

프리스트레스트 콘크리트 사장교(화명대교)의 설계

Design of Prestressed Concrete Cable-Stayed Bridge (Hwamyung Grand Bridge)



김광수*
Kwang-Soo Kim



조의경**
Eu-Kyeong Cho



이천수***
Cheon-Su Lee



전홍건****
Hong-Kean Jeon



이만섭*****
Man-Seop Lee

1. 개요

화명대교는 초정~화명간 연결도로 건설 공사의 일환으로 계획된 교량으로써 경상남도 김해시와 부산광역시 화명동을 연결하는 낙동강 횡단 교량이다(그림 1). 해당 사업은 김해를 비롯한 경남의 주요 도시와 부산광역시의 동부산권을 연결하는 지역간 광역교통망을 구축하여 남해고속도로와 국도 14호선의 교통여건을 개선하기 위하여 계획되었다. 이와 함께 해당 지역의 동·서축을 연결하는 기간도로망을 확충함으로써 시내 주요 간선도로의 교통을 분산하고 도심간 접근성을 개선할 것으로 기대하고 있다.

이러한 전체적인 노선계획에 있어서 화명대교는 낙동강을 횡

단하기 위하여 계획되었으며 2006년 11월 대안설계입찰이 실시되었고 현대건설이 대표시공사로 선정되어 2007년 3월에 착공되었다. 현재 시공중인 교량은 총 연장 1,039 m로서 주교량 500 m는 프리스트레스트 콘크리트 사장교이며 접속교는 강박스 거더교이다(그림 2). 본 고에서는 국내 최장 경간의 프리스트레스트 콘크리트 사장교로 계획된 화명대교의 설계 내용을 개략적으로 소개하고자 한다.

2. 프리스트레스트 콘크리트 사장교

프리스트레스트 콘크리트 사장교는 강사장교에 비하여 도장을 비롯한 유지관리의 측면에서 유리하고 사장재의 축력에 대해 효율적으로 단면 설계가 가능하다는 측면에서 구조적, 경제적 장점이 인식되어 왔다. 특히 케이블 기술의 발전과 지간장의 증대에 따라 보강형의 축력이 커지게 되고 압축에 강한 콘크리트는 사장교 보강형의 적절한 형식으로 그 효율성이 다시 인식되고 있다.

국내에서는 주경간장 150 m의 올림픽대교가 1989년에 준공된 이후 몇 차례의 프리스트레스트 콘크리트 사장교 건설 시도가 있었지만 이쉽게

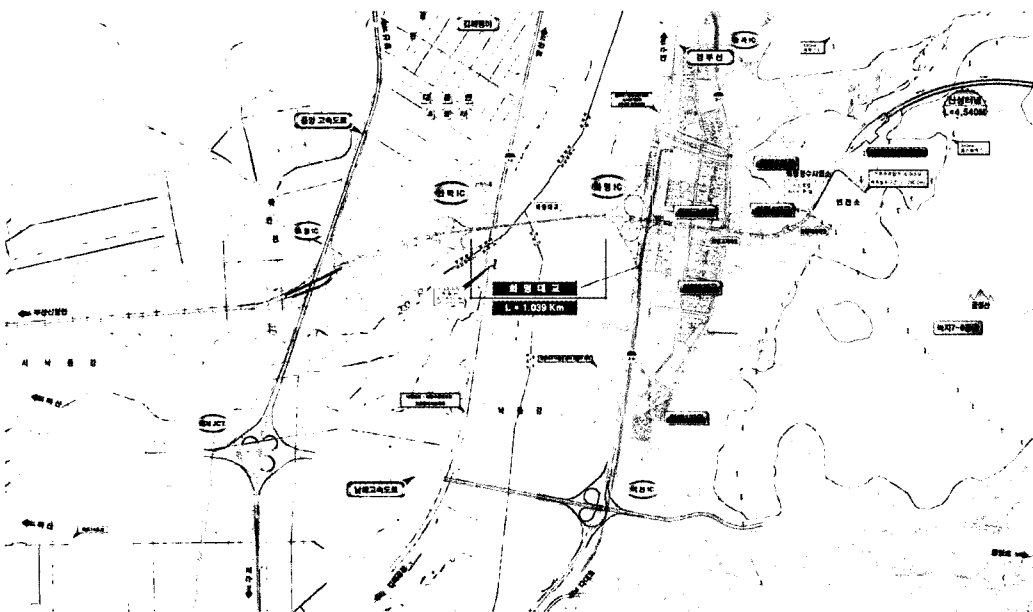


그림 1. 화명대교 위치도

* 정희원, 현대건설(주) 화명대교 건설현장 공무부장
biocon@hdec.co.kr

** 정희원, 현대건설(주)기술개발원 부장

*** 현대건설(주) 화명대교 건설현장 현장소장
(주)도화종합기술공사 전무이사

**** 정희원, 코비코리아(주) 대표이사

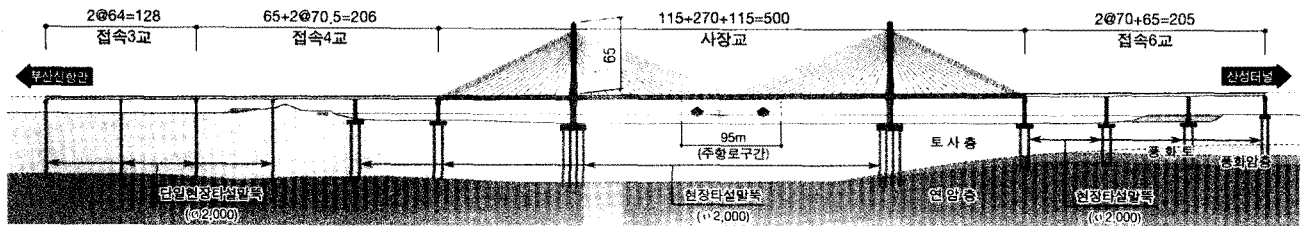


그림 2. 교량 계획 현황

도 성공하지 못하였다. 이에 비하여 해외에서는 주경간장 400 m 급의 콘크리트 사장교가 1990년대에 많이 건설되었으며 최 장 경간장은 500 m를 상회하고 있다. 특히 중국은 콘크리트 사장교 건설에 매우 적극적이어서 다수의 시공 사례를 보유하고 있다(표 1).

프리스트레스트 콘크리트 사장교는 압축에 강하므로 큰 축력이 작용하는 주탑과 보강형에 효과적인 적용이 가능할 뿐 아니라 케이블 정착부 상세를 단순하게 시공할 수 있는 장점이 있다. 또한 구조물의 감쇠가 커서 진동에 안정적이고 내풍 안정성에도 상대적으로 유리하며 피로 문제가 없어서 내구성도 우수한 구조 형식이라 할 것이다. 이와 함께 유지관리의 용이성에 따른 LCC 측면은 물론, 일정 기간까지는 시공비에 있어서도 경쟁력이 있는 것으로 평가되고 있는데 일반적으로 450 m 정도의 규모로 평가되고 있다.

3. 화명대교의 설계

3.1 보강형 설계

콘크리트 사장교의 보강형은 크게 박스 거더 형태나 edge 거더를 둔 슬래브 형식이 가능한데 화명대교는 박스 거더를 채

택하였다. 양단에 종방향 거더를 갖는 슬래브 형식은 휨강성이 작아 발생하는 종방향 모멘트도 감소시킬 수 있고 그에 따라 단면을 줄이게 되며 축력을 제어하기 위하여 단면을 확대한 edge 거더를 양단에 두는 형식이다. 이러한 형식은 이동식 비계의 규모를 줄일 수 있는 장점이 있지만 케이블 물량의 증가는 불가피하다.

화명대교는 수상에서 가설되어 기초 규모의 축소를 통한 가물막이의 시공성과 경제성 확보가 중요하므로 케이블을 1면으로 배치하고 주탑의 하부 구조를 경감시키고자 하였다. 이에 따라 보강형은 박스 거더 단면으로 설계되었으며 1-Cell 구조를 실현하기 위하여 횡방향 리브 구조를 채택하였다(그림 3).

박스 거더에 사재 케이블이 정착되는 단면은 매우 큰 응력이 작용하게 되며 이를 제어하기 위한 방법으로 강제 스트럿이 적용된 사례가 다수 있다. Panama Canal Bridge는 박스 내에 H형 강제 프레임을 설치하여 케이블 정착 단면을 보강하였는데 연결부는 프리캐스트 블록과 스티드를 활용하여 구성하였다. 화명대교에서는 접합부의 시공 상세를 단순하게 하고 구조 거동이 명확한 콘크리트 격벽을 활용하는 구조로 설계하였다(그림 4). 이와 함께 케이블 긴장으로 인해 격벽에 발생하는 인장응력을 제어하기 위하여 텐던을 배치하는 것으로 설계하였다.

주철근 설계는 국내의 최근 개발 기술을 적극적으로 도입함으로써 시공성과 경제성을 증진하였다. 하부 플랜지의 현치부 철근 상세 개선안을 반영하여 보강형의 콘크리트 타설이 원활하도록 하였다. 이와 함께 복부의 수직철근과 상부 플랜지 현치부 철근 상세에 있어서도 횡방향 및 비틀림 거동이 우수하도록 개선안을 반영하였다(그림 5).

표 1. 세계의 주요 콘크리트 사장교

교량명	국가	주경간장(m)
Skarnsundet	노르웨이	530
Jingsha	중국	500
Zhanjiang Bay	중국	480
Pontte Strallato	브라질	456
Dafoushi	중국	450
Chongqing 2nd	중국	444
Barrio de Luna	스페인	440
Tongling	중국	432
Helgeland	노르웨이	425
Panama Canal	파나마	420
Vasco da Gama	포르투갈	420
Yunyang Hanjiang	중국	414

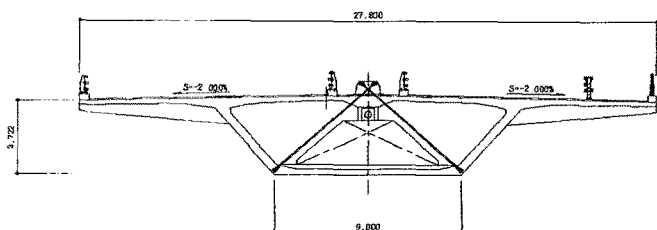


그림 3. 횡 리브와 tie-tendon을 이용한 1-Cell 박스 거더

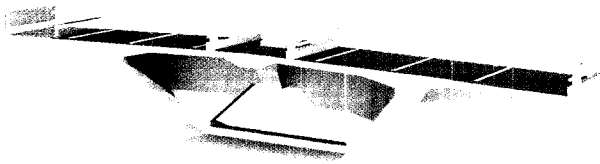


그림 4. 콘크리트 벽을 이용한 케이블 정착단면 설계

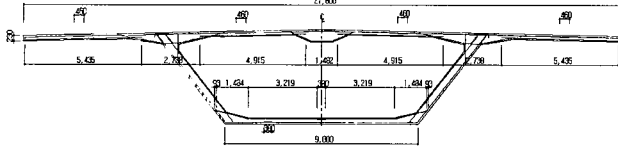


그림 5. 화명대교 보강형의 주철근 설계 (FCM 구간)

3.2 케이블 설계

화명대교의 케이블은 부분 교체가 가능하고 긴장 및 재긴장이 용이한 MS(multi-strand) type으로 선정되었다. 사용 강선은 최소 49개에서 85개까지 분포하며, 총 72개의 케이블이 배치되었다. 케이블의 간격은 보강형 세그먼트의 길이와 같도록 6.8 m로 설계되어 있고 구조 효율성을 위하여 팬타입으로 설계되었다. 케이블 덕트는 내풍 안정성 증진을 위하여 Helical Filet 처리된 컴팩트 타입을 적용하였다.

케이블의 가설은 HDPE 파이프와 마스터 강연선을 인양하고 strand by strand 방식에 의하여 강연선을 인장하며 multi-jack에 의하여 장력을 조정하는 단계를 거치게 되는데 보강형은 물론 주탑에서도 인장이 가능하도록 구조설계시 반영되었다(그림 6).

부반력 제어를 위하여 측경간 교각과 보강형에 tie-down 케이블이 설계되었는데 15.7 mm의 강선 31개가 4개소에 배치된다. 측경간 교각에는 tie-down 케이블의 유지관리를 위한 통로 및 점검 계단과 점검 발판을 설치하여 유지관리와 교체를 위한 구조 세목을 반영하였다(그림 7).

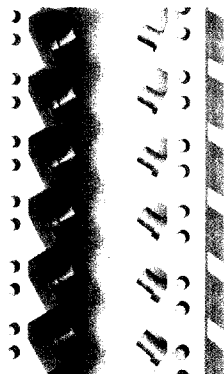


그림 6. 사재 케이블의 주탑 정착부

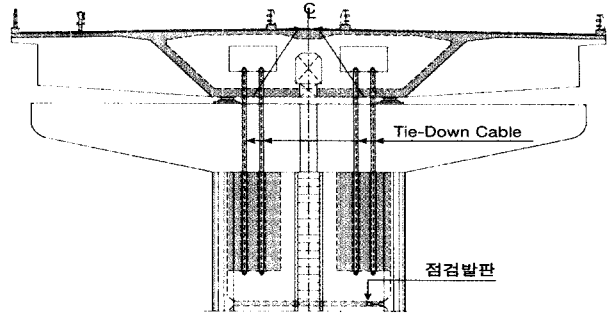


그림 7. Tie-down 케이블 설계

3.3 주탑 및 하부 구조 설계

주탑은 일주형으로 설계되었으며 보강형에서의 높이는 65 m이다. 이러한 1주형 주탑은 프랑스의 Brotonne교를 통하여 경험적 장점이 널리 인식된 바 있으며 최근에는 미국의 Maumee River 횡단 교량을 통하여도 확인되었다.

주탑의 하부 구조는 박스 거더의 하부 플랜지와 동일한 폭으로 설계되어 미학적 효과를 거둘 수 있었으며 기초 저판의 규모를 일반적인 사장교에 비하여 크게 경감시킬 수 있었다. 이를 통하여 하부 구조 시공을 위한 가물막이의 규모가 줄어들어 시공중 가시설 공사비를 절감시키는 성과를 거둘 수 있었다(그림 8).

이와 함께 주탑은 주탑 교각을 통하여 박스 거더 보강형과 강결되는 구조로 설계되었다. 이러한 강결 구조는 부정정력으로 인하여 주탑 기초의 단면력을 상승시킬 수 있지만 교좌 장치를 생략할 수 있을 뿐만 아니라 주탑부 보강형의 구조 상세를 매우 간결하게 처리할 수 있는 장점이 있다. 이와 함께 보강형과 주탑의 단면력을 감소시키는 효과를 기대할 수 있다(그림 9, 10).

4. 화명대교의 시공 계획

화명대교의 사장교 보강형은 form traveler에 의한 FCM 가설을 채택하고 있다. 6.8 m의 1개 세그먼트는 바지선을 이

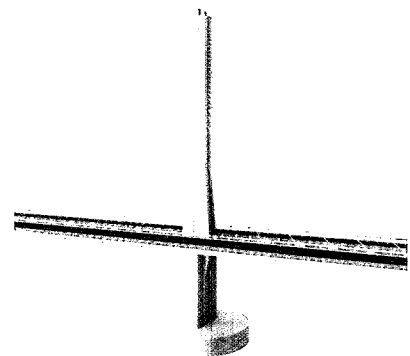


그림 8. 화명대교의 일주형 주탑 구조



그림 9. 강결구조에 의한 보강형의 처짐 감소



그림 10. 강결 구조에 따른 주탑의 변위 감소

용하여 레미콘 트럭을 물양장에서 낙동강을 통과하여 현장타설 하는 것으로 계획되어 있는데 콘크리트 펌프와 버킷을 이용한 현장타설이 활용될 예정이다. 케이블의 가설과 콘크리트 타설 등을 이용한 자재의 인양과 운반을 위하여 타워크레인을 운용할 계획인데 타워크레인을 보강형 거더에 위치시켜 가물막이와 기초의 규모를 경감시키는 효과를 얻을 수 있었다.

주탑부는 거푸집과 비계틀을 일체로 조립하고 크레인을 이용하여 단위길이를 일괄 인양 및 설치하는 climbing form에 의하여 시공할 계획이다(그림 11). 이러한 경우에도 타워크레인이 주요 장비로서 활용될 수 있는데 주탑과 보강형의 강결 구조는 시공중 구조물의 안정성 확보에 유리할 것으로 기대되고 있다. 주탑의 정착부는 PT-bar를 이용하여 국부적인 전단력과 인장력에 대하여 보강되는데 단면제원의 적정성과 시공 가능성이 사전에 검토되었다.

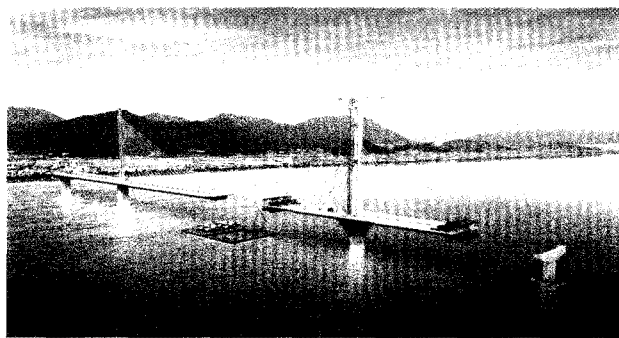


그림 11. 사장교 가설 계획

5. 맺는말

일정 지간장의 교량에서 콘크리트 사장교가 갖는 구조적 장점과 경제적 효과에도 불구하고 시공중 발생된 문제는 국내에서 콘크리트 사장교의 채택을 막는 계기가 되었다. 이에 따라 장지간 사장교는 물론 중지간의 사장교도 강사장교나 강합성 사장교로 설계되어 구조 형식의 편중을 초래하는 결과를 낳았다.

다행히 콘크리트 사장교에 대한 인식이 변화되면서 몇 개의 설계 사례가 확인되고 있으나 주경간장이 270m인 화명대교가 설계당시에 국내 최장의 경간장이므로 이미 500m를 상회하고 있는 세계 수준과는 차이가 있다. 이러한 주경간장 기록을 통하여 교량의 기술력을 가늠하기에는 무리가 있으나 해외의 사례는 물론 국내의 사회적 상황을 고려하더라도 콘크리트 사장교는 적용성이 뛰어난 교량 형식임은 분명하다.



그림 12. 화명대교의 완공 예상도

화명대교는 올림픽대교 이후에 한동안 시도되지 않았던 콘크리트 사장교를 적용하면서 다수의 진보적인 구조 상세를 설계 과정에서 반영하였다(그림 12). 이러한 과정을 통하여 콘크리트 사장교가 갖는 구조 형식으로서의 경쟁력을 다시 한번 확인하였으며 앞으로도 다른 구조물에서의 적용을 활성화하는 계기가 될 것으로 예상된다. 화명대교의 관련 기술자들은 교량이 차질없이 시공될 수 있도록 최선의 노력을 기울일 것이며 이러한 시공과정을 통하여 콘크리트 사장교의 기술 발전에 기여할 수 있도록 국내 기술진의 많은 관심과 조력을 기대한다. □