

여수국가산업단지 진입도로 개설공사 기본설계 묘도~광양간 현수교의 계획과 설계

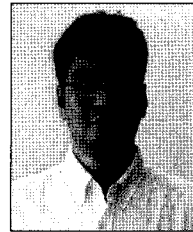
The Plan and Design of Suspension Bridge between
Yeosu-Myodo Yeosu Industrial Complex Road Turnkey Project



이 석 용*



서 석 구**



양 병 흥***

*삼성물산(주) 건설부문 부장
**서영엔지니어링 부사장
***서영엔지니어링 부장

2007년 전산구조공학회지에서는 전산 구조와 관련한 다양한 분야 중 지속적 정보 전달 가치가 있는 두 분야에 대한 연재 기사를 게재하고자 합니다. 그 중 한 분야는 전산구조와 관련된 컴퓨터 응용 프로그램 분야이고 두 번째 분야는 국내 토목/건축 터키 또는 대안설계에 참여하였던 구조분야의 설계내용을 정리 발표 함으로서 자칫 사장 될 수 있는 소중한 구조설계 관련 기술 자료의 보관 및 축적을 시도하려 합니다. 본 연재 특집이 자료로서의 가치를 지닐 수 있도록 회원 여러분의 지속적 관심과 관련 기사 게재를 부탁드립니다.

1. 머리말

본 교량(묘도~광양간 현수교)은 여수산업단지와 광양 산업단지를 연결하는 여수국가산업단지 진입도로 기본설계로 총 8.5km에 8800억원이 투입되는 이 사업의 제 3공구에 시공되는 교량으로서, 교량 완공시 이미 포화상태에 이

른 국도 17호선을 대체해 양 산업단지간 거리를 60km에서 10km내로 단축시키고 소요시간 또한 80분에서 10분내로 줄어들게 될 것으로 기대된다. 특히, 산업물동량의 원활한 처리를 통한 물류비용 절감과 화물차에 의한 대형 교통사고 예방은 물론 양 지역간의 인적·물적 교류를 촉진시켜 지역민의 소득향상에도 큰 기여를 할 것으로 전망된다.

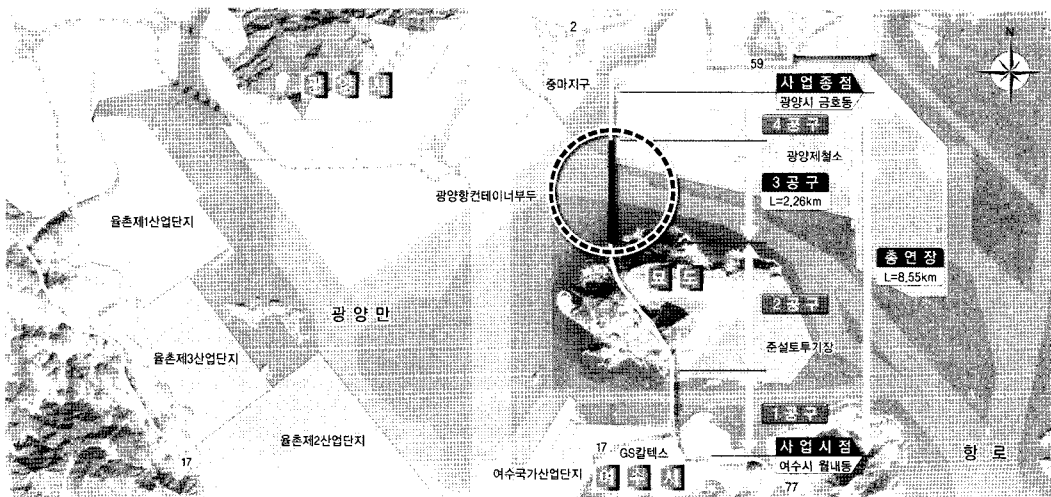


그림 1 위치도

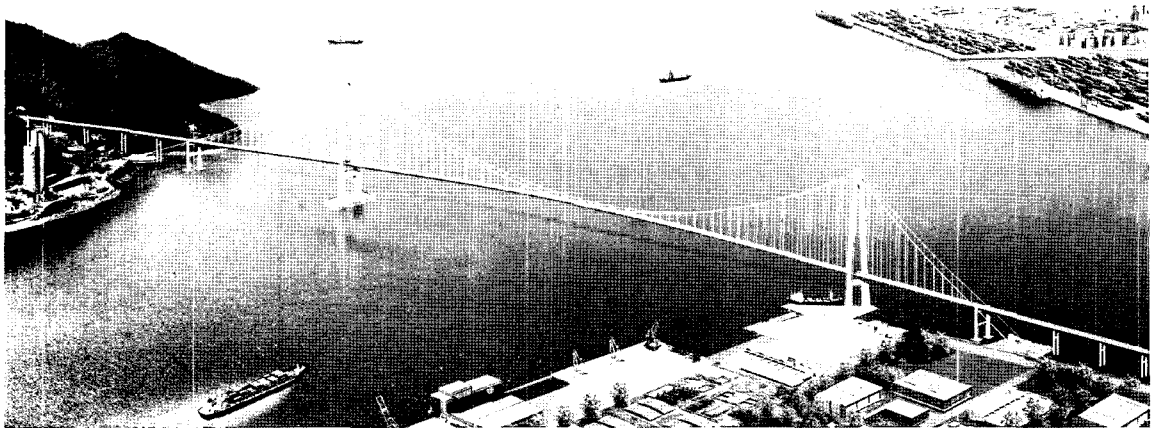


그림 2 조감도

아울러, 2012여수세계박람회 및 광양만권 광역도시 건설을 위한 순환 교통망 역할도 담당하게 돼 지역경제와 광양 컨테이너 활성화, 광양만권 경제자유구역의 투자촉진을 위한 기반조성에도 큰 몫을 하게 될 것으로 보인다.

이와 함께, 광양 컨테이너부두 앞을 횡단하는 본 교량(남빛대교, 모도~광양간 교량)의 경우에는 선박 통행에 지장이 없도록 시뮬레이션 등을 거쳐 주경간장을 국내 최장 규모의 현수교로 계획하였고, 세계적으로도 일본의 '아카시대교(Akashi Kaikyō)', 덴마크의 '그레이트 벨트교(Great Belt East)'에 이어 세계 4위 규모이며, 타정식 현수교에서는 세계적으로 적용 사례가 전무한 3차원 케이블 시스템 도입으로 차세대 현수교의 새로운 패러다임을 제공할 수 있을 것으로 기대되며, 광양만권의 랜드마크 역할을 담당하게 될 뿐만 아니라 우리나라의 새로운 명물로 자리잡게 될 것으로 보인다.

본고에서 기본설계 단계에서 적용한 주요부재의 설계내용과 특히 타정식 현수교에서 세계최초로 적용하게 되는 3차원 케이블 시스템의 설계 및 시공방안에 대해 소개하고자 한다.

2. 교량계획

2.1 경간계획

교량계획시 기본방향은 장래 광양항 개발계획을 감안한 주항로부 공간을 확보할 수 있도록 하여 통항 선박의 안전성 확보에 주안점을 두고 주변여건과 입찰안에서 요구사항을 만족할 수 있도록 공학적 판단에 근거하여 기본설계 경간계획을 수행하였다.

기본계획시 적용된 종평면도를 나타내는 그림 3에서와 같이 주경간 1100m의 현수교와 시종점에 각각 310m와 190m의 접속교로 구성된 기본계획의 경우 주탑과 충돌방지공 사이의 항로폭 950m는 선박 교행 운행시 안전성 확보가 미흡하며, 특히 컨테이너 부두로 입항하는 선박과 항로부에 위치한 종점부 주탑기초와의 간섭이 발생하므로, 운항 선박의 안전성 확보를 위해 주탑의 위치를 종점(광양)측으로 이격해야 하는 것으로 분석되었다. 따라서 기본설계시 주경간장은 최소 1,300m 이상을 적용토록 계획하였다.

기본설계 최종안으로 480+1,450+330=2,260m의 경간계

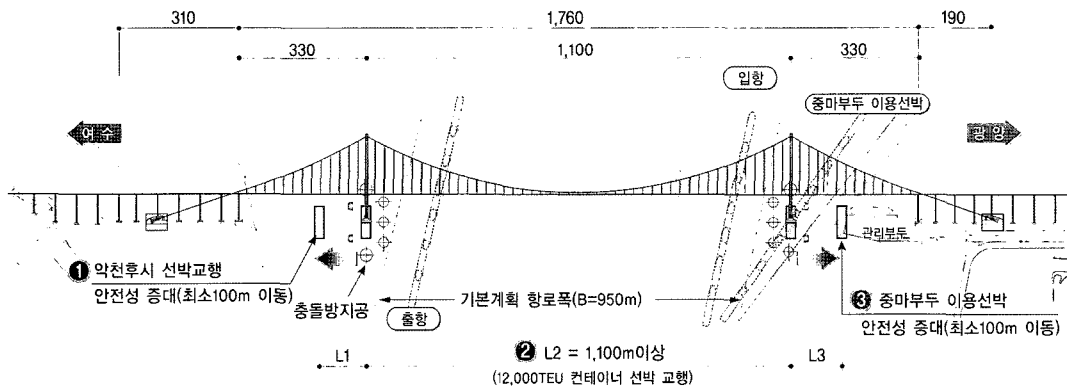


그림 3 기본계획 경간장 검토

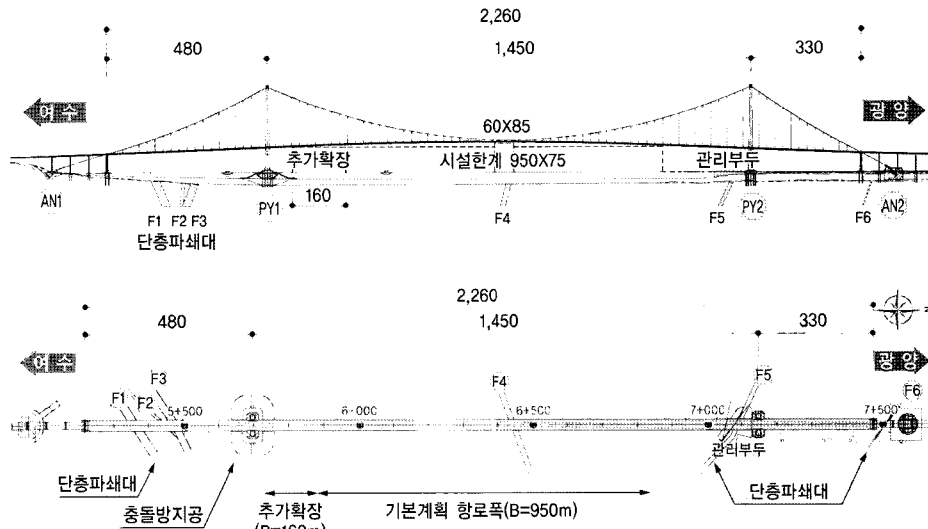


그림 4 기본설계 증평면도

획을 적용함으로써 장래 출현 가능한 초대형 선박 (12,000TEU)의 운항 여건 확보와 선박 교행시에도 충분한 안전성을 확보하였다. 또한 여수측 앵커리지의 육상화 시공과 과업구간 전체를 접속교 없이 현수교 만의 단일 공종으로 계획함으로써 시공 효율성은 물론 경제성도 만족할 수 있었으며, 지반조사 결과 조사된 단층파쇄대 위치에 기초 위치를 배제하여 구조적으로도 충분한 안전성을 확보할 수 있었다(그림 4).

2.2 경계조건

2.2.1 부양지지시스템(Floating System)

현수교의 경계조건은 설계가 편리하고 신축이음장치의 규모가 감소하는 등 고전적 해석이론에 근거하여 진행된 많은 현수교에서 3경간 힌지 시스템을 적용하였다. 이 경우 주로 교량받침과 링크시스템을 사용하게 되나, 많은 현수교에서 교량받침 혹은 링크 장치에 대한 설치비와 유지관리 비용이 전체 공사비 및 유지관리 비용의 상당 부분을 차지하고 있어, Device 설치를 최소화 하여 공사비 및 유지관리 비용의 절감효과를 기대할 수 있는 부양지지시스템(Floating System)이 최근의 현수교 계획시 권장되고 있다.

Floating System은 주탑부 가로보 및 연직 교량받침을

표 1 Floating System 적용 현수교 사례

교량	위 치	완공년도	경 간 구 성
High Coast(Hogakusten)	스웨덴	1997	295+1,210+295 = 1,800m
Great Belt	덴마크	1998	535+1,624+535 = 2,694m

생략하고 주탑부 행어 및 케이블로 연직하중을 지지하므로 경제성 및 구조적 성능 개선이 가능하며, 표 1에서와 같이 1997년 완공된 High Coast교(스웨덴) 및 1998년 완공된 Great Belt교(덴마크)에 기 적용된 바 있다.

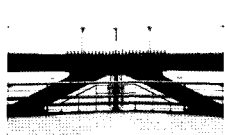



고전적 힌지 시스템에 비해 Floating System을 적용한 교량의 구조적 특징은 연속거더 형식으로 거동하여 연직 방향 및 횡방향 강성이 증가하므로써 각각의 변위량이 감소되어 사용성 측면에서 유리하며, 내용안정성의 지표인 비틀림 강성도 단순보 형태의 힌지시스템 적용에 비해 유리하게 나타난다. 단 주탑부 위치에서 횡방향(면외방향) 모멘트 및 연직방향(면내방향) 모멘트가 크게 발생하게 되므로 주탑부 위치의 보강형 단면에 대한 보강과 종방향 변위에 대한 적절한 제어가 필요한 것으로 판단된다.

2.2.2 경계조건 선정에 대한 Parametric studies

본 교량의 경우 단부(부탑) 위치에만 교량받침을 설치한 Floating System을 적용하였으며 상시 및 지진시 종방향 거동에 대한 경계조건을 표 2에서와 같이 크게 4가지로 구분하여 각각의 구조특징을 분석하여 최적의 경계조건을 적용하였다.

표 2에 나타난 해석결과와 같이 중앙경간부 구속조건으로 Rigid Frame을 적용한 CASE 1안과 Stay Cable 구조를 적용한 CASE 2안의 해석결과를 비교한 결과, 종방향 변위량 및 중앙부 연결구조에 발생하는 부재력에 큰 차이를 나타내고 있지 않으므로 2가지 CASE에 대한 구조적 비교우위를 평가하는 것은 큰 의미를 갖지 않는 것으로 판단되었다. 따라서 중앙경간부 연결구조에 대한 선정은 전

표 2 경계조건별 해석결과

구분		CASE 1 Rigid Frame 구조	CASE 2 Stay Cable구조	CASE 3 2안+End Stay	CASE 4 2안 + Buffer
개요도					
발생변위 (m)	활하중(L)+온도(T)	±1.564	±1.563	±0.893	+1.125
	지진하중(EQ)	±0.438	±0.455	±0.411	±0.455
Stay단면 력 (tonf)	상시	347.5 / -371.7	238.5	669.0	621.0
	지진시	1332.4 / 509.3	1106.3 / 396.1	1047.6 / 383.1	1269.3
받침반력	연직반력*1	D+L+T	178.5 / -554.2	389.7 / -617.6	-
	지진시	129.19	128.04	187.15	-

주)1 받침 연직반력의(+)는 부반력을, (-)는 정반력을 의미함.

체구조계의 구조거동의 효율성 보다는 각각의 적용안에 따른 경관성 및 연결부 상세에 대한 검토를 통해 결정해야 할 것으로 판단하여, 행어 케이블 시스템과 일관된 미관을 확보할 수 있으며 보강형과의 연결부에 힌지조건이 적용되어 Frame 구조에 비해 축력 성분만이 보강형에 전달되는 Stay Cable 구조를 적용하였다.

CASE 3안 End Stay 적용의 경우 교축방향 변위를 제어할 수 있는 가장 효율적인 경계조건으로 판단되었으나, 단부 받침에 활하중에 의한 부반력이 증가되고 중앙부 Center Stay에 적용한 것과 같이 10m이상의 밴드를 단부 행어 위치에 적용해야 하며 연속형 박스거더 형식을 적용한 현수교에 End Stay를 적용한 실적이 없으므로 본 과업 경계조건에서 제외하였다.

기본설계에 적용한 최종 경계조건은(Case 4안) 경간중앙부 Center Stay와 주탑부에 점성댐퍼와 Proper 기능을 동시에 수행하는 Buffer를 설치하는 안으로 결정하였다. Buffer는 활하중, 풍하중 등 급속하중(Faster load)에 의해 유발되는

교축방향 진동특성을 댐퍼의 감쇠효과에 의해 제어하고 일정 거리 이상 교축방향 이동량 발생시 Buffer내부에 설치된 Proper 시스템으로 이동량을 강제 제어하는 시스템으로 교량의 사용성과 교축방향 절대 이동량에 의해 내구수명이 크게 영향을 받는 신축이음장치 및 교량받침 등의 내구성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 이에 대한 검증을 위해 차량이동 하중에 대한 시간이력 해석을 수행하였으며, 보강거더 단부에서의 변위 및 속도 변동량을 그림 5에 나타내었다. 해석결과에서 보듯이 이동하중에 의한 절대 변위량 감소가 80%이상 조사되고 있어 Buffer 설치에 의해 구조물의 변위량 및 속도가 크게 감소됨을 확인하였다.

3. 주요 부재의 설계

3.1 보강거더

보강거더는 유선형 강박스거더를 적용하였으며 장래 확

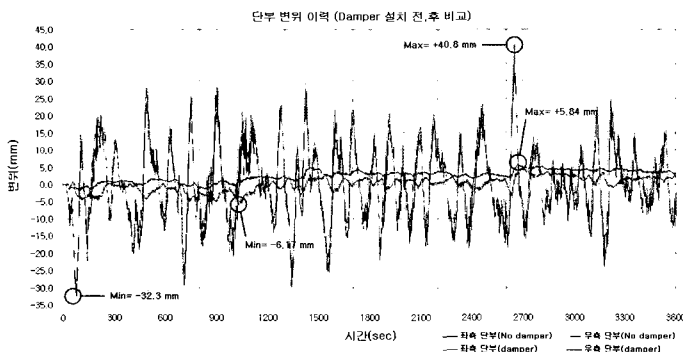


그림 5 차량 이동하중에 의한 시간이력해석결과

구분	Buffer		비고	
	설치전	설치후		
변위 (mm)	여수방향	40.8	5.84	85.7% 감소
	묘도방향	32.3	6.17	80.9% 감소
속도 (m/sec)	여수방향	8.34	2.24	73.1% 감소
	묘도방향	8.29	2.51	69.7% 감소

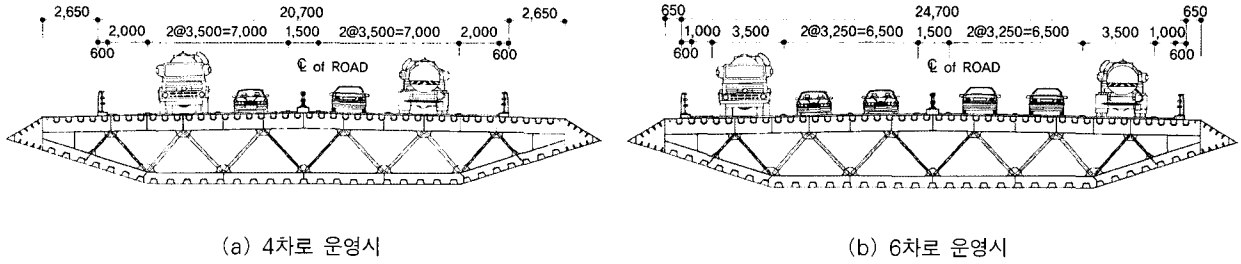


그림 6 유선형 1-cell 강박스거더

장을 고려하여 기본계획시 20.7m 폭원을 26m로 적용하였다. 다이어그램은 다이어그램에 의한 비틀림강도가 전체 구조강성에 미치는 영향이 적음을 고려하여 중복형식 적용에 비해 경제적인 강관 트러스 형식을 적용하여 4.0m 간격으로 배치하였다.

단면 결정시 주경간장이 1450m인 국내 최대 현수교임을 감안하여 내풍안정성이 우수한 단면을 선정하기 위해 2차원 보강거더 예비실험과 본실험을 수행하고 전산유체 해석을 통해 검증하였다.

3.2 케이블

초장대 현수교 계획에 맞추어 케이블 재료의 복합재료화 및 고강도에 대한 연구가 세계적으로 진행중에 있으며, 국내에서도 산업자원부 주도하에 고강도 교량용 케이블 와이어가 개발 중에 있으며, 현수교용 케이블의 경우 1860MPa급 개발

이 완료된 상태이다.

현재 Messina교량에서 고강도 케이블 적용을 계획중에 있으나 공사시기에 대해서는 불투명한 상태이다. 본 교량에 고강도 케이블을 적용할 경우 세계 최초로 인장강도 1,860MPa의 고강도 케이블을 현수교에 적용하는 사례가 된다. 고강도 케이블 적용시 1,770MPa급 케이블 적용에 비해 약 5%이상의 자중 감소효과가 있으며 주케이블 자체의 단면 감소는 물론 앵커리지 및 주탑의 규모를 감소시키는 효과도 기대된다.

주케이블은 5.07mm 고강도 와이어 460개를 1개소의 스트랜드로 구성하여 37스트랜드를 주경간부에 적용하였으며, 여수측 측경간에 224개의 와이어로 구성된 2개소 스트랜드를 추가 적용하고, 광양측 측경간측에 272개의 와이어로 구성된 6개소 스트랜드를 extra 케이블로 적용하여 최대 발생장력 대비 허용장력의 비가 전구간에서 약 94% 수준을 만족하도록 경제적이고 효율적인 단면을 구성하였다.

표 3 케이블 구성

구 분	주경간(1,450m)	측경간(Extra 케이블 적용)		케이블 단면도
		여수측 (480m 구간)	광양측 (330m 구간)	
단면구성 (소선수)	460 wires × 37 strands (17,020 wires)	460 wires × 37 strands + 224 wires × 2 strands (17,468 wires)	460 wires × 37 strands + 272 wires × 6 strands (18,652 wires)	
직 경	740mm	749mm	774mm	

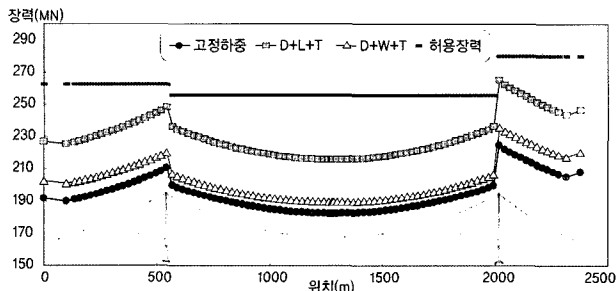


그림 7 주케이블 설계장력 및 허용장력

구 분	주경간	측경간	
		여수측	광양측
발생장력	CASE 1	236.5	265.3
	CASE 2	207.0	236.0
허용장력		255.6	280.2
발생장력/허용장력		92.5%	94.7%

주) 단위는 MN, CASE 1 = D+L+T, CASE 2 = D+W+T

주케이블의 가설은 국내 시공장비 및 시공경험이 풍부한 A/S공법과 소선을 저장력으로 인출하여 케트워크상에서 스트랜드를 형성하여 시공함으로써 내풍안정성 측면에서 유리하고 새그조작업이 용이하여 공기 단축이 가능한 Controlled Tension공법을 적용하였다.

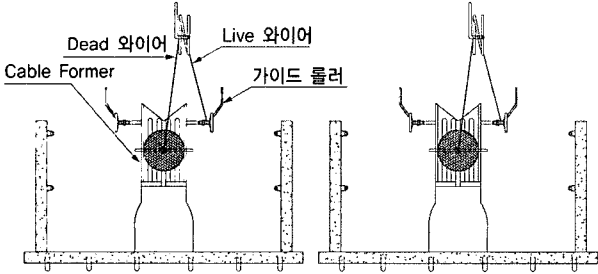


그림 8 Controlled Tension공법

3.3 주탑 및 주탑기초

주탑은 주케이블의 연진 반력을 지지하고 기초로 하중을 전달하는 휨-압축부재로서 압축강도 40MPa의 철근콘크리트 주탑으로 계획하였다. 높이는 약 260m에 이르며 3차원 케이블 배치와 연계하여 주탑의 형상을 A형 형태로 계획하였고, 주탑 단면은 경관적 이미지 향상과 정적 풍하중 감소가 기대되는 원형형태의 단면 형상을 외측부에 적용하고 오각형 형태의 기본단면으로 구성하였다. 본 교량의 지배하중은 횡방향 풍하중으로서 H형 주탑 적용에

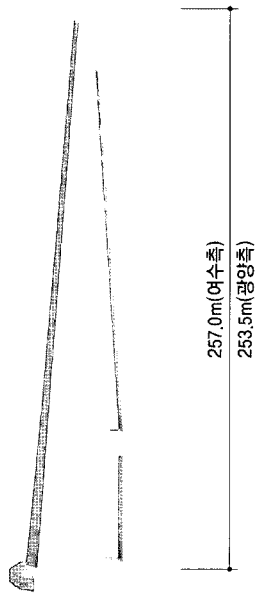


그림 9 A형 주탑

비해 A형 주탑의 경우 구조적 효율성이 우수하므로 동일 하중 조건에서 상대적으로 단면감소가 가능하며, 가로보 설치 위치 및 개소도 H형 주탑에 비해 적게 배치하여도 동일한 강성효과를 나타낸다. 본 교량의 주탑 가로보의 경우 보강거더 하면에 1개소만을 설치하여 통과차량의 개방감을 확보할 수 있었다.

주탑기초로 가설지역 여건과 지층 지지조건을 분석하여 직경 3.0m의 돌출형 현장타설말뚝기초를 적용하였다.

3.4 내풍설계

교량의 구조적인 특성이 동적 응답에 미치는 영향을 나타내는 그림 10을 보면, 감쇠가 증가함에 따라 응답은 줄어들고 한계풍속은 증가한다. 그리고 강성이 증가하면 마찬가지로 한계풍속이 증가하게 된다. 즉 구조물의 감쇠와 강성을 조절하여 내풍안정성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

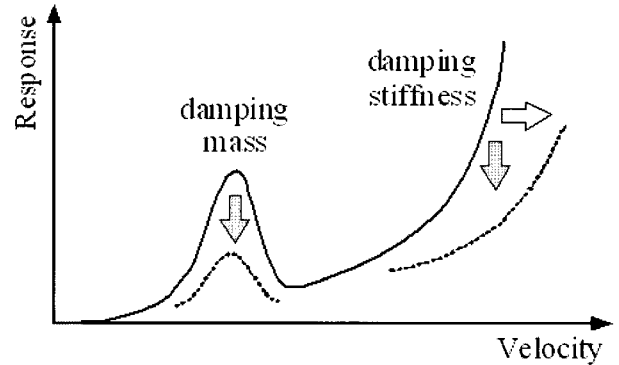


그림 10 구조특성이 동적응답에 미치는 영향

일반적으로 교량의 한계풍속은 다음식 (1)과 같이 표현되는 비례관계를 가지고 있다.

$$U_{cr} = \frac{f_t \cdot B}{K_{cr}} \quad (1)$$

위 식에서 f_t 는 비틀림 고유진동수이고, B 는 단면 폭이며, K_{cr} 는 무차원 진동수로 비틀림 고유진동수를 향상시키는 케이블 시스템을 적용하면 한계풍속도 비례하여 증가함을 알 수 있다. 동일한 강성의 거더와 케이블 단면적을 지닌 현수교에 대하여, 주탑의 형상과 케이블의 배치 방법을 바꿈에 따라 한계풍속이 증가하게 되고 특히 본교량에서와 같이 3차원 케이블 시스템을 적용한 경우 일반적인 2차원 케이블 시스템 적용에 비해 57%까지 증가한다는 연구결과를 그림 11에 나타내었다.

본 교량은 세계 최초로 3차원 케이블 시스템을 적용한 현수교인 만큼 바람에 대한 충분한 안전성을 검증하기 위해 풍동실험을 수행하였다. 특히 2차원 케이블 시스템과 3차원케이블 시스템 적용시 영각에서의 플러터 발현풍속을 비교하여 그림 12에 나타내었다. 그림에서 보듯이 3차원 케이블 시스템 적용시 내풍성능이 10%이상 향상됨을 알 수 있었으며, 한계풍속($V_{cr}=74m/sec$, 안전율 1.2)을 상회하여 약 85m/sec이상에서 플러터가 발생하므로 설계풍속

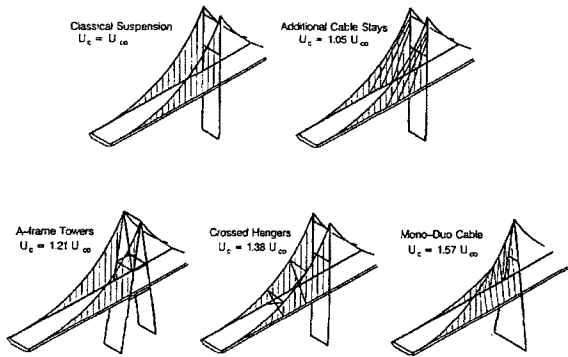
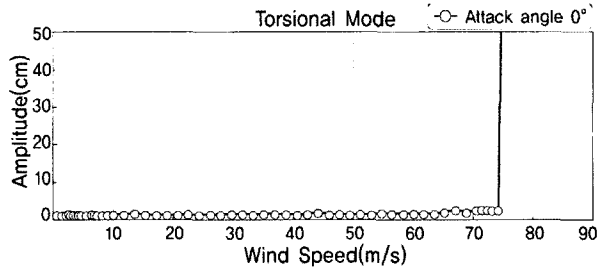
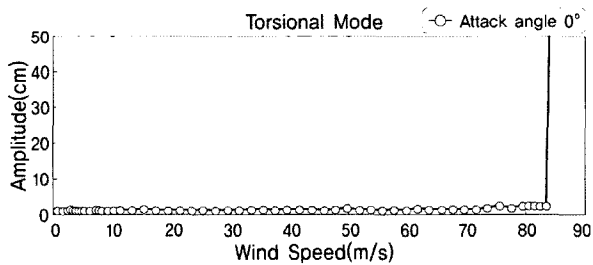


그림 11 주탑 및 케이블 시스템이 구조물 동적응답에 미치는 영향
(Osterfeld, K.H. and Larsen A., "Bridge engineering and aerodynamics", Proceedings of the 1st International Symposium on Aerodynamics of Large Bridges, Copenhagen, 1992.)



(a) 2차원 케이블 시스템



(b) 3차원 케이블 시스템

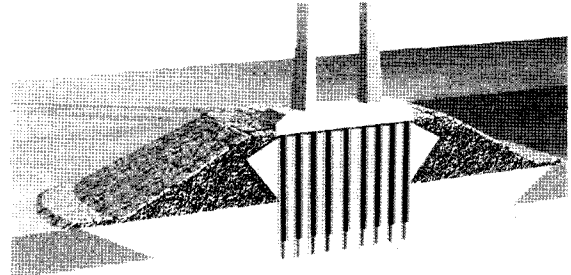
그림 12 등류상태, 비틀림거동

내에서 충분한 내풍안정성을 확보하고 있음을 검증하였다.

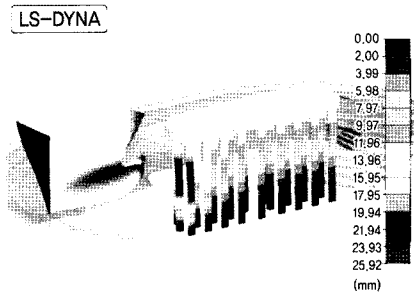
3.5 충돌방지공

본 교량은 광양향 입·출입 항로를 횡단토록 계획되어 산 박운항의 안정성과 교량의 안전성을 확보할 수 있도록 계획하였다. 선박충돌에 대한 설계는 AASSTO LRFD 규정에 따라 수행하였으며, 설계선박으로 140,000DWT급을 적용하고 중요교량으로 분류하여 위험도분석 결과로부터 연간파괴빈도가 목표치(0.0001)를 확보할 수 있도록 여수측 주탑에 섬식충돌방지공을 설치하였다. 섬식충돌방지공은 충돌시 내부채움재에 의해 충돌에너지 소산이 확실하

여 선박파손이 적고 복구가 매우 용이한 장점이 있다. 충방공 본체에 대해서는 3차원 FEM해석을 수행하여 주탑 말뚝기초 설계에 해석결과를 반영하여 구조적 안전성을 확보하였다.



(A) 섬식충돌방공 형상



(b) FEM 해석

그림 13 섬식충돌방지공

4. 3차원 케이블 가설 계획

3차원 케이블이라 함은 주케이블이 일반적인 현수교에서와 같이 연직방향으로 포물선을 이룰 뿐만 아니라 평면상에서도 포물선 형상을 나타내는 것을 의미하며, 자정식 현수교인 영종대교에서 기 적용된 바 있다.

본 교량의 주케이블은 초기평형상태에서 연직방향 세그 160m이고, 평면상 형상은 주탑부 위치에서 케이블 중심간격 8.0m, 중앙경간부 중앙부에서 케이블 중심간격 26.0m로 확장되는 형상으로 타정식 현수교로서는 세계 최초로 3차원 케이블 배치를 계획하였다.

케이블 가설은 A/S공법을 적용하였으며 케이블 가설 초기에 평면상 8.0m 간격으로 평행하게 가설을 완료한 후 Lifting Beam에 설치된 유압잭과 확장용 임시 브레이스를 이용하여 중앙부 위치 케이블을 8.0m에서 26.0m까지 확장하고 확장지용 트러스를 케이블 사이에 설치한다. 이후 보강거더를 순차적으로 가설하게 되며, 보강거더의 가설이 진행됨에 따라 케이블의 3차원 형상도 점차 최종 형상을 갖추게 된다. 3차원 케이블 가설순서를 그림 14 및

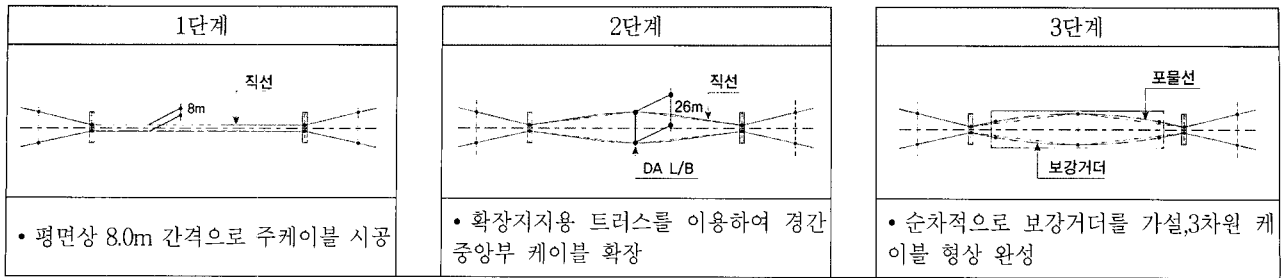


그림 14 3차원 케이블 가설 개요도

15에 나타내었다.

가설단계 해석을 통해 3차원 케이블 수렴정도를 검토한 결과, 그림 16(b),(c)에서와 같이 연직방향으로는 가설 진행에 따라 초기평형상태의 최종 위치까지 크게 이동되나 횡방향으로는 1~2개소의 보강거더만 가설되어도 최종 위치

에 거의 근접할 정도로 케이블의 수렴속도가 매우 빠른 것을 알 수 있다. 그림 16(d)에 확장지지용 트러스에 작용하는 압축력을 나타내었으며 최초 약 1300kN에서 보강거더 가설이 진행되면서 점차 줄어드는 경향을 나타내고 있어, 3차원 케이블 형상이 빠르고 안전하게 수렴해감을 확인하였다.

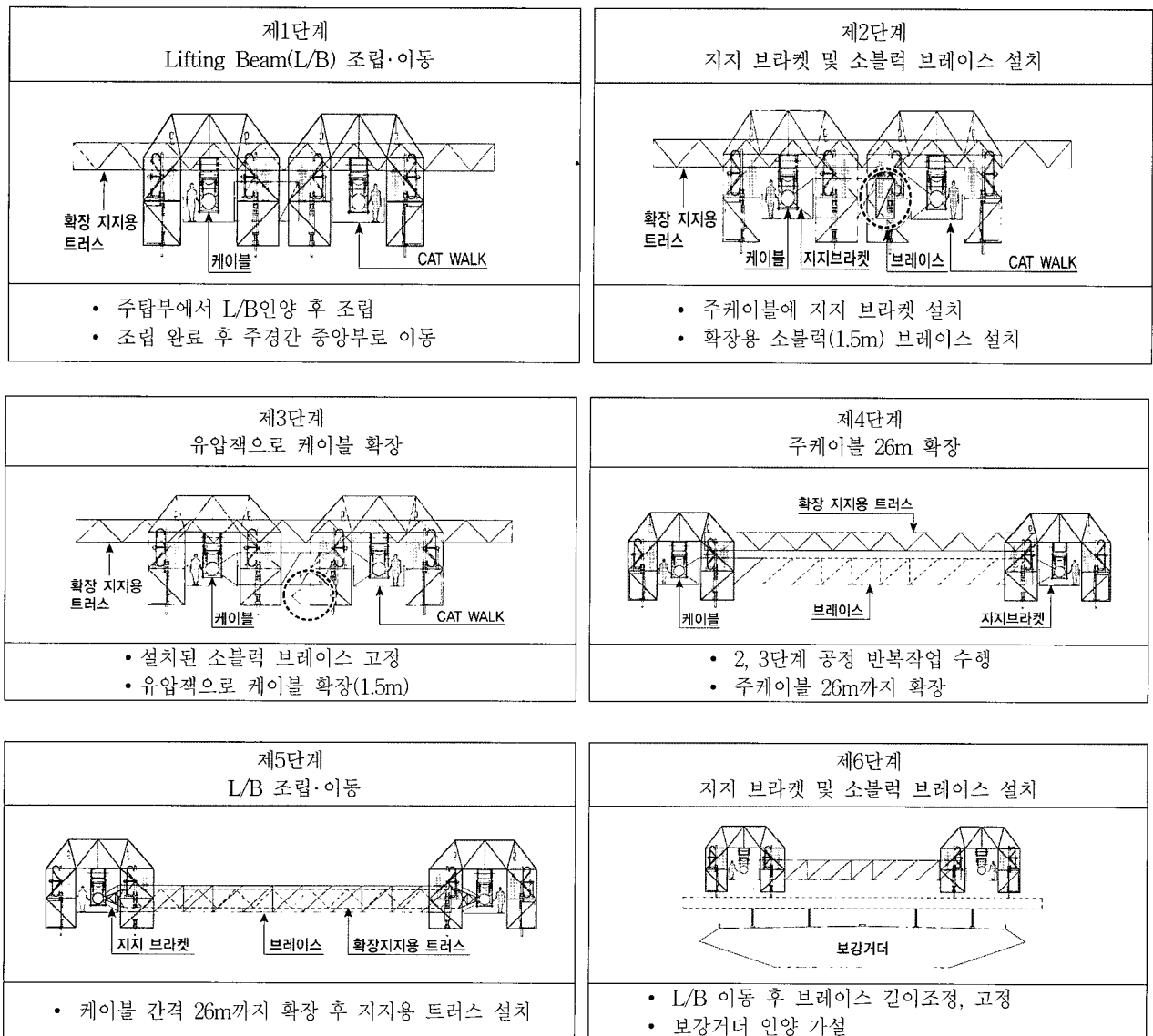


그림 15 케이블 확장 개요도

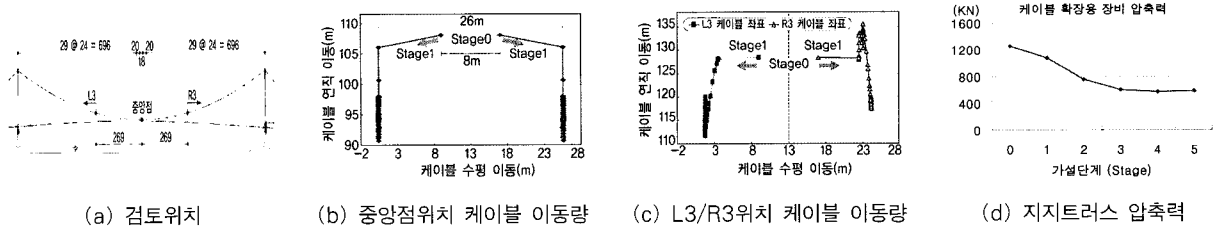


그림 16 가설단계해석

5. 맺음말

주경간장 3km이상의 Messina 해협대교 및 Gibralta 해협 횡단 교량계획 등 세계적으로 초장대 교량의 시대적 개막을 앞두고 있으며, 초장대교량에서 극복해야 할 가장 중요한 요소중의 하나는 내풍안정성의 확보라 할 수 있다. 이에 대한 방안으로 신재료 개발·재료의 합성 및 구조형식의 개선 등을 통한 내풍성능 향상 방안 등이 제시되고 있다. 이 중 본교량에 적용토록 계획한 3차원 케이블 시스템(Mono Duo)이 초장대 교량의 대표적인 Prototype(원

형)으로 제시되고 있다.

우리나라에서도 서해대교, 영종대교, 광안대교가 성공적으로 건설됨에 따라 본격적인 장대교량의 시대를 맞이하게 되었고, 본 남빛대교는 주경간장 규모면에서 국내 최장, 세계 4위의 장대교량으로서 세계 최초의 타정식 3차원 케이블 시스템을 도입한 교량으로 앞으로 우리나라의 장대교량 선진국으로의 도약을 위한 발판은 물론 새로운 장대교량의 패러다임을 제시하게 될 것으로 기대되며, 장래 연육교 및 연도교 계획 및 설계에 많은 도움이 되길 바라는 바이다. 