

碩 士 學 位 論 文

同調 質量 시스템의 最適 設計

指導教授 殷 熙 昌



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

建築工學專攻

張 泰 俊

2003

同調 質量 시스템의 最適 設計

指導教授 殷 熙 昌

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2003 년 6 월 일

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

建築工學專攻

張 泰 俊



제주대학교중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

張泰俊의 工學 碩士學位論文을 認准함.

2003 년 월 일

<u>委員長</u>	인
<u>委 員</u>	인
<u>委 員</u>	인

목 차

목 차	-----	i
Summary	-----	ii
Figure Contents	-----	iii
Table Contents	-----	iv
I. 서 론	-----	1
1. 연구 배경	-----	1
2. 연구 목적	-----	2
3. 연구 방법	-----	3
II. 제진 구조	-----	4
1. 제진 구조의 목적	-----	4
2. 진동 제어 방법	-----	4
2.1 기초 격리 시스템	-----	5
2.2 질량 효과 시스템	-----	12
2.3 에너지 흡수 시스템	-----	14
2.4 능동 제어 시스템	-----	14
III. TMD의 최적 설계	-----	19
1. 질량동조 감쇠기	-----	19
2. 최적 설계와의 비교	-----	20
3. ATMD	-----	24
IV. 결 론	-----	31
참고 문헌	-----	32

Optimal Design of Tuned Mass Damper System

Jang, Tae-Joon

Department of Construction and Environmental Engineering
Graduate School of Industry
Cheju National University
Supervised by Professor Eun, Hee-Chang

Summary

This paper presents optimal design values of tuned mass damper, which is a control system to reduce the dynamic responses. The values were obtained by minimizing a performance index, which is a quadratic form by dynamic responses, and applying an optimization algorithm. Also, more reduction of dynamic responses was observed by acting control forces determined by optimal control theory on the structure. It was desirable that an additional tuned mass damper except the top floor of a multi-degree-of-freedom structure locates at the floor governing the second vibration mode.

Figure Contents

Fig. 1. Types of vibration control-----	5
Fig. 2. Laminated Rubber Bearing-----	6
Fig. 3. R-FBI system-----	8
Fig. 4. EDF system-----	9
Fig. 5. Behavior of EDF system under earthquake-----	9
Fig. 6. NZ system-----	11
Fig. 7. Tuned Mass Damper System-----	13
Fig. 8. Hybrid Mass Damper-----	16
Fig. 9. Active Tendon Control system to apply in bridge---	17
Fig. 10. Isolator-Actuator Hybrid System-----	18
Fig. 11. TMD installed on the top of building-----	20
Fig. 12. Comparison of dynamic properties of TMD-----	22
Fig. 13. Comparison of dynamic response-----	23
Fig. 14. Control forces by optimal control-----	26
Fig. 15. Response comparison by TMD and ATMD-----	27
Fig. 16. Displacement response of 10th floor-----	31

Table Contents

Table 1 Optimal values according to the story-----	29
Table 2 Mode shapes of primary structure-----	30



I. 서 론

1. 연구 배경

최근 들어 국내에 건축물들은 고층화 및 경량화 추세로 풍하중이나 간헐적으로 발생하는 지진에 의한 진동으로 내진 설계나 건축물의 진동 제어에 대한 관심이 증가하고 있다. 일본, 미국 등과 같이 지진 다발 지역에서는 내진 설계와는 별도로 진동 제어 시스템을 설치하여 진동에 대한 피해를 줄이려는 많은 시도들이 행해지고 있다. 제어 시스템은 크게 수동(passive)과 능동(active) 제어 시스템으로 구분된다.

수동 제어 시스템은 작용하는 외력을 이 시스템의 동적 능력에 의해 에너지를 흡수하여 구조물의 동적 특성을 변화시키는 역할을 한다. 반면에, 능동 제어 시스템은 센서에 의해 지진동을 탐색하고 이에 대응하는 제어력을 가력기(actuator)에 의해 작용시키는 방법이다. 이 시스템은 전기적인 장치에 의해 힘을 발휘시키므로 지진 작용시에 외부 에너지의 공급이 중단될 경우에는 제어력을 발휘시키지 못하는 단점이 있으나 수동 제어에 비하여 진동 제어를 확실히 할 수 있다는 장점이 있다. 이들 수동과 능동이 지닌 장점을 효율적으로 발휘시키기 위하여 두 시스템을 복합한 합성 시스템(hybrid system)이 적용되기도 한다.

수동 제어에 관계되는 시스템은 여러 종류가 있으며, 그 효율성이 이론적으로 규명될 뿐만 아니라 현장에 적용되는 단계에 있다. 따라서, 이 분야에 대한 연구들이 활발하게 진행되었으며, 현재도 수행 중에 있다.

수동 제어 시스템의 일종인 동조 질량 감쇠기(Tuned Mass Damper, 이하 TMD라 함)는 진동 에너지를 구조물의 고유 진동수에 동조하여 기계적 감쇠비를 증가시키는 방법으로, 유지 관리가 쉽고 효과가 비교적 확실한 장점이 있다. 뉴욕시에 Citicorp 쉐타 건물에 최초로 MTS사가 제작한 TMD가 설치되었다. Den Hartog는 동조 질량 감쇠기가 포함된 2자유도 모델의 조화 진동에 의한 정상 상태 응답을 실시하여, 질량 동조 동적확대 계수(dynamic magnification factor) 곡선 상에 2개의 고정점이 되도록 높으면서 같은 값을 갖도록 함으로서 최적 동조 질량 감쇠기 설계 방법을 제안하였다. 이는 시스템의 진동 제어 영역을 기본 진동 모드 외에 타 모드의 진동 제어를 목적으로 하기 때문이다.

McNamura, Luft 등은 조화 진동 및 랜덤 진동 해석에 의해 TMD의 최적 설계 방안을 제시하였다. 이외에도 TMD 설계에 관한 많은 연구 결과들이 있다. 그러나 그 적정 설계에 관한 연구는 일관되지 못하며, 외력으로서 조화하중과 지진하중이 작용할 경우에 그 최적 설계에 대한 그 방안이 상이하게 나타나고 있다.

따라서, 본 연구에서는 구조물의 변위에 의한 목적 함수(performance index)를 최소화하는 최적화(optimization)에 의해 미지의 동적 특성을 결정하여 기존의 연구 결과와 비교를 한다. 또한, 고층 건물에 있어서 TMD를 최상층 외에 추가로 설치할 경우에 최적 위치 및 설계 방안을 최적화하여 결정한다.

2. 연구 목적

“자연의 재해를 지배 못할 경우에 이를 수용하라”는 선인들의 말씀과 같이 지진이라는 자연 재해를 지배할 수 없는 한, 이를 지진의 발생에 대

비한 설계를 요구한다. 국내 건축 설계 기준에서는 1987년부터 내진 설계를 규정하고 있다. 내진 설계 외에도 확실한 지진동에 대비한 구조 설계를 위하여는 진동 제어 시스템의 도입을 필요로 한다.

따라서, 본 연구에서는 지진 발생시에 충격에너지를 구조물의 동적 성질에 의해 흡수하는 방식을 취하는 TMD의 설계 방안을 제시하는데 그 목적이 있다. 최근 들어서는 TMD를 여러 개 설치하여 지진에 대한 응답을 최소로 하는 방안도 연구가 진행 중에 있으며, 그 일환으로 최상층 외에 추가로 TMD를 설치할 경우에 그 위치를 결정하는 방법을 제시하며, 본 연구에서 제안한 방법과 기존의 연구 결과들을 비교하여 연구의 타당성을 검증한다.

3. 연구 방법

본 연구는 기존의 연구 결과들과 TMD의 설치 목적 등을 명확히 파악하여 TMD의 새로운 설계 방안을 도출하고자, 지배방정식을 결정하고 이에 대해 수학 프로그램인 MATLAB을 사용하여 그 최적화를 실시하였다. 기존의 연구들이 대부분은 건축물의 1차진동 모드만을 고려하므로 주구조물과 TMD에 의한 2자유도의 시스템으로 해석을 실시하였으나, 본 연구에서는 기타 모드에 대한 영향을 고려하였으며, 조화 진동 동안에 구조물의 진동응답의 합을 목적 함수로 이를 최소로 하는 TMD의 설계 값을 MATLAB 프로그램을 사용하여 결정하였다. 이 결과들은 Den Hartog가 제안한 TMD 설계값과 비교하여 그 타당성을 비교하였다.

II. 제진 구조

1. 제진구조의 목적

지진동 하에 구조물의 진동은 재산의 피해 및 심지어 인명 손실로 이어진다. 따라서, 1987년부터 국내 설계 기준에서도 내진 설계를 규정하고 있다. 내진 설계 외에 추가적으로 임의 범위 내로 진동을 감소시키기 위하여 제어 시스템을 도입하여 확실한 제어를 요구한다. 따라서, 제진의 목적은 지진이나 강풍에 의한 진동으로 건물내부의 기능이 지진이나 강풍으로 인해 손상되지 않는 것을 주목적으로 다음으로 요약될 수 있다.

- (1) 건물내부의 기능이 지진이나 강풍으로 인해 손상되지 않도록 하는 것(기능성의 향상 혹은 확보).
- (2) 구조물의 골조 혹은 내부의 마무리부재가 손상됨에 따라 건물 내부 외에 있는 사람이 위험하게 되지 않을 것.
- (3) 구조물의 자산 가치를 잃지 말 것(안전성의 향상 혹은 확보).
- (4) 구조물의 건설 단가를 낮게 하는 것(경제성의 향상).

2. 진동 제어 방법

구조물의 진동 제어 방법은 작용하는 하중, 제어 방법의 역학적 원리 등에 따라 여러 가지 방법으로 분류할 수 있다. Fig. 1은 지진 하중을 받는 구조물에 대해 분류를 나타내고 있다.

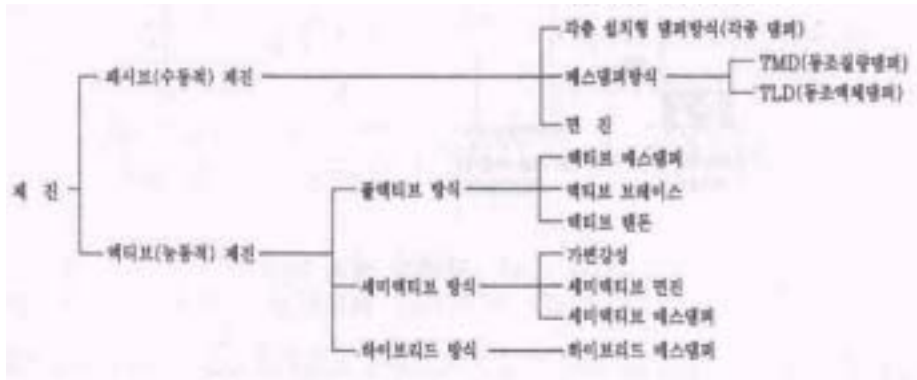


Fig. 1 Types of vibration control

Fig. 1에 나타낸 바와 같이 내진 설계는 넓은 의미에서 진동 제어 방법의 하나라고 할 수 있으나, 구조물 자체의 강성만으로 지진하중에 대하여 사용성과 안정성을 확보한다는 점에서 응답 제어 시스템과는 구분된다. 응답 제어 시스템이란 진동을 저감시키기 위한 별도의 역학적 장치와 구조물로 이루어진 시스템을 말하며, 사용하는 장치의 역학적 원리에 따라 기초 분리 시스템(base isolation system), 질량 효과 시스템(mass effect system), 에너지 흡수 시스템(energy absorption system), 그리고 능동 제어 시스템(active control system) 등으로 구분된다. 또한 사용하는 장치가 구조물에 별도의 에너지를 공급하는지의 여부에 따라서 능동 제어 시스템을 제외한 나머지 시스템을 수동 제어 시스템으로 분류하기도 한다.

2.1 기초 격리 시스템

기초 격리 시스템은 구조물의 기초와 상부 구조 사이에 설치되고 수평 방향으로 유연한 강성을 갖는 특성 때문에 상부 구조물의 고유 주기를 이동시켜 구조물을 공진 주파수로부터 분리시킨다. 아울러 수평 방향 진동

에너지를 흡수하는 기능도 갖고 있다.

(1) LRB(Laminated Rubber Bearing) System

가장 널리 사용되는 감진장치로서 고무에 강재 철판을 보강함으로써 수직방향의 강성을 증가시킨다(Fig. 2). 고무와 철판의 결합은 Vulcanization에 의한다. 그 자체만으로는 감쇠 능력은 작아 추가적인 감쇠장치가 함께 쓰이는 경우가 많다. 면진을 위한 주요 기능은 진동수 이동에 있다. 일반적으로 LRB 시스템의 구조물 전체의 질량에 대한 고유주기는 2초 정도이고, 감쇠비는 0.08 정도의 값이 사용된다.

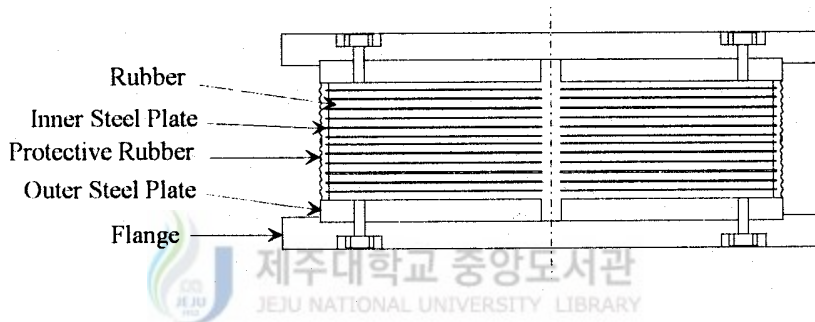


Fig. 2 Laminated Rubber Bearing

(2) P-F(Pure-Friction) Base Isolation System

P-F Base Isolation System 혹은 Sliding-joint Base Isolation 시스템으로 불리는 이 장치는 구조물과 기초 지반과의 마찰을 이용하여 구조물을 지진으로부터 보호한다. 이 장치는 모든 감진장치 중에서 가장 간단한 시스템으로 볼 수 있다. P-F Base Isolation System은 구조물의 바닥판과 기초 사이의 미끄럼에 의하여 발생하는 수평 마찰력이 구조물이 받는 지반 가속도를 감소시키고 구조물의 수평 변위를 줄이는 역할을 하고, 마찰에 의한 변위로 많은 에너지를 흡수하므로 구조물을 지진에 대해 보호한다.

P-F Base Isolation System은 변위에 대한 복원력이 없으므로 일단 변위가 발생하면 그 후 구조물이 추가적인 힘을 받지 않을 경우 그 변위는 계속 유지된다. P-F Base Isolation System의 특징은 약한 지진시에는 미끌림이 발생하지 않고 이 때 구조물은 Isolator가 없는 경우의 응답과 동일하게 나타나며, 일정 임계값을 넘는 큰 지반 가속도를 받는 경우에만 시스템에 미끌림이 일어나고 Isolator 효과가 발생한다. 여기에서 임계값은 마찰계수에 의해 결정되어지며, 마찰계수는 보통 0.1 정도이다. 비교적 규모가 작은 구조물에 이용하기에 경제적이다.

(3) R-FBI(Resilient-Friction Base Isolation) System

1987년 Hostaghel과 Khodaverdian에 의해 제안된 것으로 둥근 Teflon 코팅된 판들이 마찰에 의해 접촉되어 있고 중앙에 복원력을 제공하는 Rubber Core나 LRB가 들어 있다(Fig. 3). 1984년 Ikonomou에 의해 발표된 Alexisison System과 유사한 형태이다. R-FBI 시스템은 LRB 시스템과 P-F 시스템의 특성을 모두 가지고 있으므로 LRB 시스템과 P-F 시스템을 동시에 구조물에 사용하는 것과 유사하다. R-FBI 시스템은 P-F 시스템과 같이 일정 임계값에 미달되는 지반 가속도에 대해서는 작동하지 않으나, 변위가 발생했을 경우 P-F 시스템과는 달리 복원력을 갖고 있다. 일반적으로 R-FBI 시스템은 LRB 시스템 보다 유연하여 상부 구조물 전체 질량에 대한 시스템의 고유 주기는 4초이며, 마찰판의 마찰 계수는 P-F 시스템의 값보다 작은 0.03에서 0.05의 값이 사용되며, 지진시 마찰판의 마찰에 의해 효과적인 에너지 흡수, 분산이 이루어진다. R-FBI 시스템은 역학적으로 스프링, Visco-Damper와 Friction Damper가 병렬로 연결된 형태로 모델링된다.

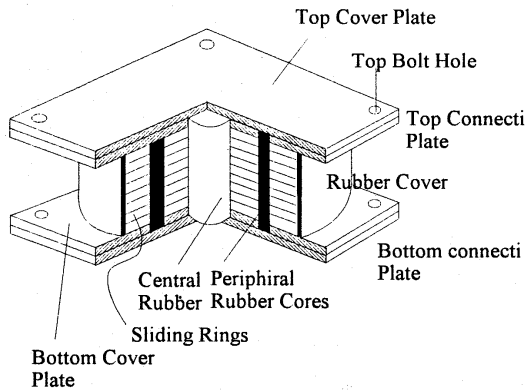


Fig. 3 R-FBI system

(4) EDF(Electric De France) System

강재판으로 보강된 횡유연성(Lateral Flexibility)을 가진 Neoprene Pad 위에 추가된 안전 장치인 Friction Plate가 있다. Neoprene Pad의 상부에 있는 납-청동 합금판이 구조물 바닥에 있는 Stainless Steel Plate와 Friction couple을 이룬다(Fig. 4). Neoprene Pad는 40℃ 정도까지 탄성 계수의 변화가 크지 않고, 20년 정도의 시간이 흘러도 별다른 노화 현상을 보이지 않으며, 현재 프랑스에서 원자력 발전소 건설시 표준 설계로 채택되고 있다. 일반적으로 원자력 발전소는 수천 미터의 넓은 면적의 콘크리트 기초 위에 건설되는데, 이 콘크리트 기초와 지반 사이에 Isolation 시스템을 장치하여 지진의 위험으로부터 원자력 발전소를 보호하게 한다.

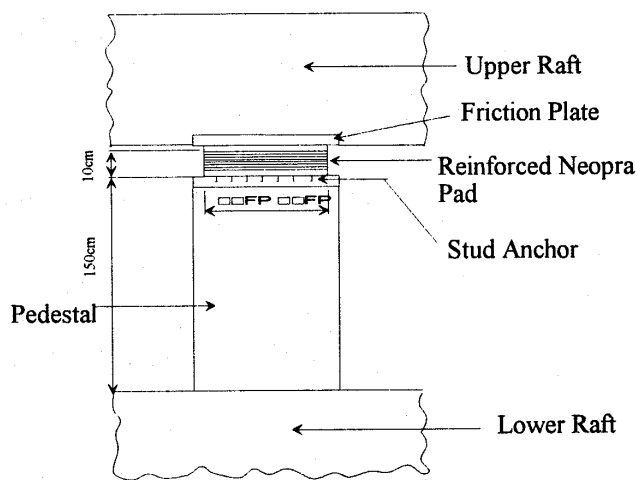


Fig. 4 EDF system

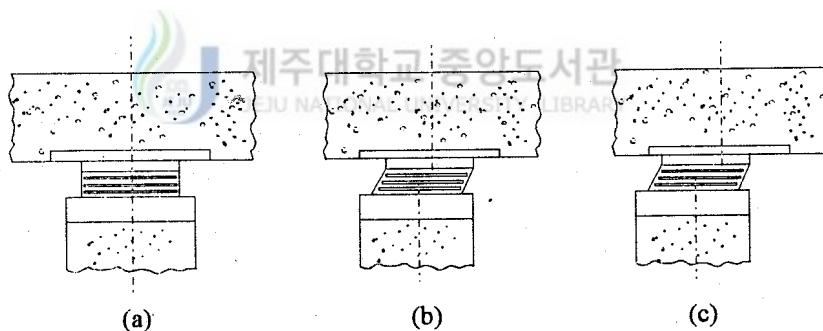


Fig. 5 Behavior of EDF system under earthquake

EDF 시스템의 거동 특성은 첫째, 설계 지진 강도 내에서는 Neoprene Bearing이 탄성적으로 거동하며(Fig. 5(b)), LRB와 유사한 거동을 보인다. 둘째, 설계강도를 초과하는 강진에서는 Friction Plate에서 slip이 일어나 전단력의 전달을 일정한도 내로 제한한다. 이 때는 지진 종료후

Friction Plate에서 잔류 변위가 남는다(Fig. 5(c)). 셋째, Friction Plate에 의해 전달되는 최대 전단력의 크기는 Bearing 에 의해 가해지는 수직력과 Friction Plate의 마찰계수를 곱하여 구한다. 마찰판의 미끄러짐이 일어나는 조건을 결정하는 값이 마찰계수로 약 0.2 정도가 사용되며, 상부 구조물의 질량에 대한 고유 주기는 약 1초 정도이다.

(5) SR-F(Sliding Resilient-Friction) System

최근에 R-FRI 시스템과 EDF 시스템의 중요한 장점들을 결합한 새로운 Isolation 시스템인 SR-F 시스템이 개발되었으며, 이 시스템은 기본적으로 EDF 시스템과 유사한 Isolation 시스템으로 볼 수 있다. EDF 시스템의 Neoprene Pad를 R-FRI로 대체한 형태이다.

이 시스템은 큰 상대 변위를 일으키지 않고도 효과적으로 가속도 응답을 줄이며, 침투 응답은 지반 가속도의 강도나 주파수특성의 극심한 변화에 대해서도 민감하지 않다. 가장 최근에 개발되었으며, 설계 강도 이하의 지진에서는 R-FBI와 같이 작용하고, 설계 강도 이상의 지진에서는 Friction Plate에서 slip이 일어난다.

(6) NZ(New Zealand) System

NZ 시스템, Lead Core Laminated Rubber Bearing, Lead Rubber Bearing 등으로 불리는 이 장치는 LRB 시스템을 개선하여 만든 장치이다. LRB의 중앙에 원통형의 납을 넣어 추가적인 에너지 분산 장치로 사용한다(Fig. 6). 고무에 의해 중앙 복원력이 제공되고 납의 전단, 압축, 항복을 통해 다량의 에너지를 흡수한다. 이 과정을 통해 감진 장치의 횡변위를 줄인다. 이 메카니즘은 Hysteretic damper로 취급될 수 있다.

단점은 지진 후 Lead Plug의 손상을 외부에서 확인하기 어렵고, 강진

후 모든 Bearing을 교환해야 할지도 모른다는 것이다. 최근에는 뉴질랜드에서 교량 등에 많이 이용되며, 일본, 아일랜드, 이탈리아, 미국 등지에서도 이용되고 있다.

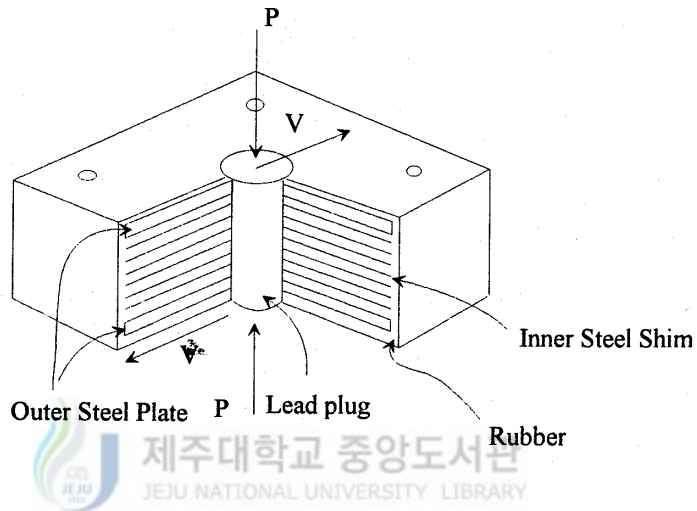


Fig. 6 NZ system

(7) High Damping Rubber Bearing(HDRB)

HDRB의 외관상 형태는 LRB와 동일하나 사용된 고무가 높은 감쇠 효과를 갖는 것이 LRB와는 다른 특성이다. 따라서, 감쇠기구가 감진 장치에 내장된 형태가 되므로 따로 감쇠기구를 설치할 필요가 없고 설치가 간단하다. 에너지를 흡수하는 감쇠 메카니즘은 고무에 첨가된 충전재 입자들의 마찰에 의해 이루어진다. HDRB는 수평 변위와 복원력의 관계에 있어서 선형에 가까운 LRB와는 달리 매우 큰 비선형성을 나타내며, 감쇠효과도 hysteretic damping에 의해 구현된다. HDRB의 경우 최근에는 감쇠 계수가 0.4 이상인 super plastic rubber에 대한 실용성 연구가 이루어지고

있다.

2.2 질량 효과 시스템

질량 효과 시스템은 건물 상부에 건물 고유주기와 같은 고유주기를 가지는 추와 스프링과 감쇠장치로 이루어지는 진동계를 설치한 것으로 건물이 진동하면 이것을 억제하려고 하는 힘이 건물에 작용하도록 하는 것이다. 장치의 주기를 건물의 주기와 같게 하는 의미에서 동조 질량 댐퍼(tuned mass damper, TMD)라고도 한다.

Fig. 7은 질량 댐퍼의 원리를 설명하고 있는 것이다. 이 모델에서는 건물을 하나의 질량과 스프링과 viscous damper로 이루어지는 모델로 치환하고 이 위에 질량 댐퍼를 설치하는 것이다. 기계적인 장치를 사용하는 대신에 유체의 움직임에 의해서 에너지 감쇠 효과를 발휘하는 동조 액체 감쇠 장치(Tuned Liquid Damper, TLD)가 있다. TMD나 TLD는 작동을 위해 외부 외부 에너지의 공급이 필요치 않은 매우 간단하며 유지 관리가 쉽고 효과가 비교적 확실한 시스템으로 그 적용 범위가 점점 확대되고 있다.

하나의 TMD는 구조물의 단일진동모드의 동적 응답을 줄이는데 효과적이다. 하지만 구조물이 여러 개의 진동 모드를 가지고 있을 경우라도 가장 지배적인 모드를 선정하여 원구조물과 TMD 시스템을 포함하는 2자유도 모델로 TMD의 기본적인 특성을 나타낼 수 있다.

TMD의 감쇠비가 0일 경우 2자유도 시스템은 2개의 완전히 분리된 진동 모드를 나타내며, 무한대일 경우 2자유도 시스템은 단자유도의 진동 시스템이 된다. TMD 시스템이 포함된 2자유도 모델의 조화진동에 의한 정상상태 동적응답은 해석적으로 구할 수 있으며, 조화진동의 주파수에 대한 동적확대계수의 그래프를 보면 TMD의 감쇠비에 상관없이 DMF 곡

선이 2개의 고정된 점을 지나는 것을 확인할 수 있다. Den Hartog는 DMF 곡선상의 2개의 고정점이 되도록 높으면서 같은 값을 갖도록 함으로서 최적 TMD를 설계할 수 있다는 것을 제안하였다. 이것의 물리적인 의미는 공진 주파수에서 DMF 곡선을 되도록 수평으로 만드는 것으로 결과적으로 원구조물의 동적 응답을 최대한 효과적으로 줄이는 것이다. 최적 TMD의 설계를 위해 Den Hartog는 다음과 같은 최적 진동수비 γ_{opt} 와 최적 감쇠비 $\xi_{T_{opt}}$ 를 질량비 μ 의 함수로 나타내었다.

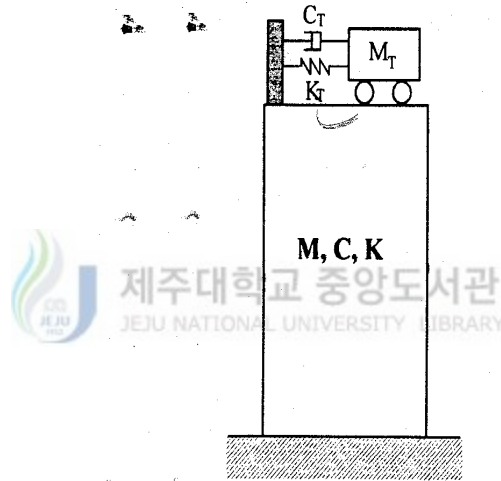


Fig. 7 Tuned Mass Damper System

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (2.1)$$

$$\xi_{T_{opt}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3\mu/2}{1 + 3\mu}} \quad (2.2)$$

여기서,

$$\omega_T = \sqrt{\frac{K_T}{M_T}} ; \text{TMD의 고유 진동수}$$

$$\xi_T = \frac{C_T}{2M_T\omega_T} ; \text{TMD의 감쇠비}$$

$$\omega_S = \sqrt{\frac{K_S}{M_S}} ; \text{원구조물의 고유 진동수}$$

$$\xi_T = \frac{C_T}{2M_T\omega_T} ; \text{원구조물의 감쇠비}$$

$$\mu = \frac{M_T}{M_S} ; \text{질량비}$$

$$\gamma = \frac{\omega_T}{\omega_S} ; \text{진동수 비}$$

2.3 에너지 흡수 시스템(Energy Absorption System)

에너지 흡수 시스템은 기본적으로 감쇠기에 기초한 시스템이다. 감쇠기는 구조물의 진동 응답을 줄이기 위해 지진으로부터 구조물에 들어오는 에너지를 흡수한다. 이러한 에너지 흡수 시스템은 지진 입력 에너지를 금속의 소성 이력 에너지나 마찰 에너지로 변환시키는 이력 감쇠 시스템과 지진 입력 에너지를 점성 유체나 점탄성 물질의 변형을 통해 열에너지로 변환시키는 점성 감쇠 시스템으로 구분할 수 있다. 이러한 에너지 흡수 시스템은 단독으로 사용되거나 다른 형태의 진동 제어 시스템의 일부로서 사용된다.

2.4 능동 제어 시스템

능동 제어 시스템은 외부 하중에 의하여 발생하는 구조물의 응답을 센서를 통해 감지하고 이 정보로부터 필요한 제어력을 결정하여 구조물에 전달함으로써 진동을 제어하는 방법이다. 이 방법은 구조물에 발생하는

진동 에너지를 흡수하는 수동형 진동 제어 방법에 비하여 구조물에 에너지를 가하여 진동을 제어하므로 능동 제어 시스템이라 한다. 능동형 진동 제어 방법은 구조물이 가질 수 있는 적응성을 이용함으로써 지진과 같은 불확실한 하중에 대하여 적절히 대처할 수 있는 장점을 지니고 있으나, 상대적으로 비용이 많이 드는 단점이 있다.

능동 제어 시스템은 센서로부터 얻은 정보를 이용하여 필요한 제어력을 결정하는 제어 알고리즘과 실제로 제어력을 구조물에 전달하기 위한 제어 메카니즘에 따라 여러 가지로 분류할 수 있으나, 제어 메카니즘에 따른 분류가 일반적이다. 현재 널리 알려져 있거나 사용되고 있는 능동 제어 시스템의 제어 메카니즘에는 능동 질량 감쇠기(Active Mass Damper), 능동 텐던 장치(Active Tendon/Bracing System), 능동 강성 조절 장치(Variable Stiffness System) 등이 있으며, 수동형 진동 제어 시스템과 능동형 제어 시스템을 함께 사용하는 혼합형 제어 시스템(Hybrid Control System)이 있다. 기초 분리 시스템과 하중 재하기를 연계시켜 사용하거나 TMD와 AMD를 복합한 장치인 Hybrid Mass Damper(HMD) 등이 혼합형 제어 시스템에 속한다. 혼합형 제어 시스템의 장점은 제어 에너지의 효율적인 분담과 보다 나은 진동 제어 효과에 있다. 저진동수에 해당하는 큰 진폭의 진동 제어는 수동형이 분담하고 고진동수의 진동은 능동형이 부담하게 하는 것이 혼합형 진동 제어 시스템의 대체적인 구성 방법이다. 제어 알고리즘의 경우 현재까지는 선형 최적 제어 이론에 바탕을 둔 이론들이 많이 적용되어 왔으나, 비선형 제어, 강인 제어(robust control), 적응 제어, 신경망(neural network), 퍼지 제어(fuzzy control) 등 제어의 목적과 특성에 따라 다양한 이론들이 계속 연구 중에 있다.

(1) 능동 질량 감쇠기, 복합형 질량 감쇠기

(Active Mass Damper(AMD), Hybrid Mass Damper(HMD))

부가적인 질량을 움직여서 그 관성력을 반력으로 사용하는 방법으로서 좁은 장소에 설치가 용이하며 가장 널리 채택되는 형태이다. 보다 나은 제어 효과를 얻기 위하여 수동형인 TMD와 병행하여 사용하기도 하며, 이러한 장치를 복합형 질량 감쇠기라 한다. 최근 일본에서는 시공중인 교량, 또는 완성된 교량과 고층 건물의 안전성과 사용성 확보를 위해 AMD 또는 HMD를 사용하는 예가 늘어나고 있다.

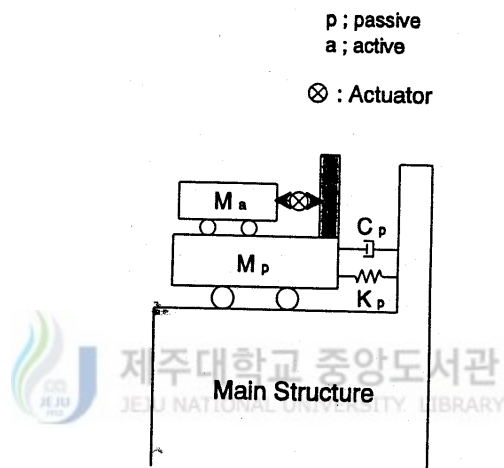


Fig. 8 Hybrid Mass Damper

(2) 능동 텐던 장치

제어 하중을 구조물에 직접 가하는 형태의 시스템이다. 브레이싱이나 텐던은 구조물을 구성하는 부재이므로 별도의 장치 설치에 따른 부담이 줄어들다는 면에서 선호되는 방법이나, 가할 수 있는 제어하중의 크기가 제한되므로 비교적 작고 가벼운 구조물에 적용이 가능하다. Fig. 9는 교량에 적용된 능동 텐던 장치이다.

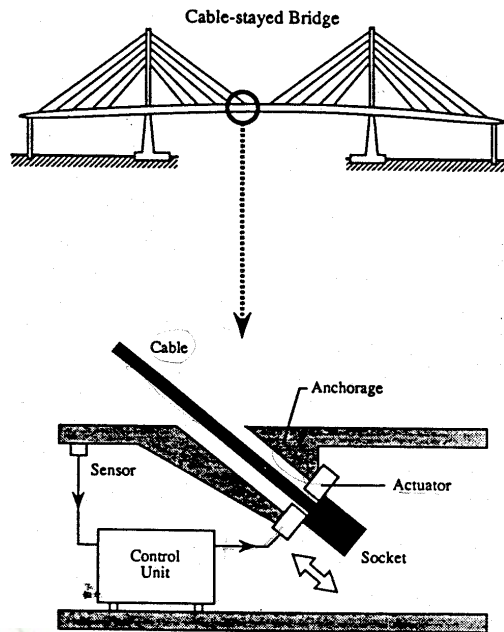


Fig. 9 Active Tendon Control system to apply in bridge

(3) Isolator-Actuator Hybrid system

기초 격리 장치와 하중 재하기를 연계하여 사용하는 복합형 시스템의 일종이다. 일반적으로 isolator는 비선형 거동을 보이므로 제어 알고리즘 적용시 이에 대한 고려가 필요하다. Fig. 10은 이를 나타내고 있다.

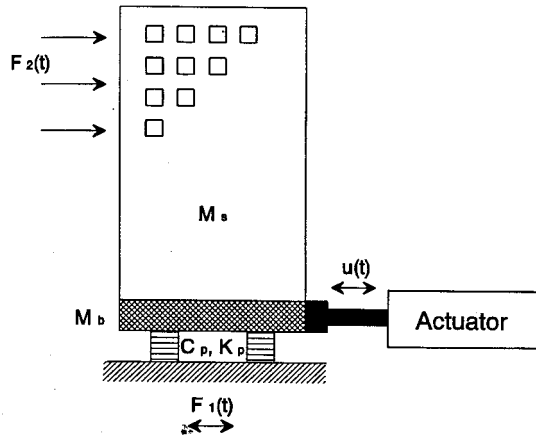


Fig. 10 Isolator-Actuator Hybrid System

III. TMD의 최적 설계

1. 질량 동조 감쇠기

TMD는 진동 에너지를 구조물의 고유 진동수에 동조하여 기계적 감쇠비를 증가시키는 제어 시스템이다. Fig. 11 은 TMD가 설치된 단자유도계를 나타내고 있다. 조화 진동을 하는 이들 시스템에 대한 운동방정식은 다음으로 쓸 수 있다.

$$M_s \ddot{y}_s + (C_s + C_T) \dot{y}_s - C_T \dot{y}_T + (K_s + K_T) y_s - K_T y_T = P_0 \sin \omega_s t \quad (3.1)$$

$$M_T \ddot{y}_T - C_T \dot{y}_s + C_T \dot{y}_T - K_T y_s + K_T y_T = 0 \quad (3.2)$$

여기서, 아래 첨자 s와 T는 각각 구조물과 TMD를 일컫으며, M, C, K는 질량, 감쇠 및 강성을 나타낸다. 그리고 ω_s 는 구조물의 진동수를 나타낸다.

다.

조화 진동 동안에 구조물의 진동응답의 합을 다음과 같은 형태의 함수로 나타낼 수 있다.

$$PI = \int_{t_0}^{t_f} y_s^2 + y_T^2 dt \quad (3.3)$$

여기서, PI는 목적 함수를 의미하며, 이 목적 함수의 값을 최소로 하는

TMD의 감쇠 및 강성 계수를 MATLAB의 Toolbox의 optimization을 사용하여 최적화를 행할 수 있다.

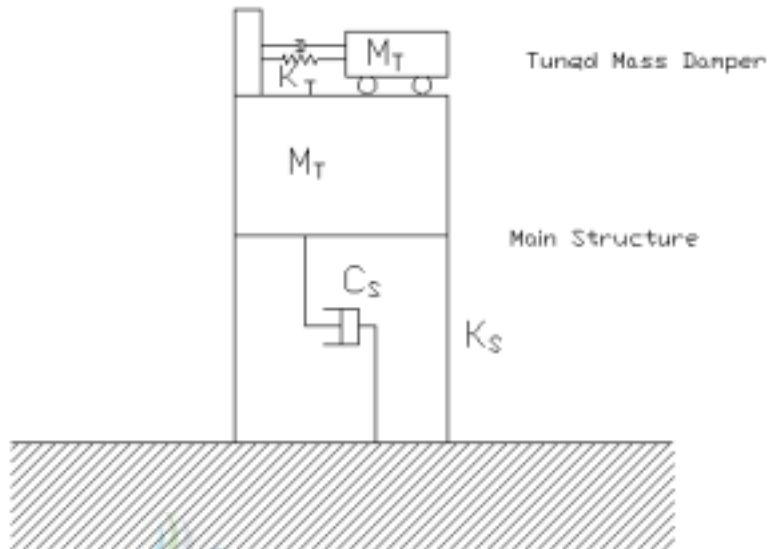


Fig. 11 TMD installed on the top of building

2. 최적 설계와의 비교

Den Hartog는 최적 동조 질량 감쇠기의 설계를 위하여 최적 진동수비 γ_{opt} 와 최적 감쇠비 $\xi_{T_{opt}}$ 를 질량비 μ 의 함수로 다음과 같이 제시하였다.

$$\gamma_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (3.4)$$

$$\xi_{T_{opt}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3\mu/2}{1 + 3\mu}} \quad (3.5)$$

여기서

$$\omega_T = \sqrt{\frac{K_T}{M_T}} : \text{감쇠기의 고유진동수}$$

$$\xi_T = \frac{C_T}{2M_T\omega_T} : \text{감쇠기의 감쇠비}$$

$$\omega_S = \sqrt{\frac{K_S}{M_S}} : \text{구조물의 고유진동수}$$

$$\xi_S = \frac{C_S}{2M_S\omega_S} : \text{구조물의 감쇠비}$$

$$\mu = \frac{M_T}{M_S} : \text{질량비}$$

$$\gamma = \frac{\omega_T}{\omega_S} : \text{진동수비}$$



식 (3.3)을 최소로 하는 감쇠와 강성 계수를 수치적으로 산정하고, 이를 Den Hartog가 제안한 값과 비교하고자 구조물의 동적인 성질을 다음과 같이 가정하였다.

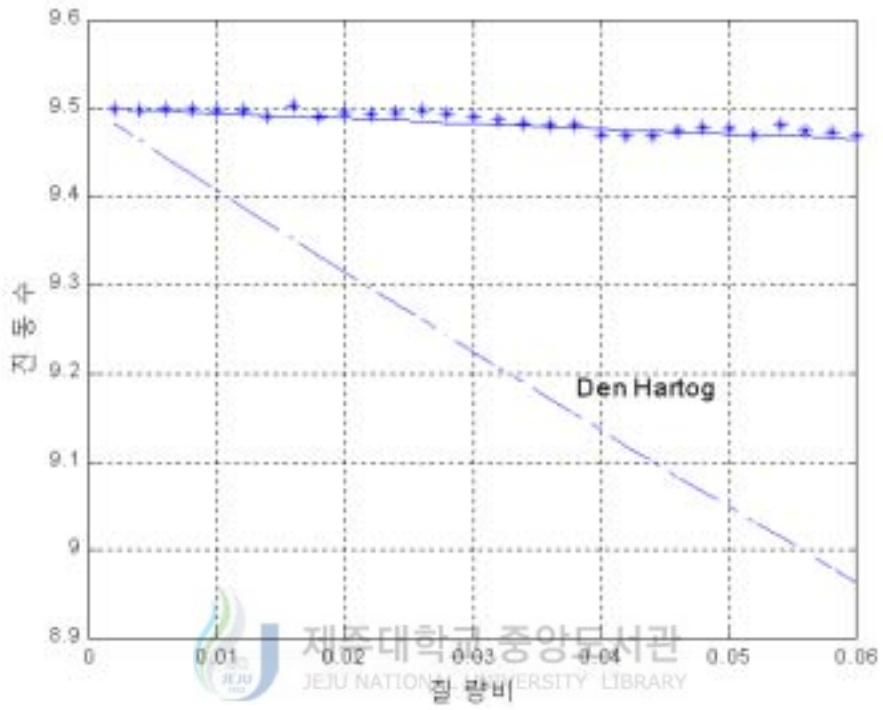
$$M_S = 360000 \text{ kg}$$

$$K_S = 32500000 \text{ N/m}$$

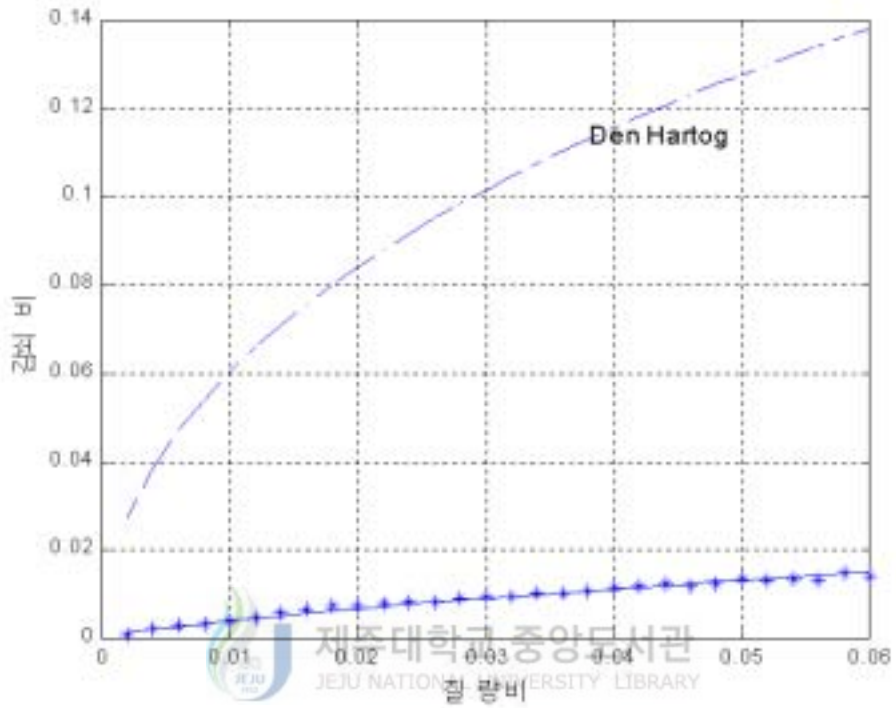
$$\xi_S = 0.02$$

$$\omega_S = 9.248 \text{ rad/sec.}$$

$$P(t) = 10000 \sin \omega_S t \text{ (N)} \quad (3.6)$$

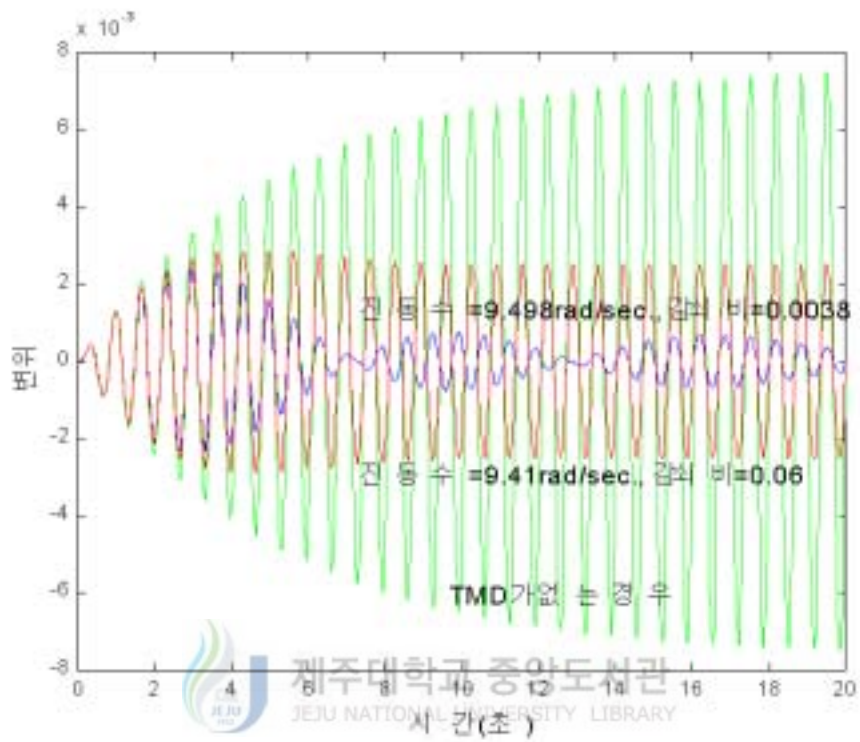


(a)

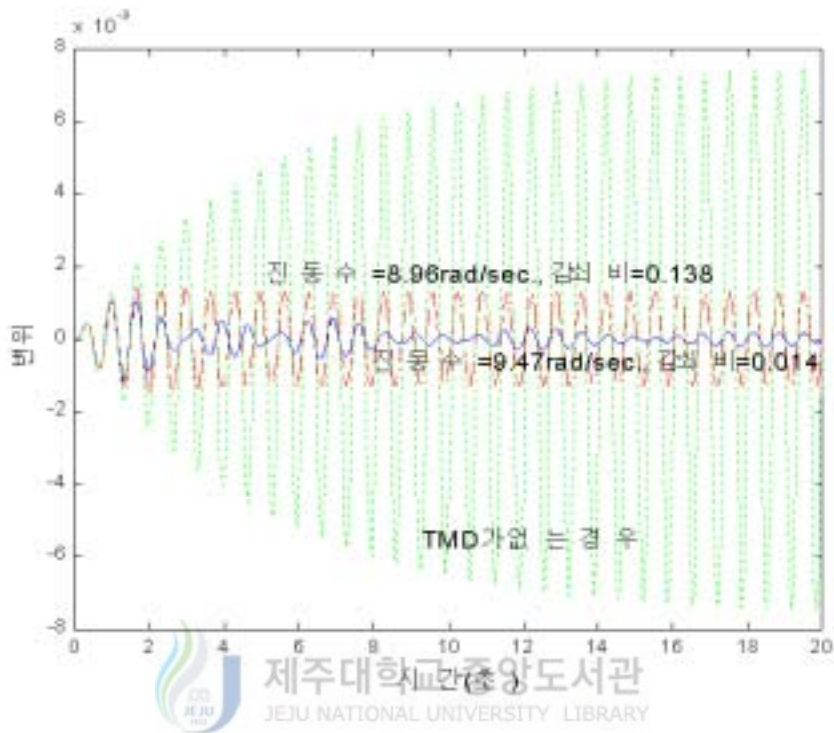


(b)

Fig. 12 Comparison of dynamic properties of TMD



(a)



(b)

Fig. 13 Comparison of dynamic response;
 (a) $\mu=0.01$, (b) $\mu=0.06$

Fig. 12에 질량비의 증가에 따른 TMD의 진동수와 감쇠비를 비교하고 있다. 이 그림에서 보는 바와 같이 질량비가 증가하면 TMD의 진동수 및 감쇠비의 증가에 의해 구조물의 진동 응답을 줄일 수 있음을 볼 수 있으나, 그 증가율은 Den Hartog가 제안한 값이 보다 큼을 볼 수 있다.

Fig. 13은 질량비가 0.01과 0.06일 경우에 이들 경우를 비교한 결과를 나타내고 있다. 이 그림에서 TMD가 설치될 경우에 구조물의 진동 변위의 급격한 감소를 볼 수 있다. 또한 Den Hartog가 제안한 값 보다는 최적화에 의해 얻는 값에서 보다 현저한 진동의 감소를 볼 수 있다.

TMD에 의한 구조물의 진동 제어를 보다 극대화하기 위하여 가력기에 의한 제어력을 발휘시킴으로서 진동을 제어할 수 있다. 이를 능동 동조 질량 감쇠기(Active Tuned Mass Damper, ATMD)라 하며, 최적 제어(optimal control) 이론을 근거로 다음의 목적 함수를 최소로 하는 제어력을 산정할 수 있다.

3. ATMD

제어력을 포함하는 식(3.1)과 (3.2)의 운동방정식은 다음과 같은 행렬의 형태로 표현이 가능하다.

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = Du(t) + Ep(t) \quad (3.7)$$

여기서, $u(t)$ 는 제어력을 나타내며, D 와 E 는 각각 제어력과 외력의 작용 위치를 나타낸다. 이를 상태 방정식으로 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + Hp(t) \quad (3.8)$$

여기서,

$$z(t) = [y(t) \quad \dot{y}(t)]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix},$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{bmatrix}.$$

이 때에, 제어력 벡터 $u(t) = -Gy(t)$ 와 같이 상태 벡터에 관한 선형 조합으로 가정한다면 성능 지수는 $u(t)$ 와 $z(t)$ 의 이차형에 의한 함수로 다음과 같다.

$$J = \int_0^{\infty} [z^T Q z + u^T R u] dt \quad (3.9)$$

여기서, Q 와 R 은 가중 행렬로 그 크기는 상태 변수와 제어력의 상대적인 중요성에 따라 설정된다.

식(3.9)의 성능지수를 최소화하는 이득 행렬 G 가 산정되고 이로부터 제어력이 결정된다. 단, 식(3.9)의 $u(t)$ 는 시스템이 구속되지 않은 상태에서의 제어력을 나타낸다.

성능 지수로 인한 제어 이득 G 는 다음으로 계산된다.

$$G = R^{-1} B^T P \quad (3.10)$$

여기서, 행렬 P 는 다음의 Ricatti 방정식을 만족하는 행렬을 취한다.

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (3.11)$$

질량비 0.01, 진동수 9.498rad/sec., 감쇠비가 0.0038로 설계된 TMD에 가력기를 설치하여 제어력을 위의 제어 방법에 의해 산정한 결과를 Fig. 14에 나타내고 있다. 이 제어력의 발휘에 의해 TMD만에 의한 진동 저감이 현격히 나타나고 있음을 Fig. 15에서 볼 수 있다. 이와 같은 복합 시스템은 확실한 진동을 저감시킬 뿐만 아니라 전력의 공급이 중단될 지라도 TMD에 의해 진동을 줄일 수 있는 장점이 있다.

TMD는 구조물의 진동이 1차 진동 모드에 의해 지배된다는 가정하에 유도된 시스템으로 최상층 외의 임의의 층에 추가로 TMD를 설치할 경우에 그 위치와 최적 설계 방안을 다음에서 고려하였다.

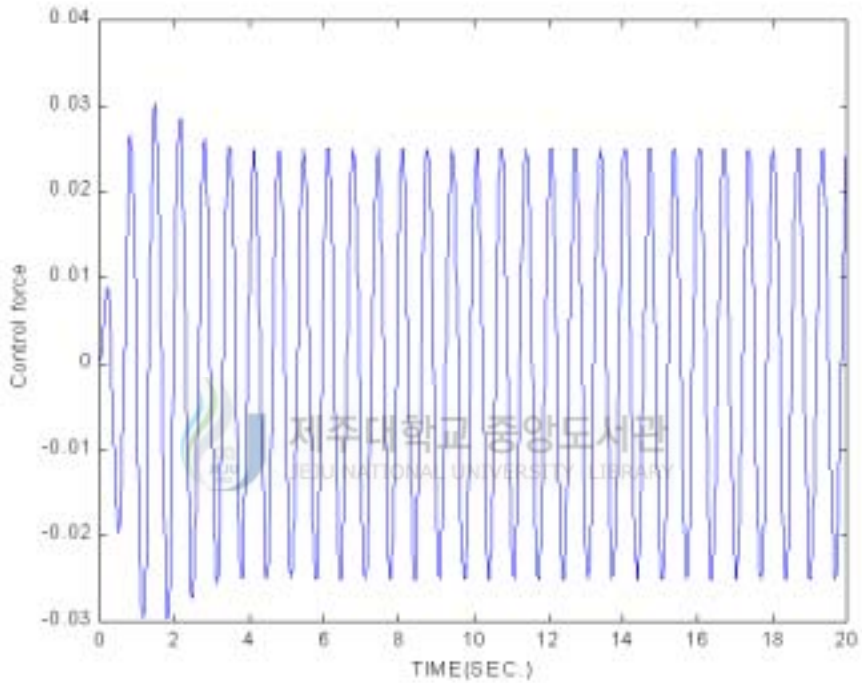


Fig. 14 Control forces by optimal control

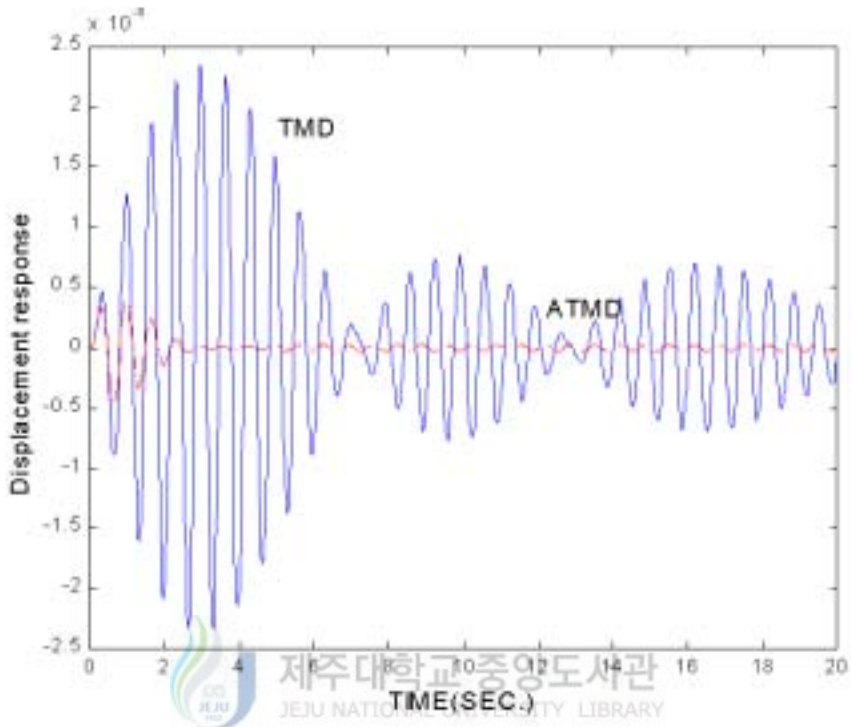


Fig. 15 Response comparison by TMD and ATMD

4. 다층 건축물에서의 TMD

TMD가 설치된 10층 구조물에 추가로 TMD를 설치할 경우에 그 위치 및 TMD의 최적 설계를 실시하였다. 이 구조물의 운동방정식은 다음과 같은 행렬의 형태로 표현된다.

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = Ep(t) \quad (3.12)$$

여기서 y 는 10자유도의 구조물과 TMD의 변위에 의한 변위 벡터를 나타

내며, E는 외력의 작용 위치를 나타낸다. 수치 해석을 위하여 구조물의 모든 층에 대한 동적 특성을 다음으로 가정하였다.

$$\begin{aligned}
 M &= 360000 \text{ kg} \\
 K &= 32500000 \text{ N/m} \\
 \xi &= 0.02 \\
 \omega &= 9.526 \text{ rad/sec.} \\
 P(t) &= 10000 \sin \omega t \text{ (N)}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

최적화는 다음과 같은 모든 층의 변위에 대한 목적 함수를 최소로 취하는 값을 선정하였다.



$$PI = \int_{t_0}^{t_f} \mathbf{y}^T \mathbf{y} dt \tag{3.14}$$

최상층에 설치된 TMD는 Den Hartog가 제안한 식에 의해 구조물 질량의 0.01로서 진동수 9.432 rad/sec., 감쇠비가 0.06으로 설계되었다. 이러한 시스템에 추가로 TMD를 설치할 목적으로 최적화에 의해 선정되는 설계 변수는 층의 위치, 추가적인 TMD의 진동수와 감쇠비이다.

Table 1은 최상층 외에 추가로 설치된 TMD의 위치 및 그 때에 최적화되는 진동수와 감쇠비를 나타내고 있다. 이 표는 20초 동안의 응답 변위를 제공한 값의 합을 제공근을 취하여 얻은 값을 나타내고 있다. 단지, 최상층에 TMD를 설치한 경우에 그 값이 61.65임을 감안한다면 4층이나 5층에 TMD를 추가로 설치한다면 보다 감소된 변위를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그러나 TMD는 단지 구조물의 1차 모드만을 고려한 진동 제어를 목적으로 하는 제어 시스템을 감안하지만 추가적인 TMD는 Table 2에서와 같이 2차 모드가 지배적인 위치에 TMD를 설치할 경우에 변위를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그러나 1차 진동 모드가 지배적으로 2차 진동모드를 고려한 TMD의 설치는 Fig. 16에서와 같이 진동 제어에 큰 역할을 하지는 못하나 구조물의 자유도가 증가한다면 추가적인 TMD의 설치는 진동 제어에 효과적일 것이다.

Table 1 Optimal values according to the story

story	frequency(rad/sec)	damping ratio	sum of squared displacement
1	7.994	0.075	61.63
2	28.71	0.007	61.61
3	13.93	0.194	61.73
4	8.00	0.190	61.49
5	8.02	0.180	61.59
6	8.00	0.001	61.63
7	18.14	0.100	61.81
8	4.74	0.0003	61.70
9	4.47	0.190	61.84

Table 2 Mode shapes of primary structure

	1st mode	2nd mode	3rd mode
1	0.06	-0.19	0.30
2	0.13	-0.34	0.44
3	0.19	-0.43	0.34
4	0.25	-0.43	0.07
5	0.30	-0.34	-0.25
6	0.34	-0.19	-0.43
7	0.38	0	-0.38
8	0.41	0.19	-0.13
9	0.43	0.34	0.19
10	0.44	0.43	0.41

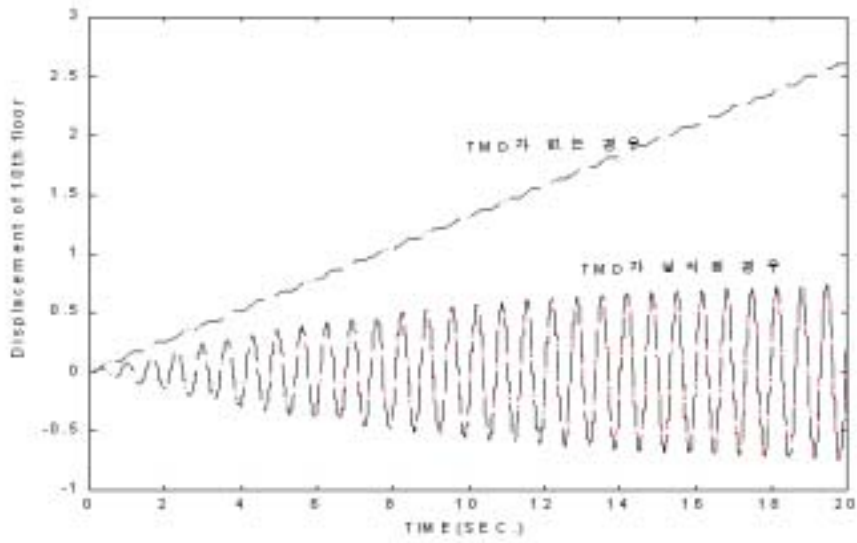


Fig. 16 Displacement response
of 10th floor

IV. 결 론

지진이나 풍하중과 같은 횡하중에 의해 구조물은 수평 진동을 하며 이를 위해 내진 설계 및 진동 제어 시스템을 활용하고 있다. 진동 제어 시스템으로 TMD는 구조물의 진동수와 동조하는 감쇠기를 설치함으로써 구조물의 진동을 제어하는 시스템이다.

본 연구에서는 변위 응답의 이차형을 목적 함수로 이를 최소화하는 수치 해석을 실시하여 최적설계방법론을 제안 하였다. 연구결과는 다음과 같다.

(1) Den Hartog가 제안한 TMD의 최적 설계 외의 값에서 효과적인 진동 제어를 얻을 수 있었다.

(2) 추가로 가력기를 설치한 복합 시스템으로 설계를 할 경우에 보다 효과적으로 진동을 제어할 수 있음을 확인할 수 있었다.

(3) 고층 건축물에서 최상층에 설치한 TMD 외에 추가로 TMD를 설치할 경우에 2차 모드를 지배하는 위치에 설치한다면 진동 저감에 효과적임을 알 수 있었으나, 1차 진동 모드가 지배적인 저층 구조물에서는 큰 효과가 없음을 확인하였다.

참고문헌

- (1) Den Hartog, JP., 1956, Mechanical Vibration, 4th Ed., McGraw-Hill.
- (2) Rene W. Luft, 1979, Optimal Tuned Mass Dampers For Buildings, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 105, No. ST12, pp.2766-2772.
- (3) McNamara, R.J., 1977, Tuned Mass Dampers for Buildings, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 103, No. ST9, pp.1785-1798.
- (4) 고희무, 1997, 감진장치를 이용한 교량의 내진설계, International Seminar on Seismic Design and Devices.
- (5) ENR. Hancock tower now to get dampers. Engineering News Record, 1975
- (6) Kwok KCS, MacDonald PA. Fullscale measurements of acceleration response of Sydney Tower. Engineering Structures 1990;12 pp.153-162
- (7) Kaynai AM, Veneziano D, Biggs JM. Seismic effectiveness of tuned mass dampers. Journal of Structural Engineering, ASCE 1981;107(8), pp.1465-1484
- (8) Sladek JR, Klinger RE. Effect of tuned mass dampers on seismic response. Journal of Structural Engineering, ASCE 1983; 109(8), pp.2004-2009
- (9) Chowdhury AH, Iwuchukwu MD, Garske JJ. Past and future of seismic effectiveness of tuned mass dampers. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Sturctural Control, Ontario, Canada,

1985, pp.105-127

(10) Villaberde R, Koyama LA. Damped resonant appendages to increase inherent damping in buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1993;22, pp.491-507

(11) Soto-Brito R, Ruiz SE. Influence of ground motion intensity on the effectiveness of tuned mass dampers. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 1999;28, pp.1255-1271

(12) Lukkunaprasit P, Wanitokrkul A. Inelastic buildings with tuned mass dampers under moderate ground motions from distant earthquakes. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2001;30(4), pp.537-551

(13) Park YJ, Ang AHS, Wen YK. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering, ASCE* 1985;111(4), pp. 722-739

(14) Valles RE, Reinhorn AM, Kunnath SK, Li C, Madan A. IDAR2D Version 4.0: A computer program for the inelastic damage analysis of buildings. Technical Report NCEER-96-0010, University of New York at Buffalo, NY, 1996.

(15) Fajfar P, Fischinger M. N2- A method for nonlinear seismic analysis of regular buildings. In: *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering Tokyo, Japan, 1988*, pp.111-116