

TMD를 이용한 서해대교 가로등의 진동제어

Vibration control of lamp posts in Seohae Bridge using TMD

○박찬민* · 박종칠* · 황성호** · 김용길** · 권오병**

Chanmin Park, Jongchil Park, Seongho Hwang, Yonggil Kim, Obyung Kwon

Key Words : new-type TMD, lamp posts, large frequency domains

ABSTRACT

Tuned Mass Damper(TMD) has been applied in various fields in order to mitigate these vibrations. The shape or configuration of TMDs being unrestricted, a large panel of designs is possible to improve their effectiveness and economical-efficiency, where ingenuity plays an essential role and is required. This study presents an application of a new-type TMD on lamp posts to reduce vibrations induced by loads with large frequency domains such as wind loads. It is shown that the proposed TMD absorbs efficiently the energy without being restricted by frequency contents of the vibration.

1. 서론

동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, 이하 TMD) 설 계는 오래전에 Den Hartog¹⁾에 의해 정립되었으며 현재 는 교량, 건축 및 기계설비 분야 등에서 많이 적용되고 있다. TMD는 다른 제진 방법에 비하여 그 적용이 매우 간편하고, 유지 관리가 용이하다는 점에서 매우 유리하 다. 또한 본 구조물의 강성을 직접 증가시키지 않고도 제 진 효과를 발휘하므로 비용이 적게 들며 여러 활하중(풍 하중, 이동하중 등)에 대해서도 진동제어효과를 발휘하므 로, 최근에는 가로등이나 교통신호등과 같이 저주파수대 역에 대한 TMD적용연구²⁾가 활발하게 진행이 되고 있다. TMD는 일정한 무게를 가지는 물체에 스프링과 감쇠기 가 붙어있는 형태로, 구조물과의 상대운동으로 구조물의 진동에너지를 흡수하는 장치이다. TMD는 주로 구조물의 제어하고자 하는 한 모드에 대하여 동조(tune)되도록 설

계된다. 따라서 구조물의 응답이 한 모드가 지배적인 경 우 효과가 크지만 그렇지 않을 경우 적절하지 않을 수 있다.

본 논문에서는 이러한 TMD의 단점을 보완하고자 충격 력으로 에너지를 흡수하는 새로운 형태의 TMD를 제시 하여 풍하중과 같이 광범위한 주파수 대역에서의 효과를 분석하고자 한다.

2. 실험체 제작 및 실험방법

2.1 실험체 제작

실험모형은 일반가로등을 선정하여 필드에서 주파수측 정을 하였으며 실험실의 조건을 고려하여 축소모형으로 설계 제작하였다. 실제 가로등 측정결과 주된 관심 주파 수가 1차모드인 0.953Hz이므로 모형제작도 거기에 상응 되는 1Hz로 설계 제작하였다. TMD의 질량비는 축소가

* 한국도로공사 기술연구소

** (주)유일엔시스 기술연구소

로동질량의 10%정도로 하였으며 동조비를 이용하여 0.9Hz로 설계하였다. 수평강성재료로는 일반 코일스프링을 이용하였다. 코일스프링의 수직강성은 쉽게 구할 수 있으나 수평강성은 특별한 실험없이 불가능하기에 일반적인 실험식³⁾을 이용하여 간략한 설계를 한 후 Tuning을 하였다. 유도과정은 아래 식(1)과 같다. 축소가 로동 및 TMD의 Tuning은 질량체를 이용하였다. TMD 구성은 Fig.1에 표시하였고 실험전경은 Fig.2에 나타내었다. TMD의 최적매핑과 진동수는 식(2)와 같다.

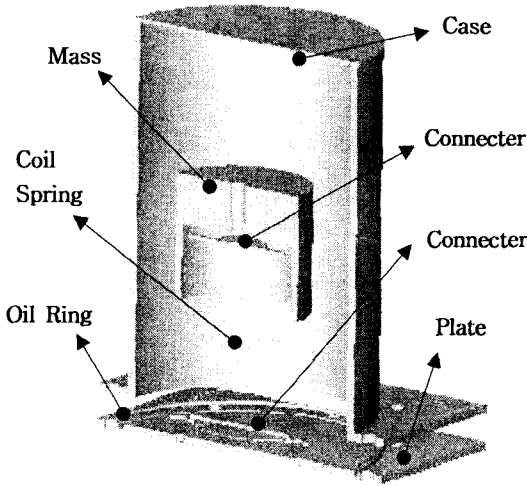


Fig. 1 Cross Section of TMD

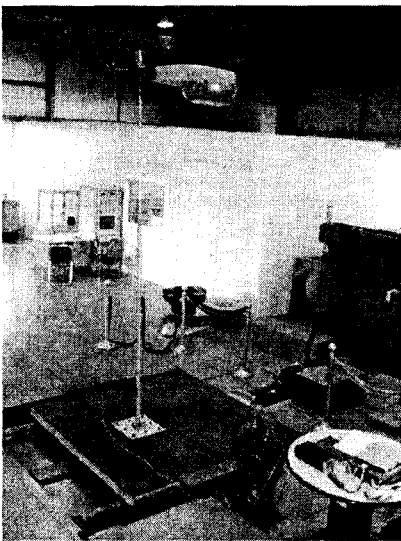


Fig. 2 Experimental Setup

식(1)에서의 f_p 는 수직하중에 의한 수직변위, L_0 는 초기 변위, D 는 스프링의 중심지름이다. R_c 는 수직강성과 수평강성의 비로써 본 식에의해 수평강성을 유추 하였다.

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1.0613}{\gamma_0} \sqrt{\gamma_0 - 0.6142 \times f_q} \left(0.9422 \times \gamma_0 \times \sqrt{\gamma_0 - 0.6142} \right) - \left(\frac{\beta_0}{\gamma_0} - 1 \right) \quad (1)$$

$$\alpha_0 = \frac{f_p}{L_0}, \quad \beta_0 = \frac{L_0}{D}, \quad \gamma_0 = \frac{f_p}{D}$$

TMD의 동조방법은 기존의 강제조화진동에 의한 방법을 적용하였는데 동조를 위한 진동수비와 최적감쇠비는 다음과 같다.

$$\omega_{TMD} = \frac{\omega_s}{1 + \mu}$$

$$\xi_{TMD} = \sqrt{\frac{3 \times \mu}{8(1 + \mu)}}, \quad \mu = \frac{m_s}{m_{TMD}} \quad (2)$$

ω_s 는 구조물의 고유진동수이며 m_s 는 구조물의 질량체 m_{TMD} 는 TMD질량체, μ 는 질량비이다.

2.2 입력 하중

가로동의 실제 가진데이터는 풍력이지만 실험실 테스트에서는 구현이 불가능하여 랜덤하중을 이용하여 가로동을 가진하였다. 가진데이터는 분산이 1인 Random Noise를 생성하여 이를 필터적분 과정을 통하여 변위데이터를 취득후 진동테이블에 입력하였다. 입력데이터는 Fig.3과 같다.

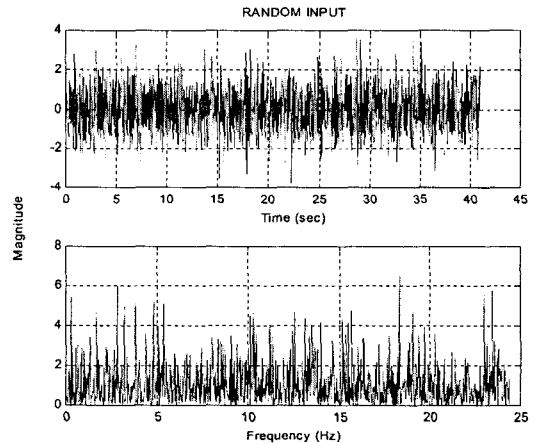


Fig. 3 Random Input Data

2.3 변수 설정

실험 변수로는 총 5가지를 선정하였다. 첫째는 일반 TMD형태로써 TMD의 작동거리가 자유로운 상태이고 둘째로는 TMD외부에 Case를 두어 TMD 질량체가 작동할 경우 제한을 받는 형태, 셋째로는 Case를 설치한 다음 TMD의 충격을 흡수하기 위해 Pad를 설치한 경우로써 Pad의 종류도 3가지 종류를 선정 하였다. Pad1은 발포고무류이고 두께는 10mm Pad2는 일반고무류이고 두께는 2mm Pad3은 댐핑시트류로써 3mm두께이다.

3. 실험결과 분석

Fig.4는 TMD 형태별에 따른 주파수응답비교이고 Fig.5는 Pad형태별 주파수응답을 비교하였다. Fig.4에서 보면 Open TMD경우는 목적주파수에서는 제어가 뛰어나나 0.87Hz와 1.25Hz에서 응답이 증가한다. 하지만 Case TMD는 목적주파수에서는 Open TMD보다는 다소 진동 감쇠가 떨어지나 거의 유사한 제어성을 가지고 있으면서 충격력에 의해 1.25Hz에서는 Open TMD보다 제어능력이 뛰어남을 알 수가 있다.

Fig.5는 Pad종류별응답으로써 3가지 Pad류 중에서 Pad1의 경우가 가장 좋지 않은 결과를 보여주고 있다. 이는 Pad의 두께로 다른 Pad류에 비해 두꺼운 관계로 인하여 Case 내부에 있는 TMD가 이력을 하지 못하고 Mass로만 작용을 하고 있기 때문이다. Pad2와 Pad3은 거의 유사한 응답이 측정되는 것으로 보아 Pad류의 종류에는 그다지 큰 영향이 없음을 알 수가 있다.

상기의 실험결과를 Table 1.에 정리하였다. Table1에서 보면 전주파수대역에서는 Open TMD경우가 가장 작고 댐핑에 있어서는 그다지 효과가 없다. 이는 스프링에 의해 Y축 방향의 진동이 계속 발생하기 때문이다. Case가 있는 경우는 전반적으로 감쇠비가 좋은 편이다. 이는 위상차에 의한 충격력으로 인하여 감쇠비가 증가한다. 하지만 이격거리 제한으로 인한 동조방해로 인하여 RMS에서는 증가하는 현상이 발생한다. 위의 내용으로만 보면 Case TMD가 효과가 없는 것처럼 느껴지나 관심주파수대역인 0.5Hz~2Hz대역사이에는 Case TMD의 진동감쇠 효과가 탁월함을 알 수가 있다.

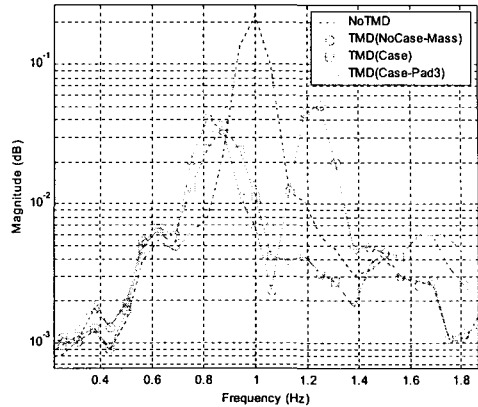


Fig. 4 Comparison of Frequency Response according to TMD Type

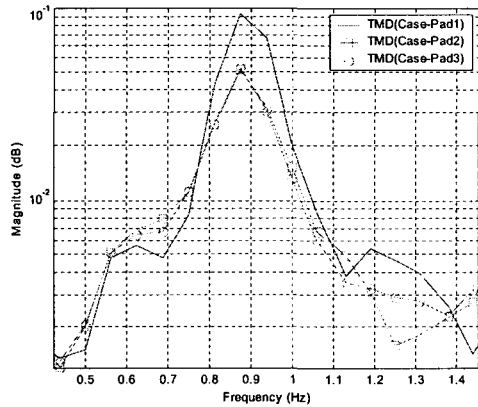


Fig. 5 Comparison of Frequency Response according to Pad Type

Fig.6과7은 자유진동에 의한 감쇠비를 알아보기 위한 실험 결과이다. Fig.6은 TMD형태별 응답으로써 비설치시 가장 오랫동안 진동을 하며 Open TMD의 경우는 스프링작용에 의해 Y축 및 회전 진동으로 인한 진동이 발생하여 금방 감쇠가 되지 않는 걸 알 수가 있다. Case의 경우는 Pad가 있고 없고의 상관없이 2개다 유사한 감쇠 현상을 보이고 있음을 알 수가 있다.

Fig.7은 Pad류에 따른 자유진동응답으로써 주파수 응답과 유사하게 Pad의 두께가 가장 두꺼운 Pad1의 감쇠비가 가장 적음을 알 수가 있다.

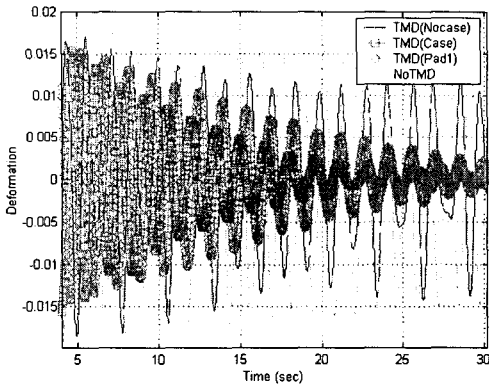


Fig. 6 Comparison of Free Vibration according to TMD Type

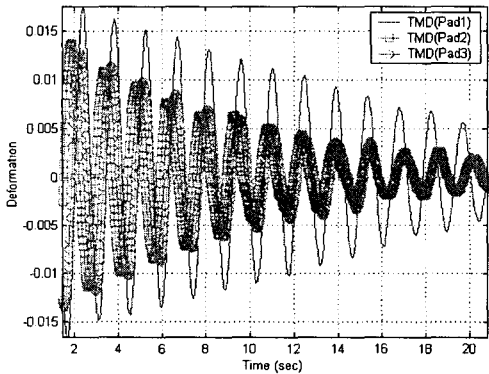


Fig. 7 Comparison of Free Vibration according to Pad Type

Table 1. Character Value of Experimental Results

	Damping Ratio (%)	Peak Value (cm/sec ²)	Peak Freq. (Hz)	RMS (dB)
Un Control	0.22	22.30	1	67.36
Case TMD	2.42	3.59	0.875	56.78
Open TMD	0.78	5.13	1.25	55.74
Pad1 TMD	1.28	10.40	0.875	62.05
Pad2 TMD	2.78	5.10	0.875	58.54
Pad3 TMD	2.63	5.28	0.875	57.92

Fig.8과 9는 Random하중에 의한 시간응답을 체크하였다. Fig.8은 TMD형태에 따른 응답으로 비제어시에는 0.507g에서 일반 Open TMD설치시에는 0.2723g로 TMD설치 전보다 1.86배가 감소되었음을 알 수가 있다. Case TMD의 경우는 0.183g로 2.77배가 감소하여 진동감쇠효과 좋은 것으로 나타났다. Fig.9는 Pad종류에 따른 시간이력으로써 거의 근소한 차이를 보이고 있다. Table.2에 랜덤하중에 의한 시간응답값에서 최고치와 감소비율을 비교하였다.

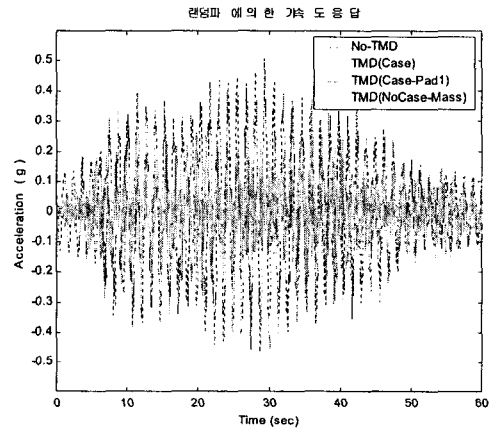


Fig. 8 Time history according to TMD Type

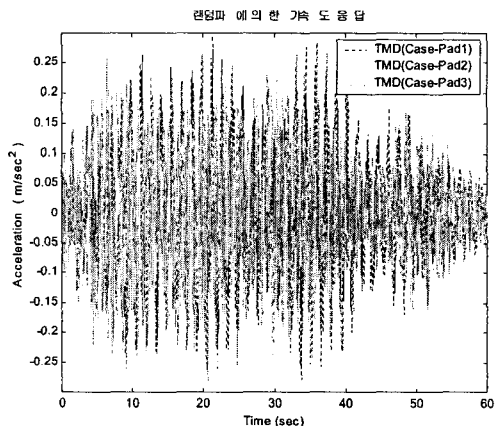


Fig. 9 Time history according to Pad Type

Table 2. Peak Value of Time History in Random

	Peak Value (g)	Ratio (Un-Control/)
Un-Control	0.5071	-
Case-TMD	0.1830	2.77
Open-TMD	0.2723	1.86
Pad1-TMD	0.2969	1.71
Pad2-TMD	0.2303	2.2
Pad3-TMD	0.2603	1.95

4. 결 론

본 논문에서는 기존 TMD의 성능 개선 목적으로 충격에 의한 에너지 흡수를 할 수 있는 새로운 형태의 TMD를 제시 하였고, 진동테이블 실험을 통하여 성능을 검토하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 감쇠비에 있어서는 Case가 있는 경우가 충격력에 의해 감쇠가 빨리 진행이 되지만, RMS에서는 이격거리 제한에 따른 동조방해로 인하여 응답값의 감소량이 Case가 없는 경우보다 작다.

2. Case에 Pad 종류에 따른 주파수응답에서 최고치의 응답에서는 영향을 미치는 요소는 Pad의 종류보다는 두께로 인한 영향을 받는 것을 알 수가 있다. 즉 패드에 의한 충격력흡수에 의한 영향은 미미하며, TMD 이격거리의 제한이 큰 영향을 미친다.

3. 결론적으로 목표주파수가 하나일 경우는 충격이 발생하지 않는 Open TMD가 구조물과 동조되어 성능이 우수하나, 목표주파수 전후를 포함한 전 주파수대에서 진동 제어에 있어서는 충격에 의해 감쇠가 증가되는 Case TMD의 성능이 우수함을 알 수가 있었다.

추후 연구과제로는 제시된 TMD 실물 가로등 실험을 통하여 성능이 검증되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) J.P.Den Hartog, Mechanical Vibrations, 4th edn, McGraw-Hill, New York, 1956.
- (2) Marcus H. and Ansley, P.E., "Design, Testing, and Specification of a Mechanical Damping Device for Mast Arm Traffic Signal Structures." Structures and Materials Research Report No. BC-050. 2000. 1.
- (3) GERB, "Vibration-Isolation Systems".