

반능동 동조질량감쇠기를 이용한 구조물의 진동제어

Structural Vibration Control Using Semiactive Tuned Mass Damper

지한록* · 문영종** · 김춘호*** · 이인원****

Ji, Han Rok · Moon, Yeong Jong · Kim, Chun Ho · Lee, In Won

1. 서 론

현대의 토목, 건축 구조물은 그 규모가 점차 고층화, 장대화 되어감에 따라 동적거동 제어의 필요성이 대두되고 있다. 구조물의 진동을 저감시키기 위한 효과적인 제어장치중의 하나로 동조질량감쇠기를 들 수 있으며, 질량감쇠기로는 주로 수동형 동조질량감쇠기와 능동형 동조질량감쇠기를 고려할 수 있다. 수동형 동조질량감쇠기의 경우 간단하고 저렴한 진동저감 장치이지만 고정된 변수들을 사용하므로 그 성능에 한계가 있다. 능동형 동조질량감쇠기의 경우는 그 성능은 뛰어나지만 복잡한 메커니즘과 비싼 비용, 그리고 위험시의 신뢰성 문제로 인하여 실용화에 어려움이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 반능동 동조질량감쇠기에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문에서는 반능동 동조질량감쇠기에 다양한 제어 알고리즘을 적용, 그 성능을 평가하고자 한다.

2. 반능동 동조질량감쇠기

2.1 지배방정식

동조질량감쇠기가 설치된 단자유도 시스템의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ f \end{Bmatrix} \quad (1)$$

수동형 동조질량감쇠기의 경우는 고정된 강성계수 k_2 와 감쇠계수 c_2 를 사용하며, 주 시스템의 진동 저감에 있어서 최적의 계수를 선정하기 위한 많은 연구가 이루어졌다. 그러나 수동형의 고정된 계수들은 실제 구조물이 받게 될 다양한 하중조건에 민감하지 못하며, 따라서 그 성능이 제한적이다. 반면, 반능동 제어의 경우는 자기유변유체 감쇠기 및 가변형 오리피스 감쇠기와 같은 장치를 사용하여 감쇠계수 c_2 의 실시간 조절이 가능하다. 따라서 c_2 는 고정된 상수가 아닌 $c(t)$ 로 표현되며 지배방정식은 식 (2)와 같이 표현된다.

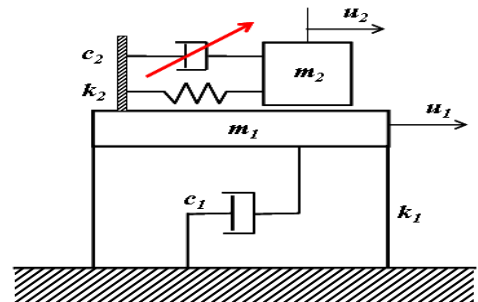


그림 1. 반능동 질량감쇠기가 설치된 단자유도 시스템

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c(t) & -c(t) \\ -c(t) & c(t) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ f \end{Bmatrix} \quad (2)$$

*한국과학기술원 건설 및 환경공학과 석사과정 · E-mail: jihhr77@kaist.ac.kr - 발표자
 **한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정 · 공학석사 · E-mail: oonehe78@kaist.ac.kr
 ***정회원 · 중부대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: chkim@joongbu.ac.kr
 ****정회원 · 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: iwlee@kaist.ac.kr

3. 제어 알고리즘

반응동 제어장치와 함께 제어장치를 구동시키는 다양한 접근방법들이 제안되었다. 반응동 동조질량감쇠기를 사용하는 경우 구조물의 거동을 최소화 시키는 감쇠비를 결정하는 것이 목적이 된다. 따라서 제어 알고리즘도 그러한 반응동 동조질량감쇠기의 특성을 고려하여, 주 구조물의 응답의 피드백을 통하여 그 거동을 감소시킬 수 있는 감쇠계수를 계산하고, 그 값을 동조질량감쇠기의 감쇠계수로서 사용하게 된다. 본 논문에서 사용된 반응동 제어 알고리즘은 다음과 같다.

3.1 clipped 최적제어 알고리즘

성능지수 J 를 최소화하는 최적의 감쇠계수 $c(t)$ 를 결정하는 알고리즘으로, 이때의 반응동 시스템의 성능지수는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$J_{semi} = J_{active} + \int_0^{\infty} r(u_{semi}(t) - u_{active}(t))^2 dt \quad (3)$$

반응동 제어력 u_{active} 는 LQR 방법을 통해서 산정하며, 가변의 감쇠계수를 갖는 반응동 동조질량감쇠기를 고려하면, 질량 감쇠기의 감쇠계수 $c(t)$ 를 조절함으로서 식 (4)와 같은 반응동 제어력을 구현시킬 수 있다. 성능지수 J 를 최소화시키는 최적의 감쇠계수는 식 (5)와 같이 얻을 수 있으며, SAT 함수를 통하여 감쇠계수의 범위를 c_{min} 과 c_{max} 사이에 한정시킨다.

$$u_{semi}(t) = -c(t)\dot{z}(t) \quad (4)$$

$$c_{opt}(t) = SAT \{u_{active}(t) / \dot{z}(t)\} \quad (5)$$

3.2 최대 에너지 소산 알고리즘 (MEDA)

최대 에너지 소산 알고리즘은 McClamroch 등(1995)이 제안한 Decentralized Bang-Bang 알고리즘을 변형시킨 것으로, Lyapunov 함수를 식 (6)과 같이 전체 구조물의 상대적인 진동 에너지로 가정하여 진동 에너지를 가장 빠르게 소산시키도록 제어 장치를 구동시키는 방법이다.

$$K = \frac{1}{2}\eta^T K \eta + \frac{1}{2}\dot{\eta}^T M \dot{\eta} \quad (6)$$

자기유변유체 감쇠기를 사용하는 경우는 입력전압에 대한 함수로 나타나지만, 본 논문에서는 감쇠계수를 직접적으로 결정하므로 식 (7)과 같이 감쇠계수를 산정한다.

$$c_{opt}(t) = c_{max} H(-\dot{\eta} \phi F_d) \quad (7)$$

3.3 Groundhook 이론에 입각한 제어 알고리즘

Groundhook 이론은 질량감쇠기의 진동을 증가시킴으로서 상대적으로 주 시스템의 진동을 저감시키고자 하는 개념이다. 즉 질량감쇠기의 진동이 주 시스템의 진동을 저감시키는 방향으로 일어날 때는 감쇠력을 최소화시켜 효과를 극대화하고, 반대의 경우에는 감쇠력을 최대로 조절하는 방법이다. 감쇠계수의 결정에는 질량감쇠기의 상대속도와 주 시스템의 절대속도 혹은 절대변위를 사용하는데 전자의 경우를 VBG(velocity based Groundhook) 알고리즘, 후자를 DBG(displacement based groundhook) 알고리즘이라 한다.

3.3.1 on-off 형태의 VBG 알고리즘

질량감쇠기의 상대속도와 주 시스템의 속도의 방향이 같을 때 최소의 감쇠계수를, 반대의 경우에 최대의 감쇠계수를 산정하는 방법이다.

$$\begin{aligned} v_1 v_{2l} \geq 0 & \quad c(t) = c_{min} \\ v_1 v_{2l} < 0 & \quad c(t) = c_{max} \quad v_{2l} = v_2 - v_1 \end{aligned} \quad (8)$$

3.3.2 on-off 형태의 DBG 알고리즘

질량감쇠기의 상대속도와 주 시스템의 변위의 방향이 같을 때 최소의 감쇠계수를, 반대의 경우에 최대의 감쇠계수를 산정하는 방법이다.

$$\begin{aligned} u_1 v_{21} \geq 0 & \quad c(t) = c_{min} \\ u_1 v_{21} < 0 & \quad c(t) = c_{max} \end{aligned} \quad v_{21} = v_2 - v_1 \tag{9}$$

4. 수치해석

4.1 수치모델

각 제어 알고리즘의 성능평가를 위한 수치해석에 사용된 대상은 그림 (1)과 같은 반능동 동조질량감쇠기가 설치된 단자유도 시스템으로서, $m_1=1360\text{kg}$, $m_2=68\text{kg}$, $k_1=859050\text{N/m}$, $c_1=683.61\text{Nsec/m}$ 와 같은 물성치를 갖는다. Uncontrolled 경우는 동조질량감쇠기를 설치하지 않은 단자유도 시스템을 사용하고, Passive TMD는 Den Hartog(1956) 식을 이용하여 동조질량감쇠기의 강성 및 감쇠계수를 설계하였다. 다양한 반능동 제어 알고리즘의 적용을 위해 최적의 c_{min} 과 c_{max} 값을 설정하였으며, 입력하중으로는 30%로 규모를 축소시킨 Elcentro 지진과 Kobe 지진을 사용하였다.

4.2 해석결과

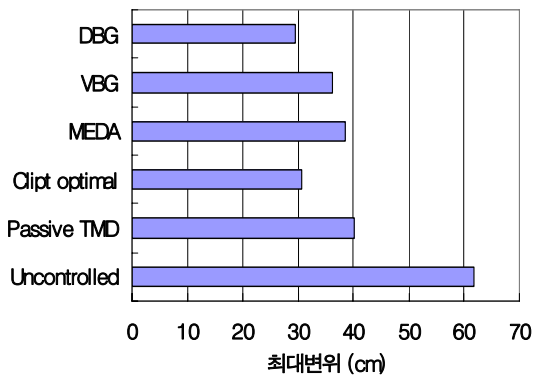


그림 2. Elcentro 지진시의 최대 변위

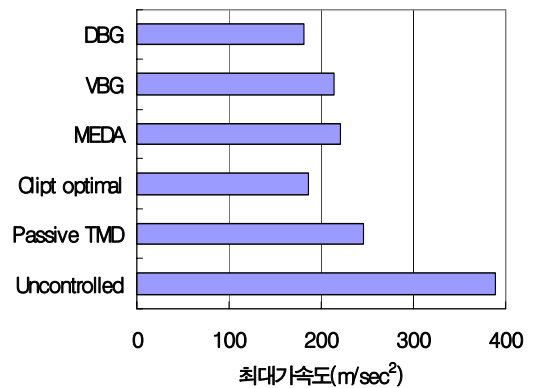


그림 3. Elcentro 지진시의 최대 가속도

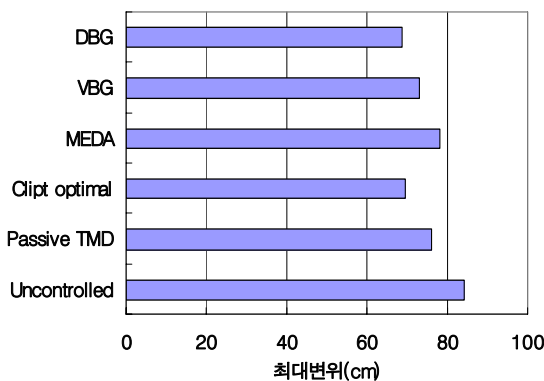


그림 4. Kobe 지진시의 최대 변위

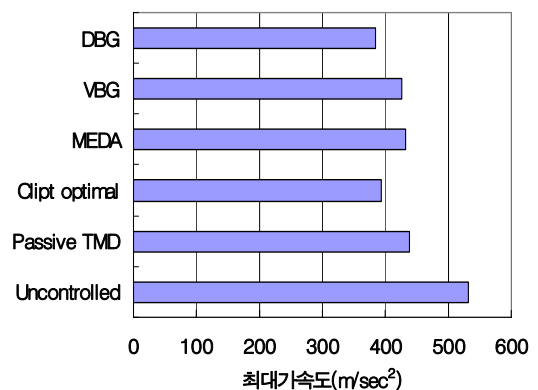


그림 5. Kobe 지진시의 최대 가속도

그림 2~5 는 Elcentro 지진과 Kobe 두 지진시 주 시스템의 최대변위와 최대가속도를 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 반능동 동조질량감쇠기를 사용하고 제어 알고리즘을 적용한 경우에 Elcentro 지진의 경우 4가지의 반능동 제어 알고리즘이 모두 수동형에 비해 더 뛰어난 성능을 보여주고 있으며, Kobe 지진의 경우에도 Clipt 최적제어 알고리즘과 DBG 알고리즘은 수동형의 경우보다 뛰어난 진동저감 효과를 보여주고 있다. 표 1은 각 지진에 대한 정규화 된 구조물의 최대변위 및 최대가속도를 나타내고 있다.

표 1. 정규화 된 구조물의 최대변위 및 최대가속도

지진하중	평가지수	Passive TMD	Clipt 최적제어	MEDA	VBG	DBG
Elcentro	J_1	0.652	0.497	0.624	0.587	0.475
	J_2	0.632	0.478	0.568	0.548	0.465
Kobe	J_1	0.903	0.825	0.930	0.869	0.815
	J_2	0.823	0.739	0.811	0.801	0.721

J_1 : uncontrolled 경우의 값으로 정규화 된 구조물의 최대변위
 J_2 : uncontrolled 경우의 값으로 정규화 된 구조물의 최대가속도

5. 결 론

본 논문에서는 수치해석을 통하여 반능동 동조질량감쇠기를 이용한 구조물의 진동제어 성능을 평가하였다. 수치해석은 반능동 질량감쇠기가 설치된 단자유도 모델을 대상으로 수행되었으며, 다양한 반능동 제어 알고리즘의 성능을 평가하였다. 그 결과 반능동 동조질량감쇠기가 설치된 경우 수동형의 질량감쇠기보다 구조물의 진동저감 효과가 뛰어남을 확인하였다. 다양한 제어 알고리즘 중에서 clipt 최적제어 알고리즘과 groundhook 이론에 기반한 DBG 알고리즘이 매우 좋은 성능을 나타냈다. 특히 DBG 알고리즘의 경우 이상적인 능동 제어력의 계산이 필요 없는 간단한 알고리즘이지만 그 성능에 있어서는 가장 뛰어난 결과를 보여주었다. Elcentro 지진의 경우 최대변위 및 최대가속도를 53% 가까이 감소시켰으며, 수동형 동조질량감쇠기보다도 15%에 가까운 성능의 개선효과를 가져왔다. 수치해석을 통해 적절한 제어 알고리즘을 적용한 반능동 동조질량감쇠기가 효율적인 진동저감 장치임을 확인하였다.

참고문헌

1. Koo, J.-H. Ahmadian, M. Setareh, M. and Murray, T. M.(2004) In search of suitable control methods for semi-active tuned vibration absorbers, *Journal of Vibration and Control*, Vol.10, pp.163-174.
2. T. Pinkaew and Y. Fujino (2001) Effectiveness of semi-active tuned mass dampers under harmonic excitation, *Engineering Structures*, Vol. 23, pp. 850-856.
3. Rahul Rana and T.T. Soong (1998) Parametric study and simplified design of tuned mass dampers, Vol. 20, pp. 193-204.
4. Den Hartog, J. P. (1956) Mechanical vibration, 4th edn, McGraw-Hill, NewYor