



콘크리트 사장교 적용을 위한 고기능성 콘크리트

High Functional Concrete for Applying to Cable Stayed Bridges

김영진 Young-Jin Kim
(주)대우건설 기술연구원 부원장

김성욱 Sung-Wook Kim
한국건설기술연구원
구조교량연구실 연구위원

김용직 Yong-Jic Kim
(주)대우건설 기술연구원
토목연구팀 선임연구원

1. 머리말

최근 건설되는 장대교량은 해당 국가의 랜드마크로서 건설기술에 대한 과시 및 침체된 경제에 활력을 불어넣어 주는 역할을 한다. 국내의 경우도 장대교량의 주를 이루는 사장교 및 현수교의 설계 및 시공실적이 증가하고 있어 이 분야의 관련 기술이 비약적으로 발전하고 있다. 국내 장대교량의 시장규모는 1990년대에 약 0.8조원 규모에 불과하였으나 2000년대에는 약 4.5조원 규모가 되었으며 2010년대에는 주경간이 1,545m인 이순신대교를 포함하여 현재 사업비를 추정할 수 있는 실적만 고려하더라도 6.7조원에 이를 것으로 예상되어 세계에서 가장 큰 시장 중 하나로 부상할 것으로 예상된다¹⁾. 그러나 장대교량 건설의 경우 콘크리트 구조물이 대형화됨에 따라 성공적인 시공을 위한 콘크리트 물성에 대한 요구 성능이 강화되고 있다. 사장교 및 현수교의 주경간 길이의 증가에 비례하여 주탑의 높이가 증가하고 하부 구조인 기초 또한 부재의 크기가 증가하고 있어 고기능성 콘크리트에 대한 필요성은 계속 가속화될 전망이다. 일반적으로 콘크리트 주탑 시공 시 상부에 콘크리트를 운반하기 위해서 버킷과 펌핑을 이용하는 두 가지의 방법이 있다. 버킷의 경우 초기 비용은 비교적 저렴한 편이지만 주탑의 높이가 증가함에 따라 오히려 펌핑이 경제적인 방안이 될 수 있다. 한편 해상교량의 하부구조에 타설하는 콘크리트의 경우 물과 접하는 경우가 많아 일부 중요 부위에는 수중불분리 콘크리트를 타설해야 하며 이 때 시공 효율성과 품질 안정화를 위한 방안이 필요하다. 따라서 점차 장대화 되어가는 사장교에 적용하여 공기 단축 및 경제성 확보에 기여할 수 있는 고기능성 콘크리트의 기술은 크게 재료분리를 방지할 수 있는 범위에서 저점도 특성을 가져서 원활한 펌핑이 가능한 콘크리트를 제조하고 그 성능을 평가할 수 있는 기술과 해상기초의 수중 타설 작업 시 시공 성능을 향상시킬 수 있는 고품질의 수중불분리 콘크리트²⁾ 배합 제조 기술로 나누어 볼 수 있다.

2. 사장교의 콘크리트 기술 현황

특수 콘크리트 연구개발 분야 중에서 장대교량 건설과 관련된 분야로는 현장 작업성이 우수한 고유동 콘크리트, 매스 콘크리트 구조물의 온도균열 제어를 위한 저발열 콘크리트 및 대형해상기초 타설을 위한 수중콘크리트 등이 있으며, 이러한 맞춤형 특수 콘크리트 개발에 대한 연구개발이 활발히 진행 중에 있다. 이절에서는 주로 사장교의 주탑 및 해상기초에 적용될 수 있는 고기능성 특수 콘크리트 위주로 살펴보려고 한다.

2.1 주탑

장대교량에서 주경간을 증가시키기 위해서는 <사진 1>과 같이 고주탑이 요구되며, 설계 및 시공 기술의 발전에 따라 주탑의 형식과 소재도 변화되어 갈 것으로 예상되나 최근에는 콘크리트 주탑이 주를 이루고 있다. <표 1>은 주요 사장교의 주경간과 콘크리트 주탑 높이의 비율을 정리한 것이다. <표 1>에서 기존의 사장교 형상비를 검토해 보면 향후 교량이 장대화 되어감에 따라서 콘크리트 주탑의 높이는 300m 이상이 요구될 것으로 판단된다.

장대교량에서 콘크리트 주탑 시공시 경제성을 확보하고 공사기간을 단축시키기 위해서는 콘크리트의 일괄압송이 반드시 필요하다. 장대교량에 적용된 콘크리트의 일괄압송 기술은 국내의 경우 이순신대교에 적용된 270m가 최고이며, 국외의 경우는 현재 시공 중인 루스키대교에 적용한 321m이다. 콘크리트의 일괄압송을 가능하게 하기 위해서는 펌프의 용량도 중요하지만, 콘크리트의 압송 전·후 품질 변동성을 최소화시키는 기술이 필요하다. 압송 전후의 슬럼프, 공기량 및 압축강도 등 콘크리트의 물성 변화를 최소화시키기 위해서는 콘크리트 배합 기술이 기본적으로 중요하며, 사용 분체 및 화학혼화제의 품질도 중요하다³⁾.

2.2 해상기초

최근 장대교량을 비롯한 대형 해상 구조물이 대형화 되면서 해상기초 시공 시 수중 콘크리트에 대한 사용이 활발해지고 있다. 특히, 수중불분리 혼화제를 이용하여 유동성과 재료분리 저항성을 높여 수중에서 시공시에도 우수한 품질 확보가 가능한 수중 불분리 콘크리트에 대한 적용사례가 늘고 있다⁴⁾.

수중불분리 콘크리트 기술이 가장 발달한 일본의 경우, <표 2>와 같이 수중불분리 콘크리트는 현장타설 말뚝과 케이슨의 내·외경 사이 및 바다 콘크리트에서 채움 콘크리트 역할을 한다. 일본의 경우 수중불분리 콘크리트가 저발열 특성과 고유동 특성을 갖

표 1. 주요 사장교의 주경간과 주탑높이의 비율

| 교량명 | 주탑형식 | 주경간 (m) | 주탑높이 (m) | 주탑높이/주경간 |
|------|------|---------|----------|----------|
| 거가대교 | 콘크리트 | 475 | 158 | 0.33 |
| 서해대교 | 콘크리트 | 470 | 182 | 0.39 |
| 인천대교 | 콘크리트 | 800 | 238.5 | 0.30 |
| 수통대교 | 콘크리트 | 1,088 | 306 | 0.28 |

출 수 있도록 결합재를 구성하고 수중불분리 혼화제를 적극적으로 활용하였으며 장대교량의 경우와 같이 구조물의 규모가 커짐에 따라 수중불분리성 콘크리트를 포함한 수중콘크리트의 사용량이 점차 증가하고 있다. 아카시대교 건설 당시에는 주탑기초 2기와 앵커리지 기초 2기에 수중콘크리트 타설량이 약 129만m³였으며, 1회 콘크리트 타설량이 9,000m³에 이르렀다.

국내의 경우 1984년 수중불분리성 혼화제가 도입된 이후 수중불분리 콘크리트의 현장시공 실적이 증가하고 있다. 이러한 추세를 반영하기 위하여 1996년 콘크리트표준시방서 개정과 더불어 수중불분리 콘크리트의 시공에 대한 일반적인 지침과 1995년 대한토목학회의 ‘콘크리트용 수중불분리 혼화제 품질규준(안)’이 제정되었으며, 1999년에는 한국도로공사에서 별도의 수중 불분리 콘크리트의 설계·시공지침(안)을 제정하였다.

국내 시공실적으로는 수중불분리 혼화제의 도입과 함께 나로도 연육교, 자은암대교 및 응포대교 등에 적용된 바 있으며, 최근에는 영종대교, 광안대교, 이순신대교, 인천대교 등과 같은 대형 수중 콘크리트 구조물



(a) 거가대교 (b) 서해대교 (c) 인천대교 (d) 수통대교

사진 1. 주탑의 재원

에 수중불분리 콘크리트가 사용되었다. 향후 장대교량을 비롯한 해양 구조물의 대형화 추세를 고려할 때 수중불분리 콘크리트의 성능을 향상시키고 시공 효율성을 높이기 위해서는 수중불분리 콘크리트의 슬럼프 플로우가 600mm 이상인 기술개발이 요구된다.

3. 장대 사장교용 콘크리트의 핵심기술

3.1 주탑 : 고압송 콘크리트

콘크리트 사장교의 주경간이 길어짐에 따라서 높아지는 고주탑의 시공용 콘크리트에서 가장 중요한 인자는 콘크리트의 압송성이다. 버킷으로 시공할 수 있는 한계를 벗어나는 높이에서는 펌핑시공이 콘크리트의 품질을 향상시킬 수 있고 경제성도 확보할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 지상에서 상부까지 콘크리트의 물성 변화 없이 콘크리트를 이송할 수 있는 기술력을 확보하는 것은 다소 어려운 것이 현실이다. 이러한 기술을 확보해서 상부까지 콘크리트를 물성변화 없이 압송할 수 있다면 경제성 확보와 함께 콘크리트 품질이 크게 향상될 것이다. 따라서 굳지 않은 콘크리트의 펌프 압송성 예측기술, 압송 전후의 물성변화 최소화 기술 및 펌프압송시 관내 폐색현상 방지 기술은 고주탑

용 콘크리트 시공기술 중에서도 핵심기술이다. 콘크리트의 펌프 압송성 예측 기술은 공정 계획시 예정된 조건하에서 압송이 가능한지 여부 확인, 펌프의 기중 선정 및 콘크리트 배합의 보정이 필요한지 사전에 파악할 수 있는 기술이다. 이러한 콘크리트의 펌프 압송성을 예측할 수 있는 한가지 방법은 레올로지(rheology, 유변학) 시험에서 얻어진 값을 이용하여 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD) 해석을 실시하고 유동성과 펌프압송성의 관계를 정량적으로 분석하는 것이다⁵⁾. 압송 전후의 물성변화 최소화 기술은 압송 전과 후의 콘크리트 물성에서 슬럼프, 공기량 및 압축강도의 변화를 최소화 시킬 수 있도록 최적의 결합재 및 화학혼화제를 선정하고 콘크리트를 배합하는 기술이다. 펌프압송 시 관내의 폐색 현상은 특히 수직으로 압송할 경우 수직관 내에서 자중에 의해 물이 이탈하여 발생할 가능성이 크다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 골재의 함수 상태에 따른 콘크리트의 특성 및 가압블리딩 시험 등을 실시하여 압력을 받은 굳지 않은 콘크리트의 특성변화에 대한 영향 요인을 분석하는 것이 필요하다. <그림 1>은 고압송 콘크리트의 배합설계 순서를 정리한 것이다. 또한, <표 3>은 고주탑용 콘크리트의 현재 기술수준 및 국내 초장대교량사업단¹⁾의 목표 수준을 비교한 것이다.

표 2. 일본 해상교량의 제원과 기초 콘크리트 현황

| 교량 형태 | 교량명 | 완성 연도 | 경간 배분(m) | 기초수 | 콘크리트(m ³) | | | 시멘트 종류 | |
|-------|--------|-------|----------------|--------|-----------------------|---------|-----------|-----------|--------------------|
| | | | | | 수중부 | 기중부 | 합계 | 수중부 | 기중부 |
| 현수교 | 쿠루시마대교 | 1999 | 50+140+600+170 | 10(5)* | 121,000 | 336,900 | 457,900 | 저발열 | 저발열형 (일부 벨라이트계) |
| | | | 250+1,020+245 | | | | | | |
| | | | 260+1,030+280 | | | | | | |
| | 아카시대교 | 1998 | 960+1,991+960 | 4(2)* | 503,000 | 786,100 | 1,289,100 | 저발열 | 저발열형 |
| 사장교 | 다타라대교 | 1999 | 270+890+320 | 7 | 38,000 | 75,300 | 75,300 | 저발열 | 저발열형 (벨라이트계) |
| | 세토대교 | 1988 | 185+420+185 | 4(2)* | 43,000 | 83,200 | 126,200 | 플라이 애쉬 B종 | 중용열 고로B종 |
| | 이와시마교 | 1988 | 185+420+185 | 4(3)* | 51,800 | 49,900 | 101,700 | 플라이 애쉬 B종 | 중용열 고로B종 |
| 아치교 | 오미시마교 | 1979 | 297 | 2 | - | 20,700 | 20,700 | - | 보통 포틀랜드 |

* () : 케이스 기초의 수

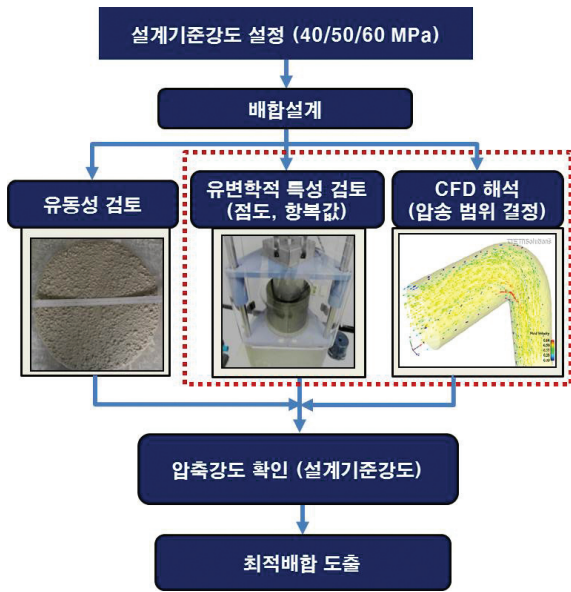


그림 1. 고주탑용 콘크리트의 배합설계 순서

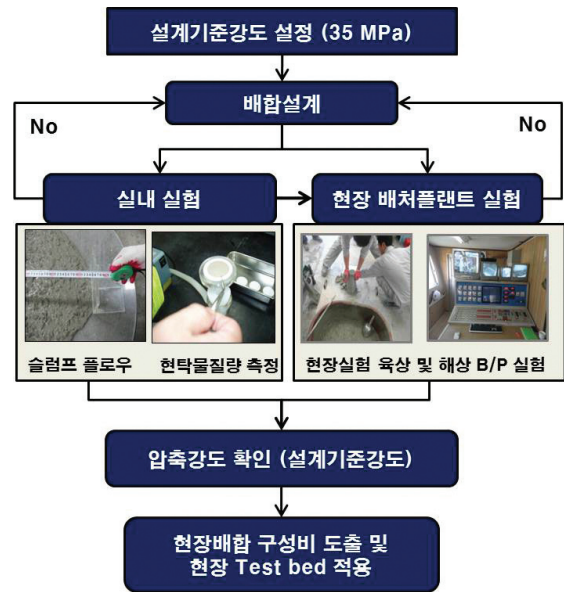


그림 2. 수중불분리 콘크리트의 배합설계 순서

표 3. 고주탑용 콘크리트의 수준 비교

| 구분 | 국내 | 국외 | 초장대교량 사업단 |
|------------|-----------------|----------------------|-----------|
| 주탑높이 | 270m (이순신대교) | 321m (루스키대교, 러시아) | 400m |
| 굵은 골재 최대크기 | 20mm | 25mm | 25mm |

표 4. 해상기초용 수중불분리 콘크리트의 수준 비교

| 구분 | 국내 | 국외 | 초장대교량 사업단 |
|--------------------------|----------|----------|-----------|
| 재령 28일 공시체 압축강도비 (수중/기중) | 0.7 이상 | 0.8 이상 | 0.8 이상 |
| 슬럼프 플로우 | 기중 500mm | 수중 500mm | 수중 600mm |

3.2 해상기초 : 수중불분리 콘크리트

현재 초장대교량의 대형해상기초 시공용 콘크리트 중에서 수중불분리 콘크리트에 요구되는 가장 중요한 인자는 고유동 수중불분리 콘크리트의 개발이다. 현재 국내에서는 슬럼프 플로우 500mm 정도의 유동성을 갖는 수중불분리 콘크리트가 적용되고 있으나 해상 시공조건을 고려할 때 시공성 및 내구성 측면에서 슬럼프 플로우 600mm 이상, 수중/기중 재령 28일 압축강도비 0.8 이상을 확보하는 기술이 요구된다. 이를 위해 수중불분리 혼화제를 개발하여 기존 혼화제의 성능을 향상시키고, 내해수성 및 저발열 특성을 갖기 위해 광물질 혼화제, 시멘트 종류 등을 검토하여 적절한 콘크리트 배합을 도출함으로써 목표성능 수준에 도달하는 고유동 수중불분리 콘크리트 배합기술을 개발할 수 있다⁶⁾. <그림 2>는 고성능 수중불분리 콘크리트의 배합설계 순서를 정리한 것이다. <표 4>는 수중불분리 콘

크리트의 현재 기술수준 및 국내 초장대교량사업단¹⁾의 목표 수준을 비교한 것이다.

초장대교량사업단¹⁾에서는 수중불분리 콘크리트의 효율성을 높이기 위해서 신재료를 활용한 수중불분리 혼화제와 해양 콘크리트에서 요구되는 고내구성 결합재로 적합한 고로슬래그 시멘트를 사용한 배합을 기반으로 고유동 수중불분리 콘크리트를 개발하였다. 개발된 고유동 수중불분리 콘크리트는 <사진 2>에 나타난 바와 같이 (주)대우건설에서 시공 중인 압해-암태 1공구 새천년대교(사장교) 구간의 RCD(Reverse Circulation Drill) 현장 타설말뚝에 Test-Bed로 일부 적용하였으며, Test-Bed 적용에 앞서 현장시험배합 및 성능검증을 통하여 유동성(슬럼프 플로우 610mm), 압축강도(28일 기준 50MPa) 및 압축강도비 0.9 이상을 확보하였다. 이 결과를 바탕으로 당초 슬럼프 플로우 500mm로 설계된 배합을 고로슬래그 시멘트를 사용하는 슬럼프 플로우 600mm의 배합으로 변경하였고, 해상 배척플랜트를 이용하여 현장



(a) 해상 배처플랜트



(b) 수중불분리 콘크리트 타설

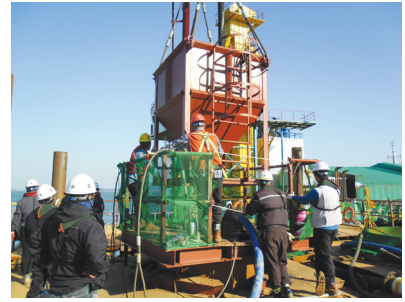


사진 2. Test-Bed 현장 적용

에서 수중불분리 콘크리트를 생산하여 RCD 현장타설말
뚝에 적용하였다. 적용결과, 개발된 고유동 수중불분리
콘크리트는 트레미관을 통과하는 능력이 우수하고 RCD
현장타설 말뚝 내에서 균질한 품질을 갖는 것을 확인하
였다.

4. 맺음말

점차 장대화 되어가는 사장교의 효율적 건설을 위하여
고주탑 및 대형 해상기초용 콘크리트에는 품질 및 시공성
이 우수한 고압송 콘크리트 및 수중불분리성 콘크리트 등
고기능성 특수 콘크리트의 개발 및 적용이 요망된다. □

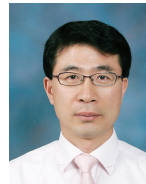
담당 편집위원 : 유성원(우석대학교) imysw@woosuk.ac.kr

참고문헌

1. 초장대교량사업단 사전기획 최종 보고서, 한국건설교통기술평
가원, 2007.
2. 한국콘크리트학회, 수중불분리성 콘크리트 설계·시공지침
(안), 1999.
3. 김용직, 김영진, 조준희, 최연왕, '초장대교량용 콘크리트의 압
송전·후 콘크리트의 특성', 한국콘크리트학회 가을 학술대회
논문집, Vol. 23, No. 2, 2011, pp. 197~198.
4. 유재원, 배수호, 박재임, 김성욱, 박정준, '고유동 수중불분리성
콘크리트의 특성', 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집,
Vol. 22, No. 2, 2010, pp. 105~106.
5. 최연왕, 박만석, 최병걸, 오성록, 김영진, 김용직, '고압송용 고
유동 콘크리트의 품질 예측을 위한 가압장치 개발', 한국콘
크리트학회 가을 학술대회 논문집, Vol. 23, No. 2, 2011, pp.
33~34.
6. 박재임, 배수호, 유재원, 김성욱, 박정준, '고유동 수중불분리성
콘크리트의 약학적 특성 및 내구성', 한국콘크리트학회 봄 학
술대회 논문집, Vol. 23, No. 1, 2011, pp. 343~344.



김영진 박사는 연세대학교 토목
공학과에서 반복하중을 받는 RC휨부
재의 비선형해석에 관한 연구로 박사
학위를 취득한 후, 1992년부터 (주)대
우건설 기술연구원에서 토목연구팀
장을 거쳐 부원장으로 재직하고 있다.
주 관심 연구 분야는 프리캐스트 조
립식 급속시공 교량, 저탄소시공시스
템, 콘크리트 내구성 분야 등이며, 현
재 초장대교량사업단 콘크리트분야
연구책임자와 우리학회 콘크리트원자
력구조물위원회 위원장을 맡고 있다.
youngjin.kim@daewooenc.com



김성욱 박사는 동국대학교 토목
공학과에서 콘크리트 크리프에 관한
연구로 박사학위를 취득한 후 1989
년부터 한국건설기술연구원에서 콘
크리트 재료분야 및 구조분야에 대
한 연구를 수행하고 있다. 2004년
에는 호주 UNSW 대학의 Visiting
Scholar로 근무하였고, 주 관심 연구
분야는 고강도, 초고성능 및 해양콘
크리트이며 우리학회 제10기 이사로
서 국제정보위원장을 역임하였다.
swkim@kict.re.kr



김용직 박사는 한양대학교 토
목공학과에서 고강도 경량 자기충전
콘크리트에 관한 연구로 박사학위를
취득한 후 캐나다 라이어슨대에서
Post Doc.을 마치고 2008년부터 (주)
대우건설 기술연구원 토목연구팀에
재직하고 있다. 주 관심 연구 분야는
고성능콘크리트, 친환경건설재료, 콘
크리트의 유변학적 특성 등이다.
yongjic.kim@daewooenc.com