시  $23^\circ\text{C}$ 에서 1주간,  $10^\circ\text{C}$ 에서 약 2주간 충분한 양생을 한 후, 실험을 실시하였다.

표3. CFS 보강 공정

공정	내용
콘크리트 표면 처리	표면 수정, 균열 보수, 모재 청결, 건조
프라이머 공정	혼합(주제와 경화제의 중량 혼합비=2:1), 도포, 경화
퍼티 처리 공정	혼합(주제와 경화제의 중량 혼합비=1:1), 충전
CFS 부착/함침	에폭시 혼합, 1차 도포, 부착, 함침, 2차 도포
기포제거/마감	가압 함침

## 2.2 실험 결과 분석

CFS로 보강된 시험체는, 최대용력 후 변형연화구간에서의 거동을 관찰하기 위해  $400\text{kgf}/\text{cm}^2$  이하에서는 초당  $0.4\text{kgf}/\text{cm}^2$ 으로, 그 이상에서는 초당  $0.2\text{kgf}/\text{cm}^2$ 으로 시험체의 파괴시까지 압축력이 가력되었으며, Data Logger에 의해 축방향 변형도와 원주 변형도(circumferential strain)가 연속적으로 기록되었다. 전 시험체의 CFS 파괴형태를 비교 관찰한 결과, 거의 모든 시험체에서 CFS에 콘크리트가 부착되어 있고, CFS의 파단 위치도 접착 이음 부위와 무관하게 발생한 것으로 보아, 본 연구에서 채택된 CFS의 보강공정에 대한 시공성은 신뢰도가 높은 것으로 확인되었다. 따라서, 본 절에서는 보강매수에



그림1. 시험체의 대표적 파괴 형태

표4. 무보강 콘크리트 공시체의 최대 압축강도, 최대 축방향 변형도

시험체명	개수	최대 압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	최대 축 변형도 (×10 <sup>-3</sup> )
1-1S0	2	411	1934
1-3S0	2	487	2186
1-4S0	2	432	3059
2-1S0	2	441	2255
2-2S0	2	430	2198
평균		440	2326

표5. CFS 보강 시험체의 최대 압축강도, 최대 축방향 변형도

보강형태	시험체명	개수	최대 압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	최대 축 변형도 (×10 <sup>-3</sup> )	$f_u/f'_c$	$\epsilon_u/\epsilon_c$
1매 보강	1-1S1	3	625	9422	1.42	4.05
	1-2S1	3	626	13320	1.42	5.73
	1-4S1	3	609	13309	1.38	5.72
	2-3S1	3	685	11406	1.56	4.90
	평균		636	11864	1.45	5.10
2매 보강	1-2S2	3	1004	23019	2.28	9.90
	1-3S2	3	976	21099	2.22	9.07
	2-1S2	3	975	25526	2.22	10.97
	2-3S2	3	1050	23982	2.39	10.31
	평균		1001	23407	2.28	10.06
3매 보강	2-2S3	3	1246	21403	2.83	9.20
	2-4S3	3	1231	21002	2.80	9.02
	평균		1239	21203	2.82	9.12

\* 시험체명 표기방법 : a-bSc a: 타설 일자, b: 배치 번호, S: CFS, c: 보강매수

\*\* 동일 타입들의 평균값으로 표기

의한 횡압을 변수로 하여 응력도-변형도 곡선상의 특징에 대해 알아 보았다.

각 시험체들의 대표적인 파괴형태는 사진1과 같으며, 무보강 콘크리트 공시체의 최대 압축 강도  $f_c'$  와 최대 축방향 변형도  $\epsilon_c$ 는 표4에, CFS 보강 시험체의 최대 압축강도  $f_u$ 와 최대 축방향 변형도  $\epsilon_u$ , 그리고 이들 값의 무보강 공시체 값에 대한 비는 표5에 나타나 있다. 그리고, 각 타입별 응력도-변형도 곡선의 대표적인 형태는 그림2와 같다. 그림2에서 선정된 응력도-변형도 곡선은 각 타입별로 평균 응력도와 변형도에 가까운 시험체의 응력도-변형도 곡선으로 하였으며, 변형도의 양의 값은 시험체의 축방향 변형도를, 음의 값은 CFS의 횡방향 인장 변형도를 나타낸다.

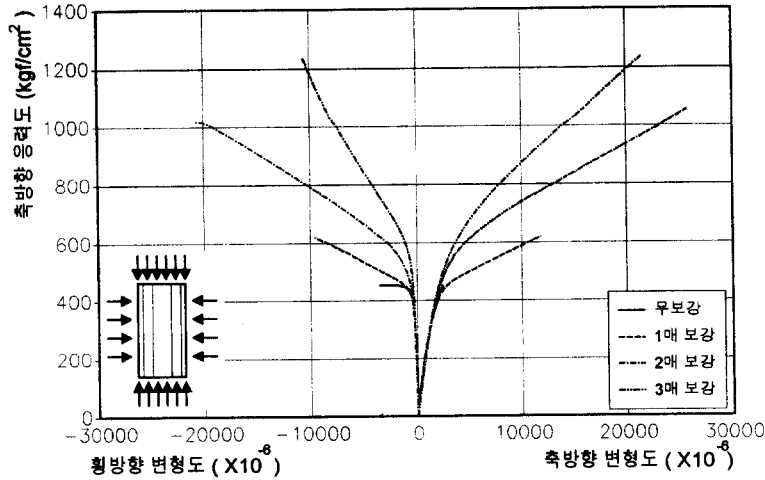


그림2. 각 타입별 응력도-변형도 곡선

### 2.2.1 응력도-변형도 곡선

그림2에서 보는 바와 같이, CFS에 의한 횡구속은 강도와 연성도를 모두 개선시킨다. CFS에 의한 횡구속 콘크리트의 응력도-변형도 특성을 알아 보면 다음과 같다.

CFS에 의해 횡구속된 시험체의 거동은 항복 이후에 변형도 연화 구간을 가지지 않고 파괴점에서 최대 압축강도를 가지는 비교적 취성적인 거동을 보여준다. 이는 최대 강도 이후에 변형도 연화 구간을 가지는 나선철근에 의한 횡구속 효과<sup>3),6)</sup>와 다른 양상인데, CFS 재료의 취성적인 특성과, 높은 횡구속압하에서의 콘크리트의 거동을 연구한 Balmer의 연구결과<sup>3)</sup>에서 볼 수 있듯이, CFS에 의해 제공된 높은 횡구속압 때문이라 사료된다.

그림2의 축방향 응력도-변형도 곡선과 이에 따른 CFS의 원주 변형도를 관찰해 보면, CFS의 횡구속 효과는 무보강 콘크리트의 일축압축강도까지는 별 영향을 미치지 않고, 항복 이후의 응력도와 변형도에 큰 영향을 미침을 볼 수 있다. 이는 CFS에 의한 횡구속이 나선철근에 의한 횡구속과 마찬가지로 수동적 구속(passive confinement) 작용을 하기 때문으로, 초기 탄성 계수에 영향을 미치는 유압에 의한 횡구속과는 다른 거동을 보임을 알 수 있다.

### 2.2.2 응력도와 변형도에 대한 영향

CFS의 보강매수에 대한 최대강도와 변형도의 증가비를 보다 자세히 나타내면 각각 그림3, 그림4와 같다. 이때, 보강매수에 대한 강도, 변형도의 비는 무보강 콘크리트의 최대강도, 최대 변형도에 의해 무차원화된 비로서 표현되었다. 표5와 그림3, 그림4에서 CFS의 횡구속에 의한 강도와 변형도의 증진 효과를 비교해 보면, 횡구속에 의한 강도의 증진보다는 변형도의 증진 효과가 훨씬 큰 것으로 관찰된다. 이러한 거동은 다른 매개물(유압, 횡방향 후프철근 등)에 의해 횡구속된 콘크리트의 거동과 유사

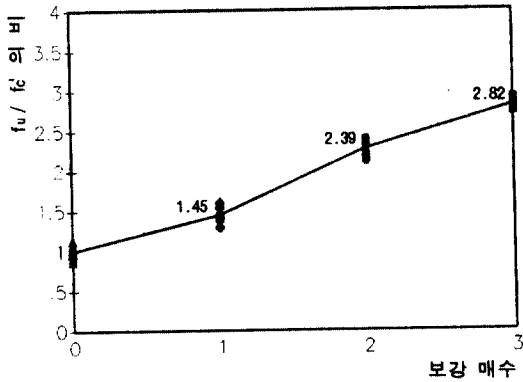


그림3. 최대강도-CFS 보강매수의 관계

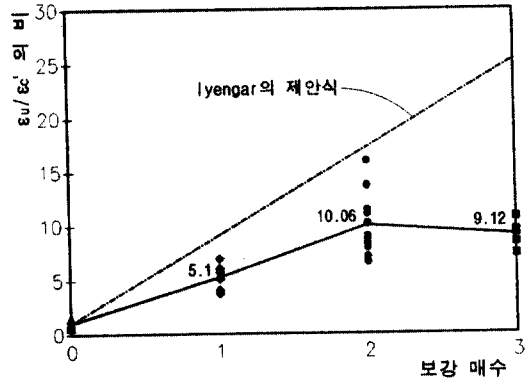


그림4. 최대변형도-CFS 보강매수의 관계

하며, 지진하중과 같은 반복하중에 대해 구조물의 소요 연성도를 확보하기 위해서는 횡구속이 상당한 효과를 발휘할 수 있음을 보여준다.

그림4에서 최대변형도와 보강매수의 관계를 살펴보면, 보강매수 2매까지는 최대변형도가 거의 선형으로 증가하다가 3매에 이르러서는 다시 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 횡구속 매질로 사용된 CFS의 재료적 특성 때문이라 사료된다. 즉, 취성적 성질을 가진 CFS가 일정량 이상에서는 콘크리트의 횡변위를 억제하고, 최대강도에 이르러 급작스런 파괴를 일으키기 때문이라 생각되는데, 이러한 양상은 그림2의 각 시험체별 파괴 형태를 살펴보면 알 수 있다.

CFS에 의한 횡구속의 변형도에 대한 영향을 살펴보기 위해, 나선철근에 의해 횡구속된 콘크리트의 변형도의 증진 효과와 비교를 하였다. Iyengar는 나선철근에 의해 횡구속된 콘크리트의 압축 실험 결과로부터, 나선철근에 의해 제공된 횡압과 변형도 사이에 다음과 같은 관계가 있다고 제안하였다.<sup>6)</sup>

$$\epsilon_u/\epsilon_c = 1 + 46.0 \frac{f_l}{f_c} \quad (1)$$

Iyengar의 제안식에 의한 변형도와 실험값을 비교해보면, 나선철근에 의한 횡구속이 CFS에 의한 횡구속보다 더 큰 연성을 제공함을 알 수 있다. 나선철근에 의한 횡구속의 경우, 제공된 철근이 변형연화구간을 가지기 때문에 최대강도에 이르러 나선철근이 항복한 이후에도 구속 콘크리트는 변형연화구간을 가지며 큰 값까지 변형을 일으키는데 반해, CFS는 취성적 성질을 가지고 있기 때문이라 사료된다. 따라서, 횡구속 콘크리트의 변형도 특성은 횡구속 매질에 의해 그 거동 특성이 달라진다는 것을 알 수 있다. 하지만, 보다 일반적인 경향을 파악하기 위해서는, 이보다 많은 양의 CFS가 제공되었을 경우의 거동에 대한 연구가 진행되어야 할 것이라 판단된다.

일반적으로 후프 철근이나 나선철근에 의한 콘크리트 기둥의 구속은 강도의 증진보다는 연성도의 증진에 더 큰 영향을 제공하기 때문에<sup>2)</sup>, 횡구속에 의한 변형도 증진에 더 큰 관심이 있을 수 있다. 하지만, CFS에 의한 보강은 연성도보다는 추가적인 강도를 제공하는데 그 목적이 있기 때문에 다음 절에서는 CFS 보강에 의한 강도의 증진 효과를 기존의 제안식과 비교하여 살펴보겠다.

### 3. CFS 횡구속의 강도에 대한 효과

#### 3.1 CFS의 횡구속 메카니즘

횡구속 콘크리트의 압축강도와 변형도의 증가는 콘크리트의 횡팽창에 대한 CFS의 저항성능에 기인한다. 콘크리트의 축방향 응력도가 증가함에 따라, CFS에 의해 콘크리트에 횡압력(lateral pressure)이

작용하게 되고, 이는 구속 콘크리트의 축방향 응력도와 횡압이 소성평형을 이루는 최대 하중까지 계속된다. 이 단계 이상에서의 변형에너지는 CFS의 변형에 의해 흡수되어 CFS의 파단으로 구속 콘크리트는 파괴에 이르게 된다. 이때, CFS의 변형이 전체 길이를 따라 균일하다고 가정하면, CFS는 전 길이에 걸쳐 균일한 후프 응력(hoop stress)을 받게 되고, 이 후프 응력이 항복 응력도에 도달할 때, 콘크리트에 최대 횡압을 제공하게 된다. 따라서, CFS에 의해 콘크리트에 제공되는 횡압  $f_1$ 은 다음과 같이 계산된다.<sup>2)</sup>

$$f_1 = \frac{2 f_{y, cfs} A_{cfs}}{hd} \quad (2)$$

여기서,  $A_{cfs}$  : CFS의 단면적 ( $=0.22\text{cm}^2$ )

$f_{y, cfs}$  : CFS의 항복강도 ( $=3500\text{kgf/cm}^2$ )

$h$  : CFS의 보강높이 (cm)

$d$  : CFS에 의해 구속된 콘크리트의 직경 (cm)

### 3.2 횡압과 압축강도의 관계

일반적으로, 횡구속 콘크리트의 압축 강도에 영향을 미치는 변수로는 횡구속 매질의 항복강도, 구속 콘크리트의 부피에 대한 횡구속 매질의 부피 비, 무보강 콘크리트의 강도 등이 있다. 본 연구에서는 앞의 두 변수의 영향을 고려하기 위해 CFS의 보강 매수를 식(2)에 의해 횡압으로 환산하였고, CFS에 의해 횡구속된 콘크리트의 압축 강도  $f_u$ 를 제공된 횡압  $f_1$ 과 무보강 콘크리트의 일축압축강도  $f'_c$ 의 관계로 표현하였다.

기존의 연구에서는 횡구속 콘크리트의 압축강도와 횡압의 관계를 설명하기 위해 일반적으로 선형 관계식과 멱함수(power function)식이 대표적으로 사용되어 왔다. Balmer<sup>5),6)</sup> 등은 높은 횡구속압의 범위까지 압축강도와 횡압의 관계를 설명하기 위해 멱함수를 사용하였는데, 이후 연구자들에 의해, 수동적 횡구속(passive confinement)에 의해 제공되는 횡구속압의 범위에서는 선형 관계식이 이를 근사하게 나타냄을 보여주었다<sup>4),6)</sup>. 따라서, 본 실험 결과들의 curve fitting으로부터, 횡구속 콘크리트의 압축강도와 횡압의 선형 관계를 나타내면 다음과 같고, 이론값과 실험 결과의 비교는 표6과 같다.

$$f_u = f'_c + 3.6f_1 \quad (3)$$

표6. 식(3)과 실험 결과의 비교

보강 매수	횡구속압 (kgf/cm <sup>2</sup> )	식(3) (kgf/cm <sup>2</sup> )	실험값 (kgf/cm <sup>2</sup> )	비교
1	77.7	679.7	636	1.07
2	155.4	959.4	1001	0.96
3	233.1	1239.2	1239	1.00

\* 식(3)/(실험값)의 비

### 3.3 기존 연구와의 비교

CFS의 횡구속에 대한 기존 연구들이 미비하기 때문에, 본 연구에서는 유압, 또는 나선철근에 의해 횡구속된 기존 실험 결과들과 비교하여, CFS 횡구속에 의한 강도 증진 정도를 살펴보았다.

본 실험 결과와 기존 실험 결과들의 직접 비교는 불가능하기 때문에, 제공된 횡압과 압축강도를 무보강 콘크리트의 일축 압축 강도의 비로 표현하여 비교하였다. 본 실험결과와의 비교를 위해 채택된 기존의 실험 결과들 및 비교는 표7과 그림5에 나타나 있다. 여기에서 각 실험 자료들은 본 실험에서

CFS에 의해 제공된 횡압의 범위내에 있는 자료들로 제한하였다.

표8. 기존 실험 결과와의 비교

연구자	횡구속 유형	횡구속압 $f_1$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	압축강도 $f_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	$f_1/f_c'$	$f_u/f_c'$	식(3)	비교 <sup>*</sup>
Balmer <sup>a)</sup>	유압	0	250	0.00	1.00	-	-
		70	730	0.28	2.92	2.01	0.69
		175	1190	0.70	4.76	3.52	0.74
		0	278	0.00	1.00	-	-
		70	752	0.25	2.71	1.90	0.70
Iyengar <sup>b)</sup>	나선철근	0	271.4	0.00	1.00	-	-
		17.3	358.9	0.06	1.32	1.22	0.92
		26.9	403.8	0.10	1.49	1.36	0.91
		46.3	491.4	0.17	1.81	1.61	0.89
Attard <sup>c)</sup>	유압	0	611.8	0.00	1.00	-	-
		10.2	683.1	0.02	1.12	1.07	0.96
		51.0	999.2	0.09	1.63	1.32	0.81
		102.0	1243.9	0.17	2.03	1.61	0.79
		152.9	1478.4	0.25	2.42	1.90	0.79
		0	1019.6	0.00	1.00	-	-
		10.2	1080.8	0.01	1.06	1.04	0.98
		51.0	1233.7	0.05	1.21	1.18	0.98
		102.0	1468.2	0.10	1.44	1.36	0.94
		152.9	1682.3	0.15	1.65	1.54	0.93

\* 각 실험값에 대한 식(3)의 비- 식(3) :  $f_u/f_c' = 1 + 3.6f_1/f_c'$

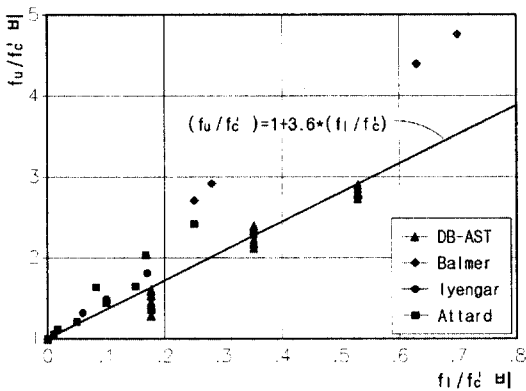


그림5. 기존 실험결과와의 비교

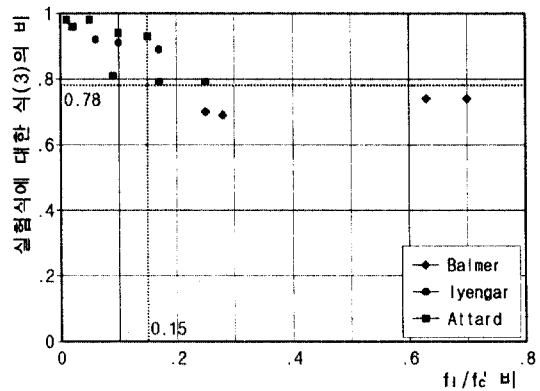


그림6. 각 실험값에 대한 식(3)의 비

표8과 그림5에 의하면, CFS에 의한 횡구속 콘크리트의 강도 증진 효과는 유압과 나선철근에 의한 횡구속 콘크리트의 강도 증진 효과보다 작음을 알 수 있다. 또한, 표8과 그림6을 보면, 아주 낮은 횡구속압에서는 식(3)이 각 실험결과에 근사한 반면, 횡구속압이 증가함에 따라 두 값 사이에 큰 오차가 남을 알 수 있다. 따라서, 본 실험에서 제공된 횡구속압의 범위인  $f_1/f_c'$  비 0.15~0.8 사이의 실험 결과와 식(3)을 비교해 보면, 그림6에서 보는 바와 같이, 이 구간에서는 각 실험값에 대한 식(3)의 비가 비교적 일정함을 알 수 있고, CFS에 의한 횡구속 콘크리트의 강도 증진 효과는 유압 또는 나선철근에



의한 강도 증진 효과의 0.78배 정도인 것으로 계산되었다.

본 실험 결과에 의한 식(3)과 기존식들의 보다 넓은 횡구속압 범위에서의 경향을 알아보기 위해, Balmer의 실험결과와 비교하였다. 본 실험 결과와의 비교를 위해 채택된 식들은 유압 및 나선철근에 의한 횡구속 콘크리트를 위해 적용된 식들이며, 다음과 같은 선형 관계식으로 되어 있다.

$$\text{Richart}^{2)} : f_u/f_c' = 1 + 4.1f_1/f_c' \quad (4)$$

$$\text{Iyengar}^{6)} : f_u/f_c' = 1 + 4.6f_1/f_c' \quad (5)$$

$$\text{Hobbs}^{4)} : f_u/f_c' = 1 + 4.8f_1/f_c' \quad (6)$$

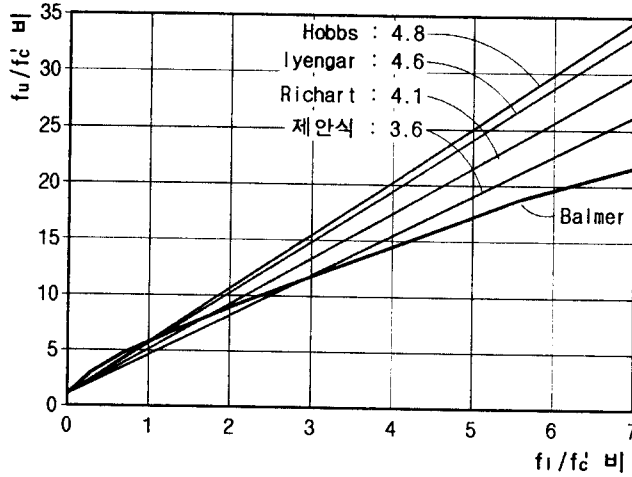


그림7. 식(3)과 기존식의 비교

이들 제안식들과 식(3)을 비교해 보면 그림7과 같다. 위 그림에 의하면, 횡구속압이 증가함에 따라 압축강도의 증가비는 감소함을 알 수 있다. 이러한 경향은 본 실험에서도 감지되었는데(그림3 참조), 식(3)과 기존의 제안식들은 높은 횡구속압에서의 이러한 경향을 설명하고 있지 못하다.

하지만, 수동적 횡구속에 의해 제공되는 횡구속압은 비교적 낮은 범위에 위치하므로, 이 범위에서는 위의 기존식들이 모두 안전측에 들며 비교적 근사한 결과를 나타내 주는 것을 볼 수 있다. 그러므로, 기존 실험 결과와의 비교에서, 본 실험의 범위내에서 CFS의 의한 횡구속 콘크리트의 강도 증진 효과는 유압 또는 나선철근에 의한 횡구속 콘크리트의 강도 증진 효과의 0.78배임을 알 수 있기 때문에, 이 값을 기존식의 계수에 대입하면, 기존식들의 적용 범위내에서 CFS를 위한 계수는 3.1~3.7정도의 값을 가지게 된다. 그러므로, 본 실험 결과에 의한 계수 3.6은 기존식들과 비교하여 CFS의 강도 증진 효과를 위한 타당한 값이라 판단된다.

본 실험 결과와 기존 연구와의 비교를 통해 특히 주목해야할 점은, Richart 및 표6에 나타난 Iyengar의 연구 결과 나선 철근에 의한 횡구속 콘크리트의 강도 증진 효과는 유압에 의한 횡구속 효과와 거의 근사하다고 하였는데 반해, CFS의 횡구속 효과는 위의 연구 결과보다 작게 나타난다는 점이다. 물론, 이에 대한 세밀한 연구가 필요하겠지만, 구조 설계자의 직관적인 판단에 의해 기존의 횡구속식으로 CFS의 강도 증진 효과를 고려하고자 할 때는 좀 더 신중을 기할 필요가 있다고 사료된다.

그리고, 위에서 언급하였듯이, 횡구속압의 증가에 따른 압축강도 증가비 및 변형도의 감소를 정확히 파악하기 위해서는 보다 넓은 횡구속압 범위를 포함하는 시험체를 제작하여 추후 지속적인 연구를 해 나가야 할 것이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 CFS에 의한 횡구속 콘크리트의 압축 강도 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) CFS에 의한 횡구속 콘크리트의 응력도-변형도 곡선은 항복 이후에 변형도 연화 구간을 가지지 않고 파괴점에서 최대 압축강도를 가지고, 강도와 연성도 모두 무보강 콘크리트에 비해 증가됨을 볼 수 있었다.

2) CFS의 보강매수에 대한 최대변형도의 관계를 살펴보면, 특정량 이후에 최대변형도는 다시 감소함을 볼 수 있었는데, 이는 보강 매질인 CFS의 취성적인 특성 때문이라 사료되며, CFS의 최대변형도에 대한 관계를 보다 명확히 밝히기 위해서는 본 실험에서 제공된 보강매수 이상에서의 거동 특성에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

3) CFS 횡구속의 강도에 대한 영향을 살펴보기위해 CFS의 항복강도, 단면적, 그리고 콘크리트의 강도를 고려하여, CFS에 의한 횡구속 콘크리트의 압축강도를 횡구속압과 무보강 콘크리트의 강도에 관한 선형식으로 표현하였으며, 이 식은 기존 실험 결과와의 비교를 위해 무보강 콘크리트의 강도에 대한 비로서 표현되었다.

$$f_u = f_c' + 3.6f_1 \quad \text{또는} \quad f_u/f_c' = 1 + 3.6f_1/f_c'$$

4) 기존의 실험 결과들과의 비교를 통하여, 본 실험에서 제공된 횡구속압의 범위인  $f_1/f_c'$ 이 0.15~0.8인 구간에서 CFS 횡구속의 강도 증진 효과는 유압 또는 나선철근에 의한 강도 증진 효과의 0.78배 정도인 것으로 밝혀졌다. 이를 기존의 제안식에 사용된 횡구속압 계수들과 비교했을 때, 본 실험에서 주어진 횡구속압 계수 3.6은 수동적 횡구속에 의해 제공되는 횡구속압의 범위내에서 타당하다고 판단된다.

#### 참고 문헌

1. 동부건설(주) 기술연구소, 『탄소섬유워트 보강 철근 콘크리트 기동의 구조특성에 관한 연구』, 서울, 1997
2. R. Park and T. Paulay, Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, New Zealand, 1975, pp. 17-30
3. W.F. Chen, "Plasticity in Reinforced Concrete", McGraw-Hill Book Company, New York, 1982, pp. 39-40
4. M.Y.H. Bangash, Concrete and Concrete Structures : Numerical Modeling and Applications, Elsevier Applied Science, London, 1989, p.33
5. G.G. Balmer, "Shearing Strength of Concrete Under High Triaxial Stress-Computation of Mohr's Envelope as a Curve", Structural Research Laboratory Report No. SP-23, U.S. Bureau of REclamation, 1949, 13pp
6. K.T.R.J. Iyengar, P. Desayi, and K.N. Reddy, "Stress-Strain Characteristics of Concrete Confined in Steel Binders", Magazine of Concrete Research, Vol.22, No.72, September 1977, pp. 173-184
7. M.M. Attard and S. Setunge, "Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Concrete", ACI Materials Jr., Sep-Oct 1996, pp. 432-442