한국소음진동공학회 1995년도 추계학술대회논문집 pp.254-260

가속도가 포함된 순간최적제어 알고리듬을 이용한 구조물 진동의 능동제어

[0]문 석 준*, 정 태 영*

(Active Control of Structural Vibration Using An Instantaneous Control Algorithm Including Acceleration)

(Seok-Jun Moon and Tae-Young Chung)

1. 서 론

구조물의 경량화·대형화 추세는 구조물의 유연성 증대 및 진동수의 조밀한 분포를 초래할 뿐만 아니라 구조물이 갖게 되는 낮은 감쇠비등으로 인하여 기진력에 대해 과도한 진동응답을 일으키기 쉽다. 따라서 적극적인 능동진동제어방법이 요구된다.

구조물의 능동진동제어는 진동을 수진기(受振器)로 감지하고, 이 신호를 받아 액추에이터(actuator)의 제어력을 실현하여 구조물의 진동을 능동적으로 제어하는 방법으로서 진동특성변경을 용이하게 실현할 수 있어 비교적 넓은 주파수 영역의 기진력에 대해서도 효율적으로 제어할 수 있다.

구조물 진동의 능동제어에 있어서는 각기 다른 제어설계 기준에 따라 다양한 제어 알고리듬이 존재할 수 있으며, Reinhorn등[1]과 Soong[2]이 이에 관한 연구동향을 조사하였다. 제어 알고리듬을 실제 구조물에 적용할 때 구조계의 상태량(변위, 속도, 가속도등)을 정확히 계측하는 것이 매우 중요하다. 특히 fixed reference frame이 없는 구조물의 경우 변위를 측정하는 데 어려움이 있으며[3,4], 속도측정으로부터 변위를 구하는 방법은 계산시의 오차 및 속도측정시의 잡음등으로 인해 정확한 값을 주지 않는다. 많은 경우 구조물의 변위측정보다 가속도 측정이 더 용이하므로 가속도 되먹임을 포함한 제어 알고리듬이 구조물진동 제어에 유효하게 적용될 수 있다.

고전적 최적제어(classical optimal control)에서는 제어기간 동안에 구조물의 상태량 및 제어력이 포함된 2차 성능지수(quadratic performance index)를 설정하고 이 지수를 최소화하는 제어력을 구한다[5]. Balas[6,7]는 고전적 최적제어 알고리듬을 유연 구조물에 적용하였으며, 실험적 연구[3]도 이루어졌으나, 이 알고리듬은 지반 운동등 기진력을 고려하지 않은 제어 알고리듬이며, 또한 Riccati 방정식을 풀어야 하므로 자유도수가 많은 대형구조물인 경우에는 많은 연산시간이 요구된다.

Meirovitch등[8,9]은 modal space에서 제어계를 설계하는 Independent Modal Space Control(IMSC)를 제안하였다. 이 방법은 몇 개의 진동형만을 제어할 경우에 효과적이며, 액추에이터와 제어할 진동형의 수가 같아야만 최적성이 유지된다.

Yang등[10,11,12,13]은 지진하중을 받는 구조물에 적용하기 위하여 모든 시간 증분에서 시간에 따라 변하는 2차 성능지수를 최소화하는 순간최적제어 알고리듬(instantaneous optimal control algorithm)을 변위-속도 되먹임/앞먹임인 경우[10]와 속도-가속도 되먹임/앞먹임인 경우[12]로 나누어 개발하였다.

대형구조물에 대한 능동제어연구의 예로서, Chung등[3,4]은 지진 기진력을 받는 대형 구조물에 대하여 텐던(tendon) 제어를 검토하였다. Soong등[14]은 active bracing system을 사용하여 지반운동하에서 실척(實尺) 모델의 진동제어를 실험하였다. Fujita등[15,16,17]은 유압 액추에이터를 사용하여 고층건물의 진동모드중 2개의 수평방향 최저차 진동모드를 제어하는 능동 질량감쇠장치(active mass damper)를 제작·실험하였고, Sakamoto등[18]은 유압식 능동 질량구동장치(active mass driver)를 일본 동경에 위치한 한 건물에 설치하여 그 유용성을 확인하였다. 또한 문[19]등은 소형 유압식 액추에이터를 이용한 능동 질량구동장치를 개발하여 4기둥지지 후판구조물에 대해 진동제어실험을 수행하였다.

본 연구에서는 제어 알고리듬 적용면에서 가속도 계측이 보다 용이한 점을 고려하여 가속도가 포함된 가속도-속도-변위 되먹임 제어 알고리듬을 개발하고, 이를 유압식 능동 질량구동장치에 적용하여 능동제어시스템의 성능을 실증적으로 검토한다. 이 때 능동제어시스템의 구성요소들의 동특성을 시스템 모델링에 포함하여 제어력을 산정함으로써 시간지연의 영향을 효과적으로 보상하는 방안을 제시한다.

2. 가속도가 포함된 순간최적제어 알고리듬

고전적 최적제어는 제어력 산정시 기진력을 무시하고 Riccati 방정식을 풀기 때문에 기진력을 고려할 수 없으나, Yang등이 제한한 순간최적제어 알고리듬은 시각 t에서의 기진력을 고려하여 제어력을 산정하기 때문에 기반 기진력을 가진 구조계의 진동제어에 매우 유효하게 적용될 수 있다[10].

제어 알고리듬을 실제 구조물의 진동제어에 적용할 때 가속도 측정이 다른 상태량 측정보다 더 용이하며 이를 이용한 되먹임 제어가 매우 바람직하다. 그러나 기존의 알고리듬은 대부분 속도와 변위만을 상태량으로 가지므로 가속도를 되먹임 시킬 수 없다. 이 문제점을 극복하기 위한 하나의 방법으로서 가속도-속도-변위 되먹임/앞먹임 제어 알고리듬을 제시한다. 본 알고리듬은 제어방법에 따라 폐루프

* 한국기계연구원 구조시스템연구부

(Closed-loop) 제어, 개루프(Open-loop) 제어 및 폐-개루프(Closed-Open-loop) 제어로 분류될 수 있으며, 본 논문에서는 폐루프제어인 되먹임 제어 알고리듬에 대해서만 다룬다.

진동하고 있는 제어 대상구조계의 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M\ddot{x}(t)+C\dot{x}(t)+Kx(t)=\overline{B}u(t)+\overline{H}f(t) \quad (1)$$

여기서 대문자 알파벳은 매트릭스를, 소문자 알파벳은 벡터를 나타내며, M, C 및 K는 구조계의 관성, 감쇠 및 강성 매트릭스이며, $u(t)$ 와 $f(t)$는 각각 제어력 벡터와 기진력 벡터이다.

구조계의 운동방정식 (1)에서 상태량 속도와 변위는 Newmark β-Method을 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{x}(t)=\dot{x}(t-\Delta t)+\beta\{\ddot{x}(t-\Delta t)+\ddot{x}(t)\} \quad (2)$$

$$x(t)=x(t-\Delta t)+\alpha\dot{x}(t-\Delta t)+\gamma\{\ddot{x}(t-\Delta t)+\ddot{x}(t)\} \quad (3)$$

여기서 Δt는 미소시간이며, α, β, γ는 상수이다.

(2)와 (3)을 (1)에 대입하여 정리하면

$$\{M+\beta C+\gamma K\}\ddot{x}(t)+\{\beta C+\gamma K\}\ddot{x}(t-\Delta t)$$
$$+\{C+\alpha K\}\dot{x}(t-\Delta t)+Kx(t-\Delta t)=\overline{B}u(t)+\overline{H}f(t) \quad (4)$$

되고, 이를 다시 간단히 기술하면 다음과 같다.

$$M_1\ddot{x}(t)=M_0\ddot{x}(t-\Delta t)+C_0\dot{x}(t-\Delta t)$$
$$+K_0x(t-\Delta t)+\overline{B}u(t)+\overline{H}f(t) \quad (5)$$

여기서

$$M_1=M+\beta C+\gamma K,\quad M_0=-\{\beta C+\gamma K\},$$
$$C_0=-\{C+\alpha K\},\quad K_0=-K$$

(5)의 양변에 M_1^{-1}을 앞쪽에 곱하면 다음과 같다.

$$\ddot{x}(t)=\overline{M}_0\ddot{x}(t-\Delta t)+\overline{C}_0\dot{x}(t-\Delta t)$$
$$+\overline{K}_0x(t-\Delta t)+\overline{B}_0u(t)+\overline{H}_0f(t) \quad (6)$$

여기서

$$\overline{M}_0=M_1^{-1}M_0,\quad \overline{C}_0=M_1^{-1}C_0,\quad \overline{K}_0=M_1^{-1}K_0,$$
$$\overline{B}_0=M_1^{-1}\overline{B},\quad \overline{H}_0=M_1^{-1}\overline{H}$$

(6)을 (2)와 (3)에 대입하면 다음과 같다.

$$\dot{x}(t)=\beta(I+\overline{M}_0)\ddot{x}(t-\Delta t)+\{I+\beta\overline{C}_0\}\dot{x}(t-\Delta t)$$
$$+\beta\overline{K}_0x(t-\Delta t)+\beta\overline{B}_0u(t)+\beta\overline{H}_0f(t) \quad (7)$$

$$x(t)=\gamma\{I+\overline{M}_0\}\ddot{x}(t-\Delta t)+\{\alpha I+\gamma\overline{C}_0\}\dot{x}(t-\Delta t)$$
$$+\{I+\gamma\overline{K}_0\}x(t-\Delta t)+\gamma\overline{B}_0u(t)+\gamma\overline{H}_0f(t) \quad (8)$$

(6), (7) 및 (8)을 정리하여 다음과 같이 묶어서 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix}\ddot{x}(t)\\ \dot{x}(t)\\ x(t)\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}\overline{M}_0 & \overline{C}_0 & \overline{K}_0\\ \beta(I+\overline{M}_0) & (I+\beta\overline{C}_0) & \beta\overline{K}_0\\ \gamma(I+\overline{M}_0) & (\alpha I+\gamma\overline{C}_0) & (I+\gamma\overline{K}_0)\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\ddot{x}(t-\Delta t)\\ \dot{x}(t-\Delta t)\\ x(t-\Delta t)\end{Bmatrix}$$
$$+\begin{bmatrix}\overline{B}_0\\ \beta\overline{B}_0\\ \gamma\overline{B}_0\end{bmatrix}u(t)+\begin{bmatrix}\overline{H}_0\\ \beta\overline{H}_0\\ \gamma\overline{H}_0\end{bmatrix}f(t) \quad (9)$$

이를 다시 다음과 같이 간략히 표현된다.

$$z(t)=Az(t-\Delta t)+Bu(t)+Hf(t) \quad (10)$$

여기서

$$z(t)=\begin{Bmatrix}\ddot{x}(t)\\ \dot{x}(t)\\ x(t)\end{Bmatrix},\quad A=\begin{bmatrix}\overline{M}_0 & \overline{C}_0 & \overline{K}_0\\ \beta(I+\overline{M}_0) & (I+\beta\overline{C}_0) & \beta\overline{K}_0\\ \gamma(I+\overline{M}_0) & (\alpha I+\gamma\overline{C}_0) & (I+\gamma\overline{K}_0)\end{bmatrix}$$

$$B=\begin{bmatrix}\overline{B}_0\\ \beta\overline{B}_0\\ \gamma\overline{B}_0\end{bmatrix},\quad H=\begin{bmatrix}\overline{H}_0\\ \beta\overline{H}_0\\ \gamma\overline{H}_0\end{bmatrix}$$

제어계의 2차 성능지수를 다음과 같은 시간종속 성능지수(time dependent performance index)로 설정할 수 있다.

$$J(t)=z(t)^TQz(t)+u(t)^TRu(t) \quad (11)$$

여기서 상첨자 T는 전치 매트릭스를 나타내고, Q 및 R은 각각 실수값을 갖는 매트릭스로 그 크기는 상태량 벡터와 제어력에 대한 상대 중요도에 따라 결정되는 가중매트릭스이다.

최적의 제어력을 구하기 위해 (10)을 만족하면서 (11)의 성능지수를 최소로 하는 제어력를 구한다. 이를 위하여 Hamiltonian $\hat{H}(t)$을 도입하면

$$\hat{H}(t)=z(t)^TQz(t)+u(t)^TRu(t)$$
$$+\lambda(t)^T\{z(t)-Az(t-\Delta t)-Bu(t)-Hf(t)\} \quad (12)$$

이다. 여기서 $\lambda(t)$는 Lagrangian multiplier 벡터이다.

(12)를 최소화하기 위한 필요조건식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial\hat{H}(t)}{\partial z(t)}=\{0\},\quad \frac{\partial\hat{H}(t)}{\partial u(t)}=\{0\},\quad \frac{\partial\hat{H}(t)}{\partial\lambda(t)}=\{0\} \quad (13)$$

(12)를 (13)에 대입하여 정리하면

$$\frac{\partial\hat{H}(t)}{\partial z(t)}=2Qz(t)+\lambda(t)=\{0\} \quad (14)$$

$$\frac{\partial\hat{H}(t)}{\partial u(t)}=2Ru(t)-B^T\lambda(t)=\{0\} \quad (15)$$

$$\frac{\partial\hat{H}(t)}{\partial\lambda(t)}=z(t)-Az(t-\Delta t)-Bu(t)-Hf(t)=\{0\} \quad (16)$$

와 같다.

되먹임 제어에서의 제어력은 계측한 상태량에 되먹임 제어이득을 곱한 형태이고, (15)로부터 제어력이 Lagrangian multiplier의 함수이므로 $\lambda(t)$는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\lambda(t)=Pz(t) \quad (17)$$

(17)을 (14)에 대입하면

$$P=-2Q \quad (18)$$

이고, (17)과 (18)을 (15)에 대입하므로써 제어력이 다음과 같이 얻어진다.

$$u(t)=\frac{1}{2}R^{-1}B^T\lambda(t)=-R^{-1}B^TQz(t)=Gz(t) \quad (19)$$

여기서 G는 제어이득이며

$$G=-R^{-1}B^TQ \quad (20)$$

이다.

(20)의 제어력을 (16)에 대입하여 정리하면 제어된 구조계의 상태량이 다음과 같이 귀착된다.

$$z(t)=[I-BG]^{-1}\{Az(t-\Delta t)+Hf(t)\} \quad (21)$$

(21)은 가속도를 상태량 벡터에 포함하고 있는 가속도-속도-변위 되먹임 알고리듬인데, 이로부터 기진력이 고려되고 있음과 제어이득에 의해 계의 특성치가 변화될 수 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 안정성을 보장하기 위해 다음과 같은 제수

들을 선택하였다.

$$\alpha = \Delta t,\ \beta = \frac{1}{2}\Delta t,\ \gamma = \frac{1}{4}\Delta t^2$$

3. 수치실험 예

본 연구에서 제시한 가속도가 포함된 순간최적제어 알고리듬에 의한 구조물 진동제어의 타당성과 유용성을 검토하기 위해 지진 기진력을 받는 구조물에 대해 수치실험을 수행하였다. 수치실험 예로서 Yang등[20]이 이미 수치실험 예로 다루었던 집중질량 전단보로 모델링되는 8층 구조물을 선택하였다(Fig. 1 참조). 이 구조물의 최상층에 능동 질량감쇠장치(Active Mass Damper)를 설치하고, 기존의 제어 알고리듬과 가속도가 포함된 순간최적제어 알고리듬을 적용하여 구조물 진동의 능동제어효과를 비교하였다. 구조물의 고유진동수는 0.92, 2.73, 4.45, 6.02, 7.38, 8.49, 9.32, 9.82Hz이며, 최상층에 설치한 보조질량(active mass)은 구조물 질량의 약 1%이다.

외력은 1940년 미국 El Centro에서 발생한 지진 기록중 남북방향 가속도를 기반 지진력으로 하였으며, 이의 시간이력 및 스펙트럼 분석결과는 Fig. 2와 같다. 수치실험에서는 최대 제어력을 830kN으로 제한하였다.

수치실험 결과로서 구조 안전성면에서 중요한 지표인 각 층에서의 층간 최대변형은 Table 1과 같다. Case 1은 각 층에서의 상태량을 모두 계측 또는 추정하여 되먹임 제어한 경우이고, case 2는 최상층인 8층에서의 상태량만을 계측하여 되먹임 제어한 결과이다. 가속도가 포함된 순간최적제어인 경우 case 1 및 case 2에서의 지반에 대한 최상층의 상대변위와 이의 스펙트럼 분석결과를 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었다.

진동제어 결과로서 Table 1, Fig. 3 및 Fig. 4에 보인바와 같이 약 50%의 제어효과를 보이고 있다. Fig. 2로부터 El Centro 지진은 저주파수 성분이 지배적임을 알 수 있으며, 이 구역에 구조물의 1차 고유진동수가 존재하여 제어전에는 공진으로 인한 응답이 지배적으며 제어후에는 공진 주파수 성분이 대부분 제어되었음을 Fig. 3 및 Fig. 4로부터 알 수 있다. 모든 상태량을 계측하여 제어를 수행한 경우(case 1)에는 제안한 가속도가 포함된 순간최적제어 알고리듬과 고전적 최적제어가 대등한 결과를 보이고 있다. 순간최적제어 알고리듬의 경우 다른 알고리듬에 비해 다소 떨어지는 제어효과를 보이고 있으나 이는 Yang[10]이 제안한 가중매트릭스 Q를 사용한 결과이므로 가중치 매트릭스의 적절한 선택에 의해 제어성능을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다. 8층에서의 상태량만으로 제어를 수행한 경우(case 2)에는 case 1인 경우와 비교할 때 제어성능이 다소 감소되는 결과를 보이고 있으나, 실제 구조물의 진동능동제어시 모든 상태량을 계측하기는 어렵고 또한 계측하지 못한 상태량을 추정하는 데는 많은 연산시간이 필요하여 시간지연 영향이 크게 나타나며, 따라서 case 2의 경우가 case 1의 경우보다 더 유용할 수 있다. 특히, 대형구조물 진동의 능동제어인 경우 다수의 상태량 계측 및 추정이 요구되므로 계측한 상태량만을 사용하는 출력 상태량 되먹임 제어가 매우 유용하다고 사료된다.

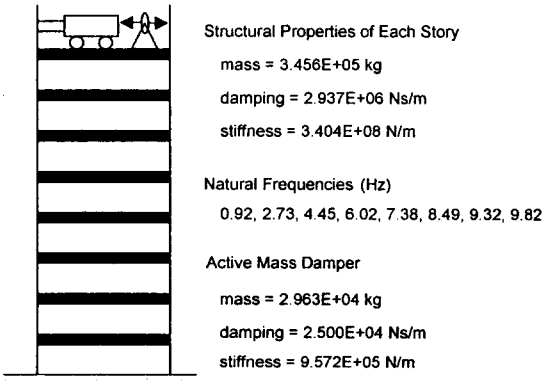
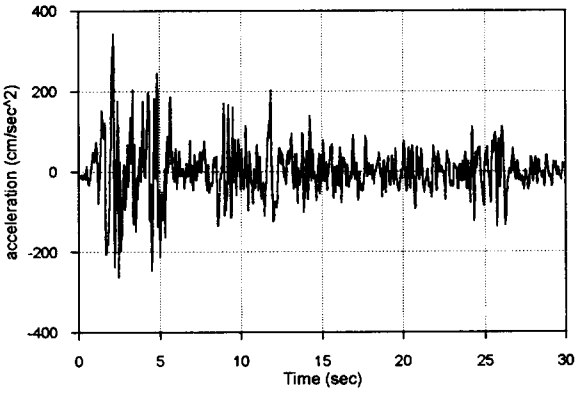
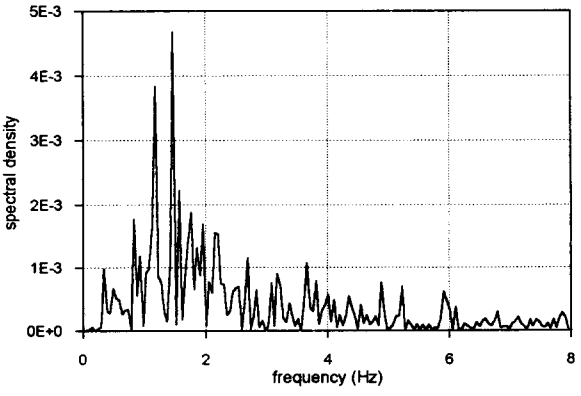


Fig. 1 Eight-Story Building Equipped with Active Mass Damper



(a) Time History



(b) Acceleration Spectrum

Fig. 2 NS Component of El Centro Earthquake in 1940

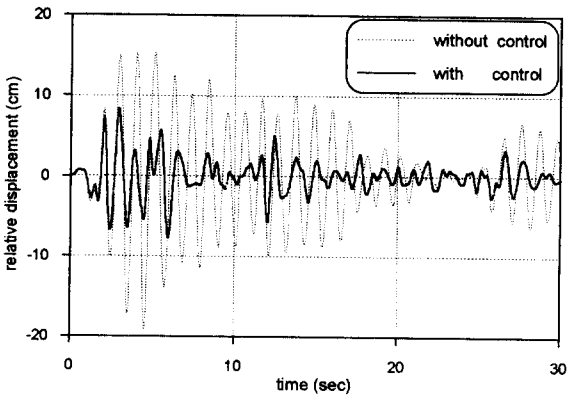
Table 1 Maximum Interstory Deformation of Eight-Story Building Equipped with Active Mass Damper (Max. Control Force = 830kN)

(unit : cm)

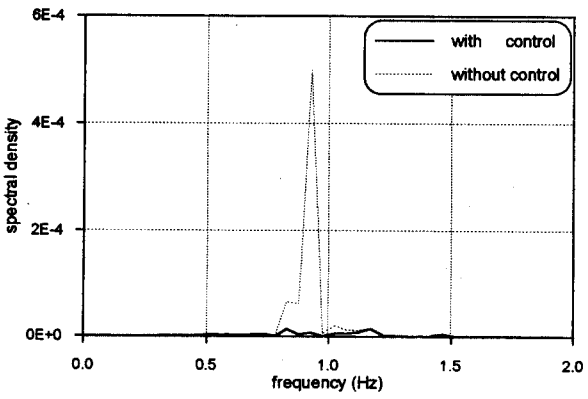
Story	No Control (Without AMD)	Classical Optimal Control	Proposed Control	
		Case 1[34]	Case 1	Case 2
1	3.25	1.53	1.52	1.78
2	3.24	1.43	1.43	1.71
3	3.12	1.35	1.37	1.57
4	2.92	1.31	1.32	1.36
5	2.61	1.18	1.17	1.12
6	2.14	0.95	0.92	0.88
7	1.53	0.67	0.64	0.57
8	0.80	0.51	0.50	0.57

Case 1 : Full State Feedback

Case 2 : Only the 8th Story State Feedback

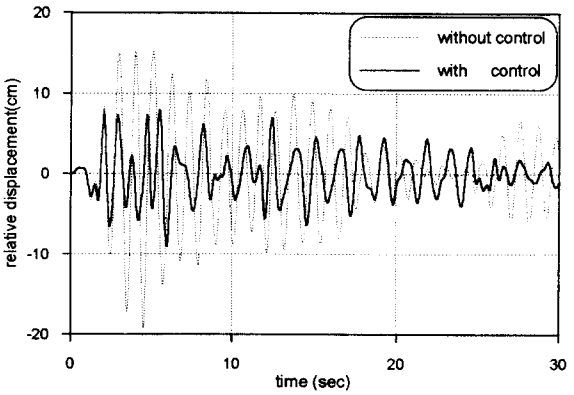


(a) Time History

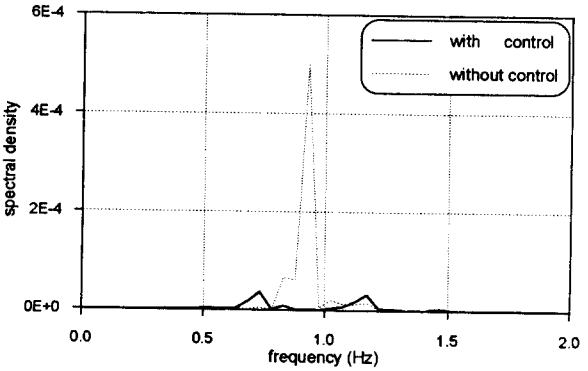


(b) Displacement Spectrum

Fig. 3 Response of the 8th Story Using Proposed Control Algorithm : Case 1



(a) Time History



(b) Displacement Spectrum

Fig. 4 Response of the 8th Story Using Proposed Control Algorithm : Case 2

4. 유압식 제어장치를 이용한 검증시험

4.1 유압식 능동제어장치 구성

제어 알고리듬의 제어 성능을 검증하기 위해 1자유도로 모델링될 수 있는 구조물로서 해양구조물 및 건축물에의 응용이 가능한 4기둥지지 후판구조물을 제작하였는데 가로×세로×높이가 1200mm×800mm×1600mm이다. 하판은 한국기계연구원에서 보유하고 있는 대형 6자유도 진동대에 취부할 수 있도록 제작하였다. 제작한 구조물의 정확한 동특성을 파악하기 위해 유한요소해석 범용프로그램 ANSYS에 의한 해석 및 실험을 수행하였으며, 그 결과 제어대상 진동형인 전후방향 1차 진동형의 진동수가 해석 및 실험의 경우 각각 15.675 및 15.6Hz로 확인되었다.

유압식 능동제어장치는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 제어장치, 유압서보장치 및 액추에이터의 3개 장치로 구성되어 있다. 정격유량은 0.01*l*/min이며, 보조질량 및 허용 스트로크(stroke)은 각각 10kg 및 ±5mm이다.

유압식 능동 질량구동장치는 유압공급장치의 공급압력, 유압서보밸브의 입력신호 크기 및 주파수에 따라 동특성이 변화한다. 따라서 유압식 능동 질량구동장치를 이용한 구조물 진동의 능동제어서는 반드시 이의 동특성을 파악하여 선형성 및 시간지연의 정도를 조사해야한다. 동특성 파악을 위해

공급압력 100kgf/cm²에서 실험을 수행하였으며, 실험에서는 유압서보제어기의 입력전압 및 주파수 변화에 따른 보조질량 변위 출력전압을 계측하였다. 실험결과 및 이를 곡선근사(curve fitting)한 결과로부터 산정된 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{u_A}{s^2 + c_A s + k_A} \qquad (22)$$

여기서 $c_A = 118$, $k_A = 43953$, $u_A = 17799$

4.2 시스템 구성 및 모델링

유압식 능동 질량구동장치는 4장에서 파악한 동특성에서 알 수 있듯이 입력신호의 주파수에 따라 출력전압의 크기 및 위상이 변화한다. 이로 인한 시간지연 등의 영향을 보상하기 위해 본 연구에서는 유압식 능동 질량구동장치의 동특성을 구조물의 운동방정식과 결합시킨다. 따라서 제작한 시험 구조물의 동특성 해석 및 실험으로부터 이의 전후진동을 1자유도계로 모델링한 구조물 운동방정식, 유압식 능동 질량구동장치 및 필터의 전달함수로부터 전체계를 아날로그 회로로 Fig. 6과 같이 모델링하였다. 여기에서 필터는 계측한 상태량으로부터 적분 또는 미분하여 원하는 상태량을 산정하는 과정에서 원하지 않는 주파수성분이 포함되어 증폭되는 것을 방지하기 위해 2차 Butterworth 대역통과 필터를 설계·사용하였다. 필터의 중심 주파수는 10Hz이고, 대역 폭은 15Hz이며, 이 필터의 전달함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{9.425 \times 10^1 s - 4.547 \times 10^{-13}}{s^2 + 9.425 \times 10^1 s + 3.948 \times 10^3} \qquad (23)$$

4.3 제어 알고리듬의 적용 및 고찰

시험 구조물 진동의 능동제어 성능검증시험을 위해서 한국기계연구원에서 보유하고 있는 6 자유도 대형진동대에 제작한 구조물의 하판을 고정하고, 진동대에 정현기진신호를 입력하여 구조물을 가진하였다. Fig. 7은 시험모습을 보여주고 있으며, 6 자유도 대형진동대 위에는 구조물이, 구조물 상부에는 진동 제어용 액추에이터가 설치되어 있다. 진동대는 기진입력신호 주파수의 정수배 주파수 성분들을 포함한 운동을 한다.

검증시험은 진동대의 기진입력신호 주파수를 5Hz부터 15Hz까지 0.5Hz 또는 1.0Hz 단위로 변경하면서 수행되었다. A/D & D/A 보드의 성능, 컴퓨터의 연산처리속도 및 시간지연의 영향등을 고려하여 A/D 채널간의 샘플링 주파수는 50,000Hz로, triggered scanning 주파수는 500Hz로 설정하여 유압서보제어 신호를 2msec 간격으로 출력되도록 하였다. 따라서 제어 알고리듬 상의 모든 연산은 2msec안에 수행되며, 이는 시험 구조물의 주 관심 진동형 고유주기의 약 1/30에 해당한다.

시험결과로서 진동대 정현기진 입력주파수에 따른 구조물 진동 제어 전·후의 최대가속도를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8로부터 구조물의 공진구역인 14Hz근처에서 능동제어시스템이 확실하게 작동함을 확인할 수 있으며, 제어후에는 관심주파수영역에서 매우 평탄한 주파수 특성을 볼 수 있다. 공진주파수 부근에서 진동 가속도레벨이 약 5m/sec²에서 약 0.7m/sec²로 감소함을 확인할 수 있다. 특히 진동대 정현기진 입력주파수가 14Hz일때 제어전과 후에 구조물에서 계측된 가속도와 보조질량의 변위를 Fig. 9에 보였으며, 이로부터 제어효과가 제어시작후 약 0.2초안에 나타남을 알 수 있다. 보조질량의 운동은 구조물의 응답이 감소함에 따라 같은 경향으로 감소한다.

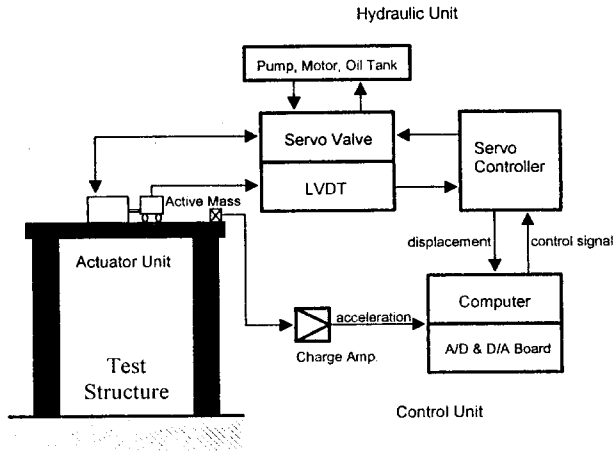


Fig. 5 Schematic Diagram of the Hydraulic Active Control System

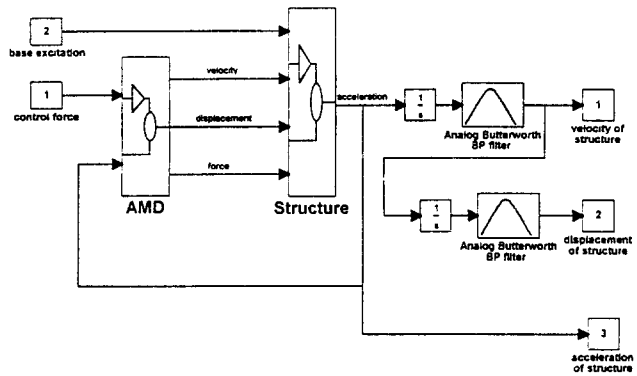


Fig. 6 Mathematical Modelling of the Active Control System

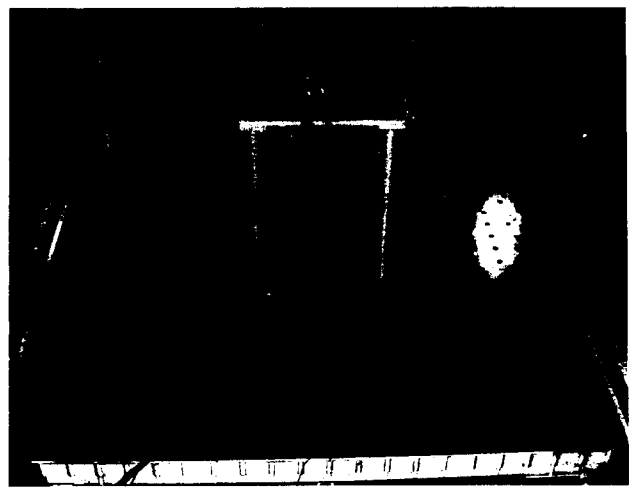


Fig. 7 Experimental Set-up

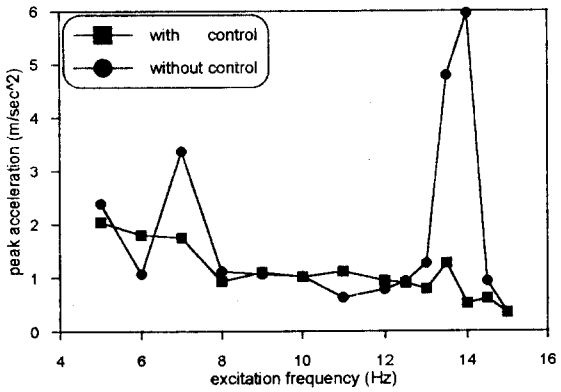


Fig. 8 Performance Test Result of the Active Control System Using Proposed Control Algorithm

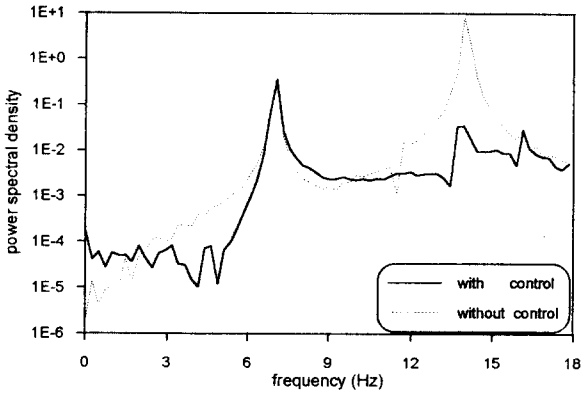


Fig. 10 Acceleration Spectrum of the Controlled Test Structure Using Proposed Control Algorithm (Excitation Frequency = 7Hz)

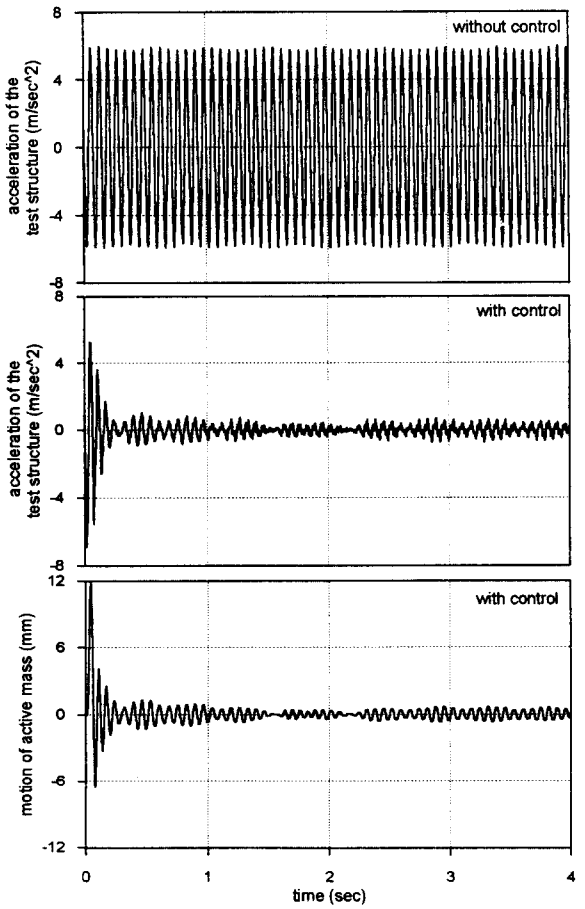


Fig. 9 Time Response of the Controlled Test Structure and Active Mass Driver Using Proposed Control Algorithm (Excitation Frequency = 14Hz)

입력기진주파수가 7Hz일때 제어전 가속도가 큰 이유는 진동대 운동이 입력기진주파수의 정수배에 해당하는 주파수 성분을 포함하고 있기 때문이며 이를 확인하기위해 Fig. 10은 입력기진주파수 7Hz에서의 제어전·후 진동응답에 대한 스펙트럼 분석결과를 보여준다. 이로부터 입력기진주파수 7Hz의 배수인 14Hz가 구조물의 공진구역에 있기 때문에 높은 레벨의 응답이 나타나고 있음을 확인할 수 있으며, 제어후에는 이 성분이 제어되어 진동응답이 낮게 나타남을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 수행된 연구결과를 요약·정리하면 다음과 같다.

1) 구조물 진동제어의 실제적용면에서 많은 경우 가속도 계측이 속도 또는 변위계측보다 더 용이하며, 가속도를 수치적분하여 구한 변위 또는 속도는 계산시의 오차 및 계측시의 배경잡음의 증폭등으로 인하여 부정확해 질 수 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위해 가속도가 포함된 순간최적제어 알고리듬을 개발하였다. 개발된 가속도가 포함된 순간최적제어 알고리듬은 가속도-속도-변위 되먹임이며 계측한 상태량만으로 제어가 가능하다. 또한 순간최적제어 알고리듬이므로 기반기진력을 받는 구조물 진동제어에 유용하게 적용될 수 있다.

2) 주파수에 따라 변경되는 시간지연의 영향을 효과적으로 보상하기 위해 능동제어시스템 구성요소인 유압식 능동질량구동장치 및 필터등의 동특성을 파악하고 이를 시스템 모델링에 포함시켜 제어이득을 산정하였다.

3) 구조물 진동제어용 유압식 능동 제어장치 구성하고, 제안한 제어 알고리듬을 적용한 성능시험을 수행하여 구조물의 약 2%에 해당하는 보조질량의 관성력으로 공진점 근처에서 구조물의 진동 가속도레벨을 약 1/6수준까지 감소시키는 효과를 확인하였다.

후 기

본 연구는 과학기술처 출연(연) 과제로 삼성중공업(주)과 공동으로 수행한 "선체진동 능동제어시스템개발"의 일부분이다.

참 고 문 헌

[1] Reinhorn, A. M. and Manolis, G. D., "Recent Advances in Structural Control", *The Shock and Vibration Digest*, Vol. 21, No. 1, 1989, pp. 3-8

[2] Soong, T. T., *Active Structural Control: Theory and Practice*, Longman Scientific & Technical, New York, N.Y., 1990

[3] Chung, L. L., Lin, T. T., Reinhorn, A. M., and Soong, T. T., "Experiments on Active Control for Seismic Structures", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 114, No. 2, 1988, pp. 241-257

[4] Chung, L. L., Lin, R. C., Soong, T. T., and Reinhorn, A. M., "Experimental Study of Active Control for MDOF Seismic Structures", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 115, No. 8, 1989, pp. 1609-1627

[5] Kirk, D. E., *Optimal Control Theory: An Introduction*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1970

[6] Balas, M. J., "Feedback Control of Flexible Systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 23, No. 4, 1978, pp. 673-679

[7] Balas, M. J., "Active Control of Flexible Systems", *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 25, No. 3, 1978, pp. 415-436

[8] Meirovitch, L., *Dynamics and Control of Structures*, John Wiley and Sons, Inc., New York, N.Y., 1990

[9] Meirovitch, L. and Baruh, H., "Control of Self-Adjoint Distributed-Parameter Systems", *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 5, No. 1, 1981, pp. 60-66

[10] Yang, J. N., Akbarpour, A., and Ghaemmaghami, P., "New Optimal Control Algorithms for Structural Control", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 113, No. 9, 1987, pp. 1369-1386

[11] Yang, J. N., Long, F. X., and Wong, D., "Optimal Control of Nonlinear Structures", *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 55, 1988, pp. 931-938

[12] Yang, J. N., Li, Z., and Liu, S. C., "Instantaneous Optimal Control with Acceleration and Velocity Feedback", *Probabilistic Engineering Mechanics*, Vol. 6, Nos 3 and 4, 1991, pp. 204-211

[13] Yang, J. N., Li, Z., and Liu, S. C., "Stable Controllers for Instantaneous Optimal Control", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 118, No. 8, 1992, pp. 1612-1630

[14] Soong, T. T., Reinhorn, A. M., Wang, Y. P., and Lin, R. C., "Full-Scale Implementation of Active Control. I: Design and Simulation", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No. 11, 1991, pp. 3516-3536

[15] Fujita, T., Katsu, M., Miyano, H., and Takanashi, S., "Fundamental Study of Active-Passive Mass Damper Using XY-Motion Mechanism and Hydraulic Actuator for Vibration Control of Tall Buildings", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, Vol. 57, No. 543, 1991, pp. 3532-3539 (in Japanese)

[16] Fujita, T., Mizuta, M., Matsumoto, K., Kinoshita, M., Takanashi, S., and Miyano, H., "Large-Scale Model Experiment of a Hybrid Mass Damper with Convertible Active and Passive Modes for Vibration Control of Tall Buildings", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, Vol. 59, No. 557, 1993, pp. 36-43 (in Japanese)

[17] Fujita, T., Kamada, T., and Masaki, N., "Fundamental Study of Active Mass Damper Using Multistage Rudder Bearing and Hydraulic Actuator for Vibration Control of Tall Buildings(2nd Report, Excitation Tests for Experimental Model of Building with Mass Damper)", *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, Vol. 59, No. 558, 1993, pp. 71-77 (in Japanese)

[18] Sakamoto, M., Sakaki, K., and Kobori, T., "Active Structural Response Control System", *Mechatronics*, Vol. 2, No. 5, 1992, pp. 503-519

[19] Moon, S. J. and Chung, T. Y., "Development of Active Control System for Structural Vibration Using a Hydraulic Actuator", *Transaction of the Society of Naval Architecture of Korea*, Vol. 32, No. 1, 1995, pp. 94-102 (in Korean)

[20] Yang, J. N., Li, Z., and Vongchavalitkul, S., "Generalization of Optimal Control Theory : Linear and Nonlinear Control", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 120, No. 2, 1994, pp. 266-283

[21] Moon, S. J., "A Study on the Active Vibration Control of Large Structures", *Ph. D. Dissertation, Seoul National University*, 1995 (in Korean)