

세풍대교의 대안설계*

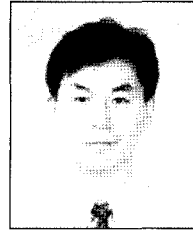
Alternative Design of Sepung Bridge



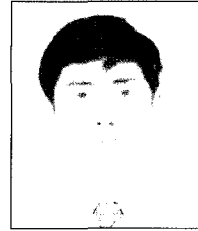
홍 현 석*



백 종 균**



홍 규 선***



조 정 빈****

* (주)청석엔지니어링 이사 기술사 공학박사
** 대림산업(주) 부장 기술사 공학박사
*** (주)청석엔지니어링 전무 기술사 공학박사
**** (주)청석엔지니어링 상무 기술사

* 본 내용은 입찰설계사의 설계도서를 근거로 하였으며, 보완 설계시 일부 내용이 변경 될 수 있습니다.

1. 서 론

세풍대교는 전라남도 광양시 광양읍 세풍리에서 광양시 황금동을 연결하는 세풍~중군 건설공사 구간 중 광양서천을 횡단하는 총연장 875m, 곡선반경 2000m의 왕복 4차선의 교량으로서 2005년 12월 익산지방국토관리청에서 대안설계로 발주되어 2006년 4월, 3주탑 콘크리트 사장교안으로 최종 결정되었다.

다주탑 사장교는 이전에는 그 예가 많지 않았으나 근래

들어 홍콩의 Ting-Kau Bridge, 그리스의 Rion-Antrion Bridge, 프랑스의 Millau Viaduct 등의 교량들이 연이어 시공되어 세간의 관심을 집중시키고 있다. 국내에서도 몇몇 대안 및 턴키 설계에서 다주탑 사장교안이 제안된 사례가 있었으나 아쉽게도 채택되지 못하였다. 이제 세풍대교의 설계 및 시공으로 말미암아 현재 시공중인 거가대교의 3주탑 사장교와 더불어 독창성이 우수한 다주탑 사장교를 국내에서도 보유히게 되었다. 더군다나 곡선반경 200m의 곡선 사장교로서의 희귀성으로 말미암아 그 가치가 더욱 커지리라 판단된다.

본 기사에서는 3주탑 사장교인 세풍대교의 계획 및 설계 단계에서 검토하고 결정되었던 몇몇 사항에 대해 소개하고자 한다.

2. 교량개요

세풍대교는 220m의 주경장을 갖는 연장 725m의 3주탑 콘크리트 사장교(주경간교)와 50m의 경간의 PSC 박스거더교(접속교)로 이루어져 있다(그림 2). 교량 시점부는 도로 계획상 확폭구간이 발생하여 접속교로 계획하여 주경간교와 분리하였으며 선형조건은 세풍대교 전구간이 R=2,000m의 평면선형을 갖고 있어 2%의 단일 편구배(횡단)조건이었고 대안설계시 종단선형은 종점측으로 1.63%의 상향하는

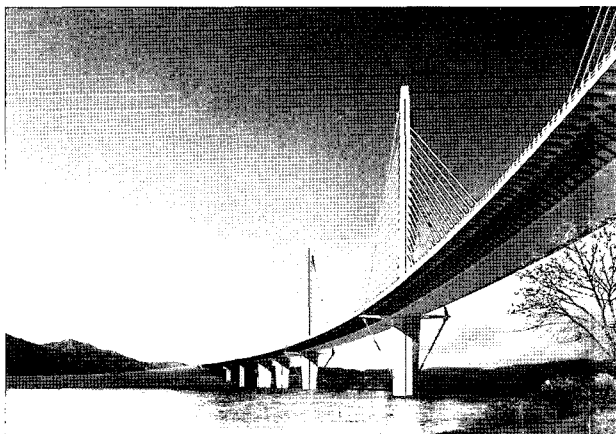


그림 1 세풍대교 조감도

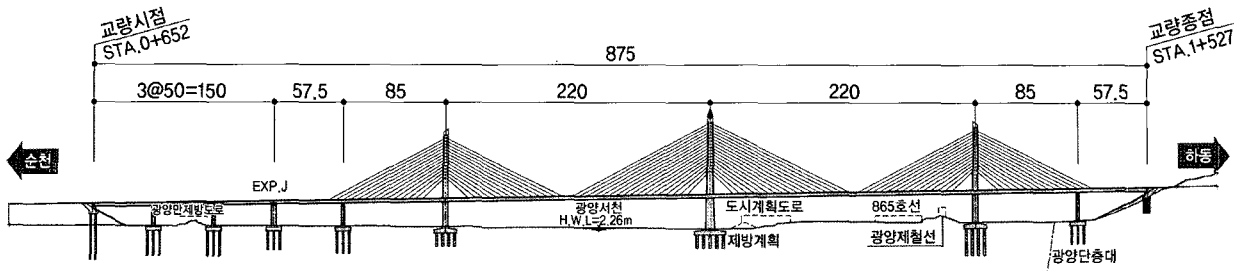


그림 2 세풍대교 종단면도

표 1 세풍대교 주요제원 및 설계조건

교량형식	주교량	사장교 : 57.5+85+220+220+85+57.5=725m 현장타설말뚝 ϕ 2.0m
	접속교	PSC 박스거더교 : 3@50=150m 현장타설말뚝 ϕ 1.5m
폭원	주교량	23.9m
	접속교	23.9~40.07m
선형	중단구배	1.63%
	횡단구배	2.0%(편구배)
	평면선형	R=2000m
설계속도		80km/h
설계활하중		DB24, DL24
풍하중		기본풍속 : V10=40m/sec
지진하중		내진1등급(I=1.4), 지진구역I(Z=0.11)
내구년한		100년

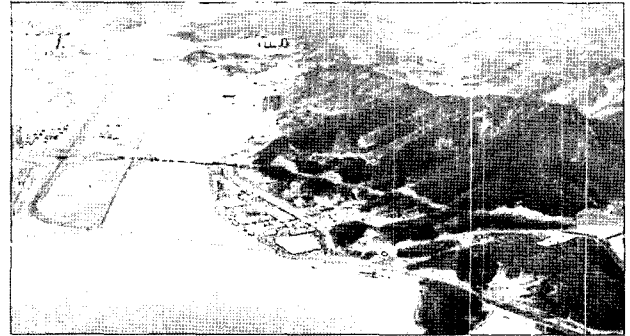


그림 3 세풍대교 가설위치 현황 조감도

기울기로 계획하였다.

주요 설계조건으로는 설계속도 80km/h, 설계활하중 DB24 및 DL24, 풍하중은 기본풍속으로 40m/sec, 지진하중은 내진1등급 및 지진구역 I로서 고려하였고 목표 내구년한 100년 이상을 확보토록 하였다.

3. 교량계획

3.1 가설지역여건

세풍대교는 해수와 담수가 교차하는 광양서천을 횡단하는 교량으로 시점부의 연약지반 및 갯벌층과 중앙부의 해상구간을 통과하게 된다(그림 3). 이 지역은 광양만의 지역개발과 함께 환경 및 천연자원의 보존이라는 두 가지 상반된 논리가 공존하는 지역이었기에 교량계획시 상징성과 차별성을 가져야 했고 또한 가설시와 공용중의 환경성을 염두에 두어야 했다.

해상구간은 홍수시에 수심이 약 3m, 유속이 1.6m/s 정도로 조사되었으므로 가설시 지장물의 저축을 최소로 하는 것이 환경적으로나 안정상 유리하였다. 한편, 갯벌구간은 유속흐름이 거의 없어 가설시 일부 구간에 가설장비를 사용하는데 무리가 없다고 판단하였다. 이 구간은 전 구간

에 가교설치를 계획하여 작업시의 환경성도 함께 고려하여야 했다.

중앙부의 해상구간을 지나면 도시계획도로 및 지방도 865호선과 광양제철선을 횡단하여야 하는 육상구간이 있으며 이 구간의 주 경간장은 최소 130m이상 확보하여야 하였다.

지반 조건을 살펴보면, 전체적으로 약 10m이내의 연약 퇴적층이 지반 상부에 존재해 있었고, 종점부 일부구간에 광양 단층대가 형성되어 있어서 주탑기초와 같은 대규모 기초는 이 구간을 피하여 설치하여야만 했다.

3.2 세풍대교 교량형식 및 경간장 계획

세풍대교의 원설계안은 경간장 130m의 3경간 Extradosed 교(주경간교, 상하행선 일체)와 50m 경간의 PSC박스거더교(접속교, 상하행선 분리)로 설계되었다. 원설계안은 해상구간의 접속교가 50m 경간으로 계획되어 있어 많은 교각들에 의한 개방감 부족과 교각위치가 제방, 계획도로 및 단층대 등과 간섭되는 문제점이 있었다. 또한, 주경간교 위치가 종점측으로 치우쳐 있어 상징성 있는 교량형식으로는 다소 부족함이 있었다.

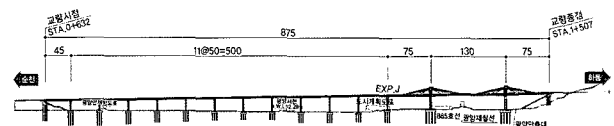


그림 4 세풍대교 원설계안

구분	종단면도	선정	구분	종단면도	선정
대안 1	1주탑 경시 사장교 50+2@60=170, 7@60=420, 190, 55, 40		대안 4	3주탑 사장교 3@50=150, 57.5, 85, 220, 220, 85, 57.5	최종 선정
대안 2	1주탑 사장교 8@60=480, 145, 190, 60		대안 5	복합 아치교 50+65+4@125=615, 210, 50	
대안 3	2주탑 사장교 45+@90=345, 50, 90, 250, 90, 50		대안 6	5주탑 Extradosed교 100, 4@170=680, 100	중점 비교

그림 5 세풍대교 형식선정을 위한 비교검토안

대안설계에서는 세풍대교의 가설조건과 상징성, 주변과의 조화 등을 고려하여 1차적으로 사장교, 아치교, Extradosed 교 등 총 6개의 안을 선정하였으며 이중에서 해상구간의 교각수 축소가 가능하고 상징성 및 교형미가 우수한 4안의 3주탑 콘크리트 사장교안과 6안의 5주탑 Extradosed교안을 2차적으로 선정하였다(그림 5). 마지막으로 2개의 안에 대하여 중점적으로 비교 검토한 후 최종대안을 선정하였다.

3주탑 콘크리트 사장교안은 비록 중간에 신축이음장치가 들어가는 하지만 접속교와 주경간교를 분리하여 시점부 확폭구간의 영향을 주경간교에서 완전히 배제할 수 있었으므로 도로계획 측면에서 자율성이 높았다. 최종적으로 중간주탑의 크기변화로 주목성 및 상징성이 매우 우수하고, 보다 장경간화로서 지역적 랜드마크가 될 수 있는 3주

탑 사장교를 채택하였다.

3.3 세풍대교 보강형 및 주탑계획

세풍대교의 주경간장은 220m로서, 사장교로서는 비교적 규모가 크지 않으므로 경제성을 고려하여 콘크리트 보강형 단면의 사장교로 계획하였다. 220m 경간의 콘크리트 사장교의 경우에는 170m의 Extradosed교와 비교하였을 경우에도 경제성에서 크게 불리하지 않은 것으로 평가되었으며 유지관리 비용 등을 감안하면 오히려 경제성 있는 교량이라 할 수 있겠다.

한편, 콘크리트 사장교의 경우 최적의 구조형식을 위하여 보강형 중량을 최소로 함과 동시에 1면 케이블지지의

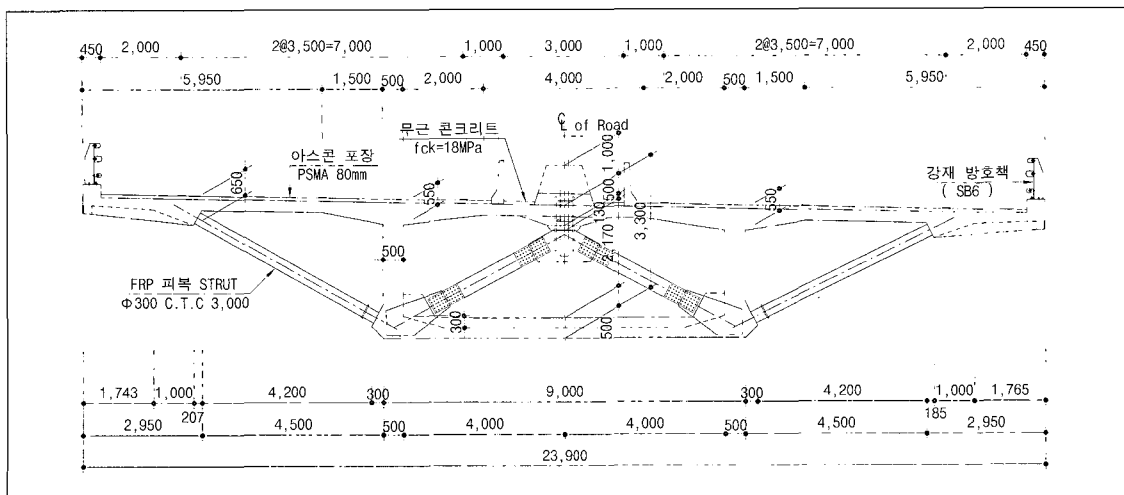


그림 6 세풍대교 보강형 단면

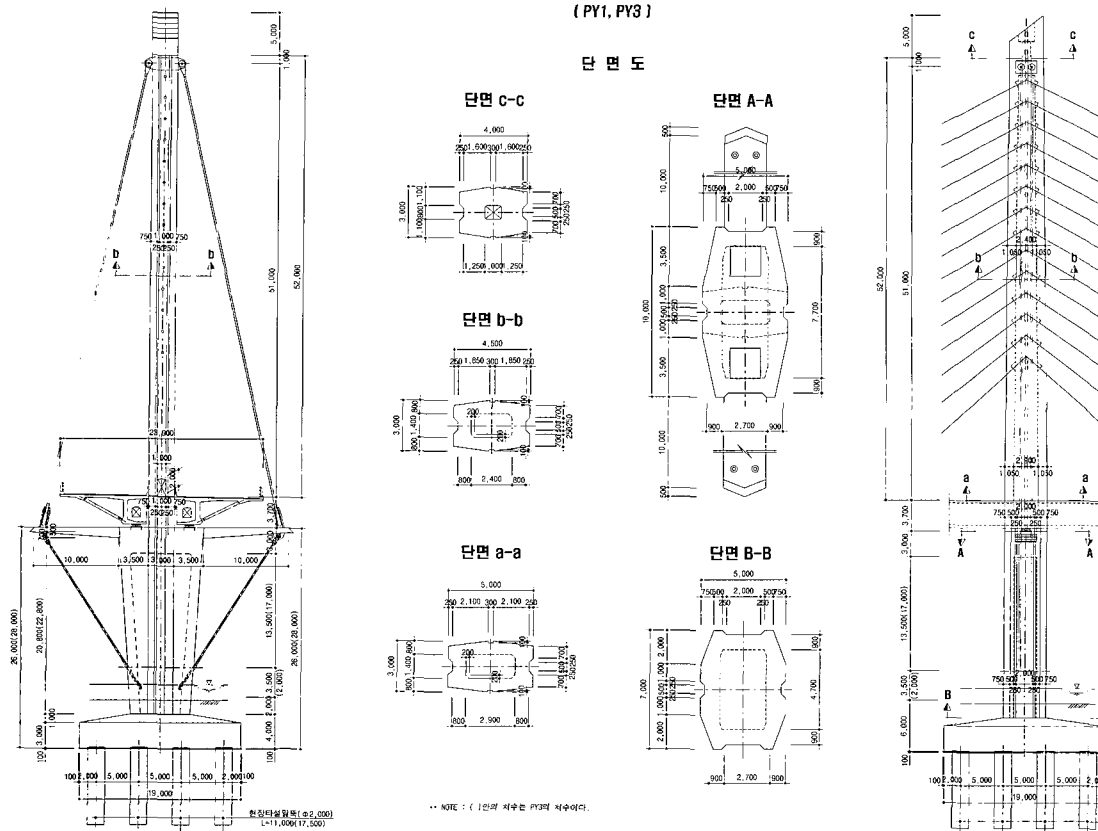


그림 7 주탑(PY1, PY3) 단면도

곡선 사장교에 적용하기 위하여 큰 비틀림 강성확보가 필수적이었다. 이를 위하여 보강형 중량을 최소로 하면서도 비틀림 강성 증진 효과가 있는 스트럿(FRP 피복) 보강의 1-cell 박스거더 형식을 제안하였다(그림 6).

케이블 정착구는 강재 프레임에 의한 내부 스트럿으로 보강하여 중량 최소화를 도모하였고 케이블 장력에 대한 힘의 분배가 명확하도록 계획하였다.

케이블 간격은 FCM에 의한 시공시 세그먼트 분할을 고려하여 6m로 계획하였고, 그에 따라 외부 FRP 피복 스트럿은 3m로, 내부 강재 스트럿은 6m로 계획하였다.

주탑형식 선정에 있어서는, 운전자의 곡선교 주행시 케이블에 의한 폐쇄감 발생 등을 고려하여 개방감 있는 일면 케이블 형식을 적용하였고 하프형 케이블 배치가 가능한 일주형을 선정하였다. 또한 곡선평면상의 사장교 케이블 설치에 따른 주탑의 기울어짐 발생 억제 및 교량 전체의 비틀림 강성 증진을 목적으로 주탑에 횡방향 케이블을 설치하는 안을 채택하였다(그림 7). 주탑의 높이는 3개의 주탑 중 중간 주탑을 높게 하고 양측의 주탑은 약간 낮게 계획함으로써 경관적으로 중앙부에 강조점을 주었을 뿐만 아니라 교축방향의 강성을 증가시키는 효과로 경관성과 안정성을 동시에 도모할 수 있도록 하였다.

3.4 경관설계

세풍대교의 경관적 설계포인트는, 세풍대교의 가설위치가 광양만으로 나아가는 유라시아 물류관문과 세계로의 바다관문 접경지로서의 지리적 잇점을 가진 지역에 위치하고 있다고 보았다.

따라서, 주변 조망권을 분석하여 향후 개발계획에 적합하고 지역적 랜드마크가 가능한 교량형식을 선정함과 동시에 주위공간과의 포괄적인 어울어짐 등을 통하여 주변 지역과 조화되는 교량안이 되도록 하였다.

이를 위하여

첫째, 랜드마크 경관의 창출을 위하여 3주탑 사장교의 중앙주탑을 측면 주탑보다 높게 함으로써 중심 상징성을 극대화하였고 하부 공간의 개방감을 확보하여 교량이 전체적으로 균형미를 갖도록 하였다.

둘째, 내부적으로 주변과 조화로운 교량안이 될 수 있도록 하기 위하여 하프형의 케이블 배치와 주탑 횡방향 케이블 설치로 주탑과 케이블이 안정감을 부여할 수 있도록 하였다. 또한 날렵한 교량단면 계획으로 하부 공간이 경쾌한 느낌과 투과성 있는 개방 경관을 연출할 수 있도록 하였다.

셋째, 상징성 및 시각성을 반영한 디테일 디자인으로 상

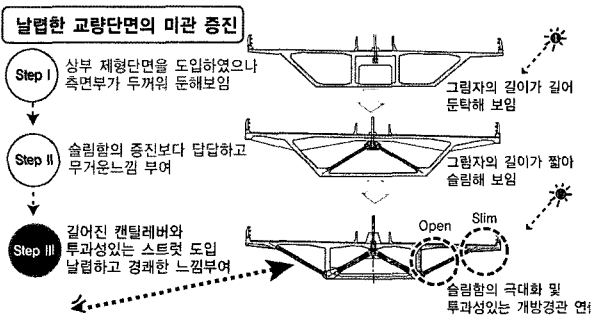
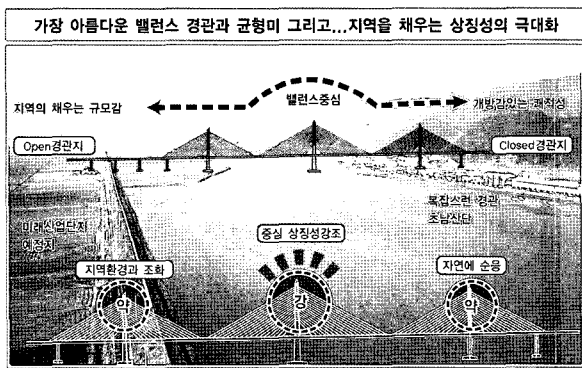


그림 8 경관설계

징적 이미지를 더욱 강조하였으며,

넷째, 교량 액센트 계획으로는 색채도입에 의해 차별성과 경관미를 부각시켰으며, 야간조명 계획으로 광양만의 야경과 조화를 이루는 경관창출이 되도록 하였다.

3.5 세종대학교의 세부 구조계획

세종대학교는 3주탑 사장교이면서 동시에 곡선평면상에 설치되는 곡선교이므로 구조적 안전성을 확보하기 위하여



그림 9 야간 경관조명 계획

여러 가지 방안이 검토되었다. 이는 크게 3주탑 사장교의 교축방향의 강성확보 방안과 곡선교로서의 교축직각방향 강성확보 방안으로 대별할 수 있으며 그 방안들에 대하여 기술하여 보았다.

3.5.1 3주탑 사장교의 교축방향 강성 확보방안

일반적인 2주탑(혹은 1주탑) 사장교의 경우 측경간의 케이블이 백스테이(Back Stay)의 역할을 하면서 주탑의 강성에 기여하여 중앙경간의 처짐을 감소시키는 역할을 하게 된다. 반면에 3주탑 이상의 사장교의 내측주탑은 Back Stay가 존재하지 않기 때문에 외측 주탑에 비해 강성이 작아지게 되며 이로 인해 내측 경간의 처짐이 상대적으로 많이 발생하게 된다. 즉, 3주탑 이상의 다주탑을 갖는 사장교의 경우에는 내측 주탑의 강성을 증가시키거나 보

구 분	대안 1 : 강결+주형분리	대안 2 : 받침구조
개 요 도		
보 강 형	모멘트 -103,700 (단위 : kN·m) +959,500 (단위 : kN·m) RM 2004	모멘트 -103,500 (단위 : kN·m) +110,900 (단위 : kN·m) RM 2004
	처짐 +0.253 (단위 : m) -0.473 (단위 : m) RM 2004	처짐 +0.384 (단위 : m) -0.604 (단위 : m) RM 2004
주탑	처짐 +0.226 (단위 : m) -0.226 (단위 : m) RM 2004	처짐 +0.297 (단위 : m) -0.296 (단위 : m) RM 2004

그림 10 구조 시스템 및 연결구조 검토

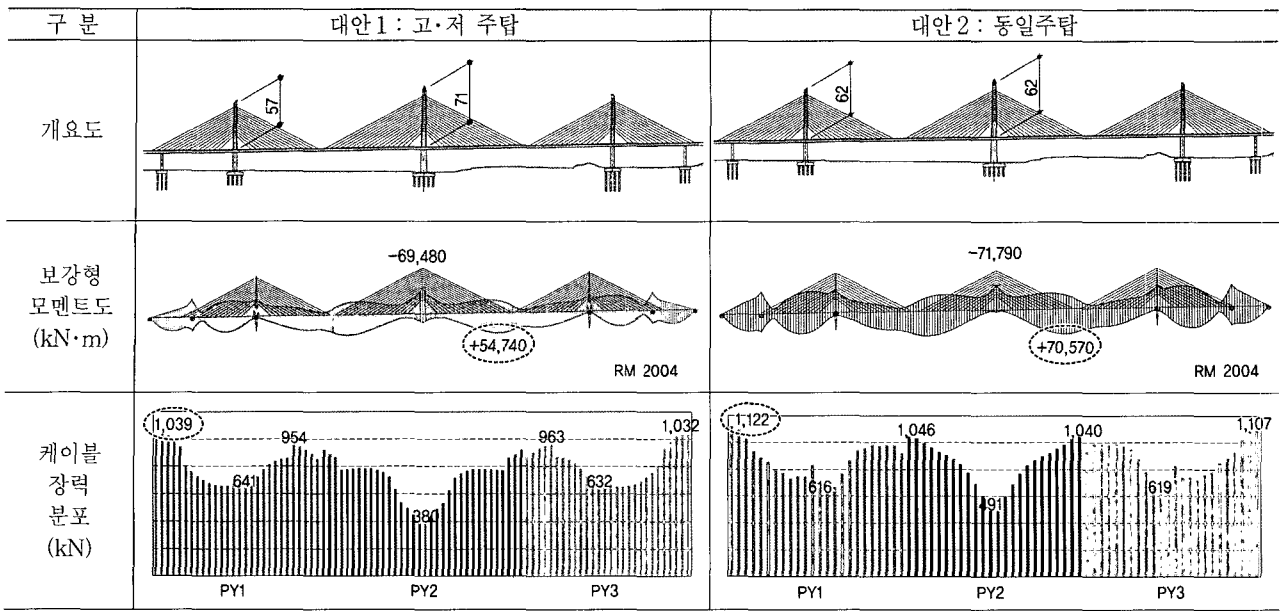


그림 11 주탑 형상 및 배치 검토

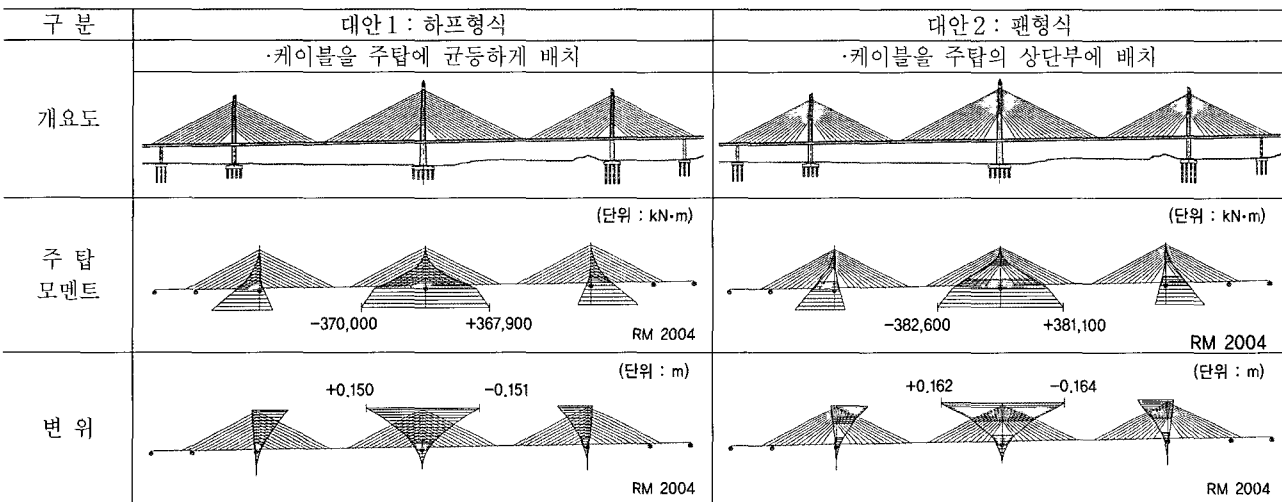


그림 12 케이블 배치 검토

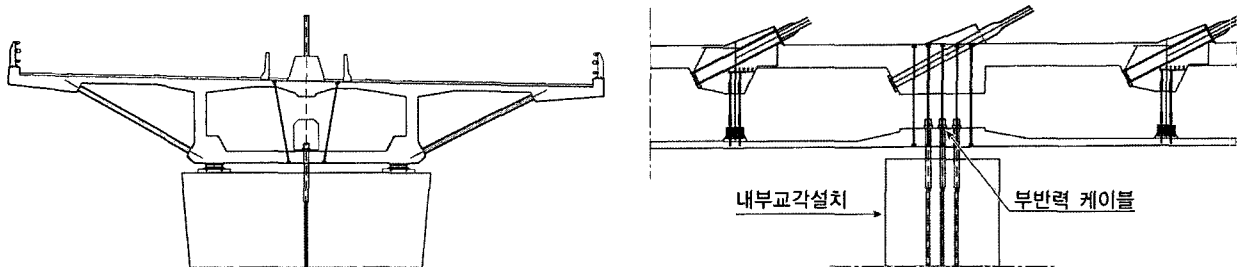


그림 13 내부교각 부반력 케이블 설치

조 케이블을 연결하는 방법을 통하여 내측 경간의 처짐을 감소시키는 방안이 필요하게 된다.

본 설계에서는 이를 위하여 다음과 같은 몇가지 방안을 사용하였다.

① 중앙주탑은 주탑과 보강형 및 교각을 완전 강결화하

고, 양측주탑은 온도응력을 고려하여 주탑과 교각은 강결화하고 보강형은 받침구조로 계획(그림 10)

② 중앙주탑의 높이를 높이고 단면을 크게하여 교축방향 강성 증가 도모(그림 11)

③ 케이블 시스템을 하프형으로 배치하여 팬형식에 비

해 교축방향 처짐 감소(그림 12)

한편, 중간교각의 적정위치를 선정하여 케이블의 장력 균등화 및 처짐 최소화 등 3주탑 사장교의 최적설계를 수행하였다. 또한, 내부교각에는 반반력 방지 케이블을 설치하였고 그에 따라 발생하는 인장력에 저항하기 위해 강봉을 설치하여 보강하였다(그림 13).

3.5.2 곡선교의 교축직각방향 강성 확보방안

곡선 평면상의 주탑에 케이블을 설치하게 되면 사하중시에도 주탑에 교축직각방향의 모멘트와 주탑 상단에 횡변위가 발생하게 된다. 곡률의 크기와 주탑의 강성 및 경간장에 따라 발생량이 다소 영향을 받겠지만 곡선교에서는 크기의 대소에 관계없이 항상 발생하게 된다. 이를 해결하기 위하여 주탑의 높이를 최소화하여 주탑 변위를 일부 허용하는 안과 적극적으로 주탑변위를 억제하는 방안을 중점적으로 검토하였다.

본 설계에서는 주탑 외부에 횡케이블을 설치하여 주탑의 변위 발생을 제어하고 주탑의 횡방향 모멘트를 최소화하였다. 횡방향 케이블 적용시 주탑의 단면을 줄일 수 있으므로 폭원 증가가 최소화(3m)될 수 있도록 케이블의 장력 크기를 결정하였다. 또한, 면진받침을 적용하여 중간교

각(P4, P5)에 집중적으로 크게 발생하는 지진력을 저감할 수 있도록 계획하였다.

그림 14에 세풍대교의 세부 구조계획에 대한 개략적인 투시도를 나타내었다.

4. 교량 설계

4.1 보강형 설계

보강형은 비틀림 강성이 커서 일면 케이블 배치에 적당한 박스(1-cell) 단면으로 하고 캔틸레버는 스트럿에 의해 보강된 구조를 채택하였다. 스트럿은 원형단면의 콘크리트에 FRP 피복을 적용한 형식으로, 다양한 색상 구현이 가능하고 내구성이 우수하며 중량이 적은 장점이 있다. FCM 가설에 의해 원안의 ILM 단면보다 상하 슬래브 두께를 적게 하여 보강형 중량을 줄임으로써 사장교 케이블량 축소, 주탑 단면 크기 축소 등 타안에 비해 경쟁력 있는 단면을 도출할 수 있도록 하였다.

케이블 정착부는 강재의 정착 구조를 적용하였으며 콘크리트와 스티드로 정착되도록 하였다. 케이블을 설치하기 전에 강관을 기 설치된 강재 정착부와 볼트로 연결하여 트러스 구조를 형성함으로써 케이블 장력에 대해 저항 할

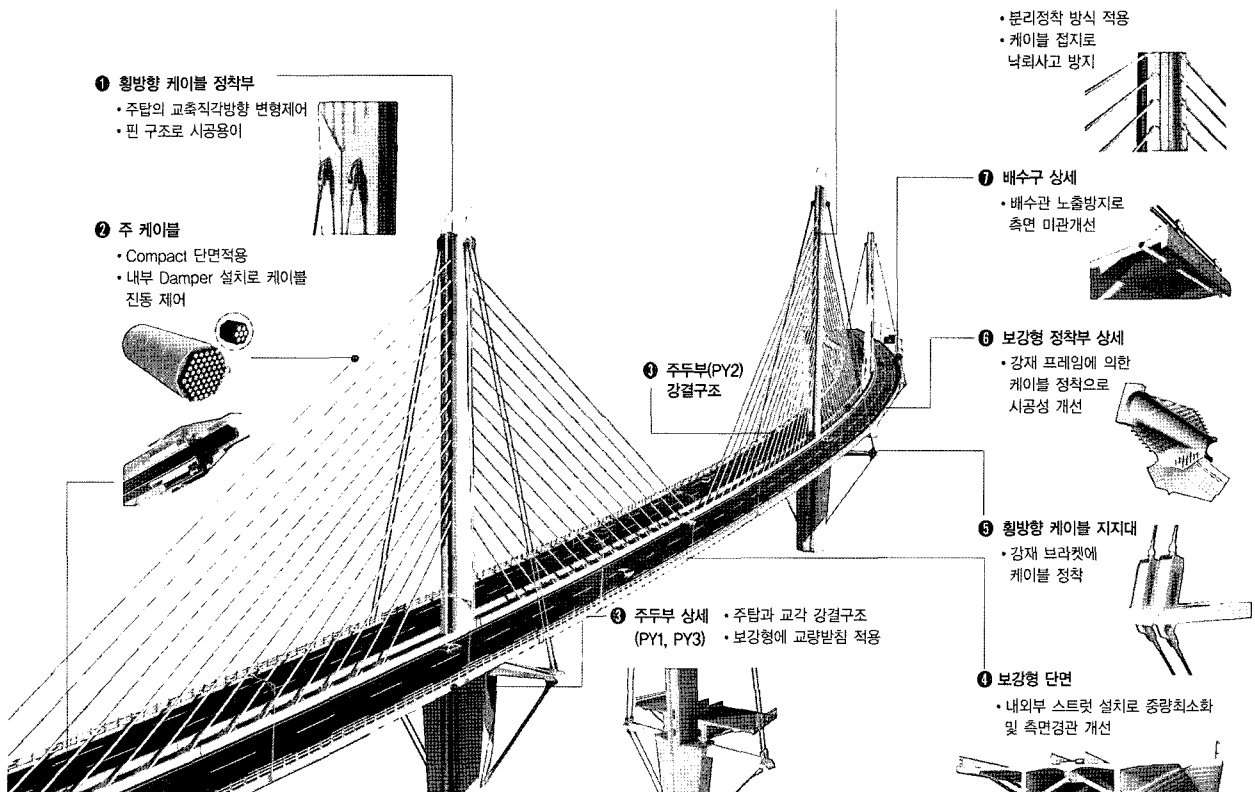


그림 14 세풍대교 구조 계획

수 있게 하였다(그림 15).

외부 스트럿의 간격 결정을 위하여 3차원 유한요소 해석을 수행하였다. 하중은 고정하중과 활하중을 재하시키고 스트럿 간격을 5m, 4m, 3.5m, 3m 등으로 변화시켜 가며 스트럿 간격에 따른 캔틸레버부의 횡방향 모멘트를 비교하였다(그림 16). 검토결과, 3.5m 이내에서는 횡방향 모멘트의 크기가 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 한편, FCM에 가설에 의한 사장교 케이블 간격과 세그먼트를 6m로 결정하였다. 따라서, 케이블이 정착되는 위치에 외부 스트럿도 설치될 수 있도록 하기 위해서 외부 스트럿 간격을 3m로 결정하였다.

보강형의 횡방향 설계는 3차원 쉘 해석 및 프레임 해석을 병행하여 수행하였다. 보강형의 내부와 외부에 스트럿이 설치되는 관계로 등가의 프레임모델을 얻기 위하여 3차원 쉘 해석에서 나온 결과를 분석하여 최적의 프레임 모델링을 도출하였다. 또한, 쉘 해석과 프레임 해석 결과를 비교하여 합리적인 분포폭을 결정하였다(그림 17).

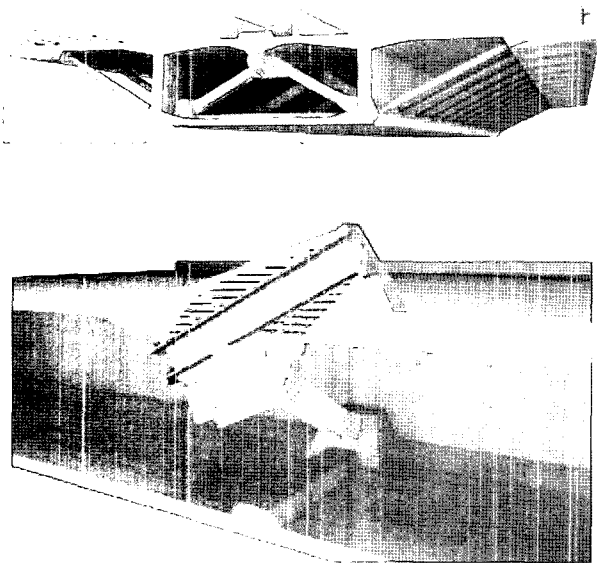


그림 15 보강형 및 케이블 정착부

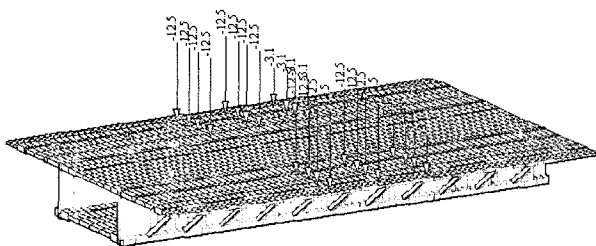


그림 16 외부 스트럿 간격 검토시 모델링 및 하중재하(스트럿 3m 간격)

횡방향 해석결과를 토대로 필요한 철근량을 결정하였고 상부 슬래브의 경우에는 15.2mm 4가닥의 강선을 750mm 간격으로 배치하여 균열 발생을 사전에 배제토록 하였다.

스트럿은 기둥검토를 통하여 기둥 크기와 철근량을 선정하였다(그림 18).

보강형 설계시 내부 강연선은 시공단계 및 완성계 해석을 통해 보강형의 응력이 허용응력을 초과하는 구간에 집중 배치하였다(그림 19).

보강형의 허용응력은 전구간에 대하여 검토하였다. 또한, 극한강도 검토시 강연선 배치 구간은 프리스트레스트 부재의 휨강도 검토를 수행하였고 강연선이 비배치되는 구간은 휨 및 축력을 받는 기둥으로 강도검토를 수행하였다.

4.2 주탑설계

주탑의 설계에 있어서는 전체구조계에서 고정하중과 활하중을 재하하여 단성해석과 P- Δ 해석을 수행한 후 각각의 결과를 비교하여 각 위치별 모멘트 확대계수를 산정하였다(그림 20, 표 2). 각 주탑에 대하여 하중조합에 의한 해석결과에 모멘트 확대계수를 곱한 수정 모멘트를 적용하여 단면 검토를 수행하였다. 그림 21에서는 PY2의 검토

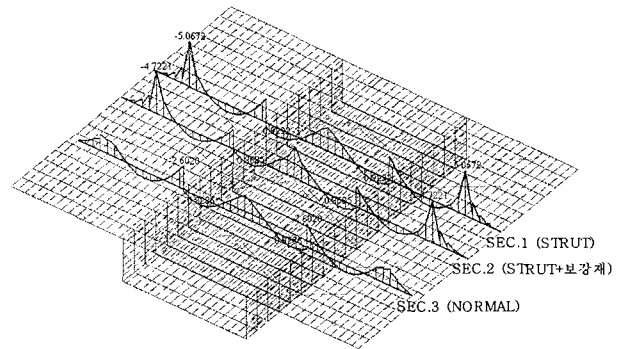


그림 17 분포폭 산정을 위한 3차원 해석 결과

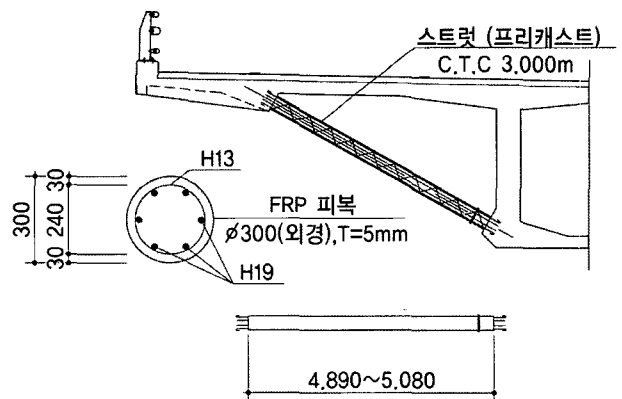


그림 18 스트럿 상세

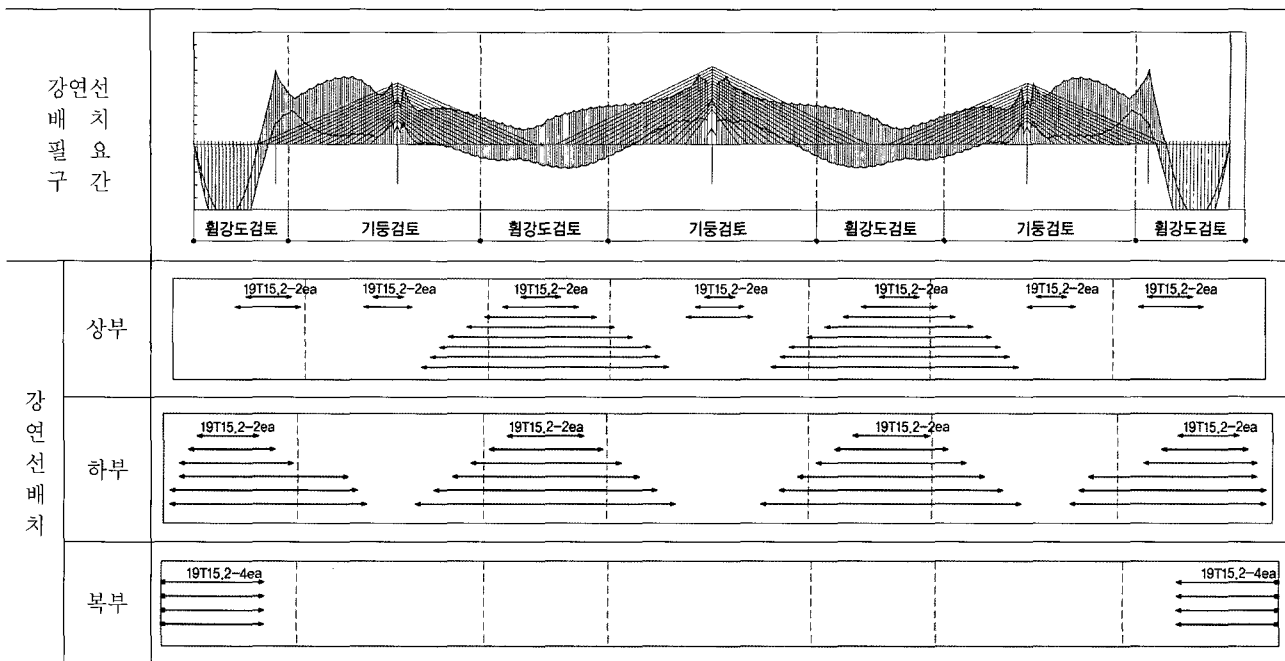


그림 19 강연선 설치 Layout

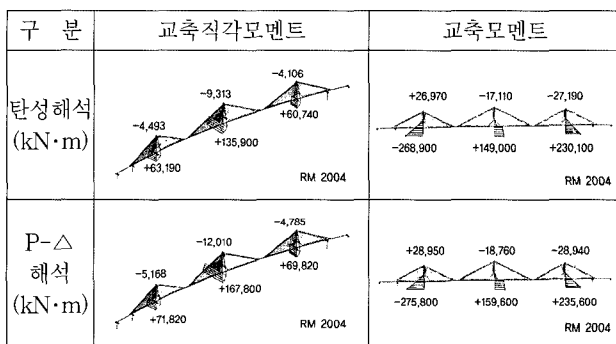


그림 20 탄성해석 및 P-Δ해석 결과

표 2 모멘트 확대계수 산정

구 분	탄성해석 결과 Me (kN-m)	P-Δ해석 결과 Mp (kN-m)	모멘트비 Mp/Me	적용 모멘트 확대계수	
주탑1	교축직각	63190	71820	1.14	1.14
	교축	268900	275800	1.03	1.03
주탑2	교축직각	135900	167800	1.23	1.23
	교축	149000	159600	1.07	1.07

단면의 위치 및 형상을 나타내었으며 그림 22에서는 각각의 단면에 대한 PM 상관도를 나타내었다.

4.3 케이블 설계

케이블은 가설단계와 완성계에 대하여 검토하였으며 각종 설계기준에 의한 피로검토를 수행하였고 또한, 케이블

PY2

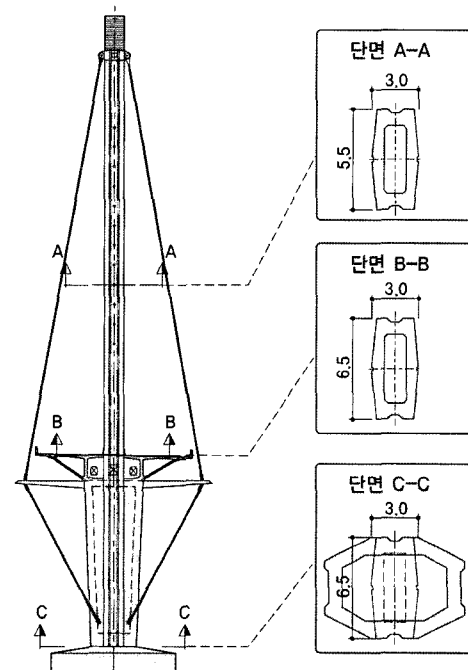


그림 21 주탑(PY2)의 검토단면

의 파단과 교체에 따른 케이블 및 타 부재의 안정성 검토를 수행하였다. 케이블의 설계장력은 사용하중조합의 최대값으로 결정하였으며 허용장력에 대하여 78~93% 수준이 되도록 설계하였다. 최종적으로 케이블은 주탑 PY1에 직경 15.7mm의 7연선 55~61가닥이 사용되었으며 주탑

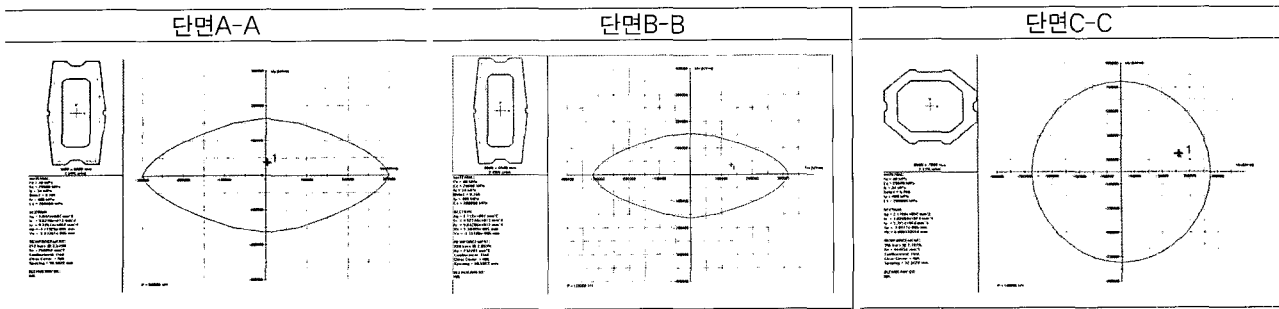


그림 22 주탑(PY2) 단면의 PM 상관도

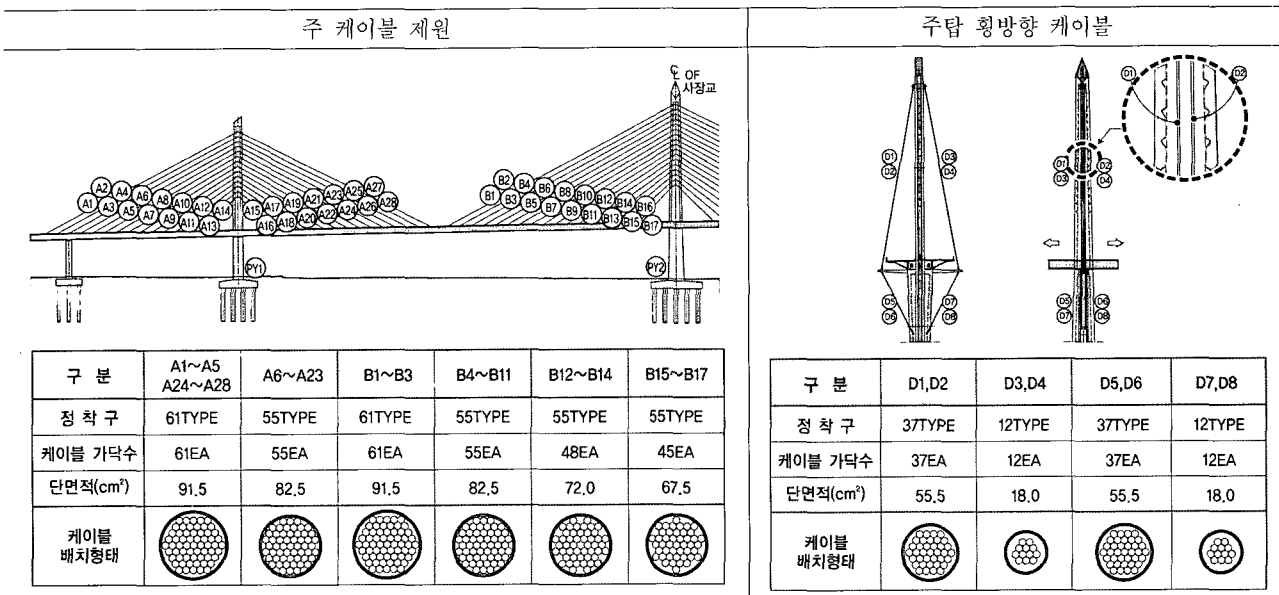


그림 23 세종대교 케이블 제원

PY2에는 45~61가닥이 사용되었다.

횡방향 케이블은 PY1에서는 평면곡선의 안쪽에는 12가닥(상하부), 바깥쪽에는 37가닥(상하부)을 적용하였고 PY2에서는 평면곡선 안쪽에 12가닥(상하부), 바깥쪽에 각각 55가닥(상부)과 61가닥(하부)을 적용하였다(그림 23).

케이블의 교체시와 파단시에 대한 검토는 고정하중과 활하중 조합에 케이블의 교체 및 파단시의 케이블 장력을 더하여 최종적인 설계장력을 산정하였다.

교체시는 부분적인 교통통제를 가정하여 활하중이 편측 3차선에 재하 하는 것으로 가정하였고 해당케이블을 제거 하였을 때의 작용인장력 만큼을 주탑 및 보강형에 외력으로 작용시켜 중첩시켰다. 구조계의 변화는 일시적인 것으로 보아 허용응력은 25%를 할증하였다.

파단시는 활하중이 전차선에 재하 하는 것으로 가정하였으며 해당 케이블 제거시의 작용인장력을 1.5배 할증시켜 중첩시켰다. 이때의 허용응력은 33% 할증을 적용하였다.

주케이블(종방향) 파단시는 보강형이 가장 크게 영향을 받는 것으로 나타났고 주탑의 횡케이블 파단시는 주탑의

응력이 크게 증가하는 것으로 나타났으며 각각의 경우에 대하여 모든 부재가 안전을 확보할 수 있도록 하였다.

4.4 내진설계

세종대교의 최적의 받침배치를 위하여 그림 24에서와 같이 3개의 구조시스템을 검토하였으며 최종적으로 3안의 면진받침 설치안을 선정하였다(그림 24).

1안은 교축방향 지진력의 경우 강결인 PY2로 집중되는 문제점이 발생하였다. 이를 해소키 위하여 2안에서와 같이 지진력을 분담할 수 있는 면진구조를 채택하여 교축방향 지진력을 저감시켰다. 그러나, 1안과 2안의 경우 내부교각인 P4와 P5에서 교축직각방향 전단력과 모멘트가 매우 크게 발생하였고 이로 인해 교축직각방향의 기초규모가 상당히 커지는 문제점이 발생하였다. 이를 개선하기 위하여 내부교각기본인 P4와 P5에 교축직각방향의 지진력을 감쇄시킬 수 있는 면진받침을 적용한 3안을 채택하게 되었다.

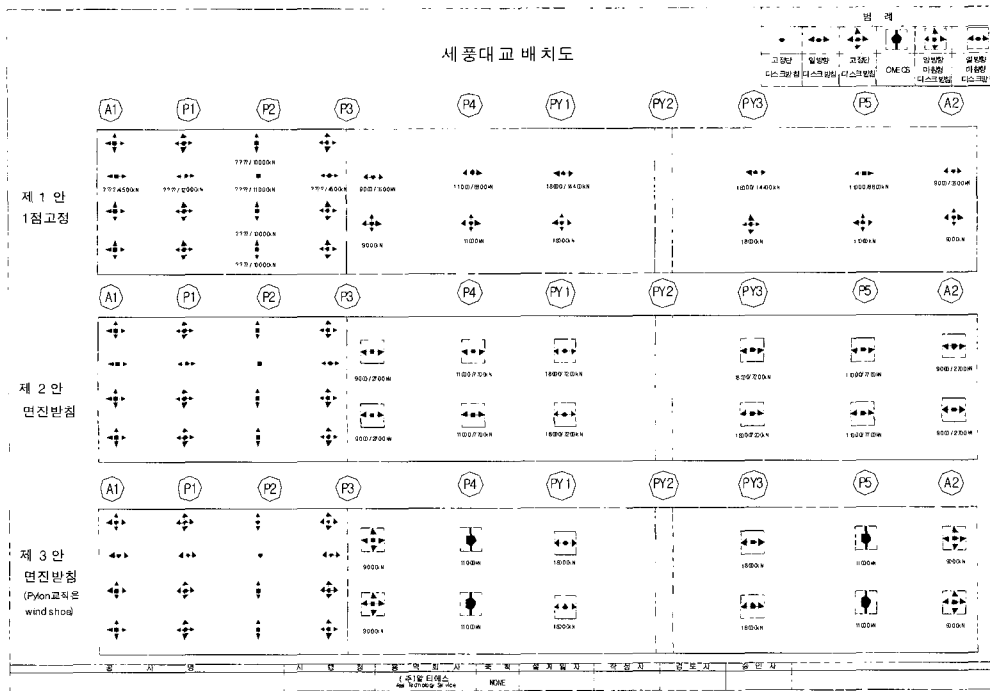
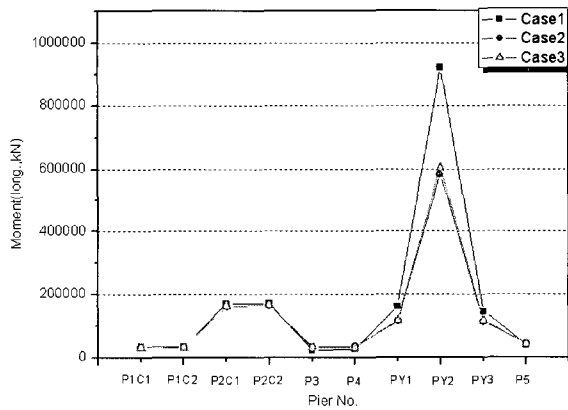
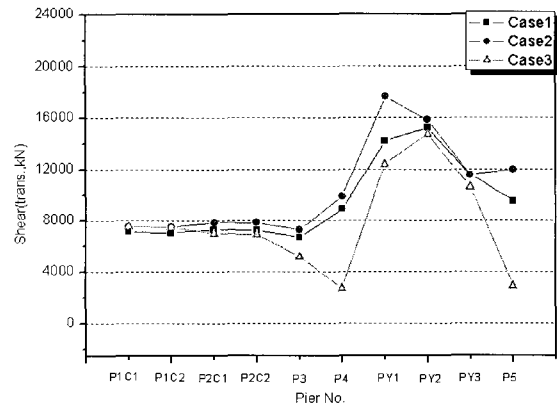


그림 24 받침 배치도

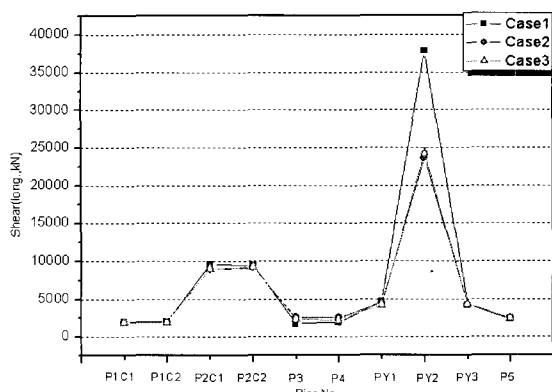


(a) 교축방향

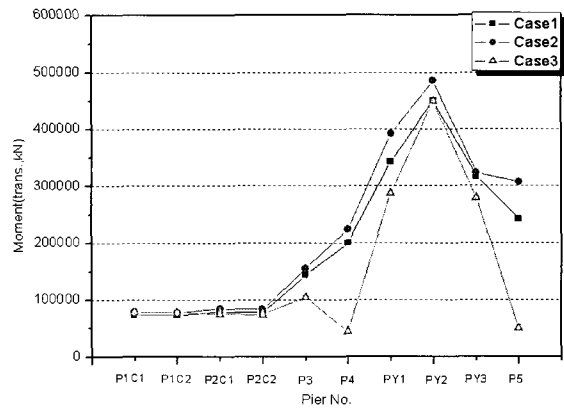


(b) 교축직각방향

그림 25 받침배치에 따른 전단력 비교



(a) 교축방향



(b) 교축직각방향

그림 26 받침배치에 따른 휨모멘트 비교

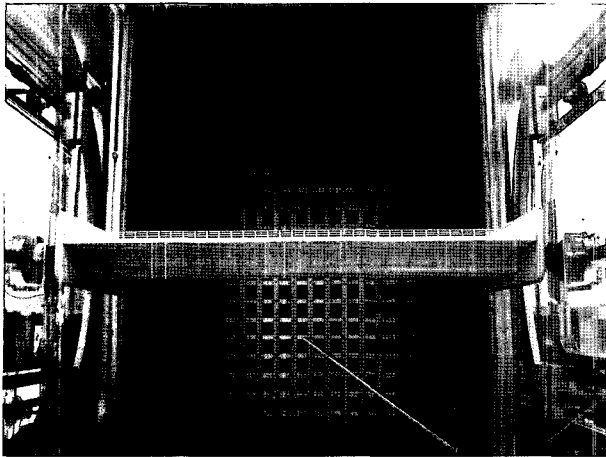


그림 27 2차원 보강형 실험 전경

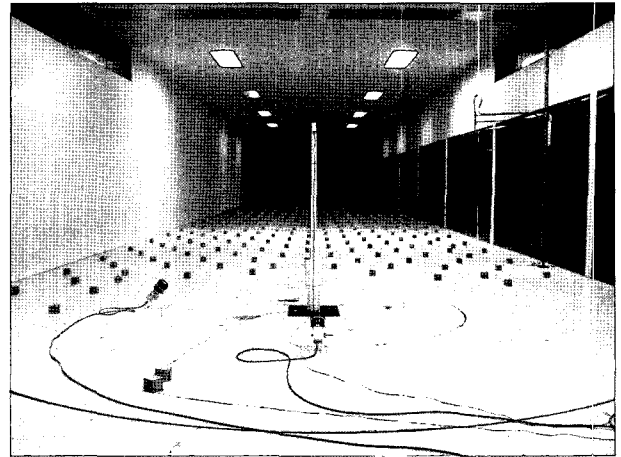
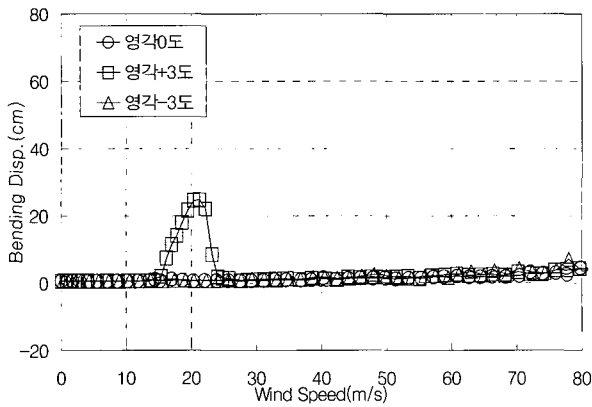
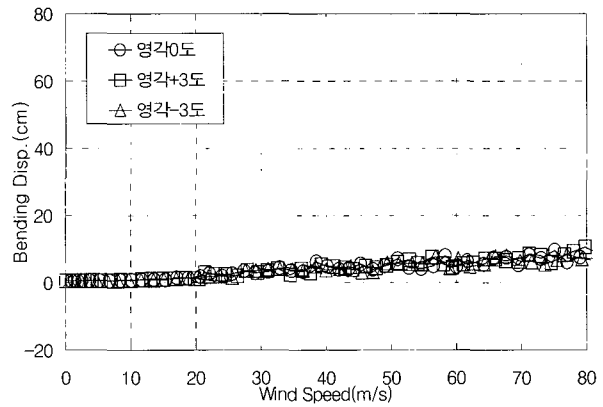


그림 28 주탑 실험 전경



(a) 등류에서의 거동



(b) 난류에서의 거동

그림 29 보강형의 진동실험(연직 거동)

4.5 내풍설계

세풍대교의 내풍안정성을 평가하고 개선하기 위하여 다음과 같이 5단계로 구분하여 내풍안정성평가를 수행하였다.

- 자연풍해석 → 현지의 탁월풍향분석 및 풍속 산정
- 2차원 보강형실험 → 완성계 보강형의 진동실험, 공기력실험
- CFD 해석 → 압력분포, 유선분포, 속도벡터
- 케이블 진동해석 → 와류진동 및 풍우진동, 웨이크 겔로핑 예측
- 3차원 주탑실험 → 가설단계의 독립주탑, 공기력 진동실험

2차원 보강형실험의 경우, 우선 등류에서 실험을 수행하여 세풍대교의 기본적인 공기력 특성을 검토하였고 등류 실험 결과를 토대로 난류실험을 수행하여 실제상황에서의 내풍특성을 평가하였다. 영각 +3도에서 연직방향의 와류

진동이 최대 25cm(풍속 14m/s~24m/s) 발생할 가능성이 있는 것으로 나타났으나 실제 기류조건을 모사한 난류실험 결과에서는 난류효과에 의해 와류진동이 소멸되고, 플러터 현상과 같은 발산진동도 발생하지 않는 것으로 나타났다(그림 29).

보강형에 대한 공기력계수의 측정은 영각 $-10^{\circ} \sim +10^{\circ}$ 의

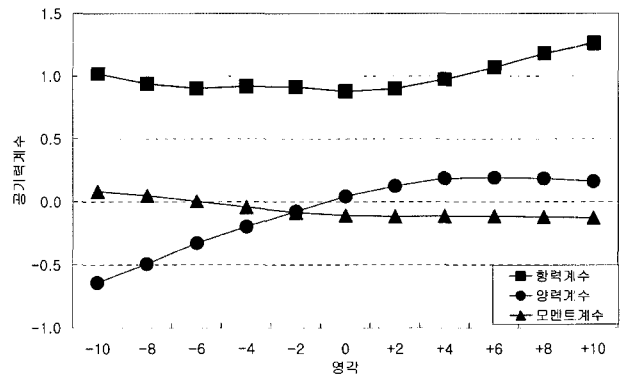


그림 30 세풍대교의 공기력 계수

표 3 교량별 표면 염소이온 농도 적용현황

구조물명	구조부위	강도 (MPa)	피복 두께 (mm)	해안선에서 부터 거리(m)	표면염소 이온농도 (kg/m ³)	비고
세풍대교	교각	35	110.5	0.00	13.0	비말대
	교각기초	35	137.5	0.00	9.0	해수토중
	보강형	40	60.5	0.00	2.2	대기중
	주탑상부	40	109.0	0.00	1.95	대기중
	주탑하부	40	109.0	0.00	13.0	비말대
	주탑기초	40	134.0	0.00	9.0	해수토중

범위에서 수행하였고 이 결과를 이용하여 정적 풍하중에 대한 안정성을 평가하도록 하였다(그림 30). 측정결과, 영각=0°에서 항력계수는 1.13, 양력계수는 0.043 모멘트계수는 -0.109로 산출되었고 실험의 항력계수가 도로교설계기

준값($C_d=1.554$)보다 작아 도로교설계기준에 의한 정적풍하중 설계는 내풍안정성이 충분함을 알 수 있다.

CFD해석을 통하여 보강형 주위의 기류의 양상 및 공기압분포 등을 파악하고 와류방출 주파수 등을 산출하여 풍동실험과 비교 검토하였다. 유동장해석을 통하여 주형 주위의 유선, 와도분포, 압력분포 및 공기력의 시간이력을 예측하였다. 해석결과, Strouhal수는 0.299, 항력계수는 1.50, 양력계수는 -0.15로 나타났으며 모델링의 차이를 감안할 때, 풍동실험결과와 비슷한 결과임을 알 수 있다.

케이블의 진동에 대해서는, 공용중 케이블의 진동모드와 교량의 진동모드를 비교하여 공진 가능성을 검토하였으며 케이블의 고유진동수가 보강형 연직모드의 고유진동수보다 작은 값을 갖는 경우와 케이블의 길이가 80m를 초과하는 경우에 케이블에 내부 댐퍼를 설치하는 것으로 계획하였다(그림 33).

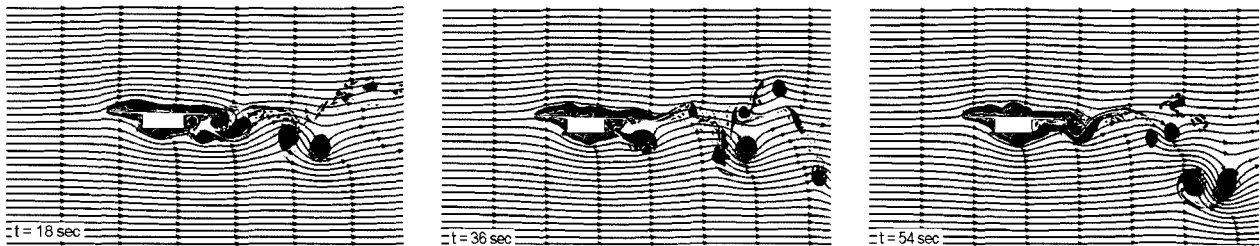


그림 31 유선 및 와도분포

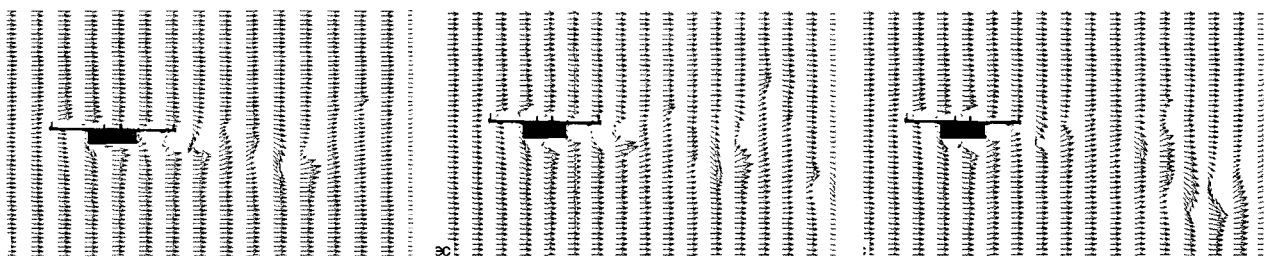


그림 32 속도벡터

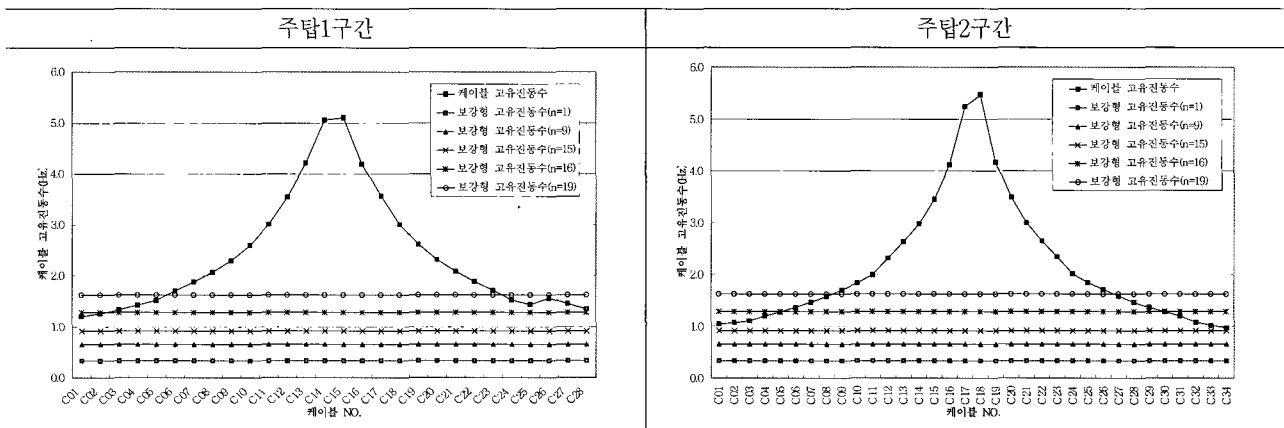


그림 33 케이블의 공진 발생 검토

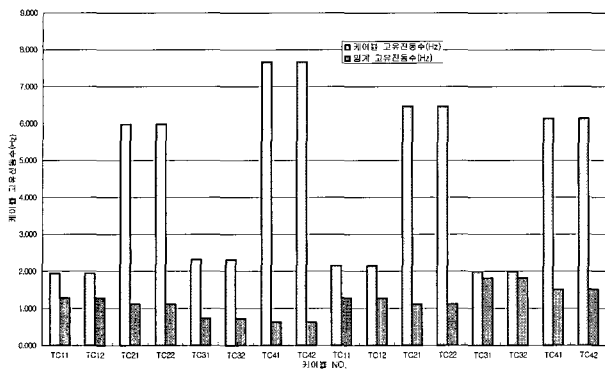


그림 34 횡케이블의 공진 발생 검토

주탑 횡방향 케이블의 경우 병렬로 설치되어 웨이크 갭 로핑 현상에 대한 검토를 수행하였다. 2열로 배치된 횡방향 케이블의 진동수를 산정하여 임계풍속시의 진동수와 비교하여 웨이크 갭로핑에 대한 안전을 확인하였다(그림 34).

4.6 내구성 설계

본 과업구간에 가설되는 세풍대교는 해안에 위치하므로 계절풍의 영향을 받는 부분으로 내구성 설계를 수행하였다. 이를 위해 염소 이온의 침투 해석을 통하여 철근의 부식 개시 시간과 함께 소요의 내구수명을 만족하는 피복 두께를 산정하였으며, 내구 한계 기간에 근거한 내구성 설계 기법 및 내구지수에 근거한 내구성 설계 기법을 적용하여 대상 구조물의 내구 수명을 산정하였다.

내구성 증진을 위해 고로슬래그 시멘트를 사용함으로써 콘크리트의 밀실성을 유지하도록 하여 염화이온의 침투, 수분 및 산소 등의 침입을 억제시키도록 하였다. 해안에서 10km 이내 지역이므로 계절풍의 영향을 받는 지역으로 설계강도 27MPa 이상을 적용하여 내구성을 증진시키도록 하였다. 염화물 침투 해석 결과 주탑 및 교각 등 비말대 구간과 같이 염분 침투가 많아 100년 이상의 내구성 확보가

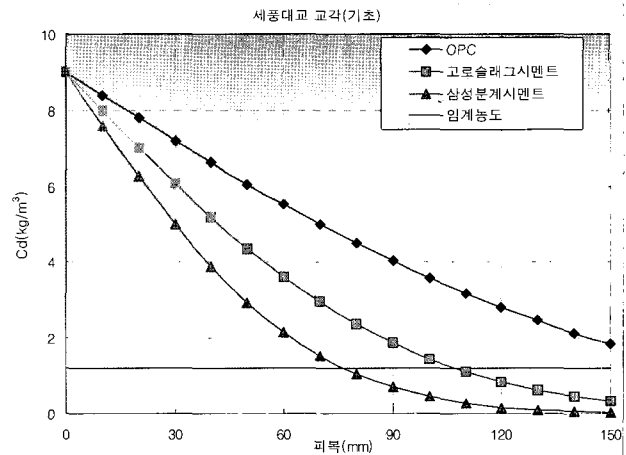
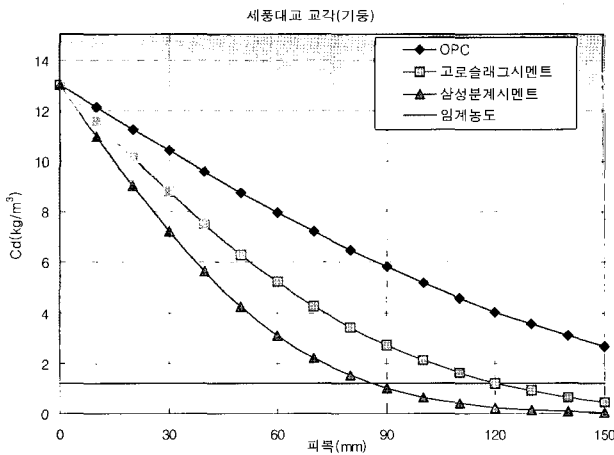


그림 35 염소이온 침투 해석 결과

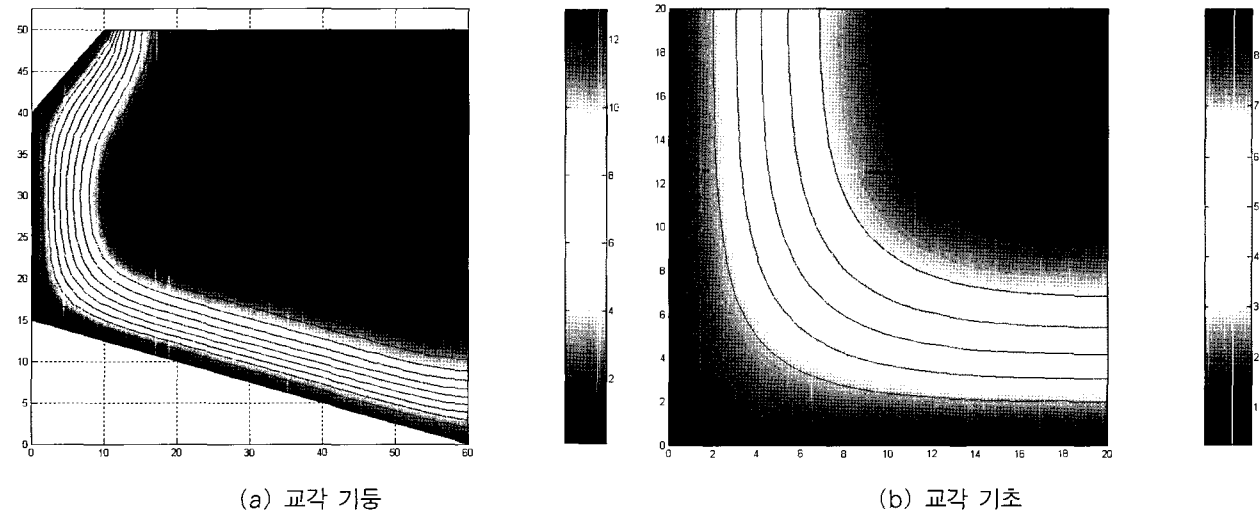


그림 36 재령 100년 이후의 염소이온 농도 분포

표 4 염소이온 침투에 의한 내구년한 검토

구분	보통시멘트			고로슬래그시멘트			비고
	필요 피복 두께 (mm)	적용 피복 두께 (mm)	내구 년한 (년)	필요 피복 두께 (mm)	적용 피복 두께 (mm)	내구 년한 (년)	
교각	199.5	110.5	30.7	120.6	110.5	84.0	내염 도장
교각 기초	178.0	137.5	59.7	107.6	137.5	130.0	
보강형	63.5	60.5	91.0	42.7	60.5	201.2	
주탑 상부	52.7	109.0	427.1	35.5	109.0	943.9	
주탑 하부	176.7	109.0	38.1	118.9	109.0	84.1	내염 도장
주탑 기초	157.6	134.0	72.3	106.0	134.0	159.8	

어렵다고 예상되는 위치는 2중방식법인 내염도장을 추가로 적용하여 충분한 내구성을 확보하도록 계획하였다.

4.7 기타 고려사항 및 상세해석

4.7.1 보강형 케이블 정착부 검토

앞서 언급한 바와 같이 보강형의 케이블 정착부는 강재로 제작되어 콘크리트와 스티드로 연결되게 하였고 케이블 장력은 내부의 강재 스트럿과 하부 슬래브의 콘크리트 보로 형성된 트러스에 의해 지지되는 방식을 채택하였다.

트러스 구조(강재 스트럿+콘크리트 보)는 상세 유한요

소 해석을 통하여 스티드 개수, 스트럿 강판의 필요두께 등을 결정하였고 콘크리트 압축응력을 검토하였다. 또한, 케이블 정착부 상부 슬래브의 압축 및 인장검토, 케이블 정착부의 지압응력을 검토하여 필요한 부분에 철근 보강 등 안정성을 확보토록 하였다.

4.7.2 부반력(Tie down) 케이블 검토

부반력 케이블 정착부는 케이블과 부반력 케이블에 의해 콘크리트 격벽에 발생하는 인장력을 상쇄시키기 위하여 작용인장력 만큼을 강봉으로 보강하는 것으로 계획하였다. 이 부분은 상부 케이블 정착부의 보강, 하부 부반력 케이블 정착부의 보강 및 전체 구조계의 응력 검토 등을 수행하여 국부적으로 발생하는 인장력에 대응하여 철근 보강을 수행하는 것으로 하였다.

4.7.3 주탑 정착부 케이블 검토

주탑의 케이블 정착부도 관용법과 유한요소해석법을 병행하여 지압응력 및 인장응력을 검토하였으며 필요한 철근량을 배근하였다. 또한, 주탑단면에 대해서는 양쪽에서 작용하는 케이블 장력에 대해 교축 및 교축직각방향으로 필요한 강봉을 설치하는 것으로 계획하였다.

4.7.4 윈드슈 설치부 검토

PY1 및 PY3는 주탑에 윈드슈 및 연직의 교량받침이 설

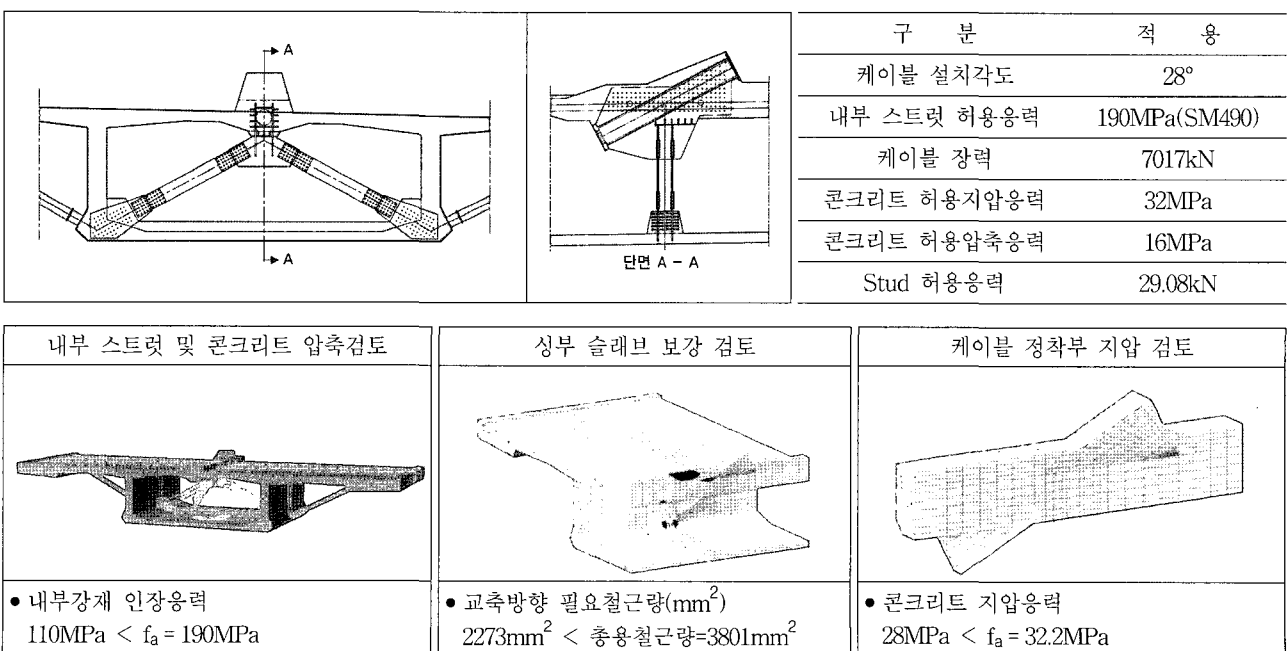


그림 37 보강형 케이블 정착부 상세해석

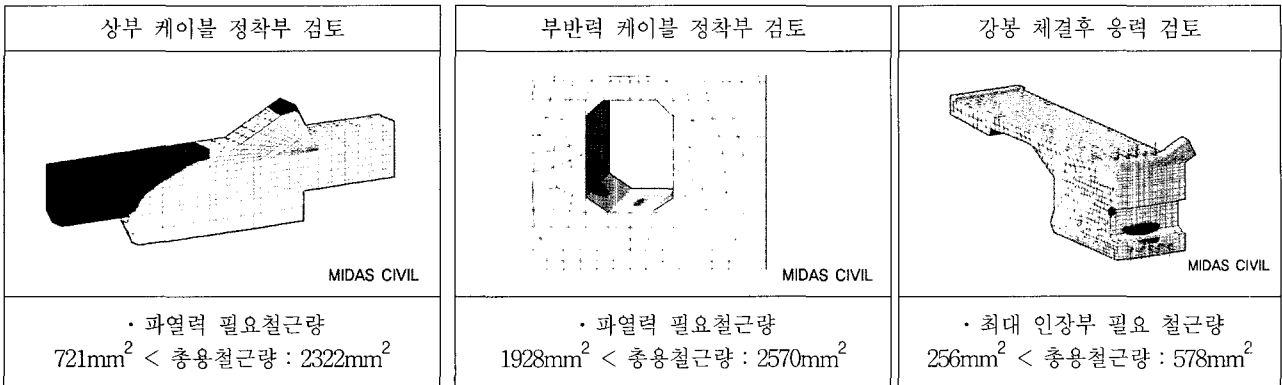
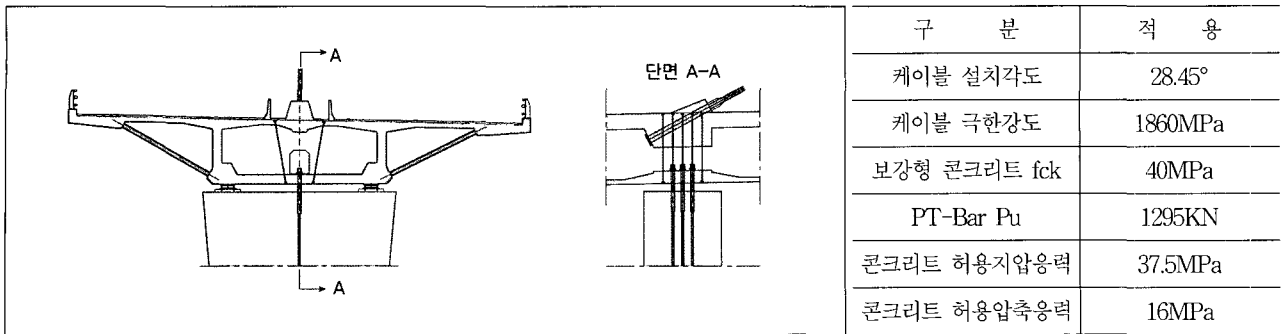


그림 38 타이다운 케이블 정착부 상세해석

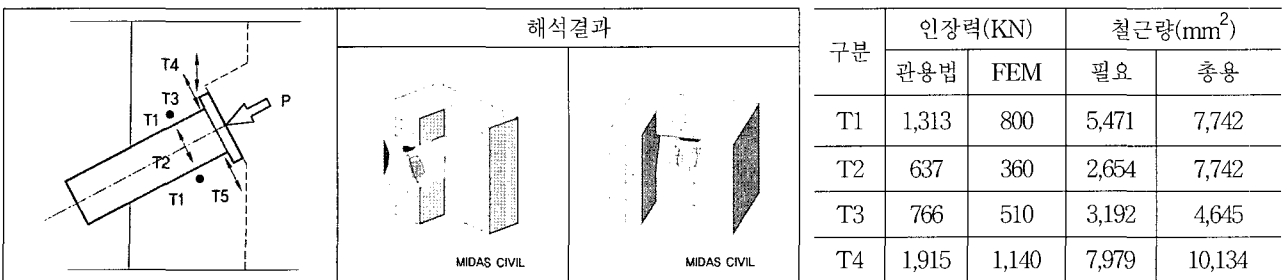


그림 39 주탑 케이블 정착부 상세해석

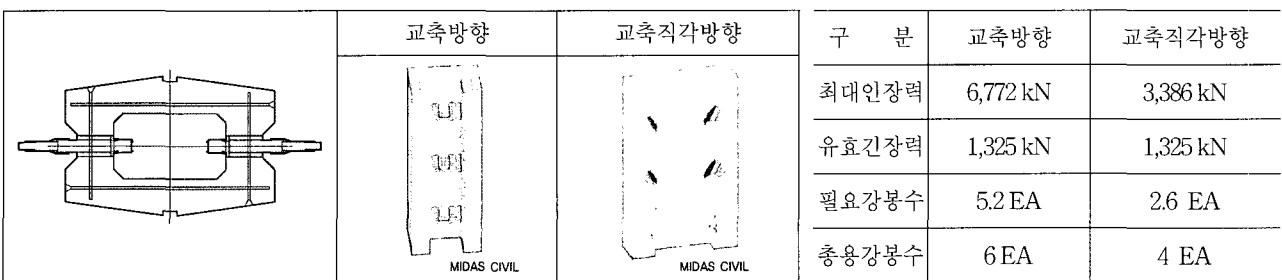


그림 40 주탑부 강봉 설치를 위한 상세해석

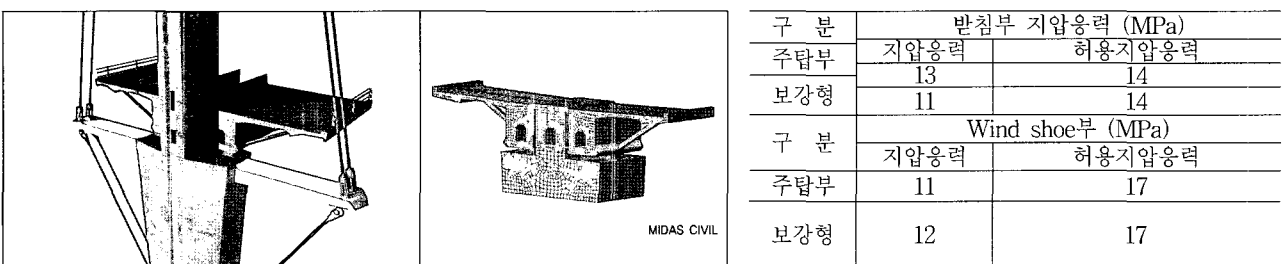


그림 41 윈드슈 설치부 상세 해석

치되는 구조로 계획하였다. 따라서 이 부분은 상세가 다소 복잡하고 응력흐름이 명확하지 않았기 때문에 상세해석을 통해 콘크리트의 지압 및 압축응력을 검토하였으며 필요한 부분에 철근 보강을 수행하는 것으로 계획하였다.

5. 결 론

세풍대교는 3주탑 곡선 콘크리트 사장교로서 국내에서 최초로 도입되는 사장교 형식이라 할 수 있다. 대안입찰의 특성상 상징성을 많이 도입하여 설계함으로써 경관적으로 매우 아름다울 뿐만 아니라 기술적으로도 횡방향 케이블 도입 등 국내에서 처음으로 시도되는 시공이 필요

한 교량이다.

본 세풍대교의 설계로 말미암아 세계유수의 다주탑 사장교들과 어깨를 나란히 할 수 있는 계기를 마련하게 되었다. 더군다나 곡선반경 2000m의 곡선 사장교로서의 희귀성으로 인해 더욱더 그 가치가 빛나리라 판단된다. 아무쪼록 세풍대교가 순조롭게 완공되어 본 교량이 국내 대표 사장교로 손색이 없는 교량이 될 수 있으리라 기대해 본다.

마지막으로 본 프로젝트에 참여하여 수고를 아끼지 않은 대림산업 주식회사의 관계자분들과 (주)청석엔지니어링 참여기술자분들께 그 동안의 노고에 감사를 드리며 본 기사를 마무리할까 한다. ☞