

1 초고성능 콘크리트의 개발 및 적용 현황

글 선우윤호 \ 토목기술팀 사원 \ 전화 02-3433-7787 \ E-mail layncenix@ssyenc.com

글 이 타 \ 토목기술팀 차장 \ 공학박사 \ 토목구조기술사 \ 전화 02-3433-7773 \ E-mail yita@ssyenc.com

1. 머리말

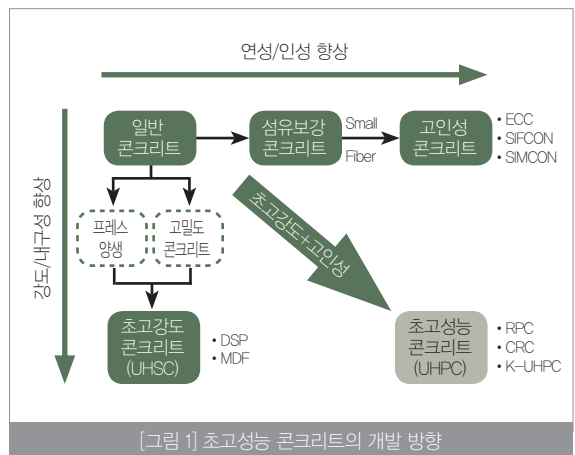
콘크리트는 오랜 기간에 걸쳐 인류의 생활과 사회의 기반을 구축 해온 건설 재료로서, 인류와 사회가 발전하는데 있어서 매우 중요한 역할을 한 재료이다. 이러한 중요성으로 인해, 과거부터 현재에 이르기까지 콘크리트에 대해 끊임없이 많은 수요가 창출되고 있다. 점점 급속화되는 사회의 발전은 더 높은 효율성을 갖춘 구조물을 필요로 하고 있으며, 이와 같은 추세에 따라 구조물의 대형화, 초고층화 및 장수명화가 추구하고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해, 더욱 우수한 성능을 갖춘 콘크리트를 개발하여 적용하기 위한 연구가 이루어지고 있으며, 이와 같은 과정 속에서 새롭게 각광받고 있는 콘크리트가 바로 초고성능 콘크리트이다. 본 고에서는 초고성능 콘크리트의 정의와 특성, 개발 및 적용 현황 등에 대해 소개하고자 한다.

2. 초고성능 콘크리트의 정의

콘크리트의 연구와 개발은 크게 다음과 같이 추구되어 왔다. 첫째로 강도를 증가시키는 방향이다. 이를 위해 굵은 골재를 미세석영 등의 작은 입자를 가진 재료로 치환하여 시멘트 경화체 조직을 밀실하게 하고, 강도에 큰 영향을 미치는 물-시멘트비를 최대한 낮추는 한편, 프레스 성형을 통해 가압력을 가하는 프레스양생이나 고온습윤양생 등 양생 방법을 개선하여 적용하였다. 이를 통해 강도 측면에서 큰 향상을 보인 콘크리트를 초고강도 콘크리트(UHSC, Ultra-High Strength Concrete)라 한다.

둘째로 인성을 증진시키는 방향이다. 다양한 고성능 콘크리트의 개발에도 불구하고, 고강도화에 따라 취성적 거동이 더욱 강하게 나타나는 경향이 있었다. 이를 극복하기 위해, 섬유보강 등의 방법을 통해 연성과 인성이 모두 향상되도록 개선한 콘크리트를 고인성 콘크리트(High Ductility Concrete)라 한다.

이에 따라, 최종적인 연구 방향은 강도와 인성을 모두 향상시키는 방향으로 귀결되고 있으며, 그러한 연구 결과가 바로 초고성능 콘크리트(UHPC, Ultra-High Performance Concrete)이다. 초고성능 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 재료적 특성이 크게 향상된 콘크리트로, 압축강도 150MPa 이상, 인장강도 15MPa 이상의 초고강도 이면서, 다량의 단섬유를 적용하여 높은 인장강도, 연성, 인성을 보유하고 있고, 우수한 내구성까지 복합적으로 갖추고 있는 콘크리트이다.



[그림 1] 초고성능 콘크리트의 개발 방향

3. 초고성능 콘크리트 연구 동향

초고성능 콘크리트를 실제 구조물에 적용하기 위해서는 초고성능 콘크리트에 대한 연구를 통해 재료의 특성을 명확히 파악하고, 이를 적용할 수 있는 설계기준 및 지침을 제시하며, 실험적 적용을 통한 경험 및 실적의 확보가 필요하다.

다음에는 초고성능 콘크리트의 특성과, 세계 각국에서 개발된 초고성능 콘크리트의 종류 및 특징에 대해서 소개하였다.

3-1. 개요

〈표 1〉은 WBCSD와 ACI에서 예측한 국내외 콘크리트 시장의 전망을 나타내고 있다.

표 1 국내외 콘크리트 시장전망 (단위: 억원)

구분	2010	2015	2020	2030
콘크리트 ¹⁾	500,000	520,000	550,000	570,000
고성능콘크리트 ²⁾	2,400	12,000	120,000	300,000
점유율(%)	0.48	2.31	21.82	52.63

1) World Business Council for Sustainable Development, 2009
2) ACI, Prediction of Concrete Industry, 2007

〈표 1〉에서 제시된 바와 같이, 고성능 콘크리트의 수요와 점유율은 전세계적으로 급속히 증가할 것으로 전망되고 있으며, 이에 따라 초고성능 콘크리트의 수요 역시 꾸준히 증가할 것으로 예측할 수 있다.

세계 각국에서는 이러한 추세를 빠르게 파악하여, 더욱 우수한 성능의 콘크리트를 개발하고 이를 실제 설계 및 시공에 적용하기 위한 연구가 전세계적으로 진행되어 왔다. 프랑스와 일본, 독일 등에서는 초고성능 콘크리트의 특성을 반영한 설계지침을 마련하고, 이를 토대로 초고성능 콘크리트를 적용한 구조물의 설계 및 시공에 적용하여, 건설재료로서의 경제성, 적용성, 타당성을 검증하는 연구를 꾸준히 진행해왔다.

국내에서의 초고성능 콘크리트에 대한 연구 성과 및 기술력도 세계적으로 충분한 경쟁력을 갖추고 있다. 한국건설기술연구원에서는 세계 각국의 초고성능 콘크리트에 견주어 부족함이 없는 성능을 갖춘 K-UHPC의 개발에 성공하였고, 이를 현장에 적용하기 위해 구조설계지침을 제정하였으며, 이를 바탕으로 도로사장교의 설계 및 시공에 세계 최초로 적용하는데 성공하였다. 이와 같은 현장에서의 적용 성과는 국내 초고성능 콘크리트의 기술력에 대한 실적으로서 건설시장에서의 경쟁력을 높여줄 것으로 기대된다.

다음은 기존 콘크리트와의 비교를 통해 초고성능 콘크리트의 특성에 대해 소개하고, 개발 현황에 대해서 기술하였다.

3-2. 초고성능 콘크리트의 특성

1) 역학적 특성

초고성능 콘크리트와 일반 콘크리트의 가장 큰 차이점은 우선적으로 강도의 차이를 들 수 있다. 〈표 2〉에 콘크리트의 종류에 따른 강도를 비교한 결과가 제시되어 있다.

표 2 콘크리트의 강도 비교

구분	압축강도(MPa)	휨인장강도(MPa)
일반 콘크리트	21~28	1~3
섬유보강 콘크리트	30~50	5~15
고강도 콘크리트	40~130	5~15
초고성능 콘크리트	150~230	15~60

초고성능 콘크리트는 압축강도가 150~230MPa, 휨인장강도 15~60MPa로 일반 콘크리트에 비해 약 8배, 고강도 콘크리트에 비해 약 4배로 강도가 크게 향상된 콘크리트이다.

또한 초고성능 콘크리트는 고연성과 고인성을 갖춘 재료이다. 초고성능 콘크리트는 전체 체적 대비 약 1.5~2.0% 정도의 섬유가 혼입된다. 초기 균열 발생 이후 섬유가 가교작용을 하면서 미세균열이 분산되고 변형을 경화 현상이 발생하는 등 연성거동을 통해 취성 파괴를 방지하는 효과가 나타난다.

2) 내구적 특성

초고성능 콘크리트의 밀실한 시멘트 경화체는 열화인자의 침투성 및 확산성을 크게 떨어뜨리게 되어 기존의 콘크리트에 비해 염해 저항성, 탄산화, 동결융해 및 수밀성 등 내구성 측면에서 우수하다. 이러한 특성은 구조물의 열화현상을 지연시켜 수명을 크게 증가시킬 것으로 기대된다.

3) 체적 변화 특성

초고성능 콘크리트의 낮은 물-시멘트비와 다양한 종류의 분체 다량 사용, 재령 초기의 고온습윤양생은 수화반응을 활성화시켜 자기 수축이 크게 발생하며, 이러한 현상은 타설 초기에 급격하게 나타난다. 따라서 팽창제와 수축 저감제의 사용을 통해 수축량의 제어가 필요하다.

3-3. 초고성능 콘크리트의 종류 및 특징

〈표 3〉에는 초고성능 콘크리트의 종류 및 특징이 제시되어 있으며, 각각에 대해서 아래에 소개하였다.

표 3 초고성능 콘크리트의 종류 및 특징

구분	특징	적용실적
RPC	<ul style="list-style-type: none"> • 압축강도 170~810MPa • 인장강도 30~140MPa • 반응성 분체(고강도) • 금속섬유(고인성) 	Sherbrooke교 선유보도교
ECC	<ul style="list-style-type: none"> • 압축강도 70MPa • 강섬유 혼합(고인성) • 균열에 대한 자기치유현상 	보수보강재료 강재 피복재료
CRC	<ul style="list-style-type: none"> • 압축강도 130~400MPa • 마이크로실리카(고강도) • 금속섬유(고인성) 	해양구조물 군사시설
SIFCON SIMCON	<ul style="list-style-type: none"> • 압축강도 210MPa • 강섬유/섬유매트 + 슬러리(고인성) 	보수보강재료 포장용재료
SUQCEM	<ul style="list-style-type: none"> • 압축강도 180MPa • 특수강섬유 혼합(고강도, 고인성) • 보강재 최소화 목적 	교량 활주로

1) 반응성분체 콘크리트(RPC)

반응성분체 콘크리트(RPC, Reactive Powder Concrete)는 고강도와 더불어 고연성과 고유동성까지 확보한 콘크리트로, 1994년 프랑스의 Bouygues사에서 개발되어, 1997년 캐나다의 세계 최초의 UHPC 보도교인 Sherbrooke 보도교에 적용되었으며, 이후 선유보도교에 사용되면서 국내에 가장 먼저 소개된 초고성능 콘크리트이다.

RPC는 콘크리트의 기본 구성 재료 중 하나인 굵은 골재를 0.5mm 이하의 크기를 가진 미세석영으로 치환하여 시멘트 경화 조직을 최밀충전구조화하고, 0.20이하의 낮은 물-시멘트비를 사용하여 강도와 열화인자 침투에 대한 저항성을 크게 향상시켰을 뿐만 아니라, 낮은 물-시멘트비로 인해 발생하는 유동성의 저하를 방지하기 위해 고성능 감수제의 혼입을 통해 유동성을 향상시켜 충분한 시공성을 확보하였고, 고강도화에 따라 발생하는 문제점인 취성적 거동에 대한 방안으로 강섬유를 혼입하여 고인성까지 확보한 콘크리트이다.

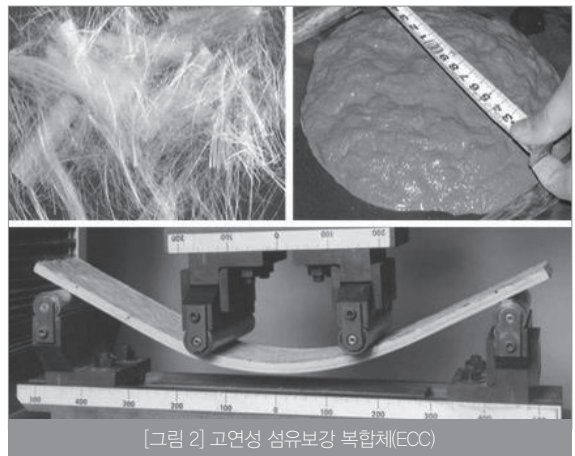
표 4 RPC의 역학적 특성

구분	압축강도(MPa)	휨인장강도(MPa)	탄성계수(MPa)
RPC200	170~230	30~60	60,000
RPC800	650~810	45~140	75,000

RPC는 RPC200과 RPC800의 두 종류로 나뉘며, 이들의 역학적 특성은 〈표 4〉에 제시되어 있다. RPC200은 일반양생으로 제조하였을 경우 200mm 이상의 슬럼프에서 170~230MPa의 압축강도가 발현되며, 90℃의 온도에서 고온양생으로 제조하였을 경우 3일 강도 측정 시 240MPa에 준하는 압축강도가 발현되고, 휨인장강도가 30MPa에서 최대 60MPa까지 발현된다. RPC800은 250~400℃의 고온고압증기양생과 가압력 50MPa의 프레스 성형으로 특수 제조한 콘크리트로, 압축강도 650~810MPa, 인장강도 45~141MPa에 이르는 높은 강도적 특성을 보인다.

2) 고연성 섬유보강 복합체(ECC)

고연성 섬유보강 복합체(ECC, Engineered Cementitious Composite)는 휘어지는 콘크리트(Bendable Concrete)라고도 불리며, 섬유보강 콘크리트와 유사하게 유기섬유와 강섬유를 혼합하여 사용한다. 압축강도는 약 70MPa로 다른 초고성능 콘크리트에 비해 비교적 낮지만, 섬유의 가교작용을 통해 미세한 다중 균열이 발생하면서 일반 콘크리트에 비해 100~1000배 높은 인장변형을 거동을 발휘하는 고인성의 재료이며, 일정 균열 폭 이하에서는 자기치유 현상이 나타난다. 이러한 특성은 높은 내구성과 긴 수명을 요구하는 구조물에 적합하며, 보수보강재료나 강재의 피복재료로서 사용된다.



〔그림 2〕 고연성 섬유보강 복합체(ECC)

3) CRC

CRC(Compact Reinforced Composite)는 마이크로실리카와 강섬유를 혼입하여, 압축강도가 130MPa에서 최대 400MPa에 이르는 고강도 특성과 고인성을 모두 갖춘 콘크리트로서, 해양구조물과 군사 시설에 주로 사용되고 있다.

4) SIFCON & SIMCON

SIFCON(Slurry Infiltrated Fiber Concrete)은 강섬유를 형틀 내에 비치하고, 스테인리스강 제조의 부산물인 슬러리를 침투 및 주입하여 콘크리트를 보강시킨 복합 콘크리트이다. 강섬유 대신 섬유 매트를 이용한 것으로 SIMCON(Slurry Infiltrated Mat Concrete)이 있다. 다량의 섬유에 의한 구속효과와 가교 작용으로 인해, 210MPa에 이르는 높은 압축강도와 고인성을 동시에 갖추고 있으며, 내진, 내폭, 보수보강용 재료, 포장용 재료 및 프리캐스트 구조물에 적용되고 있다.

5) SUQCEM

일본에서 개발된 초고강도 섬유보강콘크리트(SUQCEM, Super High-Quality Cementitious Material)는 콘크리트의 강도 향상을 위한 특수강섬유를 혼입하여 보강한 콘크리트로, 설계기준강도 180MPa, 휨인장강도 8.8MPa의 강도를 갖는 콘크리트이다. 특히 특수강섬유는 압축강도를 향상시킬 뿐만 아니라 높은 인장강도와 고인성으로 보강재의 사용을 최소화하거나 배제하는 것을 목적으로 하고 있다.

4. 국내 초고성능 콘크리트 개발 현황

4-1. 개요

국내에서는 한국건설기술연구원을 주축으로 개발된 K-UHPC가 있다. 2007년부터 2012년까지 진행된 Super Bridge 200을 통해, 설계 압축강도 200MPa, 설계인장강도 13MPa의 고강도를 가지며, 연성 거동 및 파괴에너지 흡수 능력이 탁월한 K-UHPC의 개발에 성공하였다.

이후 2020년까지 진행되는 Super Structure 2020을 통해 저비용, 장수명 하이브리드 사장교 기술의 개발을 위한 연구가 진행되고 있다. K-UHPC를 적용한 부재는 상부구조의 자중 감소 및 장경간화를 통해 장대화 교량의 목표를 달성하는 한편, 공사비 절감의 효과를 가져올 것으로 기대되고 있다. 또한 K-UHPC가 가지는 높은 내구성은 교량의 장수명화도 가능하게 할 것으로 기대되고 있다.

최근 K-UHPC의 재료역학적 거동에 대한 연구, 현장에 적용하기 위한 설계지침 제정 및 설계기준 개정을 목적으로 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 이를 적용한 교량의 설계 및 시공도 단계적으로 진행되고 있다.

다음에서는 초고성능 콘크리트의 적용 현황에 대해 알아보려고 하며, 이와 더불어 활발한 적용이 이루어지고 있는 고성능 콘크리트의 적용 현황도 소개하고자 한다.

4-2. 고성능 콘크리트 적용 현황

1) EX-Girder

특수교량을 제외하고, 일반적으로 50~70m 교량에서는 높은 공사비에도 불구하고 PSC 박스나 강박스가 거더로 주로 사용되어 왔다. 이는 PSC I형식의 거더를 50m 이상의 장경간 교량에 적용할 수 있는 기술이 충분하지 않았기 때문이었다. 그러나 최근 고성능 콘크리트를 적용한 개량형 거더의 개발을 통해 장경간화에 성공하면서, 기존 박스형 거더의 대체 거더로서 활용되고 있다.

한국도로공사에서는 건설예산 절감을 위한 20대 과제를 선정하였으며, 이 중 PC빔의 개선안으로서 EX-Girder(Expressway Girder)를 개발하였다. <표 2>에 제시된 것과 같이 일반적인 PSC 거더에 적용된 콘크리트의 설계압축강도는 30~45MPa이나, EX-Girder는 설계압축강도 40~60MPa의 고성능 콘크리트를 적용하고 최적화 설계를 수행하였다.



[그림 3] EX-Girder

표 5 EX-Girder 표준

강도	설계압축강도 60MPa				
	40	45	50	55	60
경간(m)	40	45	50	55	60
형고(m)	1.6	1.8	2.0	2.3	2.7
중량(t)	78	96	123	146	176

<표 5>는 EX-Girder의 표준으로, 최대 60m에 이르는 경간장을 확보하였을 뿐만 아니라, 저형고화를 통해 형하 공간을 충분히 확보하였고, 중량의 최소화 및 재료 수량 최소화에 따라 경제성도 향상되었다.

이후 고속도로 및 지방도로에 위치한 각종 교량의 설계 및 시공 과정에서 활발히 적용되고 있으며, 당사는 밀양-울산 고속국도 2공구

구간에 위치한 총 연장 1,111m의 단장천교에 압축강도 40MPa, 경간장 45~50m의 EX-Girder를 적용 및 시공 중에 있다.

2) HiPC-Girder

HiPC-Girder(Holed incrementally Prestressed Concrete)는 국내 최초로 80MPa의 고성능 콘크리트를 적용한 거더로서, 거더 복부에 다수의 중공을 도입하여 강선을 분산 정착하여 강선의 배치를 최적화하였다. 이를 통해 최대 70m에 달하는 경간장을 확보하였을 뿐만 아니라, 동일 경간의 거더 형식 중 가장 낮은 형고와 최경량화에 성공하였다.

2015년 비봉~매송 도시고속도로 구간에 위치한 양노3교에 설계기준 압축강도 80MPa, 경간장 60m, 형고 2.5m의 HiPC거더를 최초로 거처 및 시공하면서, 현장에서의 적용이 활발하게 진행될 것으로 기대되고 있다.



[그림 4] HiPC-Girder

표 6 HiPC-Girder 표준

강도	설계압축강도 80MPa					
	경간(m)	50	55	60	65	70
형고(m)	1.6~1.8	1.8~2.0	2.1~2.3	2.5	2.5	2.5
중량(t)	95	110	129	147	159	159

4-3. 초고성능 콘크리트 적용 교량 현황

<표 7>은 국내에서 개발된 초고성능 콘크리트인 K-UHPC를 적용한 교량의 현황이며, 이에 대해서 다음에 소개하고자 한다.

표 7 초고성능 콘크리트 적용 교량 현황

구분	연장(m)	거더형고(m)	슬래브 두께(mm)	비고
선유보도교	238.0	1.3	30.0	국내 최초 UHPC 보도교
KICT 보도사장교	7.0	0.3	70.0	국내 최초 UHPC 사장교
안동도로교	11.0	0.6	100.0	국내 최초 UHPC 도로교
레고랜드 진입교량	200.0 (2@100)	1.85	150.0	세계 최초 UHPC 도로사장교

1) 선유보도교

국내에서 최초로 적용된 초고성능 콘크리트 교량은 2002년에 준공된 선유보도교이다. π형 단면의 포스트텐션 보도교로, 거더 총 높이 1.3m, 슬래브 두께 30mm의 무근 콘크리트로 적용되었다. 당시 도로교설계기준에 의하면, 국내 콘크리트의 연구 현황을 고려하여 보도교의 슬래브 표준 두께가 140mm 이상으로 규정되어 있었으나, 자재, 설계 및 시공 기술을 갖추고 있던 프랑스와의 협력을 통해 이러한 한계를 극복하였다.



[그림 5] 선유보도교

2) 한국건설기술연구원 보도사장교

이후 국내에서도 한국건설기술연구원을 중심으로 초고성능 콘크리트의 연구 및 개발이 진행되어, 압축강도 180MPa, 인장강도 13MPa의 강도와 고인성, 고내구성을 갖춘 초고성능 콘크리트(K-UHPC)를 개발하였다.

K-UHPC를 적용한 최초의 사장교로서, 2009년 한국건설기술연구원 내에 보도사장교를 테스트베드 성격으로 건설하였다. 교량은 1주식 주탑에 3면의 팬형식 케이블을 배치한 형식으로, 건물과 연결되는 구간 단부의 보강형에 압축강도 180MPa의 K-UHPC를 적용하여 설계 및 시공하였다.



[그림 6] 한국건설기술연구원 보도사장교

3) 안동 도로교

2012년에는 국내 최초로 초고성능 콘크리트를 적용한 도로교가 안동에 건설되었다. 상부구조 전체에 K-UHPC를 적용하여 보강형 높이 0.6m, 바닥판 두께 100mm로 단면을 축소하여 경량화에 성공하였음에도 불구하고 충분한 구조적 성능을 확보하였다.

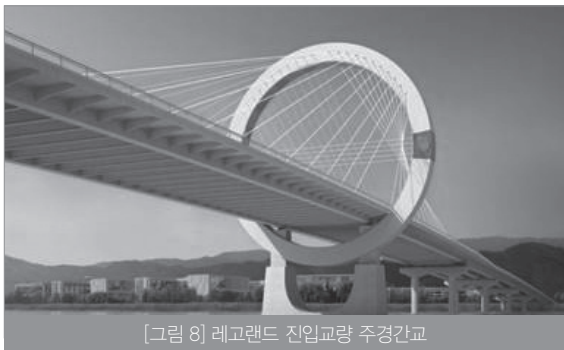


[그림 7] 안동 도로교

초고성능 콘크리트의 타설 및 양생 과정의 어려움으로 인해, 보강형은 한국건설기술연구원에서 제작 후 현장으로 운반하여 설치하였으나, 설치과정에서 발생하는 이음부는 UHPC의 배합에 적합한 이동식 특수 믹서를 현장에 배치하여 타설하였다.

4) 레고랜드 진입교량

K-UHPC를 적용한 도로사장교로 강원도의 레고랜드 진입교량이 2017년 준공을 목표로 시공 중이다. 이 교량은 세계에서 최초로 초고성능 콘크리트를 적용하여 건설되는 도로사장교로서, 도로사장교에 대한 K-UHPC의 적용성과 시공성을 입증하는 측면에서 그 의의와 상징성이 크다고 볼 수 있다.



[그림 8] 레고랜드 진입교량 주경간교

교량 형식은 경간장 100m의 1주탑 2경간 도로사장교이며, 사장교의 설계는 2015년부터 시행된 도로교설계기준-한계상태설계법의 설계기준에 부합하도록 설계되었다.

상부 보강형은 압축강도 180MPa의 초고성능 콘크리트를 적용하여,

보강형 높이 1.85m, 바닥판 두께 150mm, 자중 256kN/m로 축소한 단면으로 설계 및 시공이 진행되고 있다.

5. 맺음말

본 고에서는 초고성능 콘크리트의 정의와 특성, 개발 현황에 대하여 간략히 소개하였다.

그 동안 초고성능 콘크리트는 제한적인 연구 성과와 적용 실적 등으로 인해, 중장기적인 미래의 먹거리로서 가능성을 갖춘 건설재료로만 바라보는 시선이 있었다. 그러나 이제는 그러한 시선에서 벗어나야 할 필요가 있다. 초고성능 콘크리트는 더 이상 중장기적인 미래의 건설재료가 아니라, 현재의 건설시장에서 기술 경쟁력에 우위를 가져다 줄 수 있는, 현재 진행형의 건설재료로서의 가치도 가지고 있음을 받아들여야 할 것이다.

따라서, 초고성능 콘크리트를 설계 및 시공에 적용할 수 있는 기술력과 실적을 갖추기 위한 노력이 필요할 것이다. 그러한 의미에서 본 고가 초고성능 콘크리트에 대해 많은 관심과 참여로 이어질 수 있는 계기가 되기를 바란다. S

참고문헌

- 1 초고성능 콘크리트의 적용 현황 및 전망, 대한토목학회지 제61권 제2호, 2013
- 2 초고성능 콘크리트 개발 현황, 대한토목학회지 제61권 제2호, 2013
- 3 UHPC 활용 교량의 설계와 시공, 대한토목학회지 제61권 제2호, 2013
- 4 북부 중공 PSC (형) (HPC) 거더 교량의 설계, 대한토목학회지 제61권 8호, 2013
- 5 초고강도 고인성 반응성 분체 콘크리트(RPC)의 이용과 전망, 한국시설안전공단
- 6 초고성능 콘크리트의 재료적 특성 및 개선 방향, 한국콘크리트학회지, Vol.28 No.1, 2016
- 7 초고성능 콘크리트 교량 건설 현황, 한국콘크리트학회지, Vol.28 No.1, 2016
- 8 섬유강화 복합재료의 도로구조물 적용에 관한조사 연구, 한국도로공사 도로교통기술원, 2003
- 9 도로교설계기준(한계상태설계법)을 적용한 레고랜드 진입교량의 계획과 설계, 대림건설, 2015
- 10 도로교설계기준, 국토해양부, 2010
- 11 중소규모 교량 공법의 특성, 쌍용건설, 2015