

적용형 뱅뱅 제어 알고리즘을 이용한 다자유도계의 진동 제어에 관한 연구

° 임채욱*, 정태영**, 문석준**

A study on the vibration control of a MDOF system using the adaptive bang-bang control algorithm

C.W.Lim, T.Y.Chung, S.J.Moon

ABSTRACT

Adaptive bang-bang control algorithm has been proposed by the authors to improve peak response reduction of building structures under unexpected large earthquake. At the previous research, control performance of the proposed algorithm was experimentally confirmed by using a 1-DOF test structure. As an extended research, performance tests on a multi-DOF model structure have been conducted to prove the usefulness of the adaptive bang-bang control algorithm using a hydraulic AMD. It is confirmed that the proposed adaptive bang-bang algorithm is applicable to suppress the vibration of multi-DOF structures subject to severe external excitations.

1. 서론

구조물의 능동 제어는 지난 이십여 년간 연구되어 여러 분야에 다양하게 적용되어 오고 있다. 국내에서도 최근 몇 년 사이에 이에 대한 연구가 시작되고 있는 단계이다(1). 능동 텐던(Active Tendon), 가변 강성 (Variable Stiffness), 능동 질량 감쇠기 (Active Mass Driver ; AMD)와 같은 여러 형태의 능동 제어 장치가 개발되어 실제 구조물의 진동 제어에 적용되었는데, 이 중에서 AMD 시스템이 가장 많이 활용되어지고 있다. 주로 채택되고 있는 제어 이론은 직접 속도 되먹임 제어, LQ 최적 제어와 같은 선형 제어 이론으로서, 이로부터 설계된 되먹임 제어는 고정된 되먹임 이득을 가지게 된다(2). 지진과 같은 과도한 기진력을 받는 구조물에 AMD를 설치하여 선형 제어 이론을 적용함에 있어 제일 문제가 되는 것은 외부 기진력의 크기의 다양성에 대한 적합성의 결여이다. 특히 강한 기진력의 경우에는 제어력에 포화가 일어나고 이 때의 제어력은 구조물의 응답에 대하여 선형 함수의 형

태가 아니다. 게다가 큰 에너지를 가지는 지진은 짧은 기간 동안에 일어나기 때문에 그 기간 동안 최대한의 성능으로 구조물 응답의 감소와 같은 제어 목적을 달성하기 위해서는 주어진 제어 시스템을 최대한 활용하는 것이 필요하다. 따라서 제어 시스템의 제어력 한계를 고려하여 최적의 제어력을 계산하는 포화제어(Saturation Control)에 관한 연구들이 최근에 많이 진행되고 있다.

Nagashima(3)등은 제어력과 보조 질량의 스트로크 한계를 동시에 고려하여 LQ 제어의 적용시에 정의되는 성능지수에서 시스템 상태에 대한 가중치 행렬과 제어력에 대한 가중치 행렬 모두를 상수가 아닌 변수로 두고 되먹임 게인 행렬을 이 변수의 함수로 두는 방법을 제안하였다. Mongkol(7,8)등은 뱅뱅 제어 알고리즘의 적용시에 시스템의 상태 공간의 원점 근처에서 발생하는 제어 채터링 문제를 방지하기 위해 뱅뱅 제어와 LQ 제어를 혼합한 방식인 LS(Linear Saturation) 제어를 주장하였는데, 이는 외부의 기진력의 크기에 따라 원하는 제어 성능을 얻기 위하여 최적의 선형 제어를 적용하는 영역의 선택이 불명확하다. Indrawan(9,10)등은 최소화하고자 하는 성능 지수를 정의함에 있어서 기존의 뱅뱅 제어 이론에서 선택한 성능 지수와는 달리 제어력을 적용하는 각 시간에서의 시스템 상태의

* 정희원 ·한국과학기술원 기계공학과 대학원
** 정희원 ·한국기계연구원 구조시스템 연구부

이차함수 형태로 정의하는 제어 방법을 주장하였고 이의 제어 성능을 수치 및 실험적으로 확인하였다. 그러나 이 두 방법은 제어력이 사각파 형태의 불연속적인 함수로 표현되어 있으며 또한 시스템의 상태 함수가 아니라 상호 상태(co-state)의 함수로 표현되는 단점을 가진다. Wu⁽¹¹⁾ 등은 Lyapunov 함수를 이용하여 뱅뱅 제어의 제어력을 시스템의 상태 함수로 표현하였고, 시스템의 상태 공간의 원점 근처에서 발생하는 제어 채터링 문제를 방지하기 위하여 사각파의 불연속적인 함수를 연속적인 함수로 표현하는 수정된 뱅뱅 제어 (Modified Bang-Bang Control) 이론을 제시하여 단층 및 3층의 모형 구조물에 유압식 능동 텐던 시스템을 적용하여 이의 제어 성능을 수치 및 실험적으로 확인하였다. 그러나 이를 위해서 새로운 설계 파라미터를 도입하였는데, 이의 값은 외부의 기진력의 크기에 따라 설계자가 적절히 잘 선정해 주어야 한다. 따라서 이는 외부 기진력의 크기를 미리 알 수 있을 경우에는 효과적이지만 지반 가속도의 주파수 성분 및 크기를 예측하기 어려운 지진 기진력에 대해 이를 적용할 시에는 제어기의 안정성에 대한 문제를 가지고 있다. Lim^(12,13) 등은 이의 문제점을 극복하기 위한 방법으로 새로운 설계 파라미터를 외부의 기진력의 크기에 따라 바꾸어주는 적응형 뱅뱅 제어 방법을 주장하였고, 단층 모형 구조물에 유압식 AMD를 적용하여 이의 제어 성능 및 제어기의 안정성을 수치실험 및 실험을 통하여 확인하였다.

본 연구는 이의 연장선상에서의 연구로서 적응형 뱅뱅 제어 방법을 지진을 받는 다자유도계 구조물에 적용하였다. 제어기의 설계 시에 실제적으로 진동모드의 수만큼 무한대의 차원을 갖는 모델을 사용할 수는 없으므로 가진이 가장 쉽게 되는 저차 모드만을 가지고 이를 설계한다. 지진은 여러 주파수의 성분을 가지므로 다자유도계의 구조물의 여러 모드를 동시에 가진할 수 있다. 따라서 실제 구조계에서는 제어기의 설계 시에 고려되지 않은 모드들이 제어력에 의해서 가진되어지는 제어넘침(control spillover) 현상이나 예상치 못했던 고차 모드 진동이 제어 귀환 신호에 흡입되어 엉뚱한 정보를 기초로 목표 모드를 제어하는 관측넘침(observation spillover)이 발생할 수 있다. 특히 관측 넘침이 발생하면 제어 성능을 저하시킬 뿐만 아니라, 제어넘침 현상과 결합하여 전체 시스템을 불안정하게 할 수도 있다. 특히 본 논문이 관심을 두는 뱅뱅 제어 방법은 사각파 형태의 제어력을 넘으로, 이로 인한 고차의 하모닉 성분이 가진되거나 이의 성분이 제어 귀환 신호에 흡입되어질 수도 있다. 따라서 다

자유도계의 구조물에 제안된 적응형 뱅뱅 제어 방법을 적용하여 이에 대한 제어 성능 및 전체 구조계의 안정성 등을 확인할 필요성이 있다. 이를 위하여 5층의 시험 구조물을 제작하고 이에 유압식 AMD 시스템을 장착하여 수치실험 및 실험을 통하여 제어 성능을 검증하였다.

2. 적응형 뱅뱅 제어 (Adaptive Bang-Bang Control)

2.1 수정된 뱅뱅 제어 (Modified Bang-Bang Control)⁽¹¹⁾

시스템이 선형이고 시불변이라고 가정하고 구조물-AMD의 운동 방정식을 상태 공간의 표현으로 나타내면 (1)식과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{b}u(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0 \quad (1)$$

여기서 \mathbf{x} 는 $n \times 1$ 크기를 가지는 상태 벡터이고 u 는 스칼라 제어력이다. \mathbf{A} 는 $n \times n$ 크기의 시스템 행렬이고 \mathbf{b} 는 $n \times 1$ 크기의 제어 입력 벡터이다.

다음의 시스템의 Lyapunov 함수의 시간 미분치를 최소화하는 최적의 제어력을 계산해 보자.

$$V(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T \mathbf{S} \mathbf{x} \quad (2)$$

여기서 행렬 \mathbf{S} 는 다음 (3)식의 Lyapunov 행렬 식의 해이고 대칭 행렬이며 양정 행렬이다.

$$\mathbf{A}^T \mathbf{S} + \mathbf{S} \mathbf{A} = -\mathbf{Q} \quad (3)$$

이 때의 제어력은 다음의 제한 조건에 의해 구속된다.

$$|u(t)| \leq u_{\max} \quad (4)$$

(4)식의 제어력 제한 조건하에서 (2)식의 Lyapunov 함수의 시간 미분치를 최소화하는 최적의 제어력은 다음과 같다.

$$u(t) = -u_{\max} \cdot \text{sgn}[\mathbf{b}^T \mathbf{S} \mathbf{x}(t)] \quad (5)$$

(5)식에 의해 주어지는 제어력은 시스템의 상태의 함수로 표현되기 때문에 뱅뱅 제어가 가지는 상호 상태(co-state)의 미분 방정식을 풀어야 되는 단점을 보완하지만, 시스템의 상태 공간의 원점 근처에서의 제어 채터링 문제점을 극복하지 못한다. 따라서 이를 극복하기 위하여 (5)식에서 제어력의 방향을 결정하는 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$v(t) = \mathbf{b}^T \mathbf{S} \mathbf{x}(t) \quad (6)$$

새로운 제어력 파형 결정 파라미터 α 를 도입하여 $\beta(t)$ 를 (7)식과 같이 정의를 하면

$$\beta(t) = [v^2(t) - \alpha^2] / \alpha^2 \quad (7)$$

$|v(t)|$ 는 (8)식과 같이 $\beta(t)$ 의 항으로 표시된다.

$$|v(t)| = \alpha \sqrt{1 + \beta(t)} \quad (8)$$

(8)식을 0 점 근처에서 $\beta(t)$ 에 대해 급수 전개를 하면 제어력은 (9)식과 같이 표현된다.

$$u(t) = -u_{\max} \cdot v(t) / |v(t)|$$

$$= -u_{\max} \cdot \frac{v(t)}{\alpha [1 + \frac{1}{2}\beta(t) - \frac{1}{8}\beta^2(t) + \frac{3}{16}\beta^3(t) - \frac{5}{128}\beta^4(t) + \dots]} \quad (9)$$

(9)식은 설계자가 α 를 잘 선택해 주면 제어력 항이 시스템 상태의 함수이기 때문에 시스템의 상태 공간의 원점 근처에서의 제어 채터링의 문제점을 극복할 수 있는 장점을 가진다. 그러나 이는 외부 기진력의 크기를 미리 알 수 있을 경우에는 효과

적이지만, 지반 가속도의 주파수 성분 및 크기를 예측하기 어려운 지진 기진력에 대해 이를 적용할 시에는 제어기의 안정성에 대한 문제를 가지고 있다.

2.2 적응형 뱅뱅 제어 (Adaptive Bang-Bang Control)^(12,13)

(8)식으로부터 α 는 전 제어되는 시간동안의 $|v(t)|$ 의 최대값에 제어력 파형 결정 무차원 파라미터 c 를 곱한 값으로 정의될 수 있다.

$$\alpha = c \cdot \max |v(t)| \quad (10)$$

우선 설계자가 (9)식에서 제어력 항의 $\beta(t)$ 의 차수를 결정하고, 차수에 따른 선정 범위 내의 c 의 값을 선정하여 외부 기진력의 크기를 예측하여 α 를 선정한다. 고정된 α 의 값에 대하여 외부의 기진력이 커질수록 $\beta(t)$ 는 1보다 큰 값을 가지는 경우가 생길 수 있다. 이로 인하여 급수 전개 시의 조건, $|\beta(t)| \leq 1$, 을 만족하지 못하므로 원하는 제어력 파형을 얻지 못함으로 인해 제어기의 안정성에 문제가 발생하게 된다. $c = 1$ 경우, 외부의 기진력이 설계치보다 더 커지면 α 를 $|v(t)|$ 로 바꾸어 주는 적응형 제어 방법을 적용하면, 선택된 $\beta(t)$ 의 차수에 상관없이 제어력은 최대의 값이 되고 제어력 방향은 보장되므로 제어기의 안정성이 보장된다. 따라서 시스템의 안정성과 제어 효과를 위해서 외부 기진력의 크기에 따라 α 의 값을 더 큰 값으로 바꾸어 주는 다음의 적응형 뱅뱅 제어 알고리즘을 제시한다. Fig.1에서 초기값 α_{init} 은 너무 작게 선정하면 초기의 약한 지진 신호에 대해 제어 채터링이 생길 수 있기 때문에 주의가 요구된다.

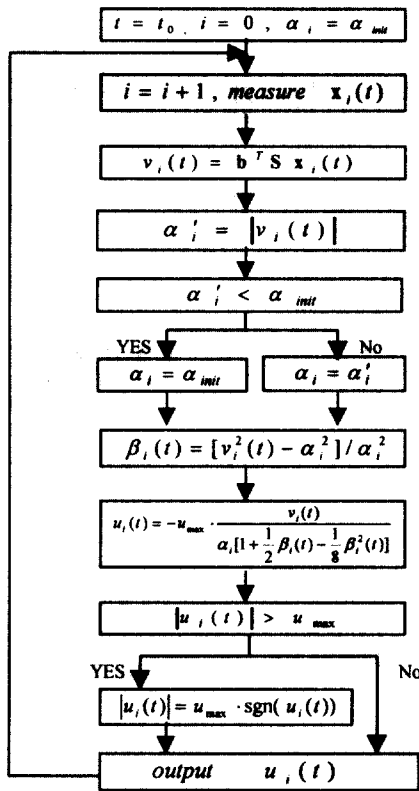


Fig.1 Flowchart of the proposed adaptive bang-bang control algorithm

3. 시험 구조물

시험 구조물은 5층의 구조물로서 각 층은 후판 구조물(가로×세로×높이 = 1200mm×800mm×50mm)이 4기둥으로 지지되어 있다. 각 기둥의 높이는 600mm이고 시험 구조물의 총 질량은 약 2,260kg이다. 시험 구조물의 하판은 한국기계연구원에서 보유하고 있는 대형 6자유도 진동대에 취부할 수 있도록 제작하였다.

3.1 동특성 실험

동특성 실험은 6 자유도 진동대에 시험 구조물을

고정시킨 후, random 파형을 이용하여 진동대를 수평 방향으로 가진시키면서 수행하였다. 시험 구조물의 각 층에는 가속도계를 부착하여 기판 가진에 의한 각 층에서의 응답을 계측하였다. 계측된 응답으로부터 각 층에서의 전달 함수를 구하여 고유

진동수, 감쇠비, 모드 형상 등을 추정하였다. 추정된 시험 구조물의 고유 진동수 및 감쇠비는 Table 1 과 같다. 감쇠비는 각 모드에서의 반동력점(half-power bandwidth)을 이용하여 추정하였다.

Table 1. Natural frequencies and damping ratio of the test structure

Mode	1	2	3	4	5
Natural frequency (Hz)	2.87	7.29	12.15	15.32	20.73
Damping ratio (%)	0.41	0.15	0.12	0.11	0.14
Effective mass (kg)	1685.9	250.6	34.3	41.1	9.8

3.2 시험 구조물의 모델링

시험 구조물을 전단 집중질량 모델로 가정할 경우, 동특성 실험을 통하여 추정되어진 고유 진동수, 감쇠비, 모드 형상 등을 통하여 다음의 운동 방정식의 행렬들을 추정하였다.

$$\mathbf{M}_s \ddot{\mathbf{x}}_s(t) + \mathbf{C}_s \dot{\mathbf{x}}_s(t) + \mathbf{K}_s \mathbf{x}_s(t) = \mathbf{f}_s \ddot{u}_g(t) \quad (11)$$

여기서 $\mathbf{x}_s(t) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T$ 로 지반에 대한 각 층의 상대 변위를 나타내며, \ddot{u}_g 는 지반 가속도를 나타낸다.

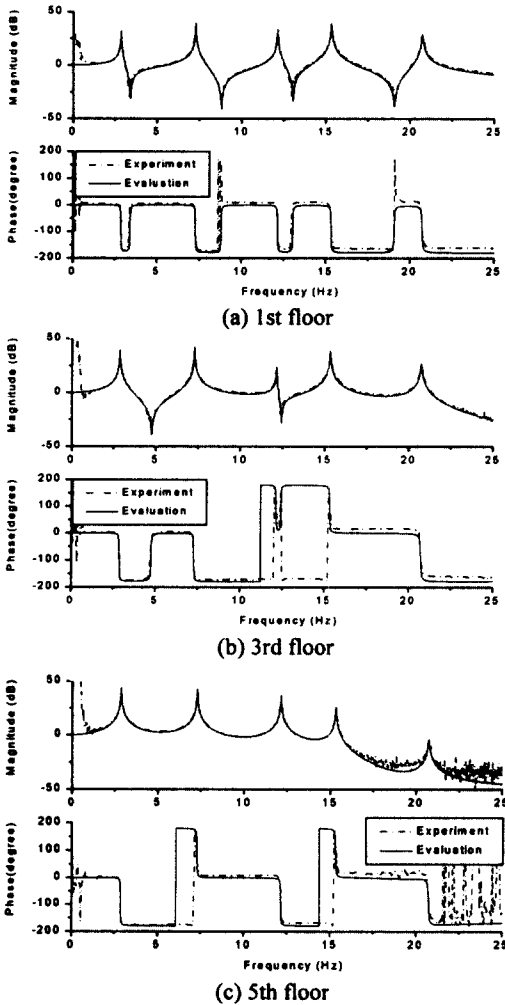


Fig.2 Transfer function of the test structure

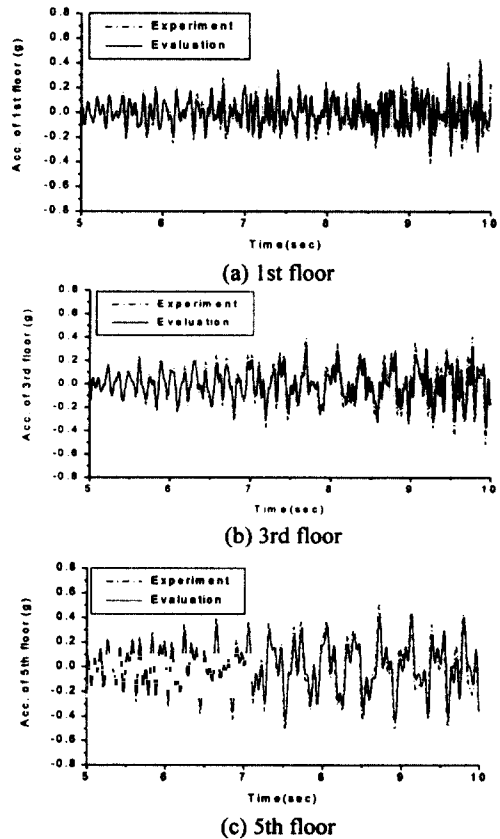


Fig.3 Time history of the test structure

시스템 모델링 결과를 실험 데이터와 비교하여 이를 검증해 보았다. Fig.2는 진동대 가진 입력에 대한 1,3,5 층의 전달 함수를 보여 주고 있다. 극점 (poles)과 영점(zeros)이 대체로 잘 일치함을 알 수 있다(몇몇 영점(zeros)에서 약간의 오차가 있으나 그 크기는 매우 작다). Fig.3은 random 파형의 진동대 가진 입력에 대하여 1,3,5,층의 가속도 응답의 시간 이력을 보여주고 있다. 모델링에 의한 결과가 실험 결과보다 약간 작은 것은 감쇠비를 추정함에 있어서 반동력점을 이용함으로써 실제보다 큰 값으로 추정되었기 때문이다.

4. 유압식 AMD를 이용한 검증 실험

4.1 시스템의 모델링

제안된 적응형 뱁뱁 제어 알고리즘의 진동 제어 효과를 확인하기 위하여 5 층 시험 구조물의 최상층에 소형 유압식 AMD를 설치하여 설계 시에 고려된 이상의 기진력을 주어 제시된 알고리즘의 유효성을 확인하였다. AMD의 보조 질량은 10kg으로, 이는 시험 구조물의 총 질량의 약 0.5%에 해당하고, 1차 모드의 등가 질량에 대하여는 약 0.6%에 해당한다. 유압식 AMD로의 명령 입력 전압 대 보조 질량 변위 출력 전압 사이의 동특성을 실험하여 이를 커브 피팅한 결과로부터 2 차함수로 근사화된 전달함수를 얻어 다음과 같이 AMD 시스템을 모델링하였다.



Fig. 4 Experimental set-up

$$\ddot{x}_a(t) + a_1 \dot{x}_a(t) + a_2 x_a(t) = -a_3 V_m(t) \quad (12)$$

여기서 x_a 는 AMD의 보조 질량 변위, V_m 은 명령 입력 전압, $a_1 = 183$ $a_2 = 51023$ $a_3 = 43141$ 이다.

(11)식과 (12)식을 연성하면 전체 시스템의 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = \mathbf{b}V_m(t) + \mathbf{f}\ddot{u}_g(t) \quad (13)$$

여기서 $\mathbf{x}(t) = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_a]^T$ 이다.

따라서 시험 구조물에 대한 입-출력 모델을 선형 시불변인 상태 공간으로 표현하면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) + \mathbf{B}V_m(t) + \mathbf{E}\ddot{u}_g(t) \quad (14)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{z}(t) + \mathbf{D}V_m(t) + \mathbf{F}\ddot{u}_g(t) \quad (15)$$

여기서 $\mathbf{z}(t) = [\mathbf{x}(t)^T \ \dot{\mathbf{x}}(t)^T]^T$ 로 시스템의 상태 벡터

이고, $\mathbf{y}(t) = [\ddot{x}_{a1} \ \ddot{x}_{a2} \ \ddot{x}_{a3} \ \ddot{x}_{a4} \ \ddot{x}_{a5} \ \ddot{x}_{am} \ x_a]^T$ 로 실시간 제어 시에 센서로부터 직접 측정되어지는 출력 벡터이며 이는 시험 구조물의 각층에서의 절대 가속도와 보조 질량의 절대 가속도 및 보조 질량의 변위를 나타낸다.

4.2 실험 시스템의 구성

실험적 검증을 위하여 Fig.4 처럼 한국 기계 연구원에서 보유하고 있는 6 자유도 대형 진동대에 제작된 시험 구조물의 하판을 고정하고, 진동대에 묘사된 지반 가속도 신호를 입력하여 시험 구조물을 가진하였다. 또한 시험 구조물의 최하층에 작용하는 전단력을 측정하기 위하여 load cell을 하판과 진동대 사이에 설치하였다.

A/D 채널 간의 샘플링 주파수는 160kHz로, 데이터 취득 주기는 500Hz로 설정하여 유압 서보 제어 신호를 2msec 간격으로 출력하도록 하였다. 따라서 제어 알고리즘 상의 모든 연산은 2msec 안에 수행된다.

제어 알고리즘을 적용하기 위해서는 시스템의 상태 벡터를 모두 측정 또는 추정해야 한다. 이를 위해서 시험 구조물의 1,3,5 층의 가속도계 센서의 신호를 이용하여 설계된 Kalman 필터로부터 시스템의 상태량을 추정하였다.

4.3 제어 알고리즘의 적용

본 논문에서는 설계 기준력으로 El Centro 지진을 고려하였고, 설계 기준의 PGA(Peak Ground Acceleration)값은 0.02g 인 경우를 고려하였다. 실험 시에 입력 전압의 한계는 $|V_{in}| \leq 7(V)$ 로 두었는데, 이는 유압식 AMD의 동특성 실험을 통하여 확인된 사용 한계치이다. 설계 파라미터 α 값을 임의로 정해 수치실험을 수행하여 제어되는 전 시간동안의 $v(t)$ 로부터 $1 \cdot \max|v(t)|$ 의 값과 이미 선정된 α 값이 같을 때까지 여러 차례 수치실험을 수행하였다. 수치실험으로부터 $\max|v(t)| = 6e-3$ 에 대하여 $\alpha = 6e-3$ 으로 정할 수 있었다. 따라서 이 값을 이용하여 α 값을 구조계의 응답에 따라 바꾸어 주는 제안된 적응형 제어 방법을 적용하여 제어 성능을 확인해 보았다.

먼저 PGA = 0.02g 인 El Centro 지진에 대하여 제어를 수행하였을 때, 선정된 설계 파라미터 α 값에 대하여 제어 채터링은 발생하지 않았고 시험 구조물의 응답을 줄임에 효과적임을 알 수 있었다. Fig.5는 실험에 의한 제어 전후의 시험 구조물의 5층의 절대 가속도와 최하층에서의 전단력의 시간 이력을 보여주고 있다. 이의 제어 성능을 LQG 제어 방법을 적용했을 경우와 비교해보면 Fig.6과 같다. 동일한 입력 전압 제한 조건하에서 구조물의 응답의 피크치 및 rms 값과 기저 전단력을 줄임에 있어서, 제안된 적응형 제어 방법은 LQG 제어 방법보다 더 효과적임을 확인할 수 있었다.

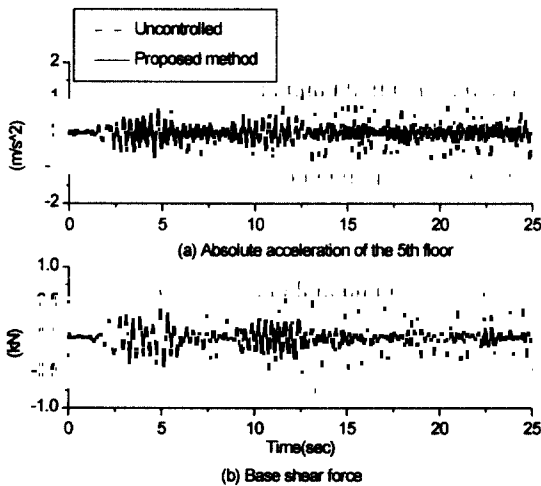


Fig.5 Time history of absolute acceleration and base shear force of the test structure at PGA=0.02g

다음으로 앞의 PGA = 0.02g 인 경우에 대하여 선정된 값을 $\alpha_{init} = 6e-3$ 로 두고 그 이상의 지반 가속도를 입력해 주었을 때에 제안된 적응형 뱅뱅 제어 방법에 의한 제어 성능을 살펴보았다. 제어 성능은 지반 가속도가 커질수록 조금씩 감소하지만 제어력 파형 결정 파라미터 α 의 값이 구조물의 응답이 커짐에 따라 더 큰 값으로 바뀔수록 인해 제어 역효과는 발생하지 않았으며 제어 성능 또한 확인할 수 있었다. Fig.7은 그 중에서 PGA = 0.05g 인 경우의 5층에서의 절대 가속도, 기저 전단력, 제어 입력 전압, α 값의 변화에 대한 시간 이력을 보여주고 있다.

따라서 다자유도계에 제어력 파형 결정 파라미터 α 의 값을 구조계의 응답에 따라 바꾸는 제안된 적응형 제어 방법의 적용은 설계자가 고려한 이상의 기진력보다 더 큰 경우에 대해서도 제어 시스템의 용량 안에서 제어기를 안정하게 작동시켜 원하는 제어 성능을 낼 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

수정된 뱅뱅 제어 이론의 실제 적용에 있어, 설계 기진력보다 더 큰 기진력이 발생했을 경우에는 선정된 제어력 파형 결정 파라미터 α 의 값이 구조계의 응답에 비해 너무 작게 되어 제어 역효과가 일어나 시스템을 불안정하게 할 수 있다. 이의 문제점을 극복하기 위하여 제안된 적응형 뱅뱅 제어 방법은 제어 기간 중 제어력 파형 결정 파라

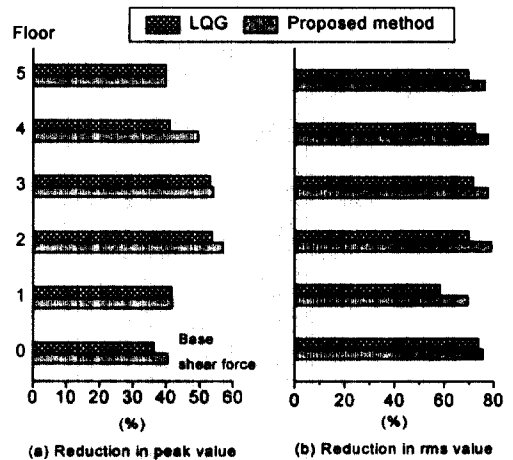


Fig.6 Comparison of control performance for absolute acceleration and base shear force of the test structure at PGA=0.02g

미터 α 의 값을 구조계의 응답에 따라 바꾸어 줌으로 제어기의 안정성을 보장할 수 있는 방법이다.

다자유도계의 구조물에 대해서도 제안된 적응형 뱅뱅 제어 방법의 유용성을 검증하기 위해서 5층의 시험 구조물을 제작하여 동특성 실험을 수행하였고, 구조물의 전체 질량의 약 0.5%에 해당하는 보조 질량을 갖는 유압식 AMD 시스템을 이용하여 설계 기준 기진력 이상의 큰 기진력에 대해서도 제어기와 시험 구조물의 안정성 및 제어 성능이 확보됨을 실험을 통하여 검증하였다. 따라서 제안된 적응형 뱅뱅 제어 방법은 1자유도계 뿐만 아니라 다자유도계에 대해서도 제어기 및 구조물의 안정성에 문제가 없이 적용 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국가 지정 연구실 사업으로 수행 중인

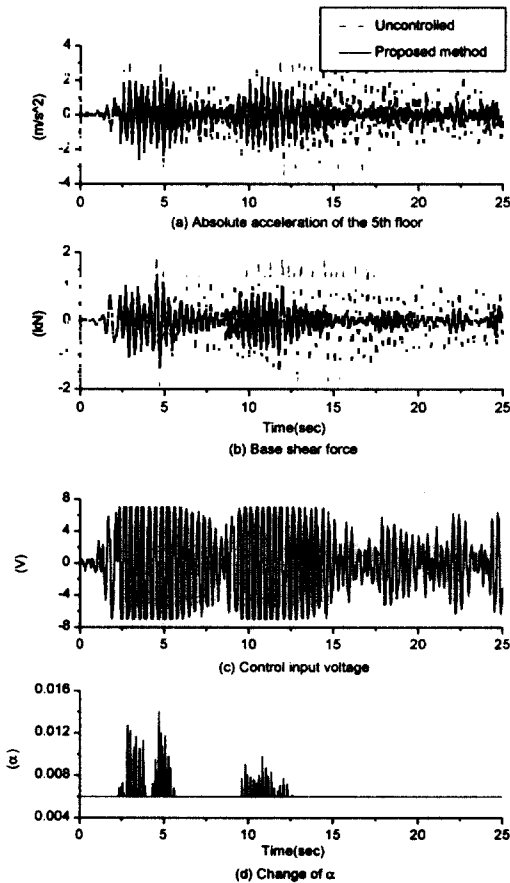


Fig.7 Control performance using the proposed method at PGA=0.05g

“제진 장치를 활용한 제진 설계 기술 개발” 과제와 건설 기술 연구 개발 사업으로 수행 중인 “고층 건축물의 풍 및 지진 진동 제어용 동흡진기 개발” 과제의 결과 중 일부이다.

참 고 문 헌

- [1] 문석준, 정태영, “가속도가 포함된 순간최적제어 알고리즘을 이용한 구조물 진동의 능동 제어”, 한국 소음 진동 공학회지 제 6 권 제 2 호, pp.215-224 (1996)
- [2] T.Y.Chung, S.J.Moon and S.M.Jang, “Active control on the structural vibration under base excitations using a linear oscillatory actuator”, Int.J.of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol.10, pp.203-214 (1999)
- [3] 고현무, 박관순, 박원석, “설계제한조건이 고려된 출력되먹임 최적제어에 의한 구조물 진동의 능동 제어”, 대한토목학회논문집, 15 권, 6 호, pp.1535-1544(1995)
- [4] 고현무, 박관순, 박원석, “복합형 질량 감쇠기의 운동거리를 고려한 능동제어시스템의 최적설계”, 한국지진공학회 춘계학술대회 논문집 pp.196-201(1999)
- [5] T.Kobori, N.Koshika, K.Yamada and Y.Ikeda, “Seismic-response-controlled structure with active mass drive system. Part1:design”, Earthquake Engng. Struct. Dyn. 20, pp 133-149 (1991)
- [6] I.Nagashima, and Y.Shinozaki, “Variable Gain Feedback control technique of active mass damper and its application to hybrid structural control”, Earthquake Engng. Struct. Dyn. Vol.26, pp.815-838 (1997)
- [7] B.Bhartia, Y.Fujino, and J.Mongkol, “Control algorithm for AMD with constraints”, Proc.1st World Conference on Structural Control, TP2, pp.70-78 (1994)
- [8] J.Mongkol, B.Bhartia, and Y.Fujino, “On Linear-Saturation(LS) control of buildings”, Earthquake Engng. Struct. Dyn. Vol.25, pp.1353-1371 (1996)
- [9] B.Indrawan and H.Higashihara, “Analytical study on a new power-efficient active control method”, Proc.2nd Int.Conf.on Motion and Vibration Control, Yokohama, pp.687-692 (1994)
- [10] B.Indrawan, T.Kobori, M.Sakamoto, N.Koshika, and S.Ohru, “Experimental verifcaion of Bounded-Force control method”, Earthquake Engng. Struct. Dyn. Vol.25, pp.179-193 (1996)
- [11] Z.Wu and T.T.Soong, “Modified Bang-Bang control law for structural control implementation”, J.Eng.Mech.,ASCE, Vol.122, pp.771-777 (1996)
- [12] 임채욱, “제어력 한계를 넘는 기진력에 대한 구조물의 진동 제어 알고리즘 적용 연구”, 공학 석사 학위 논문, 한국과학기술원 기계공학과 (2000.2)
- [13] 임채욱, 정태영, 문석준, 김광준, “과도 기진력을 받는 구조물의 진동 제어를 위한 포화 제어 이론의 적용”, 한국 소음 진동 공학회 추계 학술 대회 논문집, pp.188-193 (1999)