

# 고성능 강섬유보강 콘크리트가 적용된 반복하중을 받는 이중 프리스트레스 콘크리트 보의 휨 거동

## Flexural Behavior of Dual Prestress Concrete Beams Using High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete Subjected to Cyclic Loading

박 대 효\*      윤 성 환\*\*  
Park, Taehyo    Yun, SungHwan

### ABSTRACT

This study presents results from an experimental work for two normal prestressed concrete beams and three dual prestressed concrete beams. The dual prestressed concrete beams made with normal concrete in compression zone and high performance steel fiber reinforced concrete in partial depth of tension zone.

Through cyclic loading test under low frequency, structural behavior and resistance to dynamic loading for dual prestressed concrete beams are investigated. Considerable increase of crack and yield load capacity of Dual prestressed concrete beam is shown compared with normal prestressed concrete beam. In addition, re-loading and un-loading rigidity of dual prestressed concrete beam under cyclic loading are increased comparing with normal prestressed concrete beam.

### 1. 서      론

고강도 콘크리트(high strength concrete, 이하 HSC)는 조기강도 증가, 수밀성을 통한 내구성 향상, 건조수축 및 불리딩의 감소 등 역학적 특성이 개선됨에 따라 보통강도 콘크리트에 비해 높은 압축강도를 발현하지만 압축강도에 대한 인장강도비는 고강도화 될수록 작아지며 취성적인 파괴특성을 나타낸다. 이러한 단점을 보완하기 위해 HSC에 섬유를 첨가한 섬유보강 콘크리트(fiber reinforced concrete, 이하 FRC)는 섬유의 균열 제어 작용으로 급격한 균열 진전을 억제해 연성과 인성을 증가시킬 수 있다.

Dwaranath and Nagaraj (1992)는 전체단면과 하단에서 1/2 깊이까지 강섬유를 적용한 단철근 콘크리트보에 대해서 휨강성을 비교하기 위한 실험을 수행하였다. 섬유보강 철근콘크리트보는 보통 철근콘크리트보에 비해 균열 및 극한하중이 증가되었고, 균열 발생의 진전이 억제되고 처짐이 감소됨을 보였다. 강섬유가 콘크리트 단면의 1/2 깊이까지 적용된 철근콘크리트보의 균열 및 극한하중, 휨강성이 전단면에 강섬유가 적용된 철근콘크리트보와 비교하여 큰 차이 없이 유사한 결과가 나타남을 보였다.

\* 정희원 · 한양대학교 토목공학과 교수

\*\* 정희원 · 한양대학교 토목공학과 석사과정

그러나 지금까지 수행된 연구에서는 FRC를 전단면이나 하단에서 1/2 깊이까지만 적용되었고, 보통 콘크리트에 섬유만을 적용하여 압축 및 인장강도를 효과적으로 증진시키지 못했다. 따라서 본 연구에서는 실리카 흙(silica fume)과 고로슬래그(blast-furnace slag)와 같은 미세 광물혼화재(mineral admixture)를 매트릭스에 적절하게 치환하여 치밀성을 유도하였다. 이를 통해 골재 및 보강 섬유와의 부착성능을 높여 매트릭스(모래+시멘트계 재료)가 하중지지능력(load capacity)을 유지하도록 함으로써 강도가 증진되고 초기균열 이후 콘크리트 강성 저하를 억제하는 고성능 강섬유보강 콘크리트(high performance steel fiber reinforced concrete, 이하 HPSFRC)가 적용되었다. 휨균열을 제어하고 초기균열 및 사용하중, 휨강성을 향상시키기 위해 HPSFRC를 프리스트레스보의 전단면이나 단면의 1/2 깊이가 아닌 인장부에 부분적으로 적용되었다. 경제성과 시공성에 유리한 HPSFRC 적용깊이를 도출하기 위해 각각 다른 깊이의 HPSFRC를 적용하였다. 인장부의 HPSFRC와 압축부의 보통강도 콘크리트(normal strength concrete, 이하 NSC)의 합성으로 이루어진 이중 프리스트레스 콘크리트(dual prestress concrete, 이하 DPC)보와 일반 프리스트레스 콘크리트(normal prestress concrete, 이하 NPC)보를 제작하여 낮은 진동수에서의 반복하중 실험을 통하여 동적하중에 대한 NPC와 DPC 두 보의 구조적 거동 특성(초기균열 및 사용하중, 하중-처짐 응답 등)을 비교·분석되어진다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 배합비 및 콘크리트의 역학적 특성

섬유 체적비는 ASTM C39, C78 and C496의 규정을 준수한 재료 시험을 통하여 가장 적절한 강도와 워커빌리티를 나타내는 1.5%로 선정되었고 이를 DPC 보에 적용하였다. HPSFRC의 기본 배합비는 표 1에 나타나 있고, KS F 2405, 2403, 2408 규정에 준수하여 측정된 두 콘크리트의 역학적 특성(압축강도, 할렬인장강도, 휨 인장강도)이 표 2에 나타나 있다.

표 1. 고성능 강섬유보강 콘크리트(HPSFRC)의 배합비

G <sub>max</sub> (mm)	Slump (mm)	Air (%)	W/B (%)	S/a (%)	Steel fiber V <sub>f</sub> (%)	Unit Weight ( kg/m <sup>3</sup> )						SP <sup>c</sup> (C× 2%) ( kg/m <sup>3</sup> )
						W	C	BFS <sup>a</sup>	SF <sup>b</sup>	S	G	
13	210	3.7	26	46	1.5	170	490	131	33	678	805	9.81

<sup>a</sup> BFS: blast-furnace slag

<sup>b</sup> SF: silica fume

<sup>c</sup> SP: superplasticizer

표 2. 콘크리트의 역학적 특성

Mechanical properties	NSC	HPSFRC
Compressive strength (MPa)	39.2	84
Flexural tensile strength (MPa)	5.5	14.3
Split tensile strength (MPa)	3.6	11.2
Modulus of elasticity (GPa)	29.6	37.3

### 2.2 시편 재원 및 실험방법

직사각형 단면(폭 0.6m, 높이 1.1m)을 갖는 길이 12m 인 포스트텐션 PC 보의 형상과 치수가 그림 1에 자세히 나타나 있다. HPSFRC가 각각 하단에서 200mm(DPC I), 300mm(DPC II), 400mm(DPC III) 깊이별로 적용된 3개의 DPC 보와 2개의 NPC 보를 제작하였고. 공칭직경 127mm의 강연선(SWPC 7B

7연선 12.7mm이 KS D 7002-1988 규정에 준수하여 긴장에 사용되었다. 각 긴장재(tendon)는 4개의 강연선(strand)으로 구성되어 2개씩 각 시편에 적용되었다. 각 긴장재 헤드부분에 긴장력을 확인하기 위한 하중계가 설치되었고 유압식 인장기를 이용하여 긴장이 실시되었다. 강연선 1개에 항복하중의 81%인 120 KN의 유효 긴장력이 적용되었고, 각 긴장재당 480 KN의 긴장력이 작용되었다.

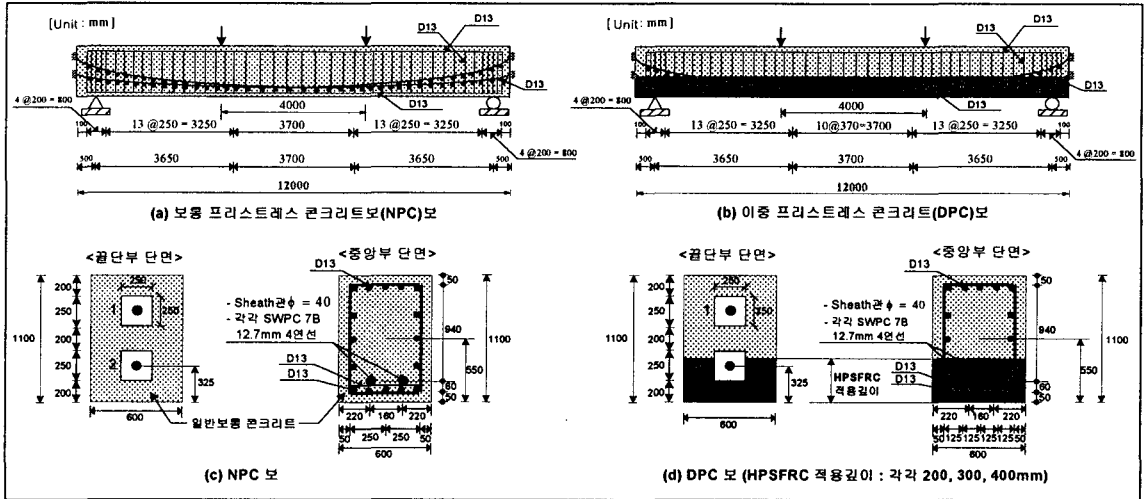
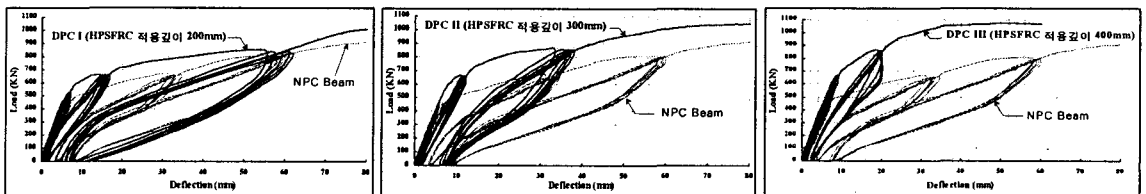


그림 1. 시편의 형상과 치수

9,810 KN 용량의 유압식 만능 시험기(U.T.M)를 통해 4점 재하 실험이 실시되었고 제작된 강재 가력보에 196 KN/min 속도의 하중제어방식으로 가력되었다. 휨강성의 뚜렷한 감소를 확인하기 위해 균열하중의 90%(1단계)와 균열하중의 110%(2단계), 균열하중과 항복하중의 중간하중(3단계), 항복하중의 90%(4단계)로 각 단계마다 5회 반복 재하한 후에 시편이 항복될 때까지 재하되었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

NPC 보와 DPC 보의 하중-처짐 곡선은 그림 2에 나타나 있다. 반복하중수준이 균열하중 이하인 경우 하중재하곡선과 하중제거곡선이 동일 직선상에 존재하였고, 반복하중수준이 균열하중을 초과할 경우 균열발생으로 인한 시편 강성 저하는 NPC 보에 비해 DPC 보에서 작게 나타났으며 그 중 DPC 보 III에서 현저히 작게 나타났다. 단계별 하중증가에 따른 잔류변형은 NPC 보에 비해 DPC 보에서 감소되었고 그 중 DPC 보 III에서 현저히 감소되었다.



(a) NPC 보와 DPC 보 I의 비교

(b) NPC 보와 DPC 보 II의 비교

(c) NPC 보와 DPC 보 III의 비교

그림 2. 시편들의 하중-처짐 곡선

NPC 보와 DPC 보의 초기균열 및 사용하중과 처짐, 초기 휨강성이 각각 표 3에 나타나 있다.

표 3. 시편 실험 결과

Beam	Precracking stage		Postcracking service-load stage		Ultimate load [KN]	Flexural rigidity [KN/mm]
	Load [KN]	Deflection [mm]	Service Load [KN]	Deflection [mm]		
NPC I	0~331.4	0~4.61	331.4~437.9	4.61~6.85	705	71.89
NPC II	0~328	0~4.34	328~450	4.34~6.42	734	75.58
DPC I	0~410	0~4.63	410~560	4.61~7.05	745	88.55
DPC II	0~503	0~5.68	503~620	4.61~8.8	830	88.56
DPC III	0~550	0~6.13	550~660	6.13~8.34	950	89.72

Precracking stage에서 초기균열하중이 NPC 보와 비교하여 DPC I보에서 24%, DPC 보 II에서 52%, DPC 보 III에서 67% 증가되었고, Postcracking service-load stage에서 사용하중이 NPC 보와 비교하여 DPC I 보에서 29%, DPC 보 II에서 43%, DPC 보 III에서 52%가 증가되었다. 초기 휨강성은 HPSFRC 적용깊이에 따라 DPC 보 I에서 20%, DPC 보 II에서 20%, DPC 보 III에서 22%가 증가되었다. 사용성면에서 같은 처짐에 대한 하중지지능력(load capacity)은 NPC 보와 비교하여 DPC 보 I에서 18%, DPC 보 II에서 30%, DPC 보 III에서 52%로 확연하게 증가되었다.

#### 4. 결 론

인장부에 각각 다른 깊이의 고성능 강섬유보강 콘크리트를 적용한 이중 프리스트레스 콘크리트보 는 일반 프리스트레스 콘크리트보에 비해 Precracking stage에서 초기균열하중이 증가되었고 Postcracking service-load stage에서도 이중 프리스트레스 콘크리트보의 사용하중이 현저히 증가되었다. 하중-처짐곡선에서 초기 휨강성이 증가되었고, 초기균열 이후 항복까지의 휨강성은 확연하게 증가 되었다. 그 중 HPSFRC 적용깊이가 400mm인 이중 프리스트레스 콘크리트보의 경우 초기균열 이후 휨강성이 가장 효과적으로 증가되었고 처짐이 현저히 감소되었다. 사용성면에서 같은 처짐에 대한 하중지지능력(Load Capacity)은 월등히 향상되었고 항복까지의 처짐도 현저히 감소되었다.

일반 프리스트레스 콘크리트보에 부분적으로 고성능 강섬유보강 콘크리트를 적용함으로써 초기균 열 및 극한하중의 증가, 휨강성 증가, 단계별 하중증가에 따른 강성저하 및 잔류변형의 제어 효과를 얻을 수 있었고 이는 풍하중이나 지진하중 등 반복하중을 받는 구조물의 안전성과 사용성면에서 효과 적으로 활용될 수 있고 향후 교량의 보를 장경간화 하는데 적용 가치가 높을 것으로 보인다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설교통기술혁신사업(02 산학연A03-01)의 일환으로 수행되었으며, 이에 관 계자 여러분들에게 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Dwarakanath, H.V. and Nagaraj, T.S. (1991) "Comparative study of predictions of flexural strength of steel fiber concrete", ACI Structural Journal, Vol. 88, No. 6, pp. 714-720.
2. Nawy, E.G. (2000) "Prestressed concrete : A fundamental approach", 3rd ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J
3. Padmarajaiah, S.K and Ramaswamy, A. (2002) "Flexural strength predictions of steel fiber reinforced high-strength concrete in fully/partially prestressed beam specimens", Cement & concrete composites, v.26 no.4, pp.275-290)