

## 동조질량감쇠기를 이용한 교량 가로등의 진동제어

# Vibration Control of Lamp posts On Bridge using Tuned Mass Dampers

하동호\*      김용규\*\*      이창형\*\*\*      유문식\*\*\*\*      박동현\*\*\*\*\*  
Ha, Dong Ho      Kim, Yong Gyu      Lee, Chang Hyung      Yoo, Moon Sig      Park, Dong Hyun

---

### ABSTRACT

Long span, high-rise bridges are rapidly increasing nowadays. Because of high flexibility, such bridges are easily excited by winds, vehicles, and pedestrians. The vibration of bridge induces a vibration of lamp post and pillar. Wind loads can also excite lamp posts and traffic signal structures directly. Because of low damping, such vibrations of lamp post are frequently amplified and come to collapse or lamp failure. In addition, such vibration makes the maintenance cycle shorter and increases social cost. We conducted vibration tests and identified the dynamic characteristics of two types lamp posts, and proposed tuned mass dampers to control the vibrations. Established models of the lamp posts present the dynamic characteristics of the structures very well and they are used to design TMDs. In this study, we suggested a new-type TMD model that is small, simple, economic and effective to suppress the vibration of lamp posts. The efficiency of TMD was examined by numerically and is to be examined experimentally.

---

### 1. 서론

교량 건설 기술의 비약적인 발달로 인해 그 형태는 장대화, 경량화 되고 있다. 이러한 형태의 교량 구조물은 풍하중과 차량 및 보행자의 이동하중으로 인해 교량에 진동이 쉽게 발생하게 된다. 교량 주형의 진동은 구조물 자체의 안정성에 문제를 일으키기도 하지만 교량 상에 가설된 부속 구조물에 진동을 발생시키기도 한다. 가로등은 교량상에 존재하는 진동에 취약한 대표적인 구

---

\*    정회원: 건국대학교 토목공학과 교수  
\*\*    (주) KR E&C 기술연구소 연구원  
\*\*\*    건국대학교 토목공학과 석사과정  
\*\*\*\*    정회원: (주) KR E&C 기술연구소 연구소장  
\*\*\*\*\*    (주) KR 기술연구소 주임연구원

조물이다. 가로등의 가해지는 진동은 크게 3가지 측면에서 손상을 가져온다. 큰 가속도 응답은 가로등 램프의 파손을 유발하고, 가로등 지주의 진동시 변위에 의한 기둥 기초부 응력집중으로 전도의 가능성이 있으며, 지속적으로 발생하는 진동은 가로등 지주의 피로파괴를 가져오기도 한다. 이러한 가로등의 파손은 많은 유지보수비용의 지출과 공사 시에 발생하는 차량의 통제에 의한 사회간접비용의 발생을 초래한다. 또한, 가로등의 파손은 차량 및 보행자의 안전사고 발생 가능성을 증가시키므로, 경제적, 사회적 여러 가지 이유로 가로등의 진동에 대한 대책이 요구된다. 본 연구에서는 실제 가로등의 실물 가진 실험을 통해 구조물의 동적 특성을 파악하고, 그 특성을 잘 표현하는 3차원 유한요소 모델을 통해 제진장치를 설계하였다. 제한한 장치는 수동형 진동 제어 장치인 동조질량감쇠기(Tuned Mass Dampers, 이하 TMD)로서 가로등 구조물의 제진전후의 진동을 평가하여, TMD의 제진효과를 확인하였다.

## 2. 동조질량감쇠기(Tuned Mass Dampers)

TMD는 수동형 진동 제어 장치로서 관성력을 이용한 진동 제어가 이루어지기 때문에 진동을 제어하기 위해 별도의 구동장치를 필요로 하지 않는다. 그리고 구조물에 적용이 간단하고 유지 관리가 거의 필요하지 않으면서 우수한 제진성능을 발휘한다는 장점을 지니고 있어서 현재 국내외에 그 적용이 증가하고 있다. TMD는 3가지 요소로 구성되어 있다. 관성력을 발휘하는 질량체(Mass)와 복원력을 발휘하는 Spring, 감쇠력으로 작용하는 Dashpot이 그 3요소이다. TMD의 질량은 관성력으로 작용하기 때문에 질량이 클수록 유리하지만 토목 및 건축 구조물의 경우에 구조물 자체의 질량이 크기 때문에 질량비가 조금만 증가하더라도 TMD의 질량은 과대해질 수 있다. TMD의 질량이 과대해지면 구조물에 큰 하중으로 작용하기 때문에 일반적으로 주구조물에 대한 TMD의 질량비는 2~3%이하로 하는 것이 일반적이다. TMD의 성능을 조절하는 요소 중에 감쇠력과 복원력은 경우 Den Hartog(1956)에 의해 제안된 최적 동조비 산출 조건에 의해 결정된다. 하나의 TMD는 주구조물의 단일진동모드의 동적응답을 감쇠시키는 효과를 가진다. 실제 구조물은 여러 가지 진동모드를 가지고 있지만 간단하게 단자유도 구조물과 TMD로 구성된 그림 1과 같은 2자유도 구조물로 표현이 가능하다. 식(1), (2)는 두 자유도의 운동방정식이다.

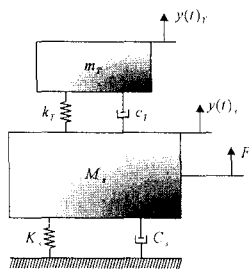


그림 1. TMD가 설치된 2자유도 모델

여기서,

- $M_s, m_T$  : Mass of Structure & TMD
- $K_s, k_T$  : Stiffness of Structure & TMD
- $C_s, c_T$  : Damping coefficient of Structure & TMD
- $y(t)_s$  : Displacement of Structure & TMD
- $y(t)_T$  : Displacement of Structure & TMD
- $F$  : External Force

$$\ddot{y}(t)_s + 2\zeta_s \dot{y}(t)_s - \omega_a^2 - 2\mu\zeta_T \omega_T (\dot{y}(t)_T - \dot{y}(t)_s) - \mu\omega_T^2 (y(t)_T - y(t)_s) = \frac{1}{M_s} F \quad \text{식(1)}$$

$$\ddot{y}(t)_T + 2\zeta_T \omega_T (\dot{y}(t)_T - \dot{y}(t)_s) + \omega_s^2 (y(t)_T - y(t)_s) = 0 \quad \text{식(2)}$$

### 3. 대상구조물 및 계측

가로등의 동적특성을 파악하기 위해 실제 동작대교 상에 설치 운용되고 있는 원형 테이퍼 형태의 가로등을 공터로 옮겨 설치 한 후 가진기를 이용하여 면내와 면외 방향으로 가진을 실시하여 가로등의 램프, 외팔보, 기둥부분의 가속도 응답을 계측하였다(그림 2). 계측된 가속도 응답을 이용하여 가로등의 감쇠비와 고유진동수를 추정하였다. 실험을 통해 감쇠비를 추정하는 가장 대표적인 방법인 로그 감소법을 이용하여 감쇠비를 추정하였다. 추정된 가로등의 감쇠비는 면내 및 면외 방향에서 각각 0.030, 0.038 이다. 대상 가로등의 면내 및 면외 방향의 고유진동수는 모두 2.05로 추정할 수 있었다(그림 3, 그림4). 표 2는 대상 가로등의 동적 특성을 정리하였다.

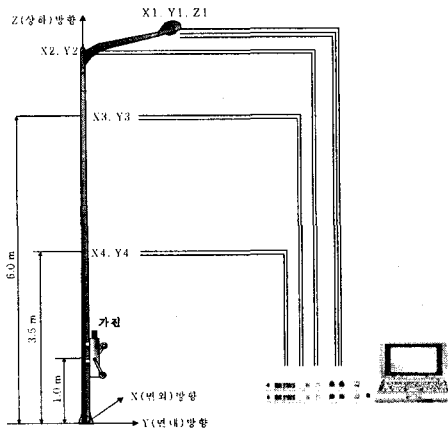


그림 2. 가속도 응답의 계측 위치 및 방향

표 2. 가로등의 동적특성

방 향	고유진동수	감쇠비
면내(X 방향)	2.05 Hz	0.030
면외(Y 방향)	2.05 Hz	0.038

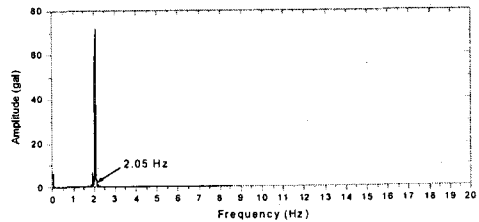


그림 3. 면내 방향 가진 시 FFT 분석결과

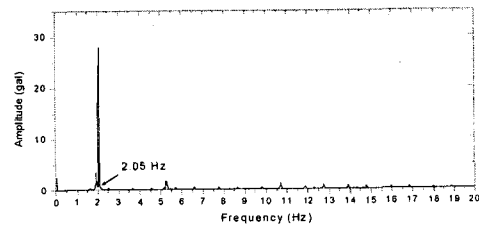


그림 4. 면외 방향 가진 시 FFT 분석결과

### 4. FEM 해석

본 연구에서는 대상 구조물의 3차원 유한요소 해석을 위해 범용구조해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL을 이용하였다. 실제 구조물을 정확히 나타내기 위해 기둥은 보요소로 외팔보는 판요소를 이용하여 모델링하였다. 그리고 기둥과 외팔보는 질량 중첩을 피하기 위해 강절연결을 실시하였으며, 가로등의 기초는 고정단으로 처리하였다. 사용된 하중은 가속도 10gal의 sin 하중을

진동수를 0.1 Hz에서 10.0 Hz까지 0.1 Hz씩 증가 시켜가면서 가진을 실시하였다. 또한, 구조물의 고유치 해석을 통해 구조물의 진동수와 모드참여계수를 표 3과 같이 구하였다.

표 3. 구조물의 고유치 해석 결과

Mode No	회전 고유진동수 (rad/sec)	고유진동수 (Hz)	고유주기 (sec)	모드참여계수(Modal Participation Factor, %)					
				X 방향		Y 방향		Z 방향	
				MASS	SUM	MASS	SUM	MASS	SUM
1	12.800	2.037	0.491	0	0	55	54.57	0	0
2	12.989	2.067	0.484	52.36	52.36	0	54.57	1.69	1.69
3	42.067	6.695	0.149	0	52.36	9	63.41	0	1.69
4	47.273	7.524	0.133	14.72	67.08	0	63.41	12.14	13.83
5	99.041	15.763	0.063	0	67.08	14	77.4	0	13.83
6	105.603	16.807	0.059	8.36	75.44	0	77.4	0.2	14.03
7	150.781	23.998	0.042	0	75.44	1	78.64	0	14.03
8	161.032	25.629	0.039	5.22	80.67	0	78.64	3.74	17.76
9	265.252	42.216	0.024	0	80.67	7	85.26	0	17.76
10	312.881	49.797	0.020	5.56	86.23	0	85.26	0.82	18.59
11	493.586	78.557	0.013	0	86.23	3	88.5	0	18.59
12	550.104	87.552	0.011	2.87	89.1	0	88.5	0.1	18.69
13	638.978	101.696	0.010	0	89.1	1	89.49	0	18.69
14	736.694	117.248	0.009	1.17	90.27	0	89.49	7.84	26.53
15	869.852	138.441	0.007	0	90.27	2	91.6	0	26.53

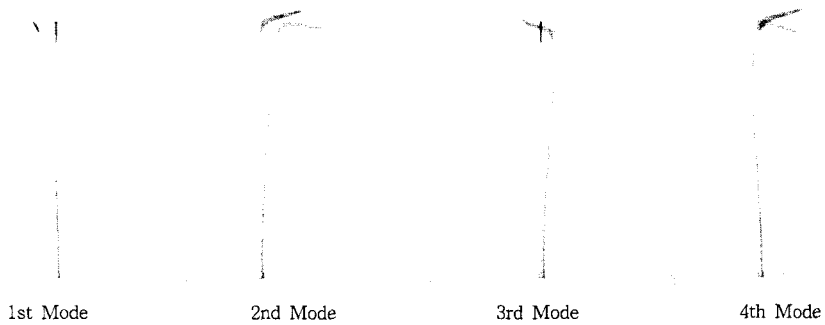


그림 5. 모드형상

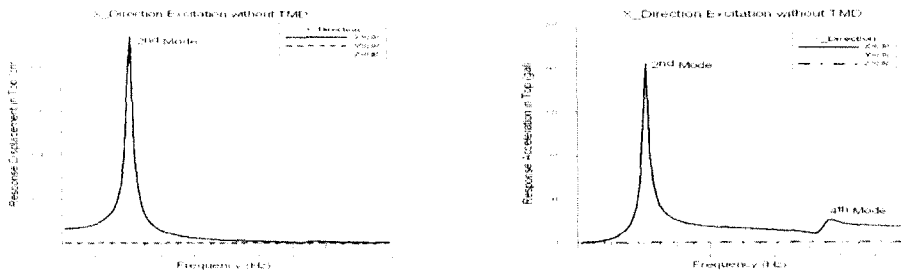


그림 6. 면내(X)방향 가속도·변위 응답

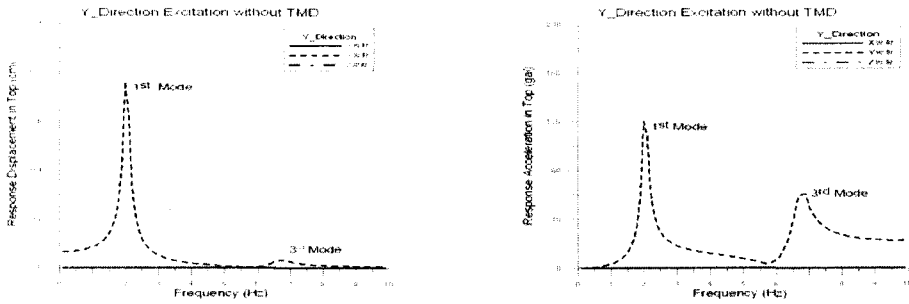


그림 7. 면외(Y)방향 가속도·변위 응답

그림 5는 해석으로 얻은 가로등 구조물의 모드형상이며, 그림 6과 7은 각각 면내, 면외의 진동 수용답 특성이다. MIDAS/CIVIL을 이용한 해석을 통해서 1차,2차,4차 모드의 진동이 지배적이라는 사실을 확인할 수 있었다. 따라서, 제진이 필요해지는 경우, 그 대상은 1차, 2차, 4차 모드이다. 또한, 그림 8과 표 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 실험과 해석에서 추정된 가로등의 동적 특성은 서로 일치하고 있으며, 이는 해석모델이 실제 구조물을 잘 표현하고 있다는 사실을 나타내고 있다.

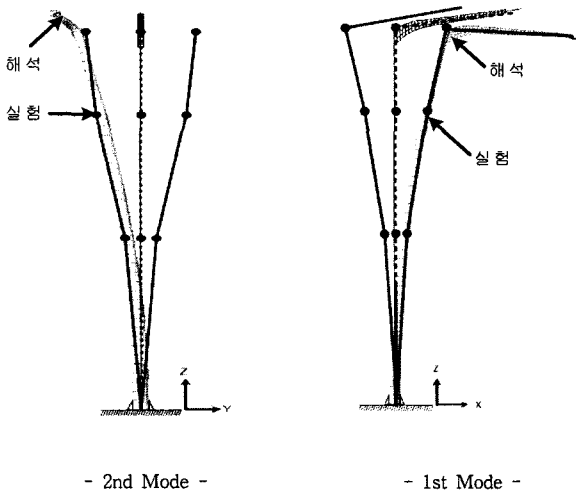


그림 8. 모드형상 비교

표 4. 가로등의 진동수

	계측	해석
면내(X, 2nd Mode)	2.05 Hz	2.04 Hz
면외(Y, 1st Mode)	2.05 Hz	2.07 Hz

## 5. 가로등의 진동 대책 및 효과

### 5.1 진동 대책

TMD를 이용한 진동제어를 위해서는 먼저 질량비를 결정하여야 한다. TMD는 관성을 이용한 진동제어 방법이므로 질량비가 크면 더 좋은 제어성능을 기대할 수 있으나, 대상

구조물인 가로등의 특성을 고려하여, 소형경량의 장치가 가능하도록 질량비 3%를 이용하였다. TMD의 성능을 결정하는 나머지 특성인 고유진동수와 감쇠비는 Den Hartog(1956)에 의해 제안된 동조 조건식을 이용하였다. TMD는 구조물의 특정 모드에 대한 진동제어효과를 가지게 되며 질량비는 해당모드의 유효질량(Effective Mass)에 의하여 결정된다. Den Hartog에 의해 제안된 최적 동조비는 아래 표와 같이 구할 수 있다.

표 5. 가로등의 모드별 동적 특성과 TMD의 최적 동조조건

모 드	가로등의 동적 특성			TMD의 최적 동조조건			
	모드참여율	유효질량(kg)	진동수	질 량(kg) (질량비 3%)	진동수비 $\left(\gamma = \frac{1}{1+\mu}\right)$	진동수 (Hz)	최적감쇠비 $\left(\xi_T\right)_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}}$
1(면외)	54.57%	7.18	2.05Hz	0.215	0.97	1.99	0.1
2(면내)	52.36%	6.89	2.05Hz	0.207	0.97	1.99	0.1
4(수직)	12.14%	1.60	7.52Hz	0.048	0.97	7.30	0.1

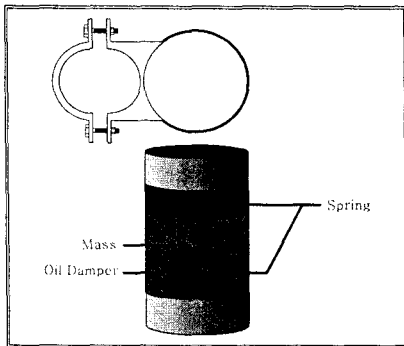


그림 9. 가로등 TMD

TMD의 형태는 대상구조물에 쉽게 적용 가능하도록 검토되었다. 계측 및 해석 결과로부터 관심모드인 1차 모드와 2차 모드의 동조조건이 유사한 것을 확인하였기 때문에 평면적으로 동일한 동특성을 갖는 TMD로 양 모드를 제진하도록 하였다. 또한 기둥부의 적절한 위치에 설치하는 경우에는 4차 모드의 제진도 가능하여 연직방향의 진동수를 4차 모드에 일치시키는 TMD를 제안하였다. 이 경우, 하나의 TMD로 3방향의 제진효과를 누리는 일거삼득의 효과를 볼 수 있을 것으로 사료된다. 고안된 TMD의 형상은 그림 9에 나타내었다. 중앙에 질량을 가지는 추를 배치하고, 이를 상하와 평면방향에 대한 자유도를 가지는 스프링으로 고정하였으며, 점성오일을 이용하여 감쇠를 제공한다. 본 TMD는 소형이며 제진대상 가로등과 같은 원형의 형태를 가지고 있기 때문에 주 구조물인 가로등 내부에 설치가 가능하며, 외부설치 시에도 미관상 잘 어울린다. 또한 그 형태가 단순하여 경제적이고, 기존 구조물의 외부에 설치시 볼트를 이용한 간단한 장착으로 그 작업이 용이하다.

## 5.2 제진효과

가로등의 TMD를 장착한 후의 제진효과를 알기 위해 본 연구에서는 MIDAS/CIVIL을 이용한 3차원 유한요소모델로 시뮬레이션을 실시하였다. TMD 장착 전의 해석조건과 동일한 조건에서 가로등 기둥(Pole)의 상부에 TMD 모델을 추가 한 후 고유치 해석과 시간이

력해석을 수행하고, 진동제어 전의 가로등 기둥상부의 가속도 응답과 변위응답을 비교 분석하였다. 그림 10과 11은 구조물에 TMD를 장착한 후에 상부에서의 변위 및 가속도 응답을 제진전과 비교한 것이다. 먼내, 변위 방향의 변위응답가 가속도응답이 최소 52%에서 최대 65%까지 감소함을 알 수 있다. 표 6에 제진전후의 응답감소 효과를 정리하였다.

표 6. 제진 전후의 응답 비교

가진 방향	Before Control		After Control		응답 감소 효과 (Before/After)	
	변위 (cm)	가속도 (gal)	변위 (cm)	가속도 (gal)	변위 (%)	가속도 (%)
X방향	0.95	165.38	0.55	86.50	57.89	52.30
Y방향	0.77	120.20	0.50	73.80	64.94	61.40

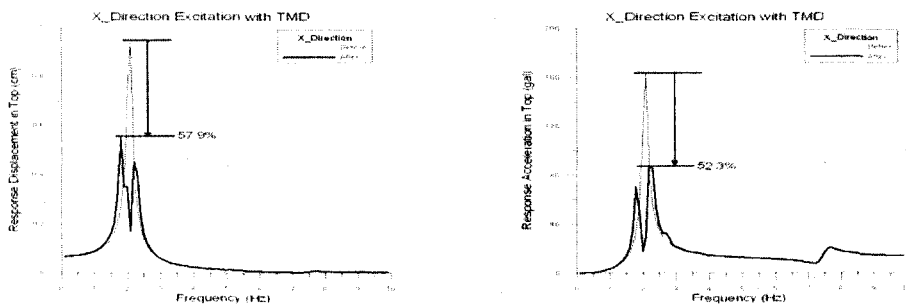


그림 10. TMD 장착 후의 변위 및 가속도 응답(X방향 가진 시)

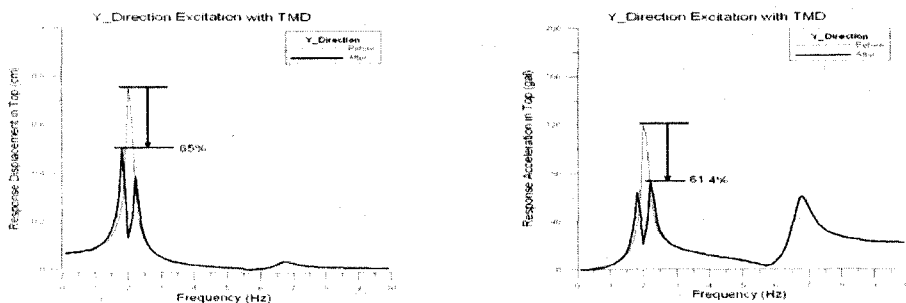


그림 11. TMD 장착 후 변위 및 가속도 응답(Y방향 가진 시)

## 6. 결론

교량상의 지주구조물은 진동에 취약하고, 특히 가로등은 교량하중이나 풍하중에 의해 손상을 입은 사례가 국내외에 보고 되고 있다. 이러한 손상은 구조적 피해뿐만 아니라 교통정체 등의 커다란 사회적 비용을 요구한다. 본 연구에서는 각종 진동에 의한 가로등

의 파손을 방지하기 위하여, 가로등의 동특성을 계측과 해석을 통하여 검토하고 진동대책을 제안하였다. 가로등의 실물가진실험과 3차원 유한요소 해석을 수행하여, 실구조물의 동특성을 잘 표현하는 해석모델을 수립하였고, 얻어진 모델을 이용하여 가로등 구조물에 적합한 동조질량감쇠기의 형태를 제안하였다. 또한 범용구조해석 프로그램을 이용한 시뮬레이션으로 그 진동저감효과를 확인할 수 있었다. 제안된 새로운 형태의 TMD는 경제적이고 단순한 형태이며, 미적/경제적 측면뿐만 아니라, 시공성에 있어서도 가로등 구조에 대단히 적합하다고 사료된다. 본 연구를 통해 제안된 제진방법은 가로등의 장수명화로 인한 사회적 비용 절감효과를 기대할 수 있을 것이며, 세장비가 큰 다른 지주 구조물에도 응용이 가능할 것이다.

추후, 제안한 TMD를 제작하고 실제 가로등에 설치하여, 실물가진실험을 통한 진동저감효과를 확인할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 중소기업청 중소기업기술혁신개발사업의 지원으로 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사드립니다. 또한 현대건설기술연구소 구조연구팀의 협조에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 김남식, 정운, 서주원, 안상섭 “사장교 케이블 동특성 평가를 위한 케이블 가진시스템 개발,” 한국지진공학회 논문집, Vol. 7, No. 4, 2003, pp. 77-79
2. 박찬민, 박종철, 황성호, 김용길, 권오병 “TMD를 이용한 서해대교 가로등의 진동제어”, 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 2003, pp.252-256
3. 변윤주, 윤태양, 송재준 “바람에 의한 장대 Tower 구조물의 진동제어 방법”, 한국소음진동공학회지, Vol. 3, No. 4, 1993, pp. 293-299
4. 유문식, 윤태양, 倉林浩 “동조질량감쇠장치를 이용한 보도교의 효율적 진동제어”, 한국강구조학회지, Vol. 15, No. 3, 2003, pp. 24-31
5. J. P. Den Hartog "Mechanical Vibrations", 4th edn, McGraw-Hill, New York, 1956
6. T. T. Soong and G. F. Dargush(1997) "Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering" John Wiley & Sons, Ltd..
7. 倉林浩 “구조물의 제진용 TMD의 적용사례”, 한국강구조학회지, Vol. 5, No 2, 1993, pp. 24-31
8. 別井 仁, 飯嶋 俊比古, 神山 淨 “橋梁に取り付けらわる道路照明 柱の制振対策”. 橋梁と基礎, 2000, pp.50-53