

혼합형 리니어 모터 댐퍼를 이용한 실규모 철틀 구조물의 진동제어

Vibration Control of Real-Size Steel Structure by Hybrid Linear Motor Damper

⁰정정교*, 김두훈*, 박해동*, 박진일*, 정태영**, 문석준**, 임채욱**

Jeoung-Kyo Jeoung, Doo-Hoon Kim, Hae-Dong Park, Jin-Il Park, Tae-Young Chung, Seok-Jun Moon, Chae-Wook Lim,

ABSTRACT

To control vibration of real-size steel structure, a hybrid-type linear motor damper was designed and applied to 30m steel structure at UNISON. The LMD was tuned to the first mode natural frequency of the building. In order to use for simulation data and control parameters, dynamic response characteristics of building and damper were tested. The response of building was reduced by 10 dB with LMD and H_{∞} algorithm. This value was similar to the result of simulation.

I. 서론

인구 집중화, 도시화 등에 의해 인구당 생활면적이 감소하는 문제를 해결하기 위해 생겨난 것 중 하나가 초고층 철틀 구조물의 등장이다. 특정지역에서 인구 일인당 활용가능한 토지 면적이 점차 줄어들어 따라 높은 용적율을 요구가 증대되고 있으며 또한 생산성을 높이기 위한 방법 즉, 건설 공기를 앞당기기 위한 방법으로 철틀 구조물 건설비용이 점차로 높아지고 있다. 초고층 철틀 구조물의 경우, 낮은 감쇠와 고유진동수로 인한 진동이 주거 또는 상업용 목적으로 하는 건물의 사용성을 저해하는 주요한 요인중 하나가 되며 사용성 향상을 위해서 구조물의 진동 변위를 감소할 수 있는 장치에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^(1,2)

본 연구에서는 혼합형 리니어 모터 댐퍼를 이용한 실규모 철틀 구조물의 진동제어에 대하여 논하고자 한다.

혼합형 리니어 모터 댐퍼는 동조질량댐퍼에 작동기로 리니어 모터를 사용하는 장치로 기존의 작동기인 유압식 작동기나 회전형 서보 모터식 작동기에 비해 장·단점이 있다. 유압식 시스템의 경우 유압펌프, 유압모터, 오일탱크, 냉각장치, 압력계, 각종 밸브, 여과기 등 많은 부대요소가 필요하여 시스템이 복잡하고 유지보수비가 많이 들며 회전형 서보 모터형태의 시스템의 경우 캠, 기어, 클러치, 벨트, 스크류 등 기계적인 변환 장치를 이용하여 회전운동을 직선운동으로 변환시키게 되므로 모터의 효율이 낮고 소음발생, 마모 등이 필수적으로 수반되는 단점이 있다. 이에 비해 선형모터를 이용한 작동력이 전자기력에 의해 직접 발생하므로 회전운동을 직선운동으로 변환하는 장치가 필요치 않아 에너지 손실 및 접촉에 의한 기계음을 감소시킬 수 있는 장점이 있다.

건축 구조물의 경우 안정도가 중요한 요인 중 하나이기 때문에 강건성이 뛰어난 H_{∞} 제어에 의한 진동 제어기법을 선정하였다. 본 연구는 H_{∞} 제어를 이용하여 유니슨 산업(주) 기술연구소에 위치한 실규모 철틀 구조물의 진동을 저감시킨 사례를 기술하겠다.

* 정희원 · 유니슨산업(주) 기술연구소

** 정희원 · 한국기계연구원 구조시스템 연구부

II. 본 론

1 제어알고리즘

H_∞ 제어는 대표적인 강인제어 방법중 하나로 시스템의 모델링 파라미터와 외부 입력에 불확실성이 존재하는 경우 시스템의 성능 및 안정성을 향상시키기 위해 개발되었다. 불확실성이 있는 시스템에 LQG/ H_2 제어를 적용할 경우 불안정해질 수 있으며, 이러한 것을 해결하기 위한 방법이다. 일반적으로 플랜트와 추정기 사이의 관계는 식 1과 같이 정리되며 블록 다이어그램은 Fig. 1과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B_w w(t) \\ m(t) &= C_m x(t) + D_{mw} w(t) \\ e(t) &= C_y x(t) - \hat{y}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

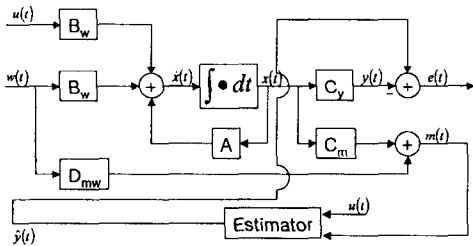


Fig. 1 Block Diagram of H_∞ Control

철골구조물의 4층 바닥에 위치한 가진기에 의해 구조물에 정현파 형태의 진동을 발생시키고 5층 바닥에 고정된 LMD를 이용하여 구조물의 진동을 제어하는 시험을 수행하였다. 구조물 5층 바닥 가속도 신호를 측정하였으며 상태 변수를 모두 측정할 수 없었기 때문에 칼만필터를 이용하여 나머지 상태 변수를 추정하였다.

2. 대상 구조물 식별

LMD를 적용하기 위한 시험 대상 구조물은 Fig. 2의 5층 철골 구조물로서 총 질량은 100톤(5×20 ton), 가로 6m, 세로 6m, 총 높이는 30m이며 실험으로부터 추정된 구조물의 약축 방향의 1차 모드 고유진동수는 0.51Hz, 감쇠계수는 0.2%이다.

Fig. 3은 시험 대상 철골 구조물의 4층 바닥

Accelerance를 커브-피팅한 결과와 실험으로 구한 값을 비교하여 보여주고 있다.

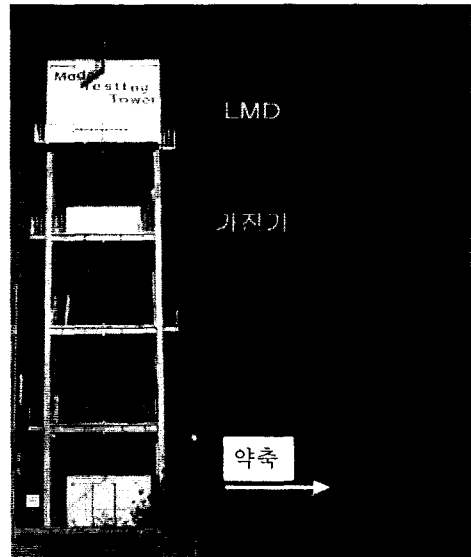


Fig 2. Testing structure

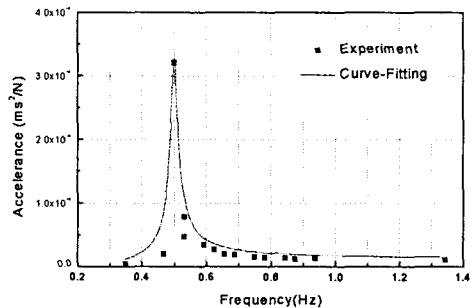


Fig. 3 Accelerance at the 4th Floor

철골구조물 2차 모드 확인하기 위해 LMD를 이용한 주파수 스위프가진과 동시에 응답 측정이 수행되었으며 1.75 Hz에 2차 모드의 고유진동수가 있음을 확인하였다. 감쇠는 구조물의 자유진동시, 가속도 신호의 지수감소량으로 측정하였다. Fig. 4는 Fig. 7에서 자유진동시 진동 피크값을 나타낸 그래프이다.

건축된 철골구조물의 제원과 동특성 실험결과를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

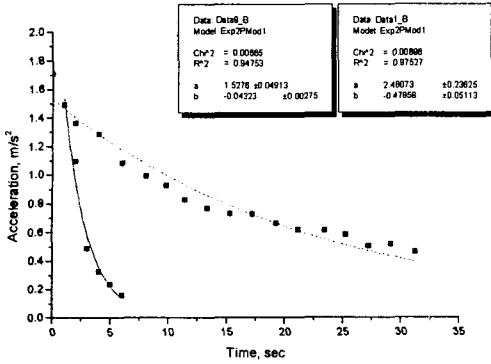


Fig 4. Calculation of damping

Table 1. Specification of Structure

항 목	값	항 목	값
총 높이	30 m	총 질량	100 ton
층간 높이	6 m	층간 질량	20 ton
가로 길이	6 m		
세로 길이	6 m		
1차모드질량	80 ton	2차모드질량	10 ton
고유진동수 (1차)	0.51 Hz	고유진동수 (2차)	1.75 Hz
감쇠	1.03 %	감쇠	-

3. 제어기 사양 및 수치모형⁽⁶⁾

3.1 혼합형 리니어 모터 댐퍼의 사양

리니어 모터 댐퍼를 이용한 진동제어 기술은 미국, 일본을 중심으로 미세진동 차단 시스템에 적용되고 있으며 구조물쪽으로는 아직까지 모형 구조물의 진동저감장치로 적용되고 있을 뿐이다^(3,4,5) 구조물에서 사용된 LMD는 가동 자석형으로 제작되었으며 고정자는 전류로 여자하는 전자석이며 가동자는 영구자석으로 구성되어 있다. 이러한 형태의 액츄에이터는 이동자의 관성력이 가동 코일형에 비해 크기 때문에 진동 발생 주파수가 수 Hz로 제한되기 때문에 고속의 추력이 요구되는 적용처에는 적합하지 않으나 구조물 진동저감과 같이 큰 추력과 저속의 진동제어엔 적합함을 알 수 있다. 또한 전원공급 리드선이 정지된 상태이므로 전선이 피로하중을 받지 않는등 유지보수 측면에서 장점이 있다⁽⁷⁾

제작된 리니어 모터 댐퍼의 사양은 Table 2에

표시하였으며 형상은 Fig. 5와 같다.

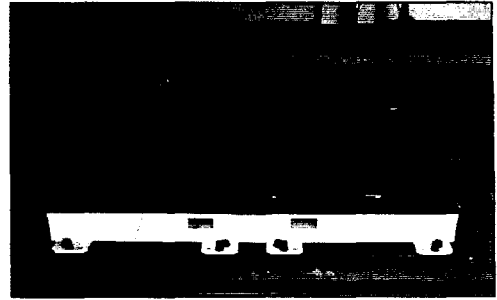


Fig. 5 The Fabricated LMD

Table 2 Specifications of the Fabricated LMD

항 목		사 양
정격 전압/전류		180[V]/23 [A]
가 동 질 량		1500 [kg]
공 극 길 이		50 [mm]
스 트 로 크		±250 [mm]
총 질 량		2352kg (하판 포함)
크 기		2100×420×670 [mm ³]
영구 자석	계 열	NdFeB
	잔류자속밀도	1.08 [T]
	자석 치수	2×2×1 [inch]
	총 자석길이	675 [mm] (케이스 포함)
코일	총 자석폭	472.4 [mm] (케이스 포함)
	턴 수	630 [turn]
	코일 단면적	5.31 [mm ²] (φ2.6 mm)
	코일 길이	154 [mm]
	코일 높이	37 [mm]
요크	전류 밀도	4 [A/mm ²]
	외측요크두께	95 [mm]
	내측요크두께	190 [mm]
	폭	474 [mm]

3.2 혼합형 리니어 모터 댐퍼의 수치모델

LMD의 기계적인 운동방정식은 식 (2)와 같다.

$$m_d \frac{d^2 x}{dt^2} = k_T i - k_d x - c_d \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

여기서 m_d 는 가동질량, k_T 는 추력상수, k_d 는 강성계수, c_d 는 마찰계수, x 는 가동질량의 변위이다.

코일에서의 전압방정식은 식 (3)과 같다.

$$V_c = Ri + L \frac{di}{dt} + k_E \frac{dx}{dt} \quad (3)$$

여기서 V_c 은 인버터를 통해 코일에 공급되는 전압, R 은 코일 저항, L 은 코일 인덕턴스, dx/dt 는 가동 질량의 속도이다. 식(3)에서 오른쪽의 두 번째 항은 전류변화에 따른 모터의 기전력항이며, 오른쪽 세번째 항은 자계속에서 코일이 운동함에 의해 발생하는 속도 기전력항이다.

제어 입력 전압과 인버터를 통해 코일에 공급되는 전압은 식(4)과 같은 관계가 있다.

$$V_c = G_i V_{in} \quad (4)$$

여기서 V_{in} 는 제어 입력 전압, G_i 는 인버터를 통해 증폭되는 전압 증폭 계인이다.

식 (2), (3), (4)에서의 제어 파라미터들을 해석 및 실험을 통하여 산정하였다. 위에서 기술된 방정식은 식 (5)의 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{X} = AX + BV_{in} \quad (5)$$

여기서 $X = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ i \end{bmatrix}$, $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -\frac{K}{M} & -\frac{C_d}{M} & \frac{k_T}{M} \\ 0 & -\frac{k_E}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}$,

$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{G_i}{L} \end{bmatrix}$ 이다.

출력을 LMD의 변위로 두면 출력방정식은 식 (6)와 같다.

$$y = CX + DV_{in} \quad (6)$$

여기서 $C = [1 \ 0 \ 0]$, $D = [0]$ 이다.

Fig. 6은 식 (5)와 식 (6)으로 계산한 제어 입력 전압에 대한 LMD의 변위에 대한 주파수 응답을 실험 결과와 비교하여 보여주고 있는데, 대체로 잘 일치함을 확인할 수 있다.

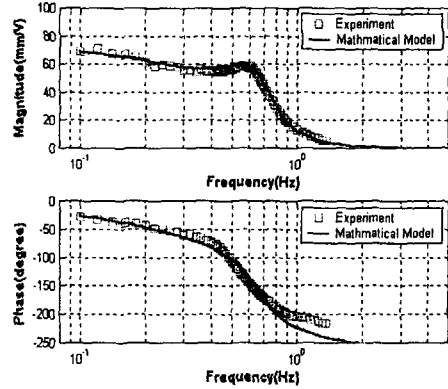


Fig. 6 Comparison of Frequency Responses of Displacement of the LMD to Input Control Voltage

4. 제어 파라미터 추정 및 제어 성능 시험

4.1 파라미터 추정

상태변수는 총 10개로 구조물을 2차 시스템 2차 모드까지 고려하였기 때문에 구조물을 표현하는 상태변수가 4개이며 3차 시스템인 혼합형 리니어 모터모델의 상태(3개)와 제어파라미터를 결정하는 상태(3개)를 사용하였다. 제어알고리즘에 사용되는 방정식은 식(1)과 같다.

추정된 파라미터를 사용한 수치 시뮬레이션 결과 전달함수(Fig. 7)와 나타난 바와 같이 제어성능은 1,2차 모드 모두 가속도 응답의 약 10dB가 저감됨을 알 수 있었으며 외란이 발생하는 경우 1,2차 고유진동수에서 9.5dB의 진동저감 효과를 확인할 수 있었다. (Fig. 8, Fig. 9)

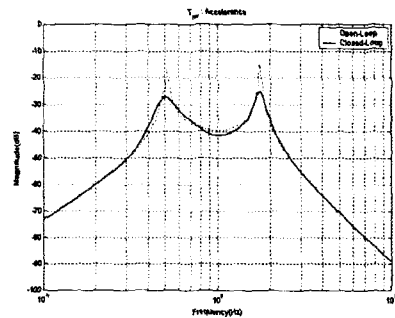


Fig. 7 System Transfer Function

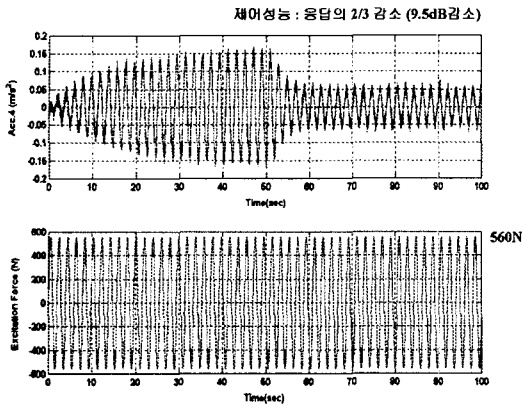


Fig 8. Time response for 1st mode

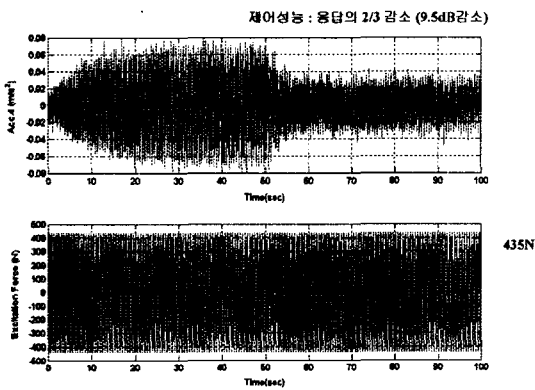


Fig 9. Time response for 2nd mode

4.2 제어성능 시험

제어기는 PC에 Visual C++를 이용하여 프로그래밍 되었으며 NI사의 다목적 A/D보드를 통해 가속도 신호를 입력 받고 제어 신호를 출력하였다. 입력 샘플링 시간은 0.02초이다.

제어 성능은 크게 두가지 평가되었다. 첫 번째 실험은 LMD를 이용하여 철골 구조물을 가진한 후, 가진력을 제거하는 자유진동 실험과 같은 조건에서 H_{∞} 제어를 수행한 결과를 비교한 것으로 이 때 각각의 지수감소 곡선으로부터 감쇠력의 증가 정도와 평형상태(가속도=0)까지 이르는 데 걸리는 시간을 비교함으로써 제어 성능을 평가하였다. Fig. 10, Fig. 4는 제어시와 비제어시 자유진동값의 차이를 나타내는 것으로 감쇠비(ζ)는 자유진동시 약 1.03%, 이고 제어시 약 14.9%로 14% 감쇠비가 증가한 효과를 가짐을 알 수 있다.

두 번째로 복합형 선형 모터 댐퍼의 기능별 성능 평가를 수행하였다. 철골 구조물의 4층 바닥에서 1차 공진주파수로 가진력을 발생하고 정상상태에 달했을 때, LMD에 장착된 스톱퍼를 제거하여 수동진동제어모드로 작동하게 하였으며 수동진동모드가 정상상태에 이르렀을 때, H_{∞} 제어를 시작하여 복합(능동+수동)제어를 수행하였다. 그 결과를 Fig. 11에 도시하였다.

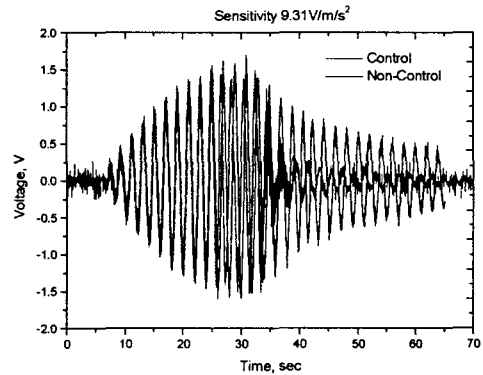


Fig. 10 Free vibration and Control

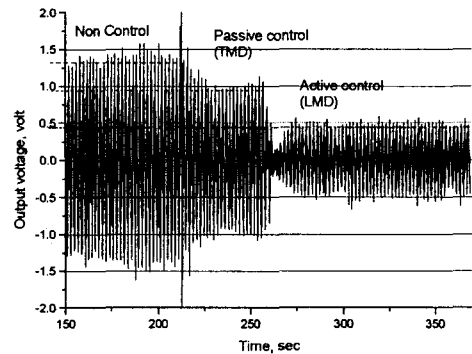


Fig. 11 Acceleration at 5th floor

제어시험결과 비제어시와 수동제어시, 그리고 복합제어시의 진동 저감량을 Table 3에 정리하여 나타내었다. 능동제어시 1차 모드의 진동이 약 10 dB 저감되었으며 이는 시뮬레이션 결과와 유사하며 외란이 있는 경우에도 제어기가 잘 작동함을 확인할 수 있었다.

Table 3. TL for vibration control mode

	비제어시	수동제어	능동제어
가속도 (m/s^2)	0.145	0.103	0.046
저감량	0	3 dB	10 dB

III. 결 론

본 연구에서는 실규모 철골 구조물의 진동제어 장치로 복합형 리니어 모터 댐퍼를 개발 제작하여 적용 시험을 하였으며 수치 시뮬레이션을 통해 예측한 성능지수와 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

본 실험에서는 정형파 가진에 대한 진동제어 성능을 시뮬레이션하고 실험을 통해 검증해 보았으며 앞으로 랜덤한 가진에 대한 제어 성능 지수 및 제어 강건성에 대한 고찰을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업 기반 기술 개발 사업 중 “초고층 철골 구조물의 진동 제어 장치 실용화에 관한 연구”사업의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1.T.T.Soong, and G.F.Dargush (1997), “Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering”, John Wiley & Sons
- 2.B.F.Spencer, Jr. and M.K.Saint (1997), “Controlling Buildings : A New Frontier in Feedback”, Special Issue of the IEEE Control Systems Magazine on Emerging Technology, Vol.17, No.6, pp.19-35
- 3.T.Y.Chung, S.J.Moon and S.M.Jang (1999), “Active Control on the structural vibration under base excitations using a linear oscillatory actuator”, Int. J. Applied Electromagnetics and Mechanics Vol.10, pp.203-214
- 4.정태영, 문석준, 정종안, 박희창, 장석명 (1997),

“Linear Oscillatory Actuator를 이용한 구조물 진동의 능동제어 연구”, 한국소음진동공학회지, 제7권 2호, pp.311-317

5. 장석명, 정상섭, 박희창, 문석준, 박찬일, 정태영 (1999), “리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액츄에이터의 설계제작 및 제어정수도출”, 전기학회 논문지, 제48B권 5호, pp.241-248
6. 정태영, 임채욱, 허영철, 장석명, 정상섭, 김두훈, 박행동, “건축 구조물 제진용 대용량 하이브리드형 리니어 모터 댐퍼의 개발”, 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집 2001년, pp 951-957
7. 정상섭, “진동제어 시스템을 위한 리니어 왕복 액츄에이터의 동특성 해석”, 충남대학교 대학원 전기공학과 기구 및 재료 박사 학위 논문, 2002. pp20-25