

# 고성능 강섬유보강 콘크리트가 적용된 I-단면 프리스트레스트 이중 콘크리트 보의 휨 거동

## Flexural Behavior of I-Section Prestressed Dual Concrete Beam Using High Performance Steel Fiber Reinforced Concrete

박 대 효\*      윤 성 환\*\*  
Park, Tae-Hyo      Yun, Sung-Hwan

### ABSTRACT

I-section prestressed concrete(I-PC) beam crack due to low tensile strength, may decrease rigidity and structural performance by excessive deflection. In an effort to this problem, in this research, I-section prestressed dual concrete(I-PDC) beam has been proposed, consisting of normal strength concrete in compression zone, and high performance steel fiber reinforced concrete(HPSFRC) with a bottom flange depth in tensile zone. Crack formation and its propagation are controlled by the HPSFRC in I-PDC beam. The initial cracking and service limit loads are increased along with the load carrying capacity and flexural stiffness.

### 1. 서론

최근 콘크리트 구조물의 비약적인 발전과 더불어 고강도 콘크리트(high strength concrete, 이하 HSC)에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. HSC는 철근과의 높은 부착성능, 수밀성을 통한 내구성 향상, 건조수축 및 블리딩의 감소 등 역학적 특성이 개선됨에 따라 보통강도 콘크리트에 비해 높은 압축강도를 발현하지만 압축강도에 대한 인장강도 비는 고강도화 될수록 작아지며 취성적인 파괴 특성을 나타낸다. 이러한 단점을 보완하기 위해 HSC에 섬유를 첨가한 섬유보강 콘크리트(fiber reinforced concrete, 이하 FRC)는 콘크리트 내부에서 성장하는 균열 면 사이를 연결하여 저항하는 균열 제어 작용으로 급격한 균열 진전을 억제하여 연성과 인성을 증가시킬 수 있다.

Padmarajaiah and Ramaswamy(2001)는 폴 프리스트레스트 콘크리트 보와 파설 프리스트레스트 콘크리트 보에 대하여 각각 전체단면과 하단에서 1/2 깊이까지 강섬유를 적용하여 실험을 수행하였다. 하단에서 1/2 깊이의 인장부에만 강섬유를 보강한 시편은 강섬유를 보강하지 않은 시편과 비교하여 극한 하중이 증가됨을 보였다. 그러나 같은 시편에서 전체단면에 강섬유를 보강한 시편과 비교하면 극한 하중이 거의 유사하게 나타남을 보였다. 따라서 섬유가 프리스트레스트 콘크리트 보의 인장부에만 보강 되어도 전단면에 걸쳐 섬유가 보강된 경우와 비교해 구조적 성능은 큰 차이 없이 유사한 결과가 나타남을 알 수 있다.

그러나 지금까지 수행된 연구에서는 FRC를 전단면이나 하단에서 1/2 깊이까지만 적용되었고, 보통

\* 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

콘크리트에 섬유만을 적용하여 압축 및 인장강도를 효과적으로 증진시키지 못했다. 따라서 본 연구에서는 실리카 폼(silica fume)과 고로슬래그(blast-furnace slag)를 매트릭스에 적절하게 치환하여 치밀성을 유도하였다. 이를 통해 골재 및 보강 섬유와의 부착성능을 높여 매트릭스가 내하력(load carrying 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. 휨 균열을 제어하고 초기균열 및 한계사용하중, 휨 강성을 향상시키기 위해 HPSFRC를 I-단면 프리스트레스트 보의 전단면이나 단면의 1/2 깊이가 아닌 인장부 하부 플랜지 깊이까지 적용되었다. 인장부 일부분의 HPSFRC와 압축부의 보통강도 콘크리트(normal strength concrete, 이하 NSC)의 합성으로 이루어진 I-단면 프리스트레스트 이중 콘크리트(I-section prestressed dual concrete, 이하 I-PDC)보와 일반 I-단면 프리스트레스트 콘크리트(I-section prestressed concrete, 이하 I-PC)보의 초기균열 및 한계사용하중, 휨 강성, 하중-처짐 응답 곡선 등 구조적 거동 특성이 비교·분석된다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 콘크리트의 역학적 특성

섬유 체적비는 ASTM C39, C78 and C496의 규정을 준수한 재료 시험을 통하여 가장 적절한 강도와 워커빌리티를 나타내는 1.5%로 선정되었다. HPSFRC의 기본 배합비는 표 1에 나타나 있고, KS F 2405, 2403, 2408 규정에 준수하여 압축강도, 활렬 인장강도, 휨 인장강도가 측정되었으며, 측정된 두 콘크리트의 역학적 특성이 표 2에 나타나 있다.

표 1 고성능 강섬유보강 콘크리트(HPSFRC)의 배합비

G <sub>max</sub> (mm)	Slump (mm)	Air (%)	W/C (%)	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	150	3.7	24.5	1.5	165	490	131	33	743	805	6.54

<sup>a</sup> BFS: blast-furnace slag      <sup>b</sup> SF: silica fume      <sup>c</sup> SP: superplasticizer(polycarboxylic acid)

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 자원 및 실험방법

I-단면(전체 높이 560mm, 상·하부 플랜지 폭 360mm, 상·하부 플랜지 높이 155mm, 복부 두께 150mm)을 갖는 길이 6.2m인 포스트텐션 PC 거더를 제작하였다. HPSFRC가 단면의 하단에서 하부 플랜지 깊이까지 적용된 I-PDC와 일반 I-PC를 제작하였고, 긴장재는 6개의 PS강연선으로 구성되어 각 시편에 적용되었다. 긴장재는 공칭직경 12.7mm의 강연선(SWPC 7B 7연선 12.7mm)이 KS D 7002-1988 규정에 의거하여 사용되었고, 강연선 1개당 항복용력의 80%인 125kN이 적용되어 긴장재에

750kN의 긴장력이 적용되었다. 긴장은 유압식 인장기를 이용하여 실시되었고, 긴장력을 확인하기 위하여 긴장재의 앵커헤드(anchor head)에 하중계가 설치되었으며, 시험 시편의 형상과 치수가 그림 1에 상세히 나타나 있다.

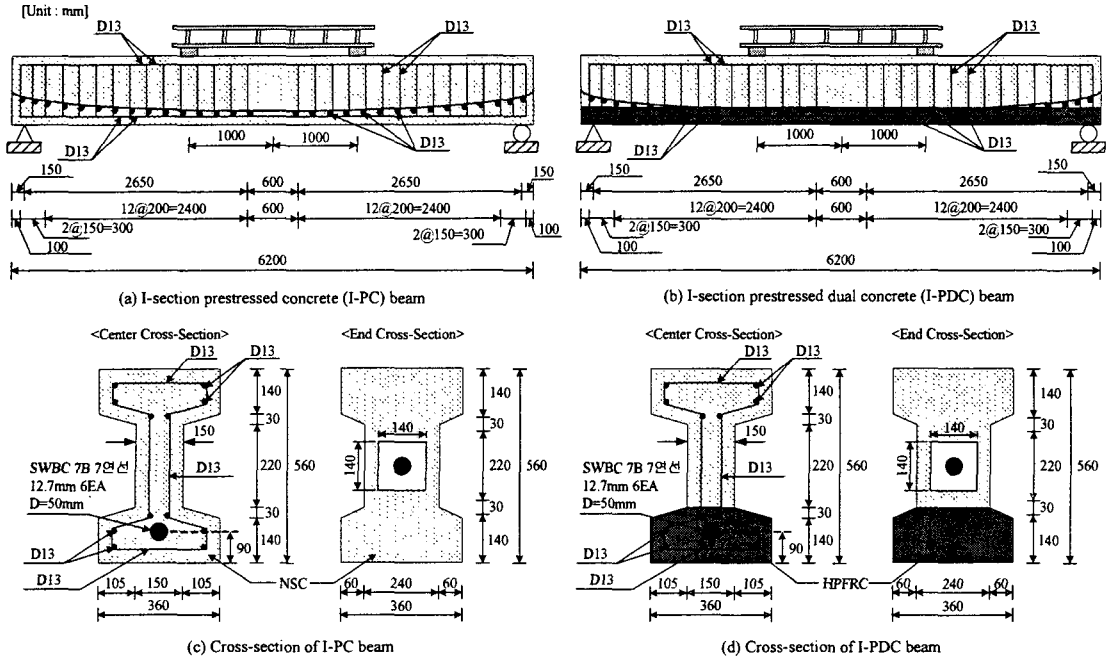


그림 1 시편의 형상과 치수

9,810 kN 용량의 유압식 만능 시험기(U.T.M)를 통해 4점 재하 휨 실험이 실시되었다. 시편의 양쪽 단부에서 각각 150mm 떨어진 지점에 강재 로울러를 이용하여 시편을 지지하였고, 수직방향 변위와 회전에 대한 구속이 없도록 제작되었다. 시편의 중심에서 각각 1,000mm인 지점에 하중 가력점을 위치시켰고 지점에서 가력점까지 거리는 195mm이며 두 가력점 사이의 2,000mm 구간은 순수 휨 구간이 되도록 설치하였다. 제작된 강재 가력보에 3.0mm/min 속도의 변위 제어방식으로 하중이 가력되었고 작용하중은 액츄에이터에 부착된 하중계에 의해 측정되었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

I-PC 보와 I-PDC 보의 초기균열 및 한계사용하중, 극한하중, 각 하중에서의 처짐, 초기 휨 강성이 각각 표 3에 나타나 있다. I-PDC 보는 I-PC 보와 비교하여 Precracking stage에서 초기균열 하중이 11%, Postcracking stage에서 한계사용하중이 11%, Ultimate stage에서 극한하중이 13%가 증가되었다. I-PC 보와 I-PDC 보에 대한 실험결과와 하중-처짐 곡선이 그림 2에 나타나 있다. 초기 휨 강성은 하중-처짐 곡선에서 초기균열 이전의 기울기를 나타내며, 휨 강성의 증가는 같은 크기의 외력에 대한 구조물의 변형 감소를 의미한다. I-PDC 보는 I-PC 보와 비교하여 초기 휨 강성이 22%가 증가되었다. I-PDC 보의 사용성면에서 같은 처짐에 대한 내하력(load carrying capacity)은 I-PC와 비교하여 20%가 증가되었다.

I-PC 보와 I-PDC 보에 대한 균열 양상이 그림 3에 나타나 있다. I-PDC 보는 I-PC 보와 비교하여

파괴에 도달될 때 하중 수준이 높은 것을 알 수 있고, I-PC 보는 파괴에 도달될 때 주균열이 압축부까지 상당히 진전되어 있으나, I-PDC 보는 I-PC 보에 비해 주균열의 진전이 억제되는 것을 보여준다. 이는 강섬유가 균열 사이를 연결하여 하중의 저항 및 전달 매체로서의 역할을 함으로써, 주균열 폭을 줄이고 주균열 진전을 억제시키기 때문이다.

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]		
I-PC	0~202	0~5.6	202~351	5.6~17.8	425.7	36.1
I-PDC	0~225	0~5.1	225~390	5.1~16.9	481	44.1

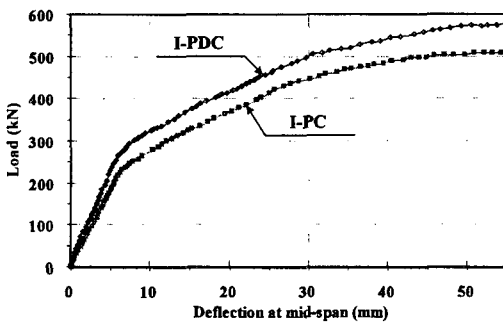
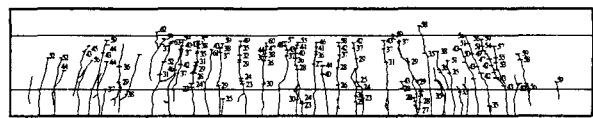
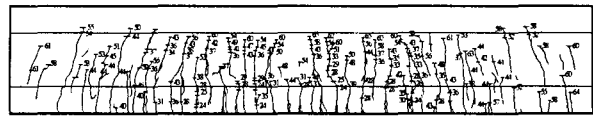


그림 2 I-PC 및 I-PDC 보의 하중-처짐 곡선



(a) I-PC 보의 균열 양상



(b) I-PDC 보의 균열 양상

그림 3 I-PC 및 I-PDC 보의 균열 양상

#### 4. 결론

프리스트레스트 이중 콘크리트 보는 일반 프리스트레스트 콘크리트 보에 비해 Precracking stage에서 초기균열 하중이 증가되었고, Postcracking stage에서도 한계사용하중이 증가되었다. 하중-처짐 곡선에서 초기 휨 강성이 증가되었고 같은 크기의 처짐에 대한 내하력이 증가되어 사용성이 향상되었다. 인장부에 적용된 고성능 강섬유보강 콘크리트에 의해 균열이 제어됨으로써, 주균열 폭을 줄이고 주균열 진전이 억제되었다.

일반 프리스트레스트 콘크리트 보에 부분적으로 고성능 강섬유보강 콘크리트를 적용함으로써 초기 균열 및 한계사용하중의 증가, 휨 강성 증가, 주균열 제어의 효과를 얻을 수 있었고, 이는 향후 교량의 거더에 적용 가치가 높을 것으로 보인다.

#### 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. 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.