

# 섬유복합 초고성능 콘크리트의 특성 및 구조체 활용 방안

김 성 욱 (한국건설기술연구원 수석연구원)

## 1. 서 언

건설산업에서 가장 많이 사용되는 콘크리트는 성형성, 강도 및 경제성이 우수한 재료이다. 그러나 취성이 강하고 상대적으로 에너지 흡수 또는 구조물의 절긴 정도를 나타내는 인성이 부족하여 콘크리트로 구조물을 건설할 때는 철근을 보강하여 사용하고 있다. 특히 교량의 거더 및 건축물의 보 부재와 같이 주로 휨강성이 강조되는 부재의 경우 일반 철근콘크리트(Reinforced Concrete, 이하 RC)로 건조될 경우 많은 양의 철근을 필요로 하며, 프리스트레스 콘크리트(Prestressed Concrete, 이하 PSC)로 건조될 경우 적정량의 철근과 프리스트레스 강선의 배치를 필요로 한다. 이와 같이 기존의 RC구조 또는 PSC구조에서는 콘크리트의 인장응력과 휨응력 저항력을 거의 무시하고 설계함으로써 부재 단면이 커지고 많은 양의 보강 강재를 필요로 하게 된다.

반면에 철근콘크리트 부재에서 철근이 감당하는 인장응력, 휨응력 및 전단응력 등을 콘크리트 복합재가 상당부분을 감당하고, 콘크리트 복합재 자체가 초고강도의 기능을 지닌다면 동일한 소요하중에 대하여 단면을 크게 축소할 수 있다. 또한 철근 배근량을 최소화할 수 있을 것이며, 휨인장 철근 또는 PS강선만으로 휨응력을 충분히 감당할 수 있을 것이다.

섬유복합 초고성능 콘크리트는 매트릭스의 구성과 사용되는 섬유의 종류에 따라 여러가지 형태로

나눌 수 있다. 이들 중 대표적인 것으로서 ECC(Engineered Cementitious Composite)는 미시간(Michigan)대학 Victor C. Li 교수팀이 마이크로 메카니즘과 파괴역학의 개념을 도입하여 폴리에틸렌섬유, 비닐섬유 등의 유기섬유와 강섬유를 체적비로 1~2% 정도 혼입하여 개발한 것으로 직접인장응력 하에서도 변형경화(Strain-Hardening) 현상을 나타내고, 고밀도의 미세한 복수균열을 형성함으로써 최대 인장변형이 8%에 달하는 고인성 섬유복합 고성능 복합재료이다. RPC(Reactive Powder Concrete)는 1994년 Bouygues사의 R. Richard 등에 의해 반응성 분체 콘크리트의 개념으로 개발된 무기계 복합재료이며 최밀충전이론에 기초하여 개발된 반응성 분체를 이용한 시멘트계 매트릭스에 금속섬유를 혼입하여 초고강도(압축강도 180~230MPa, 휨강도 30~60MPa), 고내구성(동결융해저항성 100 이상), 고유동성(플로우치 200~250mm)을 지닌 초고성능 섬유복합 콘크리트이다. CRC(Compact Reinforced Composite)는 1986년 덴마크 Aalborg Portland사에서 개발한 시멘트 복합체 재료로서 압축강도 130~400MPa까지 얻을 수 있으며, CRC에 사용된 결합제는 백색시멘트(비중:3.15), 마이크로 실리카(비중:2.25) 및 나프탈레네계 분체형 고성능 감수제로 구성되어 있고 섬유는 곧은 강섬유를 최대 12%로 사용하며, 길이와 직경은 구조체의 용도에 따라 변경된다. SIFCON, SIMCON(Slurry Infiltrated Fiber Concrete, Mat Concrete)은 강섬유 또

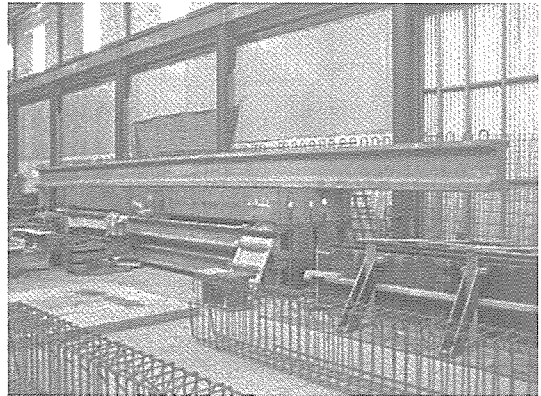
는 섬유매트를 먼저 거푸집에 배치한 후 시멘트 슬러리를 칩투시켜 제조하는 방법으로서 체적비로 최대 20%까지 섬유를 혼입할 수 있다.

필자가 소속된 한국건설기술연구원에서는 RPC를 모델로 하는 초고성능 섬유복합 콘크리트(Ultra High Performance Cementitious Composite, 이하 UHPCC)를 개발하고 이를 활용하여 교량 거더를 중심으로한 UHPCC 구조체 활용기술을 연구하고 있다.

## 2. 섬유복합 초고성능 콘크리트의 적용 사례

캐나다 Sherbrooke 보도교는 1997년 최초로 RPC타입의 UHPCC로 건조된 구조물이다. 총 길이가 60m이고 두개의 세그먼트를 연결하여 완성하였다. 각 세그먼트는 380mm × 320mm의 단면을 지닌 상하플랜지가 Deviator로 나란하게 연결되어 있고, 프리텐션 방식의 프리스트레스가 도입되었다. 이 거더에는  $\phi 150\text{mm}$ 의 스테인레스 튜브를 연결하고 강성을 키우기 위하여 튜브 안을 UHPCC로 채웠다. 각 세그먼트 제작시 철근은 전혀 사용되지 않았다. 총 길이 60m인 RC 교량과 비교하면 소요 콘크리트의 양은 1/5에 불과했으며, PSC 구조와 비교해도 약 1/3에 불과하였다. 이 교량에 사용된 콘크리트의 압축강도는 180MPa이었다.

호주의 Sheperds Gulley Creek Bridge는 2004년 준공된 세계 최초 UHPCC로 건설된 도로교이다. 시드니 인근의 Belmont 지역에 건설된 이 교량은 호주정부가 차세대 신개념의 콘크리트 기술을 도입하기 위하여 VSL Australia와 University of New South Wales의 Gowripalan 교수팀이 주도하여 Design Guidelines을 마련하고 RTA(Road and Traffic authority)의 인준과정을 거쳐서 UHPCC 교량거더를 프리캐스트로 UNSW에서 제작, 설치하였다. 이 교량의 경간은 16m이고, 거더의 높이는 600mm, 상하부 플랜지의 넓이는 330mm로서 PSC 교량거더와 비교하면 동일한 경간에서 1/2 이하의



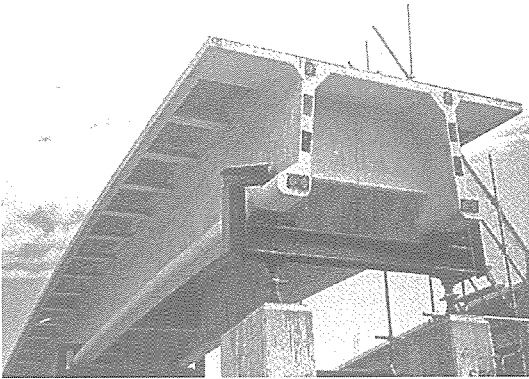
〈사진-1〉 UHPCC 프리캐스트 교량 거더

콘크리트 체적을 가지며, 여기에 사용된 콘크리트의 압축강도는 200MPa이었다. 〈사진-1〉과 〈사진-2〉는 필자가 건설중에 현장을 방문하여 찍은 사진이다.

국내에서도 한강 상의 선유도를 잇는 선유 보도교가 180MPa의 초고강도 콘크리트를 이용하여 2002년에 준공된 바 있다. 이 교량은 한·불 수교 100주년 기념사업으로 시행되었으며, 서울시가 프랑스 Bouygues사에 의뢰하여 건조한 것이다. 이 교량 거더 구조체는 각 20m의 세그먼트를 프리캐스트로 제작하여 총 6개의 세그먼트를 이어서 아치 형상의 교량을 완성하였다. 상부 바닥판과 T-형상의 거더가 일체형으로 제작되었으며, 각 세그먼트의 연결이 완료된 후 텐돈을 이용하여 최종 포스트텐션닝으로 구



〈사진-2〉 UHPCC Sheperds 도로교



〈사진-3〉 선유교 세그먼트 단면

조체를 일체화하였다. 보도교이지만 이 교량에 적용된 바닥판의 두께는 단지 3cm로서 상부 적재하중을 충분히 감당할 수 있게 하였다. 구조체 제작에 필요한 시멘트, 골재, 첨가재료 및 기타재료는 모두 프랑스 Lafarge사가 선정, 수입하였고, 프랑스 Bouygues사의 감리하에 VSL KOREA가 시공하였다. 당시 자체의 재료 및 해당 콘크리트 제조기술은 없는 상태였으며, 독자적인 시공기술도 전혀 확보되지 않은, 완전한 외국 기술에 의해 도입된 것이다. 〈사진-3〉과 〈사진-4〉는 선유교의 가설 단계와 준공 후 사진이다.

한편, 미국에서는 그동안 UHPCC에 대한 연구개발을 최근 2002년부터 도로연방국(FHWA)이 주도하여 교량거더를 중심으로 하는 UHPCC 활용연구를 시작하였다. 그 적용예로서 2005년 아이오와주 DOT가 주관이 되어 Wapello County에 UHPCC를 활용한 교량거더를 제작하고 현장교량에 거치하여 도로교량을 가설하였다. UHPC를 활용하는 이 시범사업은 Innovative Bridge Construction Program(IBRC)의 TEA-21에 따라 혁신적인 교량건설에 관한 교량개축사업에서 예산을 받아서 UHPCC를 활용한 교량 개축사업을 수행하였다. 여기에 사용된 UHPCC의 재료는 프랑스에서 개발한 Ductal을 그대로 사용하였으며 설계기준 압축강도는 200 MPa이고, 3개의 거더를 거치하였다. 구조적으로는



〈사진-4〉 선유교 준공 후 전경

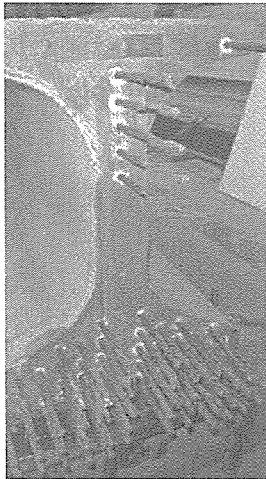
스터럽 등과 같은 전단보강철근은 사용하지 않았고 15mm PS강선으로 프리텐션을 도입하였다. 이 프로젝트의 수행에는 여러 연구개발팀이 새로운 신재료인 UHPCC의 활용을 위하여 협동연구개발을 수행하였으며 대표적인 개발 분야와 참여연구팀으로는 Research Program(FHWA), Design Issues and Section Optimization(MIT), Material Testing(PS I), Design Issues and Precasting(Prestress Service of Kentucky), Material Overview and Precasting Issues(LaFarge North America), Overview of IBRC Project(Ames, Iowa) 등이다.

〈사진-5〉는 아이오와 DOT에서 제작한 30m 경간장의 UHPCC 단순거더이고 〈사진-6〉은 제작된 UHPCC 거더를 교대 위에 거치하는 장면이다.

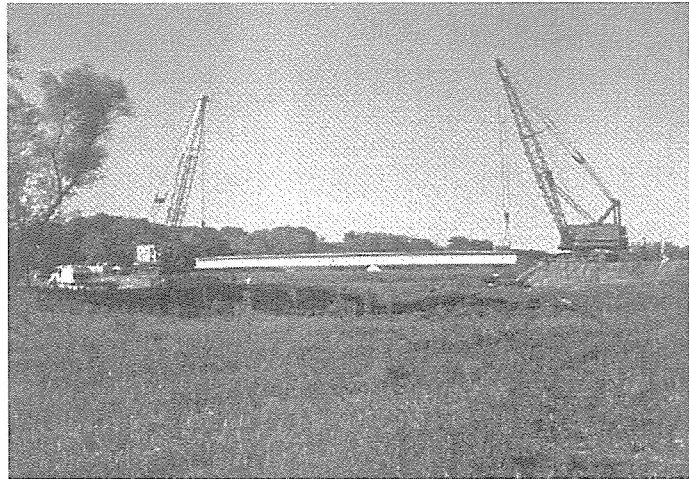
### 3. 섬유복합 초고성능 콘크리트의 물성

#### 가. 배합 특성

보통콘크리트에서 균열이 발생하고 파괴되는 것은 크게 두가지 현상으로 구분할 수 있다. 즉, 골재와 시멘트 수화물 사이의 계면 박리와 수화물 결정 사이의 층간 박리를 들 수 있다. 적정한 시멘트량을 사용하고 수화구조가 정상적인 콘크리트에서는 주로 골재와 수화물간의 계면 박리가 콘크리트 균열



〈사진-5〉 Wapello Br. 단면



〈사진-6〉 Wapello Br. UHPCC 거더 거치 장면

및 파괴의 주된 원인이 된다. 초고성능 콘크리트에서는 골재와 시멘트 수화물 사이의 계면 확장의 영향을 최소화하고 초고성능 콘크리트에 사용하는 섬유유리의 분리저항성을 향상시키기 위하여 굵은골재를 사용하지 않거나 골재의 최대치수를 작게 하고 분체량이 많은 부배합을 사용한다. <표-1>은 초고강도 및 고인성 특성을 지닌 UHPCC의 재료구성 예이다.

#### 나. 수화 및 미세구조 특성

보통콘크리트는 배합 후 약 20°C, 48시간 후인 초기에는 시멘트의 전체 수화도는 약 50% 정도에 이르게 되고 이때 굳은 페이스트 매트릭스내의 모세관

공극률은 약 40%(Empty Capillary 3.7%, Capillary Water 33.5%) 정도에 이르게 된다. 그러나 같은 시기에 UHPCC는 극히 낮은 물-결합재비로 인하여 전체 수화도는 약 20~26% 정도에 이르고, 이 때 모세관 공극률은 전체 7%의 낮은 수준을 유지하게 된다. 따라서 UHPCC의 경우 가열 증기양생을 필요로 하게 되며, 타설 후 90°C에서 24~48시간 가열양생과정을 거치면 UHPCC는 약 1%의 모세관 공극률을 지니게 된다. UHPCC의 경우 재료구성에서 굵은골재가 배제되고 결합재에 첨가된 실리카퓌미 높은 분말도를 지니기 때문에 배합과정에서 보통콘크리트보다 닫힌공기(Entrapped Air) 양이 기본적으로 적고, 수화과정과 가열 증기양생 공정에서 모

〈표-1〉 전형적인 UHPCC의 재료구성 예

Components	Fibers Steel	Sand Quarts	Cement HSR	Quartz Flour	Silica Fume	Super Plasticizer	Water (total)
Length(mm)	13						
Diameter(μm)	200.0	310.0	10.0	2.0	0.2		
Density	7.79	2.65	3.17	2.65	2.27	1.21	
Mass ratio	0.216	1.430	1.000	0.300	0.325	0.012	0.200
Vol. Fraction	0.021	0.402	0.235	0.084	0.107	0.004	0.142
kg/m <sup>3</sup>	16	1066	746	224	9	142	142

세관 공극을 극히 줄임으로써 초고강도, 고내구성을 지니게 된다.

UHPCC는 구조적 성능뿐 아니라 재료적 내구성 능 측면에서도 많은 장점을 지닌다. 분석장치를 통하여 보통콘크리트의 미세구조를 관찰하면 콘크리트가 많은 공극을 지니고 있는 것을 알 수 있다. 이 공극 중에는 젤공극과 같이 Å 단위의 아주 작은 크기의 미세공극에서부터 타설시 발생하는 갭현 mm 단위 이상의 공극까지 다양한 크기의 공극이 분포되어 있다. 이 중에서 1 $\mu$ m 이상의 모세관 공극은 탄산가스, 염소이온 등의 각종 침해물질의 침투와 확산에 직접적인 영향을 미치는 공극으로서 보통콘크리트에는 많이 분포하고 있다.

따라서 이들 열화인자의 침투 및 확산으로 인하여 RC 구조체는 철근부식과 침식이 발생하여 구조물의 내구성이 떨어지게 된다. 반면 UHPCC는 구성재료의 입자가 작고 수화반응 후 일반 콘크리트와는 비교가 되지 않을 정도로 모세관 공극 크기 이상의 공극비가 낮기 때문에 수밀성이 높은 콘크리트를 형성하게 된다.

## 다. 역학적 특성

프랑스 BOUYGUES가 중심이 되어 개발한 UHPCC는 구성재료를 미세화하고 시멘트를 포함한 결합재의 물리화학적 수화반응을 극대화하여 시멘트 매트릭스를 고강도화하며, 여기에 작은 직경 및 큰 길이/직경비(Aspect Ratio)를 지닌 섬유(Fibers)를 혼입하여 균열응력에 저항하는 콘크리트이다. 이 콘크리트는 양생조건에 따라서 강도의 최대 범위가 800MPa까지 가능하나 유럽을 비롯한 기술 선진국에서 현재 실용화 단계에 있는 압축강도의 범위는 약 200MPa 수준이다. UHPCC는 높은 압축강도의 시멘트 매트릭스 구조를 갖는 반면, 그 자체로는 높은 인장강도를 지니지 못하고 취성파괴를 한다.

UHPCC에 섬유(Fibers)를 첨가하면 압축강도와 더불어 인장강도를 증진시킬 수 있으며, 파괴거동도

〈표-2〉 UHPCC의 역학적 특성

Properties	Plain Concrete	FRC	UHPCC
Compressive Strength	21~27 MPa	30~50 MPa	50~400 MPa
Bending Strength	1~3 MPa	5~15 MPa	15~60 MPa
E-modulus	21,000~35,000MPa	30,000~40,000MPa	< 50,000 MPa
Characteristics of Behavior	Brittle	Quasi-Brittle	Ductility
Characteristics of Crack	Partial	Partial + Multiple	Multiple

유사연성거동(Pseudo-Ductile Behavior) 또는 연성거동(Ductile Behavior)이 가능하게 할 수 있다.

UHPCC의 역학적 특성을 보통콘크리트 및 섬유보강콘크리트와 비교하면 〈표-2〉와 같이 나타낼 수 있다. UHPCC의 압축강도, 휨강도 등은 보통콘크리트와는 비교가 되지 않을 정도로 높은 역학적 물성을 지니며, 보통콘크리트가 취성이 강한 반면 UHPCC는 역학적으로 우수한 연성 특성을 지닌다.

UHPCC의 변형경화 현상과 다분산균열(Multiple Cracking) 특성을 실현하기 위한 필수조건은 균열면에서 섬유에 의한 가교작용으로 발생하는 힘이 매트릭스의 균열시 발생하는 인장력을 상회할 수 있어야 하고, 그 비가 클수록 많은 균열이 발생하기 쉽고 인성능력이 향상된다. 이러한 가교작용은 섬유의 강도, 매트릭스의 강도 및 섬유와 매트릭스의 부착강도, 섬유의 혼입률, 매트릭스의 공기량 등이 영향을 주로 받지만, 섬유의 분산성 및 시공성의 영향도 받는다.

크리프(Creep)의 경우 콘크리트를 타설하고 증기양생을 실시하지 않은 경우는 크리프계수가 1.2 정도이고, 증기양생을 실시한 경우 0.3 정도로, 보통콘크리트가 2~3인 것에 비교하면 매우 낮은 값을 지닌다. 건조수축량은 보통콘크리트보다 훨씬 낮으며, 구성성분에 따라 다르지만 건조수축량은 대략 <식-

$$\epsilon_{shrinkage}(t) = A_0 \exp \left[ \frac{-2.5}{\sqrt{t-0.5}} \right] \dots\dots\dots \langle \text{식-1} \rangle$$

1)로 산정할 수 있다.

여기서, A<sub>0</sub>는 재료구성에 따른 실험고유치(일반적으로 550micro-strain)

### 라. 내구 특성

콘크리트의 내구 특성은 각종 열화인자에 대한 저항성으로 평가할 수 있다. 대부분의 열화인자에 대한 저항성은 콘크리트의 미세구조내의 공극구조로 설명이 가능하며, 이것은 미세구조내의 투과성(Permeability)과 밀접한 관계를 가진다.

〈표-3〉은 UHPCC에 대하여 질소를 이용한 투기성 시험, 염소이온의 확산계수시험, 동결융해시험 및 중성화 깊이를 측정한 시험결과와 예이다. 〈표-3〉에서 보는 바와 같이 UHPCC의 질소가스 투기성은 보통콘크리트에 비해 10<sup>-4</sup> 정도로 작고, 염소이온의 확산계수는 10<sup>-4</sup> 정도, 동결융해 저항성 및 중성화에 대한 저항성 등도 보통콘크리트와 비교해 월등히 높은 내구성을 나타낸다. 이것은 모세관 공극이 UHPCC의 경우 매우 단락되어 있기 때문이며, 침투한 물분자의 이동이 자유롭지 못하여 열화인자가 동반된 이온의 이동이 극히 제한되기 때문이다. 또한 UHPCC에서는 유체나 확산 이온 등이 나노스케일

의 CSH 결정을 통과하여야 하며, 이 CSH 결정은 비틀려서 연결되어 있어서 이동 통로가 상당히 길어져, 결정체의 층을 돌아가야 하기 때문에 결국 통과 능력이 저하된다.

이상과 같이 UHPCC의 경우 매트릭스와 골재 사이의 천이영역을 최대한 밀실하게 하고 모세관 공극의 연결을 최대한 단락시킬 수 있게 되어 있으므로 각종 열화인자가 동반된 유체나 가스의 확산과 침투를 방해하기 때문에 우수한 내구성을 지닐 수 있다.

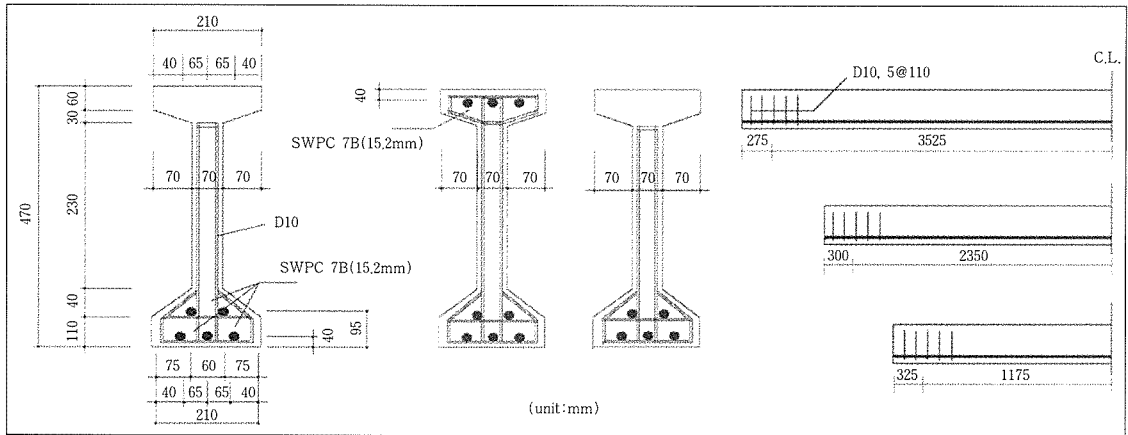
## 4. 초고성능 콘크리트를 활용한 PSC 교량 거더 개발

### 가. 구조시험체 제작

초고성능 콘크리트 구조물의 거동은 보통콘크리트 구조물 또는 고강도 콘크리트 구조물의 거동과는 많은 차이점을 가지고 있다. UHPCC는 강도 및 탄성계수 등 재료역학 특성치가 보통강도 또는 고강도 콘크리트에 비해서 월등히 높고, 고온 양생이 완료된 후 건조수축이나 크리프와 같은 장기거동 변형이 적다는 장점을 가지고 있다. 실험에서 볼 수 있듯이 UHPCC의 재료특성 중에서 압축강도가 보통콘크리트보다 6배 큰 경우 탄성계수비가 2~2.5배, 최대응력에서 변형률이 0.004 정도이므로 설계하중하에서 변형률이 다소 크게 나타나는 처짐 특징을 가지

〈표-3〉 UHPCC의 내구성 시험결과 예

Concrete type	UHPCC		HPC	NSC
	20°C (28d)	20°C (2d) +90°C (2d)	20°C (28d)	20°C (28d)
W/C	0.2	0.2	0.35	0.5
Permeability no drying severe drying	1.0E-22 < 1E-20	1.0E-22 < 1.0-20	1.0E-19 5.0E-18	2.0E-18 3.5E-17
Diffusivity Cl <sup>-</sup> (m <sup>2</sup> /s)		2.0E-14	1.5E-12	1.8E-11
Freeze-thaw scaling(g/cm <sup>2</sup> )	7	7	900	> 1000
Carbonation depth(mm)	0.05	0.04	2	10



〈그림-1〉 시험체의 단면형상 및 치수

고 있다. 이것은 강섬유가 콘크리트 인장변형뿐 아니라 압축변형도 구속하므로 압축구역에서도 급격한 취성파괴를 하지 않으면서 더 큰 파괴변형률을 갖기 때문이다. 이런 재료적 특성으로 인해 최대하중 이후 내하력을 상당히 유지한 채 구조물의 변형이 증가되는 특징을 가지고 있다. 즉, 구조물의 안정성면에서 큰 장점을 가지고 있다고 볼 수 있다.

UHPCC로 만들어진 보는 강섬유 보강 효과로 인해 전단철근을 별도로 배치하지 않으므로 전단강도식을 유도하는데 있어서 전단철근 강도식을 배제한 순수한 콘크리트 매트릭스만의 전단강도식을 세워야 한다. 또한 UHPCC의 응력-변형률 관계는 비선형 관계가 아닌 거의 선형관계를 형성하고 있다. 따라서 보통콘크리트나 고강도 콘크리트 강도설계법에서 사용하고 있는 직사각형 응력블록을 사용할 수 없으며, 휨강도식을 삼각형 응력블록을 사용하는 것이 가장 합리적이라고 할 수 있다.

UHPCC를 사용한 PSC 교량 거더의 거동을 파악하기 위하여 축소모형 거더를 제작하였다. 단면의 형상은 현재 국내에 일반적으로 적용되고 있는 국내 표준 PSC 거더 단면을 근거로 하고 ASSHTO 표준 PSC 거더 단면 및 워싱턴주 표준 PSC 거더 단면을 참고하여 UHPCC의 특성을 효과적으로 발휘할 수 있는 단면으로 결정하였다. 실험변수로는 경

간형고비(L/h), 초기긴장력(P), 복부폭(bw) 및 긴장재배치를 설정하여 시험체 12개를 제작하여 실험을 수행하였다. 12개의 시험체의 단면형상 및 치수는 〈그림-1〉과 같다.

시험체는 프리텐션 PSC 거더로서 시험체의 제작 공정은 재료의 건비율 후, 배합수를 투입하고, 강섬유를 투입하는 순서로 하였으며 각 공정별로 정해진 시간과 방법에 따라 제작되었다. 플로우 및 공기량은  $21 \pm 2\text{cm}$ 와 3~4%가 되도록 배합설계를 하였으며 타설 후 양생은 상온에서 1일 습윤양생을 실시한 후  $80 \pm 5^\circ\text{C}$ 에서 1일 증기양생을 실시하였다. 이와 같은 방법은 이전의 연구결과로부터 1일 습윤양생 후 증기양생을 실시하는 것이 강도발현에 가장 효과적인 방법이기 때문이다. 양생이 끝난 후 긴장재를 절단하고 거푸집을 탈형한 시험체를 다시  $80 \pm 5^\circ\text{C}$  상태로 하루더 증기양생을 실시하여 소요 압축강도를 발현하였으며 이후 실험재령까지 상온에서 습윤양생을 실시하였다. 각각의 실험조건에 대해 초고성능 시멘트 복합재료를 소요압축강도 150MPa에 대해 〈표-4〉와 같은 배합설계를 통해 시험체를 제작하였으며 각각의 시험체에 대한 실험변수값 및 재령별 발현강도로서 긴장재 절단시 압축강도는 120MPa 정도, 실험시 압축강도는 160MPa 내외이며, 이때 인장강도는 15MPa 정도, 탄성계수는 48GPa

〈표-4〉 UHPCC의 기본 배합표(중량비)

W/B	시멘트	실리카폼	충전재	잔골재	고성능감수제	강섬유
0.21	1	0.25	0.3	1.1	0.02	2 vol%

정도였다.

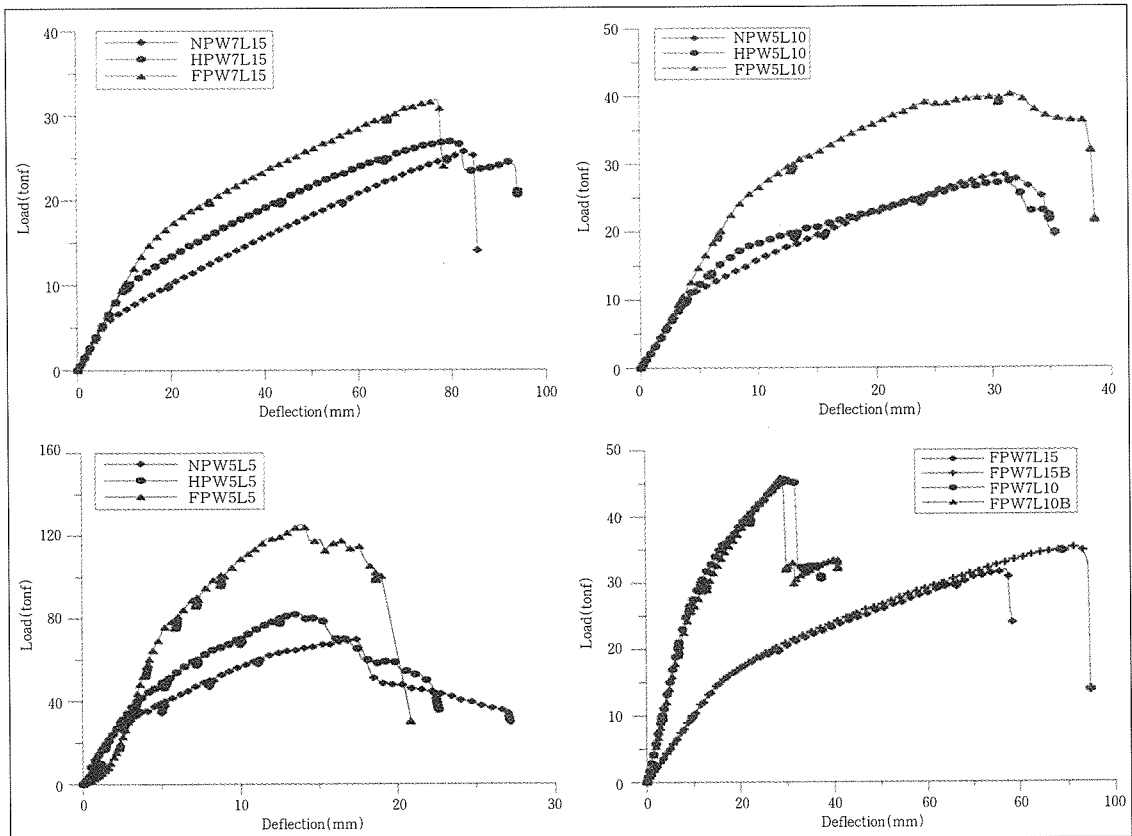
### 나. 구조실험 및 결과분석

동일한 경간형고비에 대해 긴장력 변화에 따른 균열하중 및 파괴하중을 살펴보면 긴장력이 클수록 인장부에서 초기에 큰 압축력이 작용하여 인장응력에 도달하기까지 하중저항력이 커져 초기균열하중이 증가하여 나타났고 사인장균열이 발생하는 하중 및 극한하중도 크게 나타났으며 극한상태의 처짐은 상

대적으로 적게 나타났다.

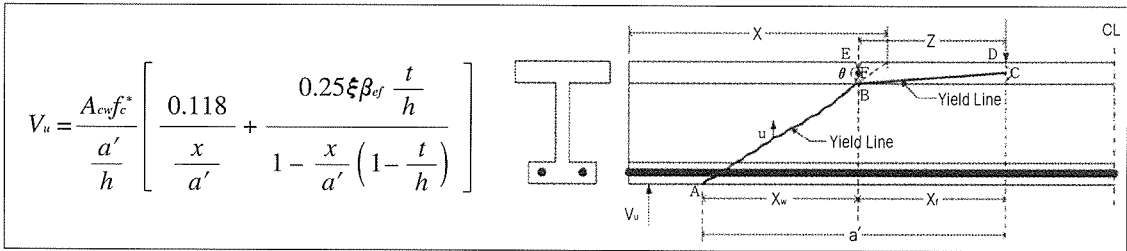
그리고 하부강선에 60tonf를 긴장한 경우와 하부강선 60tonf, 상부강선 30tonf을 함께 긴장한 경우를 비교해 보면 상부긴장에 따른 거동의 변화는 극한하중 상태의 처짐이 증가하는 것 외에는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 〈그림-2〉는 실험변수별로 구한 UHPCC 거더의 하중과 처짐곡선이다.

이상의 구조실험결과를 바탕으로 UHPCC 거더 설계에 활용한 전단강도와 휨강도를 산정하는 계산식을 유도하였다. 전단력 산정은 Plastic Theory에

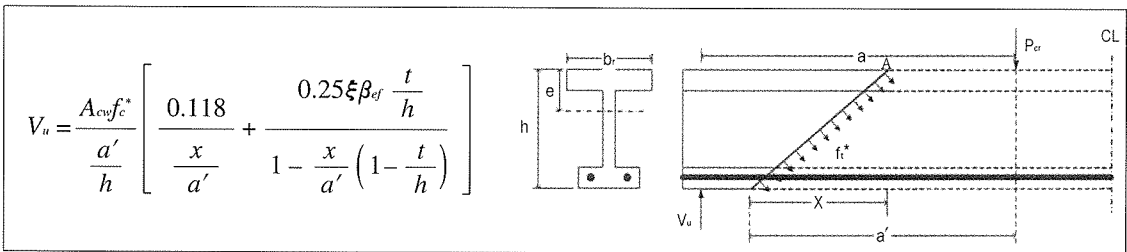


〈그림-2〉 하중-처짐 곡선 실험결과





〈그림-3〉 Yield Line



〈그림-4〉 Cracking Load

근거하여 전단 파괴하중을 계산하였으며, 프리스트레스를 받는 시험체의 전단력은 보의 지점에서 발생하는 극한하중과 사인장 균열하중이 같다는 가정하에서  $x$ 를 구하여  $V_u$ 와  $V_{cr}$ 를 계산하였다. 〈그림-3〉과 〈그림-4〉에 유도과정을 나타내었다.

시험체의 휨모멘트는 〈식-2〉로 산출하였다.

UHPCC의 압축영역의 응력분포는 공시체 시험 및 보 실험에서 계측한 높이별 변형률 값으로 볼 때 삼각형 모양을 형성하고 있다. UHPCC는 초고강도의 압축강도 뿐만 아니라 강섬유 혼입으로 인해 상당한 인장강도를 가지므로 인장영역에서의 응력분포를 복부와 플랜지로 나누어 고려하였다.

$$M = A_{ps}f_{sp}(d_p - u) + f_{ic}(h - e)b_w \left( \frac{h}{2} + \frac{e}{2} - u \right) + f_{ict}b(b - b_w) \left( h - \frac{t_b}{2} - u \right) \dots \dots \dots \langle \text{식-2} \rangle$$

### 5. 섬유보강 초고성능 콘크리트의 활용 분야

섬유보강 초고성능 콘크리트의 초고강도 및 초내

구적 특성을 활용하면 다음과 같은 분야에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

#### 가. 교하 공간 최소 확보가 필요한 도심지 차량 통행 육교교량 건설에 활용

섬유보강 초고성능 콘크리트로 제작된 프리캐스트 교량거더는 초고강도 압축 및 인장강도를 지니고 연성거동이 가능하므로 단면을 최소화시킬 수 있고, 거더의 높이를 최소화시킬 수 있기 때문에 교하 공간의 부족이 문제시 되는 도심지 교차 육교 거더로 활용할 수 있다.

#### 나. 단경간 교량의 프리캐스트 거더로 활용

연구에서 개발 목표로 하는 거더는 20m 이하의 경간을 갖는 RC I형 거더, PSC I형 거더로서 일반 소경간의 교량 거더로 곧바로 사용할 수 있다. 이 거더는 프리캐스트 형태로 제작됨으로써 공기를 단축하고, 거더 자체의 초고강도, 초고내구성을 갖기 때문에 기존 RC 및 PSC I형 거더를 대체하여 사용이

가능하며 포스트텐션 형식으로 개발할 경우 50m 이상의 장경간 교량거더로 활용할 수 있다.

#### 다. 복합 건물의 보(Beam)로 활용

최근 대형 쇼핑몰 및 사무실과 역사를 복합적으로 활용하는 Multi-Complex 건물의 차량 하중과 대용량의 적재하중을 받는 보 구조체로 활용이 가능하다. 즉, 일반 건축물의 보와 같이 단순 적재하중을 받지 않고 차량, 철도의 진동 등 동적 하중을 복합적으로 받는 고기능성의 보로 사용할 수 있다.

#### 라. 대단위 단면을 갖는 장대교량의 콘크리트 대체 구조체에 응용

후속 연구개발을 지속할 경우 UHPCC는 PSC 박스거더의 경량화 및 고기능화가 가능한 첨단재료로 활용이 가능하며 이 경우 박스거더 초경제적인 단면 설계가 가능하여 ILM, FCM 및 PC 세그먼트 거더 부재로 활용이 가능하다.

#### 마. 높은 충격하중을 고려한 구조체의 재료로 응용

충격 또는 폭탄 하중 등에 민감한 군사시설물, 원자력 발전소 등 충격에너지 흡수 및 분산 기능이 필요한 구조물의 건설에 UHPCC의 응용이 가능함. UHPCC는 충격하중이 구조체에 전달될 경우 다균

열분산저항(Multi-Cracking Resistance) 성능이 우수하고 다균열 상태에서 연성거동이 가능하므로 구조물의 순간적인 파괴를 방지할 수 있는 구조체의 재료로 응용이 가능하다. 직접적인 연구 범위는 아니지만 본 연구를 통하여 개발(소화개량 포함)된 UHPCC는 구조 요소별 후속 연구를 통하여 PSC Box 형 구조물과 같은 장경간 교량이 박스 거더 재료로 응용이 가능하다.

### 6. 결 언

섬유복합 초고성능 콘크리트는 매우 높은 압축강도를 지니며 동시에 강섬유 보강으로 인해서 높은 인장 및 휨강도를 지닌다. 동시에 치밀한 수화조작으로 인해서 내구성이 매우 뛰어난 재료이며, 굳기 전 유동성이 매우 크기 때문에 자기충전 콘크리트와 유사한 물성을 갖고 있다. 따라서 재료 자체의 성질로는 초고성능을 지니고 있다. 그러나 단위시멘트량이 매우 높고, 응결과 관련된 가사시간이 비교적 짧기 때문에 부재 특성에 따라 제한적으로 적용될 수 있다.

UHPCC에서 굳지 않은 상태에서 물리적 특성을 개선하는 연구, 재료역학적 특성을 정확히 반영할 수 있는 실험연구, 구조실험 및 구조해석 연구를 가속할 경우 초고성능 콘크리트를 활용한 다양한 구조체의 개발이 가능할 것이며, 종래 부재가 크고 둔탁하게만 느껴지는 콘크리트 구조물을 기능과 미관이 우수한 첨단 구조물로 탈바꿈 시킬 수 있을 것으로 확신한다. ▲