초고성능 콘크리트의 교량 적용 현황 및 기술 동향

글 박성용 ＼ 한국건설기술연구원 연구위원 ＼ **전화** 031-910-0140 ＼ **E-mail** sypark@kict.re.kr

1. 머리말

1875년 프랑스 동부 알프스 지역에 최초의 콘크리트 교량인 'Pont de Chazelet'이 건설된 이래 현재까지 콘크리트는 교량 건설재료 중에서 가장 중요한 위치를 차지하고 있다. 국내에서도 전체 도로교 중에서 약 80% 정도가 콘크리트 교량일 정도로 콘크리트 교량이 대세를 이루고 있다.[1] 이와 같은 현상은 철도교량의 경우 더 두드러지게 나타나는데, 일례로서 2012년에 설계된 서해선 철도교의 경우 총 33.2km의 교량 구간 중 92%가 콘크리트 교량으로 설계되었다.[2] 이들 교량에 사용된 콘크리트의 강도는 대부분 20~40 MPa 정도이며, 가격적인 장점이 콘크리트 교량 점유율이 높은 가장 큰 이유이다. 하지만, 콘크리트는 염해에 약하고, 균열이 발생하기 쉬운 구조라서 철근 부식 등의 원인이 되어 대체로 강교보다 공용수명이 짧은 실정이다. 또한 강도에 비해 중량이 너무 커서 교량 설계 시 장대화하기 위해 별도의 조치가 필요하다.

이와 같은 콘크리트의 단점을 극복하기 위해 개발된 것이 고성능 콘크리트이며, 이 중에서 일정량의 강섬유를 혼입하여 압축강도가 150MPa이고 인장강도도 8MPa 이상을 발현토록 한 콘크리트를 초고성능 콘크리트(Ultra-High Performance Concrete, 이하 UHPC)라고 부른다. UHPC는 이와 같은 고강도 특성에 더하여 물처럼 흐르는 유동성으로 시공성이 우수하며, 혼화재를 다량 사용하여 조직을 치밀하게 만듦으로써 뛰어난 내구성능을 보장한다.

UHPC는 앞서 최초로 콘크리트 교량을 건설한 프랑스에서 1990년대부터 개발이 시작되었으며, 현재는 일본, 독일, 미국, 말레이시아 등에서 재료가 개발되거나 이 재료를 이용하여 교량을 건설하였다. 우리나라에서도 2000년대 초반에 한국건설기술연구원을 중심으로 하여 초고성능 콘크리트를 개발하여 왔으며, 국내에 몇 개의 시범교량을 건설한 바 있다. 이와 같은 성과를 바탕으로 최근에는 춘천에 세계 최초로 UHPC 도로 사장교 건설을 확정하고 설계를 완료하였으며, 2017년 완공을 목표로 현재 공사가 진행 중에 있다. 또한, 해외 진출을 위해 미국과 미얀마에 UHPC 시범교량을 성공적으로 건설하였으며, 이들 국가에서 실제 사업으로 이어가기 위한 노력을 경주하고 있다.

본 고에서는 아직까지 많은 사람들에게는 생소한 단어로 여겨지지만 벌써 많은 것을 이루어가고 있는 UHPC에 대하여 재료 개발 현황과 더불어 현재까지 국내외에서 적용된 UHPC 교량에 대해 간략히 소개하고자 한다.

2. 초고성능 콘크리트 개발 현황

앞에서 잠깐 설명한 바와 같이 UHPC는 압축강도가 150MPa 이상으로 초고강도이면서 체적비 2% 내외의 강섬유를 혼입하여 8MPa 이상의 높은 인장강도를 발현하며, 시멘트 경화체의 조직을 매우 밀실하게 함으로써 열화인자의 침입을 어렵게 만들어서 수밀성과 내구성을 대폭 향상시킨 섬유 보강 콘크리트의 일종이다. UHPC는 시멘트, 잔골재, 실리카퓸, 고성능 감수제, 강섬유, 물로 구성되어 있으며 여기에 다양한 화학 혼화제가 추가된다.

현재까지 많은 국가에서 UHPC의 개발이 진행되었으며, 대표적

---

[1] 국토교통부에서 2015년에 발간한 '도로 교량 및 터널 현황' 자료를 분석한 결과임
[2] 서해선 철도교 건설공사 실시설계 자료를 분석한 결과임

으로 프랑스의 Bouygues사에 의해 개발된 'DUCTAL'로 대표되는 RPC(Reactive Powder Concrete), 프랑스의 LCPC[3]에 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 Cementitious Material), 한국건설기술연구원의 K-UHPC 등이 있다. 독일에서는 우리의 과학재단에 해당하는 DFG(Deutsche Forschungs Gemeinschaft) 프로그램의 일환으로 UHPC 배합 및 적용 기술을 개발한 바 있으며, 인근의 오스트리아와 스위스 등과 연계하여 기술 개발을 지속하고 있는 상태이다. 또한 호주와 말레이시아, 중국 등에서도 UHPC 재료의 현지화 및 활용기술 개발이 활발히 이루어지고 있다.

한편, 국내에서는 한국건설기술연구원을 중심으로 하여 2002년부터 UHPC 재료 기술 개발을 시작하였으며, 그 성과로서 180MPa급 UHPC의 원천기술과 이를 활용한 세계최고 수준의 저비용 ·장수명 UHPC 사장교 기술을 확보하게 되었다. 이와 같은 기술을 바탕으로 하여 해외 진출을 위해 UHPC 재료의 현지화를 추진하고 있으며, 최근에 미국과 미얀마에서 현지 재료를 사용한 UHPC의 배합 및 제조 기술을 개발하고 현지에 적용한 바 있다.

〈표 1〉에서는 위와 같이 개발된 UHPC의 역학적 특성을 보통 콘크리트 및 섬유보강 콘크리트와 비교하여 보여주고 있다.

표 1 UHPC의 역학적 특성 비교

특성값	보통 콘크리트	섬유보강 콘크리트	UHPC
압축강도(MPa)	21~28	30~50	150~230
인장강도(MPa)	2~3*	4~8*	10~20**
탄성계수(GPa)	21~35	30~40	43~50
거동 특성	Brittle	Quasi-Brittle	Ductile
균열 형상	Partial	Partial Multiple	Multiple

* 할렬인장강도, ** 직접인장강도

3. 초고성능 콘크리트 구조 설계기준 현황

UHPC 구조설계를 위한 설계지침은 2002년도에 프랑스 토목학회(AFGC)에서 발간한 'Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Interim Recommendations'이 최초이다. 이 지침에는 역학적 특성, 구조설계 및 내구성 등 UHPC 구조물의 설계에 필요한 상수들을 제안하고 있다. 이 지침을 토대로 많은 설계가 이루어졌으며, 2013년도에 개정판이 발간되었다.

일본에서는 프랑스의 설계지침(안)을 토대로 하고 자국의 연구 결과를 반영하여 토목학회 이름으로 2004년도에 '초고강도 섬유보강 콘크리트 설계시공지침(안)'을 발간하고 실제 교량 설계 등에 적용하였다. 그러나 프랑스와 일본에서 발간한 지침에서는 철근 사용의 배제를 전제로 하여 개발됨으로써 UHPC의 효율적인 사용을 위해 필수적인 철근 배근과 관련된 규정들이 포함되어 있지 않은 단점이 있다.

한편, 독일에서는 정식으로 출간된 설계지침은 없지만 'Interim Report : Ultra High Performance Concrete'라는 보고서에 설계기준에 준하는 내용을 담고 있으며, 이에 따라 보도교를 설계하고 시공한 바 있다. 이 보고서에서는 철근의 사용을 위해 부착강도 및 균열거동 등에 대한 내용이 포함되어 있는 것이 특징이다.

국내에서는 한국건설기술연구원에서 수행된 UHPC 관련 연구성과를 기초로 하여 2012년에 한국콘크리트학회와 더불어 '초고성능 콘크리트 K-UHPC 구조설계지침'을 발간하였다. 이 지침은 기본적으로 철근과 강연선 등 보강재의 사용을 전제로 하고 있으며, 최신의 연구 결과를 반영하여 개정판(SUPER Concrete 구조설계지침, 2015)을 발간한 바 있다. 이와 같은 국내 설계지침에 따라 최근에 레고랜드 진입교량을 설계하였으며, 현재 시공 중에 있다. 또한 2015년에 미국과 미얀마에 각각 건설된 시범교량도 이 설계지침에 따라 설계되었으며, 해당국가의 검토 및 승인 절차를 모두 통과하였다.

[그림 1] 각 국의 UHPC 설계지침

4. 해외 초고성능 콘크리트 교량 현황

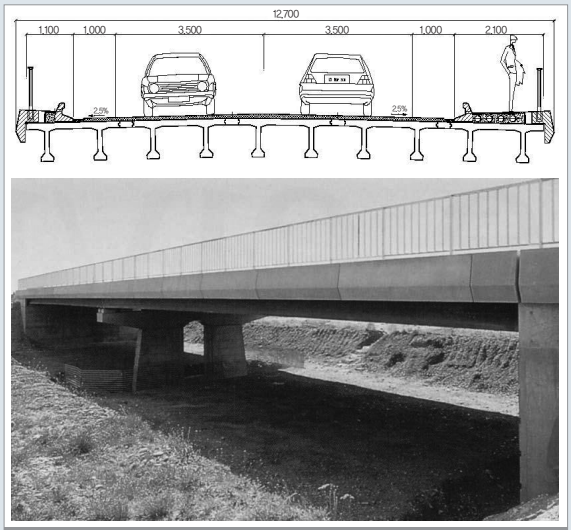
1997년 캐나다에 세계 최초의 UHPC 보도교가 건설된 이후 UHPC를 적용한 교량은 프랑스, 독일, 네덜란드, 덴마크, 스위스, 오스트리아, 이태리, 크로아티아, 슬로바니아 등 유럽, 미국, 캐나다 등 북미, 그리고 우리나라를 비롯하여 일본, 중국, 말레이시아 등 아시아, 마지막으로 호주, 뉴질랜드 등 오세아니아에 이르기까지 명

3 현재는 IFSTTAR(Institut Francais des Sciences et Technologies des Trasports, de l'Amenagement et des Reseaux)로 통합되었음

실공히 전 세계적으로 널리 건설되고 있다. UHPC 교량은 상부구조 전체에 UHPC를 적용한 경우도 있지만, 거더 또는 바닥판에만 UHPC를 적용한 경우도 있다. 한편, UHPC의 장점을 활용하여 보통 콘크리트로 제작한 프리캐스트 부재간의 연결부에 채움재로 사용하거나 교면 포장으로 사용한 경우도 있다.

4-1. 유럽

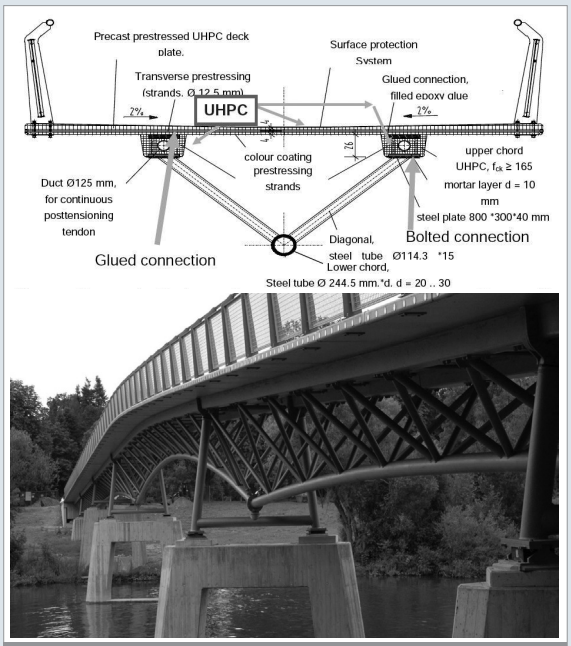
세계 최초로 UHPC를 개발하여 상용화에 성공한 프랑스는 캐나다에 세계 최초의 보도교를 건설한 후 2001년에는 세계 최초의 UHPC 도로교인 'Bourg-Les-Valence Overpass Bridge'를 건설하였다([그림 2] 참조). 이 교량은 거더 길이가 각각 20.5m와 22.5m인 두 개의 경간으로 구성되어 있으며, UHPC 파이형 거더를 프리캐스트로 제작하여 교각 위에 거치한 후 보통 콘크리트로 바닥판을 타설하여 완성하였다. 거더간의 연결과 거더간 종방향 연결부에 UHPC가 현장 타설 방식으로 적용되었다. 이 교량에서는 프리캐스트 부재를 연결하기 위한 연결부를 제외하면 철근이 사용되지 않았으며, 횡방향 텐던도 없다. 설계자에 의하면 UHPC를 적용함으로써 형고를 0.9m로 줄였으며, 이 영향으로 고정하중을 기존 교량에 비해 1/3 수준으로 축소시킬 수 있었다고 한다.



[그림 2] Bourg-Les-Valence Overpass Bridge(프랑스, 2001)

프랑스는 UHPC의 종주국답게 위의 교량 외에도 7개소의 UHPC 교량을 건설하였으나, 교량보다는 마르세이유 MUCEM 박물관이나 파리의 Jean-Bouin 스타디움과 같은 대형 건축물의 외장재에 UHPC를 적용하는 것이 더 활발하게 추진되고 있다.

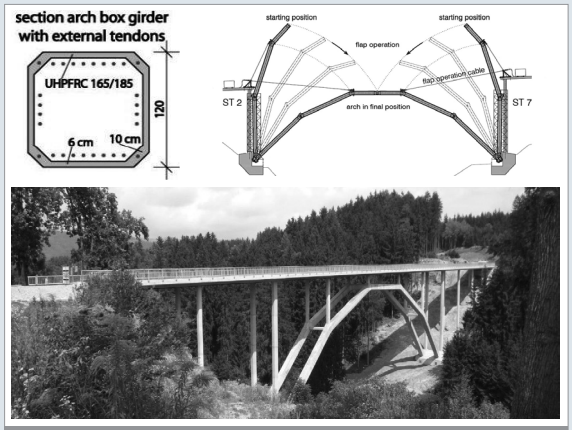
독일에서는 독일과학재단인 DFG의 주관 하에 2005년부터 7년간 1200만 유로의 연구비를 들여서 UHPC 재료의 성능개선, 구조물 활용 방안 등에 연구를 수행하였으며, 그 과정에서 총 다섯 개의 UHPC 교량을 건설하였다. 이 중에서 네 개는 지간장이 8~12m 정도인 소규모 교량이고, 나머지 하나가 2007년도에 독일의 카셀 지방에 건설된 'Gaertnerplaz Bridge'이다([그림 3] 참조). 이 교량은 주경간이 36m이고 총 연장이 133.2m인 6경간 연속 트러스 보도교이다. 두 개의 UHPC 상현재와 강재 하현재 및 사재로 구성된 변단면 트러스가 프리캐스트로 제작된 프리스트레스트 UHPC 바닥판을 지지하는 형태의 구조이다. UHPC 바닥판은 두께가 80~100mm로 변화하고 전체 폭은 5m이며, 보행자와 자전거 전용으로 설계되었다.



[그림 3] Gaertnerplaz Pedestrian/Bicycle Bridge(독일, 2007)

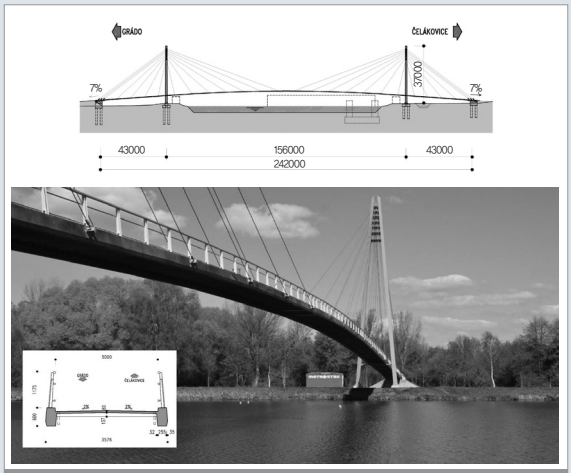
오스트리아 Wild 사에서는 2010년에 세계 최초로 UHPC로 아치 리브를 제작한 도로 아치교인 'Wild Bridge'를 건설하였다([그림 4] 참조). 아치 리브의 총 길이는 70m이며, 총 다섯 개의 세그먼트로 구성되어 있다. 아치 리브의 단면은 중공 사각단면으로 두께는 60mm에 불과하고 외부 긴장방식으로 보강되어 있다. 배치플랜트에서 제작된 아치 리브 세그먼트를 현장으로 이동한 후 회전공법(Swivel-in Method)을 이용하여 조립하는 방식으로 시공하였다. 기술적인 완성도를 중시하는 독일 문화권에서 임계부재인 아치 리브를 UHPC로 제작하여 실제 교량에 적용한 점은 시사하는 바가 크다고 할 수 있다.

체코에서는 2014년에 주경간이 156m이고 전체 길이가 242m인 2주탑 보도 사장교를 건설하였다([그림 5] 참조). 교폭은 3m이며, 보도하중과 더불어서 35kN의 차량하중을 견딜 수 있도록 설계되었



[그림 4] Wild Bridge(오스트리아, 2010)

다. 이 교량에는 체코에서 현지 재료를 사용하여 1.5%의 강섬유를 혼입한 UHPC가 사용되었다. 사용된 UHPC의 설계 강도는 110MPa이었으나, 실제 발현강도는 130MPa로 나타났으며, 이는 다른 나라에서 사용된 UHPC에 비해 강도가 낮은 편이다. 하지만 그만큼 가격도 싸져서 150만 유로에 이 교량을 건설할 수 있었다고 한다. 바닥판의 두께가 60mm이고 형고가 600mm인 에지거더 형식을 채택하고 있으며, 종방향 프리스트레싱을 도입하여 인장 보강 및 세그먼트간 연결을 꾀하였다. 정착부는 별도로 보강하지 않았으며, 세그먼트 길이는 11.3m로 하고 매치캐스팅 방식과 에폭시 접합으로 연결부를 처리하였다. 이와 같이 제작된 세그먼트는 런칭 겐트리를 사용하여 가설하였다. 이 교량에 사용된 전체 UHPC 물량은 126.5m^3이고 철근과 PS강재 물량은 각각 12.7톤과 17.5톤이며, 케이블 물량은 48톤이다. 이 교량은 2013년 1월에 착공하여 2014년 4월에 준공되었으므로 총 시공기간은 1년 4개월에 불과하다.

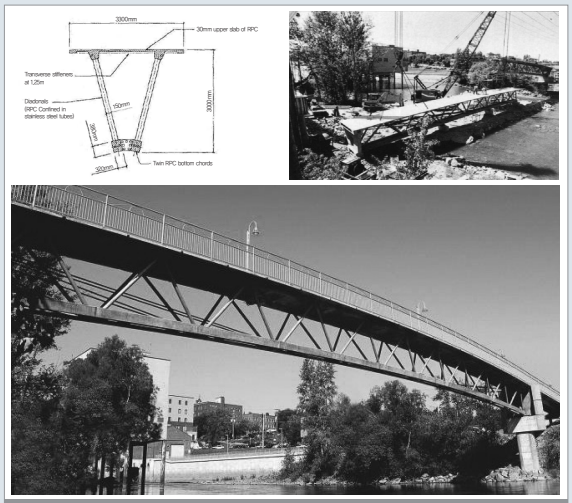


[그림 5] Čelákovice Footbridge(체코, 2014)

이외에도 스위스, 네덜란드, 슬로베니아에서 바닥판 패널, 교면 포장, 교량 확폭 및 교각 보강 등에 UHPC를 적용한 사례가 있다.

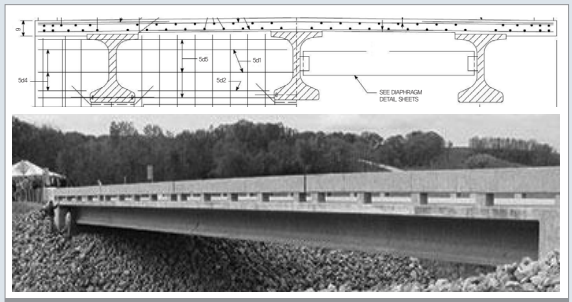
4-2. 북미

세계 최초의 UHPC 교량은 1997년 캐나다 퀘벡지방에 건설된 'Sherbrooke Bridge'로 프랑스에서 개발한 RPC를 사용하여 건설된 보도교이다. 교폭은 3.3m이고 바닥판의 두께는 30mm이다. 지간장은 60m이고 바닥판은 횡방향으로 프리스트레스가 도입되어 있다. UHPC 세그먼트는 10m 길이로 총 6개를 제작하였으며, 제작기간에 2개월이 소요되었고, 2주만에 가설을 완료하였다([그림 6] 참조).



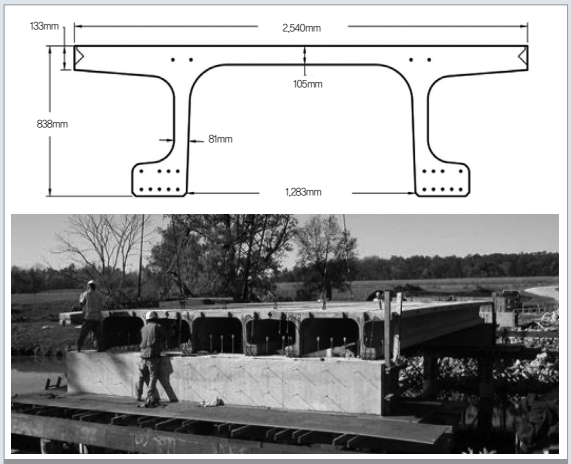
[그림 6] Sherbrooke Pedestrian Bridge(캐나다, 1997)

북미 지역에서 최초로 건설된 도로교는 2006년에 미국 아이오와주 와펠로 카운티에 건설된 'Mars Hill Bridge'이다. 이 교량은 33.5m의 지간장을 갖는 단순교로서 UHPC로 제작한 높이 1.14m인 세 개의 Bulb T 거더를 UHPC로 제작하여 현장에 거치한 후 보통 콘크리트를 현장 타설하여 완성한 교량이다. 각 거더에는 15.2mm 강연선이 47개씩 배치되어 있으며, 전단철근은 없다([그림 7] 참조).



[그림 7] Mars Hill Bridge(미국, 2006)

2008년에 미국 버지니아주에 건설한 'Cat Point Creek Bridge'도 'Mars Hill Bridge'와 유사한 형식으로 건설되었다. 같은 해에 아이오와주 뷰캐넌 카운티에 파이 거더 형식의 바닥판 일체형 거더 교량인 'Jakway Park Bridge'가 건설되었다. 이 교량은 미국 FHWA의 주관으로 개발된 것으로 Double T 거더와 유사한 형상이나 하부 플랜지가 복부 바깥쪽으로 튀어나가 있는 점이 다르다. MIT 대학에서 최초로 개발한 단면이 설계기준을 만족하지 못하자 FHWA에서 단면두께를 증가시켜서 기준을 만족하도록 하였다. 이 교량의 지간은 15.2m이고 교폭은 7.6m이며, 형고는 838mm이다. 가설 중에 강재 가로보를 사용하여 안정성을 꾀하였으며, 전단키를 이용하여 세그먼트를 연결하였다. 종방향으로는 거더당 총 22개의 15.2mm 강연선을 사용하여 프리텐션을 가하였다([그림 8] 참조).

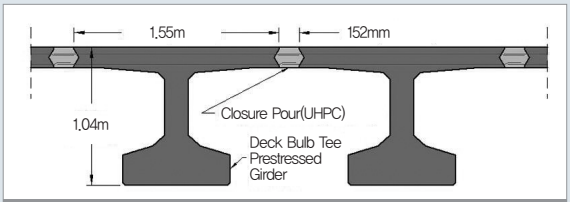


[그림 8] Jakway Park Bridge(미국, 2008)

2011년에는 아이오와 주립대에서 와플형 UHPC 바닥판을 개발하고, 와펠로 카운티에 있는 교량의 교체 공사에 적용하였다([그림 9] 참조). 바닥판의 두께는 64mm이고 리브 높이는 140mm이며, 리브 간격은 610mm이다. 바닥판 패널은 길이 4.6m, 폭 2.4m로 하여 총 14개를 제작하였으며, 바닥판 패널간 연결부에는 UHPC를 현장 타설하여 충전하였다.

[그림 9] UHPC Waffle Deck Bridge(미국, 2011)

한편, 북미 지역에서는 [그림 10]과 같이 보통 콘크리트로 제작된 프리캐스트 거더간 연결부에 UHPC를 적용하는 경우가 많다. 연결부에 UHPC를 적용하면 철근 겹침길이를 짧게 할 수 있으며, 사용성 및 내구성이 향상된다. 또한 거더간 연결을 통해 활하중에 대해 연속화를 꾀하는 경우에도 교각 위 바닥판의 연결부에 UHPC를 적용한 사례도 있다.



[그림 10] 프리캐스트 거더간 연결부에 적용

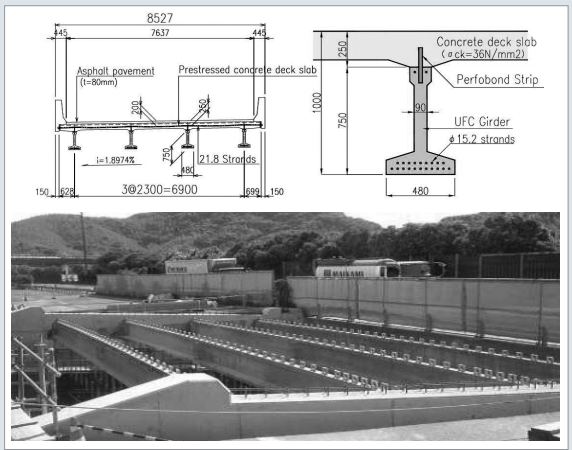
4-3. 아시아

일본에서는 2002년에 최초의 UHPC 교량인 'Sakata-Mirai Bridge'가 건설되었다([그림 11] 참조). 지간장이 50m인 이 보도교는 프리텐션 방식으로 프리스트레스가 도입된 총 8개의 박스거더 세그먼트들을 포스트텐션 방식으로 연결하였다. 특히 이 교량은 복부에 큰 구멍을 뚫어서 고정하중을 줄이고 미관을 향상시키고자 하였다. 이 교량의 교폭은 2.4m이고 바닥판 두께는 50mm이다. 설계자에 따르면 이 교량의 총 고정하중은 560kN이며, 이를 보통 콘크리트를 사용하여 기존 방식대로 설계했다면 2,780kN 정도 되었을 것으로 예측하였다. 결과적으로 고성능 재료인 UHPC의 사용과 중량을 줄이기 위한 설계자의 노력이 더해져서 고정하중을 기존에 비해 80% 가까이 줄인 셈이다.

[그림 11] Sakata-Mirai Bridge(일본, 2002)

'Sakata-Mirai 교량' 외에도 일본에서는 다양한 형상으로 많은 18개에 이르는 UHPC 교량을 건설하였다. 이 중에서 대부분의 보도교는 프리캐스트 세그먼트 U-거더를 가설한 후 슬래브를 별도로 연결한 형식이다. U-거더 세그먼트는 포스트텐션 방식으로 연결한다.

일본 최초의 도로교는 2005년에 건설된 'Horikoshi Highway C-Ramp Bridge'이다([그림 12] 참조). 이 교량은 4개의 프리텐션 UHPC 거더와 기존의 현장타설 콘크리트 바닥판을 퍼포본드 스트립을 이용하여 합성한 것으로 UHPC를 사용함으로써 거더의 개수를 11개에서 4개로 줄였다. 이를 통해 교량 전체의 자중을 30% 정도 줄일 수 있었다고 한다. 참고로 이 교량의 지간장은 16m이고 교폭은 8.5m, UHPC 거더의 높이는 0.75m이다.

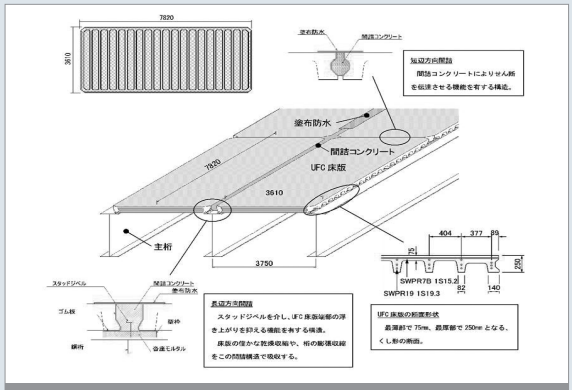


[그림 12] Horikoshi Highway C-Ramp Bridge(일본, 2005)

도쿄의 하네다 공항에 건설된 GSE(Ground Support Equipment) 교량은 하부공간을 최대한 확보해야 하므로 형고를 줄이는 것이 필요했다. 이에 UHPC 거더를 제작하여 현장타설 콘크리트 바닥판과 합성하였다([그림 13] 참조).

[그림 13] 하네다 공항 GSE Bridge(일본, 2010)

일본에서는 교량 외에도 공항 활주로 공사에도 바닥판에 UHPC를 대규모로 적용하였다. 즉, 도쿄 하네다 국제공항의 해상활주로에 UHPC 바닥판을 적용하였는데 바닥판의 형상은 리브로 보강된 박판으로서 판 두께가 75mm에 불과하다. 각 리브에는 텐던이 배치되어 있으며, 상면 슬래브에도 프리텐션 강재가 배치되어 양방향 모두 프리스트레스된 구조이다. 패널의 크기는 7,620mm x 3,610mm이며, 6,900개가 사용되고 기존의 콘크리트 패널에 비해 중량이 56% 정도 밖에 되지 않는다([그림 14] 참조).



[그림 14] 하네다 공항 해상 활주로(일본, 2010)

말레이시아의 Dura Technology 사는 UHPC 전문업체로서 2015년 현재 14개의 UHPC 교량을 완공하였으며, 12개 이상의 UHPC 교량을 시공 중이라고 한다(www.dura.com.my). 이 회사에서는 2011년에 경간장이 50m인 거더교로는 세계 최장의 도로교인 'Kampung Linsum Bridge'를 건설하였다([그림 15] 참조). 프리캐스트로 제작된 UHPC U-거더와 현장 타설된 콘크리트 바닥판을 합성한 구조로 교폭은 4m이고 UHPC 거더의 높이는 1.75m에 불과하다.

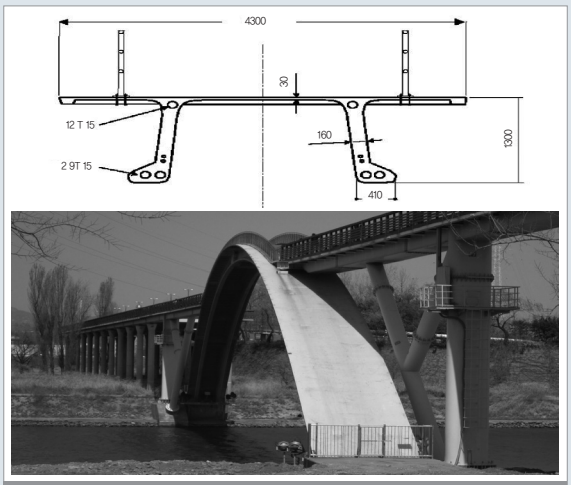
[그림 15] Kampung Linsum Bridge(말레이시아, 2011)

이 외에도 호주와 뉴질랜드 등에서도 UHPC 교량을 건설한 실적이 있으며, 특히 최근에는 중국에서도 UHPC에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있으며, UHPC 교량도 건설 중에 있는 것으로 알려져 있으나 그 자료를 구하기는 쉽지 않은 실정이다.

5. 국내 초고성능 콘크리트 교량 현황

국내에서 UHPC는 한불수교 100주년을 기념하여 2002년 준공한

선유 보도교(일명 Peace Bridge)에서 처음 소개되었는데, 프랑스 Bouygues사의 UHPC를 전량 수입하여 사용하였으며, 설계 및 시공도 프랑스 기술진에 전적으로 의존하여 건설한 경험을 가지고 있다. 이 교량은 아치 지간이 120m이고, 파이형 거더로서 형고가 1.3m이다. 폭원은 4.3m이고 슬래브 두께는 70mm이며 종방향으로 프리스트레스가 도입되어 있다([그림 16] 참조).

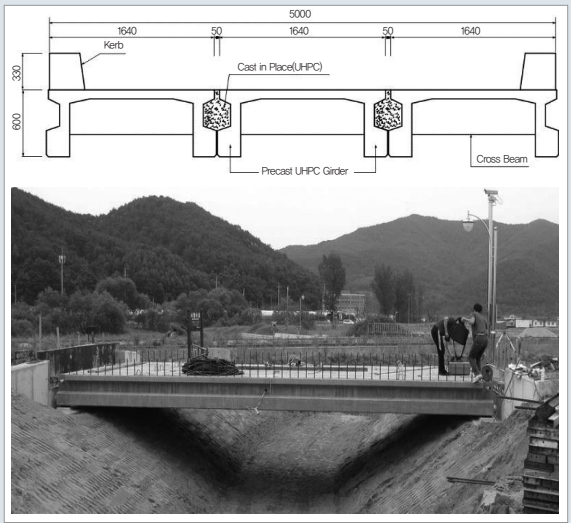


[그림 16] 선유 보도교(2002)

한국건설기술연구원에서는 2002년부터 목표강도 200MPa의 초고성능 콘크리트를 개발하기 시작하여 설계압축강도 180MPa, 설계인장강도 13MPa의 초고강도를 가지며, 연성거동 및 파괴에너지 흡수 능력이 탁월한 K-UHPC의 개발에 성공하였다. 2007년부터는 이를 사장교에 적용하기 위한 연구를 수행하여 보도교이기는 하지만 사장교를 실구조물로서는 세계 최초로 설계 및 시공하였다([그림 17] 참조). 폭 2.5m, 길이 7m, 거더높이 0.3m, 바닥판 두께 70mm의 에지거더 형식의 UHPC 세그먼트 4개를 제작한 후 주탑 쪽 현장 타설부에 한 경간당 2개씩 조립하여 경간길이 18m의 사장교를 완성하였다.

[그림 17] 한국건설기술연구원 내 보도 사장교(2009)

2012년에는 상부구조 전체가 UHPC로 제작된 도로교를 국내 최초로 시공하였다([그림 18] 참조). 지간장은 11m이고 교폭은 5m이다. 상부구조는 UHPC의 장점을 극대화한 독창적인 형식으로서 3개의 파이형 프리캐스트 프리스트레스트 거더로 구성되어 있다. 거더 높이는 0.6m, 바닥판 두께는 100mm로서 거더 1개당 중량은 약 112kN에 불과하다. 거더간 연결부는 UHPC를 현장에서 타설하였다. 이 교량은 규모는 작지만 교량 건설에 필요한 주요 기술이 모두 포함되어 있으므로, 이 교량의 성공적인 건설을 통해 국내에서 개발한 UHPC를 도로 교량에 즉시 적용 가능함을 확인할 수 있었다.



[그림 18] 안동 UHPC 도로교(2012)

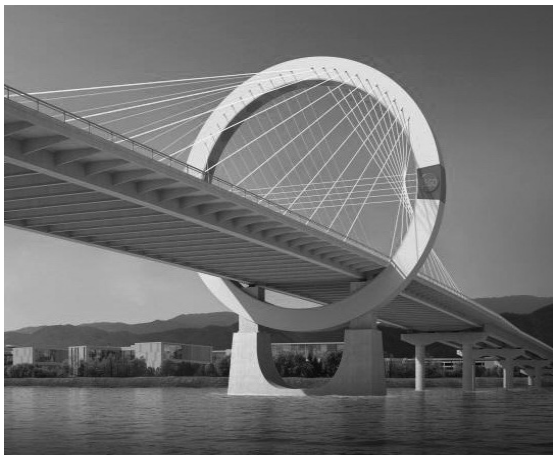
또한 2012년 말에는 한국건설기술연구원에서 자체 개발한 리브형 UHPC 바닥판을 적용한 교량이 시공되었다. 이 바닥판은 기존의 프리캐스트 콘크리트 바닥판에 비해 중량이 50% 수준의 경량으로서 경제성 분석 결과 기존의 강합성 사장교에서 바닥판만 대체하더라도 약 10% 정도의 상부 공사비를 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

UHPC 활용 사장교에 대한 국내 연구성과를 바탕으로 2011년에 남해안의 조발도와 둔병도를 연결하는 국도 77호선 조발대교 설계에 세계 최초로 UHPC 도로 사장교로 계획하였다([그림 19] 참조). 이 교량은 주경간장이 200m이고 주탑의 높이가 90m인 3주탑 사장교로서 교폭이 15.4m에 에지거더의 높이가 1.2m에 불과한 슬림한 구조이며, PSC 사장교로 설계한 것보다 14% 정도 공사비가 낮은 것으로 나타났다. 하지만 이 교량은 다른 원인으로 인해서 채택되지 못하였다.

[그림 19] 조발대교 설계(안)(2011)

2015년은 훗날 한국의 교량사에 한 획을 긋는 해로 기억될 것으로 보인다. 국내에서는 춘천 레고랜드 진입교량의 주교량에 UHPC 사장교를 적용하기로 확정하고 현재 시공이 진행되고 있으며, 국외에서는 우리나라에서 개발한 K-UHPC기술을 미국과 미얀마의 현지 재료를 사용하여 현지화에 성공하고 이를 이용하여 현지에 교량을 건설함으로써 우리 기술력을 해외에서 인정받은 해이기 때문이다.

먼저, 강원도에서 발주한 춘천 레고랜드 진입교량에 적용할 사장교는 1주탑 사장교로서 총 길이는 200m이고 교폭은 29.5m이다. 캔틸레버에 보행자 및 자전거 도로를 둔 4차로의 에지거더 형식으로서 바닥판 두께는 150mm이며, 가로보 간격은 4m로 설계하였다. UHPC를 사용하면서 상부구조가 경량화 되었으며, 이로 인해 강재 주탑이 가능해 지면서 레고랜드의 상징성을 나타낼 수 있는 원형 주탑으로 경관설계를 할 수 있었다([그림 20] 참조). 이 교량이 완공되면 UHPC 도로 사장교로는 세계 최초가 되며, UHPC 도로교 중에서도 세계 최장의 교량이 될 것이다. 현재 2017년 완공을 목표로 공사가 진행되고 있으며, ㈜대림산업에서 시공하고 있다.



[그림 20] 레고랜드 진입교량 조감도(2017 예정)

한국건설기술연구원에서는 앞서 언급한 바와 같이 UHPC 기술의 해외 진출을 도모하고 있으며 그 일환으로 미국과 미얀마에 진출하여 일부 현지 재료를 사용하여 UHPC의 배합에 성공하였다. 이들 재료를 이용하고 현지의 장비를 사용하여 UHPC 교량을 건설하였다. 교량의 형상은 [그림 18]에서 보인 안동 UHPC 도로교와 유사하며, 미국 아이오와의 뷰캐넌 카운티에 건설한 교량은 경간장이 16m이고, 미얀만의 양곤-만달레이 고속도로 확장구간에 적용한 교량은 12m이다. 아이오와 교량의 경우 현지의 지대한 관심 속에 진행되었으며, 지역 NBC 방송과 신문에 대대적으로 소개되었다. 이 교량은 규모는 작지만 국내 기술로 미국 현지에 시공한 최초의 교량이다([그림 21] 참조).

[그림 21] 미국 아이오와 뷰캐넌 카운티에 건설한
Hawkeye UHPC Bridge(2015)

미얀마 교량의 경우, 현재 발주 과정에 있는 '우정의 다리' 사업에 K-UHPC를 적용하기 위한 검증을 위해 미얀마 정부와의 협력을 통해 현지화한 재료인 M-UHPC에 대한 시범교량의 성격으로 진행되었다([그림 22] 참조). 이 교량 건설의 성공적인 수행으로 인해 미얀마 정부 관계자들이 UHPC에 대해 더 큰 호감과 관심을 갖게 되었으며, 이는 '우정의 다리' 사업뿐만 아니라 향후 예정된 미얀마의 많은 교량 사업들에 UHPC를 적용할 수 있는 큰 토대를 구축하였다고 평가할 만하다.

[그림 22] 미얀마 양곤-만달레이 고속도로 확장구간
M-UHPC Bridge 공사 전경(2015)

6. 맺음말

초고성능 콘크리트(UHPC)의 재료 및 기준을 간략히 살펴보고 현재까지 각국에서 건설된 UHPC 교량을 살펴보았다. 앞서 본 바와 같이 유럽, 일본, 미국 등 선진국에서는 UHPC를 건설 재료로서 충분한 경쟁력이 있음을 인식하고 기술 선점을 위해 치열하게 경쟁하면서 많은 성과를 거두고 있다. 프랑스에서는 이미 교량뿐만 아니라 건축물 등 다양한 구조물에 UHPC를 활용하고 있으며, 독일도 이미 연구개발을 마치고 오스트리아, 스위스 등 주변국들과 함께 적극적으로 UHPC를 적용할 기회를 엿보고 있다. 미국에서는 FHWA와 DOT 등 정부에서 주도하여 UHPC를 다양하게 활용하고 있으며 타국의 기술도 적극적으로 수용하는 분위기이다. 이웃나라 일본은 독자적인 재료개발과 함께 세계에서 UHPC 교량의 건설 실적이 가장 많을 정도로 이미 UHPC가 실용화 단계에까지 와있는 상태로 볼 수 있다. 또한 말레이시아, 중국 등에서는 UHPC 교량의 가격 경쟁력을 확보한 상태로 사업이 진행되고 있으며 우리가 모르는 사이에 많은 실적을 보유하고 있다. 이와 같이 UHPC 활용 기술은 이미 미래 기술이 아닌 현재 진행형인 기술이 되었으며, 선진국뿐만 아니라 개발도상국에서도 이 기술을 미래 성장동력으로 인지하고 경쟁적으로 현장에 적용하고 있는 추세이다.

UHPC가 우수한 특성을 가진 고품질 재료임에는 틀림없으나 기존 콘크리트에 비해 단가가 매우 비싸므로 가격 경쟁력을 갖출 수 있는 활용분야를 찾는 것이 매우 중요하다. 아직까지는 선진국에서도 경제성이 확인된 UHPC 구조물이 보고된 바는 없다. 그러나 다행스럽게도 국내에서는 한국건설기술연구원을 중심으로 하여 이미 UHPC 재료의 국산화에 성공하였으며, 소규모 교량에 비해 상부구조 공사비 비율이 낮고, 고강도화에 따른 부대효과가 크게 나타날 것으로 예상되는 사장교가 실용화 가능성이 높을 것으로 판단하고 UHPC를 활용한 사장교의 기술 개발을 시도하여 이미 성공적으로 마친 바 있다. 또한 경제성 평가 및 테스트베드 등을 통해 가격 경쟁력 및 현장 적용성이 충분히 검증된 상태로서 즉시 현장에 적용할 수 있는 수준의 기술력을 갖게 되었다. 이와 같이 국내의 초고성능 콘크리트 관련 기술은 이미 세계적으로도 충분히 경쟁력을 갖추고 있으며 특히 2015년에 춘천 레고랜드 진입교량에 UHPC 사장교를 적용하게 됨으로써 국내외의 입찰에 꼭 필요한 실적까지 갖추게 되었다. 이는 매우 중요한 의미를 가지고 있으며, 향후 세계 시장에 진출할 때 UHPC 사장교 기술로 수주할 수 있는 길이 열린 것이라고 할 수 있다. 한편, 미국과 미얀마에 진출하여 UHPC를 현지화하는데 성공하였으며, 이 재료를 이용하여 우리 기술로 현지에 UHPC 교량을 성공적으로 건설함으로써 우리 기술의 우수성을 검증 받았으며, 후속 사업을 통해 해당 국가로 진출할 수 있는 토대를 마련하였다.

이를 통해 단기적으로는 현재 위기 상태인 국내 건설산업의 활로를 트여주고, 장기적으로는 UHPC의 시공 경험을 통해 기술노하우를 계속 축적함으로써 세계 건설시장에서의 선도적인 위치를 유지할 수 있게 될 것이다. 또한 축적된 기술을 바탕으로 하여 UHPC 적용 시장을 계속해서 개척해 나갈 수 있으며, 이를 통해 UHPC 활용 기술을 국가 성장동력으로까지 발전시켜 나갈 수 있게 될 것으로 기대된다.

참고문헌

❶ 한국건설기술연구원(2012), "하이브리드 사장교 설계 및 시공시스템 기술 개발", 최종보고서
❷ 한국건설기술연구원(2012), "하이브리드 사장교 바닥판 개발", 최종보고서
❸ 한국콘크리트학회, "초고성능 콘크리트 K-UHPC 구조설계지침", 2012.9
❹ AFGC/SETRA, "Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes, Interim Recommendations," January 2002
❺ DAfStb, "Interim Report: Ultra High Performance Concrete", August 2008
❻ E. Fehling, M. Schmidt, et al (2013), "BetonKalender: Ultra -High Performance Concrete UHPC, Fundamentals Design, Examples", Ernst & Sohn
❼ F. Toutlemonde, and J. Resplendino (2011), "Designing and Building with UHPFRC", ISTE Ltd and John Wiley & Sons, Inc
❽ H. Russel & B. Graybeal (2013), "Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community", FHWA-HRT-13-060
❾ M. Schmidt, E. Fehling et al (2012), "Proceedings of Hipermat" 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, March 7-9, 2012
❿ S. Aaleti, B. Petersen, S. Sritharan (2013), "Design Guide for Precast UHPC Waffle Deck Panel System, including Connections", FHWA-HIF-13-032
⓫ Y. Voo, B. Nematollahi, B., et al (2012), "Application of Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete - The Malaysia Perspective", International Journal of Sustainable Construction Engineering & Technology, Vol 3, Issue 1, pp.26-44
⓬ 日本土木學會, "超高强度纖維補强 コンクリートの設計·施工指針(案),コンムリートライブラリー113", 2004.9
⓭ M. Kalný, J. Komanec, V. Kvasnička (2014), "Lavka res Labe V Čelakovicich", http://www.google.co.kr/url?sa=t&rct=j&q=esrc s&source=web&cd=5&ved=0ahUKEwjK1cTg2cvJAhWi2KYKHe1FBrYQFgg5MAQ&url=http%3A%2F%2Fwww.celakovice.cz%2Ffilemanager%2Ffiles%2Ffile.php%3Ffile%3D131691&usg=AFQjCNHEks6TwFpvx46WUWNqyHmdHs0GAA