

TMD를 이용한 기존 보도교의 효율적 진동제어 Effective Vibration Control of Existing Footbridge Using Tuned Mass Damper

최석정* · 유문식** · 안상구*** · 박찬희****

Choi, Suk-Jung, Yoo, Moon-Sig, Ahn, Sang-Gu and Park, Chan-Hee

Key Words : Tuned Mass Damper(동조질량감쇠장치), footbridge(보도교), Vibration Control(진동제어)

ABSTRACT

This paper describes the vibration control using a tuned mass damper(TMD) for the existing footbridge. The footbridge connecting driveway to the Stadium is the simple steel box-girder bridge with the main span length of 44.6m. This footbridge has light weight(=25.3kN/m) and pedestrians walking on the footbridge were found to induce resonance at the fundamental mode of the structure, resulting in unacceptable accelerations in it. Taking into account economical and constructional benefits, TMD was designed to damp the vibrations of the modes next to the natural frequency caused by a pedestrian, with a limitation criteria of vertical amplitude. A set of two 500kgf vertical TMDs was manufactured by KR and installed into the railings next to the central section of this footbridge. The installation of TMDs reduced the peak acceleration in the meeting box to less than 90%. It is hoped that the study will present bridge engineers with a measure of retrofitting footbridges to make them more friendly to users.

1. 서론

최근 차량의 증가로 인해 야기되는 교통의 혼잡을 피하기 위해 도심도로의 폭이 점차 넓어지고 있다. 이로 인해 도로를 횡단하는 보행자의 안전을 도모하기 위해 도로를 횡단하는 횡단보도보다는 보도교의 가설이 계속 증가되는 추세이다.

일반적으로 도심지 횡단을 위한 보도교는 4차선 이상의 도로에서 가설되고 있으며 광로인 경우 교통의 흐름과 차량 속도의 고속화로 인하여 횡단보도를 이용한 보행자의 도로 횡단은 교통흐름의 정체를 유발하여 경제적 손실이 발생된다. 따라서 4차선 이상의 광로에서는 보도교를 가설하여 횡단을 하도록 하고 있으나, 보도교 지간이 30m 이상이 되는 경우가 많아 구조물의 안전성, 사용성을 고려하여 가설되어야만 한다.

본 연구의 목적은 민원이 접수된 대전 월드컵경기장 진입 보도교의 구조 및 진동 상태를 정밀 조사하고, 이에 대한 대

책 수립 및 시행을 수행하여 구조물의 점진적 손상을 방지하고 보도교 통행자의 사용성 및 편의성을 증대시키며, 공용 기간 동안 유지관리의 효율성을 제고시키는데 있다.

이를 위하여 구조물의 고유주기 및 상시진동 및 강제진동을 측정하여 이론적인 해석결과와 비교·분석함으로써 대상 구조물의 구조적 안전성, 사용성 및 진동발생의 원인 분석을 수행하였다. 또한, 분석데이터를 바탕으로 수직TMD(Tuned Mass Damper, 이하 TMD)를 설계, 제작하여 구조물에 시공하였고, 이에 따른 진동감소효과를 실제 계측을 통하여 비교하였다.

2. 대상구조물 특성 파악

2.1 대상구조물 현황 및 보도교 단면도

표 2.1 대상구조물의 현황

위치	연장	폭원	형식	준공년도
대전광역시 유성구 노은동 270 번지	44.6m	4 m	steel box	2002

* (주)케이알 기술연구소 대리
E-mail : choisj@krroad.co.kr
Tel : (031)378-9378, Fax : (031)378-9381

** (주)케이알 기술연구소 이사

*** 포스코건설 기술연구소 과장

**** RIST 선임연구원, 공학박사

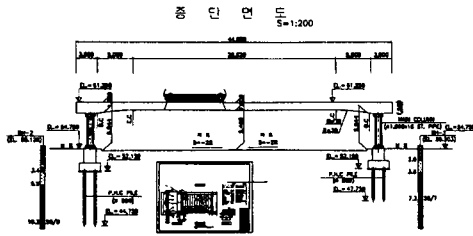


그림 2.1 정면도

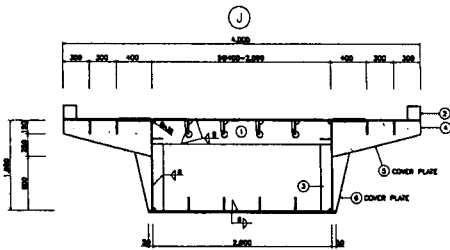


그림 2.2 중앙단면도

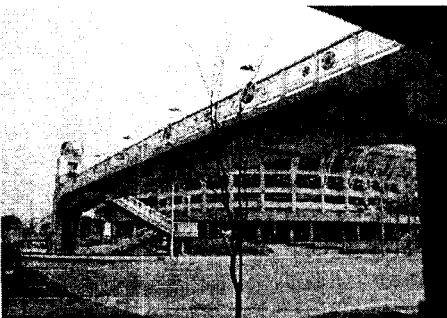


그림 2.3 현장 전경

2.2 시험위치 및 방법

측정장비로는 MMF KS46 Accelerometer(저주파측정 전용 장비)와 01dB Harmonic Analyzer(계측데이터의 분석 및 해석)이 사용되었다. 보도교의 진동을 측정하기 위한 센서의 측정위치는 지간 및 폭의 중앙에 위치한다.

(1) 자유진동시험

교량의 고유주기 및 동특성 파악을 위하여 시험자 1명이 보도교 중앙부에서 연속적으로 무릎을 굽혔다 펴는 동작을 연속하여 보행가진력에 상당하는 하중을 입력하였다. 연속적인 입력주기는 서울시 시설물 관리기준에 명시된 보행자의 보조(步調)인 약 2Hz정도로서 15초 동안 연속하여 가진

하였고, 가진 종료와 동시에 가속도계 KS-46을 이용하여 수직방향(상하방향)의 가속도 측정을 시작하여 약 1분간 측정을 계속하였다. 이 시험은 교량의 동적 특성인 고유진동수 및 감쇠율을 측정하기 위한 시험으로, 자유진동상태에서 시간에 따른 가속도 계측이 이루어 졌다.

(2) 보행 시험

실제 사용상태와 유사한 형태의 시험으로 성인 남자 4명이 2열 종대로 열을 지어 교량의 일단에서 타단으로 일반 보행속도(1.8m/sec)로 보행하는 시험을 수행하였다. 보행의 시작과 동시에 측정이 시작되어, 보행종료 후에도 약 1분간 가속도계 KS-46을 이용하여 수직방향(상하방향)의 가속도 계측이 이루어 졌다.

(3) 실제 사용조건상태 시험

실제 사용상태 하에 있을 때의 진동 계측한 시험으로 측구경기 시작 전 및 종료후 측정이 이루어 졌다. 위의 두 시험과 동일하게, 가속도계 KS-46을 이용하여 수직방향의 가속도 계측이 이루어 졌다.



그림 2.4 실제 경주시 보행자 이동모습

2.3 측정결과

대상보도교의 사용성 및 안전성 검토를 위하여 진동시험을 위 2.2절과 같이 수행한 결과는 다음과 같다.

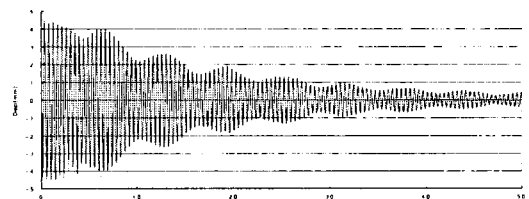


그림 2.5 1인 가진시 자유진동(최대변위=4.51mm)

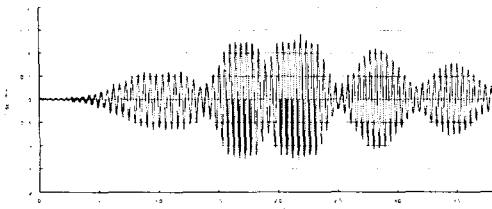


그림 2.6 4인 보행시 진동변위(최대변위=1.44mm)

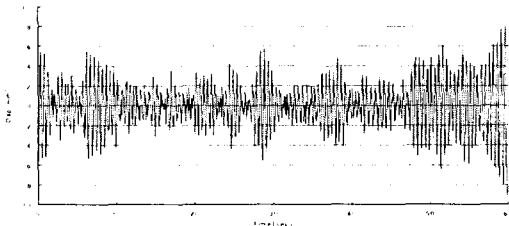


그림 2.7 실제 경기시 진동변위(최대=7.7, 평균peak=5.5mm)

2.4 시험결과 분석

계측결과 획득한 진폭과 고유진동수를 FFT Analyzer로 주파수 분석한 결과는 그림 2.8과 같다.

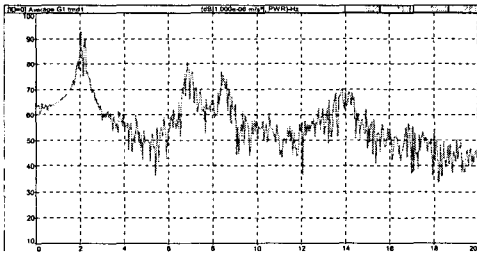


그림 2.8 주파수 분석(FFT) 결과

분석결과 보도교의 1차 고유진동수는 분석시 분해능(Resolution)을 고려했을 때 2.3Hz임을 확인 할 수 있었다.

또한, FFT결과를 토대로 보도교의 고유진동수와 진폭에 대하여 보행자가 감지할 수 있는 생리적·심리적 반응을 조사하였으며, 보도교의 고유진동수와 보행자의 보조(步調)진동수가 일치했을 때, 보행자 입장에서 인지되는 상황에 대해 분석하였다.

(1) 인간이 느낄 수 있는 인체공학적인 분석

구조물의 진동은 그 진동에 따라 보행자가 받는 생리적

현상이나, 심리적 반응이 다르다고 알려져 있다. 구조물의 진동에 따른 인체공학적인 영향은 동적하중 및 충격하중에 의한 진폭과 고유진동수를 이용하여 평가를 할 수 있는데 진폭과 고유진동수의 변화에 따른 인체공학적인 영향은 그림 2.9에서 보는 바와 같다.

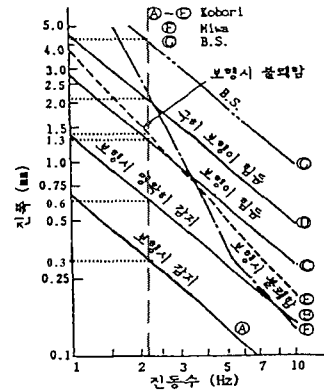


그림 2.9 진동수와 진폭에 따른 인체영향

그림 2.9에서 보는 바와 같이 2.3Hz의 고유진동수를 갖는 구조물의 진동시 진폭이 0.6mm 이상이면 보행시 처짐을 정확히 감지할 수 있으며 1.3mm 이상이 되면 보행이 힘들어지게 된다. 또한 2.2mm 이상이 되면 보행이 극히 힘들어지게 되며 4.3mm 이상이 되면 보행이 극히 힘들음을 넘어 불쾌감을 느끼게 된다. 대상보도교에 대하여 진동계측 시험을 실시한 결과는 표 2.2와 같다.

표 2.2 실제 계측 결과

조건	최대 변위	판정
1인가진	4.51mm	극히 보행이 힘들, 보행시 불쾌함
4인 보행	1.44mm	보행이 힘들
실제경기시	7.7mm	극히 보행이 힘들, 구조물 손상위험

(2) 고유진동수에 대한 분석

연구결과 지간 길이가 40m 정도를 넘을 경우 진동에 대한 영향을 무시하면, 보행자에 불안감, 불쾌감을 줄 위험이 있다. 보행자의 보조(步調) 남녀노소를 불문하고 약 2Hz이며, 그 편차는 거의 없다. 이 때문에 보행자가 교량에 주는 힘도 2Hz의 주기력으로 간주해도 거의 차가 없다. 따라서, 보도교 주거더의 고유진동수가 2Hz에 가까운 경우에는, 진폭이 커지고, 보행자에 대한 불쾌감을 커지며, 주구조물에

대해서도 좋지 않은 영향을 끼친다. 따라서 주구조체의 처짐 진동의 고유진동수가 2Hz전후 (1.5~2.3Hz)가 되지 않게끔 할 필요가 있다.(서울시 시설물 관리기준 pp.25~26)

대상보도교의 경우 고유진동수가 3번의 시험결과에서 모두 2.3Hz로서 보행자의 보조(步調)와 거의 일치되었다. 결과적으로 보행자에 불안감 및 불편감 발생등 사용성의 문제점과 과도 진폭발생으로 인한 구조물에 좋지 않은 영향이 있는 것으로 판단된다.

· 허용처짐량 : 지간 40m 이상일 경우

$$L/600 = 68.4\text{mm} = \Delta_{\max}$$

· 최대 보행인원 탑재시 처짐비교

$$40.31\text{ mm} < \Delta_{\max} = 68.4\text{mm}$$

(2) TMD 보강 후의 처짐량 검토

· 최대 보행인원 및 TMD 동시 탑재시 처짐비교

$$42.55\text{ mm} < \Delta_{\max} = 68.4\text{mm}$$

3. 구조해석 및 안정성 검토

3.1 구조해석

구조해석에 사용된 구조물의 특성치는 표 3.1과 같다.

표 3.1 구조물의 특성치

Total weight	115.04 tonf	
Mass (Superstructure)	11.73 ton	
Natural frequencies	1st	2.30 Hz
1st mode effective mass ratio	56.4317%	
Effective mass	6.62 ton	

대상 구조물의 유한요소모델링을 통해 얻어진 특성은 실제측 결과와 거의 일치하여 모델링에 대한 적합성을 검증할 수 있었다.

3.2 처짐량 검토(지간 중앙부 최대처짐)

구조물의 자중과 보행하중, TMD의 중량을 고려한 처짐 검토를 위해 각각의 하중조합에 대해 계산된 지간 중앙부에서의 최대처짐은 표 3.2와 같다.

표 3.2 지간 중앙부 최대 처짐

·도로교설계기준(p9.9) 등분포 하중 재하기준

하중조건	처짐량(mm)
보도교자중	76.74(camber 부여로 상쇄)
*보행하중	40.31
TMD자중	1.94
전체하중	42.25

(1) TMD 보강 전의 처짐검토

4. TMD(TMD)의 설계

4.1진동제어 장치의 원리

진동을 저감시키고자 하는 주구조물에 부구조물(TMD)을 부착시키는 시스템으로서 외력형태를 주기함수인 $F_0 e^{i\omega t}$ 라고 하면 그림 4.1과 같이 모델링 할 수 있다.

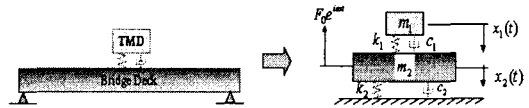


그림 4.1 TMD가 장착된 교량의 2자유도계 모형

TMD의 진동수가 하중의 진동수와 같은 값을 가지면 이론적으로 주구조물의 진폭은 0이 되어 진동이 없어지게 된다. 또한 이 경우 TMD의 진동은 외력과 반대방향으로 진동하게 된다. 정리하면 TMD를 주구조물의 고유진동수에 동조시키면 TMD 자체가 외력의 반대방향으로 진동하면서 진동에너지를 흡수하여 주구조물의 진동을 없애주게 된다.

4.2 TMD의 설계 및 시뮬레이션

TMD의 기능은 주구조물이 공진상태 이거나 이와 유사한 상태의 진동을 일으킬 경우 극대화 된다. 이론적으로 진동수를 일치시키면 주구조물의 진폭을 0으로 만들 수 있으나, 실제 상황에서는 여러 가지 요인들에 의해 시스템의 고유진동수 및 외력의 진동수가 일정한 Band에 걸쳐 나타나므로 다음과 같은 물리적 변수들을 최적으로 조합하여 설계를 한다.

μ : TMD의 질량과 주 질량의 비

β : TMD와 주 시스템의 진동수비

$\xi_{1,2} : c_{1,2}/c_{cr}$

본 연구에서 대상 구조물에 TMD를 적용하여 변수들을 최적 조합하여 simulation한 결과는 그림 4.2, 4.3과 같다.

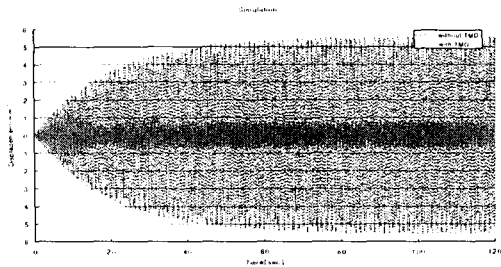


그림 4.2 시뮬레이션 결과(시간영역)

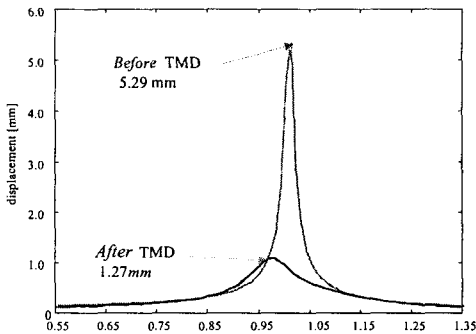


그림 4.3 시뮬레이션 결과(주파수 영역)

simulation결과 최대 진동변위가 5.29mm에서 TMD 설치 후 1.22mm로 약 76%의 감소효과를 보이고 있다. 또한 여러 보행자가 다니고, 하부에 차량이 통과하며 보도교에 미치는 외력을 고려할 때 제어가능한 주파수의 bandwidth 또한 충분하게 확보하고 있음을 알 수 있다.

4.3 시뮬레이션 결과고찰 및 TMD 제원결정

동적해석시, 보강전 구조물은 동일한 고유진동수를 가지는 외력에 의해 최대 5.29mm까지 진동변위가 발생함을 알 수 있다. 이는 극히 보행이 힘들음을 느낄 수 있는 상태이다. simulation이 아닌 실제 상황에서는 더 큰 외력이 가진 될 수 있으므로 정상적인 보행을 할 수 없어 구조물의 역할을 수행하지 못할 가능성도 있다.

그러나, TMD 설치후 보도교의 진동변위는 1.27mm로써 약 76%의 감소율을 보였다. 또한 여러 보행자가 지나다니고, 하부도로에 차량이 통과하며 보도교에 미치는 외력을 고려할 때 제어 가능한 주파수의 bandwidth 또한 충분하게 확보하고 있음을 알 수 있다.

표 4.1 보도교 진동최대 변위 (Simulation)

항목	진동변위(mm)	
	보강전	보강후
2.3Hz에서의 최대진동변위	±5.29	±1.27
판정	극히 보행이 힘들	보행 시 단순 감지
변위감소율(%)	76	

실제 계측된 주 구조물의 데이터와 상기 이론 및 해석을 바탕으로 설계된 TMD의 제원은 다음과 같다

표 4.2 TMD의 제원

Type	수직진동제어형
고유진동수	2.20
질량체 중량	500 kgf
자체 감쇠율	13%
총중량	750 kgf
크기 (W×H×T)	1190×950×300
설치유형	교량중앙부 양단 2기 설치

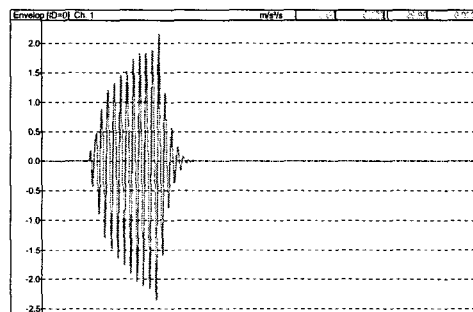


그림 4.4 TMD의 응답 특성

5. 시 공

5.1 시공위치

TMD가 최대 성능을 발휘하기 위해서는 최대변위가 발생하는 지간 중심에 설치하는 것이 최적이거나, 그림 5.1에서 보는 바와 같이 플랜지와 연결되는 리브위치가 가로등 및 난간의 지주부와 간섭되어 지간 중심에서 2.0m 떨어진 지점에 2기가 시공 되었다.

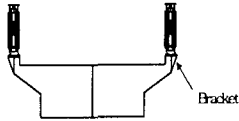
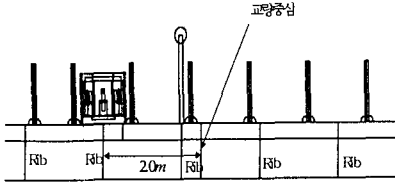


그림 5.1 시공 위치

5.2 시공방법 및 순서

시공 방법 및 순서는 다음과 같다

- 1) 설치위치 선정
- 2) 난간 탈거 및 지주위치 변경
- 3) 브라켓 플레이트 설치
- 4) 외측면 브라켓 용접
- 5) TMD 설치(그림 5.2)
- 6) 상부레일 복원(그림 5.3)
- 7) 시공완료(그림 5.4, 5.5)



그림 5.2 TMD 설치

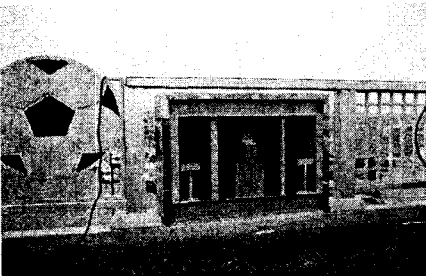


그림 5.3 상부 레일 복원

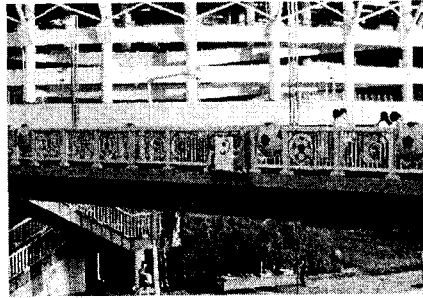


그림 5.4 설치 후 전경(1)

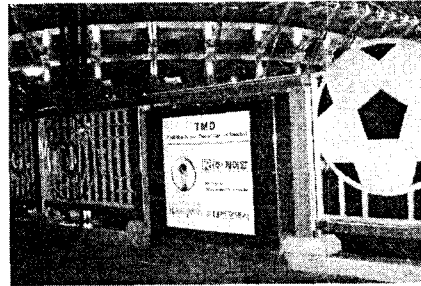


그림 5.5 설치 후 전경(2)

6. TMD 시공 후 진동제어성능평가

6.1 설치 전후 응답비교

(1) 자유진동 응답비교

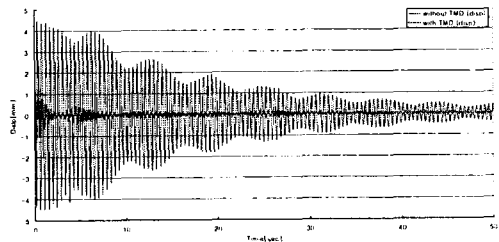


그림 6.1 TMD 설치 전, 후의 자유진동 응답 비교

1인 가진 후 자유진동을 측정하였다. TMD 설치 후 최대 변위는 1.27mm였으며 진동의 90% 감소시간은 8.6초로서 설치전 최대변위 4.51 mm, 진동감소시간 43.22초에 비해 변위는 71.8%, 진동은 90%, 감소시간은 80.1% 감소되었다.

(2) 강제진동 응답비교

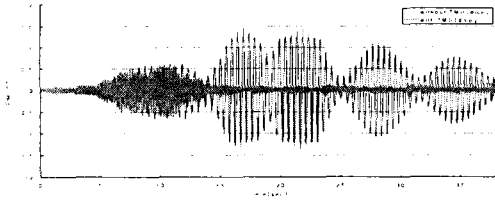


그림 6.2 TMD 설치 전, 후의 강제진동 응답 비교
4인 보행시 진동계측 결과, TMD 설치후 최대변위는 0.57mm로, 설치전 1.44mm에 비해 60.5%가 감소되었다.

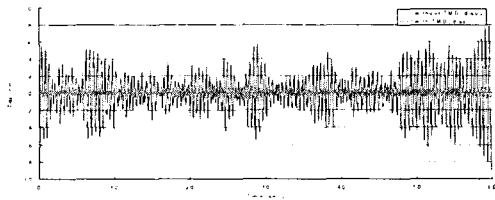


그림 6.3 실제 경기시 TMD설치 전, 후의 응답비교
실제 경기시 진동계측 결과, 설치후 최대변위는 0.71mm로서 설치전 7.7mm에 비해 90.7%가 감소되었다.

6.2 결과분석

TMD를 설치하여 설치전·후의 응답을 비교한 결과 표 6.1과 같이 대상보도교의 진동을 감소시킴에 있어 탁월한 성능이 있음이 밝혀졌다.

표 6.1 TMD의 성능평가

조건	설치 전/후 최대변위 [mm]	감소율 [%]	설치 전/후 판정
1인 가진	±4.51 → ±1.27	71.8	극히 보행힘듦, 보행시 불쾌함 → 보행시 명확히 감지
4인 보행	±1.44 → ±0.57	60.5	보행힘듦→보행 시 감지
실제 경기시	±7.7 → ±0.71	90.7	극히 보행힘듦, 구조물 손상위험 → 보행시 감지

7. 결론

대전 월드컵경기장 진입보도교의 구조 및 진동상태를 정밀 조사하여 대상구조물의 구조적 안전성, 사용성 및 진동발생의 원인분석을 수행하였으며, 본 데이터를 바탕으로 수직 TMD를 설계·제작·시공하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 현장계측결과 구조물의 1차 고유진동수는 2.3Hz로 측정되었고, 실제 경기시 계측된 최대변위는 ±7.7mm로서, 극히 보행이 힘든 상태를 넘어 보행시 불쾌함을 느낀다고 산출되었다. 고유진동수 평가 역시 교량자체의 고유진동수가 보행자의 보조와 거의 일치되어 구조물의 진폭이 보행자의 진행과 더불어 점차적으로 증폭되어, 결과적으로 보행자에 불안감 및 불쾌감 발생 등 사용성에 문제점이 있었으며 과도진폭발생으로 인한 구조물에 좋지 않은 영향이 있는 것으로 판단되었다.

2. 분석결과 및 이론을 바탕으로 TMD의 시공전과 시공후의 1인 가진, 4인 보행시험, 실제 경기시 진동계측 비교 결과 최대변위는 71.8~90.7% 감소하였고, 진동 잔여시간은 80% 감소하였으며 그 결과 시공전 극히 보행이 힘든 상태에서 시공후 보행시 경미하게 진동이 느껴지는 정도로 사용성이 향상되었을 뿐 아니라 구조물의 손상 또한 방지할 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) 이준일 등, 2002, "대전월드컵경기장 진입보도교 TMD 설치 최종보고서", 대전광역시
- (2) 2000, "도로교설계기준", 건설교통부
- (3) 2001.11, "시설물 설계·시공 및 유지관리 편람", 서울특별시
- (4) 권순덕, 1997, "차량하중을 받는 교량의 진동제어를 위한 TMD의 효과", 대한토목학회논문집, Vol.18, No.1~4 pp.457~467.