

초고성능 콘크리트의 개발과 활용

Development and Application of Ultra High Performance Concrete

김 성 욱* 박 정 준** 강 수 태** 류 금 성** 고 경 택*** 이 장 화***
Kim, Sung Wook Park, Jung Jun Kang, Su Tae Ryu, Gum Sung Koh, Gyung Taek Lee, Jang Hwa

ABSTRACT

In order to develop an Ultra High Performance Concrete (UHPC) suited to the Korean conditions, KICT has carried out several parts of research in the field of UHPC from 2003. KICT developed UHPC which was a structural material exhibiting very remarkable mechanical performances with compressive strength, tensile strength and flexural strength rising up to 200MPa, 15MPa and 35MPa, respectively. In addition, this material presents exceptional durability regard to the very low diffusion and penetration speeds of noxious substances like chloride ions. This 200MPa strength concrete has been effectively adopted for the construction of bridges like Sherbrooke Bridge in Canada in 1997, Sunyu Bridge in Korea in 2002, Meata Bridge in Japan in 2003, Sheperds Guelly Creek Bridge, the first ultra-high strength concrete highway bridge in Australia in 2004 and, more recently in 2005, Mars Hill highway bridge in USA in 2005. The construction of structures using ultra high performance concrete is a worldwide development trend of concrete technology for the construction of advanced facilities in the 21st century.

요 약

초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete)는 압축강도 200MPa, 인장강도 15MPa 및 휨강도 35MPa 정도의 높은 강도 특성과 열화인자의 침투 및 확산 속도가 보통콘크리트에 비해 1/20에서 최대 1/10,000까지 낮은 고내구성을 나타내면서 동시에 슬럼프 플로우가 약 220mm 정도의 자기충전성 특성을 갖는 콘크리트이다. 최근 유럽을 중심으로 초고성능 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 교량, 플랫폼 지붕구조 및 초고층 건축물 등에 적용이 점차 확대되고 있으며 일본에서는 이미 철도 교량의 거더로 활용도 목전에 두고 있다. 우리나라에서는 KICT를 중심으로 초고성능 콘크리트에 대한 연구가 2003년 이후 지속적으로 이루어지고 있으나 유럽 또는 일본에 비해 연구인력과 연구비의 투자 규모가 매우 작다. 여기에서는 그동안 KICT를 중심으로 한 국내 초고성능 콘크리트의 개발 및 활용 현황에 대하여 살펴보고 향후 이 분야에 대한 연구 활성화를 모색하고자 한다.

* 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실장

** 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 연구원

*** 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 책임연구원

1. 서 론

초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete, 이하 UHPC)는 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. UHPC는 높은 압축강도의 시멘트 매트릭스 구조를 갖는 반면, 그 자체로는 높은 인장강도를 지니지 못하고 취성파괴를 한다. UHPC에 섬유(fibers)를 첨가하면 압축강도와 더불어 인장강도를 증진시킬 수 있으며, 구조체의 파괴거동도 유사연성거동(pseudo-ductile behavior) 또는 연성거동(ductile behavior)이 가능하게 할 수 있다.

2. 초고성능 섬유보강 콘크리트 적용 사례

캐나다 Sherbrooke 보도교는 1997년 최초로 RPC(Reactive Powder Concrete)타입의 UHPC로 건조된 구조물이다. 총 길이가 60m이고 두 개의 세그먼트를 연결하였으며 각 세그먼트는 상하부 플랜지를 UHPC로 제작하고 사이를 UHPC를 채운 $\varnothing 150\text{mm}$ 의 스테인레스 튜브를 연결하고 프리스트레스를 도입하였다. 국내에서도 한강 상의 선유도를 잇는 선유 보도교가 180MPa의 초고강도 섬유보강 콘크리트를 이용하여 2002년에 준공된 바 있다. 이 교량 거더 구조체는 각 20m의 세그먼트를 프리캐스트로 제작하여 총 6개의 세그먼트를 이어서 아치 형상의 교량을 완성하였다. 거더와 바닥판이 일체화된 π 형 단면을 지니고 있으며, 각 세그먼트의 연결이 완료된 후 텐돈을 이용하여 최종 포스트텐션닝으로 구조체를 일체화 하였다. 보도교이지만 이 교량에 적용된 바닥판의 두께는 단지 3cm로서 매우 얇은 단면을 지니고 있다. 당시 적용한 UHPC의 설계기준강도는 180MPa이었으며 제작 단계에서 다소의 시행착오가 있었다.

한편, 2004년 호주의 Sheperds Gulley Creek Bridge가 도로교로는 세계 최초로 건설되었다. 이 교량의 경간은 16m, 거더의 높이는 600mm, 상하부 플랜지의 넓이는 330mm이며 거더 간격은 2.3m로 구성되었다. PSC 교량거더와 비교하면 동일한 경간에서 1/2 이하의 콘크리트 체적을 가지며, 여기에 사용된 콘크리트의 설계기준강도는 180MPa이었다. 이후 미국에서는 미연방도로국(FHWA)이 주도가 되어 Innovative Bridge Construction Program(IBRC)의 TEA-21 사업을 시행하였으며 이에 따라 혁신적인 교량개축사업을 시행하였다. 이 프로그램의 일환으로 Iowa Wapello County에서 Mars Hill Bridge를 가설하였다. 이 교량은 경간이 33m Bulb-Tee 단면을 갖으며 형고는 불과 105cm 밖에 되지 않았다. 이 교량의 건설에는 여러 분야의 연구팀이 참여하였는데 Design Issues and Section Optimization(MIT), Material Testing(PSI), Design Issues and Precasting(Prestress Service of Kentucky), Material Overview and Precasting Issues(LaFarge North America), Overview of IBRC Project(Ames, Iowa) 등이다. 이외에도 독일의 Kassel 지역에서 2007년 UHPC를 활용한 교량을 가설하였으며 교량 이외에 캐나다 켈거리에서는 역사의 플랫폼의 캐노피 구조물을 UHPC로 가설하였으며 일본의 Taisei 건설에서는 경전철의 상부 거더를 UHPC를 활용하여 U거더 형식의 구조 단면을 개발하여 현장 적용을 앞두고 있다.

3. 초고성능 섬유보강 콘크리트의 물성

3.1 배합 특성

초고성능 콘크리트에서는 골재와 시멘트 수화물 사이의 계면 확장의 영향을 최소화하고 초고성능

콘크리트에 사용하는 섬유유리 분리지항성을 향상시키기 위하여 굵은골재를 사용하지 않거나 골재의 최대치수를 작게 하고 분체량이 많은 부배합을 사용한다. 표 1은 초고강도 및 고인성 특성을 지닌 UHPC의 재료구성 예이다.

표 1 전형적인 UHPC의 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 ³	16	1066	746	224	9	142	142

3.2 수화 및 미세구조 특성

UHPC는 배합 후 약 20°C, 48시간 후인 초기에는 극히 낮은 물-결합재비로 인하여 전체 수화도는 약 20~26% 정도이며 이 때 모세관 공극률은 전체 7%의 낮은 수준을 유지하게 된다. 그러나 타설 후 90°C에서 24~48시간 가열 양생과정을 거치면 UHPC는 약 1%의 모세관 공극률을 지니게 되며 수화도는 85% 이상 이르게 된다. UHPC의 경우 재료구성에서 굵은골재가 배제되고 결합재에 첨가된 실리카폼이 높은 분말도를 지니기 때문에 배합과정에서 보통콘크리트보다 갇힌공기(entraped air)양이 기본적으로 적고, 수화과정과 가열 증기양생 공정에서 모세관 공극을 극히 줄임으로써 초고강도, 고내구성을 지니게 된다.

3.3 역학적 특성

UHPC는 높은 압축강도의 시멘트 매트릭스 구조를 갖는 반면, 그 자체로는 높은 인장강도를 지니지 못하고 취성파괴를 한다. UHPC에 섬유유리(fibers)를 첨가하면 압축강도와 더불어 인장강도를 증진시킬 수 있으며, 파괴거동도 유사연성거동(pseudo-ductile behavior) 또는 연성거동(ductile behavior)이 가능하게 할 수 있다. UHPC의 역학적 특성을 보통콘크리트 및 섬유보강콘크리트와 비교하면 표 2와 같이 나타낼 수 있다.

표 2 UHPC의 역학적 특성

Properties	Plain Concrete	FRC	UHPC(KICT)
Compressive Strength	21~27MPa	30~50MPa	190~220MPa
Flexural Strength	1~3MPa	5~15MPa	30~35MPa
E-modulus	21,000~35,000MPa	30,000~40,000MPa	< 50,000MPa
Characteristics of Behavior	Brittle	Quasi-Brittle	Ductility
Characteristics of Crack	Partial	Partial + Multiple	Multiple

UHPC의 변형경화 현상과 다분산균열(multiple cracking) 특성을 실현하기 위한 필수조건은 균열 면에서 섬유유리에 의한 가교작용으로 발생하는 힘이 매트릭스의 균열 시 발생하는 인장력을 상회할 수 있어야 하고, 그 비가 클수록 많은 균열이 발생하기 쉽고 인성능력이 향상된다. 이러한 가교작용은 섬유

의 강도, 매트릭스의 강도 및 섬유와 매트릭스의 부착강도, 섬유의 혼입률, 매트릭스의 공기량 등에 주로 영향을 받지만, 섬유의 분산성 및 시공성의 영향도 받는다.

3.4 내구 특성

표 3은 KICT에서 UHPC에 대하여 질소를 이용한 투기성 시험, 염소이온의 확산계수시험, 동결융해 시험 및 중성화 깊이를 측정한 시험결과의 예이다. 표 3에서 보는 바와 같이 UHPC의 질소가스 투기성은 보통콘크리트에 비해 10^{-4} 정도로 작고, 염소이온의 확산계수는 10^{-4} 정도, 동결융해 저항성 및 중성화에 대한 저항성 등도 보통콘크리트와 비교해 월등히 높은 내구성능을 나타낸다. 이것은 모세관 공극이 UHPC의 경우 매우 단락되어 있기 때문이며, 침투한 물분자의 이동이 자유롭지 못하여 열화인자가 동반된 이온의 이동이 극히 제한되기 때문이다.

표 3 UHPCC의 내구성 시험결과 예

Concrete type	UHPC(KICT)		HPC	NSC
Curing mode	20℃ (28d)	20℃ (2d) +90℃ (2d)	20℃ (28d)	20℃ (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 ⁻ (m ² /s)		2.0E-14	1.5E-12	1.8E-11
Freeze-thaw scaling (g/cm ²)	7	7	900	>1000
Carbonation depth(mm)	0.05	0.04	2	10

4. 구조부재 개발 및 활용

UHPC의 활용에 대한 연구개발은 여러 형태의 구조부재에서 진행 중이다. 그 예로서 우선 교량 거더를 들 수 있다. KICT에서는 경간장 20m 정도의 단경간 UHPC 프리텐션형식의 프리스트레스 교량 거더를 이미 개발한 바 있다. 현재는 경간장 약 50m 정도의 포스트텐션 형식의 교량용 거더를 개발 중이다. 또한 UHPC를 활용한 교량의 바닥판과 임시 가교에 사용될 콘크리트 복공판 등을 개발하고 있다. 이외에도 UHPC와 보통 철근콘크리트 구조를 합성한 복합구조 형식도 현재 개발을 서두르고 있다.

5. 결 론

UHPC는 높은 강도 특성을 지니며 강섬유를 혼입하여 취성과파괴를 방지하고 연성거동을 유도할 수 있는 우수한 역학적 성질을 지니고 있는 재료임에는 틀림없다. 그러나 아직까지 섬유가 혼입된 복합재료로서 설계에 필요한 역학적 성능평가가 부족하고 설계 CODE 정립에 더 많은 연구가 필요하며 부재 제작에 일반콘크리트보다 더욱 세심한 주의가 필요하다. 21세기 첨단 콘크리트 재료로서 UHPC가 자리잡기 위해서는 콘크리트의 연구자들의 보다 많은 관심과 연구개발 참여가 있어야 한다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통평가원에서 시행한 2005년 건설핵심CTRM연구개발사업(05-CCT-D11)지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.