

초장대현수교(광양대교)의 실현을 위한 교량구조시스템의 혁신

Innovation of Bridge Structural Systems to Realize a Super Long-span Suspension Bridge (Gwangyang Bridge)

김 홍 식* · 권 호 철** · 송 명 관*** · 백 종 균****
Kim, Hong-Sik · Kwon, Ho-Chul · Song, Myung-Kwan · Paik, Jong-Gyun

ABSTRACT

In this paper, the contents of numerical investigations in the innovative tender design of the super long-span suspension bridge to be constructed between Myodo and Gwangyang are introduced. The total span length of the bridge, of which the main span is the third longest in the world so far, reaches 2.260km, and the bridge has the floating-type stiffening girder which has no vertical supporting points at pylon. Judging from the condition of ship navigation, wind climate on roadway, and construction cost, it is inevitable to make the central span 1,545m and to improve the technical level applied to the structural components in the existing suspension bridge system. To realize the innovative super long-span suspension bridge, the close numerical investigations for the structural capacity, aerodynamic serviceability, and dynamic serviceability are carried out by various tools of computational mechanics.

Keywords: *super long-span suspension bridge, innovative design, twin-box stiffening girder, numerical investigations, computational mechanics.*

1. 서 론

묘도-광양간 현수교(가칭 광양대교)는 전라남도 여수국가산단 진입도로 개설공사의 제3공구 구간에 2007년부터 2012년까지 시공완료될 예정인 총연장 2,260m, 주경간장 1,545m의 타형식 플로팅 현수교로서 주경간장이 세계 제3위에 랭크되는 초장대 현수교이다(그림 1). 여수국가산단과 광양국가산단간 물동량 수송을 원활히 하고, 물류비용 절감, 광양만권에 대한 설비투자여건 개선 및 2012년 어수세계박람회, 한려해상 등 서남해안 관광개발 여건 개선을 위해 계획되었으며, 2006년 12월에 기본설계가 완료되었다. 본 교량은 그동안 적금-영남간 현수교 등을 통하여 축적된 현수교의 설계·시공 기술을 바탕으로 국내 기술진들이 계획 및 설계를 수행함으로써 세계와 어깨를 나란히 할 수 있는 교량 기술의 선진화를 달성할 수 있는 계기가 되었다고 할 수 있다.

* (주)유신코퍼레이션 구조본부 상부, 토목구조기술사 Email: y10962@yooshin.co.kr

** (주)유신코퍼레이션 구조본부 이사, 토목구조기술사 Email: y12546@yooshin.co.kr

*** (주)유신코퍼레이션 구조본부 차장, 공학박사 Email: mksong@yooshin.co.kr

**** 정회원 · (주)대림산업 특수교량팀 부장, 공학박사/토목구조기술사 Email: seed@daelim.co.kr

묘도-광양간 현수교는 광양항을 횡단하는 교량으로서 장래 18,000TEU급 선박 통항을 위해 주경간장을 1,545m로 계획하였으며, 이러한 초장대교 현수교를 실현하기 위해서는 극한경(바람, 지진)조건, 시공조건, 주행 안전조건, 한정된 공사비를 극복하는 현수교 구조시스템이 필요하였다. 따라서 교량계획단계에서는 기존의 현수교 설계·시공기술과 최근의 초장대교 신기술을 분석하여 본 교량에 적합한 구조시스템을 적용하였고, 설계단계에서는 다양한 실험과 최신 기법의 시뮬레이션, 전산역학해석 등을 통하여 교량구조성능, 내풍안정성, 내진안전성, 진동사용성 등을 극대화시킨 혁신적인 현수교 구조시스템을 구현하였다. 본 논문에서는 주요 구조시스템의 설계를 위하여 수행한 전산역학해석에 의한 검증 내용을 소개하고자 한다.



그림 1 묘도-광양간 현수교 개요

2. 주요부재의 설계 혁신 내용

세계 3위의 초장대 현수교를 실현하기 위해서는 교량 자중의 경량화 및 공사비 절감하면서 세계 최대급 내풍성능 확보, 초장경간화에 대한 하이테크 공법이 필요하다. 본 교량은 세계최초의 고강도 케이블, 트윈 강박스 보강거더, 세계최고의 콘크리트주탑, 지중정착식 앵커리지, 3경간 연속 플로팅시스템, 케이블 새그의 상향 등 혁신기술을 적용한 결과, 초장대 현수교의 구현 및 효율성 및 안정성을 실현하게 되었다(그림 2).

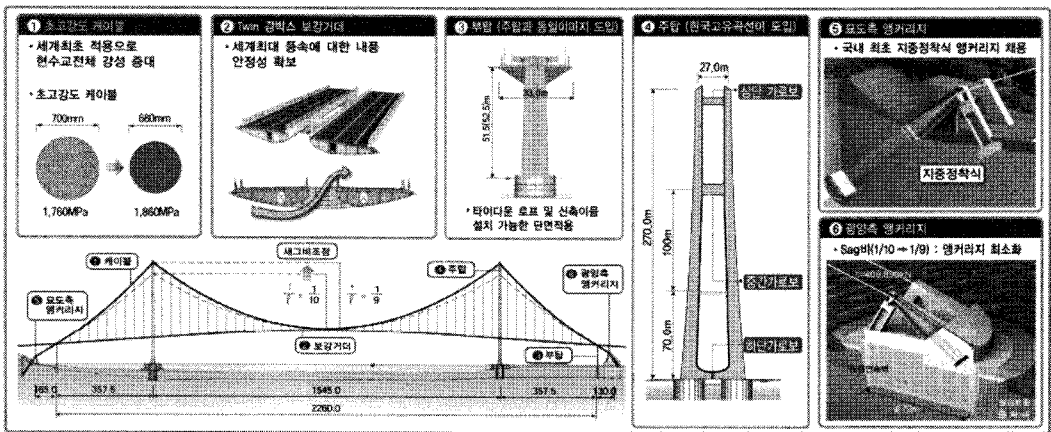



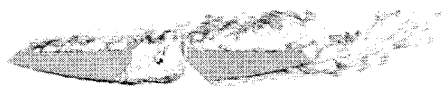


그림 2 묘도-광양간 현수교 시스템 개요

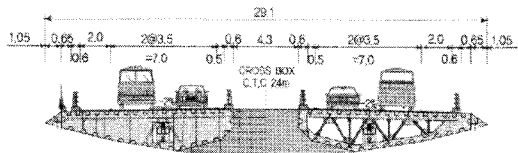
3. 전산유체해석에 의한 내풍성능 검토

초장대 현수교는 중소교량과 달리 교량지저집간 거리가 길기 때문에 내풍안전성 확보가 가장 중요하다. 본 지역의 설계기본풍속은 $V_{10}=40.4\text{m/s}$ (여수기상대)이고, 보강거더 계획고에서의 설계기준풍속 V_d 는 62.8m/s , 교량의 동적내풍안정성(플러터 발현방지)확보를 위한 설계요구풍속 V_{FR} 는 $81.6\text{m/s}(1.3 \times V_d)$ 이상을 만족하도록 하였다. 이러한 세계 최상급의 설계풍속에 대한 내풍성능 확보를 위해 단면형상의 최적화 과정을 필요하게 되었다. 보강거더는 현수교 전체시스템의 내풍성능에 큰 영향을 미치는 중요한 구조요소이며, 내풍안정성 확보 및 검증은 위해 전산유체해석(CFD) 및 2·3차원 풍동실험 등 다양한 검토 결과를 통하여 계획하였다. 본 교량의 보강거더는 플러터 발현풍속의 증대 및 정적공기력계수를 최소화한 트윈박스거더 단면을 도출하여 내풍안정성 극대화 및 강중저감을 실현할 수 있었다.

단면형상의 최적화 과정은 싱글박스거더와 트윈박스거더에 대해서 동적전산유체해석(CFD)으로 내풍성능을 비교하였고, 트윈박스거더의 적정 개구율(개구부폭/전체폭)을 산정하였다. 해석 프로그램으로는 구조물-바람 상호작용을 실제와 근사하게 구현할 수 있는 DVMFLOW(Larsen과 Walther 1997)를 이용하였다. 해석결과 개구율이 15% 이상의 트윈박스거더는 플러터 발현풍속 $V_F=102\text{m/s}$ 이상으로서 요구풍속(81.6m/s)을 충분히 상회하였으며, 싱글박스거더의 플러터 발현풍속은 요구풍속을 약간 상회하나 거더폭 B가 필요이상으로 과다하게 커져 강중이 크게 증가하므로 제외하였다(표 1). 기존의 연구사례에서도 개구율 약 50%까지는 플러터 발현풍속이 점차 증대하며, 그 이상의 개구율에 대해서는 플러터 발현풍속이 점차 감소하는 것으로 보고 되어 있다(Ge *et al* 2005). 따라서, 강중절감에 의한 경제성 및 충분한 내풍성능 확보가 가능한 개구율 15%의 최종적인 트윈박스거더③의 단면형상을 그림 3과 같이 선정하여 적용하였다.

표 1 전산유체해석(CFD)에 의한 보강거더 단면 선정

	
트윈박스①: B=33m, b=7.3m, 개구율=22%, $V_F=115\text{m/s}$	트윈박스②: B=31.5m, b=5.8m, 개구율=18%, $V_F=112\text{m/s}$
	
트윈박스③: B=30m, b=4.3m, 개구율=15% $V_F=102\text{m/s}$	싱글박스: B=34.2m, $V_F=85\text{m/s}$



(a) 단면형상(단위: m)



(b) DVMFLOW 해석 결과 ($V_F=102\text{m/s}$)

그림 3 최종 트윈박스 보강거더 단면형상

4. 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진해석 (SSI)

본 교량과 같은 초장대 현수교의 경우는 지지점(주탑, 앵커리지)간 거리가 상당히 떨어져 있어서 내진설계시 지진입력의 공간적 변동성, 즉, 파동전달효과 및 상관성 저하를 고려할 필요가 있다. 이러한 효과의 영향을 평가하고 이를 내진설계에 반영할 것인지 여부를 검토하도록 하였다. 부분구조법을 적용하여 지진해석 문제를 파동산란문제와 파동방사문제로 분리하여 해석을 수행하였다. 지반-구조물상호작용해석은 SASSI 프로그램을 사용하고, 시간이력해석 프로그램으로는 SAP2000 Ver.8을 사용하였다(그림 4).

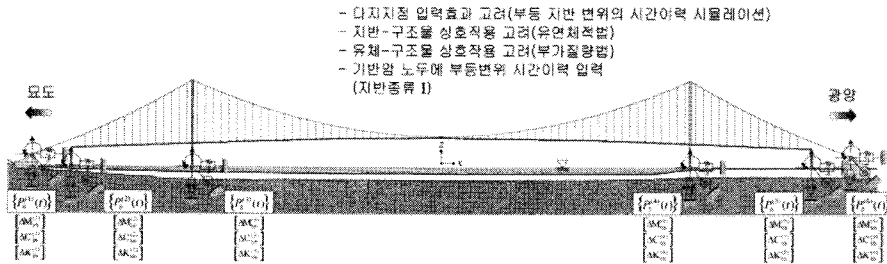


그림 4 지반-구조물 상호작용을 고려한 지진해석

해석검토 결과, 다중모드응답스펙트럼해석법에 의한 지진력은 SSI해석값보다 안전측임을 확인하였다(표 2). 지진입력의 공간적 변동성은 지진력을 크게 하는 원인이 되지만, SSI 효과(특히, 방사감쇠 효과)에 의하여 지진력이 감소하는 것으로 평가되었다. 응답스펙트럼해석법에 의한 해석시, 지반종류 IV(지반계수 2.0)를 적용하였으며 보수성 확보의 가장 큰 요인이 된 것으로 판단되었다.

표 2 단면력 산정 결과 (단위: kN, kN·m)

검토 대상		위치	다중모드응답스펙트럼해석	SSI 해석	응답비 (다중응답스펙트럼해석/SSI해석)
주 탑	My	P1	117,682	923,44	1.27
		P2	920,087	601,206	1.53
		P3	2,493,621	1,630,223	1.53
주 케 이 블 인 장 력		C1	32,155	18,286	1.76
		C2	33,252	16,635	1.99
		C3	14,964	15,396	0.97
		C4	33,291	16,027	2.08
보 강 거 더	My	G1	12,093	10,700	1.13
		G2	15,554	15,811	0.99
		G3	5,871	5,563	1.06
		G4	36,763	18,776	1.96

5. 차량 주행안정성 평가

본 교량의 차량 주행안정성 평가는 노면 요철에 의한 인체 감성도평가와 강풍시 주행안정성평가를 수행하였다. 인체 감성도 평가는 노면요철과 이동질량을 고려한 DB24 차량 2대를 모델링하여 주행속도 60, 70, 80km/h에 대해 차량 탑승자의 인체진동감각 평가를 수행하였다(그림 5, 6). 노면요철의 생성시에는 Dodds와 Robson(1973)이 제안한 PSD함수를 이용하였으며, 노면상태는 양호(good)한 경우로 하였다. 동적해석시에는 Newmark 방법에 의한 직접시간적분법을 이용하였으며 구조물 감쇠비는 2%, 적분시간간격은 0.002초로 하였다. 3절량을 갖는 6자유도 기본 차량모델의 질량간 변위제한조건을 가하여 차량의 피칭운동을 표현하였다. Meister 진동동감각곡선에 의한 평가결과는 60~80km/h의 차량속도에 대해 승차자의 진동감지수준 D(진동감지) 수준으로 평가되었다. 차체의 진동가속도 시간이력을 이용하여 진동 가속도 레벨(VAL)을 구하고 승차감을 분석한 결과, 진동구분 1의 상한값인 83dB보다 현저히 작은 값을 보여서 '매우 양호'로 평가되었으며 실효치(RMS) 및 진동레벨(VAL)의 산정결과를 ISO-2631 피로능률감도·경계곡선에 의한 평가에서도 '매우 우수'로 평가되었다. 차량의 승차감은 차량제원마다 다를 수 있으나, 이상의 결과를 통하여 볼 때, 차량 주행에 대한 인체 감성도의 평가는 매우 양호한 것으로 판단할 수 있었다.

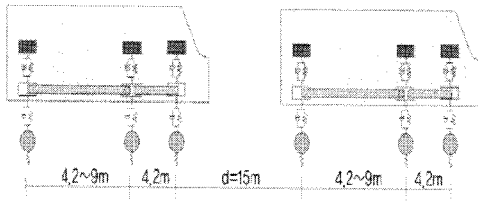


그림 5 차량 모델

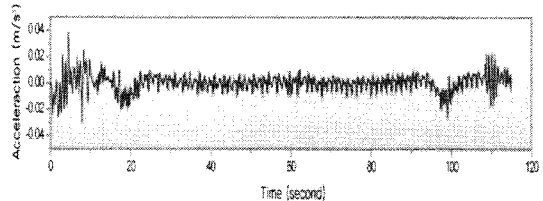


그림 6 차량 연직가속도 결과

케이블 강교량 설계지침(2006)에서는 풍속 25m/s 이하에서 차로의 수평 및 수직 최대가속도를 0.5m/s^2 이하가 되도록 하여, 통행자의 직접적인 신체의 불쾌감뿐만 아니라 시각적인 효과에 의한 심리적인 불쾌감이 발생하지 않도록 규정하고 있다. 이러한 검토를 위하여 거스트응답 평가를 위한 버페팅 해석(buffeting analysis)을 수행한 결과 최대연직가속도는 0.214m/s^2 로서 허용치 이하로 주행자의 안락감(comfort)에 문제가 없는 것으로 평가되었다(그림 7). 트윈박스거더의 개구부에서 불어나오는 바람영향이 주행차량에 미치는 영향을 알아보기 위해 2차원 전산유체해석 프로그램 RANS에 의해 해석한 결과, 풍상측 보강거더 하면류는 풍하측 보강거더로 부드럽게 통과하였으며, 보강거더의 유해한 진동은 발생하지 않았고, 개구부를 통과하여 풍하측 상부로 올라가는 곡류도 발생하지 않았다(그림 8). 이러한 결과는 풍동실험결과와 일치하는 결과로서 본 설계에 채용한 트윈박스 보강거더 형식은 바람에 대한 차량 주행안정성, 즉, 사용상에는 문제가 없다는 것을 검증하였다.

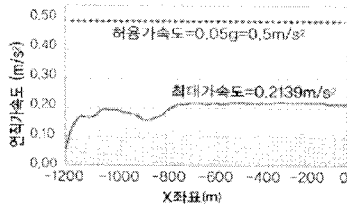


그림 7 버페팅해석의 연직가속도 결과

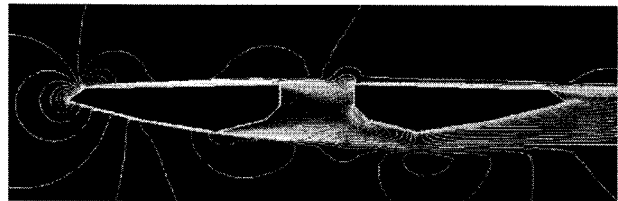


그림 8 전선유체해석(RANS)에 의한 해석결과

6. 버퍼시스템 제어효과 평가

본 교량은 차량 주행효율성과 보강거더의 연직처짐량 최소화를 위해 3경간 연속플로팅 현수교로 계획하였다. 플로팅(Floating) 시스템은 기존의 2현지 시스템과 달리 두탑부에 보강거더 받침과 신축이음장치가 없기 때문에 보강거더 단부의 신축이음부에서 상시 큰 이동량이 발생하게 된다. 신축이음장치의 누적이동량은 신축이음장치의 수명과 관련이 있으므로 누적이동량을 줄이는 것이 신축이음장치의 수명연장을 위해서 유리하다. 따라서, 보강거더 단부에서 발생하는 동적인 활하중 및 풍하중에 의한 누적이동량을 줄이기 위해 버퍼를 설치하도록 하였다. 본 교량의 버퍼시스템은 STL(shock transmission unit with force limiter)를 적용하였으며 수치적 성능검증으로는 SAP2000 Ver.8을 이용한 동적비선형 거동해석을 수행하였다. 하중 CASE는 DL하중 1차선 제하로서 중앙경간 1/2에 제하하여 최대변위가 발생하는 하중 케이스로서 STL에 의한 변위 제어효과는 77%, 속도감쇠효과는 79%로 발생하였다(시점부 종방향 변위)(그림 9). 이러한 해석결과를 통하여 볼 때, 신축이음장치의 교체주기는 4배 이상 대폭 향상되어 내구성 증대효과를 가져올 수 있다.

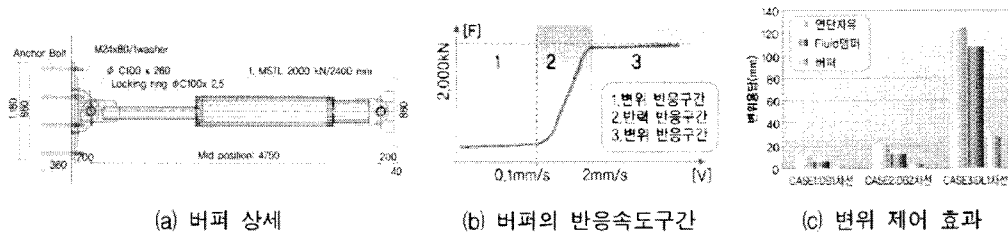


그림 9 버퍼시스템의 효과 검토(단부 종방향 변위)

7. 결 론

묘도-광양간 현수교는 초장대교의 실현을 위하여 혁신적인 현수교 구조시스템 요소들을 도입하였다. 이러한 구조시스템들의 구조성능, 내풍안정성, 내진안정성, 진동사용성 등에 대하여 다양한 전산역학을 이용하여 상세검토를 수행하였다. 실축척실험 및 모형실험에 의한 검토가 불가능한 특정상황의 구조물 거동의 특성에 대하여 적절한 수치해석방법 및 전산역학들을 이용하여 검토 및 분석이 가능하였다.

참 고 문 헌

- 대한토목학회(2006), 케이블 강교량 설계지침(안).
- Dodds and Robson (1973), The Description in Relation to Vehicle Response, *Journal of Sound and Vibration*, pp.175-183.
- Ge, Y.J., Yang, Y.X., and Zou, X.J. (2005), Flutter Stabilization and Its Mechanism of Long-span Suspension Bridges with Slotted Box Girders, *The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering(APCWE-VI)*, Seoul, Korea, September 12-14, pp.1283-1295.
- Larsen, A. and Walther, J.H. (1997), Aeroelastic Analysis of Bridge Girder Sections based on Discrete Vortex Simulations, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 67&68, pp.253-265.