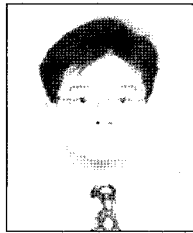


# 은파보도현수교의 진동제어를 위한 TMD설계 및 검증

## Design and Verification of Tuned Mass Damper for Mitigation of the Footbridge Vibration



김윤석\*



주석준\*\*



장동두\*\*\*



김형섭\*\*\*

\*(주)티이솔루션 대표이사  
\*\*(주)티이솔루션 부장  
\*\*\*(주)티이솔루션 대리

### 1. 서론

군산은파 보도교는 이벤트 광장과 만남의 광장, 빛과 물의 체험공간은 물론 야간 경관조명을 연출하여 밝고 생동감 있는 예술작품으로 조성됨으로써 교량이 완공되면 하나의 관광명소로 각광을 받게 될 것으로 기대된다. 보도교의 일부인 현수교 구간은 지역 상징물로서의 의미를 지니는 것으로 미관을 고려하여 장지간과 경량의 철골구조물로 설계되어 있는데, 구조적안정성은 기본적으로 만족되나

시공완료 후 보행자에 의한 수직진동에 대한 사용성의 문제가 우려되고 있다. 일정한 기준치 이상의 수직진동이 발생할 경우 보행자 또는 교량의 이용자는 심리적으로 불편감을 느끼게 되며, 이러한 진동이 반복적으로 나타날 경우 교량의 구조부재에서의 피로현상을 유발할 수도 있다.

진동을 제어하는 방법으로는 크게 구조물의 크기나 단면형상을 변경하는 구조적인 방법과 인위적인 제진장치를 사용하는 기계적인 방법이 있다. 구조적인 방법은 설계변경과 이에 따른 재설계(재시험)가 수행되어야 하고 진동 제어 효과에 대한 정확한 예측이 어려운 반면, 기계적인 방법은 사용되는 제어장치와 구조물의 동적 특성만으로 진동 제어 효과의 정확한 예측이 가능하고, 일정한 제어효과를 보장하기 때문에 최근 들어 많이 적용되고 있다. 은파보도현수교의 경우, 적극적으로 제진장치를 도입함으로써 형태변경 등에 의한 미관의 손실이 없도록 하였으며, 현장의 여건을 고려하여 별도의 외부전력이 필요하지 않고, 유지관리가 용이한 수동형의 동조질량감쇠장치(tuned mass damper, TMD)를 제진장치로 채택하였다.

본 기사를 통하여 은파현수보도교의 수직진동제어를 위한 제진장치(TMD)의 설계에서 현장적용, 그리고 검증에 이르는 일련의 과정을 개괄적으로 기재하였다.

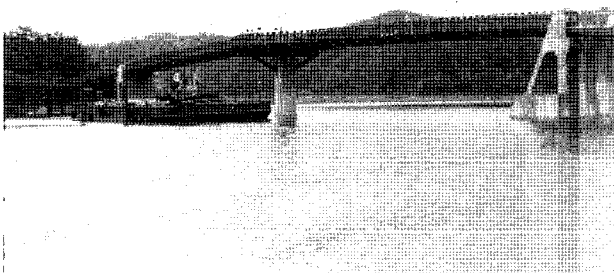


그림 1 군산은파 보도교

## 2. 은파보도현수교

### 2.1 위치

은파보도현수교는 전북 군산시 나운동 은파유원지내의 은파호수에 설치되었고, 그러한 위치는 아래의 그림 2에 나타내었다.

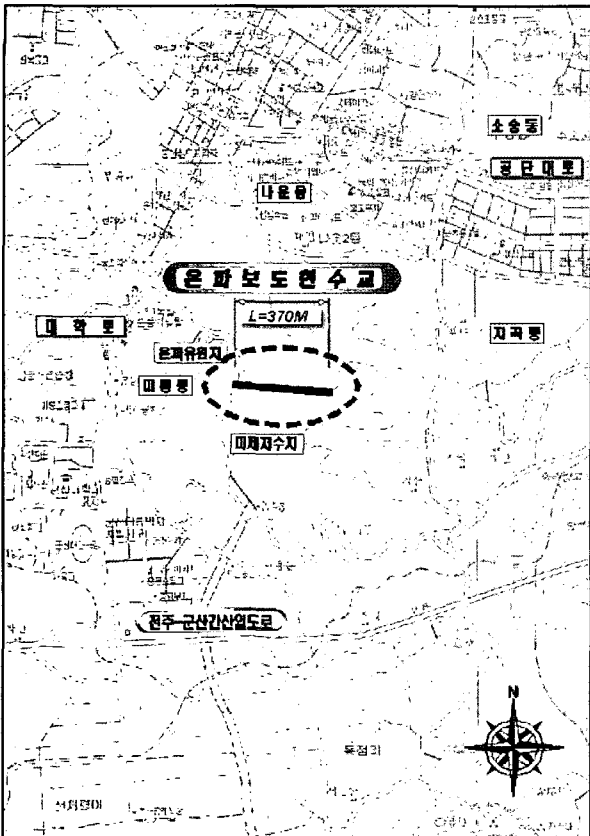


그림 2 은파보도현수교의 위치

### 2.2 제원

은파보도교의 제원은 다음과 같다.

- 교량형식 : 1주탁 2경간 현수교 + 접속교
- 연장구성 :
  - 현수교 : 60.0+60.0=120.0m(제진장치 설치구간)
  - 접속교 :
  - 시점측, 20.0+2@25.0+2@12.5+20.0=140.0m
  - 종점측, 20.5+22.0+25.0+22.0+20.5=110.0m
- 폭 원 :
  - 교량폭 : 현수교 - B0=3.7m~9.8m
  - 접속교 - B0=3.7m
  - 보도폭 : B=3.0m~9.1m

## 3. 보도교의 사용성

### 3.1 국내 보도교 진동기준

아직까지는 국내 지방서 규정에 보도교를 포함한 교량의 진동에 대한 정량적인 평가 기준은 없으며, 다만 2001년 서울시에서 발간한 '시설물설계 시공 및 유지관리편람'에서 보도교의 공진으로 인한 진폭확대를 피하기 위해 교량의 고유진동수와 보행자의 보행주기인 2Hz전후(1.5~2.5Hz)를 피하도록 권고한 내용이 유일한 진동제한 규정이다. 참고로 국내 도로교통설계기준 강교편에서는 차량의 안전 주행 보장 및 변형에 의한 2차 응력의 영향에 대한 구조물의 안전성, 그리고 통행자에게 주는 불편감을 고려하여 교량 각부의 응력을 사용재료의 허용응력 이하로 하면서 교량 전체가 어느 정도 이상의 강성이 되도록 처짐량을 제한하고 있을 뿐이다.

### 3.2 해외의 보도교 사용성 기준

표 1 각국의 "안락함"을 나타내는 기준

| Code                | $a_{crit}$              |
|---------------------|-------------------------|
| BS5400 and EC2.2    | $\frac{1}{2}\sqrt{f_0}$ |
| Ontario Code(ONT83) | $\frac{1}{4}f_0^{0.78}$ |
| EC5.2               | 0.70                    |
| ISO/DIS 10137       | 0.59                    |

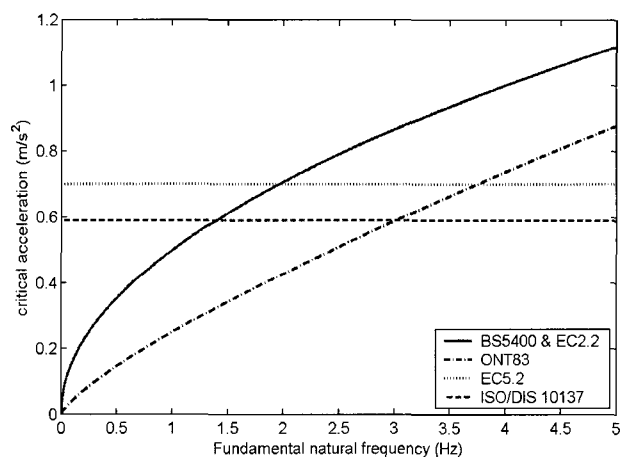


그림 3 해외 보도교 진동기준

표 1은 국외의 5가지설계기준에서 제시된 사용성 기준의 값이다. Eurocode 5 Part 2(EC5.2)와 ISO/DIS 10137를 제외한 다른 세 가지는 모두 진동수에 근거하여 기준을

제시하고 있지만, EC 5.2와 ISO/DIS 10137에서는 진동수와 무관하게 상수 값을 제시하고 있다. 보행자의 진동수인 2Hz 근방에서는 Ontario Bridge Code (OTN83)의 0.43 m/s<sup>2</sup>을 제외한 모든 기준이 0.57~0.7m/s<sup>2</sup>내에 있다.

은파보도현수교의 경우, 해석을 위한 하중산정과 사용성 평가의 기준으로 보행하중 산정의 근거가 이론적으로 명확하며, 수식에 의하여 1인 및 다수보행에 의한 진동가속도의 예측이 가능한 EC 5.2를 적용하여 해석을 수행하였다.

### 4. 제진장치(TMD) 설계

#### 4.1 규준에 의한 TMD 초기설계

##### 4.1.1 1인 보행하중에 의한 가속도

EC 5.2의 규준에 따라 수직 1차 진동모드를 기준으로 1인 보행하중의 가속도를 산정하면 아래와 같다.

$$a_{vert,1} = \frac{165K}{M} \frac{1}{\zeta} (1 - e^{-2\pi n \zeta})$$

$$= \frac{165 \times 0.7}{856.5 \text{ kg/m} \times 60 \text{ m}} \frac{1}{0.005} \left( 1 - e^{-2\pi \times \frac{60}{0.75} \times 0.005} \right)$$

$$= 0.4131 \text{ m/s}^2$$

- 여기서,  $a_{vert,1}$  : 1인 보행하중에 의한 가속도(m/s<sup>2</sup>)
- $K$  : 형상계수(=0.7, BS 5400)
- $M$  : 보도교의 질량
- $\zeta$  : 보도교의 감쇠비(= 0.5 %로 가정)
- $n$  : 교량을 지나는데 필요한 발걸음 수 (한 걸음을 75 cm로 가정)

##### 4.1.2 다수 보행하중에 의한 가속도

$$a_{vert} = \begin{cases} a_{vert,1} \times k_{vert,f} = 0.4131 \text{ m/s}^2 \\ \text{for a few pedestrians} \\ 0.027Lb a_{vert,1} k_{vert,f} = 2.008 \text{ m/s}^2 \\ \text{for a continuous flow of pedestrians} \end{cases}$$

- 여기서,  $k_{vert,f}$  : 동적증폭계수(=1.0, 그림 4 참조)
- $L$  : 보도교의 경간장(=60m)
- $b$  : 보도교의 폭(=3m)

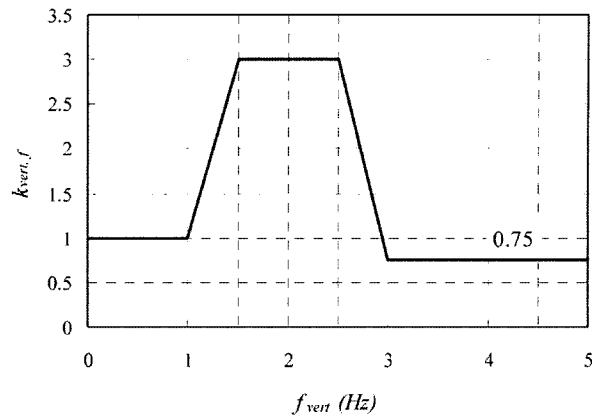


그림 4 동적증폭계수  $k_{vert,f}$  (EC.5.2)

##### 4.1.3 TMD 이동질량

TMD의 요구질량의 산정과정은 다음과 같다.

(1) 요구저감계수 =  $\frac{a_{crit}}{a_{vert}} = \frac{0.7}{2.008} = 0.349$

(2) 요구감쇠비

$$\sqrt{\frac{\zeta_{footbridge}}{\zeta_{eff}}} = \sqrt{\frac{0.005}{\zeta_{eff}}} = 0.349$$

(3) 요구 TMD 질량비

$$\zeta_{eff} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu}{2 + \mu}} \rightarrow 4\zeta_{eff}^2 = \frac{\mu}{2 + \mu}$$

$$\therefore \mu = \frac{8\zeta_{eff}^2}{1 - 4\zeta_{eff}^2} = \frac{8 \times 0.0411^2}{1 - 4 \times 0.0411^2} = 0.0135$$

위에서 산정한 TMD의 질량비 1.35%는 표 2의 1차 모드질량, 67.2ton에 대해 TMD1기의 이동질량 454kg에 해당하며, 이상적인 작동환경 하에서는 충분하다 할 수 있으나, 실질적으로 존재하는 마찰력 및 조립상의 오차를 고려하여 650kg으로 산정하였다. 안쪽경간에 1기씩 총 2기를 설치하며, 이때 TMD의 질량비는 1.93%에 해당한다.

### 4.2 TMD의 설계

#### 4.2.1 보도교의 수직진동모드

다음의 표 2는 구조해석 프로그램인 RM에 의해 모델링된 보도교의 3Hz이하의 각 모드별 모드질량과 진동수이다. 여기서 각 모드질량은 각 모드형상의 최대 값을 기준으로 정규화 한 모드형상을 이용하여 산정된 것이다. 이들 모드 중 수직모드는 1, 4, 5, 10, 그리고 19차이고, 보행하중의 진동수인 2Hz에 가장 가까운 모드는 10차 모드이다. 따라서 10차 모드를 기준으로 TMD를 설계하였다. 이는 EC 5.2가 제어대상으로 가정 하는 수직진동 1차 모드와는 차이가 있다.

표 2 RM에 의해 산정한 각 모드별 진동수와 질량

| 모드 | 진동수 (Hz) | 모드질량 (ton) | 모드 | 진동수 (Hz) | 모드질량 (ton) |
|----|----------|------------|----|----------|------------|
| 1  | 0.5497   | 67.2       | 11 | 1.8639   | 3227.6     |
| 2  | 0.9595   | 32913.8    | 12 | 2.0517   | 496.4      |
| 3  | 1.106    | 26658      | 13 | 2.2894   | 220.6      |
| 4  | 1.2579   | 49.2       | 14 | 2.3229   | 6745.1     |
| 5  | 1.3017   | 70.5       | 15 | 2.324    | 75703.2    |
| 6  | 1.3848   | 37634.6    | 16 | 2.3354   | 2754.1     |
| 7  | 1.385    | 6398.3     | 17 | 2.3708   | 3595.2     |
| 8  | 1.3998   | 74613.4    | 18 | 2.5947   | 150.9      |
| 9  | 1.4049   | 108135.4   | 19 | 2.7405   | 68.2       |
| 0  | 1.7677   | 51.2       | 20 | 2.8918   | 107.1      |

4.2.2 TMD 설치위치

TMD설치위치는 약 117m 보도교의중심으로부터 28.5m 떨어진 곳으로써 58.5m 스패んの중심부에 가까운 곳에 대칭으로 2기를 설치하였고 그림 5에 나타내었다. 위치선정은 시공 상 가능한 공간 중에 모드변위가 가장 큰 곳을 선정하였으며 TMD설치 위치를 기준으로 정규화 된 10차 모드형상으로부터 모드질량을 재 산정하면 185.2ton이 된다.

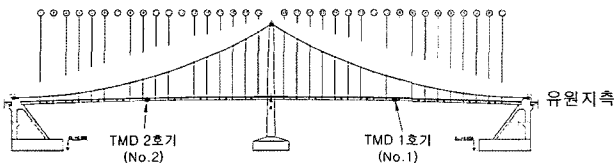


그림 5 TMD 설치위치

4.2.3 TMD의 설계변수

TMD의 최적설계변수는 Den Hartog가 제한 한 최적식을 이용하여 변수를 선정하였고 표 3에 나타내었다.

표 3 TMD 변수

| TMD 변수             | 수식                       | 값       |
|--------------------|--------------------------|---------|
| 질량비( $\mu$ )       | -                        | 0.00702 |
| 감쇠비( $\xi_{opt}$ ) | $\sqrt{3\mu/8(1+\mu)^3}$ | 0.05077 |
| 진동수비( $f_{opt}$ )  | $1/1+\mu$                | 0.99303 |

4.3 진동해석결과

4.3.1 보행하중 생성

보행하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \sum_{i=1}^n \Phi_i \cdot 280 \cdot \sin(2\pi f_w t + \phi) : \text{단위 Newton}$$

여기서,  $\phi_i$ 는 번째 사람의 위치에서의 모드형상으로 TMD설치위치를 기준으로 정규화 되었다.  $n$ 은 보행자 수로  $1m^2$  당 1.0명을 가정하였다.  $f_w$ 는 보행하중의 진동수(Hz)이며, 평균이 2Hz이고, 표준편차가 0.4/3인 normal distribution 형태의 분포를 사용하여, 1.6Hz와 2.4Hz의 범위에 약 99.7%가 존재하도록 하였다. 또한,  $\phi$ 는 각각의 하중의 위상차 (radian)로써 0과  $2\pi$ 에서 uniform distribution 형태의 분포한다고 가정하였다.

위 식을 이용하여 생성한 10차 모드 보행하중의 시간이력을 그림 6에 나타내었다.

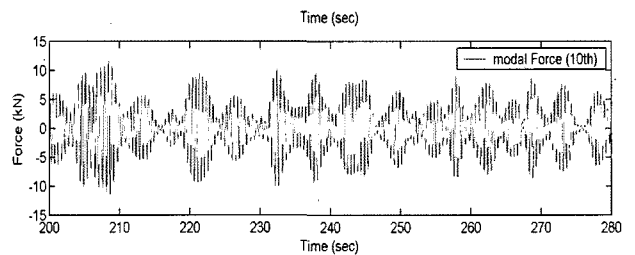


그림 6 보행에 의한 10차 모드 하중의 시간이력

4.3.2 모드해석

은과보도교의 해석은 모드해석결과를 기초로 5Hz이하의 37개 모드만을 고려하여 해석을 수행하였다. 응답 측정점은 보도교 경간의 중심점으로 하였다. 또한 하중의 생성과정에서의 특수성을 없애기 위해서 임의로 10개의 서로 다른 보행하중을 생성하여 해석을 수행하였다. 즉 표 4와 5는 각각 10회의 해석을 수행한 후 평균한 수치이다. 그림 7은 보도교의 변위와 가속도응답으로써 TMD설치 전후를 비교한 것이다. 표 3에서 알 수 있듯이 보도교에 TMD를 설치함으로써 보행하중에 대하여 변위에서는 약 40%의 응답감소와 가속도에 있어서는 약 35%의 응답감소가 있음을 알 수 있다. 표 5에서는 TMD 2기의 스트로크를 각각 나타내었는데, 본 보도교는 양 스패인 대칭이라서 TMD 스트

표 4 TMD 설치 전후의 응답비교

|        | 변위(mm) |      |       | 가속도( $m/s^2$ ) |      |       |
|--------|--------|------|-------|----------------|------|-------|
|        | RMS    | MAX  | MIN   | RMS            | MAX  | MIN   |
| 제어전    | 2.38   | 6.95 | -6.95 | 0.31           | 0.94 | -0.94 |
| 제어후    | 1.33   | 4.21 | -4.21 | 0.19           | 0.62 | -0.61 |
| 제어율(%) | 43.9   | 39.5 | 39.4  | 37.3           | 34.1 | 34.5  |

표 5 TMD 스트로크

|      | TMD 스트로크(mm) |        |         |
|------|--------------|--------|---------|
|      | RMS          | MAX    | MIN     |
| No.1 | 9.536        | 29.521 | -29.334 |
| No.2 | 9.692        | 28.945 | -29.024 |

로크의 최대 값이 약 30mm로 거의 같게 나왔다.

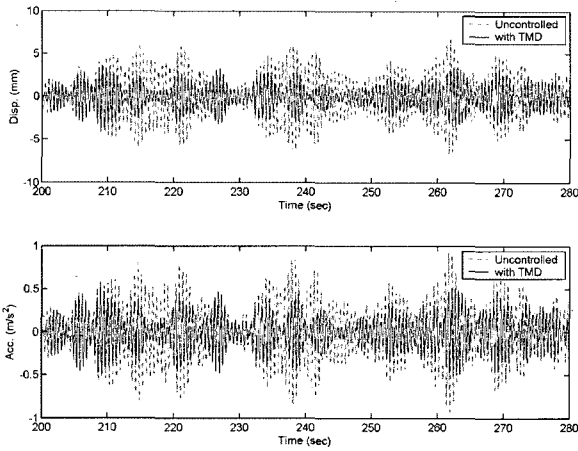


그림 7 TMD설치 전후의 보도교의 응답비교

#### 4.4 TMD형상설계

은파보도교의 미관을 해치지 않는 범위내에서 설계하기 위해서는 기존의 사용된 TMD는 적당하지 않다. 또한 H형 강 사이에 위치하기 위해서는 스트로크 및 형상에 많은 제약이 있다. 이러한 점들을 고려하여 아래와 같이 설계되었다.

##### 4.4.1 진자형 TMD

은파보도교에 설치될 TMD는 진자형TMD로써 다음 그림 8과 같이 약 650kg 질량체가핀을 중심으로 외팔보 형식의 회전 수직진동을 하고 그 중간에 스프링과 댐퍼가 설치되어 진동수와 감쇠를 조절한다.

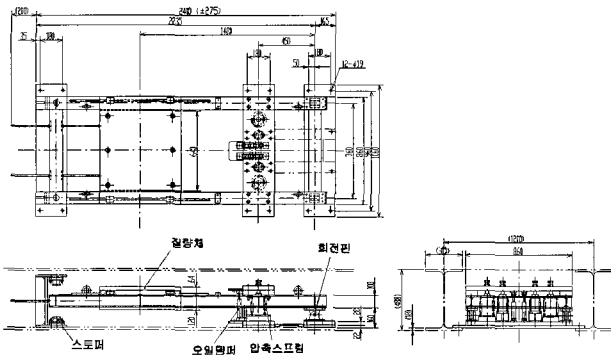


그림 8 TMD형상

##### 4.4.2 TMD의 사양

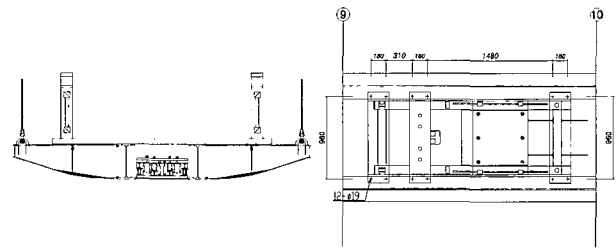
은파보도교에 설치된 TMD의 사양을 요약하여 다음 표 6에 나타내었다.

표 6 TMD 사양

| 항 목   | 사 양                                       |
|-------|---|
| 형 식   | 수동형질량동조감쇠기<br>(Passive Tuned Mass Damper) |
| 제진방향  | 연직방향 1방향                                  |
| 수 량   | 2 sets                                    |
| 총 중 량 | 1071kg: 베이스, 가대, 질량체, 스토퍼,<br>스프링받침프레임    |
| 이동질량  | 약 650 kg                                  |
| 구동방식  | 캔틸레버형 진동                                  |
| TMD크기 | 2400 x 1060 x 420mm(H)                    |
| 스트로크  | 스프링위치 ±40mm                               |
| 감쇠장치  | 오일댐퍼                                      |

##### 4.4.3 설치형상

보도교의 양 스패んに 설치된 TMD의 설치형상의 단면, 평면을 그림 9에 나타냈다.



(a) 단면 (b) 평면  
그림 9 TMD 설치형상

## 5. 현장가진시험

본 TMD는 군산은파 보도교가 완공되기 이전에 설계, 제작 및 설치공사가 완료되어야 하였기 때문에, 모든 설계 변수가 은파보도교의 구조해석 결과에 근거하여 설정되었다. 따라서 구조해석에 의한 건물의 동적특성이 실제와 크게 다를 경우에는 TMD의 제진성능의 저하가 초래될 수 있다. 따라서 구조물의 실제 동적특성을 파악하고, 이를 기준으로 TMD의 설계변수에 대한 세심한 조정작업이 수행되어야 한다.

구조해석에 의한 은파 보도교의 수직방향(TMD작동방향) 고유진동수는 1.768Hz이며, 감쇠비는 규준에 의하여 0.5%를 가정하였다. 그러나 이 값들은 구조해석모델 및 재료적인 특성과 시공상의 오차에 의하여 실제와 다를 수 있으므로 현장계측에 의한 확인이 요구된다. 또한 TMD의 제진효율이 설계시의 목표대로 확보되었는지도 확인해야 한다. 구조물의 동적특성에 대한 최종적인 확인은 구조적인 공사가 완료된 후 수행되어야 하며, 또한 이를 기준으로 TMD를 정밀하게 튜닝하여야 한다. TMD의 현장성

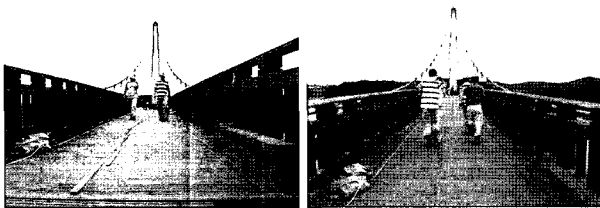
능 확인은 튜닝 된 TMD에 대하여 제진효율이 설계시의 목표대로 발휘되는지를 확인하게 된다.

### 5.1 교량 가진

아래의 그림 10은 교량의 가진 방법들 중 일부를 나타낸 것이다. 낙하 혹은 제자리 점프는 10차 모드형상이 가장 큰 곳을 가진 하였다. 그 중 점프는 1Hz로, 보행은 2Hz로 위상차 없이 가진 하였다. 또한 주행에 의한 하중은 주파수와 위상 모드 랜덤하게 설정하였다.



(a) 충격하중(20kg, 2m 자유낙하) (b) 2인 점프(1Hz)



(c) 2인 보행(2Hz) (d) 4인주행



(e) 일방향 집단보행 (f) 양방향 집단보행

그림 10 튜닝 전 가진시험 모습

### 5.2 계측결과 분석

아래의 그림 14는 가진 후 계측결과 분석을 위해 설치된 센서들을 나타낸 것이다. 6개의 가속도센서가 수직방향 가속도를 측정하고 2개는 수평가속도를 측정한다.

- Ch.1, Ch.3, Ch.4, Ch.5, Ch.7, Ch.8 : 수직방향가속도 측정
- Ch.2, Ch.6 : 수평방향 가속도 측정

아래의 그림 12에서 알 수 있듯이 power spectrum에 의해 모드 주파수를 추출한 후(a), 그 모드만의 시간이력을 구하기 위해 bandpass 필터를 통과시킨 후(b), 그에 따

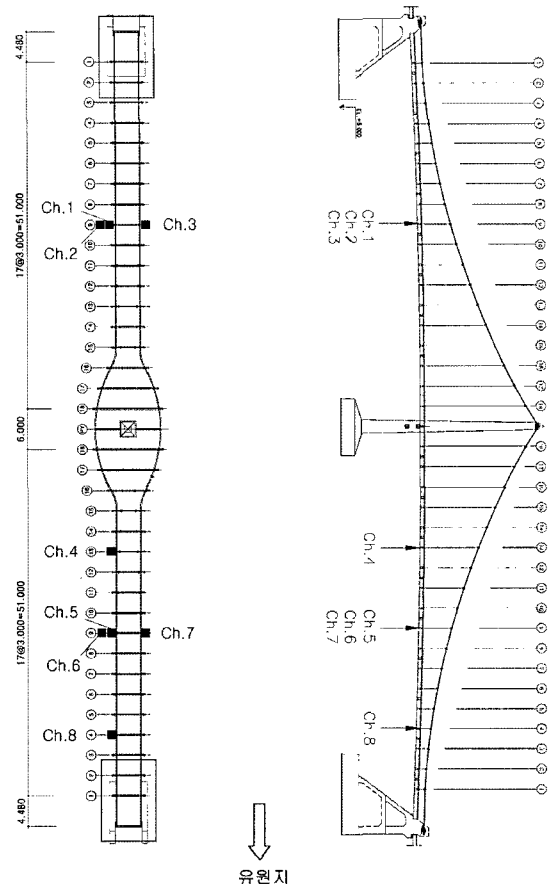
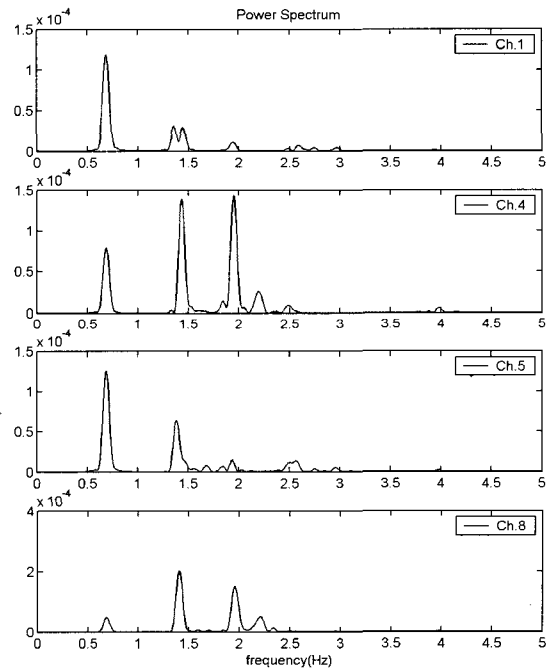


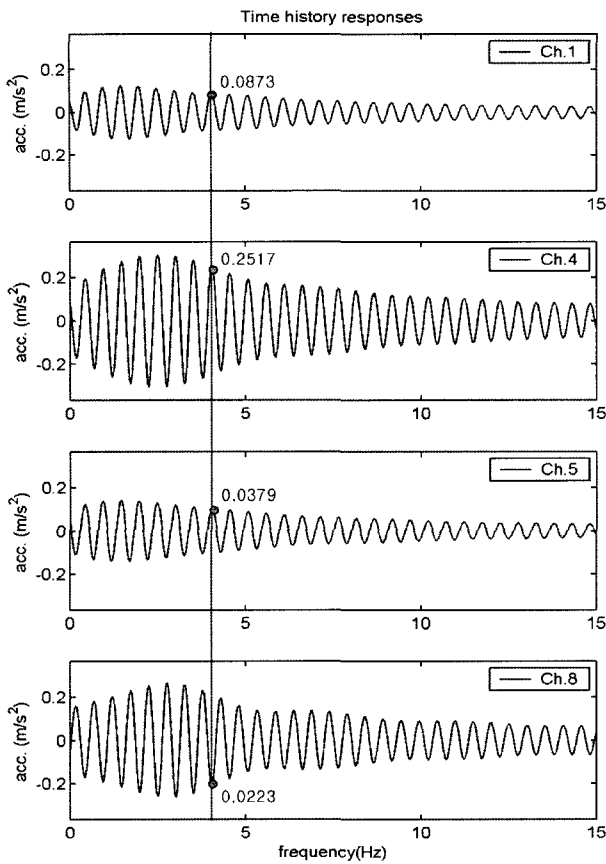
그림 11 센서위치, 넘버 및 측정 방향

른 모드형상을 구하였다(c).

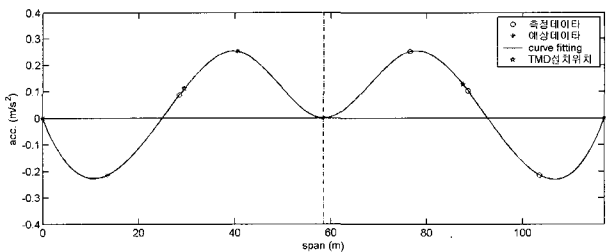
위와 같은 방법으로 총 3개의 모드를 검출하였다. 이렇



(a) 수직진동의 power spectrum



(b) 각 센서의 시간이력



(c) 시간이력에 해 산정된 모드형상

그림 12 4인 낙하에 의한 수직진동 - 수직3차모드 (1.953Hz)

표 7 해석모델과 실구조물에 의한 결과비교

|    | 모드 | RM모델 (Hz) | 현장계측 (Hz) | 오차 (%) |
|----|----|-----------|-----------|--------|
| 수직 | 1  | 0.550     | 0.685     | 19.8   |
|    | 2  | 1.258     | 1.367     | 8.0    |
|    | 3  | 1.302     | -         | -      |
|    | 4  | 1.768     | 1.953     | 9.5    |
| 수평 | 1  | 0.960     | 0.975     | 1.6    |
|    | 2  | 1.106     | 1.107     | 0.1    |
|    | 3  | 1.400     | 1.338     | -4.6   |

계 산정된 모드들과 기존의 RM모델링에 의해 산출된 모드들과의 비교를 다음에 나타내었다.

위 그래프에서 수직모드 중 2차와 3차모드는 너무 근접

해 있기 때문에 ch.1의 스펙트럼 분석결과는 모드가 분리되어 나타나고 있지만, 본 현장실험에서는 3차모드 형상을 추출하지 못하였다.

## 6. TMD 튜닝

현장가진 실험 결과를 기초로 TMD를 튜닝하기 위하여 질량체의 이동, 스프링 및 댐퍼의 조정을 실시하였다. 또한 튜닝 후 재 가진 시험을 수행하여 보도교의 동적특성 및 TMD의 제진성능을 확인하였다.

### 6.1 TMD 튜닝 파라미터 산정

- 보도교의 10차모드 질량에 대한 TMD 질량비

$$\mu = \frac{M_{TMD}}{M_{10}} = 0.0072$$

여기서,  $M_{10}$ 은 보도교의 10차 모드 질량이고,  $M_{TMD}$ 는 TMD 질량이다.

- 최적 진동수비 산정

$$f_{opt} = \frac{f_{TMD}}{f_{bridge}} = \frac{1}{1 + \mu} = \frac{1}{1 + 0.0072} = 0.993$$

여기서,  $f_{bridge}$ 는 보도교의 진동수이고,  $f_{TMD}$ 는 TMD이 진동수이다.

- TMD 진동수 산정

$$f_{TMD} = f_{bridge} \times 0.993 = 1.953 \times 0.993 = 1.9394 \text{ (Hz)}$$

- 댐퍼로 인한 TMD진동수의 변화를 고려

$$f_{TMD}^* = \frac{f_{TMD}}{R} = \frac{1.9394}{1.008} = 1.924 \text{ (Hz)}$$

여기서,  $R$ 은 댐퍼로 인한 진동수 변화(0.8%)를 고려한 변수이다.

이렇게 산정한 TMD 진동수를 그림 13과 그림 14와 같이 공장시험에 의해 미리 얻은 데이터를 이용하여 스프링

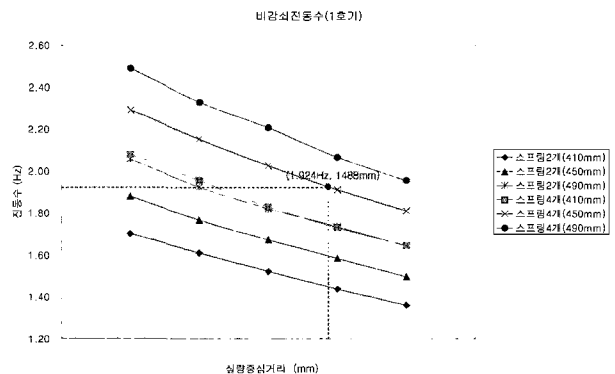


그림 13 스프링개수 및 질량중심거리 산정(1호기)

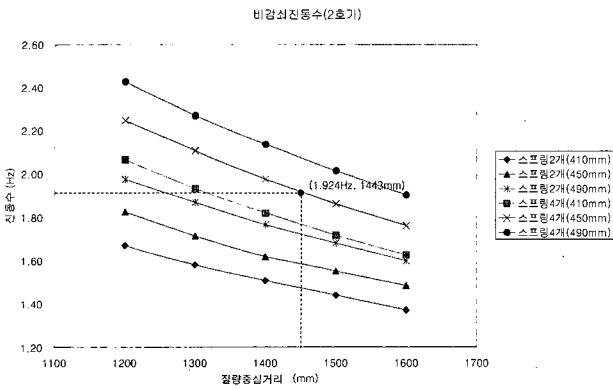


그림 14 스프링개수 및 질량중심거리 산정(2호기)

개수 및 질량중심거리를 산정하였다.

### 6.2 TMD 제어성능

튜닝이 완료된 TMD의 제어성능을 확인하기 위하여 튜닝전과 같은가진 시험을 수행하였다. 표 8은 TMD 튜닝 전, 후에 대한 시간이력해석의 결과를 보여준다. 시간이력 해석 결과 TMD를 설치 할 경우 설치하지 않은 경우에 비해 약 30~60%의 가속도의 감소효과를 확인할 수 있다. 그러한 시간이력은 그래프는 그림 15에 나타내었다.

표 8 TMD 튜닝 전후의 교량의 수직응답 비교

| 구분   | 제어전 (m/s <sup>2</sup> ) |        |       | 제어후 (m/s <sup>2</sup> ) |        |       |
|------|-------------------------|--------|-------|-------------------------|--------|-------|
|      | MAX                     | MIN    | RMS   | MAX                     | MIN    | RMS   |
| Ch.1 | 0.357                   | -0.389 | 0.189 | 0.317                   | -0.324 | 0.128 |
| Ch.3 | 0.502                   | -0.487 | 0.265 | 0.365                   | -0.353 | 0.150 |
| Ch.4 | 1.015                   | -1.017 | 0.538 | 0.597                   | -0.493 | 0.227 |
| Ch.5 | 0.445                   | -0.503 | 0.252 | 0.420                   | -0.304 | 0.135 |
| Ch.7 | 0.460                   | -0.490 | 0.241 | 0.408                   | -0.365 | 0.146 |

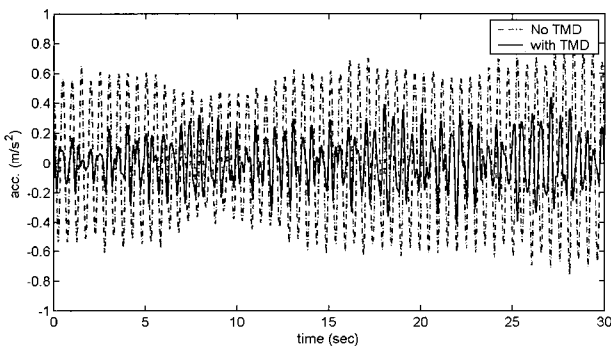


그림 15 2인점프에 의한 시간이력 (5Hz lowpassfilter)

## 7. 결론

군산시 은파 유원지에 설치되는 현수교는 유원지와 그 맞은편을 연결하는 보도교로써 보행하중에 의한 진동 사용성 검토를 수행하였다. 규준에 의한 검토 결과 보행하중에 의한 보도교의 수직방향 가속도가 불안정한 것으로 나타났다으며 이의 해결을 위하여 TMD설계를 수행하였다. 구조해석 프로그램인 RM을 이용하여 산출한 모드정보들을 분석한 결과 10차모드가 보행자의 진동수인 2Hz에 가장 가깝게 나타났다. 따라서 10차모드를 기준으로 산정된 TMD의 질량비를 이용하여 TMD의 최적 진동수비, 최적 감쇠비, 유효감쇠비를 산정하였다. 또한 설계된 TMD는 설치장소가 보도교 상판 하부의 H형강 위 아래 플랜지 사이에 위치해야 하는 장소적인 협소함으로 인하여 진자형태의 TMD가 설계, 제작되었다. 위의 설계변수들은 은파 보도교의 구조해석결과에 근거하여 설정되었기 때문에 보도교의 실제 동적특성을 파악하기 위해서 튜닝 전 현장가진시험을 수행하였고, 이 결과를 기준으로 TMD의 설계 변수들의 정밀 조정작업이 수행되었다. 최종적으로 TMD의 튜닝 후 제어성능을 검토하기 위해 튜닝전과 동일한 가진시험을 수행하였다. 그 결과 약 30~60%의 수직 가속도의 감소효과를 확인할 수 있었다. 따라서 군산 은파보도현수교에 설치된 TMD는 보행자들의 사용성 개선에 많은 도움을 줄 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. Den Hartog, J. P., Mechanical Vibrations, 4th Edition, McGraw-Hill, New York,1956.
2. Legeron, F., Le Moine, M., and Paultre, P., Studies on the Vibration of Pedestrian Bridges, 16th congress of IABSE, Lucerne, 2000.
3. Fujino, Y., Pacheco, B., Nakamura, S., and Warnitchai, P., Synchronization of Human Walking Observed during Lateral Vibration of a Congested Pedestrian Bridge, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 22, 741~758, 1993.
4. Bachman, Hugo., "Lively" Footbridges—aReal Challenge, Footbridge 2002, 1~15. [\[N\]](#)