

화포교(비대칭 콘크리트 사장교)의 계획과 설계

Planning and Design of Hawpo(Asymmetric Cable-Stayed Concrete) Bridge



서석구*
Suk-Koo Suh



이석용**
Seok-Yong Lee



황성일***
Sung-Il Hwang



윤철균****
Cheol-Kyun Yoon



송봉섭*****
Bong-Seob Song

1. 머리말

한림-생림간 도로공사에서 대안설계로 발주된 화포교는 경상남도 김해시의 생태자연도 1등급인 화포습지를 횡단하는 교량으로서, 지역경제 활성화 및 교통 혼잡을 해소하고 원활한 물류수송에 따른 물류비용을 절감하기 위해 계획된 교량이다.

화포교의 교량형식 선정시 주요 고려사항으로는, 김해시와 창원시의 경계에 위치하고 있으므로 관문적 역할 수행에 따른 상징성과 경관성이 우수한 랜드마크(landmark)적 교량 연출이 필요하며, 화포습지에 가설되는 교량을 감안하여 환경 보호를 우선적으로 고려하는 계획을 수립하였다<그림 1>. 또한, 습지의 연약지반에 교량이 가설됨에 따라 대형 장비의 진출입이 불가능하므로, 가급적 소형 장비에 의한 가설이 가능하도록 계획하였다.

2. 경간구성 및 교량형식 선정

화포교는 대안설계 입찰안내서 상에 종단 및 평면선형 그리고 교량 위치가 고정되어 있으므로, 교량의 전체 연장 520m와 다리밑 공간에 대해서는 변경이 불가하다. 교량 가설위치는 군도 9호선과 산구 경전선 및 화포습지(생태자연도 1등급)를 횡단하고 있다. 시점부인 경전선 통과구간은 철도운영 안전성을 감안해 산구 경전선 사이에 교각 설치를 배제하였고, 측면 교각 시공시 인접한 군도에 미치는 영향을 최소화하였으며, 하천설계기준을 준수하기 위해서 하천제방 끝단에서 주탑(PY1)까지의 거리를 10m 이상 이격시켜야 하므로, 주탑(PY1)에서 교각까지의 거리는 90m 이상의 경간장으로 계획하였다. 중점부인 화포천

통과구간은 유수흐름에 영향을 주지 않기 위해 하천 유심부에 교각을 설치하지 않도록 하였으며, 하천제방과 리도 205호선을 횡단하기 위해 경간장을 100m로 계획하였다<그림 2>.

그리고 교량 중앙부는 화포습지를 횡단하고 있으므로 시공중 및 공용중 습지 훼손을 최소화하기 위해 중앙 경간장을 최대한 길게 260m로 결정하여 습지내 교각 설치를 최소화하였으며, 시점부의 대규모 건설초지에는 큰 주탑으로 계획하고, 중점부의 소규모 건설초지에는 작은 주탑으로 계획하여, 환경피해의 영향을 최소화하도록 결정하였다<그림 3>.

따라서 화포교는 도로, 철도 등 지장물과 생태자연도 1등급인 화포습지를 횡단하는 주변여건을 반영하기 위해 경간장을 46.5+113.5+260+100=520m로 구성하였다. 외국에서는 Katsushika Br.(일본), Humber Br.(영국), Tsing ma Br.(홍콩) 등이 주변 및 지형여건을 고려해 비대칭으로 경간을 계획한 사례가 있으나, 국내에서는 장대교량 계획시 주변상황 보다는 시각적인 안정감을 우선시함으로써 대칭 교량으로 계획하는 경우가 대부분이다. 즉, 국내에서는 교량 계획시 주변상황에 대해서 많은 부분을 무시하고 있는 실정이지만, 화포교의 경우에는 습지 환경보호에 중점을 두어 비대칭으로 경간을 결정하였다. 또한, 화포교의 교량형식은 김해시와 창원시의 관문교량으로서 랜드마크적 상징성을 감안하여 사장교로 계획하였으며, 화포습지 상태를 고려하여 환경 친화적 재료인 콘크리트를 사용하여 공용중 소음 진동 발생과 주기적인 재도장으로 인한 습지 환경 피해

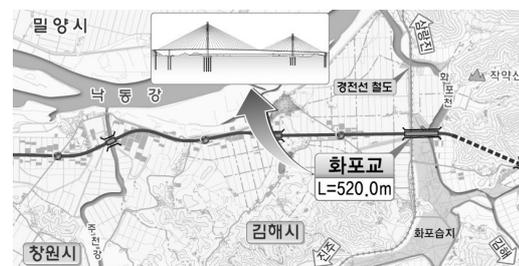


그림 1. 위치도

* 정희원, (주)서영엔지니어링 구조설계실 부사장
sksuh@seoyeong.co.kr

** 삼성물산(주) 건설부문 부장

*** 삼성물산(주) 건설부문 과장

**** 정희원, (주)서영엔지니어링 구조설계실 전무

***** (주)서영엔지니어링 구조설계실 상무

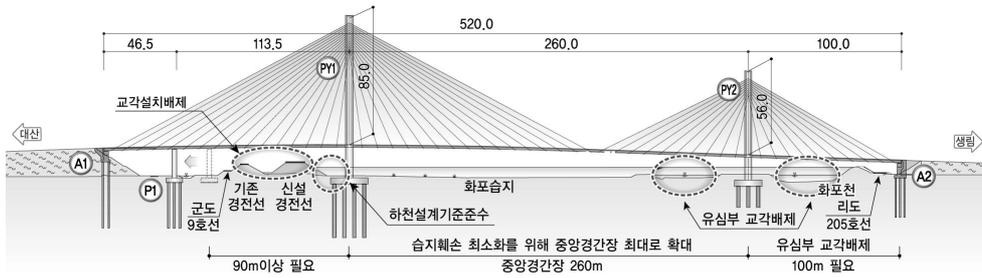


그림 2. 경간장 구성

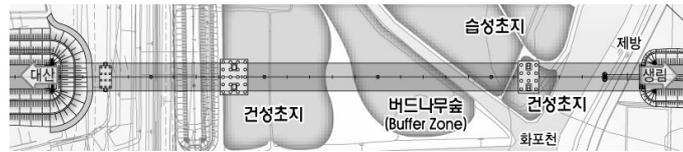


그림 3. 화포습지 현황

최소화를 고려하였다. 아울러, 시공측면에서도 소형 장비만으로 시공이 가능하도록 하기 위해 국내에서 처음으로 주경간장 260m의 비대칭 콘크리트 사장교로 결정하였다. <표 1>에 나타난 국내의 습지 통과 교량의 사례조사를 살펴보면 환경 보존을 위해 공중가설공법에 대한 적응성이 좋으며 장경간 형식인 사장교가 주로 채택됨을 알 수 있다. 따라서 화포교의 경우에도 습지보존과 시공성을 고려하여 사장교 형식의 교량으로 채택하였다.

3. 측경간 교각 설치

화포교는 화포습지와 지장물의 횡단 등 주변여건과 습지 상황을 고려하여 측경간장을 중앙경간장의 1/2을 적용하였다. 이에 따라 측경간의 보강거더는 활하중에 대한 변동응력 폭이 상대적으로 크게 발생하는 경향을 나타낸다. <그림 4(a)>에 나타난 것과 같이 교량 시점부 측경간의 보강거더에 발생하는 모멘트가 허용치를 초과하여 이에 대한 해결방안으로 보강거더의 단면을 증대시키는 방법과 측경간에 교각을 설치하는 방법 등을 검토하였다. 보강거더의 단면을 증대시키는 방안은 케이블의 배치와 장력

을 제조정해야 하고 주탑의 단면 증대 등 구조계의 전반적인 수정이 불가피함으로써 경제적인 부담이 증가하게 된다. 따라서 본 설계에서는 측경간에 교각을 설치하는 방법을 적용하였으며 그 결과 <그림 4(b)>에 나타난 것과 같이 활하중에 의한 모멘트의 변동 폭이 약 75% 수준으로 감소하여 허용치 이내로 발생하고 있으므로 보강거더의 단면을 증가시키지 않는 것으로 결정하였다.

4. 보강거더

화포교의 보강거더는 공용중 습지생물에 미치는 악영향을 감소시키며 채도장이 필요치 않아, 습지 환경피해와 유지관리 비용이 절감되고 내구성이 우수한, 환경 친화적 재료인 콘크리트를 적용하였다. 콘크리트 사장교의 보강거더는 박스거더 형식과 Edge 거더 형식을 들 수 있는데, 화포교의 경우는 습지 환경피해를 최소화하기 위해 중량이 가볍고 형고가 낮은 Edge 거더 형식을 적용함으로써, 습지내 기초 규모 축소와 더불어 내진 및 내풍 안정성을 확보하였다<그림 5>. 또한, 콘크리트 사장교는 강사장교에 비해 유지관리 측면에서 유리하고, 습지내 최소한의 가설구조물

표 1. 습지통과 교량 사례

교량명	교량 형식	주경간장(m)	위치	비고
Severn Bridge	현수교	987.5	영국	Severn 강
Second Severn Bridge	사장교	456.0	영국	Severn 강
Sidney Lanier Bridge	사장교	381.0	미국	Brunswick 강
Grosvenor Bridge	아치교	66.0	영국	Thames 강
Kessock Bridge	사장교	240.0	스코틀랜드	Moray 하구
Meihern Deising Bridge	사장교	70.0	독일	Danube 운하
동환상대교	사장교	260.0	일본	길야천 하구 습지
서강대교	닐센아치교	150.0	한국	밤섬(철새도래지)

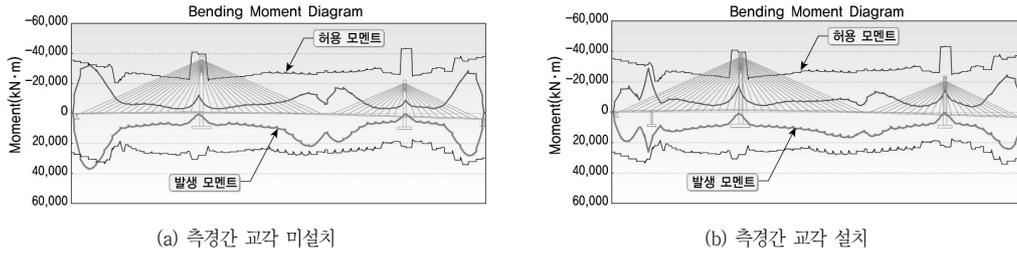


그림 4. 보강거더 단면력 비교

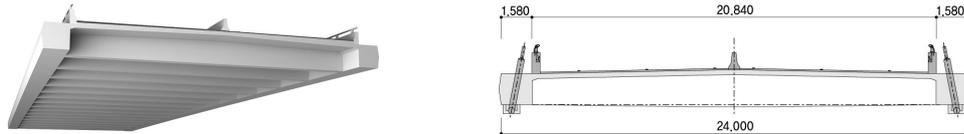


그림 5. Edge 거더

과 소형 장비의 운용으로 상부시공이 가능하며, 사장 케이블의 축력으로 인해 효율적인 단면 설계가 가능하므로, 유지관리와 경제성 및 시공성이 우수한 것으로 검토되었다.

상부 가설공법은 습지인 연약지반의 시공여건을 감안하여, 캔틸레버공법과 압출공법의 2가지 공법을 비교 검토하여, 국내 대부분의 사장교 가설에 적용되었고, 화포 습지내 가교 연장을 최소화 하며, 가설벤트가 필요 없는 캔틸레버 가설공법을 채택하였다. 이로 인해 시공단계 보다는 완성계 해석에 의해 단면이 결정되어 보다 슬랜더한 거더 단면계획이 가능하였다.

캔틸레버 가설공법의 주두부 길이는 Form Traveller(F/T) 거치 및 운용을 고려하여 19.5m, 세그먼트 길이는 10m로 결정하였다. 그리고 보강거더를 슬래브와 일체로 타설하면 콘크리트를 지지하고 있는 F/T와 사장 케이블에 부담이 가중되기 때문에, 보강거더 가설시 작용하는 단면력을 감소시키기 위해 Edge 거더와 가로보를 먼저 타설하고, 케이블을 1차 긴장한 후 바닥판 슬래브를 나중에 타설하는 방법으로 상부거더의 시공계획을 수립하였다. F/T 형식은 Upper type과 Below type이 있는데, 콘크리트 사장교의 경우 사장 케이블의 가설이 되고 난 다음 F/T의 진행으로 인해 Upper type은 시공이 불가함으로써 Below type을 적용하였다<그림 6>.

5. 케이블

케이블 외경이 작아 바람에 의한 진동의 영향이 작고, 공장제작 일괄가설로 공기가 짧으며, 품질 확보가 우수하여 Tatar Br., 제2 진도대교 등에 적용되었던 <그림 7>과 같은 PWS (Parallel Wire Strand) 형식을 선정하였다. 케이블 배치면수는 케이블 축력과 보강거더의 강성으로 비틀림에 저항하므로 내풍안정성이 양호하며, 시공 안전성을 충분히 확보할 수 있는 2면

지지형식을 적용하였다. 케이블 배치간격은 10m, 케이블 당 스트랜드 개수는 최소 109개에서 최대 313개 까지 분포하며 총 52개의 케이블을 배치하였다.

화포교는 연약지반 상에 가설되는 교량으로, 주탑 정부에 케이블 가설을 위한 탑징크레인을 설치하기 위해서는 대용량의 크레인 이 필요하므로, 본 설계에서는 이러한 지반여건 등을 고려하여 타워크레인을 이용하여 케이블을 가설하는 것으로 계획하였다.

6. 주탑

사장교의 주탑 형상은 교량의 조형미와 상징성에 있어서 중요한 부분이다. H형 주탑의 경우 케이블의 정착을 위한 시공성과 주행자의 시각적 개방감은 우수한 반면, 조형미가 부족하고 기초 규모가 커지게 되며, 내풍안정성이 불리한 단점이 있다. 따라서

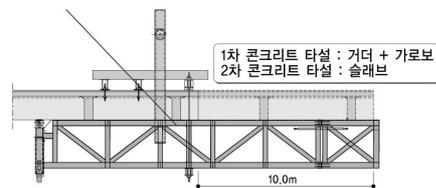


그림 6. 보강거더 가설계획

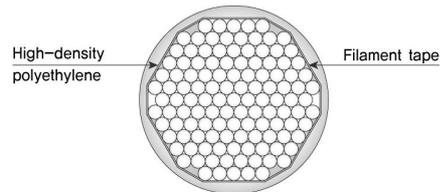


그림 7. PWS 케이블

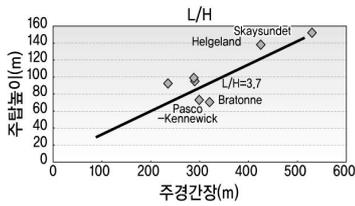
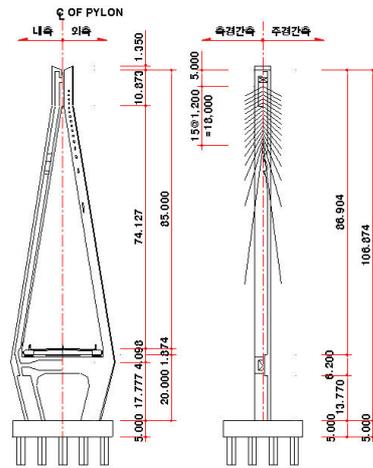


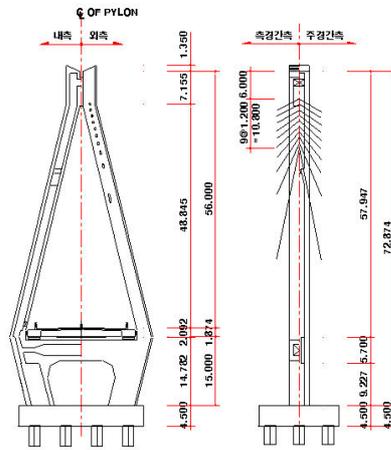
그림 8. 콘크리트 사장교의 주경간장과 주탑 높이 시공사례 분석

본 과업에서는 독창적인 상징성과 습지환경 피해를 저감하기 위해, 기초 규모가 작은 다이아몬드형 콘크리트 주탑으로 결정하였다. 주탑의 높이는 국외 2주탑 콘크리트 사장교의 시공사례 분석 및 예비설계를 통하여 최적의 주탑 높이를 선정하였다. 콘크리트 사장교의 시공사례를 분석한 결과, <그림 8>에 나타낸 것과 같이 주탑 높이는 주경간장의 L/3.7로서 높은 주탑은 경간장 160m의 2배인 320m를 고려할 경우 86.5m, 낮은 주탑은 경간장 200m를 고려할 경우 54.1m로 산출되었다. 주탑 높이 결정을 위해 높은 주탑-낮은 주탑의 높이를 70m-40m, 85m-55m, 100m-70m인 3가지 경우에 대해서 예비해석을 수행한 결과, 주탑 높이가 높아짐에 따라 케이블의 연직 성분의 증가로 인해 보강거더 및 주탑 단면력이 감소하지만, 그 값이 미소하며 경제성 측면에서 불리하므로 <그림 9>와 같이 PY1은 85m, PY2는 56m로 최적의 주탑 높이를 결정하였다.

높은 주탑(PY1)의 단면 규격은 5.0m×5.0m(중공단면, 벽체두께=1.0m), 낮은 주탑(PY2)은 4.5m×4.5m(중공단면, 벽체두께=1.0m)의 형상을 갖고 있다. 보강거더의 지지를 위해 설치되는 가로보는 프리스트레스트 콘크리트로 이루어져 있다. 주탑의 콘크리트 강도는 프리스트레스 도입을 위해 40MPa를 적용하였으며, 주탑 시



(a) PY1



(b) PY2

그림 9. 주탑 일반도

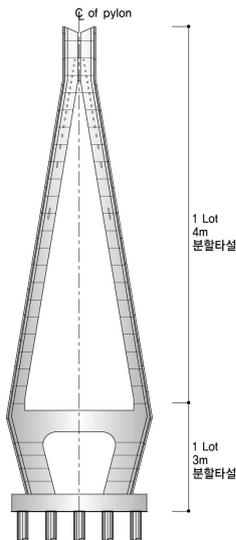


그림 10. 주탑 Lot 분할 계획

공은 수화열 해석을 통해 기둥 규모가 큰 하단부는 3.0m, 상단부는 4.0m로 분할 타설하여 시공하도록 결정하였다(그림 10).

주탑가설은 비계틀과 일체로 제작된 거푸집을 조립한 후, 타워 크레인을 사용하여 상승 이동시키면서 단계별로 시공하는 방법으로, 단면형상에 대한 제약이 적어 시공성이 양호하고 시공실적이 풍부한 climbing form 공법으로 결정하였다. 다이아몬드형 주탑으로 상단부 가설시에는 경사진 기둥의 시공 안정성을 위해 주탑 기둥사이에 임시 고정용 브레이싱을 설치하였다.

7. 내풍설계

일본 도로교 내풍 설계편람에 의해 동적 내풍설계의 필요성을 검토한 결과, 화포교의 경우 비틀림 발산진동과 와류진동의 발생 가능성이 있는 것으로 판단되어 풍동실험을 통해 안정성을 검증하였다.

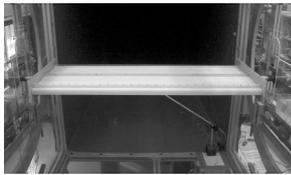


그림 11. 2차원 보강거더 모형

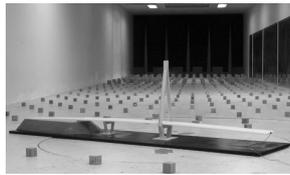
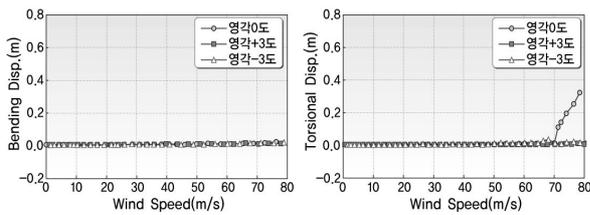


그림 12. 가설단계 전교 모형

본 과업에서 수행한 풍동실험은 2차원 거더 단면 및 가설단계 전교 모형에 대해서 검토하였으며, 2차원 거더 단면의 실험결과 등류조건에서는 풍속 75 m/sec에서 비틀림 플러터 현상이 발생하나, 설계 풍속(40.6 m/sec)을 훨씬 상회하고 있으며, 난류조건에서는 풍속 80 m/sec 이내에서 와류진동 및 발산진동이 전혀 발생하지 않으므로 매우 양호한 내풍 거동을 보이고 있는 것으로 나타났다(그림 13, 14). 또한, 가설 단계중 가장 취약한 상태인 주경간 폐합직전의 내풍 안정성 검토에서도 매우 안정된 거동을 나타내었다.

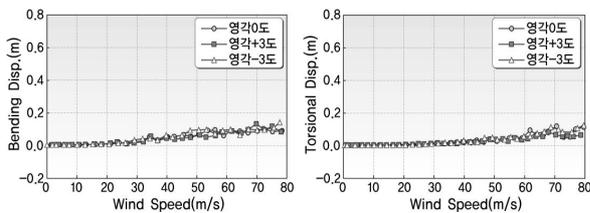
8. 맺음말

화포교는 생태자연도 1등급인 화포습지를 횡단하는 교량으로, 습지상태를 감안한 교량형식 선정과 경간계획을 수립하여 습지 훼손을 최소화하고, 공용중 소음·진동 저감으로 환경을 보호하기 위해 주경간장 260m인 비대칭 콘크리트 사장교로 계획하였다. 교량 계획시 외국의 경우에는 주변 및 지형여건을 고려해 필요한 경우 비대칭의 장대교량도 많이 계획하고 있으나, 국내에서는 대부분의 장대교량은 주변상황보다는 시각적인 안정성을 우선시하여 대칭적인 경간을 구성한 교량으로 계획하고 있으므로,



(a) 연직 거동 (b) 비틀림 거동

그림 13. 등류 실험 결과



(a) 연직 거동 (b) 비틀림 거동

그림 14. 난류 실험 결과



그림 15. 화포교 가설계획



그림 16. 화포교 조감도

사실상 주변상황에 대해서는 많은 부분이 무시되고 있는 실정이다. 특히, 콘크리트 사장교는 사장 케이블의 축방향력에 의해 효율적인 단면 설계가 가능한 구조적 특징과 유지관리의 편리성 그리고 경제적인 효과 등의 장점이 있음에도 불구하고, 시공중 발생하는 문제점으로 인해 국내에서는 장기간은 물론 중기간의 사장교에서도 대부분 강재를 적용하는 있는 것이 현실이지만, 최근에는 이러한 인식이 변화되면서 콘크리트 사장교 설계에 대한 관심이 증가하고 있다.

전술한 2가지 사항으로 인해 비대칭 콘크리트 사장교는 국내에서 거의 시도되지 않았던 구조 형식이지만, 외국의 경우에는 비대칭 경간구성과 콘크리트 사장교에 대한 설계 및 시공사례를 종종 찾아볼 수 있으므로, 국내에서도 비대칭 경간구성과 콘크리트 사장교의 장점이 반영된 교량 설계에 더욱 많은 관심을 가질 필요가 있을 것이다. 끝으로 화포교의 계획 및 설계에 관한 본 기사가 향후 국내 비대칭 콘크리트 사장교 계획, 설계 및 시공 기술 발전에 도움이 되기를 기대한다. □