

여수국가산단 진입도로개설공사 제3공구 묘도-광양간 초장대 현수교의 계획과 설계

The Planning and Design of a Super Long-span Suspension Bridge connecting Myodo and Gwangyang in the Section-3 of Yeosu National Industrial Complex Approach Road Turnkey Project



조 충 영*



이 명 재**



김 재 홍***



송 명 관****

*(주)유신코퍼레이션 구조본부 수석부사장, 토목구조기술사
 **(주)유신코퍼레이션 구조본부 상무, 공학박사
 ***대림산업(주) 특수교량팀 부장, 토목구조기술사
 **** 정회원 · (주)유신코퍼레이션 구조본부 차장, 공학박사

1. 사업개요

전라남도 여수국가산단 진입도로 개설공사의 제3공구 구간에 2007년부터 2012년까지 시공완료될 예정인 본 묘

도-광양간 현수교는 전라남도 여수시 묘도동과 광양시 금호동을 잇는 총연장 2,260m, 주경간장 1,545m의 타정식 3경간 플로팅 현수교로서 주경간장이 세계 제3위에 랭크 되는 초장대 현수교이다. 여수국가산단과 광양국가산단간

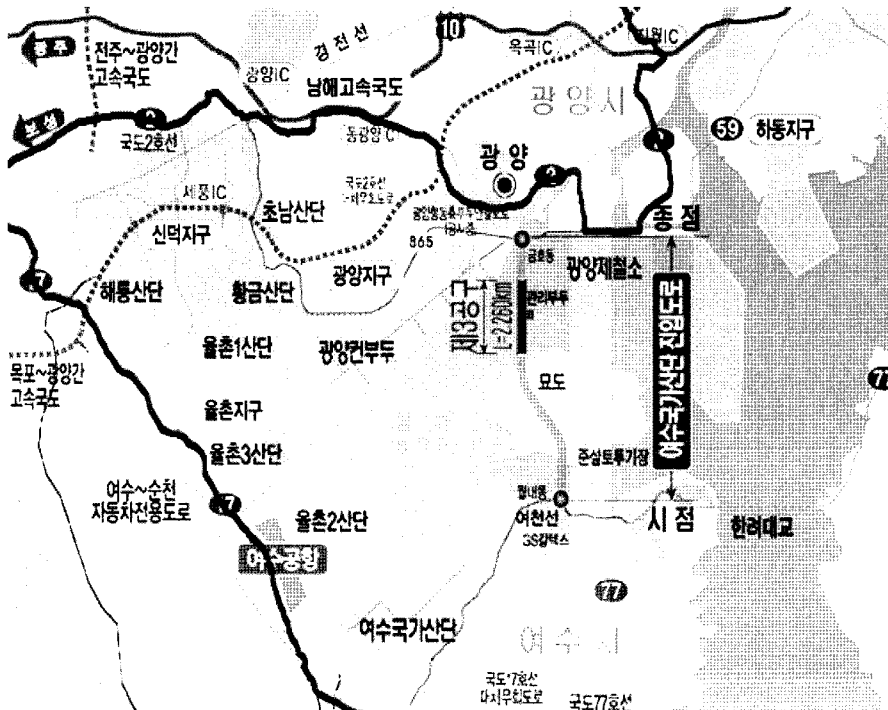


그림 1 위치도

- 관할목적**
- 여수~묘도~광양간 연결 도로로 여수국가산단과 광양국가산단간 수송거리·시간 단축을 통한 물동량 수송
 - 물류비용 절감
 - 광양만권에 대한 설비투자여건 개선
 - 2012여수세계박람회
 - 한려해상 등
 - 서남해안 관광개발여건개선
- 관할현황**
- 과업범위
 - 전남 여수시 묘도동 ~ 광양시 금호동
 - 과업개요
 - 연장 L=2,260km
 - 폭원 B=20.7m (왕복4차로)
 - 관할기간
 - 기본설계
 - 2006. 4.21 ~ 2006. 10. 25(180일)
 - 실시설계
 - 2006. 12. 20 ~ 2007. 9. 15 (270일)
 - 공사기간
 - 2007. 9. ~ 2012. 9. (착공후 60개월)

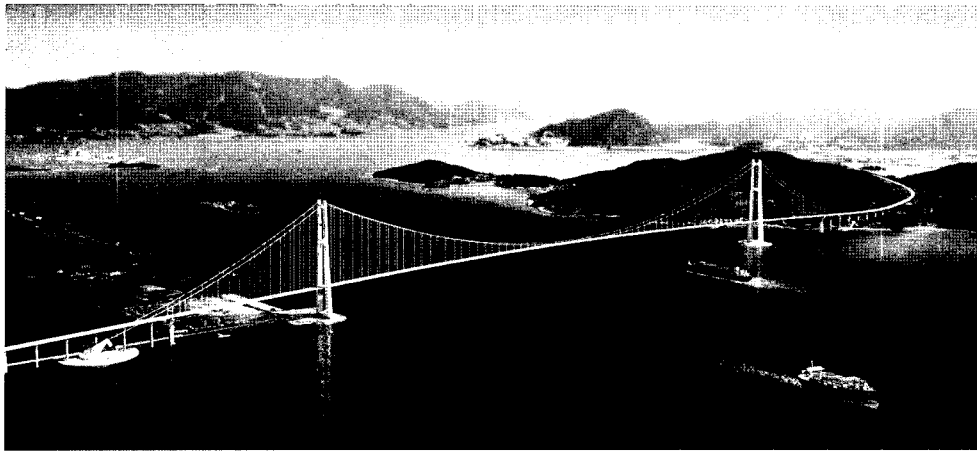


그림 2 묘도-광양간 현수교 조감도

표 1 세계 제3위의 주경간장

순위	교량명	주경간장(m)	국가명
1	Akashi Kaikyo 교	1,991	일본
2	Great Belt East 교	1,624	덴마크
3	본 교량	1,545	대한민국
4	Runyang 교	1,490	중국

원활한 물동량 수송, 물류비용 절감, 광양만권에 대한 설비투자여건 개선 및 2012년 여수세계박람회, 한려해상 등 서남해안 관광개발 여건 개선을 위해 계획되었다(그림 1). 본 교량은 그동안 적금~영남간 현수교 계획 및 설계 등을 통하여 축적된 장대현수교의 설계·시공 기술을 바탕으로 국내 기술진들이 주축이 되어 계획 및 설계를 수행하였다(그림 2).

현수교 형식은 구조역학적 효율성과 경제성에 있어서 장점을 가지고 있는 가장 오래된 교량형식이다. 거더교, 박스교, 엑스트라도즈드교, 사장교, 현수교의 순으로 적용 경간장이 길어지는데, 제반조건, 경제성, 경관성을 동시에 고려할 때 현수교 형식이 초장대교량의 최적의 교량형식이라고 할 수 있다. 이러한 사실은 주경간장 세계 제1위(일본 Akashi 교, 1,991m), 2위(덴마크 Great Belt 교, 1,624m)의 교량이 모두 현수교 형식이라는 것을 통하여 확인할 수 있다(표 1). 이들 교량의 뒤를 잇는 세계 제3위의 본 교량은 통항조건, 풍환경조건, 공사비 등을 고려할 때, 주경간장의 초장대화와 더불어 기존의 현수교 구조시스템의 구성 요소들의 기술적 혁신이 불가피하였다.

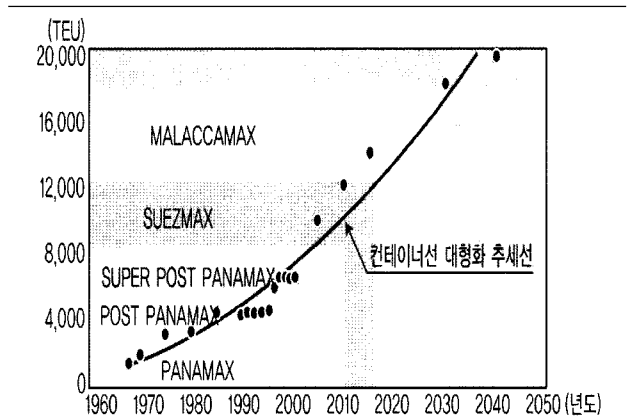
이러한 초장대 현수교를 실현하기 위해서 기존에 적용된 설계·시공 기술을 면밀히 분석하였고, 최근 적용된 선

진의 설계·시공 기술을 철저히 검토하였으며, 최적의 기술을 적용하여 교량구조물의 안정성과 사용성을 극대화한 융합구조시스템을 구현하였다. 본 기사에서는 기 완료된 기본설계시의 설계내용 전반을 소개하고자 한다.

2. 교량 계획

본 교량은 기본계획시 주경간장 1,100m로 계획되어, 12,000TEU급 선박의 직교통항이 불가하였다. 뿐만 아니라, 광양측 인근부두 통항불편, 묘도측 케이블에 선박충돌 우려, 해상 앵커리지 및 대규모 충방공설치로 하부 공사비가 증대하는 등 개선되어야 할 설계사항들이 분석되었다. 따라서, 기본설계시에는 주경간장을 1,100m부터 1,600m까지 후보안을 선정하고 선박통항안전성, 내풍안전성(변장비 검토), 공사비 민감도 분석, 교량 규모의 상징성의 비교검토를 통하여 최종적으로 주경간장 1,545m를 선정하

표 2 컨테이너선의 대형화 규모 예측



- 영국 OSC(Ocean Shipping Consulting)예상
- 2005년 8,500TEU - 2010년 12,500TEU
- 2020년 14,000TEU - 2030년 18,000TEU

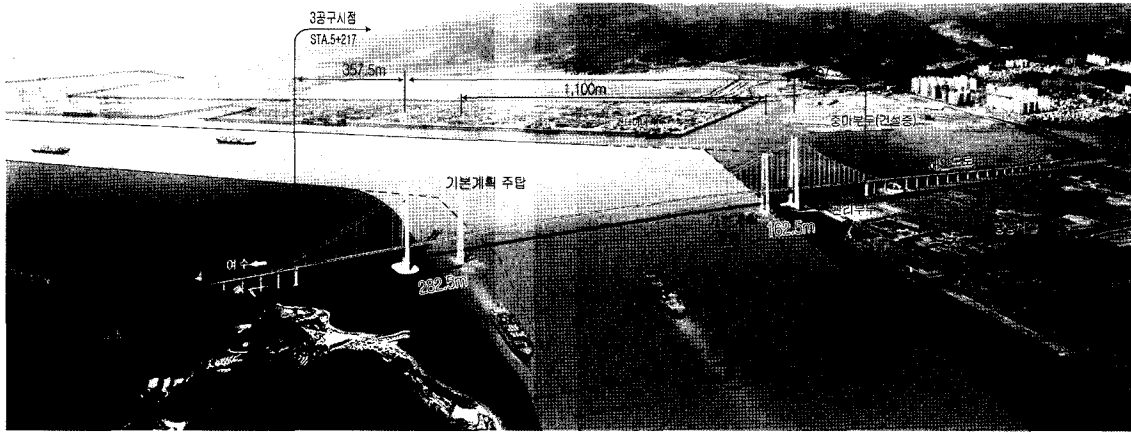
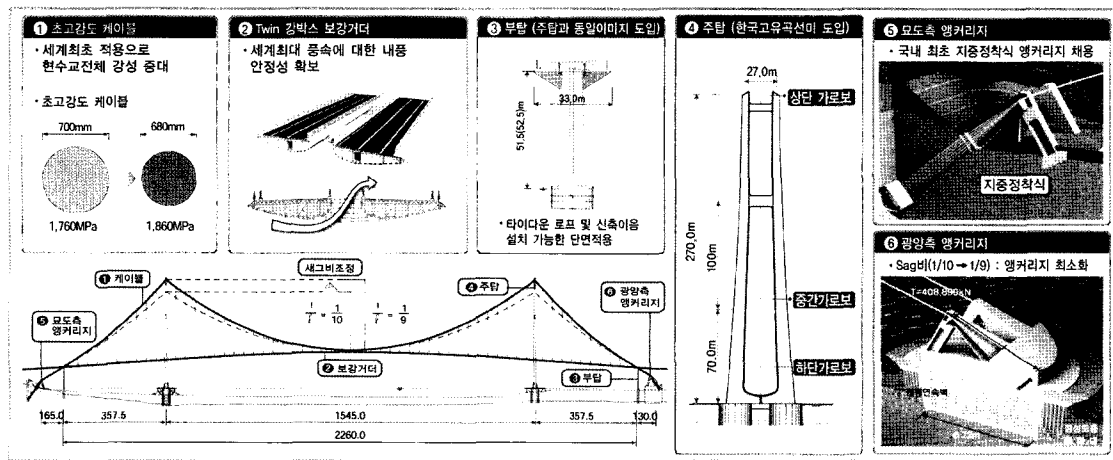
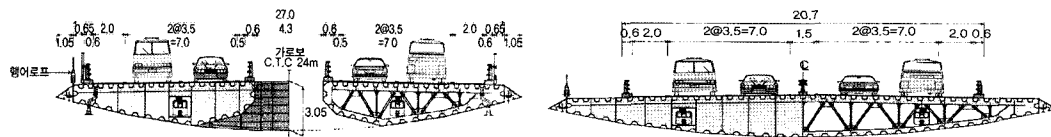


그림 3 묘도-광양간 현수교 주경간장 계획



(a) 구조시스템 개요



(b) 트윈박스 보강거더(일반부)

(c) 싱글박스 보강거더(접속부)

그림 4 묘도~광양간 현수교 구조계획 개요

였다. 따라서, 2030년에 예상되는 최대 18,000TEU급 선박의 직교 통항의 안전성 확보(표 2), 케이블의 선박충돌 대책 불필요, 앵커리지 및 주탑기초의 육상화로 하부공사비의 감소, 세계 제3위 초장대화 현수교라는 상징성 부여가 가능하였다(그림 3).

3. 구조 계획

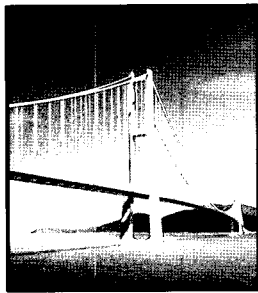
본 교량의 계획에 있어서 주안점을 3가지로 요약하면 다음과 같다. 첫째, 규모의 차별화를 통한 국가대표 교량의 실현, 둘째, 기술혁신을 통한 초장경간 현수교의 구현, 셋째, 최적시스템 구축으로 구조안전성 및 유지관리 효율

성 제고이다.

본 교량은 주탑부에서 보강거더의 연직지지 장치가 없는 3경간 플로팅 시스템으로서 국내 최초로 트윈 강박스 보강거더를 채용하였다. 트윈박스거더의 경우 상행과 하행의 도로가 분리되므로 공구 시점부와 종점부의 126.5m 구간을 싱글박스로 계획하고, 150m의 도로폭 변이구간을 두어 인접 공구의 도로폭과 일치시키도록 하였다. 주탑은 교량의 이미지를 좌우하는 구조인 만큼 다양한 경관 검토를 통하여 선정하여 조화형 주탑으로 계획하였으며, 주탑기초는 2주식 우물통 기초로 계획하였다(그림 4). 또한, 안벽식 및 사석식 충돌방지공을 설치하여 교량과 선박의 안전성을 동시에 확보하도록 하였다. 그리고, 광양측 앵커리

표 3 주요제원 및 설계조건

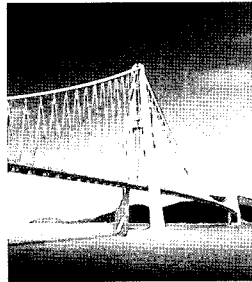
교량	3경간 현수교	357.5+1,545+357.5 = 2,260m
보강거더 형식		트윈 강박스 거더
선형	종단경사	4%
	횡단경사	2%
설계속도		70km/h
폭원		20.7m
설계 활하중	바닥판	DB-24, DL-24
	보강거더	DL-24 하중에 감소계수 적용
설계기본풍속		40.4m/s
지진하중		내진 I 등급
내구연한		100년



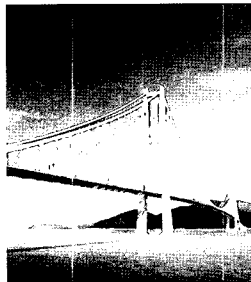
(a) 3경간 현수교(선정)



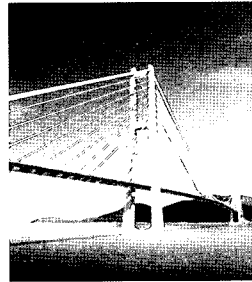
(b) 단경간 현수교



(c) 3차원 케이블 현수교



(d) 경사행어 현수교



(e) 디싱거 형식

그림 5 교량 형식 검토

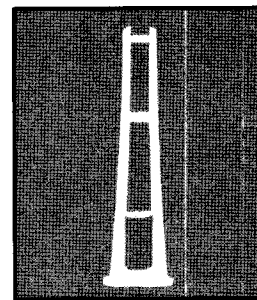
지는 중력식, 묘도축 앵커리지는 지중정착식으로서 육상화를 통한 공사비 감소를 도모하였다. 설계시 적용한 주요제원 및 설계조건은 표 3과 같다.

교량 형식의 선정에 있어서는 그림 5와 같은 비교안을 검토하여 최종안을 선정하도록 하였다. 경사 행어 현수교

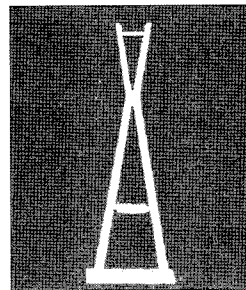
는 행어의 피로문제 및 유지보수비 증가등으로 경제성이 불량하였으며, 3차원 케이블 현수교는 보강거더 가설시 행어와의 연결공사에 어려움이 예상되었고, 디싱거 형식 현수교는 동급규모에 적용실적이 없는 단점이 있어서 최종안 선정시 배제되었다. 적용 실적이 풍부하고 구조적으로 안정한 3경간 및 단경간 현수교를 상세비교 검토한 후, 3경간 현수교를 최종안으로 선정하였다. 3경간 현수교는 전통적인 형식으로서 구조성이 우수하고, 측경간 교각이 없어 선박의 시인성이 우수하며, 또한, 연직행어 및 2차원 케이블로 시공성이 우수하고, 플로팅 시스템의 도입으로 주행성 향상 및 지진안정성을 향상시키도록 하였다.

4. 경관설계

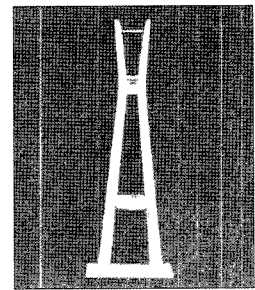
교량 경관설계에서의 연출목표는 첫째, 21세기 메가허브 광양항의 관문적 상징성의 연출, 둘째, 충무공 이순신



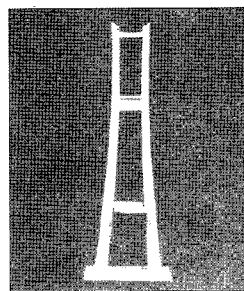
(a) 조화형(선정)



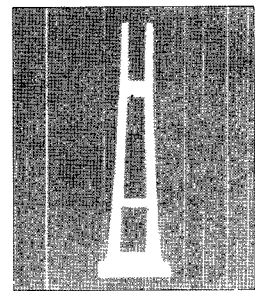
(b) X형



(c) 경사형



(d) 곡선형



(e) H형

그림 6 주탑 기본형상 검토

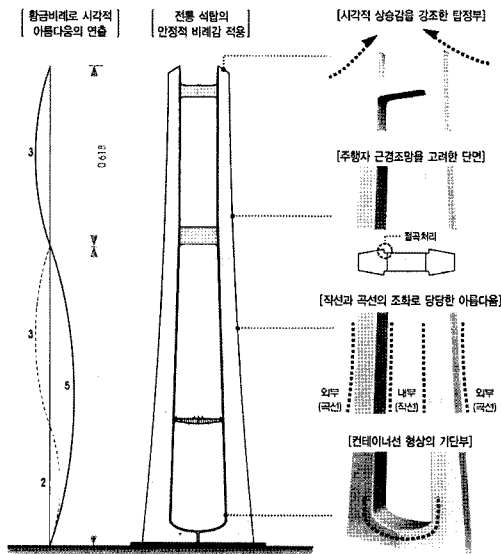


그림 7 주탑의 경관 디자인

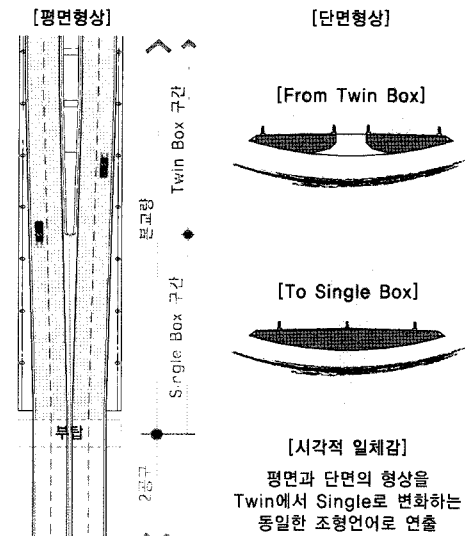
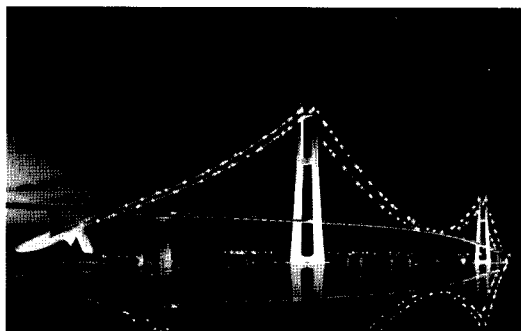
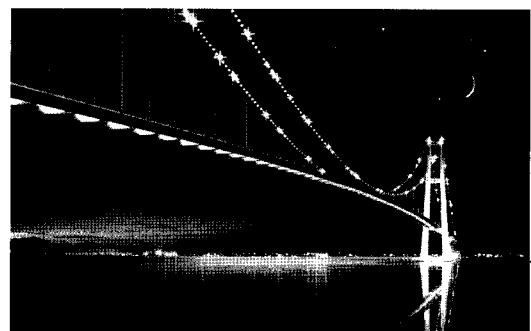


그림 8 보강거더의 디자인



(a) 전경 조망



(b) 하부 조망

그림 9 경관 조명 설계

장군의 최후 격전지에 충무공의 탄신년(1545년)을 상징하는 경간장 계획, 세째, 한국적인 미를 적용한 우아하며 아름다운 세계적 교량의 연출이었다.

현수교의 이미지를 좌우하는 주탑의 경관 디자인에 있어서는 그림 6에서와 같이 다양한 기본형상들의 검토를 수행하여 최종 형상을 선정하도록 하였다. 최종 선정된 형상인 조화형에서는 한국적 아름다움을 연출한 곡선의 조형미를 갖추도록 하였다. 주탑 내부는 직선, 외부는 곡선으로 조화시켜 당당함과 부드러운 아름다움을 동시에 연출하였으며, 탑기부는 컨테이너선을 형상화하였다. 그리고, 주탑 가로 보 및 보강거더의 연직위치를 전통 석탑에서의 황금비례를 적용하여 배치시켜 시각적 아름다움과 안정적 비례감을 연출하였다(그림 7). 보강거더의 경관적 디자인은 광양항을 진출입하는 배의 이미지를 유선형 단면의 미래지향적으로 연출하였으며, 평면과 단면을 동일한 조형 언어에 의한 연출로서 시각적 일체감을 부여하도록 하였다(그림 8).

야간 경관 조명 설계에 있어서는 일몰이후부터 자정까지

는 주탑의 랜드마크적 수직성과 케이블의 자연스러운 곡선미를 조화시킨 아름다움과 독창성을 부여하도록 하였으며, 보강거더 하부 조망시 야경은 거더하부의 투광조명이 가능하도록 하여 OPEN 구조미를 부각시키고, 컬러필터의 변화를 통하여 태양빛을 이미지화 하도록 하였다(그림 9).

5. 구조설계

5.1 설계하중

기본적으로 도로교설계기준(2005)과 케이블강교량설계지침(2006)을 준용하도록 하였다.

(1) 풍하중

설계기본풍속 V_{10} 은 지표조도구분 II인 개활지에서 지상 10m 높이에서의 재현기간 200년(내용년수 100년, 비초과 확률 60%)에 해당하는 10분 평균풍속으로 정의하였다. 현

장 풍속계측 및 수치모델링 연구, 태풍 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하여 여수기상대 풍속자료의 신뢰성을 확인하고, 여수기상대 풍속자료 분석을 통하여 $V_{10}=40.4\text{m/s}$ 로 산정하였다. 보강거더, 주케이블, 주탑에서의 설계기준풍속은 각각 62.8m/s , 68.6m/s , 68.6m/s 로 적용하였다. 그리고, 교축방향 풍속은 교직방향 풍속의 30%로 적용하였다. 동적내풍안정성 검토를 위해서는 태풍 몬테카를로시뮬레이션에 의한 신뢰도해석을 수행하고, 이를 통하여 산정된 신뢰성지수 $\beta=4.0$ 에 대한 안전계수 C_{SF} 를 1.3으로 산정하여 적용하였다. 따라서, 플러터 조사풍속은 81.6m/s 로 산정하여 전산유체해석 및 풍동실험에 의한 검토시에 플러터에 대한 동적불안정성을 검토하도록 하였다.

(2) 활하중

강바닥판 설계시에는 DB-24, DL-24 하중에 의하여 설계를 수행하였으며, 그 이외의 보강거더, 주탑, 주케이블, 행어 설계시에는 차도부분에는 교축방향으로 차로당 1대의 DB-24 하중과 1차로분의 DL-24 하중 가운데 설계부재

표 4 시간길이에 따른 DL-24 하중의 저감 ($L > 200\text{m}$)

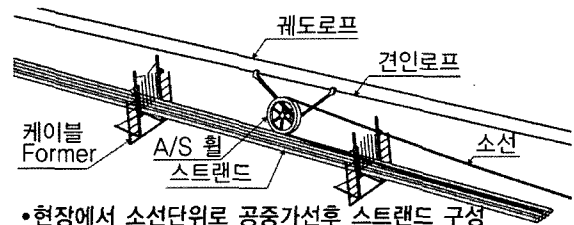
집중하중	$P_m = 108\text{kN}$ $P_s = 156\text{kN}$
등분포 차로하중	$W = 12.7 \times \left(0.57 + \frac{300}{500 + L} \right) \text{kN/m}$

에 불리한 응력을 주는 것을 재하한다. 다만, 시간길이가 200m를 초과하므로 표 4와 같이 DL-24 하중의 등분포 차로하중을 시간길이에 따라 저감하여 설계에 적용하였다.

5.2 케이블

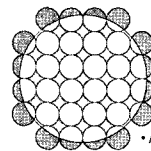
(1) 주케이블

현수교의 주케이블은 가장 중요한 구조부재로서 보강거더에 작용하는 하중을 주탑과 앵커리지에 전달한다. 일반적으로 주케이블은 5~6mm의 소선으로 이루어진 평행 소선 다발(AS, Air Spinning) 혹은 미리 제작된 지름

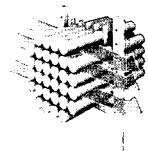


•현장에서 소선단위로 공중가선후 스트랜드 구성

(a) 공법개요



32Strand
•사각형 배치
•저장력 공법
•고강도 와이어
•Air Space = 0.074m²



(b) 직사각형 스트랜드 배치

(c) 동풍성 향상

그림 10 Innovated AS 공법

표 5 주케이블 제원

구분		제원		주케이블 단면도	
소선	재질	KSD 3509 피아노선재		<p>선택선 전</p>	<p>선택선 후</p>
	직경	$\phi=5.4\text{mm}$			
	단위중량	1.764N/m			
	인장강도	1,860 MPa			
	허용인장강도	744 MPa (SF=2.5)			
스트랜드 (Strand)	소선수	396본 / Strand		<p>선택선 전</p>	<p>선택선 후</p>
	외접원직경	120mm			
케이블 (Cable)	구분	주경간	측경간	<p>선택선 전</p>	<p>선택선 후</p>
	스트랜드수	32 Strand	34 Strand		
	소선수	12,672본	13,464본		
	래핑전 직경	680mm	701mm		
	밴드부 직경	686mm	707mm		
	밴드부 직경	671mm	692mm		
	단위중량	22.35kN/m	23.74kN/m		

40~100mm의 스트랜드로 구성되어진다. 본 교량에서는 사각형(Rectangular) 스트랜드 배치와 저장력 공법을 적용하는 Innovated AS 공법을 적용하여 시공기간 단축, 새들 및 정착규모 축소, 인건비 감소를 도모하였다(그림 10). 또한, 본 교량에서는 주경간장이 초장대화됨에 따라서 세계 최초로 초고강도 케이블(190kgf/mm², 1,860MPa)을 적용하여 구조안전성과 경제성을 향상시키도록 하였다. 현대 현수교의 케이블 인장강도는 1,770MPa에서 1,860MPa로 발전하였으며, 이탈리아의 Messina 현수교에 적용될 예정으로 있다. 국내에서도 철강기술이 발달하면서 초고강도 케이블의 발전이 완료되어 적용성을 검토하고 시험평가를 수행하였으며 본 설계에 적용하였다. 최종적으로 본 설계에 적용한 주케이블의 형식 및 스트랜드 구성에 대한 세부사항은 표 5와 같다. 결과적으로 국내자재 및 시공기술의 적용이 가능한 1,860MPa의 초고강도 케이블을 선정하여 케이블 중량을 6% 감소시키는 효율적인 케이블 시스템의 구축이 가능하도록 하였다.

(2) 행어 시스템

보강거더와 주케이블을 연결하는 행어시스템은 고정하중 및 활하중에 의한 수직력과 풍하중에 의한 수평력에 저항하는 구조체이며 행어시스템은 그림 11과 같은 케이블 밴드, 행어케이블, 정착장치 등으로 구성된다.

행어케이블로는 내구성 및 피로강도가 우수하고 국내제작이 가능한 CFRC(Center Fit Rope Core)를 채용하였다.

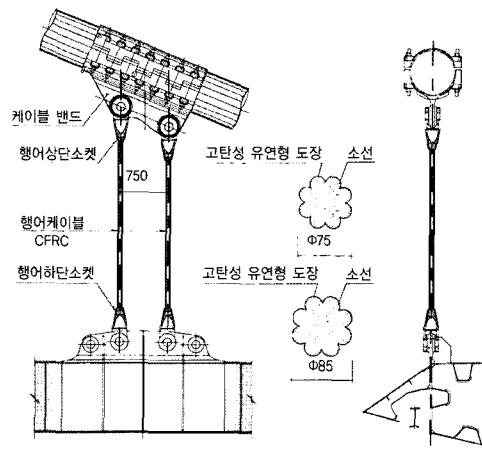


그림 11 행어 시스템

행어케이블 소켓을 케이블밴드와 핀으로 연결하는 핀-핀 정착형식을 적용하여 밴드제작 및 밴드볼트 배치를 단순화하고 볼트 중체결로 밴드내부의 배수대책이 불필요하도록 하였다. CFRC 로프의 경우 피로강도가 높고, 표면이 나선형으로 바람에 대한 와류진동이나 깎로핑을 억제하며, 아연도금으로 50년 내구성을 확보할 수 있다(표 6).

5.3 보강거더

보강거더는 차량하중을 1차적으로 지지하는 부재로서, 행어에 의해 지지되는 주부재이다. 이러한 보강거더 부재를 설계하기 위해서 3차원 대변위 해석(RM2004)을 통해서 산출되는 단면력으로 보강거더설계를 수행하였다(표

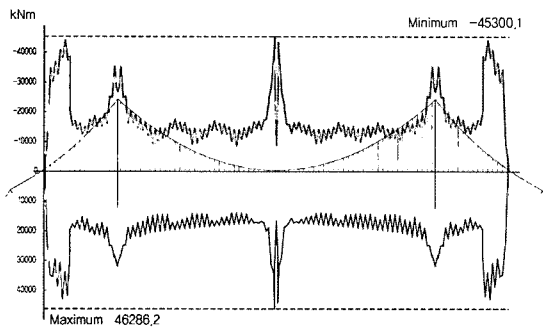
표 6 행어 케이블 제원

구분	75mm	85mm
단면		
구성	8×WS(36)+CFRC - 8×{1+7+(7+7)+14} + {8×(1+6)+1×19}	
상층소선경(mm)	3.63	4.16
단면적(mm ²)	3,093	3,972
단위중량(kN/m)	255	327
절단하중(kN)	4,332	5,401
강도(MPa)	1,660	1,610
탄성계수(MPa)	1.4×10 ⁵	1.4×10 ⁵

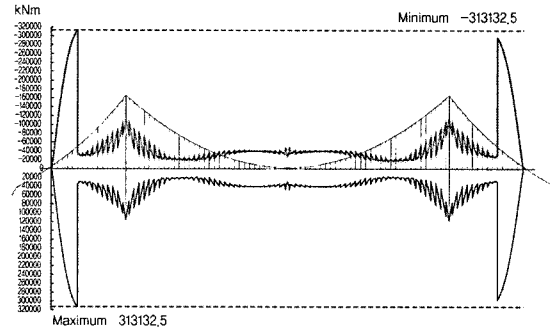
표 7 보강거더 설계를 위한 하중조합

하중 조합		
1	D+L+SD+EO	(1.00)
2	D+L+SD+EO+T	(1.15)
3	D+SD+EO+W+T(W)	(1.50)
4	D+L(EQ)+SD+EO+T+EQ	(1.50)
5	D+L+PS1	(1.25)
6	D+L(PS2)-PS2	(1.50)

여기서, D : 고정하중 T : 온도하중
 L : 활하중 T(W) : 폭풍시 온도하중
 EO : 제작오차 SD : 지점침하
 W : 풍하중 EQ : 지진하중
 L(EQ) : 지진시활하중 (=1/2×L*(H))
 L*(H) : 전체 경간에 재하된 자동차 활하중
 L(PS2) : 행어파단시 활하중 (=0.5×L)
 PS1 : 행어교체시 PS2 : 행어파단시

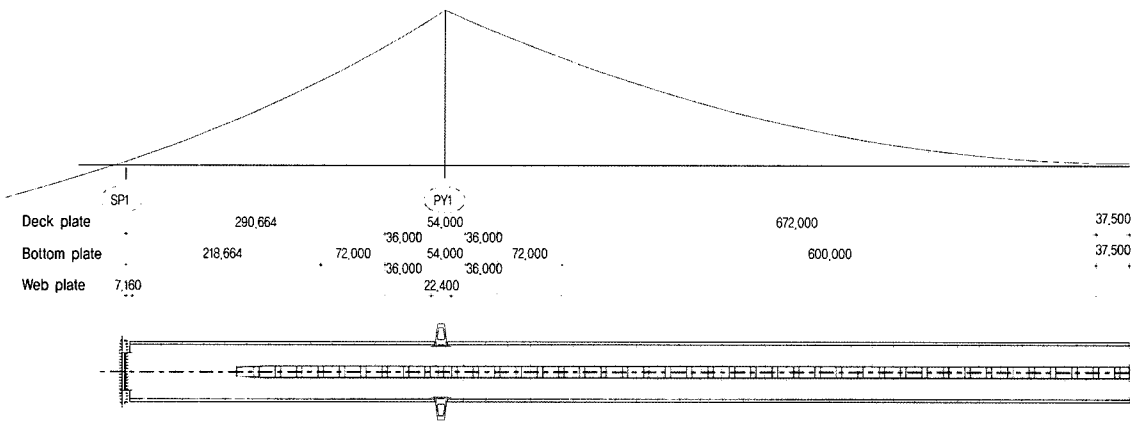


(a) 면내힘모멘트



(b) 면외힘모멘트

그림 12 보강거더 설계단면력



트윈박스 보강거더

싱글박스 보강거더

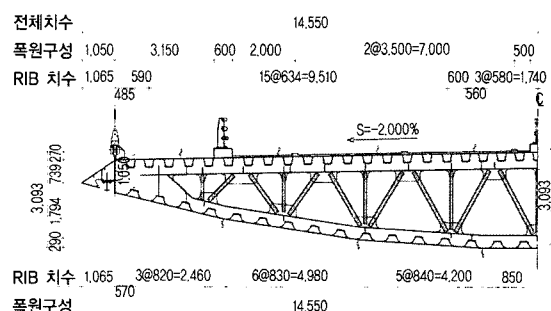
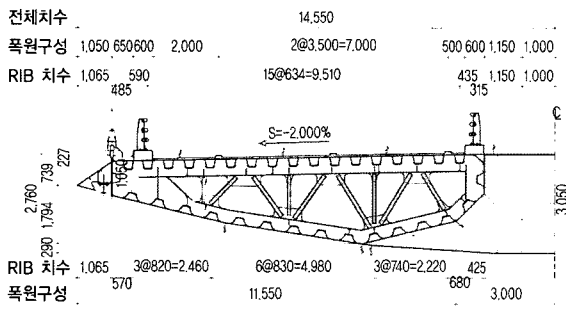


그림 13 보강거더 제원

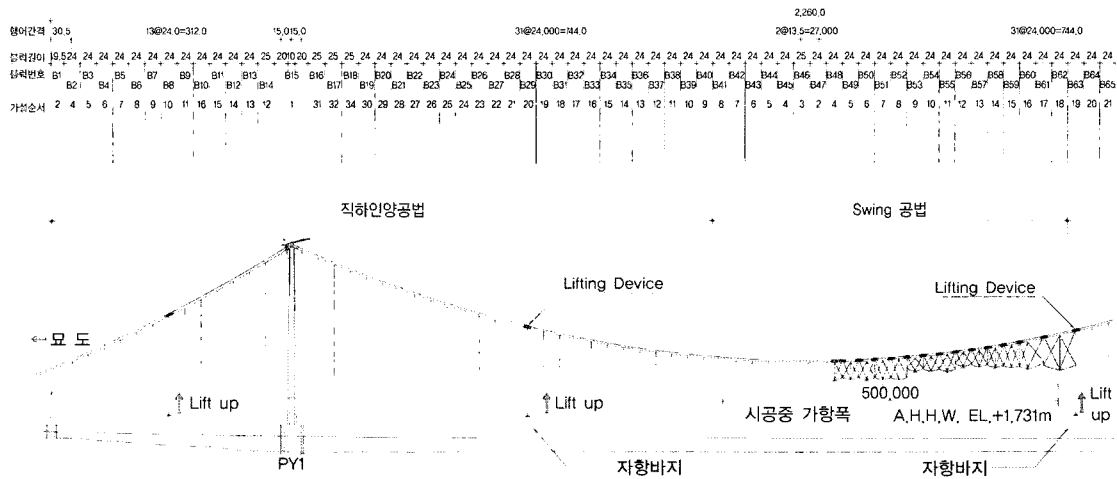


그림 14 보강거더 가설순서

7). 보강거더의 휨-전단응력, 합성응력, 보강재 검토, 횡방향 설계를 수행하였다. 초기평형상태시 보강거더에 축력이 도입되지 않으므로 보강거더 단면 검토시 데크 플레이트 및 Bottom 플레이트 전폭을 유효한 단면으로 산정하였다. 슬랜더한 단면이므로 단면 결정시 내풍안정성을 동시에 고려하였으며, 부재 설계시 가설단계시의 구조적 안전성도 고려하였다. 그림 12에서는 보강거더 설계시 적용한 설계단면력의 Envelope을 보이고 있다.

보강거더는 현수교 전체계의 내풍안정성을 지배하는 주부재로서 세계 최상급 풍속에 대한 내풍안정성 확보를 위해서 트윈박스 보강거더를 채용하여 플러터 발현풍속을 극대화하기 위하여 전체 경간에 트윈박스 보강거더를 채용되, 단부에서는 인접공구와의 원활한 차선의 접속을 위하여 싱글박스로 계획하였다(그림 13).

합리적인 보강거더 가설순서를 선정하고, 각 가설단계별 교량의 안전성을 검토하기 위하여 가설단계해석을 수행하였다. 일반교량과 달리 현수교의 가설단계시에는 완성계시보다 대변위 현상이 크게 나타나므로, 역방향(Backward) 대변위 해석을 수행하였다. 가설단계별 보강거더 응력을 누적시킨후 각 검토 위치별로 허용응력을 검토하여 안정성을 확인하였다. 이러한 결과와 가설계획을 토대로 하여 선정한 보강거더 가설단계의 순서는 그림 14와 같다.

5.4 주탑

주탑은 라멘형 철근 콘크리트 주탑으로서 현수교 주탑으로서 세계에서 가장 높은 270m 높이의 콘크리트 주탑이다. 보강거더와 마찬가지로 공기역학적으로 유리한 사다

리꼴 단면으로 계획하였고, 트윈 강박스 거더와 형상면에서 통일성을 추구하여 곡선 탑주로 계획하였다. 주탑부에서는 거더 하면의 가로보를 생략하여 플로팅(Floating) 시스템 현수교임을 부각하였다. 상단가로보는 주탑전망대로의 활용 및 공사중 탐정 크레인지지대로 활용하도록 하였고, 중간가로보는 통과 주행차량의 개방감 확보를 위해 노면 상측 110m 에 설치하였다(그림 15). 주탑 형상은 미적 특성을 고려한 제형중공단면으로 하였으며 탐정부까지 변단면 곡선 처리를 하였다. 변단면에 대한 거푸집 운용의 검토로 시공성을 확보하였으며, 설계단면력이 조금 더 큰 묘도측 주탑(PY1)에 대해 단면의 안정성을 검토하였다(그림 16).

주탑 가설단계에서는 연직정밀도 차원에서 가설 스트러트를 설치하도록 하였다. 연직도 보정은 탐주의 경사와 가설하중의 편심에 의한 변형량을 보정하도록 하였다. 풍하중에 의한 변형량은 탄성변형량이므로 연직도 보정과 무

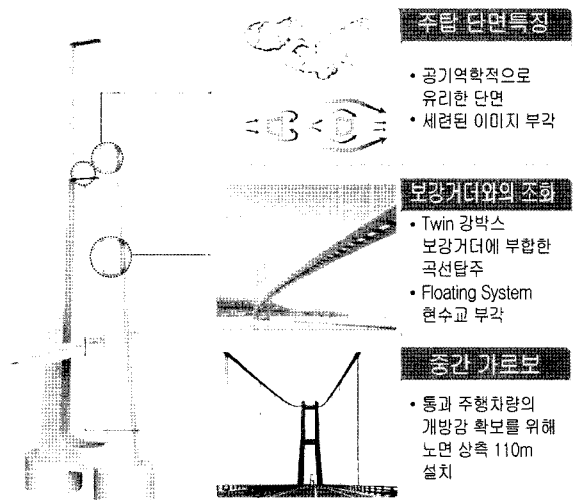


그림 15 주탑 부재 설계

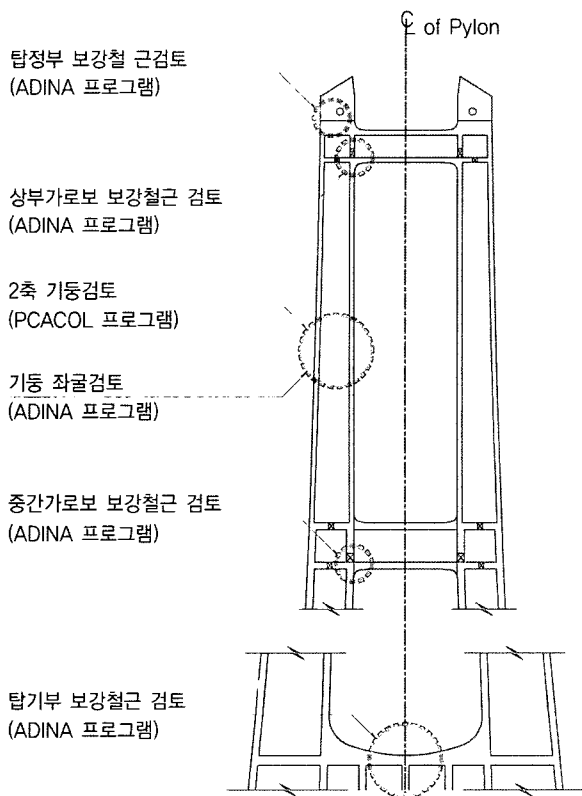


그림 16 주탑 구조안전성 검토 개요

관하다. 연직도 측정값은 측정 당시의 풍하중에 의한 변형량을 산정하여 보정하도록 하였다. 가설 스트러트의 위치 및 수량은 현장 여건에 따라 조절하도록 하였다(표 8).

5.5 앵커리지

본 교량은 케이블을 중력식 앵커리지에 정착시키는 일반적인 타정식 현수교이다. 타정식 현수교에서 앵커리지 기능은 주케이블 장력을 안전하게 지지하는 것이다. 묘도층 앵커리지(그림 17)는 견고한 암반층의 지지기반을 충분히 활용하여 암굴착량을 최소화하고 환경 훼손이 적은 지중정착식 앵커리지를 적용하였다. 지중정착식 앵커리지는 썩기 파괴에 대한 활동 안전을 기준 3.0이상을 확보하였다. 또한, 챔버부 유입수에 대한 차수 및 양수대책과 암반부 PC강선의 보호대책을 수립하였다.

광양측 앵커리지(그림 18)는 중력식 앵커리지로 원형 연속벽을 이용한 무지보 가설공법을 채택하였다. 개량된 전면 점토층의 수평저항을 고려하지 않고 직접기초 형식으로 계획하여 전체 안정성을 확보하였고, 상시 저면 반력은 사다리꼴 분포가 되도록 하였다. 연속벽 선단은 암반에 근

표 8 주탑 가설단계 검토

구분	가설단계 1			가설단계 2			가설단계 3		
연직도 검토									
	$\delta_{allow}=0.051m, \delta_{max}=0.037m$			$\delta_{allow}=0.085m, \delta_{max}=0.020m$			$\delta_{allow}=0.128m, \delta_{max}=0.020m$		
단면 검토									
	Pu (kN)	Mu (kN·m)	안전율	Pu (kN)	Mu (kN·m)	안전율	Pu (kN)	Mu (kN·m)	안전율
	176,134	1,134,700	3.17	239,351	1,531,000	2.51	305,658	2,431,580	1.15

- 가설 단계 2에서 연직도 확보를 위하여 가설 스트러트를 설치 (EL. 122.73m)
- P-M상관도에 의한 가설 단계별 내풍 안정성 검토

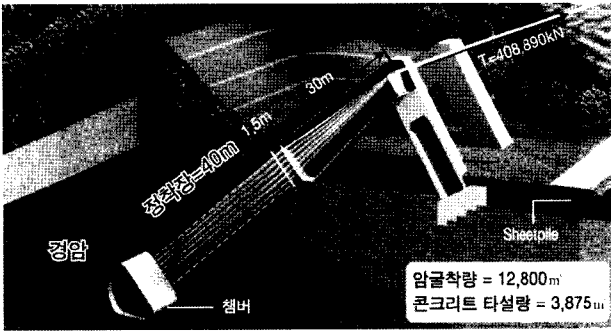


그림 17 모도측(시점측) 지중정착식 앵커리지

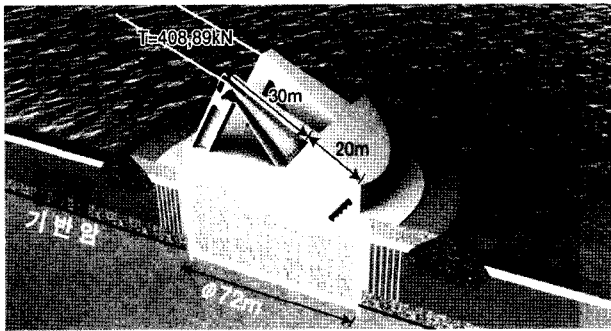


그림 18 광양측(종점측) 중력식 앵커리지.

입시켜 고정점 확보 및 침투수 차수 대책을 도모하였고, SCW보강에 의한 공벽 안정성 유지와 시공 실적에 의한 정밀한 연직도 관리를 수행하도록 하였다. 광양제철소 매립지의 안정성 확보를 위해 사석 축도 구축후 매립과 지반보강 작업을 동시에 수행하여 원제방부의 안정성을 확보하였다.

6. 변위제어장치

본 교량의 보강거더 시스템은 플로팅 시스템으로서 주탑부에 신축장치가 없으며 주행성이 양호하고 처짐특성이 우수하다. 이러한 장점이 있는 반면에 단부 종방향 신축량이 커지고, 부반력이 발생하므로 그림 19와 같은 변위제어 시스템을 계획하였다. 보강거더 단부에 신축이음장치, 링크슈, 버퍼를 설치하고, 주탑부에 스톱퍼 및 윈드슈를 설

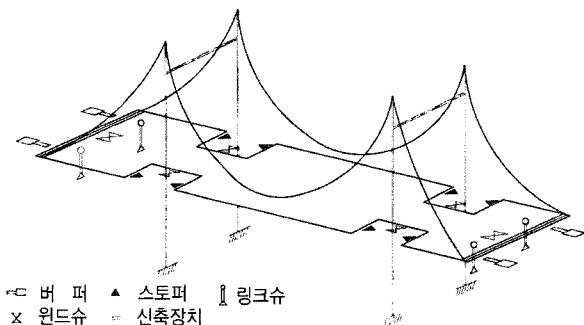


그림 19 변위제어 시스템

표 9 변위제어 시스템 구성요소들의 역할

시스템 구성요소	역할
링크슈	<ul style="list-style-type: none"> 보강거더 단부의 연직하중 및 부반력제어 (정반력: 4,402kN, 부반력: -3,108kN) 교축방향 변위를 링크본체의 궤적으로 수용
윈드슈	<ul style="list-style-type: none"> 주탑부와 부탑부 풍하중에 대한 횡방향 받침 (주탑부: 12,000kN 4기, 부탑부: 4,000kN 4기) 입의의 방향에 대한 회전변위 수용
버퍼	<ul style="list-style-type: none"> 보강거더 단부에 설치되어 동적하중에 의한 종방향 이동량 제어(2000kN, 총4기)
스톱퍼	<ul style="list-style-type: none"> 보강거더의 과도한 종방향 변위를 강성이 큰 주탑부에서 제어(12,000kN, 총8기)
신축이음	<ul style="list-style-type: none"> 현수교 전체의 교축방향 및 회전에 대한 적용이 양호한 구조(허용변위: 1,150mm)

치하여 교량 전체 구조시스템의 변위 제어의 효율성을 높 이도록 하였다(표 9).

7. 내풍설계

여수기상대 풍속자료에 의한 40.4m/s(재현주기 200년, 지표조도 II)를 설계기본풍속으로 산정하였다. 따라서, 구조요소별 설계기준풍속(보강거더: 62.8m/s, 주탑: 68.6m/s, 케이블: 68.6m/s), 플러터 조사풍속 81.6m/s를 산정하여 내풍설계를 수행하도록 하였다. 초장대현수교의 극환경조건인 바람에 대한 내풍성능을 확보하기 위하여 동적전산 유체해석, 2차원 풍동실험, 3차원 풍동실험을 수행하여 다 각도로 철저한 검토를 수행하였다.



트윈박스①: B=33m, b=7.3m, 개구율=22%, $V_F=115m/s$



트윈박스②: B=31.5m, b=5.8m, 개구율=18%, $V_F=112m/s$



트윈박스③: B=30m, b=4.3m, 개구율=15% $V_F=102m/s$



싱글박스: B=34.2m, $V_F=85m/s$

그림 20 동적전산유체해석에 의한 트윈박스 거더 기본단면 형상 도출

7.1 전산유체해석

동적전산유체해석(DVMFLOW, COWI사)을 통하여 보강거더의 플러터 발현풍속(V_F)을 산정하여 풍동실험을 위한 기본단면 형상을 도출하였다. 해석결과를 통하여 개구율(개구폭/전체폭) 15%를 갖는 트윈박스의 경우 플러터 조사풍속을 상회하고, 강제량을 줄일 수 있어 경제적인 면에서 장점이므로 풍동실험을 위한 기본단면형상으로 선정하였다(그림 20).

7.2 2차원 풍동실험

장대교량의 중요한 설계인자인 바람에 대한 내풍성능을 철저히 검토하기 위하여 2차원 부분모형 풍동실험에 있어서 예비실험, 본 실험, 검증실험을 수행하여 정확한 2차원

풍동실험이 되도록 하였다(그림 21). 먼저, 예비실험을 통하여 기존의 장대교량에 적용되고 있는 유선형 싱글박스 거더와 트윈박스거더의 내풍성능을 비교 검토하였으며, 트윈박스에서 발생할 수 있는 와류진동 등의 동적불안정 진동의 발생여부를 검토하여 최적의 트윈박스 보강거더 형상을 도출하도록 하였다(그림 22). 최적의 트윈박스 보강거더는 플러터 발현풍속이 100m/s이상으로서 플러터 조사풍속 81.6m/s를 훨씬 상회하고, 미소한 와류진동만 발생하여 충분한 내풍성능을 확보하고 있음을 확인하였다. 이러한 2차원 풍동실험에서 얻은 정적공기력계수, 플러터계수를 산정하여 내풍설계에 적용하였다. 특히, 기존의 유선형 싱글박스의 경우에는 본 교량에 적용하기에는 내풍성능이 부족하여 최종단면형상으로 선정하지 않았다.

7.3 3차원 풍동실험

본 교량의 완성계 및 가설단계(독립주탑 포함)에 대하

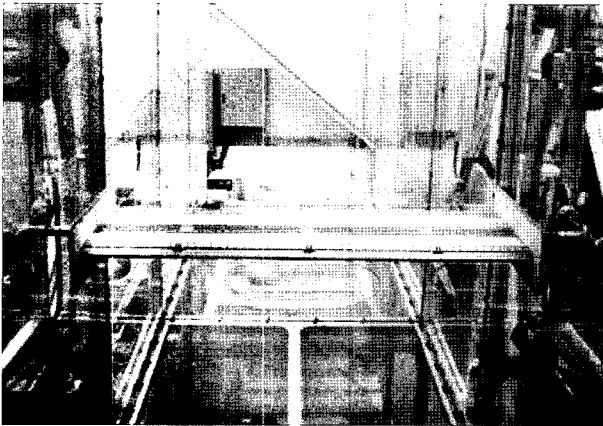


그림 21 2차원 풍동모형

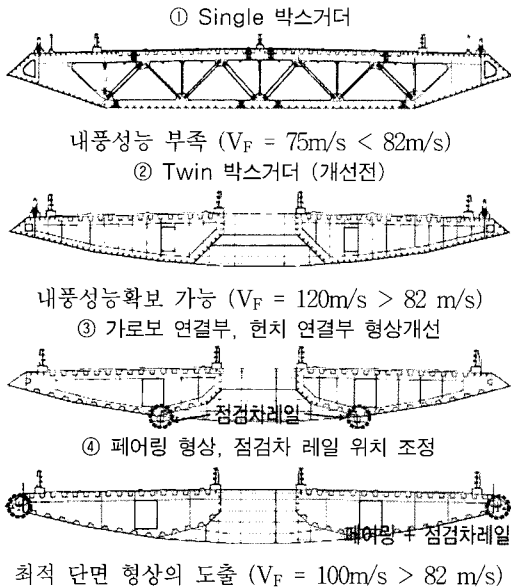


그림 22 2차원 풍동실험을 통한 트윈박스의 최적 형상 도출

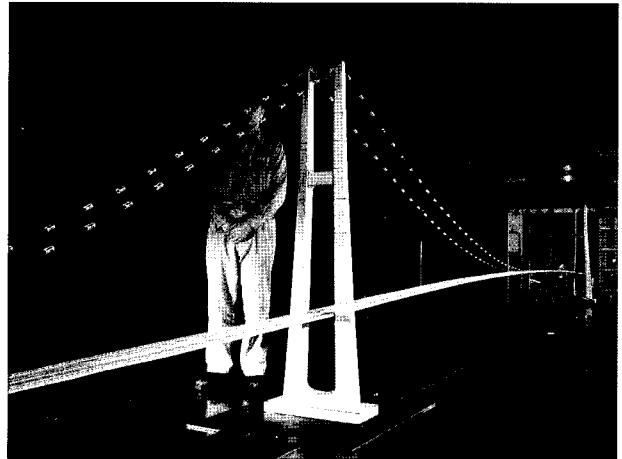


그림 23 3차원 풍동모형(1/165 축척)

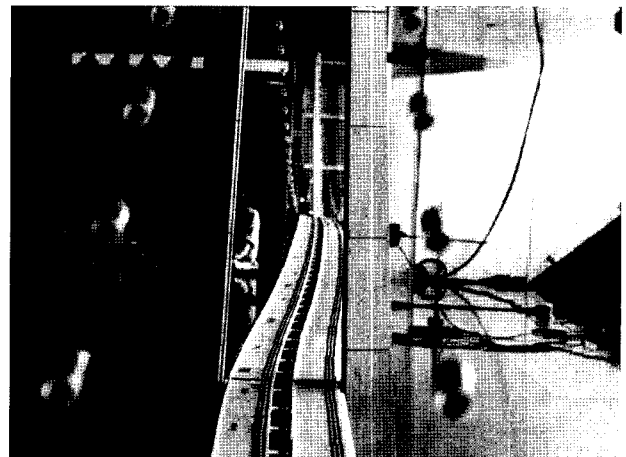


그림 24 수평변형형상 (풍속 100m/s)

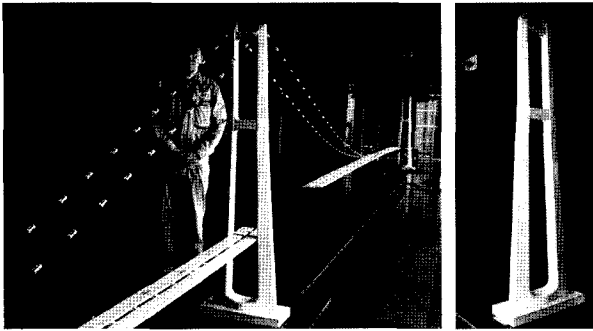


그림 25 3차원 가설단계 모형(독립주탑모형)

여 3차원 풍동실험을 수행하였다. 풍동실험에 있어서는 전체계해석에서 구한 고유진동수와 풍동모형의 고유진동수가 거의 일치하도록 상사시켜서 풍동실험 결과의 신뢰성을 높이도록 하였다.

완성계 풍동실험 결과, 등류 중에서 실교환산풍속 100m/s 까지 플러터가 발현하지 않았으며, 난류중에서도 탁월한 동적 불안정성을 보이지 않아 충분한 내풍성능을 가지고 있음을 확인하였다(그림 23, 24).

가설단계 풍동실험은 주경간 72% 가설시(한지연결)에 대하여 풍동실험을 수행하였다. 가설단계 풍동실험 결과, 실교

환산풍속 72m/s에서 플러터가 발현하였으며 조사풍속 64.1m/s를 상회하여 충분한 내풍성능을 확인하였다. 독립주탑모형실험에서는 실교환산풍속 80m/s 이하에서 깔로핑 등의 동적불안정 진동은 발현하지 않았으며, 미소한 와류진동이 확인되었지만, 설계상의 문제는 없는 것으로 판단되었다(그림 25).

8. 가설계획

항로차단방지와 파이롯트 로프(Pilot Rope)에 의한 해상 사고 방지를 위해 헬기를 이용하여 파이롯트 로프를 가설하도록 계획하였고, 작업자 안전 및 낙하물에 의한 통항선박 피해 예방을 위해 내풍안전형 캐트워크 시스템(Catwalk System)을 적용하였다. 또한, 초대형 선박통항을 위해 항로를 점유하지 않고 항로구간 외부에서 인양하여 가설지점으로 이동하는 스윙공법(Swing Method)을 적용하였다(그림 26). 주탑은 오토클라이밍폼(Auto-climbing form)으로 시공하도록 계획하였다. 또한 세계 최고 높이인 점을 고려하여 GPS에 의한 연직도 관리방안을 수립하여 설계 및 시공단계에 반영하였다(그림 27). 그리고, 주케이블은 저장력

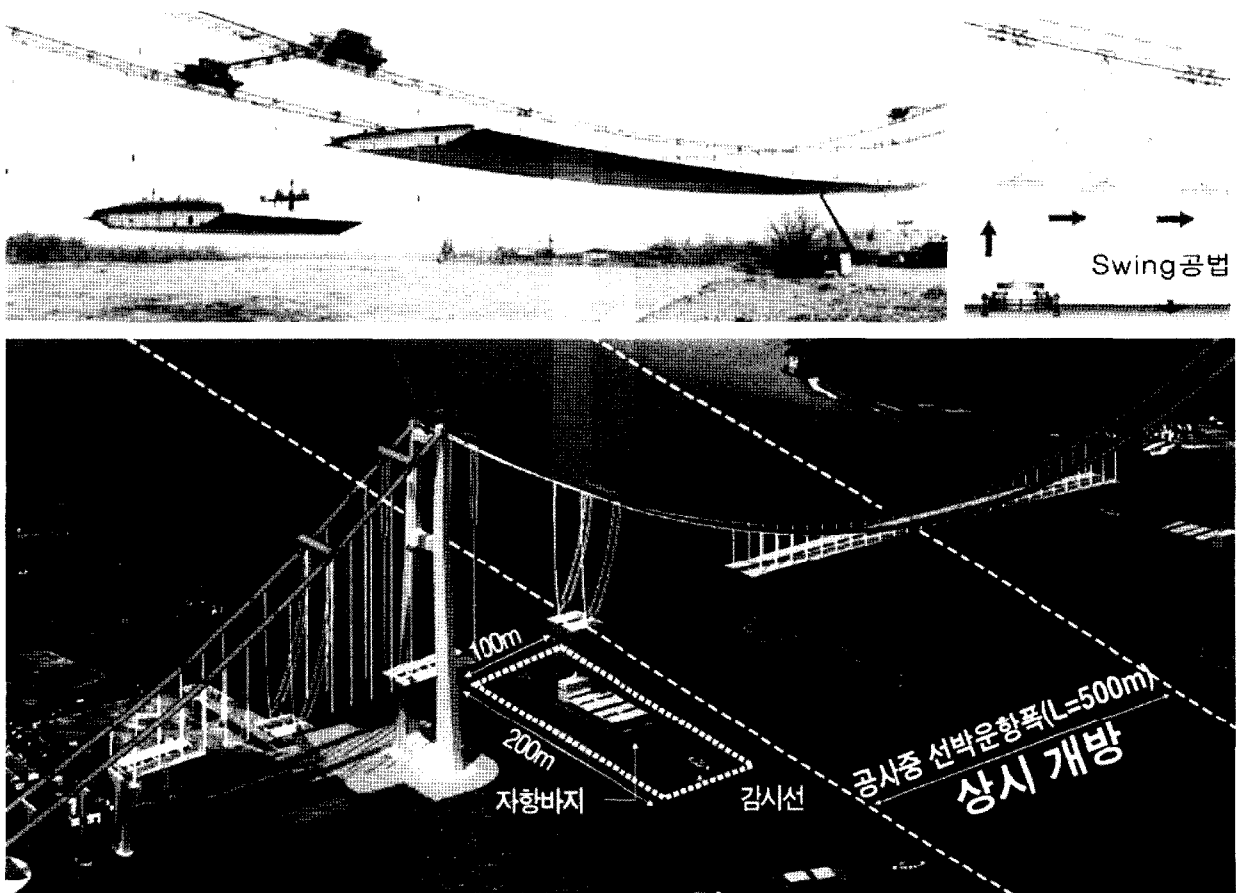


그림 26 공사중 항로확보를 위한 Swing 공법

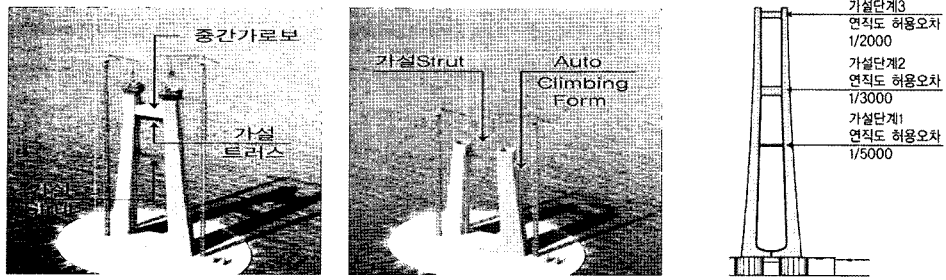


그림 27 주탑시공단계 및 연직도 관리

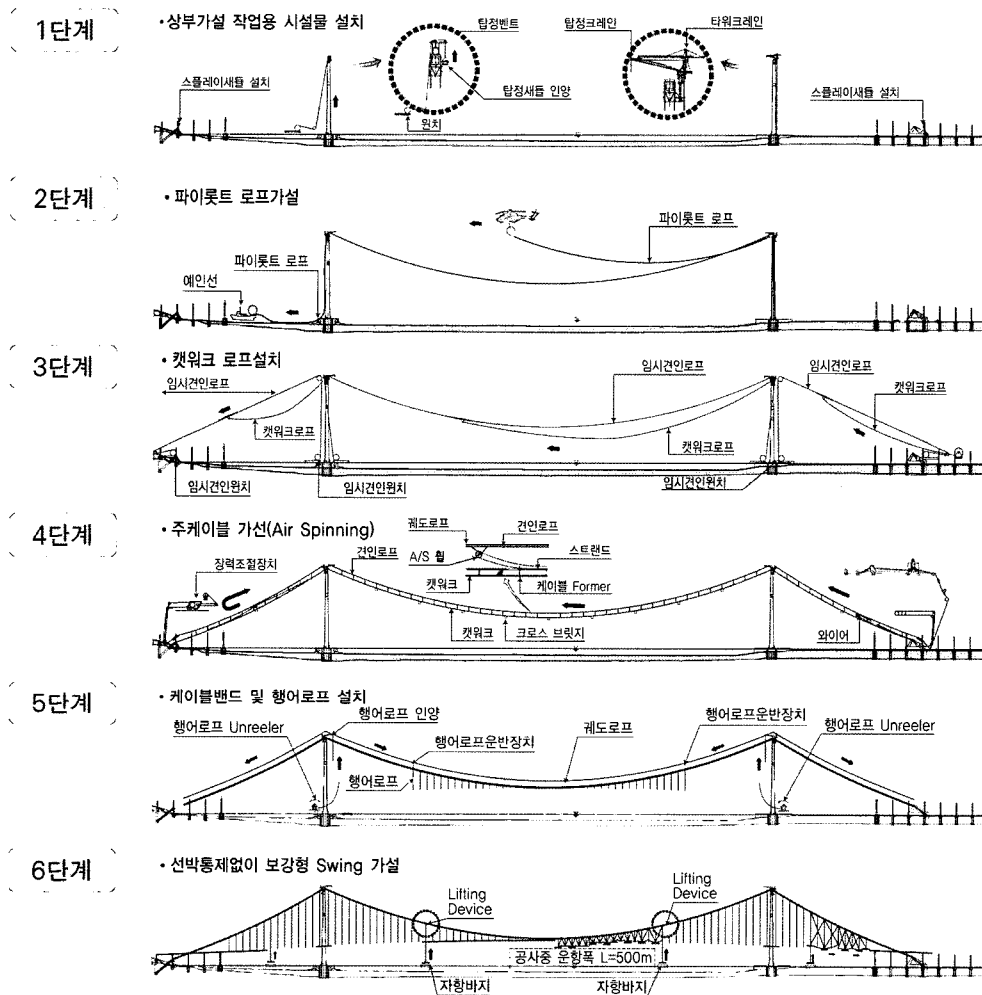


그림 28 상부구조 가설순서

Innovated AS 공법을 적용하여 공사기간을 단축하도록 하였다(그림 28).

9. 맺음말

본 글에서는 여수국가산단 진입도로 개설공사 제3공구의 묘도~광양간 현수교 기본설계서의 계획, 설계, 가설계획에 대해서 기술하였다. 본 교량은 타정식 3경간 현수교

로 국내 최대 및 세계 제3위에 해당하는 초장대 현수교로서 국내 기술진의 주도하에 교량의 계획, 설계를 수행함으로써 세계 최정상급 기술자들과 어깨를 나란히 할 수 있는 교량 기술의 선진화를 달성할 수 있는 계기가 되었다고 할 수 있다. 이를 위해 밤낮으로 혼과 열정을 쏟아주신 동료, 선배님들의 노고에 감사드리며, 실시설계 단계에서는 보다 완벽한 설계가 되도록 한치의 착오 없이 과업을 수행할 것을 약속드리며 글을 맺고자 한다. 