

사장교의 시공중 내풍 안정성 확보 방안

Temporary Stabilizing Measures during Construction of a Cable Stayed Bridge



김영민*
Kim, Young-Min



김대영**
Kim, Dae-Young

1. 머리말

사장교 가설에서 흔히 사용되는 캔틸레버 가설 공법은 사용 중에 비하여 시공 중에 더 바람에 취약한 구조를 가진다. 특히, 1940년 바람에 의하여 붕괴된 Tacoma Narrows 교량과 같은 강합성 2주형 판형교 형식(일명 π 형 교량)은 풍공학적으로 매우 불안한 구조임에도 불구하고 뛰어난 경제성과 시공성 때문에 사장교에서 많이 채택되고 있다. 따라서 시공 중 바람에 대한 안정성 확보가 매우 중요하다.

사장교의 캔틸레버 가설 공법 적용시 흔히 내풍 케이블이란 임시 케이블을 설치하여 시공 중 태풍시 바람에 안전하도록 조치를 취하고 있다. 그러나 내풍케이블에 의한 내풍 안정화 방법은 해상 교량의 경우 해저면에 중력식 콘크리트 블록이나 임시 파일기초 등을 설치하고 공사가 끝나면 철거를 해야 하므로 가설비용이 증가하고 환경오염을 유발시킬 수 있는 단점이 있다. 또한, 시공 중 선박통행에도 문제를 발생시킬 수 있다. 이에 비하여 TMD (동조질량감쇠기, Tuned Mass Damper) 등에 의한 진

동제어장치를 도입하여 시공 중에 안정성을 확보하는 방안은 해저면의 기초설치나 철거의 문제가 없고 선박통행에도 지장을 주지 않으며 환경친화적인 공법이라는 장점이 있다. 다만, 대상 구조물의 바람에 대한 동적구조특성 파악 및 엔지니어링에 주의가 필요하다.

2. 대상 교량 및 검토 방안

본고에서는 (주)대우건설에서 시공하고 있는 부산~거제간 연결도로 (거가대교)의 강합성 2주형 3주탑 사장교 (108m-230m-230m-108m)와 2주탑 사장교 (222m-475m-222m)를 대상으로 하여 해석적 접근방법과 풍동실험을 통하여 내풍케이블 및 TMD에 의한 시공 중 태풍시 내풍안정성 확보 방안을 살펴보고자 한다.

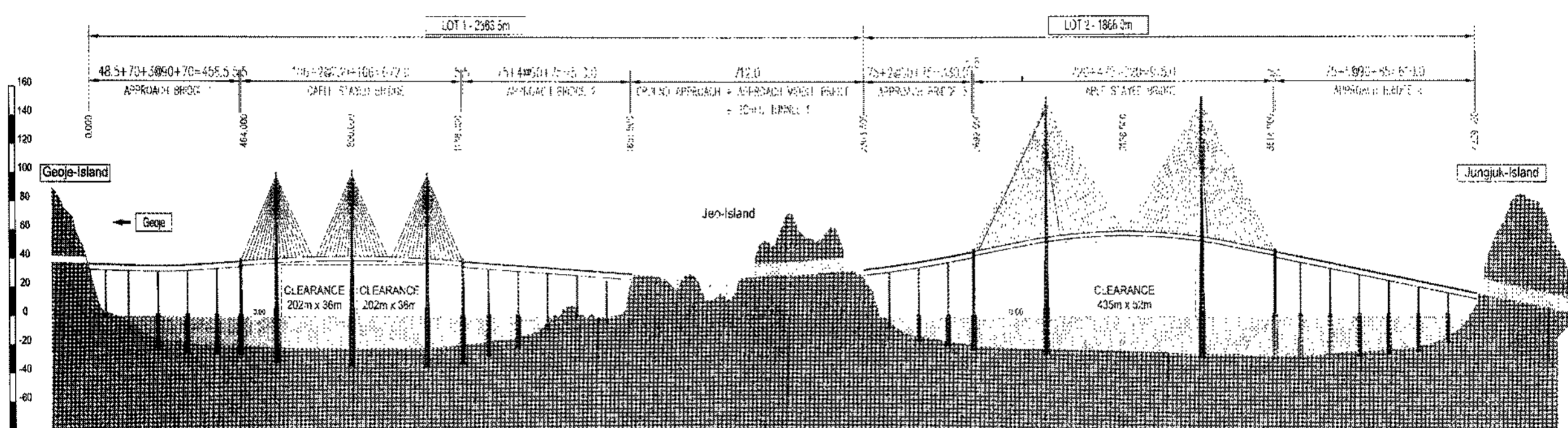
부산~거제간 연결 도로는 대한민국의 남동부 지역에서 진행되고 있는 주요 사회 기반 구조를 구축하는 프로젝트이다. 본 연결 도로는 2010년에 완공될 예정이며, 부산광역시 강서구 가덕도와 경상남도 거제시 장목면을 연결하여 편리한 교통망이 구축될 예정이다. 부산~거제간 연결도로는 총 8.2km 길이

* (주)대우건설 기술연구원 선임연구원, 공학박사
** (주)대우건설 기술연구원 시험연구팀장, 공학박사, 건축구조기술사

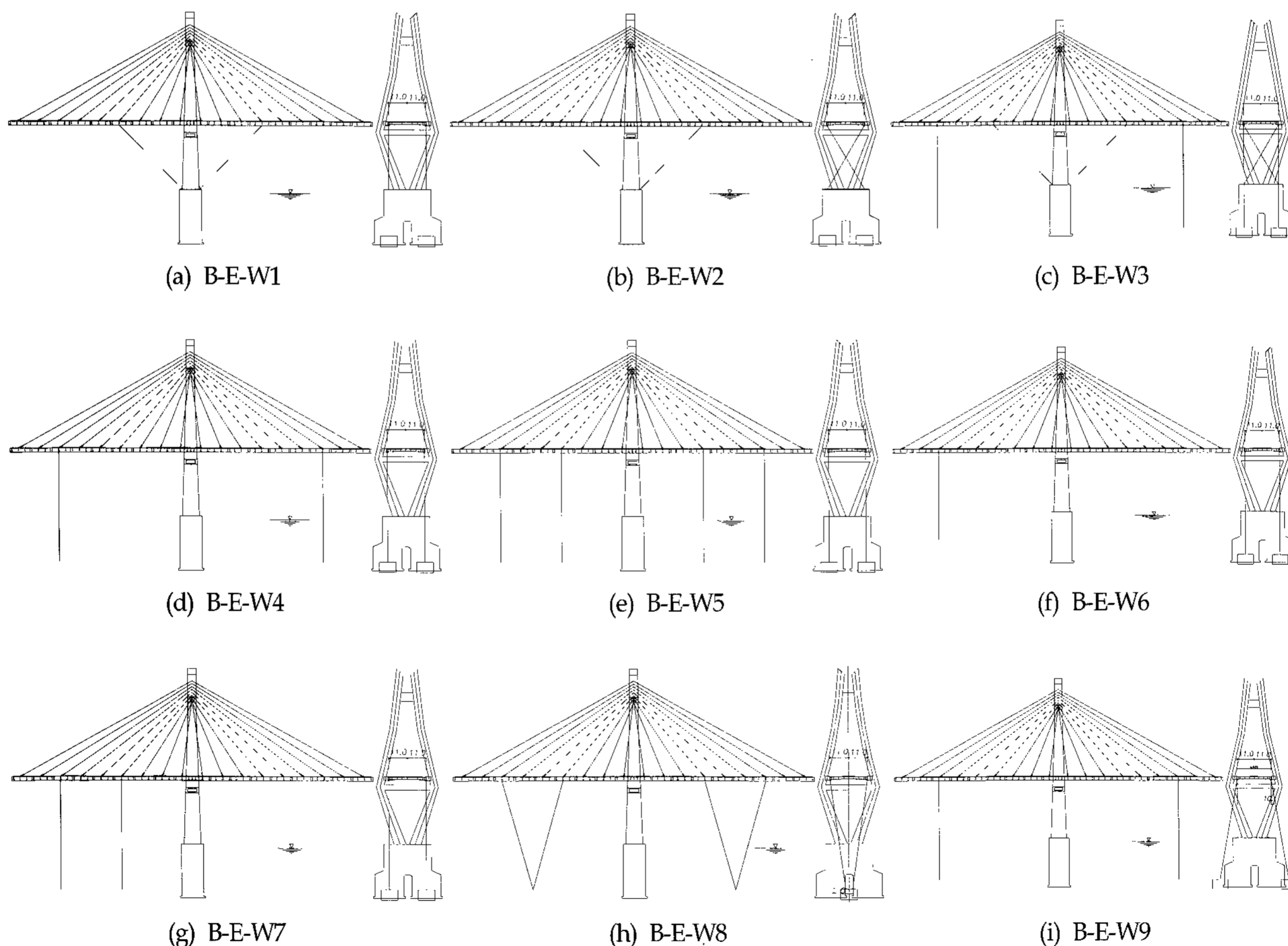
로, 주요 세 가지 구조물로 구성되어 있다.(사장교 2개소 : Lot 1 및 Lot 2, 침매터널 1개소 : Lot 3) 또한, 침매터널과 사장교 중간에 있는 섬들에 시공되는 도로와 굴착 터널 및 가덕도와 거제도에 관리 사무소와 영업소도 제공할 예정이다.<그림 1> 참조

3주탑 사장교의 가설단계는 <그림 2>와 같이 균형 캔틸레버 상태에서 주경간 107m, 측경간 104m가 시공된 가설단계 96%에 대하여 1:150 크기로 축

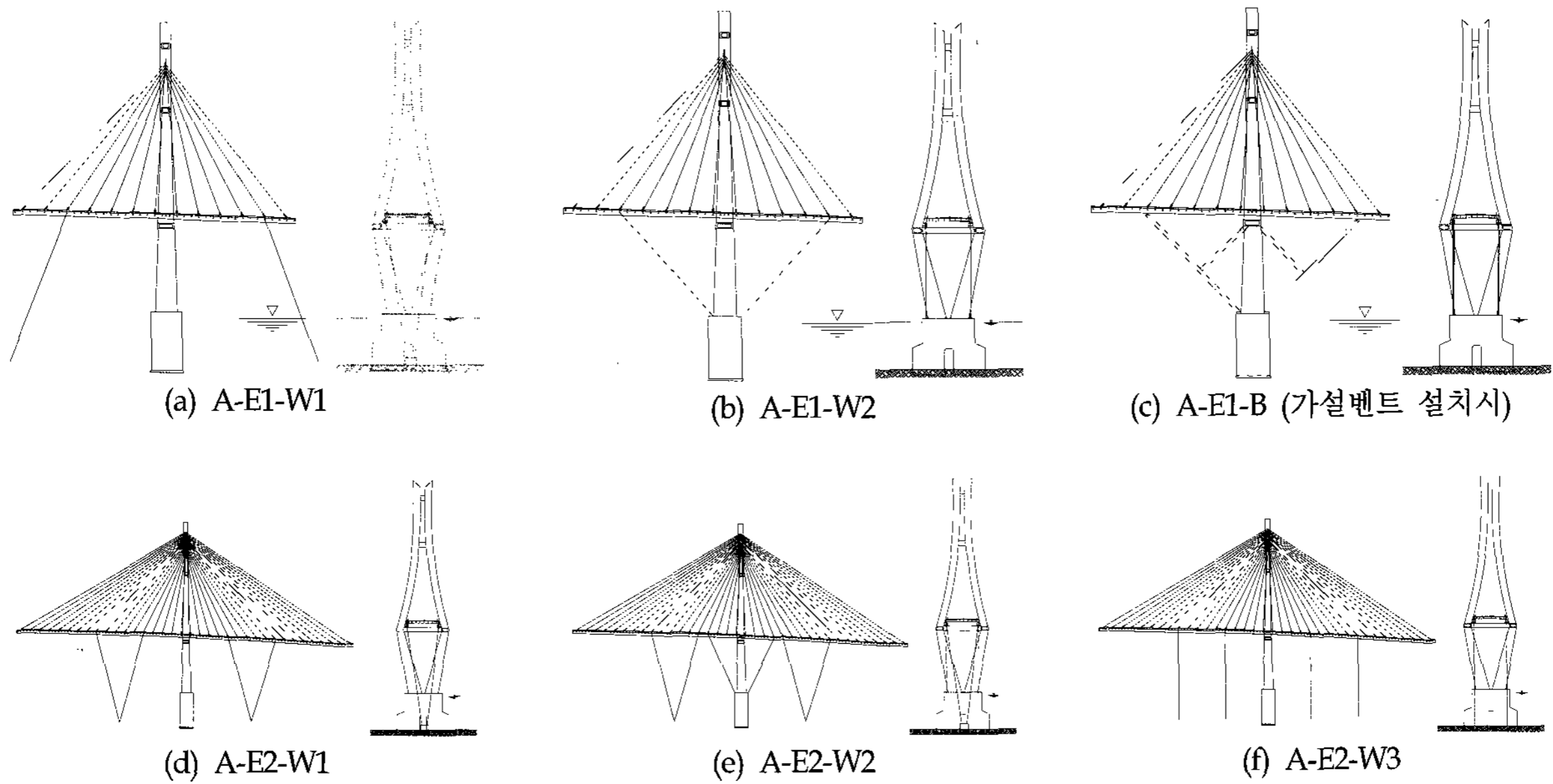
소한 공탄성 모형을 이용하여 풍동실험 결과에 의하여 검토하였으며, 2주탑 사장교는 <그림 3>과 같이 주경간 83m, 측경간 71m가 시공된 가설단계 34%와 주경간 215m, 측경간 213m가 시공된 가설단계 93%에 대하여 1:140 크기로 축소한 공탄성 모형에 의한 풍동실험 결과 및 동적구조(버펫팅)해석 결과를 이용하여 검토하였다.



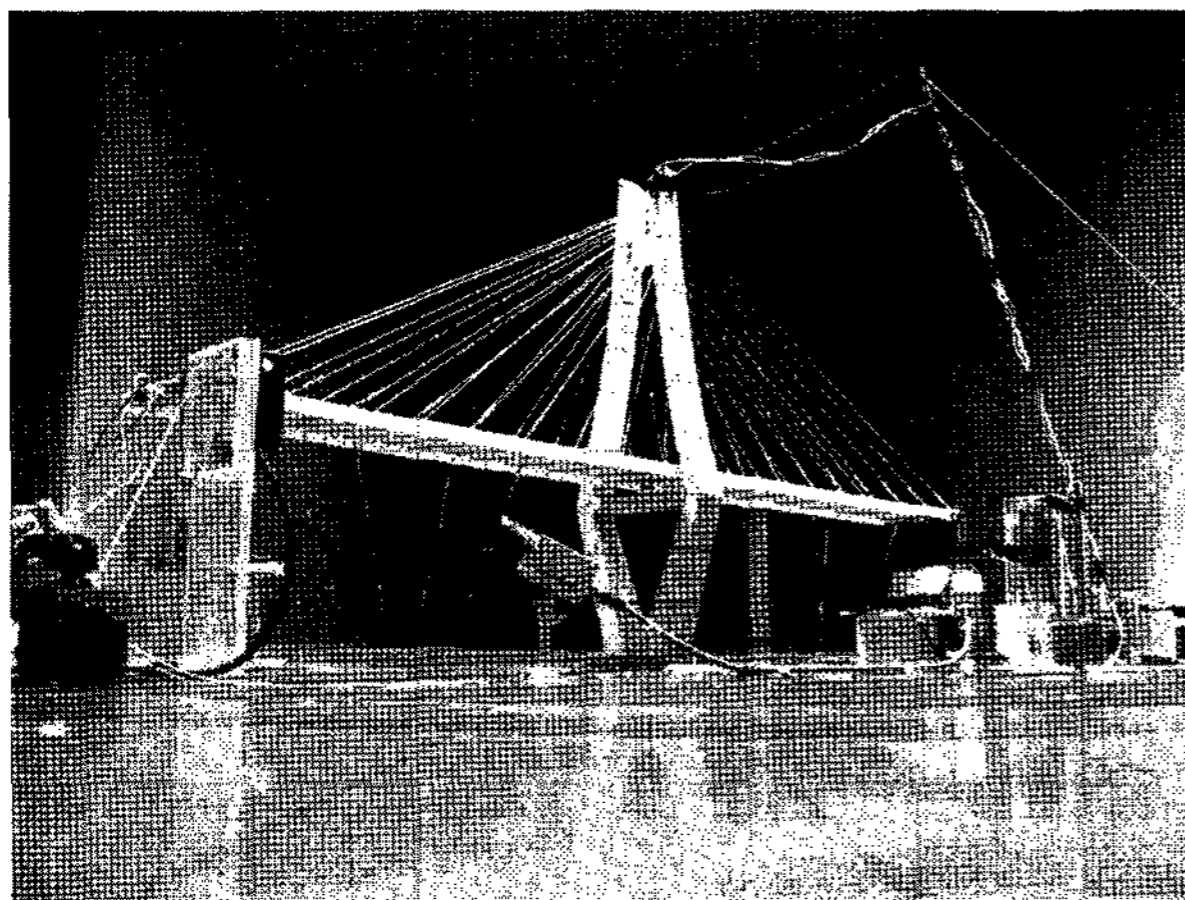
<그림 1> 부산~거제간 연결도로 교량구간 종단면도



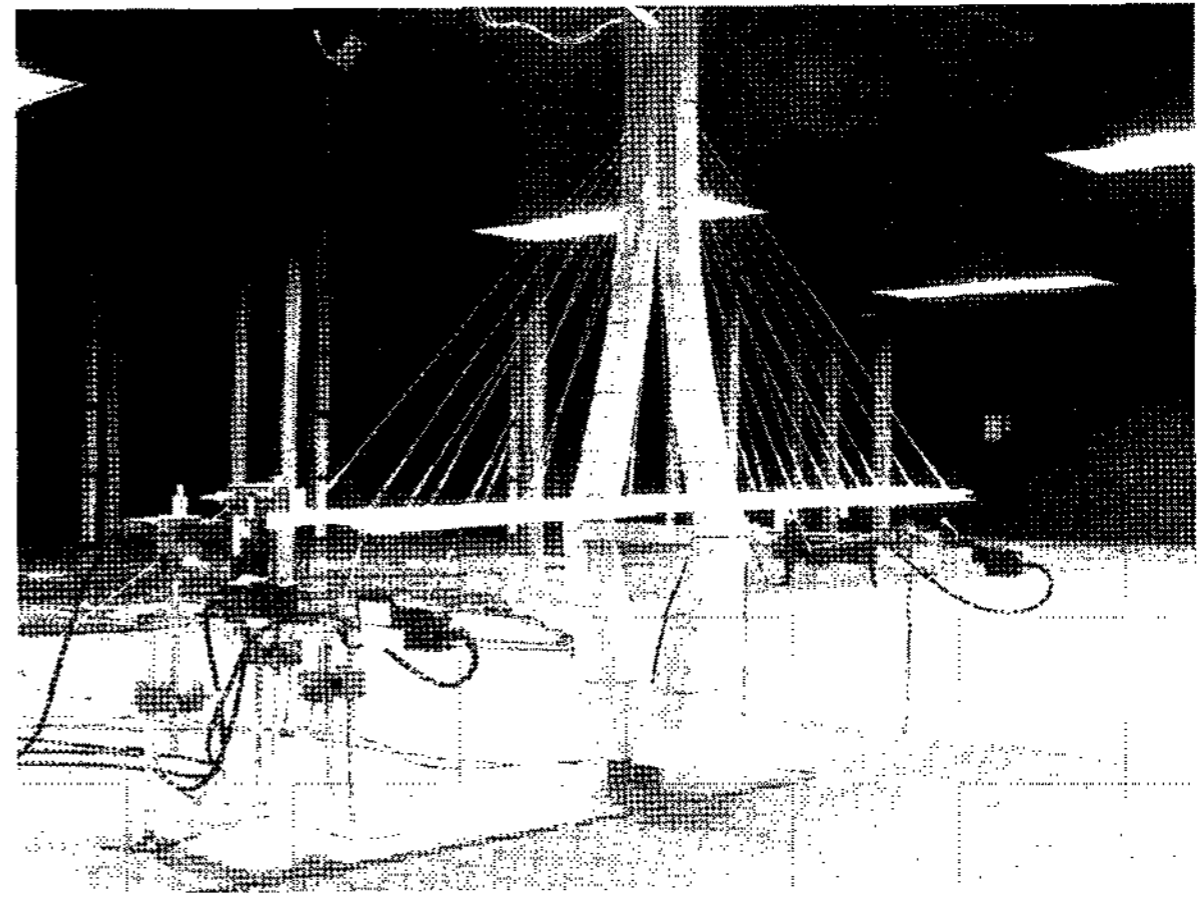
<그림 2> 3주탑 사장교(Lot 1)의 내풍안정성 확보 방안



<그림 3> 2주탑 사장교(Lot 2)의 내풍안정성 확보 방안



<그림 4> 3주탑 사장교 시공중 풍동실험 (대우건설 기술 연구원)



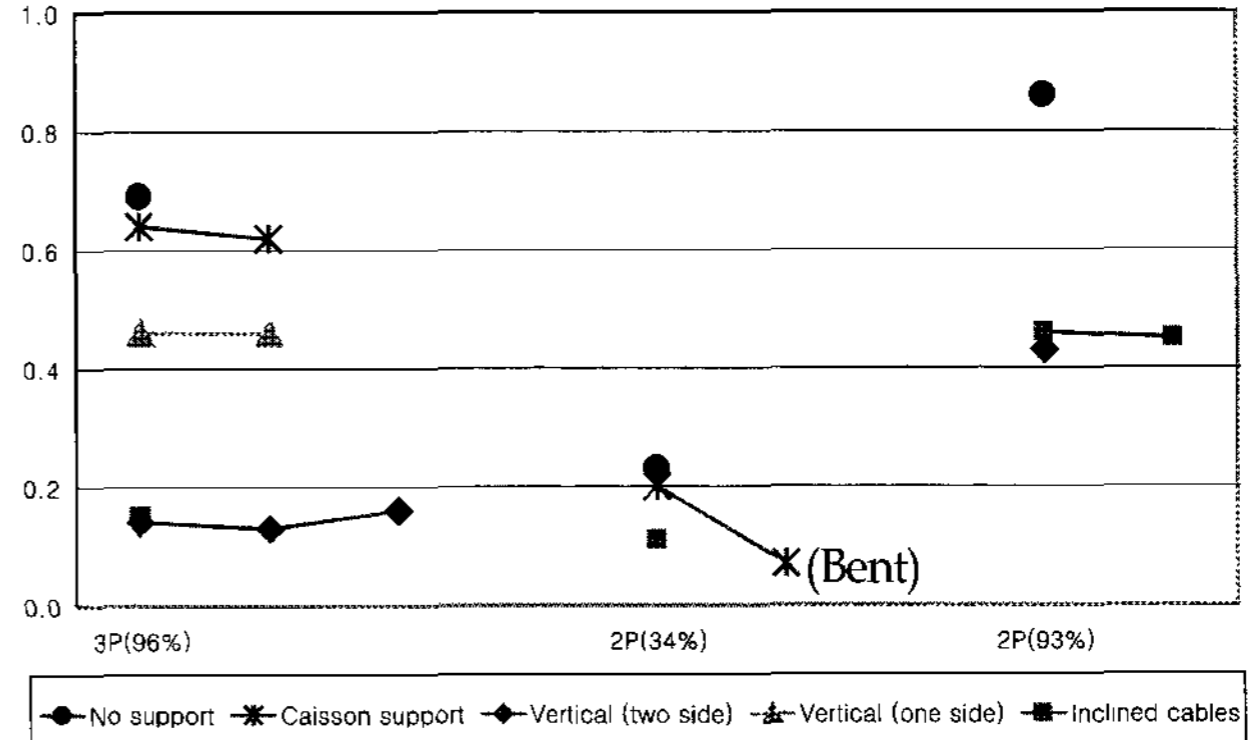
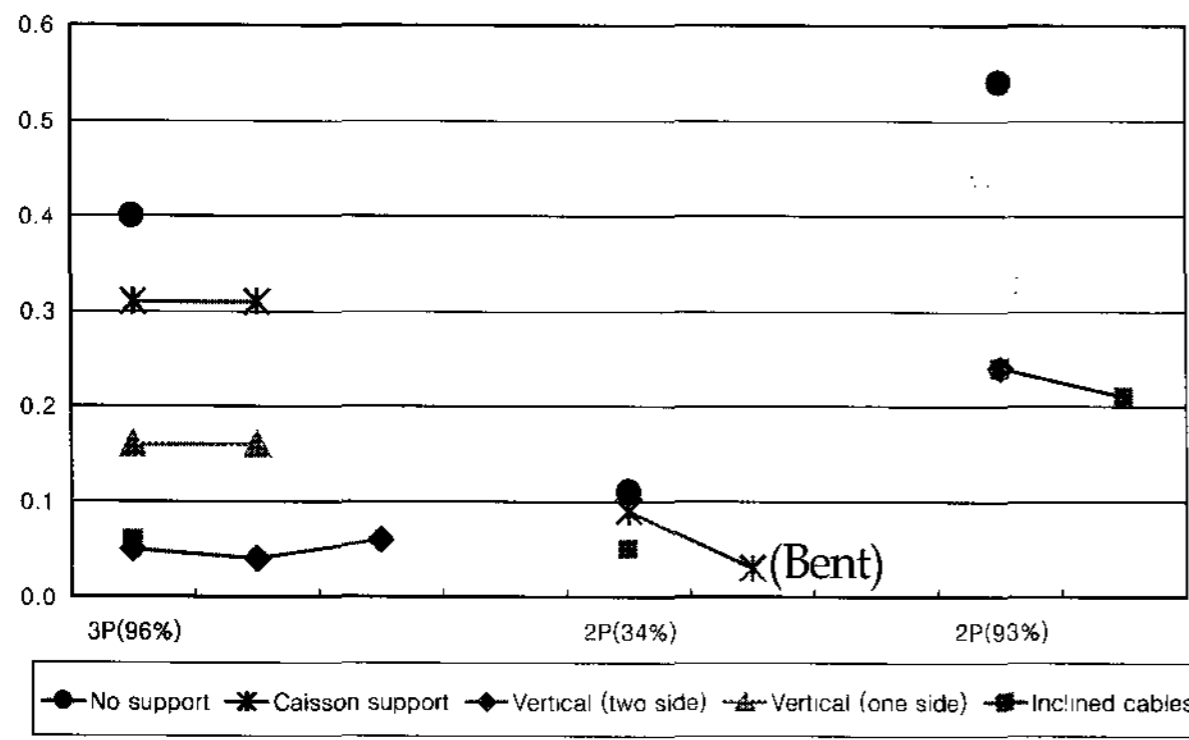
<그림 5> 2주탑 사장교 시공중 풍동실험 (FORCE Technology-DMI)

3. 풍동실험 (Wind Tunnel Test)

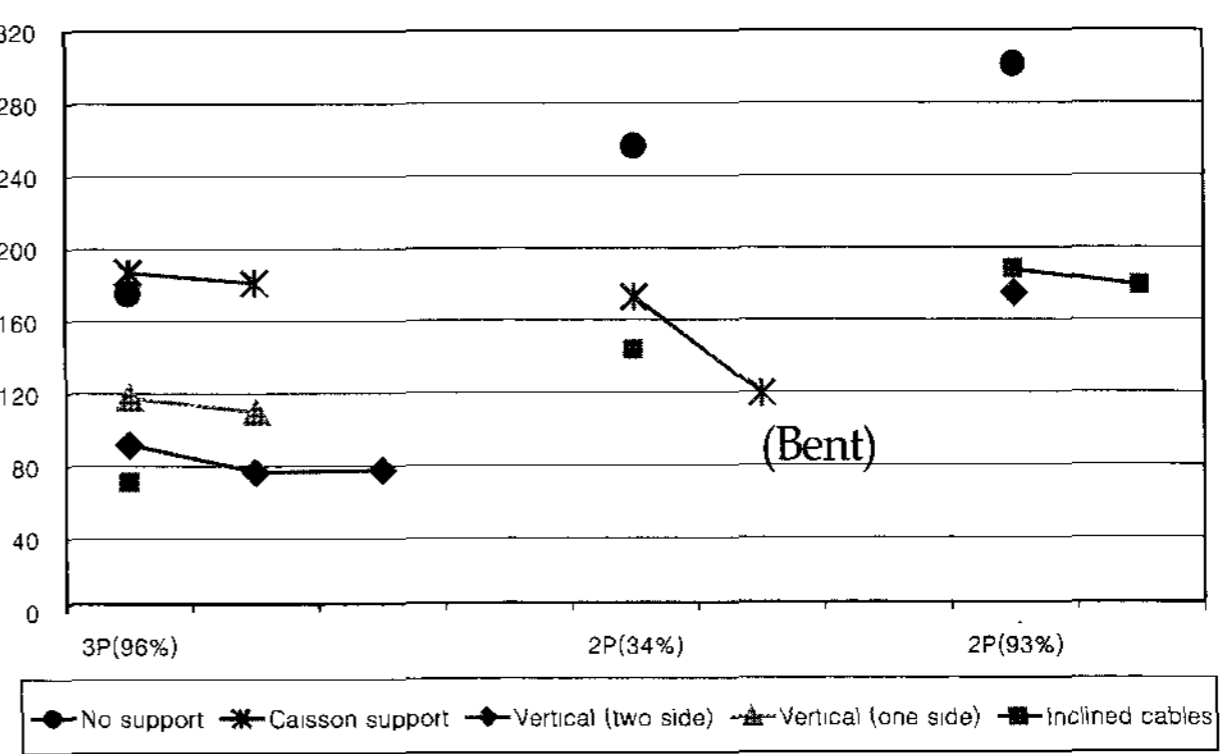
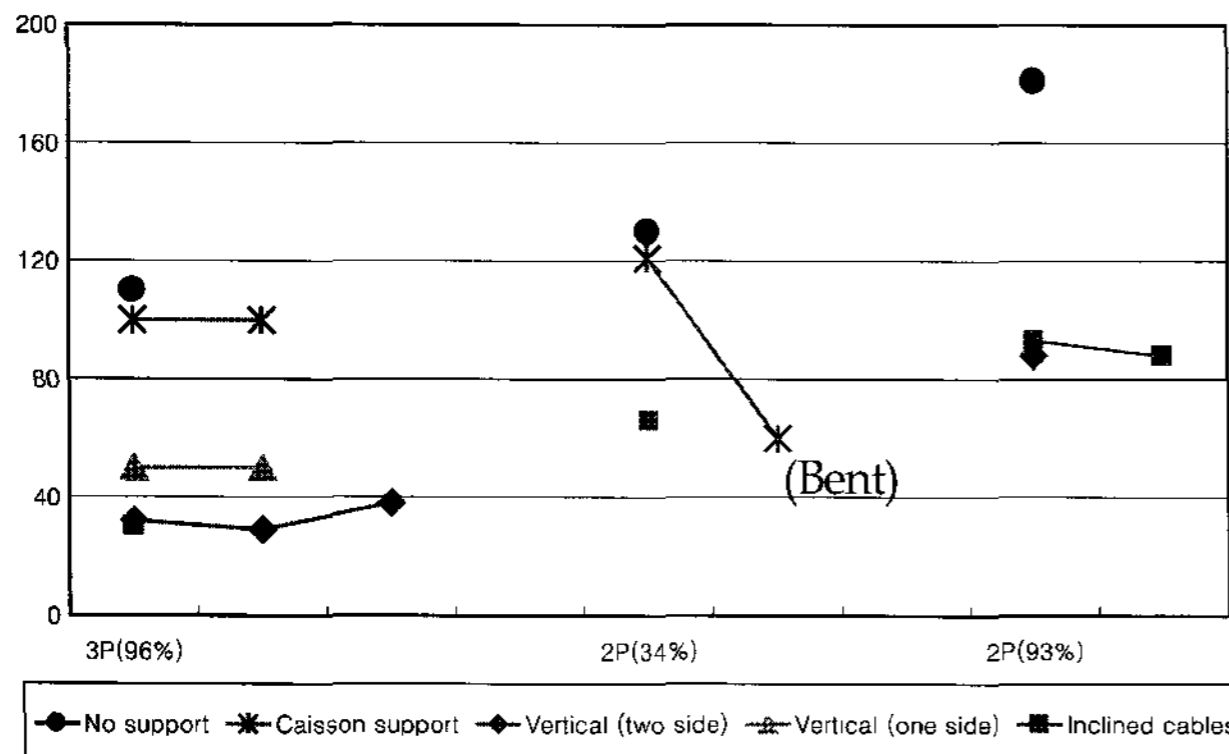
3주탑 사장교의 시공중 태풍시 내풍안정성 확보를 위한 풍동실험은 (주)대우건설 기술연구원의 경계층 풍동(3m×2m×20m)에서 수행하였으며, 2주탑 사장교의 경우는 FORCE Technology-DMI의 대형 경계층 풍동(13.6m×1.7m×15.5m)에서 수행하였다.(<그림 4> 및 <그림 5> 참조)

내풍안정성 방안의 효율성을 평가하기 위하여 주경간장 중앙에서 수직변위를 측정하고, 시공중 설계 풍속 및 한계풍속에서의 RMS값을 <그림 6>과 같이 정리하였다.

시공중 설계풍속 및 한계풍속에서 3주탑 사장교 주경간장 중앙의 수직변위 RMS는 양쪽 캔틸레버 경간에 적어도 2개 이상의 임시 케이블을 설치한 경우(B-E-W3, W4, W5, W8, W9)에 내풍안정성 확보 방안이 적용되지 않은 경우에 비하여 각각 10~15%와 19~23%로 크게 감소하였다. 따라서 양쪽 캔틸레버 경간에 적어도 2개 이상의 임시 케이블을 설치할 경우 제진 효과는 매우 뛰어났으며, 케이블의 경사와 수량 증가 여부는 크게 영향을 미치지 않았다. 주탑 케이슨에 임시 케이블을 설치한 경우(B-E-W1, W2)에는 각각 78%와 90~93%로 감소의 정도가 적었다. 한 쪽 캔틸레버 경간에만 임시 케이



〈그림 6〉 시공중 설계풍속 및 한계풍속에서 주경간장 중앙 수직변위의 RMS (m)



〈그림 7〉 시공중 설계풍속 및 한계풍속에서 주탑 하단부 모멘트의 RMS (MN·m)

블을 설치한 경우(B-E-W6, W7)에는 각각 40%와 67%로 감소하였다. 시공중 폐합전 가장 큰 하중을 받는 2주탑 사장교 가설단계 93%의 경우 시공중 설계풍속 및 한계풍속에서의 수직변위 RMS는 본 임시 케이블이 설치될 경우(A-E2-W1, W2, W3) 배치 형태와 관계없이 각각 39~44% 및 50~52%로 감소하였다.

기본적으로 가설단계의 내풍안정성 확보 방안의 목표는 주요 구조부재가 공용중에 받을 수 있는 최대 하중 이상을 시공중에 부담하지 않도록 제어하는 것이다. 부산~거제간 연결도로 사장교의 주탑은 곡선형 다이아몬드 형식으로서 미관과 경제성을 고려하여 최적설계를 하였고, 시공중 제어 대상은 주탑 케이슨 하단부에 걸리는 모멘트로 판단된다. 풍동실험은 평균 해수면(M.S.L.)을 풍동의 바다면으로 설정하였기 때문에 주탑 하단부 해발 약 3.8m 위치에 변형틀계를 부착하여 응력을 구하고 모멘트로 환산하였다.

시공중 설계풍속 및 한계풍속에서 주탑 하단부 모멘트의 RMS값은 <그림 7>과 같다. 시공중 설계풍속 및 한계풍속에서 3주탑 사장교 주탑 하단부 모멘트

의 RMS는 양쪽 캔틸레버 경간에 적어도 2개 이상의 임시 케이블을 설치한 경우(B-E-W3, W4, W5, W8, W9)에 각각 26~35%와 41~53%로 감소하였다. 이는 주경간장 중앙 수직변위 RMS의 제진 정도보다는 적지만 양쪽 캔틸레버 경간에 적어도 2개 이상의 임시 케이블을 설치할 경우 모멘트 감소 효과가 매우 뛰어났으며, 마찬가지로 케이블의 경사와 수량 증가 여부는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 주탑 케이슨에 임시 케이블을 설치한 경우(B-E-W1, W2)에는 시공중 설계풍속에서는 91%로 감소하였지만 한계풍속에서는 오히려 103~107%로 모멘트가 증가하고 있음을 알 수 있었다. 본 구조물의 경우 주탑의 강성이 상대적으로 크지 않으므로 주탑 케이슨에 임시 케이블을 설치하는 방안은 바람직하지 않은 것으로 사료된다. 2주탑 사장교 가설단계 34%에서 가설 벤트를 이용하는 방법은 제진효과가 뛰어났으나 경제성이 떨어져 검토 대상에서 제외하였다. 2주탑 사장교 가설단계 93%의 경우에 내풍 케이블이 설치된 경우 설계풍속 및 한계풍속에서 49~51% 및 58~62%로 감소하였다.

실험 결과 수직 및 경사 방향 내풍 케이블 배치의 제진 효과는 모두 우수하였으나, 해상 교량의 경우 임시 케이블 설치를 위한 가설 기초에 경사 케이블을 설치하는 방안은 시공성과 경제성이 떨어지므로, 실용성과 효율성을 고려할 때 수직방향 임시 케이블을 설치하는 것이 바람직한 것으로 사료된다.

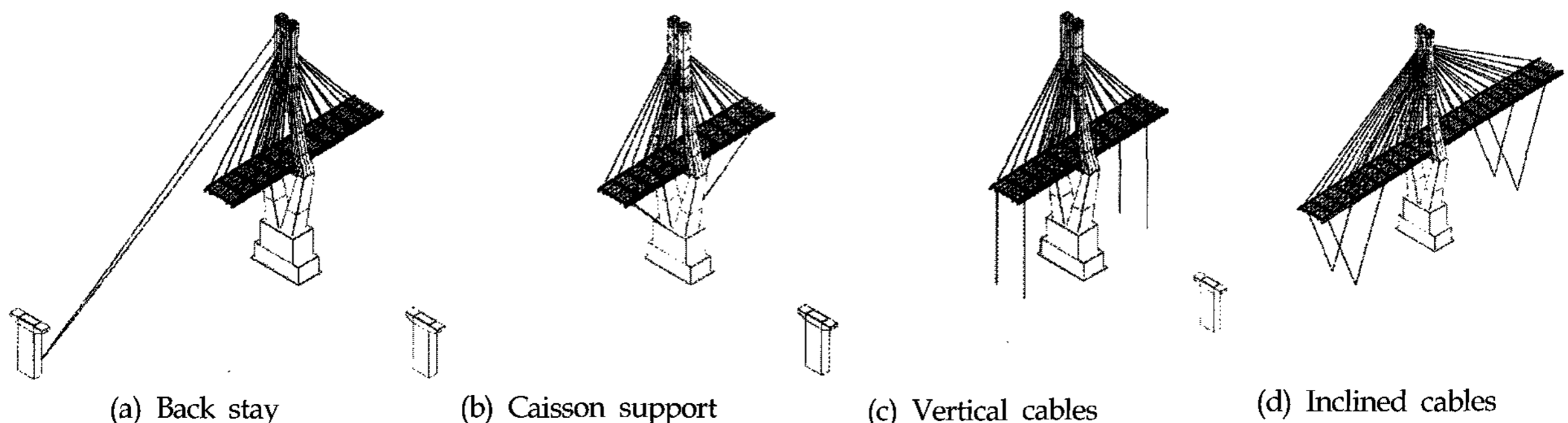
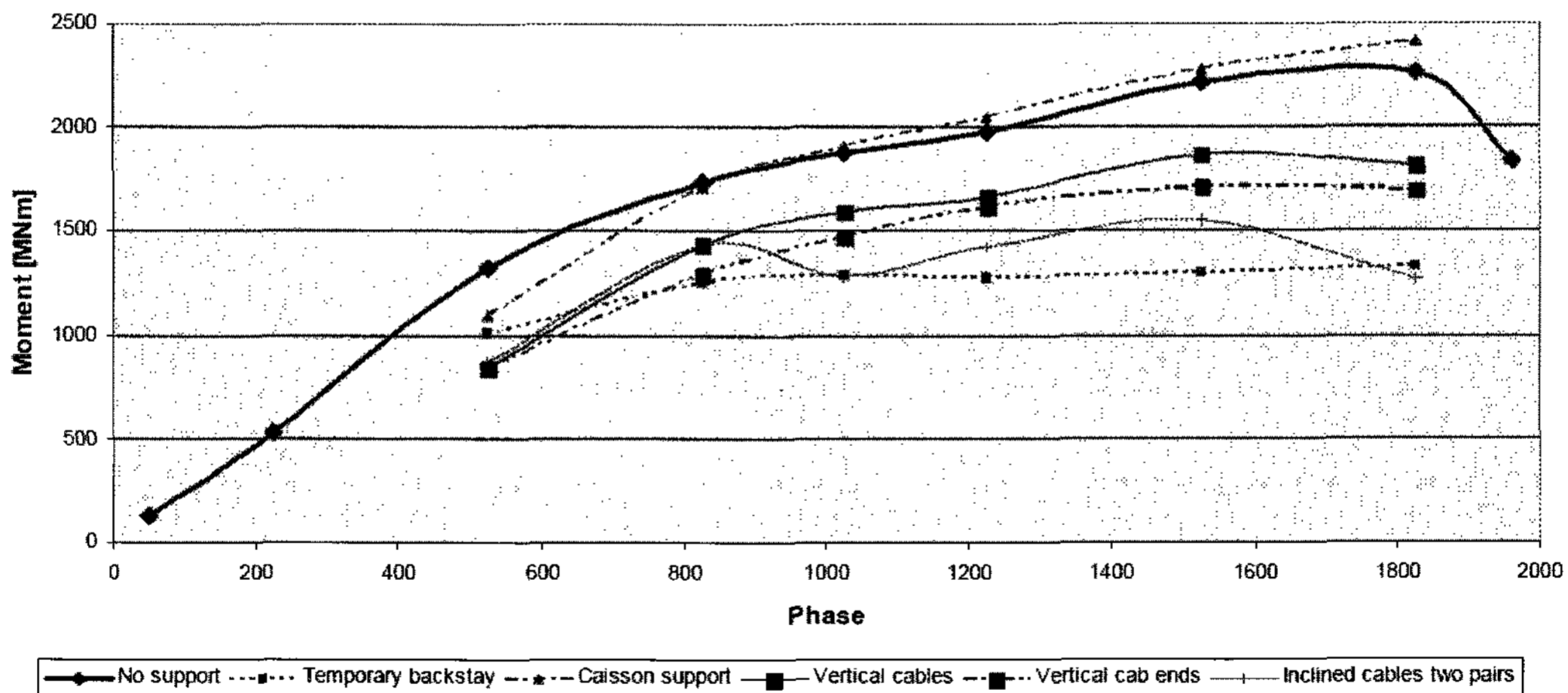
4. 동적구조해석(Dynamic Wind Analysis)

풍하중에 대한 동적구조해석은 Davenport 가 제안한 거스트 풍하중에 대한 버펫팅 해석 이론에 근거하여 설계사인 COWI에서 2주탑 사장교에 대하여 수행한 임시 케이블을 수직배치(이동위치 및 고정위치), 경사배치, 주탑 케이슨 지지, 주탑 첩두 고정(Back stay)하여 내풍 안정성을 확보하는 방안들에 대하여 검토하였다. <그림 8>의 주탑 케이슨 하단부 모멘트 해석 결과에 의하면 주탑 첩두 고정 방법이 가장 우수한 것으로 보인다. 그러나 이 방법은 주탑 첩두에 정착부를 설치하여 앵커피어까지 임시

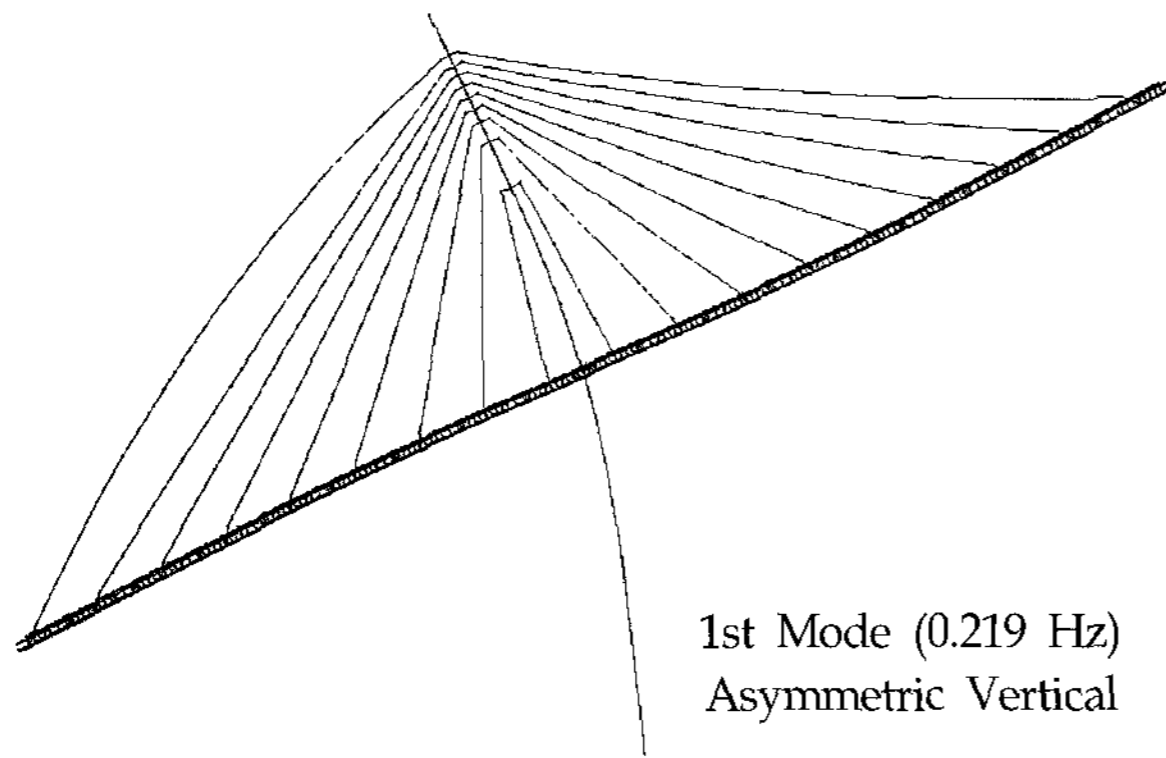
케이블을 긴장시켜야 하므로 실용성이 없으므로 선택 대상에서 제외하였다. 주탑 케이슨에 지지하는 방법은 앞선 실험 결과와 같이 제진 효과가 거의 없었으며, 이동위치 수직배치가 고정위치 수직배치에 비하여 효율성이 약간 높지만 모든 세그먼트마다 임시 케이블의 정착부를 설치하는 것은 경제성이 떨어진다. 동적구조해석 결과는 임시 케이블의 경사 배치가 수직배치에 비하여 상당히 효과적인 것으로 나타나고 있으나, 효율성이 유사한 것으로 나타난 풍동실험 결과와는 다소 차이가 있다. 이는 버펫팅 해석시 필요한 공기력계수 파라미터를 풍동실험에 의한 자료 부재로 인하여 평판(Flat plate)에 대한 수치해석(CFD) 결과 값을 적용하였기 때문에 정확성이 떨어진 것으로 사료된다.

5. TMD에 의한 안정화 방안

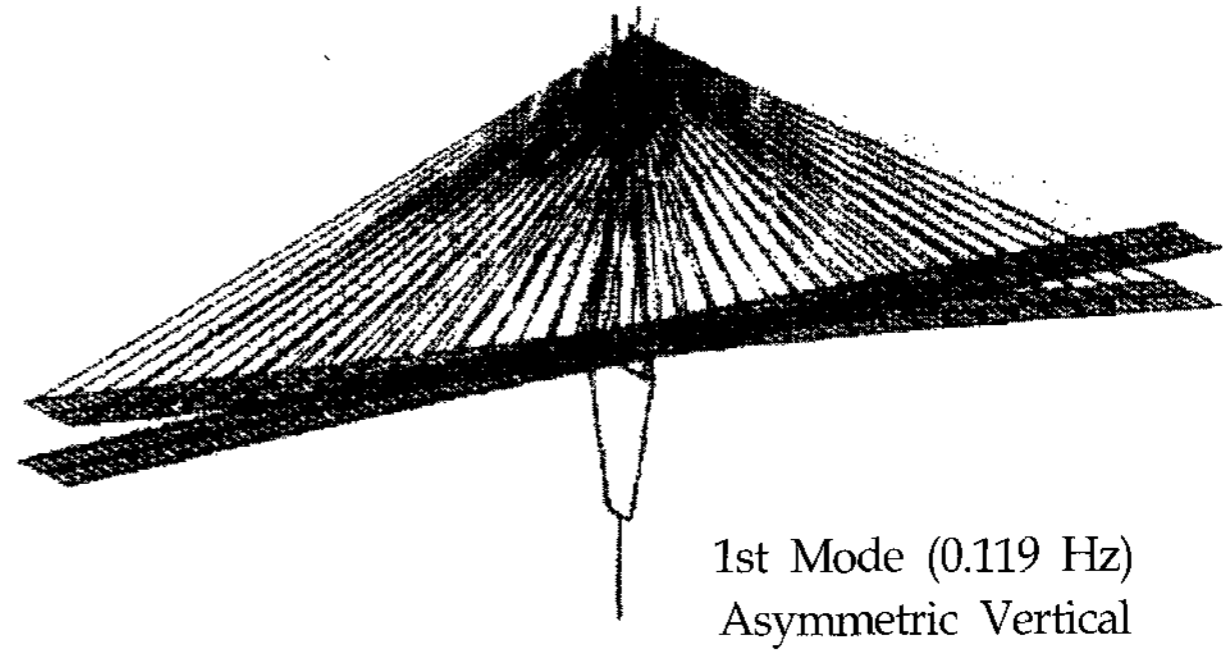
3주탑 사장교의 경우 2주탑 사장교에 비하여 교량의 규모가 작고 내풍 케이블 설치를 위한 말뚝기



<그림 8> 내풍안정성 확보 방안에 따른 주탑 케이슨 하단부 최대 모멘트 (COWI)

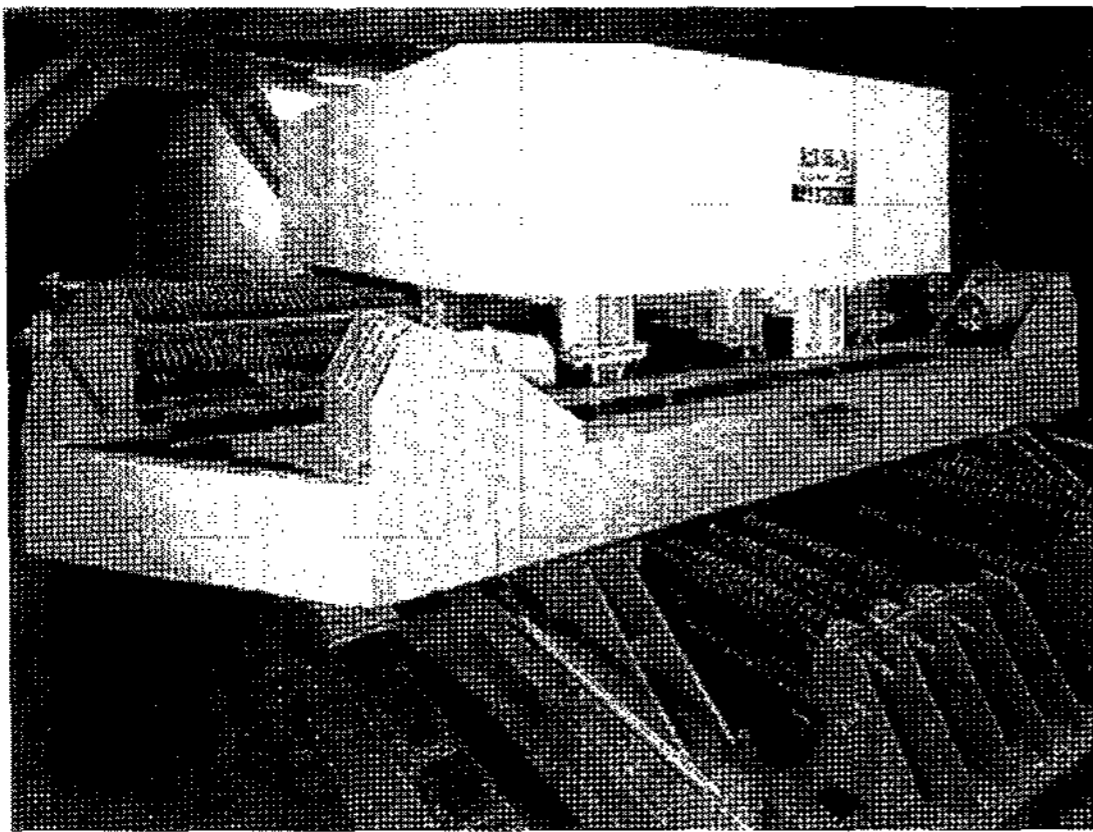


(a) 3주탑 사장교

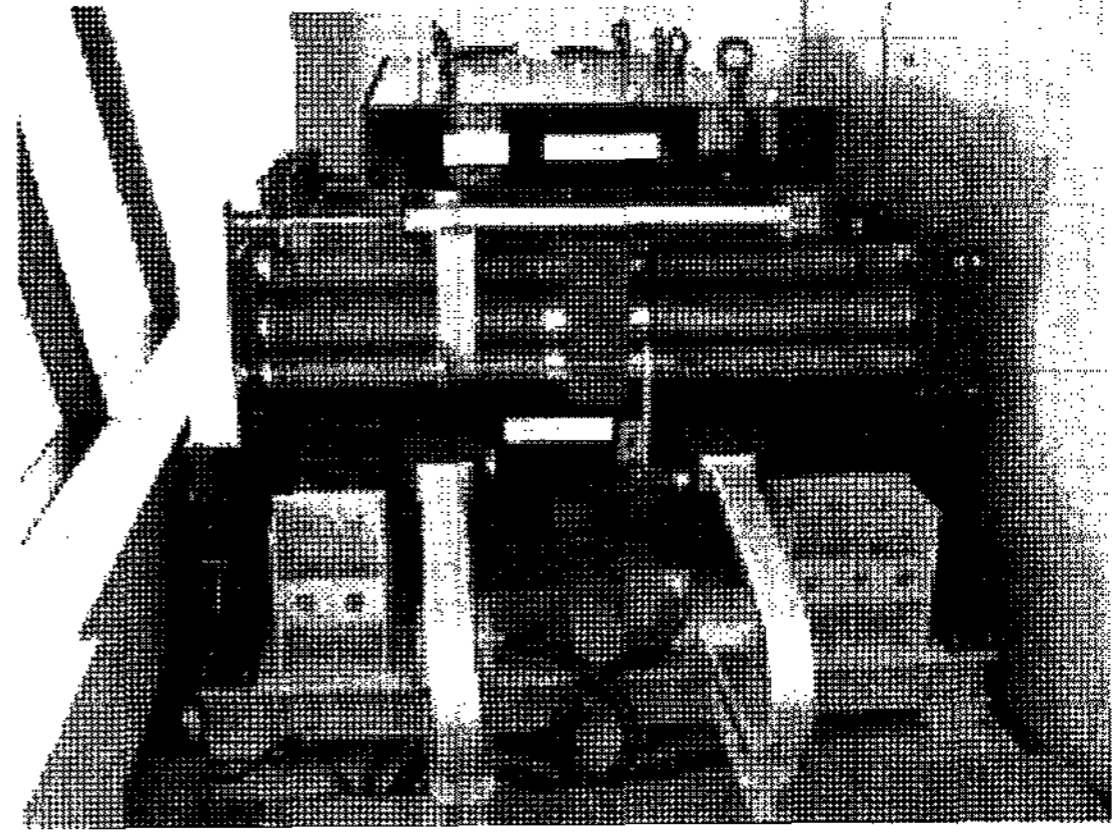


(b) 2주탑 사장교

<그림 9> 시공중 사장교의 고유진동수 및 진동모드



(a) TMD (일본)



(b) HMD (인천공항 관제탑)

<그림 10> 제진 장치 설치 예 (TE Solution)

초공사 지반조건이 열악함에도 불구하고 같은 방식의 내풍 케이블 설치 방법을 적용하는 것은 불합리해 보인다. 동적구조해석 및 풍동실험 결과를 분석해 보면 상판의 수직하중을 유발하는 주요 원인은 주탑의 1차 진동모드이다. 3주탑 사장교 주탑의 1차(0.219Hz) 및 2차(0.535Hz) 진동모드의 질량참여율은 57%로서 수평방향 40%나 수직방향 6%에 비하여 지배적이다. 이러한 고유 진동수와 진동량은 TMD (Tuned Mass Damper, 동조질량감쇠기)를 이용하여 제어가 가능한 것으로 판단된다. 반면에 2주탑 사장교의 경우 그림 9와 같이 주탑의 1차 진동수(0.119Hz)가 매우 낮기 때문에 장주기 제어를 위하여 능동제어방식과 같은 특수한 장치가 필요할 것으로 사료된다. <그림 10>은 수동형 제진장치인 TMD와 서보모터가 장착되어 능동형 제진이 가능한 HMD (Hybrid Mass Damper)의 설치 예를 보여준다. 그러나 능동형 제진장치의 경우 시공중 태

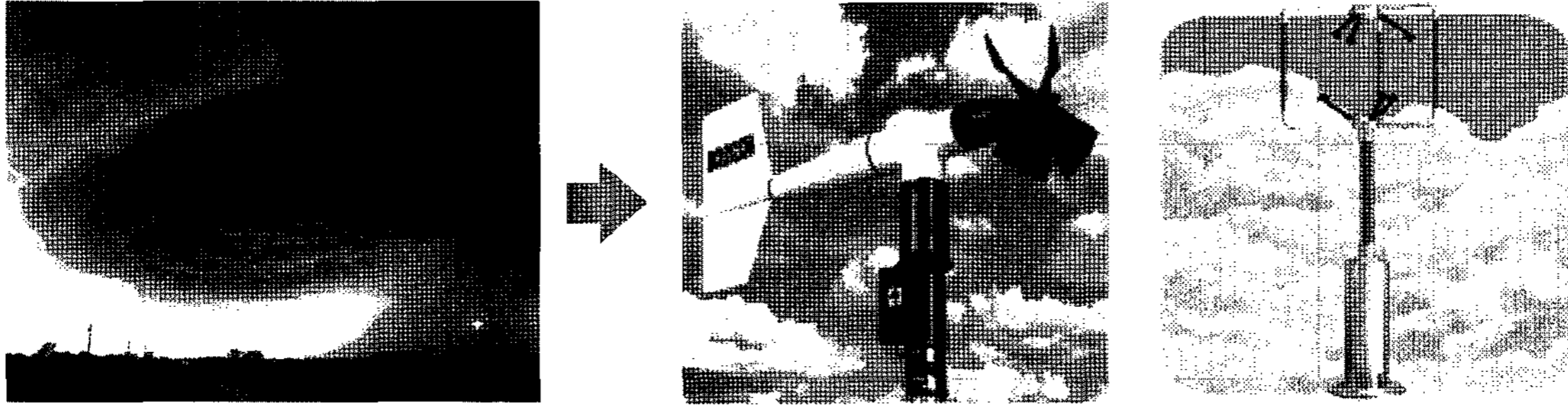
풍시 해상 교량에서는 발전기 등에 의한 전력의 공급이 어려우며, 동력이 중단될 경우 커다란 재해를 발생시킬 수 있으므로 시공중 태풍시 안정 대책으로는 적합하지 않으며, 가설시 작업성 향상이나 사용중 통행 안정성을 위한 진동억제대책으로 활용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

시공중 유지관리 계측시스템(Structural Health Monitoring System) 및 내풍 방재시스템을 활용한 사장교의 시공중 TMD에 의한 내풍 안정화 방안의 개요도를 다음의 <그림 11>에서 정리하였다.

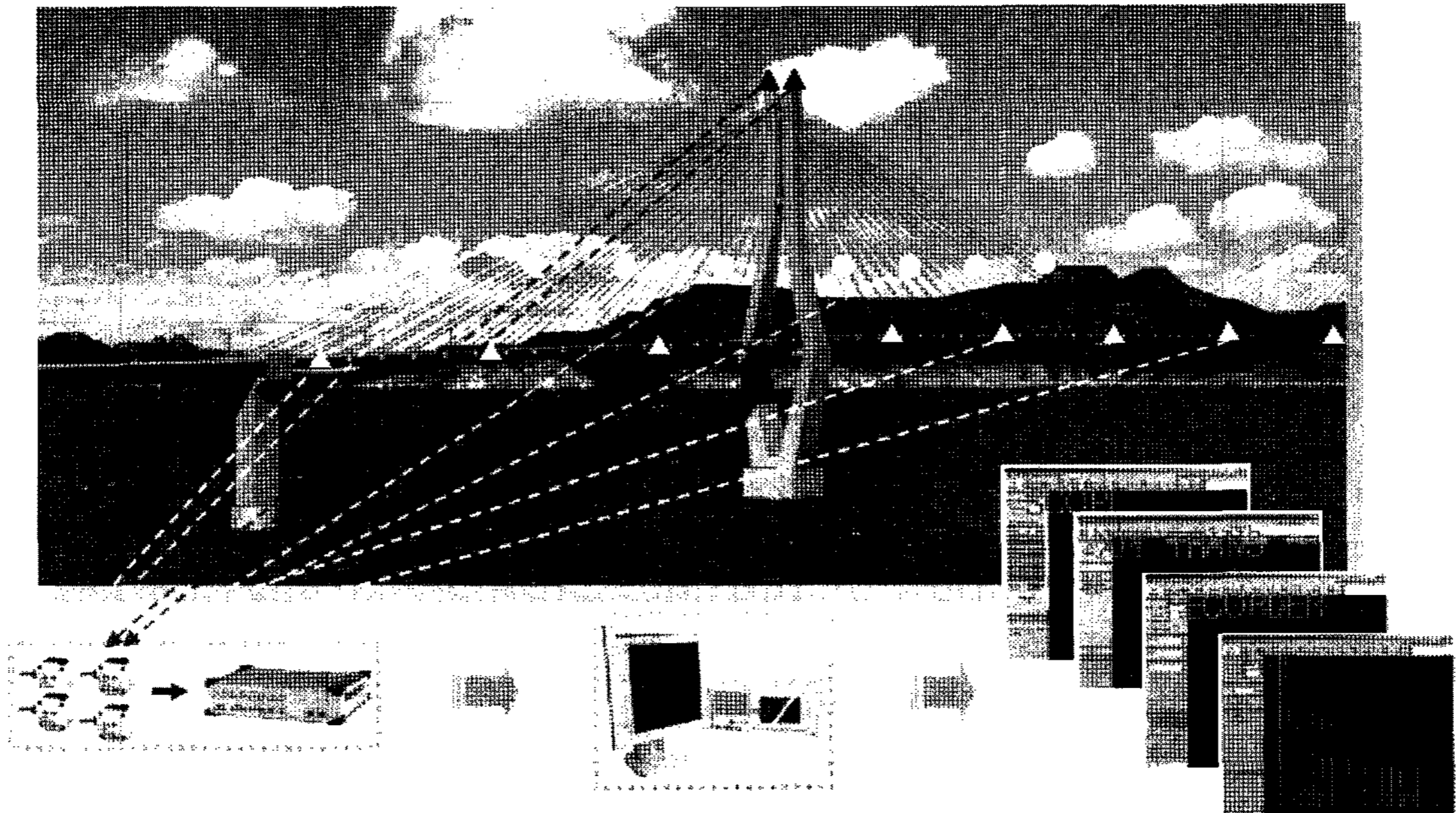
6. 맺음말

캔틸레버 가설 공법이 적용된 사장교의 시공중 태풍시 내풍안정성 확보 방안에 대하여 부산~거제간 연결도로 3주탑 및 2주탑 사장교를 대상으로 하여 내풍 케이블의 배치 방법에 따라 수직 배치, 경

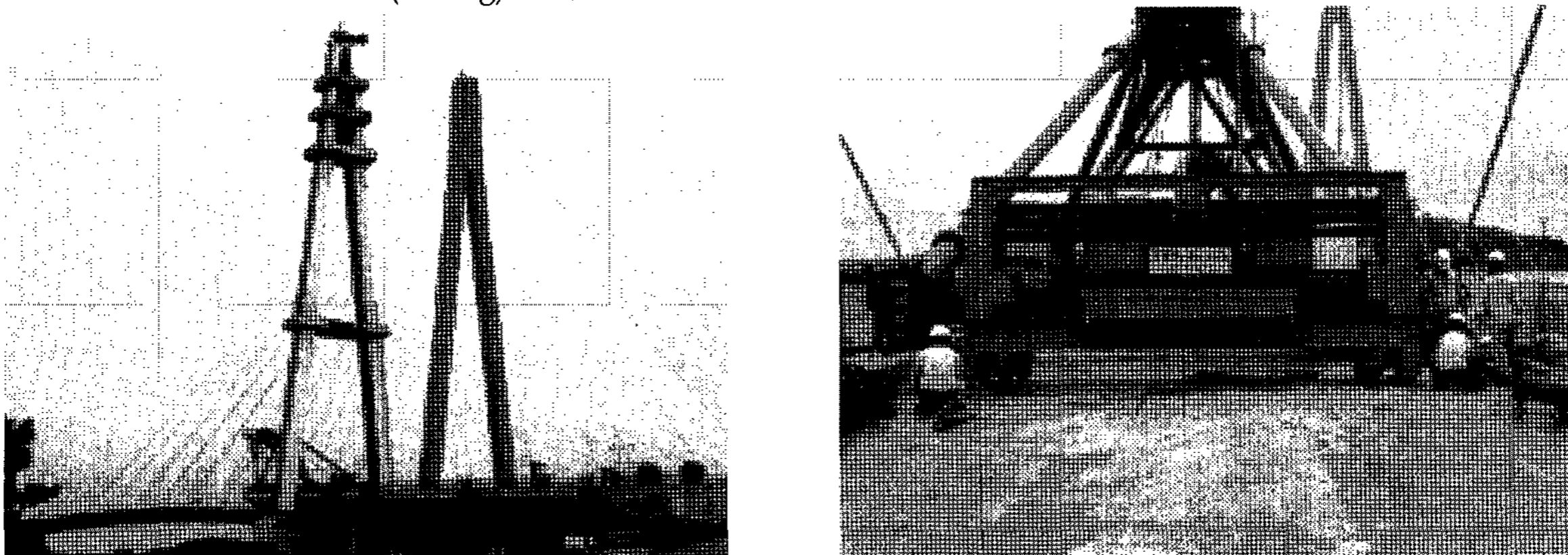
① 태풍 시 헬스모니터링에 의한 사장교 TMD 가동 경고 발령



② 가속도 측정 후 고유진동수 및 진동모드 해석 수행



③ TMD 설치 및 구조물과 동조(Tuning) 작업 시행



④ 태풍 기간 동안 제진 후 해체

〈그림 11〉 사장교의 시공중 TMD에 의한 내풍 안정화 방안

사 배치, 주탑 케이슨 지지, 주탑 침두 고정 방법, 가설벤트 설치 방법 및 TMD 설치 방안에 대하여 풍동실험 및 동적구조해석을 통하여 검토하였다. 실용성과 효율성을 고려하여 검토한 결과 주경간장

230m의 3주탑 사장교는 TMD를 이용하여 제진하고 주경간장 475m의 2주탑 사장교는 태풍시 수직방향 내풍케이블을 설치하는 방안이 가장 바람직한 것으로 판단된다.

부산~거제간 연결도로는 외해에 위치하고 있기 때문에 13m까지 올라가는 파고와 80m/s까지 부는 한계 풍속과 같은 극한의 해상조건에서 설계와 시공이 이루어지고 있다. 2010년 부산과 거제를 잇는 본 연결도로가 완공될 경우 통행시간 단축은 물론 관광자원시설 조성 및 물류비용절감 등 지역 경제 활성화에 크게 이바지할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 조재영, 김영민, 이학은, “내풍케이블 배치에 따른 가설 중 사장교의 공기역학적 거동 비교”, 한국강구조학회논문집, 제19권, 제2호, 2007, pp.147-160.
2. 김영민, 김대영, “풍공학적 관점에서 바라본 부산~거제간 연결도로 교량”, 제10회 한국풍공학회 학술발표회 논문집, 2007, pp.114-119.
3. 김영민, 김대영, “강합성 2주형 사장교의 시공중 내풍 안정성 확보 방안 연구”, 한국방재학회 학술발표회 논문집, 2008, pp.63-66.

1. 조재영, 김영민, 이학은, “내풍케이블 배치에 따른