

고층 구조물의 진동제어를 위한 복합형 질량댐퍼의 제어력 설계에 관한 연구

°박 진일*, 박 해동*, 최 현*, 김 두훈*

A Study on the control force of HMD for vibration control of the tall building structure

Jin-Il Park, Hae-Dong Park, Hyun Choi, Doo-Hoon Kim

ABSTRACT

As the construction of the high-rise building increases worldwide, the effort has been exerted to improve the safety and serviceability if the structure against various types of external dynamic loads such as wind load, seismic load, etc. The mass damper, defined as dynamic absorber in mechanical engineering is known one of the effective methods to control the vibration of flexible large structures. The hybrid mass damper, HMD is known as the most appropriate type of the mass dampers.

In this paper, the control force was designed for HMD by numerical simulations and the performance of HMD to control the flexible vibration of the steel tower induced by sinusoidal force excitation was evaluated. also TMD was designed for a 1-DOF lumped mass model.

1. 서론

최근 세계적으로 고강도 건축재료의 등장 및 구조설계분야의 기술발전과 더불어 초고층 빌딩, 타워 및 관제탑과 같이 구조 측면에서 유연한 구조물의 건축이 늘어나고 있는 추세이며, 우리나라에서도 초고층 아파트, 신공항의 관제타워 등과 같이 유연한 고층구조물의 건축이 증가하고 있다. 이러한 고층구조물에서는 풍하중이나 지진하중에 의한 건물의 공진 현상은 새로운 건축공법과 재료의 개발에 의해 건축구조물이 유연하면서도 중량이 가벼워져 더욱 문제시되고 있으며, 구조물의 안전성(safety)과 사용성(serviceability)에 직접적 영향을 주는 구조물의 진동을 효과적으로 제어할 수 있는 방법에 대한 관심이 높아지고 있다. 최근에는

이와 같은 동적 응답을 감소시키기 위한 목적으로 수동형 동흡진기(dynamic absorber)인 동조질량댐퍼(Tuned Mass Damper)와 복합형 질량댐퍼(Hybrid Mass Damper), 능동형 질량댐퍼(Active Mass Damper) 등 능동제어이론에 기초를 둔 많은 연구가 선진 외국에서 활발히 이루어지고 있다^[1].

현재 활발히 연구가 진행되고 있는 HMD는 수동형 제진 장치인 TMD 시스템에 질량체를 움직이는 제어장치를 장착한 구조로 되어있다. 따라서 HMD는 비제어시 TMD로 작동하여 구조물의 고유진동수에 동조된 질량-스프링-감쇠의 부가적인 시스템이 구조물의 진동에너지를 흡수하며, 제어시 수동형인 TMD시스템이 진동에너지를 흡수하면서, 추가적으로 부가질량을 움직여 발생하는 관성력에 의한 반력을 구조물에 작용함으로써 구조물의 진동을 제어하여 진동제어 효과를 높인다.

* 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소

이 글에서는 30m 실험용 철판 구조물(6층)에 적용하기 위한 HMD의 설계를 위해 수치 시뮬레이션을 통한 구조물의 동적 응답 및 HMD의 설계 파라미터를 검토하고자 한다. 우선 6층 철판 구조물에 대해 고유치 해석을 수행하여 1 자유도계의 등가 모델로 치환한 후 HMD가 수동제어모드인 TMD로 작동할 경우의 최적의 TMD 시스템을 설계하여 동특성 해석을 수행하였다. 또한 능동제어모드로 작동시 구조물과 HMD 시스템의 상태 방정식을 구성하였고, 구조물의 가속도 피드백에 의한 PID 제어기의 비례계인을 사용하여 동적 응답을 평가한 후 HMD의 설계사양을 검토하였다.

현재 제작 진행중인 6층 철판 구조물(그림 1)은 각 층의 질량이 약 20 ton이고, 약축 방향의 1차 굽힘 고유진동수는 0.6Hz로 설계되었으며, 표 1에 30m 철판 구조물의 제원을 정리하였다. 또한 구조물의 4층에 설치된 가진 모터로 구조물의 1차 고유주파수에 해당하는 회전수로 구동하여 모터에서 발생하는 불평형 가진력(unbalance exciting force)에 의하여 구조물의 공진이 유발되도록 한다.

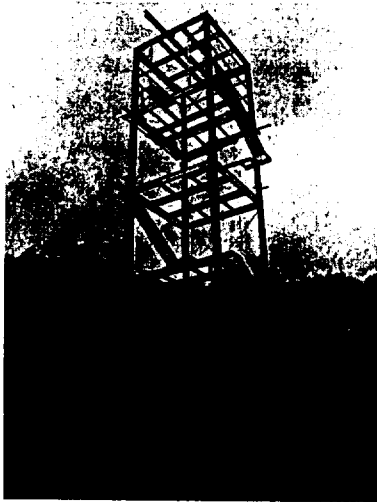


그림 1. 30m 철판 구조물

표 1. 철판 구조물의 주요 제원

철판 구조물	제원
각 층 floor size	6 m × 6 m
각 층 높이	6 m
총 높이	30 m
전체 질량 (각 층 질량)	100 ton (5 @ 20ton)
설계 1차 고유진동수	0.6Hz

2. 본론

2.1 TMD를 이용한 수동제어

철판 구조물의 진동을 제어하기 위한 최적TMD의 설계를 위하여 다음의 3가지 무차원 계수를 결정하여 TMD 시스템의 질량 m_2 , 강성 k_2 , 감쇠 c_2 를 구한다. 그리고 고유치 해석을 통하여 계산된 철판 구조물의 1차 모드 질량, 강성 및 감쇠를 각각 M_1 , K_1 , C_1 라 하면^[4],

$$\mu = \frac{m_2}{M_1}; \text{ TMD의 질량과 구조물의 1차 모드 질량과의 비}$$

$$\gamma = \frac{\omega_2}{\omega_1}; \text{ 동조주파수비}$$

$$\text{여기서, } \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}, \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{K_1}{M_1}}$$

$$\zeta_2 = \frac{c_2}{2m_2\omega_2}; \text{ TMD 감쇠비}$$

Den Hartog는 구조물에 조화하중이 작용할 때 무차원 계수들의 최적값을 결정하기 위하여 동조주파수비와 감쇠비를 식 (1), (2)와 같이 질량비, μ 의 함수로 나타내는 방법을 제안하였다^[2].

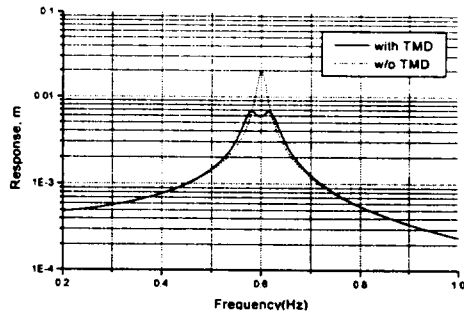


그림 2. TMD 설치시 철판 구조물의 1차 고유진동수에서의 동적 응답

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

$$\zeta_{opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad \text{식(2)}$$

위 식에 의해 설계된 최적TMD에 의해 원구조물

의 감쇠비는 다음과 같이 늘어난다.

$$\Delta\zeta_{eq} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu/2}{1+\mu/2}} \quad \text{식(3)}$$

수동제어시 철골 구조물의 동적 응답을 알아보기 위해 수치 해석을 수행하였다. 그림 2에서 TMD로 인한 원구조물의 감쇠비의 증가량은 약 2%로 1차 고유진동수에서의 응답이 약 1/5로 줄어드는 효과를 알 수 있었다. 또한 Yamaguchi(1991)^[3]등이 제안한 질량비, μ 와 진동원의 종류에 따른 구조물의 감쇠비의 증가량(그림 3)을 확인 할 수 있었다.

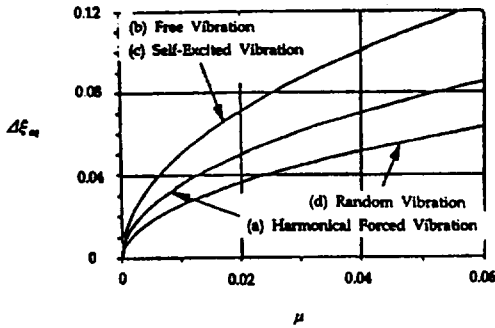


그림 3. 구조물의 진동원에 따른 증가 감쇠비

한편, 제안된 식에 따른 TMD의 설계값을 표 2에 나타내었다.

표 2. TMD의 설계값

질량비(%)	μ	0.59
철탑 1차 모드 질량(ton)	M_1	84.55
TMD의 질량(ton)	m_2	0.5
최적 동조주파수비	γ_{opt}	0.993
철탑 1차 고유진동수(Hz)	f_1	0.6
TMD의 고유진동수(Hz)	f_2	0.596
철탑의 감쇠비 (%)	ζ_1	0.5
TMD의 감쇠비(%)	ζ_2	4.7
구조물 감쇠비 증가량(%)	$\Delta\zeta_{eq}$	2.0

2.2 상태방정식

그림 4와 같이 모델링된 철골 구조물의 1차모드와 HMD가 연계된 시스템의 운동방정식은 식 (4)와 같다.

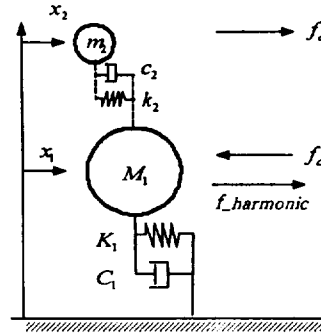


그림 4. 철골 구조물의 1차모드와 HMD 모델

$$\begin{bmatrix} M_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = F_s = \Lambda f_{harmonic} + \Gamma f_c \quad \text{식(4)}$$

여기서, M_1 = 구조물의 1차 모드 질량

K_1 = 구조물의 등가 강성

C_1 = 구조물의 등가 감쇠

m_2 = HMD 시스템의 질량

c_2 = HMD 시스템의 감쇠

k_2 = HMD 시스템의 강성

$f_{harmonic}$ = 구조물에 작용하는 정현파 하중

f_c = HMD의 제어력

$\Lambda = \{1 \ 0\}^T$ = 정현파 하중의 위치벡터

$\Gamma = \{-1 \ 1\}^T$ = HMD 제어력의 위치벡터

식 (4)로 표현된 행렬형태의 구조물 운동방정식을 양변에 질량행렬로 나누면 식 (5)와 같다.

$$\ddot{x} + M_s^{-1} C_s \dot{x} + M_s^{-1} K_s x = M_s^{-1} F_s \quad \text{식(5)}$$

구조물의 각 질량에서의 절대변위 및 절대속도로 이루어진 구조물의 상태벡터, z_s 를 다음과 같이 정의하였다.

$$z_s = \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ x \end{Bmatrix} \quad \text{식(6)}$$

정의된 상태벡터, z_s 를 식 (5)의 운동방정식을 표현하면 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \dot{x} = z_2 \\ \dot{z}_2 &= \ddot{x} = -M_s^{-1} K_s x - M_s^{-1} C_s \dot{x} + M_s^{-1} F_s \\ &= -M_s^{-1} K_s z_1 - M_s^{-1} C_s z_2 + M_s^{-1} \Lambda f_{harmonic} + M_s^{-1} \Gamma f_c \end{aligned} \quad \text{식(7)}$$

따라서, 구조물에 대한 상태방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다^{[5],[6]}.

$$\begin{aligned} \dot{z}_i &= \begin{pmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ -M_i^{-1}K_i & -M_i^{-1}C_i \end{bmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ M_i^{-1}A & M_i^{-1}\Gamma \end{bmatrix} u_i \\ &= A_i z_i + B_i u_i \end{aligned} \quad \text{식(8)}$$

위 식에서,

$$A_i = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ -M_i^{-1}K_i & -M_i^{-1}C_i \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ M_i^{-1}A & M_i^{-1}\Gamma \end{bmatrix}, u_i = \begin{pmatrix} f_{harmonic} \\ f_c \end{pmatrix} \quad \text{식(9)}$$

구조물에 제어력을 작용시키는 전자석으로 구동되는 HMD에서는 제어전압의 입력에 대하여 제어력이 출력되는 관계식이 전자석 코일에 인가되는 제어전류에 대한 1차 미분방정식의 형태로 표현되며, 회로방정식은 식 (10)과 같다.

$$i_c = \frac{1}{L} (-Ri_c + e_c - e_b) \quad \text{식(10)}$$

식 (10)의 전류에 대한 1차 미분방정식을 전자석 액추에이터의 상태방정식으로 정의하면, 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{i}_c &= \left[\frac{-R}{L} \right] i_c - \frac{e_b}{L} + \left[\frac{1}{L} \right] e_c \\ &= A_e z_e + B_e u_e \end{aligned} \quad \text{식(11)}$$

$$y_e = f_c = K_e i_c \quad \text{식(12)}$$

여기서, R 은 HMD의 전자석 코일의 저항이며, L 은 인덕턴스(inductance)를 나타낸다. HMD의 이동질량과 HMD가 고정된 구조물 사이의 상대속도에 비례하는 역기전력이 전자석 코일에서 발생되며, 그 크기는 식 (13)과 같다.

$$e_b = Bl\dot{x}_r = K_b \dot{x}_r \quad \text{식(13)}$$

위 식에서 B 는 영구자석 사이의 자속밀도, l 은 자속사이를 통과하는 코일의 총길이를 나타내며, \dot{x}_r 은 이동질량과 고정부의 상대속도를 나타낸다. 또한 K_b 는 전자석 코일의 단위속도 당 발생전압, 즉 역기전력 상수(Back emf constant)를 나타낸다.

제어상태의 HMD에서는 영구자석 사이에 전자석 코일에 인가되는 전류에 비례하는 선형 제어력이 발생하며, 그 크기는 다음 식 (14)와 같다.

$$\begin{aligned} f_c &= Ni_c l \times B = K_c i_c \\ \text{여기서, } K_c &= NIB \end{aligned} \quad \text{식(14)}$$

식 (14)에서 N 은 코일의 권선수, i_c 는 코일에 흐르는 전류이다. 또한, K_c 는 코일에 흐르는 단위 전류 당 전자석 액추에이터에서 발생하는 제어력을 나타내는 힘상수(force constant)이다.

구조물과 HMD의 절대변위, 절대속도, HMD의 구동전류 등의 상태변수로 상태벡터, z 를 식(15)와 같이 정의하였다.

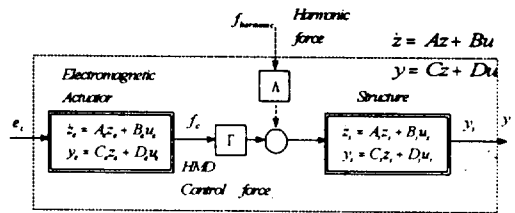


그림 5. 전자석 액추에이터와 구조물의 블록 선도

그림 5와 같이 HMD와 구조물의 상태방정식을 함께 표현한 제어시스템의 상태방정식은 식 (16)과 같다. 또한, 출력벡터, y 는 식 (17)에서와 같이 구조물과 HMD의 절대속도, 절대가속도와 구조물과 HMD간의 상대변위, HMD 이동질량이 구조물에 작용시키는 반력 및 HMD의 구동전류 등으로 정의하였다.

$$z = \{ x_1 \ x_2 \ \dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ i \}^T \quad \text{식(15)}$$

$$u = \begin{pmatrix} f_{harmonic} \\ e_c \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 1} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C & -M^{-1}\Gamma K_c \\ 0 & 0 & -K_b/L \quad K_b/L \quad -R/L \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ M^{-1}A & 0_{2 \times 1} \\ 0 & 1/L \end{bmatrix} u \\ &= Az + Bu \end{aligned} \quad \text{식(16)}$$

$$\begin{aligned} y &= \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ x_2 - x_1 \\ f_{harmonic} \\ e_b \\ i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} & 0_{2 \times 1} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C & 0_{2 \times 1} \\ -I_2 & I_2 & 0 \\ 0 & 0 & -K_b & K_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} \\ M^{-1}A & 0_{2 \times 1} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} u \\ &= Cz + Du \end{aligned} \quad \text{식(17)}$$

2.3 HMD를 이용한 구조물의 응답제어

구조물과 제어상태의 HMD 연계시스템의 동적 응답을 평가하기 위해 식 (16)의 전자식 액추에이터로 구동되는 HMD 및 구조물의 상태방정식에서 구조물에 600N의 사인하중으로 가진하였을 때, 구조물의 가속도 피드백에 의한 PID 제어기의 비례게인을 사용하여 수치 해석을 수행한 후 가속도 응답을 그림 6에 비교하였다. 해석 결과 제어시 구조물의 최대 가속도 응답은 약 5 gal로 비제어시의 최대 가속도(약 33 gal)보다 응답이 대략 1/7로 감소함을 알 수 있었다.

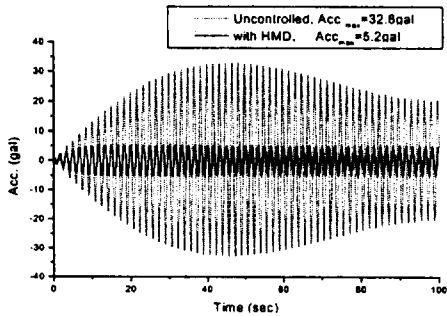


그림 6. 철골 구조물의 가속도 응답

또한, 그림 7에는 제어상태에서 HMD 이동질량의 변위, 속도, 가속도 응답을 나타내었으며, 그림 10에는 제어상태의 HMD에서 전자식 코일에 인가되는 전류에 비례하는 선형 제어력을 나타내었다.

HMD의 이동질량은 500kg이며, 해석 결과로부터 최대 변위, 최대 속도, 최대 가속도는 안전율을 고려하여 각각 $\pm 10\text{cm}$, 40cm/sec , 200gal 로 설계 사양을 결정할 수 있었고, 최대 제어력은 수동모드에 해당하는 TMD에서의 이동질량이 구조물에 작용시키는 제어력에 추가적으로 액추에이터에서 이동질량에 작용되는 제어력으로부터 약 1kN이 요구됨을 알 수 있었다.

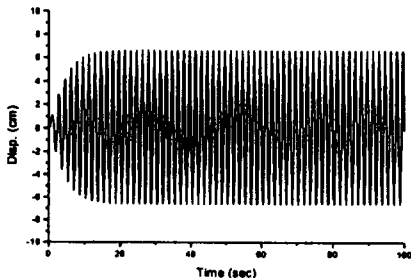


그림 7. HMD 이동질량의 변위응답(Max.= 6.6cm)

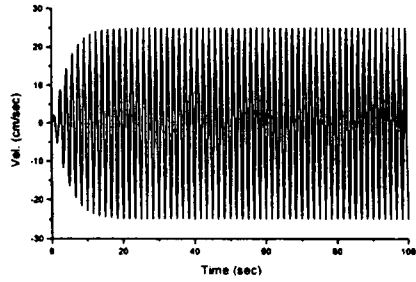


그림 8. HMD 이동질량의 속도응답
(Max.=24.9 cm/sec)

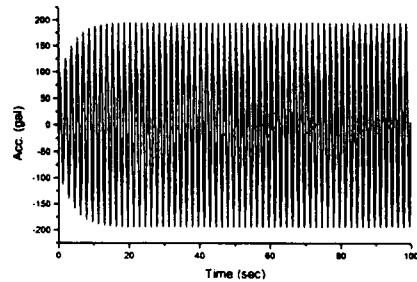


그림 9. HMD 이동질량의 가속도응답
(Max.=194.9 gal)

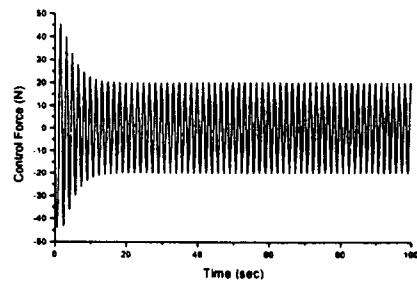


그림 10. HMD 액추에이터의 제어력
(Max.= 46N)

3. 결론

높이 30m인 6층 철골 구조물에 불평형 가진력이 작용하였을 때 효과적인 진동제어를 위한 복합형 질량 댐퍼인 HMD의 적용성을 수치 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. HMD가 수동제어모드로 작동할 경우인 TMD 시스템을 설계할 수 있었고, 이를 이용한 수동제어 해석을 한 결과 구조물의 1차 공진 주파수에서 응

답이 약 1/4로 줄어들음을 확인하였다.

6. 김 종석, 1988, 선형 제어시스템 공학

2. 구조물과 제어상태의 HMD 연계시스템의 동적 응답을 평가하기 위해 전자식 액추에이터로 구동되는 HMD 및 구조물의 상태방정식을 구성하여 능동제어 해석을 수행하였고, 해석 결과 제어시 구조물의 최대 가속도 응답은 대략 1/7배로 감소함을 알 수 있었고, 수동제어시 응답과 비교하여 더 좋은 효과를 나타냄을 알 수 있었다.

3. HMD의 액추에이터의 형태를 결정하기 위한 설계 파라미터를 결정하였고, 기존 서보 모터 및 유압 액추에이터의 마찰특성 및 온도특성변화 등의 영향을 줄일 수 있는 입력 전류에 비례하는 선형 제어력을 발생시키는 전자식 또는 linear motor 형태의 액추에이터를 고려할 수 있었다.

4. 추후 실제 구조물에 적용시 시스템 모델링 오차에 의한 시스템의 강인성 및 안정성을 고려할 수 있는 현대 제어기법의 알고리즘의 적용성이 필요하며, 구조물에 작용하는 다양한 외부하중인 풍하중 또는 지진하중을 고려하기 위한 해석 및 실험을 수행할 예정이다.

참고문헌

1. S.J. Dyke,¹ B.F. Spencer Jr.,¹ P. Quast,² D.C. Kaspari, Jr.,¹ and M.K. Sain, "Implementation of an AMD Using Acceleration Feedback Control," Microcomputers in Civil Engineering:Special Issue on Active and Hybrid Structural Control
2. Den Hartog, J.P. (1956), Mechanical Vibrations, 4th Edition, McGraw-Hill, NY.
3. Yamaguchi, H., Fujino, Y. and Tsumura, N., "Passive control of structures with TMD", Proc., Colloquium on Control of Structures, Part B, JSCE, 1991
4. Luk, Yiu-Wah, " System Modeling and Modification via Modal Analysis", UIM, 1981
5. Franklin, G.F., Powell, J.D., Emami-Naeini, A., 1986, Feedback Control of Dynamic Systems, pp. 130-203.