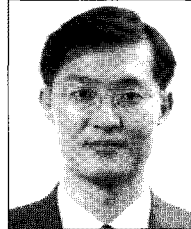


부산~거제간 연결도로 교량의 내풍공학과 풍동실험

Wind Engineering and Wind Tunnel Test for the Busan~Geoje Fixed Link Bridges



김 영 민*



Lars Hauge**

* (주)대우건설 기술연구원 방재연구팀 책임연구원
** COWI사 교량부문장

1. 서 론

부산~거제간 연결 도로는 대한민국의 남동부 지역에 서 진행되고 있는 주요 사회 기반구조를 구축하는 프로젝트이다. 본 연결 도로는 2010년 12월에 준공될 예정이며, 부산광역시 강서구 가덕도와 경상남도 거제시 장목면을 연결하여 편리한 교통망이 구축될 예정이다. 부산~거제간 연결도로는 총 8.2km 길이로, 주요 세 가지 구조물로 구성 되어 있다(사장교 2개소 : Lot 1 및 Lot 2, 침매터널 1개소 : Lot 3). 또한, 침매터널과 사장교 중간에 있는 섬들에 시 공되는 도로와 굴착 터널 및 가덕도와 거제도에 관리 사무 소와 영업소도 제공할 계획이다.

지구온난화와 기상이변으로 인하여 초대형 태풍의 발생 가능성은 점차 증가하고 있으며, 교량의 경간이 길어질수 록 바람에 취약한 구조가 된다. 따라서 장대교량일수록 시 공 및 운영중 내풍안전성 확보를 위하여 내풍설계와 풍동 실험을 충실하게 수행할 필요가 있다.

본고에서는 부산~거제간 연결도로 교량을 풍공학적 관 점에서 접근하여 설계를 지배하는 극한 하중(풍하중, 파하 중, 선박충돌하중) 중에서 특히 바람에 대한 설계, 해석 및 풍동실험 내용과 시공중 내풍안전성 확보를 위하여 내풍케 이블을 대체하여 적용한 친환경 사장교 가설방법인 TMD

공법의 적용 과정을 살펴보고자 하였다.

2. 풍하중 (Wind Load)

1999년 CSTB(프랑스, 과학기술센터)에서는 부산~거제 지역에 대한 극한풍속결정을 위한 해석을 수행하였다. 본 해 석은 1963년 이후 부산 기상관측소의 10분간 최대풍속과 1978년과 1996년 사이의 태풍자료를 가지고 수행되었다. 풍 속자료는 1904년과 1963년 사이의 부산관측소 자료와 1985 년 이후 마산관측소 자료도 입수되었으나 적합하지 않은 것 으로 판명되었다. 기상관측소와 현장 사이에는 기후조건이 다르므로 측정된 자료로부터 전환시킬 필요가 있다. 이 작업 은 관측소의 높은 지형조도($z_0 = 0.8m$)와 지형계수($k_t = 0.26$) 및 현장의 낮은 지형조도($z_0 = 0.0035m$)와 지형계수($k_t = 0.17$) 를 적용하여 고려되었다. 이 값은 현장에서의 값을 보수적으 로 전환시킨다. 이 전환된 자료를 이용하여 극한풍속이 결정 되었다. 태풍해석(Typhoon Analysis)에 의하면 재현기간 50년 에 대하여 17.8m에서의 10분간 평균풍속은 45m/s, 재현기간 100년에 대하여 10분간 평균풍속은 48m/s로 추정된다. 대의 해석(Synoptic Analysis)에 의하면 재현기간 50년에 대하여 42m/s로 추정된다. 따라서, 극한풍속은 태풍해석에 의하여 결

정된다.

2003년 막대한 피해를 발생시킨 태풍 매미의 영향을 고려하기 위하여 1996년부터 2003년까지 발생한 12개 태풍에 대한 추가적인 해석을 수행했으며, 해석결과, 기존에 계산된 100년 재현기간 10분간 평균풍속의 범위에 포함되는 것으로 계산되었다.

풍속분포는 지표면에서 로그함수형태로 분포하는 유럽 코드모델이 이용되었다. 수직 높이에 따른 10분간 평균풍속, 거스트풍속 V_g 및 난류강도 I_u 는 다음과 같다. 여기서, V_b 는 극한 풍하중 해석에 의하여 구해졌으며, 지형조도(z_0)와 지형계수(k_t)는 표 1과 같다. 표 2에서는 태풍매미와 설계기준의 풍속을 비교하였다.

$$V_{10}(z) = V_b \cdot k_t \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (1)$$

$$V_g(z) = V_{10}(z) \cdot (1 + 3.5 \cdot I_u(z)) \quad (2)$$

$$I_u(z) = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (3)$$

표 1 지형특성

풍향	지형조도, z_0 (m)	지형계수, k_t
교축직각방향	0.0075	0.17
교축방향	0.05	0.19

표 2 설계기준 풍속과 태풍 매미 풍속 비교

풍속(m/s)	태풍매미		설계기준
	부산관측소	현장(*)	
10분간 평균(높이17.8m)	26.1	40.7	48.6
3초간 거스트(높이17.8m)	42.7	66.6	70.5

(*) 남풍을 고려하여 수정계수 1.56 적용.

풍하중에 대한 동적 구조해석을 위하여 데이븐포트 버펫팅 이론(Davenport Buffeting Theory)이 이용되었으며, 변동속도성분의 스펙트럴 밀도(Spectral Density)와 길이축척(Length Scale)과 코히런스(Coherence)를 위한 표준값을 갖는 카이말 스펙트럼(Kaimal Spectrum)을 채택하였다.

3. 전산해석(Computational Fluid Dynamics)

기본설계단계에서 풍하중 평가를 위하여 전산해석(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 수행하였다. 전산해석은 COWI A/S의 교량 내풍해석 전용프로그램인 DVMFLOW

(Discrete Vortex Method, 2차원 Code)를 이용하여 설계에 필요한 공기력(항력, 양력, 모멘트력)계수를 산출하여 설계에 반영하였으며, 전산해석에서 계산된 풍하중은 최종적으로 실시설계단계에서 수행한 풍동실험을 통하여 보완하였다.

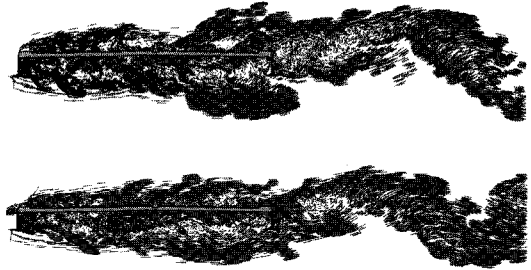


그림 1 전산해석에 의한 Fairing 유무에 따른 상부구조단면 주위의 와류흐름

4. 풍동실험(Wind Tunnel Test)

부산~거제간 연결도로는 기본설계 및 실시설계 단계에서 풍동실험을 수행하여 내풍안정성을 확보하도록 하였으며, 수행한 풍동실험으로는 사장교 상부구조 단면모형실험, 독립주탑의 풍력 및 풍압실험, 접속4 병렬교의 이격거리에 따른 공기력계수 측정 실험, 가설단계를 포함한 3차원 전교 모형실험 등이 있다.

4.1 사장교 상부구조 단면모형실험

주예비항로 2주탑사장교 상부구조 단면모형실험은 기본설계시 전북대학교에서 수행하여(S=1/80) 2.5m×1m 크기의 Fairing 설치가 제안되었다. 실시설계에서는 좀 더 심도있는 평가를 위하여 캐나다 온타리오대학교에 의뢰하여(S=1/50) 오르막차로 추가로 인한 비대칭단면의 남풍 및 북풍의 영향, 3단계 감쇠비의 영향, 3단계 기류의 영향, 시공단계 조사 등을 통하여 최종적으로 2.5m×1.0m의 Fairing 크기를 2.0m×0.8m로 조정하였다. 부예비항로 3주탑사장교에 대한 실험은 고려대학교에서 수행하여(S=1/70) Fairing이 없어도 충분한 내풍안정성을 확보하고 있는 것으로 평가되었다.

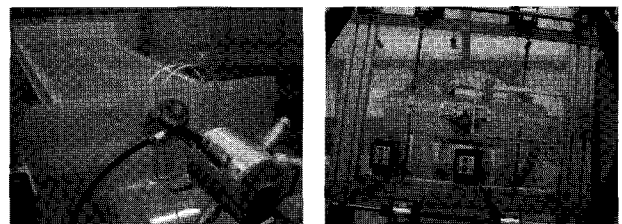


그림 2 사장교 상부구조 단면모형실험 장면 (3주탑사장교)

4.2 접속4 병렬교 공기력계수 측정 실험

침매터널과 연결되는 접속4 병렬교는 오르막차로를 포함하며 도로주행이 용이한 선형유지를 위하여 단일 교각위에 선형을 따라 이격거리가 변하는 병렬교로 설계되었다. 따라서, 이격거리에 따른 공기력(항력, 양력, 모멘트력)계수 변화 분석을 위하여 풍동실험(고려대학교) 및 전산해석(충북대학교)을 수행하였고, 그 결과를 설계에 반영하였다.

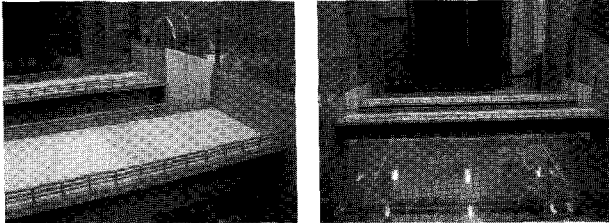


그림 3 접속4 병렬교 공기력계수 측정 실험 장면

4.3 독립주탑의 풍력 및 풍압실험

사장교의 주탑은 케이블을 이용하여 상판을 지지하는 주요구조물로서 풍하중이 설계를 지배하게 된다. 정확한 풍하중 평가를 위하여 (주)대우건설 기술연구원에서 독립주탑에 대한 풍력 및 풍압실험을 수행하였으며, 이를 근거로 하여 산출한 풍력계수를 설계에 반영하였다.

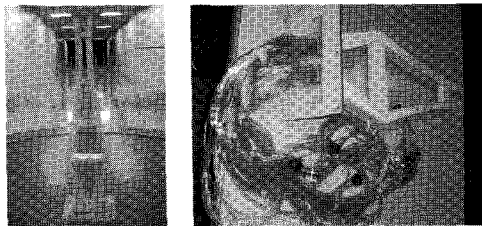


그림 4. 독립주탑의 풍력 및 풍압실험

4.4 가설단계를 포함한 3차원 전교모형실험

최종적으로 사장교의 내풍안정성 평가를 위하여 가설단계를 포함한 3차원 전교모형실험을 수행하였다. 특히, 가설단계 태풍시에도 내풍안정성을 확보할 수 있도록 내풍케이블 가설공법에 대하여 심도있는 실험 및 연구를 수행하였다. 주예비항로 2주탑사장교는 덴마크 Force Technology (구DMI)에서, 부예비항로 3주탑사장교는 (주)대우건설 기술연구원에서 각각 풍동실험을 수행하였다.

5. 시공중 내풍안정성 확보를 위한 TMD

사장교 가설에 흔히 사용되는 캔틸레버 공법은 완성계에 비하여 시공중에 더 바람에 취약한 구조를 가진다. 특히 해상교량은 주위 장애물없이 바람에 직접 노출되는 구조물로 큰 풍진동이 예상되기 때문에 풍하중에 대한 각별한 안정성 확보가 요구된다. 사장교의 캔틸레버 가설 공법 적용시 시공중 태풍시 안정성을 확보하기 위하여 흔히 내풍케이블이라는 임시 케이블을 설치하고 있으나, 이 방법은 케이블 고정을 위한 중력식 블록이나 임시 파일기초 등의 시공이 필요하여 비용이 증가하고 환경오염을 유발시킬 수 있는 단점이 있다. 이에 비하여 TMD 등 진동제어 장치의 도입은 해저면의 기초설치나 철거의 문제가 없고 선박통행에도 지장을 주지 않으며 환경 친화적인 대안이 될 수 있다. TMD는 80년대에 이르러 이론적인 검증이 마무리되었으며, 현재까지 일본을 비롯한 각국의 초고층건물 및 장대교량에 대한 다수의 적용사례를 통하여 진동제어를 위한 일반적인 방법 중의 하나로 자리잡고 있다.

5.1 대상교량 및 풍동실험

TMD 가설 공법은 부산~거제간 연결도로(거가대교)의 장

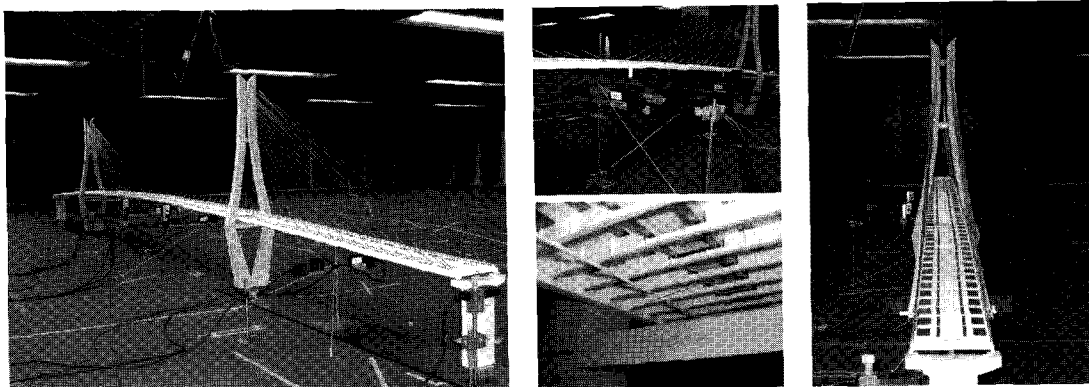


그림 5 전교모형실험 장면 (2주탑사장교)

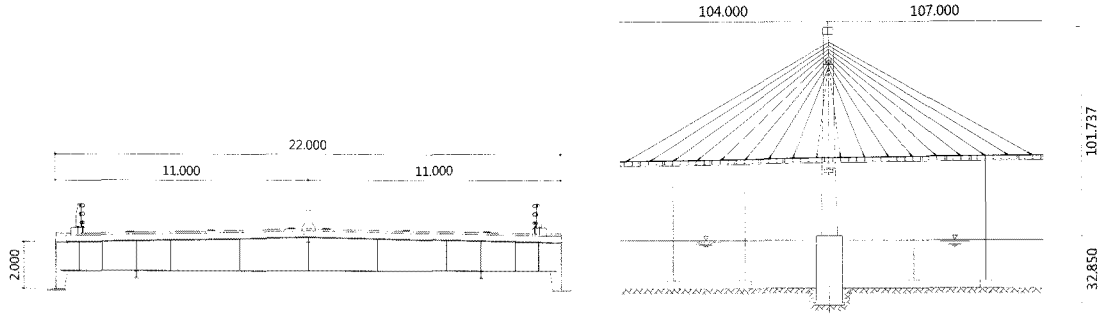


그림 6 대상교량 가설단계 96% 정의

합성 2주형 3주탑사장교(108m-230m-230m-108m)에 적용하였으며, 풍동실험과 성능시험을 통하여 TMD에 의하여 시공 중 태풍시 내풍안전성을 위한 제진효율을 확보할 수 있는지를 검증하고자 하였다. 3주탑 사장교의 가설단계 중 가장 취약한 구조계라 판단되는 키-세그먼트 폐합 직전 단계(가설단계 96%)에 대하여 TMD를 고려한 1:100 축소 공탄성 모형을 이용한 풍동실험을 국제공인시험기관(KOLAS) 인정기관인 (주)대우건설 기술연구원에서 수행하였으며, 대상 시공단계의 단면제원 및 형상은 그림 6과 같다.

거가대교 3주탑 사장교에 설치된 TMD는 이동질량의 크기와 스트로크, 제진율, 본 구조물에 미치는 영향 등을 종합적으로 고려하여 24ton 진자형으로 최종 결정되었으며, 이때 최적 감쇠비는 3.16%이다. 실제 설치되는 TMD는 질량체의 팔길이를 조절하여 진동수를 동조하며, 프레임과 질량체 팔(Mass Arm)을 양단 힌지의 유압댐퍼 두개로 연결하되 정확한 감쇠비의 구현을 위해 댐퍼의 연결위치를 상하로 조절하도록 설계되어 있다.

풍동실험을 위한 TMD의 이동질량은 Froude 상사법칙에 따라 축소되었으며, 추의 팔길이를 조절하여 진동수가 모형의 1차 모드에 동조되도록 하였다. 그러나 풍동실험에서는 실험스케일에 맞는 소형의 댐퍼 제작이 불가능하므로 실험용 TMD 모형에 감쇠효과를 구현할 수 있도록 점성유체와 저항판을 이용한 장치를 고안하여 설계치와 유사한 감쇠효과(감쇠비 3.35%)를 갖도록 하여 실험을 수행하였다.

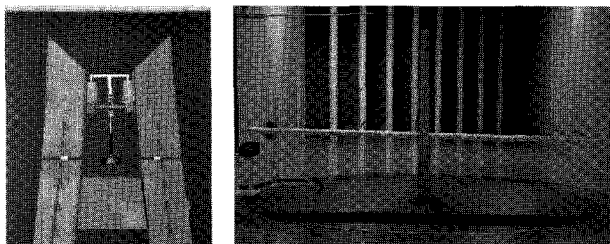


그림 7 TMD를 고려한 가설단계 3차원 공탄성 모형 풍동실험 (1/100 Scale)

보강형의 변위, 주탑 상단부의 가속도, 주탑 하부의 모멘트를 측정 대상으로 하였으며, TMD가 설치되지 않은 경우와 TMD제진시, 비제진시 응답을 측정하여 TMD의 제진효과를 검증하였다. 풍동실험 결과 TMD 제진시 변위와 모멘트 측정결과가 최대 피크 값을 기준으로 60.4%~65.8%로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 실험 결과를 그림 8에 비교하였다. 따라서 TMD를 이용한 내풍안정화 방안의 제진효율을 검증하기 위하여 TMD를 모사한 3차원 공탄성 모형 풍동실험을 수행한 결과 제진 목표치(제진효율 30%)를 충분히 만족하고 있는 것으로 평가되었다.

5.2. 현장설치 및 성능시험 결과

TMD는 공장시험이 완료된 후 설치공사에 사용될 타워 크레인의 용량과 현장이동용 트럭의 적재용량(크기 및 중량)을 고려하여 분해된다. 현장으로 반입된 부재는 바지선으로 3주탑 사장교 현장으로 이동되며, 보강형 시공 이전까지 운용되는 타워크레인으로 인양되어 TMD 설치위치에서 조립된다.

TMD의 현장설치 완료 후 각 가설단계에 대하여 TMD는 주탑의 동적특성에 따라 튜닝하여 운용한다. TMD튜닝은 주탑의 동특성 확인시험 결과를 기준으로 진동수 및 감쇠비를 조정하는 것으로, 튜닝 후에는 TMD의 제진성능을 시험으로 확인하여야 한다. 그림 10은 TMD로 주탑을 가진한

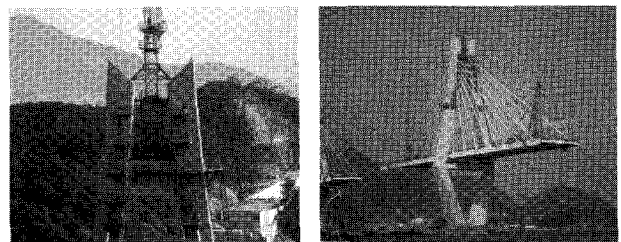


그림 9 3주탑사장교에 설치 및 운영중인 TMD

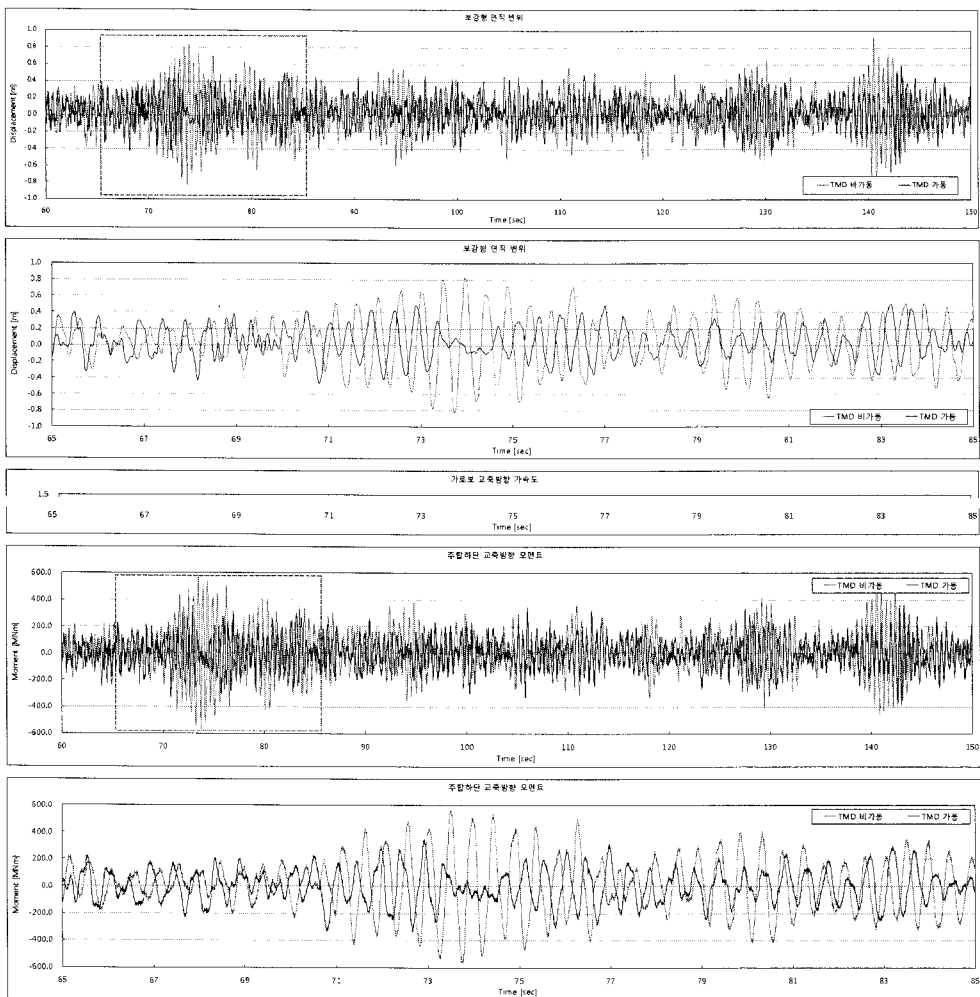


그림 8 TMD 성능 검증 실험 결과 (보강형 연직 변위 및 주탑 하단 모멘트)

후의 TMD가 작동하는 상태에서의 제진 자유진동시험의 결과를 나타내며, 표 3에서 TMD에 의한 주탑의 유효감쇠비가 비제진시 평균 0.69%에서 5.02%로 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

구조물의 풍진동이 감쇠비의 제곱근에 반비례하므로 현상성능시험 결과 본 가설단계에서는 TMD에 의하여 약 60%의 제진효과가 예상된다. 이러한 설계치 이상의 제진효과는 본 현상성능시험에서 조화진동에 가까운 외력이 작용하였으며, 설계단계에서 2단가보다 상단으로 가정한 TMD의 제어력 작용점이 외부프레임과 주탑 레그부와의 연결로 주탑상부로 크게 이동되었기 때문으로 판단된다.

표 3 성능시험결과 (P8, 2010.03.18)

설계치 (%)	측정치 (%)						평균값
	구역 I			구역 II			
	Pos.	Neg.	Ave.	Pos.	Neg.	Ave.	
2.23	6.39	6.55	6.47	3.44	3.71	3.57	5.02

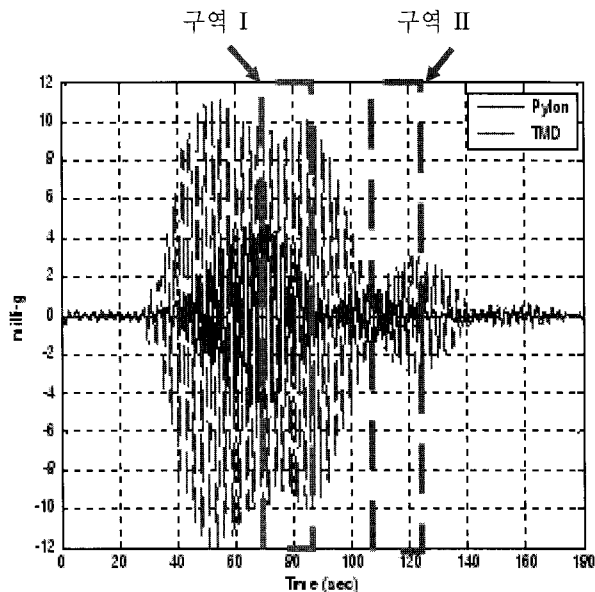


그림 10 P8 성능시험결과 (2010.03.18)

6. 결론


부산~거제간 연결도로는 외해에 위치하고 있기 때문에 태풍으로 인한 극한의 풍하중과 파랑 조건에 노출되어 있다. 13m까지 올라가는 파고와 80m/s까지 부는 한계 풍속과 같은 해상 조건이 설계를 지배하는 주하중이었으며, 주요 항만 시설이 근접해 있으므로 본 구조물은 극한 선박충돌 하중에도 견디도록 설계되었다.

바람에 대한 극한해석, 전산해석 및 풍동실험을 통하여 내풍안정성을 검토한 결과 설계기준내에서 유해한 와류진동, 버펫팅, 플러터와 같은 진동현상이 발생하지 않았으므로 부산~거제간 연결도로 교량은 충분한 내풍안정성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

캔틸레버 가설 공법이 적용된 부산~거제간 연결도로 3주탑 사장교의 풍진동을 제어하여 시공중 내풍안정성 확보를 위하여 TMD를 설계, 공장시험, 설치 및 현장성능시험을 수행하였다. 3차원 공탄성 모형을 제작하여 풍동실험을 수행하였고, 현장설치 후 TMD 운용과정에서 자유진동시험을 통하여 TMD의 제진성능을 확인한 결과 설계목표치 이상의 제진효과를 충분히 얻을 수 있음을 확인하였다. 시공중 TMD에 의한 내풍 대책은 내풍케이블 가설에 따른 중력식 블록이나 임시 파일기초 등의 시공이 불필요하여 경제성, 시공성, 친

환경성이 우수하고 선박통행에도 지장을 주지 않는 장점을 가지고 있는 친환경 녹색 성장기술로 사료된다.

참고 문헌

1. L. Hauge, C.H. Kim, Y.M. Kim, A. Galmarini, 'Design of the Busan-Geoje Fixed Link Bridges Considering Extreme Loads', 대한토목학회 교량설계핵심기술연구단 특별세션 논문집, 2004, pp.75-86.
2. 김영민, 윤영훈, 박충환, 장현갑, '부산~거제간 연결도로와 바람', 대한토목학회 정기학술발표대회, 삼다도세션, 제주 국제컨벤션센터, 2005.
3. 김영민, 김대영, '풍공학적 관점에서 바라본 부산~거제간 연결도로 교량', 한국풍공학회 학술발표회 논문집, 2007, pp.114-119.
4. 김영민, 광영학, 김대영, 주석준, '사장교의 시공중 TMD에 의한 제진 방안', 한국풍공학회 학술발표회 논문집, 2008, pp.243-248.
5. 김영민, 주석준, 신승환, 김대영, '가설단계 사장교의 안전성 확보를 위한 TMD의 적용', 한국풍공학회 학술발표회 논문집, 2010, pp.192-197. 

[담당 : 김명한, 편집위원]