



초고성능 콘크리트의 재료적 특성 및 개선 방향

Material Properties of Ultra-High Performance Concrete and Its Improvement

고경택 Kyungtaek Koh
한국건설기술연구원
구조융합연구소 연구위원

류금성 Gumsung Ryu
한국건설기술연구원
구조융합연구소 수석연구원

강수태 Sulae Kang
대구대학교
토목공학과 교수

1. 머리말

콘크리트는 오랫동안 현대사회의 인프라를 구축한 주요 건설재료로 사회기반시설물의 근간을 이룬 최고의 건설재료이다. 최근 경제, 사회 및 문화 전반에 걸친 급속한 발전은 교량, 도로, 철도, 항만, 공항 등 사회기반시설물에 대한 수요를 대량으로 창출하고 있다. 또한 대형화·고층화·장대화된 구조물의 건설이 증가함에 따라 기존 재료보다 시공성, 강도, 내구성 등 성능이 향상된 고성능 콘크리트(high performance concrete)의 적용이 요구되고 있다. 세계 각국에서는 기존 콘크리트의 성능을 개선하려는 노력이 성과를 거두어 현장 실무에 고성능 콘크리트가 활발히 적용되는 단계까지 이르렀으며, 이렇게 성능이 향상된 콘크리트 재료의 개발로 구조시스템과 공법들도 함께 발전하게 되었다.

1990년대 프랑스에서 기존 고성능 콘크리트보다 진일보된 초고성능 콘크리트(Ultra-high Performance Concrete; 이하 UHPC)를 개발한 이래 전 세계적으로 다양한 UHPC의 기술이 활발히 개발되고 있다. UHPC는 선진국에서도 미래 신성장 동력으로 인식하고 국가 차원에서 많은 지원을 하고 있다. 따라서 향후 UHPC에 대한 기술 경쟁력 확보는 세계 건설시장의 주도권을 좌우할 수 있다. 본고에서는 UHPC의 국내의 기술동향과 향후 전망에 대해 간단히 소개하고자 한다.

2. 초고성능 콘크리트의 기술 동향

2.1 국가별 초고성능 콘크리트의 개발 현황

UHPC는 압축강도가 150 MPa 이상의 초고강도이면서 단섬유 단독 또는 장·단섬유를 혼합하여 높은 인장강도 또는 휨강도를 보유하고 있으며, 시멘트 경화체의 조직이 매우 밀실하여 열화인자의 침입이 어려워 수밀성과 내구성이 매우 뛰어난 특징을 갖고 있다. UHPC의 용어는 1994년 프랑스 de Larrard에 의해 처음 사용된 이후 전 세계적으로 널리 사용되고 있다. 많은 나라에서 UHPC에 대한 기술 개발이 수행되었으며, 그 종류로는 프랑스의 Bouygues사에 의해 개발된 RPC(Reactive Powder Concrete), 프랑스의 LCPC에 의해 개발된 MSFRC(Multi Scale Fiber Reinforced Concrete), 덴마크의 Alborg Portland사에서 개발한 CRC(Compact Reinforced Composites), 일본의 가지마 건설 등에 의해 개발된 SUQCEM(Super High Quality Cemetitious Material), 한국건설기술연구원의 K-UHPC 등이 있

다. 그리고 독일에서는 DFG(Deutsche Forschungs Gemeinschaft, 과학재단) 프로그램 일환으로 UHPC 배합 및 적용 기술에 대해 활발히 이루어지고 있다. 호주와 중국 등에서도 재료의 현지화 및 적용 기술 개발에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다. 국내에서는 한국건설기술연구원을 중심으로 2002년부터 기술 개발을 수행하여 180 MPa급 UHPC의 원천기술과 이를 활용한 세계최고 수준의 저비용·장수명 하이브리드 사장교 기술 개발을 수행하였다. 그리고 2013년부터는 국가 R&D 사업으로 제조비용과 제작방법을 고려한 80~180 MPa급 SUPER Concrete 기술을 개발하고 있으며, 개발된 기술은 국내 현장은 물론 미국과 미얀마 등 국외 현장에서도 적용이 되고 있다.

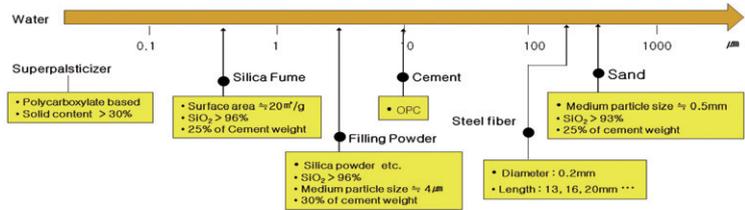


그림 1. 초고성능 콘크리트의 배합재료의 구성 및 특성

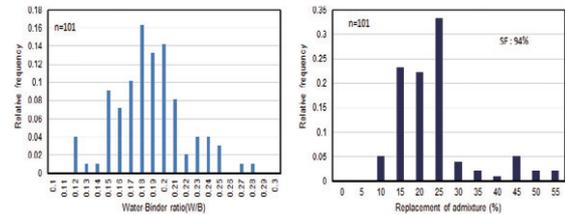


그림 2. UHPC에서 W/B와 혼화재의 혼입률 사용현황 (조사 배합 수 101건)

2.2 초고성능 콘크리트의 재료와 배합

UHPC의 사용재료 및 배합은 연구기관 및 연구자에 따라 조금씩 다르게 사용하고 있다. <그림 1>은 UHPC의 사용재료 및 물성을 나타낸 것이다. 시멘트는 포틀랜드 시멘트를 사용하고 있으며, 혼화재로는 실리카 폼을 주로 사용하고 있다. 그리고 충전재로 시멘트 입자 크기 이하(약 30 μm 이하)의 석영 미분말을 주로 사용하고 있으나 경제성 등을 고려하여 석회석 미분말, 석분 등에 대해서도 검토가 이루어지고 있다. 고성능 감수제는 주로 폴리칼본산계를 사용하고 있다.

<그림 2>는 국내의 UHPC 배합(조사된 배합 수 101건)중에서 물-결합재비(W/B)와 혼화재 혼입률의 사용현황을 나타낸 것이다. W/B는 0.15~0.21의 범위가 상당 부분 차지하고 있으며, 일반 콘크리트에 비해 매우 낮음을 알 수 있다. 그리고 실리카 폼의 혼입률은 대부분 15~25%의 범위에서 사용되고 있으며, 그 중에서도 25%가 일반적으로 사용되고 있음을 알 수 있다.

2.3 초고성능 콘크리트의 성능

2.3.1 시공성

UHPC는 슬럼프 플로 600 mm 이상의 높은 유동성을 확보함으로써 자기충전이 가능하고, 동시에 미세한 분체를 다량으로 사용하여 적절한 점성을 가지기 때문에 일

반 섬유보강 콘크리트에서 자주 문제가 되는 섬유의 뭉침현상(fiber balling)이 발생하지 않는다<사진 1>.

2.3.2 역학적 특성

<표 1>은 UHPC의 역학적 특성에 대해 일반 콘크리트와 섬유보강 콘크리트를 비교한 결과이다. 현재 상용 가능한 UHPC의 압축강도 범위는 200 MPa로 일반적인 보통 콘크리트에 비해 약 8배, 섬유보강 콘크리트에 비해 약 4배의 강도를 가지고 있다. <그림 3>은 UHPC의 직



사진 1. UHPC의 시공성

표 1. 초고성능 콘크리트의 역학적 특성

특성	보통 콘크리트	섬유보강 콘크리트	초고성능 콘크리트
압축강도(MPa)	21 ~ 28	30 ~ 50	150 ~ 230
인장강도(MPa)	2 ~ 3*	4 ~ 8*	10 ~ 20**
휨강도(MPa)	1 ~ 3	5 ~ 15	30 ~ 50
탄성계수(GPa)	21 ~ 35	30 ~ 40	43 ~ 50
거동특성	Brittle	Quasi-Brittle	Ductile
균열형상	Partial	Partial Multiple	Multiple

*활렬인장강도, **직접인장강도

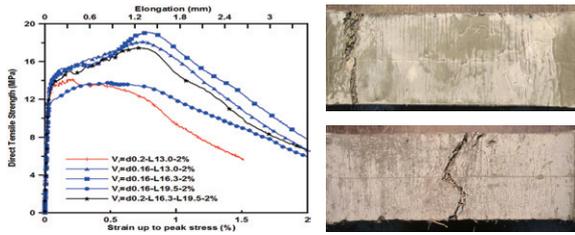


그림 3. UHPC의 직접인장 거동 및 파괴모습

접인장 특성을 나타낸 것이다. UHPC는 적절한 강섬유의 종류를 사용할 경우에는 직접인장거동에서 초기균열 발생 후에도 인장응력이 상승하는 변형률 경화(strain hardening)와 미세한 복수 균열(multiple cracking)의 생성을 유도하여 연성거동을 기대할 수 있다. <표 2>는 개발된 주요 UHPC의 압축강도와 직접인장 특성을 정리한 것이다. 프랑스의 Ductal은 압축강도 200 MPa 정도에서 직접인장강도가 12 MPa와 인장변형률은 0.3% 정도로 알려져 있다. 지금까지 개발된 UHPC 중에서 가장 높은 인장강도를 가지는 것은 CEMTEC으로 20 MPa의 인장강도와 0.2%의 변형 능력이 우수한 인장성능을 가지고 있음에도 불구하고, 강섬유의 혼입률을 11% 정도 사용하기 때문에 제조원가가 매우 높은 것이 단점으로 지적되고 있다. 미국 미시간 대학에서는 비틀림 강섬유 또는 후크형 강섬유를 사용하여 매트릭스와 섬유 사이의 부착특성을 증진시켜 강섬유의 혼입률이 2.0% 이하에서 인장강도 14.9 MPa, 인장 변형능력 0.4%의 우수한 인장특성을 가진 T-UHPFRC를 개발하였다. 한국건설기술연구원은 강섬유를 단독 또는 하이브리드 형태로 사

표 2. 초고성능 콘크리트의 직접인장 특성

종류	섬유의 사용형태	섬유혼입률 (vol.) %	역학적 특성		
			σ_{pc} MPa	ϵ_{pc} %	f'_c MPa
SUQCEM	Mono	1.75	8.8	-	180
DUCTAL	Mono	2.0	12.0	0.3	160 ~ 240
K-UHPC	Mono	2.0	12.0	0.3	200
	Hybrid	1.5	14.9	0.3	200
	Hybrid	2.0	17.5	0.54	200
	Hybrid	2.5	18.0	0.64	200
T-UHPFRC	Mono	2.0	19.1	0.79	200
MSCC	Hybrid	7.0	15.0	-	193.3
CEMTEC	Hybrid	6.0 ~ 11.0	20.0	0.2	200

용하여 인장강도가 12.0 ~ 19.1 MPa, 인장변형 능력이 0.3 ~ 0.79%의 매우 탁월한 인장성능을 가진 K-UHPC를 개발하였고, 이 K-UHPC는 지금까지 가장 우수한 인장특성을 가진 UHPC로 평가받고 있다.

2.3.3 체적변형 특성

UHPC는 W/B가 0.2 정도로 상당히 작고, 미세한 결합재를 다량으로 사용할 뿐만 아니라 굵은 골재를 사용하지 않는다. 또한 재령초기에 고온양생을 실시하기 때문에 수화반응이 활성화되어 자기수축이 매우 커져 구조물의 변형 및 균열이 발생하기 쉬워질 수 있다. <그림 4>는 콘크리트 종류별 수축량을 비교한 결과이다. 기존 UHPC의 자기수축은 800 $\mu\epsilon$ 정도이나 수축저감재료를 사용한 K-UHPC는 500 $\mu\epsilon$ 이하로 자기수축을 저감시킬 수 있다. UHPC의 경화 후 건조수축과 크리프 계수는 일반 콘크리트의 각각 1/10 이하, 1/5 이하이다. 따라서 UHPC도 수축저감 재료를 적절히 사용하면 전체 수축량을 650 $\mu\epsilon$ 이하로 제어 가능하여 구조물의 균열 및 변형이 발생하지 않는다.

2.3.4 내구특성

UHPC는 시멘트 경화체의 조직이 매우 밀실하여 열화 인자의 침입이 어려워 일반 콘크리트 및 고강도 콘크리트에 비해 염해 저항성, 탄산화, 동결융해 및 수밀성 등 내구성이 현저히 우수하다. <그림 5>는 UHPC의 염소이

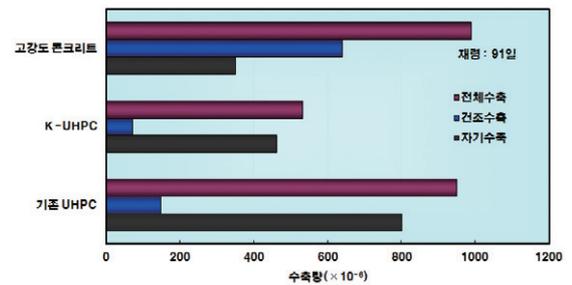


그림 4. 콘크리트 종류에 따른 수축량

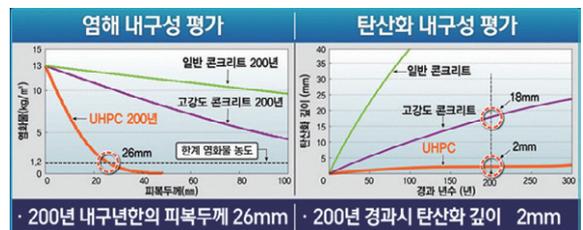


그림 5. 콘크리트 종류별 내구성명 예측

온 침투 저항성과 탄산화 저항성에 대해 사용수명을 예측한 결과이다. 일반 콘크리트와 고강도 콘크리트는 염해 및 탄산화에 대해 수명이 상당히 짧은 것으로 나타났으나 UHPC는 피복두께 25mm 이상을 확보하면 200년 이상의 내구수명을 가질 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 UHPC를 구조물에 적용할 경우 강도 및 인성 등 역학적 성능 향상뿐만 아니라 내구성능도 크게 향상되어 구조물의 장수명화를 유도할 수 있기 때문에 국가예산 절감에도 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

3. 초고성능 콘크리트의 개선 방향

3.1 사용재료 국산화 및 제조원가 절감

UHPC는 W/B가 매우 낮고 고가의 재료를 다량으로 사용하기 때문에 일반 콘크리트에 비해 제조원가가 상당히 비싸 활용 빈도가 제한적이다. UHPC의 실용화를 촉진하기 위해서는 무엇보다 제조원가를 대폭 저감시킬 필요가 있다. UHPC의 제조원가를 낮추기 위해 사용 재료를 국산화시키거나 성능을 극대화시켜 고가의 재료 사용량을 줄이는 방법이 있다. 한국건설기술연구원에서 개발한 K-UHPC는 재료를 국산화시키고 성능을 최대한 발휘시켜 고가 재료의 사용물량을 줄이는 방법으로 제조원가를 외국의 UHPC에 비해 70% 정도 절감시켰다(그림 6).

3.2 제조설비에 관계없이 다량 생산

UHPC는 강섬유의 다량 사용과 높은 점성으로 인해 믹서에 과부하를 줌으로써 기존 콘크리트에 비해 믹

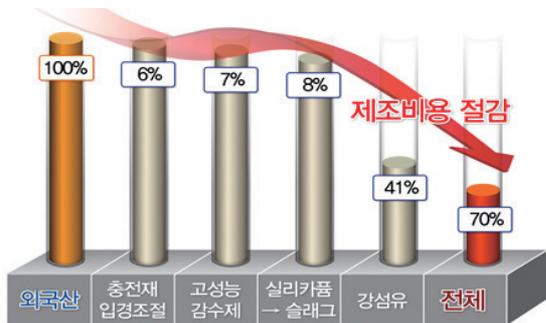


그림 6. K-UHPC의 제조원가 절감

서 효율이 저하되는 것으로 알려져 있다. 따라서 외국에서 고속믹서 및 전단믹서 등 특수한 믹서를 사용하여 UHPC를 제조하고 있으며, 이에 대한 연구가 수행되고 있다. 그러나 UHPC의 적용 확대를 위해서 믹서 종류 및 제조 시스템에 관계없이 어디에서나 다량으로 제조가 가능해야 할 것이다. 한국건설기술연구원에서는 레미콘 트럭만으로도 가능한 UHPC의 제조기술을 개발하여 국내뿐만 아니라 미국, 미얀마의 교량 현장에서 UHPC를 제조하여 적용한 바 있다(사진 2).

3.3 타설 및 제작방법의 다양화

UHPC는 일반적으로 프리캐스트로 부재를 사용하기 때문에 90℃에서 고온양생을 2일 정도 실시한다. 그러나 UHPC의 적용 범위를 확대하기 위해서는 프리캐스트 부재 제작뿐만 아니라 현장 타설도 필요하다. UHPC의 현장 타설을 위해서는 레미콘 제조뿐만 아니라 펌핑이 가능해야 하고, 양생도 고온양생을 최소화하거나 일반양생이 가능해야 한다. (사진 3)은 180 MPa급 K-UHPC를 레미콘 B/P에서 제조하여 레미콘 트럭으로 운반하여 수평 펌프카로 타설하는 모습이다.

4. 맺음말

향후 건설 산업의 미래는 현재 연장선상의 예측 가능한 변화가 아닌 친환경 생활공간, 국토의 효율적 활용, 물류의 초고속화 등 경제·사회 및 산업 환경 변화에 이



사진 2. 레미콘 트럭으로 K-UHPC의 제조(미얀마, 미국)



사진 3. K-UHPC의 레미콘 B/P 제조 및 펌핑 타설 모습

르기까지 광범위한 분야에서 새로운 국면이 예상된다. 또한 본격적인 무환경쟁시대에서 건설 산업이 국가 이익에 기여하고 경쟁력을 확보하여 세계화와 블록화 현상의 심화를 헤쳐 나가기 위해서 우리나라가 동북아 물류 중심국가로서의 자리매김을 위해 국가 기반시설물의 선진화가 필요하며, 이를 위해서 UHPC와 같은 혁신적인 건설재료의 적용이 필수적이다.

UHPC의 뛰어난 성능을 가지고 있음에도 불구하고 아직까지는 적용이 제한적이다. UHPC의 적용범위 및 적용실적을 증가시키기 위해 제조비용 절감, 어디서나 제조하고 타설이 가능하며 요구되는 품질을 확보할 수 있어야 한다. 그리고 UHPC 기술은 국내 시장뿐만 아니라 동남아 등 해외시장에서 적용이 기대된다. 따라서 UHPC 기술을 진일보시켜 국내뿐만 아니라 해외현장에서도 적용이 확대되기 위해서는 콘크리트 관련 업계에서 적극적으로 참여가 필요하다. 

담당 편집위원 : 강수태(대구대학교) stkang@daegu.ac.kr

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 하이브리드 사장교용 초고성능 콘크리트의 인성 향상 기술 개발, 2012.
2. 국토교통과학기술진흥원, 80 MPa~180 MPa급 맞춤형 SUPER Concrete의 제조기술 및 재료모델·지침 개발, 2015.
3. M. Schmidt, E. Felhing et al., Ultra-High Performance Concrete and Nonotechnology in Construction, Proceedings of Hipermat, 2012.
4. 박승훈, 김동주, 류금성, 고경택, Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete, Cement & Concrete Composites No. 34, 2012.
5. 고경택, 류금성, 강수태, 박정준, 김성욱, Shrinkage Properties of Ultra-High Performance Concrete(UHPC), Advanced Science Letters, Vol. 4, 2011.
6. Federal Highway Administration, Ultra-High Performance Concrete: A state-of-the-art report for the bridge community, FHWA-HRT-13-060, 2013.



고경택 연구위원은 일본 동북대학교에서 고유동 콘크리트의 동결융해 저항성에 대한 연구로 박사학위를 취득한 후 1999년부터 한국건설기술연구원 구조융합연구소에서 연구위원으로 재직하고 있다. 주 관심연구 분야는 초고성능·고성능 콘크리트, 친환경 콘크리트, 특수환경 콘크리트 및 콘크리트의 내구성이며, 고성능콘크리트위원회 전문위원, 콘크리트품질관리제도위원회 및 특수환경콘크리트위원회 전문위원으로 활동하고 있다.
ktgo@kict.re.kr



류금성 수석연구원은 중앙대학교에서 플라이애쉬 기반 시멘트-제로 콘크리트의 특성 연구로 박사학위를 취득하였으며, 2000년부터 한국건설기술연구원 구조융합연구소에서 수석 연구원으로 재직하고 있다. 주로 초고성능 콘크리트, 지오폴리머 콘크리트, 콘크리트 역학적 특성 및 내구성과 관련한 연구를 수행하고 있다.
ryu0505@kict.re.kr



강수태 교수는 KAIST 건설 및 환경공학과에서 초고성능 시멘트 복합체의 섬유 방향성에 따른 인장거동에 관한 연구로 박사학위를 취득하였으며, 한국건설기술연구원을 거쳐 현재 대구대학교 토목공학과 교수로 재직 중이다. 주로 섬유보강 시멘트 복합체와 관련한 연구를 수행하고 있다.
alphard93@gmail.com