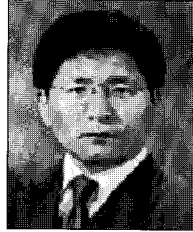


울산대교 현수교의 계획과 기본설계

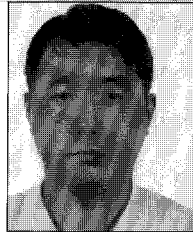
The Planning and Basic Design of Ulsan Suspension Bridge



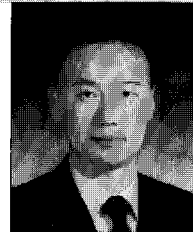
박종화*



이정한**



박지웅***



신상훈****

* 현대건설(주) 기술개발원 상무
 ** 현대건설(주) 기술개발원 차장
 *** 현대건설(주) 기술개발원 과장
 **** (주)유신코퍼레이션 구조본부 이사

1. 개요

본 울산대교는 울산광역시 남구 매암동과 동구 일산동을 잇는 울산대교 및 접속도로 민간제안사업 구간에 시공되는 교량으로 울산광역시의 간선도로망을 구축하고, 원활한 교통소통으로 물류비용 절감, 동서간 도로부재에 따른 지역간 교통난 해소, 해양관광 벨트의 노선 구축으로 문화관광 활성화를 위해 계획되었다.

해상 장대교인 울산대교는 총연장 L=2,970m 중 L=1,150m의 타정식 단경간 현수교와 시·종점측 접속교 1,820m로 구성되어 있다(그림 1).

단경간 현수교로서는 국내 최대, 세계 3위급 현수교로서

내풍안정성이 우수한 유선형 강박스 보강거더를 채용하였고 종점측 앵커리지에는 터널식 앵커리지를 적용하여 주변 환경에 적합한 형식을 선택하였다. 울산항의 이용편의, 주변 지역조건을 감안한 교량계획, 경제성을 고려한 부재설계 등을 통해 국내 기술진의 기술력으로 최첨단 현수교로서 부족함이 없는 교량기술의 선진화를 달성했다고 할 수 있다.

2. 울산대교 형식 및 경간장 계획

본 교량은 울산대교 및 접속도로 민간제안사업으로서

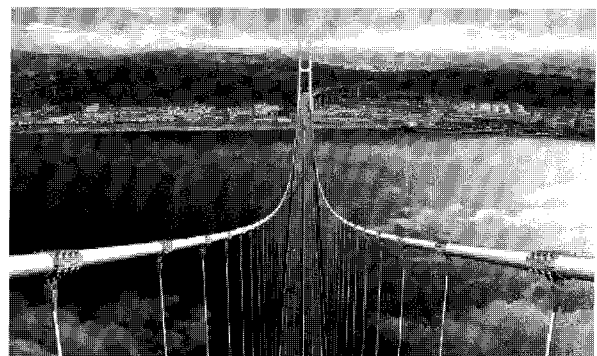


그림 1 조감도

제3차 공고안인 주경간 725m 사장교의 문제점을 분석하고 설치 구간에서의 현황조건, 민원 등을 파악하여 교량 형식 및 경간장을 계획하였다. 울산대교 계획시 선박통항 안전을 극대화한 초장대교, 울산의 랜드마크 교량 실현, 울산항의 경쟁력 극대화 등 주요 특징 3가지를 착안사항으로 하여 교량 형식을 선정하고 적정 경간장을 계획하였다.

2.1. 선박통항 안전을 극대화한 초장대교

울산대교는 울산의 물류 거점 기지인 울산항을 가로지르는 교량으로 시점측 9부두와 종점측 염포부두를 횡단하는 구간에 가설된다. 본 공사구간은 다수의 선박이 통항하는 곳이므로 향후 가설되는 구조물이 선박통항의 안전을 저해해서는 안 되는 전제조건을 가지고 있다. 제3차 공고안에서는 사장교의 주탑이 해상에 설치되어 선박 운항 및 기존부두 접·이안시 심리적 불안감을 유발시키고 주탑, 충돌방지공 등의 해상 공중 및 보강거더 가설시 가설시간이 길어 공사중 선박운항에 지장을 초래할 것으로 예측되었다. 반면 본 설계에서는 해상부 주탑 설치를 배제한 단경간 1,150m 현수교를 계획함으로써 선박 충돌의 위험성 및 선박 운항 및 접·이안시 심리적 불안감을 완전히 배제하였으며(그림 2) 주탑, 충돌방지공 등의 해상 공중이 없고 보강거더 가설시간이 짧아 선박운항에 대한 영향이 최소화 된다는 선박 시뮬레이션 결과를 얻을 수 있었다.

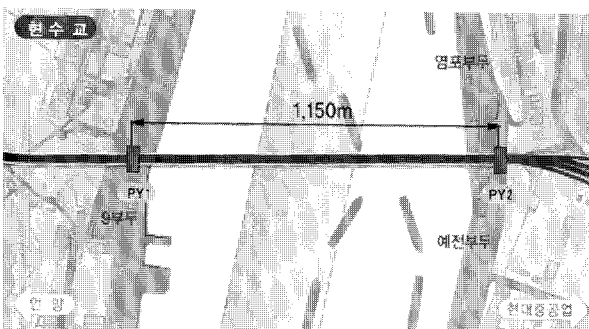
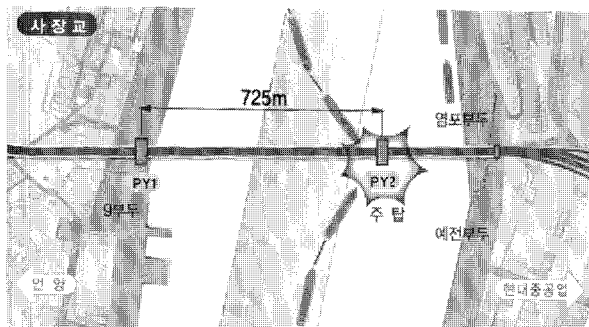


그림 2 선박 통항 안전성

2.2. 울산의 랜드마크 교량 실현

세계의 장대교량은 각 도시와 국가를 대표하는 랜드마크로서의 역할을 하고 있다. 샌프란시스코의 골든 게이트교, 뉴욕의 브루클린교, 부산의 광안대교 등과 같은 장대교량들이 단지 구조물로서의 역할 뿐만 아니라 각 도시의 랜드마크 역할을 하는 것을 알 수 있다. 따라서 울산대교도 울산을 대표하는 미관이 우수한 랜드마크의 교량으로 계획할 필요성이 있다.

울산대교는 단경간 현수교 중 주경간장이 국내 최대, 세계 3위급의 교량으로 규모면에서도 그 위용을 엿볼 수 있고 교량 형식면에서도 사장교 형식은 국내 다수 계획되어 랜드마크성이 부족한 반면 현수교 형식은 희소 가치성이 높다. 또한 울산을 상징하는 이미지를 형상화하여 울산의 대표 교량으로서 미관을 극대화한 계획을 하였다.

표 1 국내 현수교 현황

NO	교량명	주경간	도시, 연도
1	광양대교(3경간)	1,545m	광양, 시공중
2	울산대교(단경간)	1,150m	울산, 예정
3	적금대교(단경간)	850m	고흥, 시공중
4	광안대교(3경간)	500m	부산, 2002
5	남해대교(3경간)	404m	남해, 1973
6	영종대교(3경간)	300m	인천, 2000

표 2 세계 단경간 현수교 현황

NO	교량명	주경간	국가, 연도
1	Runyang Br.	1,490m	중국, 2005
2	Jiangyin yangtze Br.	1,385m	중국, 1999
3	울산대교	1,150m	한국, 2015예정
4	2nd Bosphorus Br.	1,090m	터키, 1988
5	1st Bosphorus Br.	1,074m	터키, 1973
6	Kurushima Dai-3 Br.	1,030m	일본, 1999

2.3. 울산항의 경쟁력 극대화

각 주탑의 위치는 곧 현수교의 주경간장을 결정하는 아주 중요한 계획이므로 여러 가지 고려사항을 반영하여 결정하여야 한다. 그 중에서 주탑 설치 위치의 적정성 측면에서 주탑 설치로 인한 항만 이용의 효율성 저하가 발생하지 않는 주탑 위치의 선정이 요구된다.

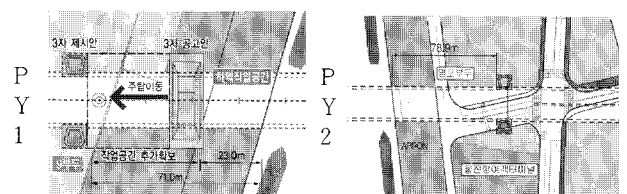


그림 3 울산항 경쟁력 극대화를 위한 주탑 위치 선정

제3차 공고안인 사장교는 9부두측 PY1의 경우 접안시설에서 최소 이격거리가 23m로 계획되어 있어 작업공간이 협소하게 되는 문제점으로 인해 부두 이용에 대한 효율성이 저하되나 본 설계에서는 접안시설에서 최소 71m이상의 이격거리를 확보하여 하역공간 및 적재공간의 간섭을 최소화함으로 부두 이용에 불편함이 없도록 계획하였다. 염포부두측 PY2도 염포부두 확장 공사 부지 외부에 설치하는 것으로 계획하여 항만 운영에 문제가 없도록 계획하였다. 울산대교의 건설로 인해 물류거점기지인 울산항의 기능성 상실을 최대한 배제하여 항만 본연의 역할에 지장이 없고 타 항만에 비해 경쟁력을 극대화할 수 있는 계획을 세웠다.

3. 울산대교의 설계

3.1. 설계기준

차로수 및 설계속도		4차로, 80km/h	
종단구배		3.95%	
항로고		AHHWL+60m	
주요 설계 하중	고정 하중	현수구조부	134.23, 137.35kN/m
		주 케이블	14.62, 13.96 kN/m
		행어 및 부속물	4.873 kN/m
	활하중	하중	DB24 / DL24
		활하중 저감	9.548 kN/m
	풍하중	기본풍속(V10)	40 m/s
설계 기준			보강거더 60.1 m/s 14.0 kN/m
주케이블		65.6 m/s 2.1 kN/m	
행어		65.6 m/s 1.63 kN/m	
주 탑 (Vd)		65.5 m/s 8.48 kN/m ²	
지진 하중		내진1등급, A=0.154g	
구조 계	현수구조	보강거더 치수	폭:25.6m, 형고:3.5m
	케이블	주케이블 새그비	1/9
		케이블 중심간격	23.5m
		주케이블 본수	1본/편측

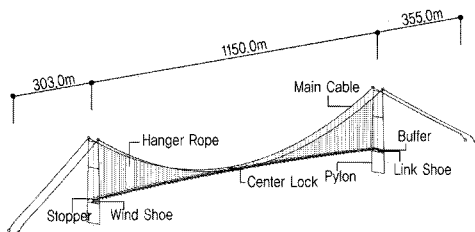


그림 4 울산대교 모델링

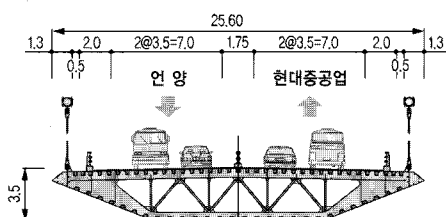


그림 5 보강거더 단면구성

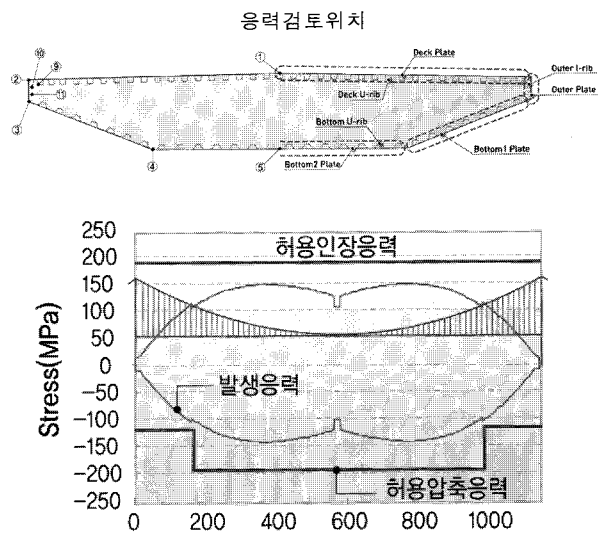
3.2. 주요부재 설계

타정식 현수교 보강거더는 다소 축력이 발생하나 구조 특성상 전체좌굴이 발생하지 않으며, 교축 및 교축직각방향 휨모멘트가 지배적이므로 응력검토시 발생 압축력은 고려하나 좌굴에 의한 허용응력감소는 고려하지 않는 것으로 한다.

케이블은 1,960MPa의 초고강도 케이블을 적용하여 케이블의 자중을 감소시켜 경제성을 추구하고, 케이블 구성 $\phi 5.35\text{mm}$ 와이어 504EA를 하나의 스트랜드로 하여 중앙경간 및 종점측 측경간에 16개의 스트랜드가 되도록 구성하였다. 시점측 측경간의 경우 중앙경간의 장력차가 약 6%가 되어 경제적 설계를 위해 16 Strand에 2개의 Extra Strand를 추가적용하여 직경을 차등 적용하였다 (표 4).

행어로프는 내구성 및 피로강도가 우수하고 국내제작이 가능한 CFRC(Center Fit Rope Core)를 채용하였고, 행어 간격을 15m로 하여 1본의 CFRC 행어로프(85mm)로 구성시켜 케이블밴드 길이 및 소켓등 부속물의 최적화로 경제성을 추가하였다. CFRC 로프의 경우 피로강도가 높고,

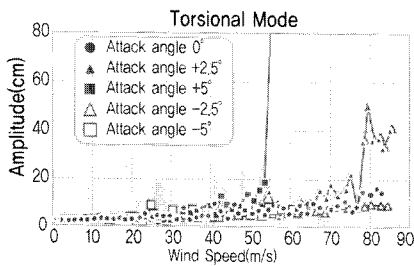
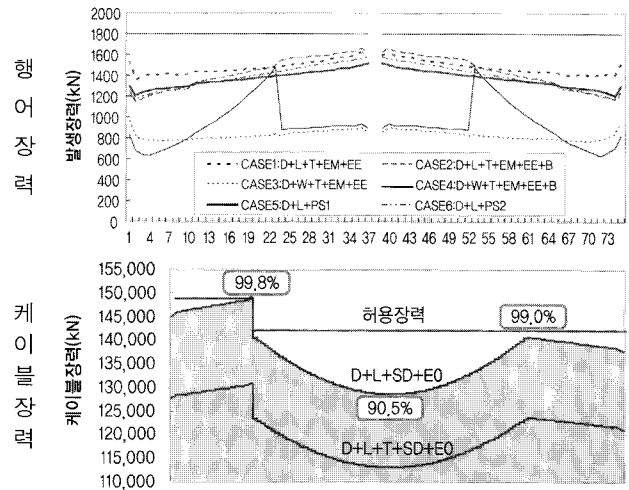
표 3 보강거더 응력검토



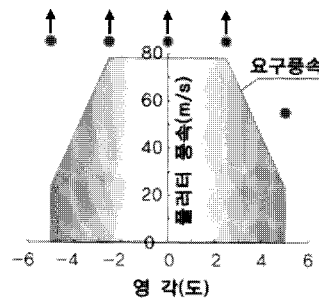
위치	발생응력(MPa)	허용응력(MPa)	발생/허용
①	-55	-190	0.29
②	-145	-174	0.83
③	-106	-116	0.91
④	-79	-116	0.68
⑤	-68	-116	0.59
⑪	-144	-163	0.88

표 4 주케이블 제원 및 장력검토

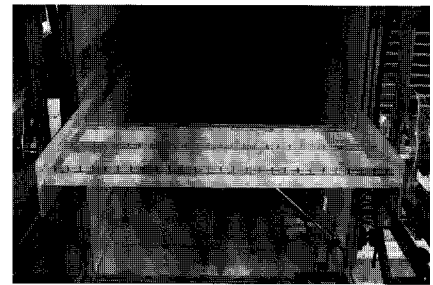
구분		제원	
소선	재질	KS D 3059 피아노선재	
	직경	$\phi = 5.35\text{mm}$	
	탄성계수	$2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$	
	인장강도	1,960 MPa	
	허용인장강도	784 MPa (S.F=2.5)	
케이블 (Cable)	구분	주경간	측경간
	스트랜드수	16 strand	16 strand+2ex
	소선수	8,064본	8,448본
	래핑전 직경	537mm	550mm
	래핑후 직경	543mm	556mm
	밴드부 직경	531mm	-
	단위중량	13.96kN/m	14.62kN/m



(a) 비틀림 거동(난류)



(b) 플러터 한계풍속



(c) 풍동 실험

그림 6 내풍 안정성 검토 결과

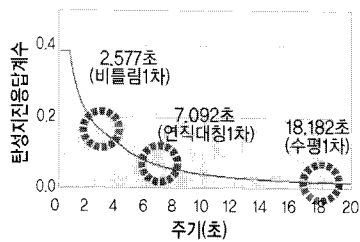


그림 7 설계응답스펙트럼 및 고유주기

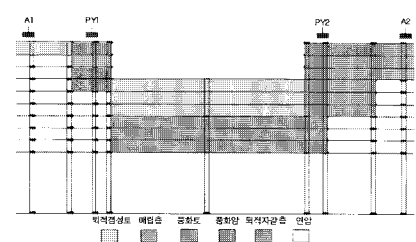
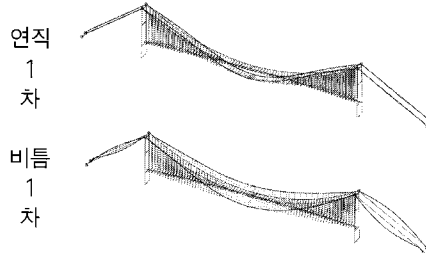


그림 8 비균질 지반 모델링

표면이 나선형으로 바람에 대한 와류진동이나 갤로핑을 억제하며, 아연도금으로 50년 내구성을 확보할 수 있다.

시점측 앵커리지는 중력식 앵커리지로 콘크리트 구체자중으로 저항하는 가장 확실한 구조이고, 종점측 앵커리지는 강재 프레임의 외주면 전단과 확폭부의 지압으로 저항하는 터널식 앵커리지를 적용하였다. 옴포산의 급경사지역에 설치되는 앵커리지로 과도한 터파기 작업을 배제하는 친환경적인 공법이라 할 수 있다.

또한 주탑은 라멘형 철근 콘크리트 주탑으로 유선형 강박스 보강거더와 마찬가지로 공기역학적으로 유리한 사다리꼴 단면을 선정하였고, 구조안전성, 경제성, 내구성 및

유지관리에 유리한 콘크리트 주탑을 선정하였다.

3.3. 풍동실험

보강거더는 1960년대 이후에 가장 널리 적용되고 있는 내풍능력이 우수한 유선형 강박스 거더를 적용하였고, 2차원 단면도형 실험을 통해 우수한 제진대책을 도출하여 풍속 85m/s 이상도 바람에 대하여 안전(요구풍속 $V_{cr} = 78\text{m/s}$, 안전계수 1.3 적용)한 것으로 나타나 바람에 취약한 현수교의 구조적인 문제점을 극복하였다 또한, 전산유체해석(CFD)을 통하여 보강거더 주위 기류의 양상을 파악하였다.

3.4. 내진설계


본 울산대교는 내진 1등급 교량으로, 도로교설계기준(2005)을 기본적으로 적용하되 케이블강교량설계지침(2006)에 제시되어 있는 설계응답스펙트럼 및 감쇠보정계수를 적용하였다(그림 7). 다중모드응답스펙트럼해석에 의해 산정된 부재력과 전체계해석에 의해 산정된 부재력들과의 하중조합에 대해 구조적으로 안전하게 설계함으로서 내진설계를 수행하였다. 또한 지형변화와 지반물성 변화가 있는 비균질 지반(그림 8)에 위치한 울산대교의 정밀한 지진응답해석을 위하여, 2차원 자유장운동 해석으로 부지효과(site effect)가 고려된 각 기초위치에서의 지표면 자유장운동을 구하고 이를 다중입력 지진으로 하여 교량의 지진응답을 검토한 결과, 다중모드 응답스펙트럼해석에 의한 지진력은 안전축임을 확인하였다.

4. 울산대교의 가설

주탑 가설은 오토 클라이핑폼을 이용한 콘크리트 타설을 계획하였고 연직도 확보를 위해 레이저와 GPS 시스템으로 보정계획을 수립하였다. 케이블의 가설은 침설공법으로 파일럿 로프를 도해하는 것부터 시작한다. 작업자의 안전 및 낙하물에 의한 통행선박 피해를 예방하기 위해 내풍안전형 Catwalk System을 적용하였다. 주케이블은 Innovated A/S공법을 적용하여 공정축진, 품질향상을 도모하였다. 보강거더 인양은 소블력으로 인양하도록 계획하였는데 교량

중앙 일반 구간은 공기가 빠르고 신속하여 품질관리가 용이한 직하인양 공법을 적용하였고, 저수심 및 육상구간에서는 Swing 공법을 적용하였다.

5. 맺음말

단기간 장대 현수교인 울산대교의 실시설계에서는 기존의 현수교 구조시스템과 적용기술 수준을 뛰어 넘어 혁신적인 첨단 하이테크 구조시스템을 완성하기 위하여 많은 검토를 통해 기본설계를 검증할 것이며, 시공성 향상 및 구조물의 안정성 확보를 확인할 것이다. 국내 현수교의 설계 및 시공 기술 향상을 위해 보다 노력할 것이다. 

[담당: 백중균, 편집위원]

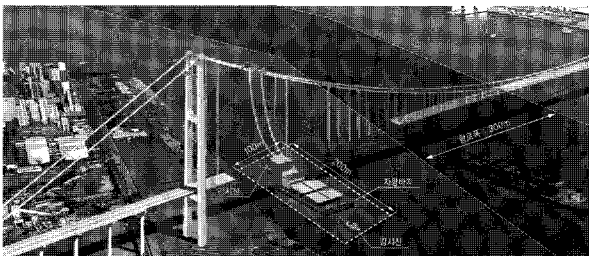


그림 9 보강거더 가설공법

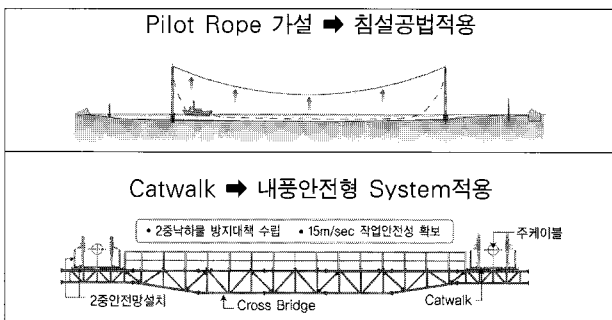


그림 10 침설공법 및 내풍안전형 Catwalk