

# 과도한 기진력을 받는 다자유도계 구조물의 진동 제어를 위한 적응형 뱅뱅 제어 알고리즘의 유용성에 관한 연구

## A Study on the Applicability of Adaptive Bang-Bang Control Algorithm for the Vibration Control of Multi-DOF Structure under Unexpected Large Earthquakes

임 채 욱\*                      정 태 영\*\*                      문 석 준\*\*  
Lim, Chae Wook              Chung, Tae Young              Moon, Seok Jun

### 국문요약

구조물이 과도한 기진력을 받을 때에 구조물의 진동 제어를 위하여 적응형 뱅뱅 제어 알고리즘이 저자들에 의해서 제안된 바 있으며, 이 제어 알고리즘을 1자유도 계의 시험 구조물에 적용하여 제어 성능을 실험적으로 확인하였다. 본 논문은 이의 연장으로서 제안된 적응형 뱅뱅 제어 알고리즘을 최상층에 유압식 능동질량 감쇠기가 설치된 다자유도계의 시험 구조물에 적용하여 이의 유용성을 확인하였다. 이를 통하여 제안된 적응형 뱅뱅 제어 알고리즘은 제어기 및 전체 구조계의 안정성이 보장되는 가운데 과도한 외부의 기진력을 받는 다자유도계의 구조물의 진동을 제어함에 효과적임을 확인할 수 있었다.

**주요어** : 적응형 뱅뱅 제어, 다자유도계의 구조물, 유압식 능동 질량 감쇠기

### 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 active mass driver. It is confirmed that the proposed adaptive bang-bang control algorithm is applicable to suppress the vibration of multi-DOF structures subject to severe external excitations.

**Key words** : adaptive bang-bang control, multi-DOF structure, hydraulic active mass driver

## 1. 서 론

최근에 지진 하중을 받는 토목 및 건축 구조물 진동의 능동 제어에 관한 연구들이 큰 관심을 받고 있다. 지진 기진력을 받는 건물을 보호하기 위하여 많은 제어 전략들이 개발되고 있다. 국내에서도 최근 몇 년 사이에 이에 대한 연구가 시작되고 있는 단계이다.<sup>(1)-(4)</sup> 강진인 경우에 능동 제어계의 설계에 있어서 직면하는 가장 어려운 문제 중에 하나가 구동기의 포화이다. 모든 제어 장치는 제어력, 토크, 유량, 스트로크 등 각각이 발휘할 수 있는 한계를 가지고 있다. 강진에 의해서 구조물에 생기는 관성 하중은 구동기의 용량보다 훨씬 크다. 예를 들어, 능동 질량 감쇠기(active mass driver, AMD)는 약진이나 중진 또는 강한 바람에 의해서 야기되는 건물의 진동을 줄이기 위해서 주로 사용되었다. 그러나 이는 강진에 의해서 야기되는 진동을 제어하는데 필요한 제어력을 얻기는 어렵기 때문에, 이 경우에는 건물의 진동을 제어할 때는 유효하지 못하다. 따라서 구동기의 포화가 고려되지 않은 제어 알고리즘은 실제적이지 못하다. 왜냐하면 지반 운동의 크기와 이것이 건물에 미치는 영향은 예측하기 어려우며, 또한 구동기의 포화를 피하기 위해서 제어 계인을 작게

설계한다면 외력이 크지 않은 경우에 대해서는 제어 성능이 좋지 않기 때문이다. 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.

이런 관점에서 제어계의 성능 한계를 고려하여 최적의 제어력을 계산하는 포화제어(saturation control)에 관한 연구들이 최근에 많이 진행되었다. Nagashima<sup>(5)</sup> 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 계인 행렬을 이 변수의 함수로 두는 방법을 제안하였다. Mongkol<sup>(6),(7)</sup> 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 주장하였고, Indrawan<sup>(8),(9)</sup> 등은 최소화 하고자 하는 성능 지수를 정의함에 있어서 기존의 뱅뱅 제어 이론에서 선택한 성능 지수와는 달리 제어력을 적용하는 각 시간에서의 시스템 상태의 이차함수 형태로 정의하는 제어 방법을 주장하고 이의 제어 성능을 수치 및 실험적으로 확인하였다. 그러나 이 두 방법은 사각파 형태의 제어력에 대한 구동기의 실제 추종 성능을 고려하지 않았고

\* 한국과학기술원 기계공학과 대학원(대표저자 : lchw@kimm.re.kr)

\*\* 정회원 · 한국기계연구원 구조시스템 연구부

본 논문에 대한 토의를 2001년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

제어력이 시스템의 상태 함수가 아니라 상호상태(co-state)의 함수로 표현되는 단점을 가진다. Wu<sup>(10)</sup> 등은 Lyapunov 함수를 이용하여 뱅뱅 제어의 제어력을 시스템의 상태 함수로 표현하였고, 사각파 형태의 제어력에 대한 구동기의 실제 추종 성능 및 제어 채터링 문제를 방지하기 위하여 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 이는 외부 기진력의 크기를 미리 알 수 있을 경우에는 효과적이지만 지진과 같이 예측하기 어려운 과도한 기진력에 대해 이를 적용할 시에는 제어기의 안정성에 대한 문제를 가지고 있다. Lim<sup>(11)(13)</sup> 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 구조물이 갖는 진동모드 수만큼의 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 가진되는 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 포화 제어 이론은 사각파 형태의 제어력을 내는 뱅뱅 제어를 기본으로 하고 있기 때문에, 이로 인한 고차의 하모닉 성분이 가진되거나 이의 성분이 제어 귀환 신호에 흡입되어질 수도 있다. 따라서 다자유도계의 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)

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

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t), x(0) = x_0 \quad (1)$$

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

수정된 뱅뱅 제어에서의 제어력은 다음의 시스템의 Lyapunov 함수의 시간 미분치를 최소화하는 최적의 제어력을 이용한다.

$$V = x^T(t)Sx(t) \quad (2)$$

여기서 행렬  $S$ 는 다음 식 (3)의 Lyapunov 행렬 식의 해이고 대칭 행렬이며 양정 행렬이다.

$$A^T S + SA = -Q \quad (3)$$

이때의 제어력은 다음의 제한 조건에 의해 구속된다.

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

식 (4)의 제어력 제한 조건하에서 식 (2)의 Lyapunov 함수의 시간 미분치를 최소화하는 최적의 제어력은 다음과 같다.<sup>(10),(14)</sup>

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

식 (5)에 의해 주어지는 제어력은 시스템의 상태함수로 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 식 (5)에서 제어력의 방향을 결정하는 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$v(t) = b^T Sx(t) \quad (6)$$

새로운 설계 요소인 제어력 파형 결정 파라미터  $\alpha$ 를 도입하여  $\beta(t)$ 를 식 (7)과 같이 정의하면

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

이로부터  $|v(t)|$ 는 식 (8)과 같이  $\alpha$ 와  $\beta(t)$ 의 함수로 표시된다.

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

식 (8)을 0점 근처에서  $\beta(t)$ 에 대해 급수 전개를 하면 제어력은 식 (9)와 같이 표현된다.<sup>(10)</sup>

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

여기서  $\beta(t)$ 는 수학적으로 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$|\beta(t)| \leq 1 \quad (10)$$

식 (9)는 설계자가  $\alpha$ 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 효과적이지만, 지반 가속도의 주파수 성분 및 크기를 예측하기 어려운 지진 기진력에 대해 이를 적용할 시에는 제어기의 안정성에 대한 문제가 발생할 수 있다.

### 2.2 적응형 뱅뱅 제어(adaptive bang-bang control)

식 (8)로부터  $\alpha$ 는 전 제어되는 시간동안의  $|v(t)|$ 의 최대 값에 제어력 파형 결정 무차원 파라미터  $c$ 를 곱한 값으로 정의될 수 있다.

$$\alpha = c \cdot \max |v(t)| \tag{11}$$

우선 설계자가 식 (9)에서 제어력 항의  $\beta(t)$ 의 차수를 결정하고, 차수에 따른 선정 범위 내의  $c$ 의 값을 선정하여 외부 기진력의 크기를 예측하여  $\alpha$ 를 선정한다.<sup>(13)</sup> 여기서 선정된  $\alpha$ 의 값을 고정된 값으로 사용하게 되면, 외부의 기진력이 커질수록 구조계의 응답이 커져  $\beta(t)$ 는 1보다 큰 값을 가지는 경우가 생길 수 있음을 식 (7)을 통하여 알 수 있다.  $\beta(t)$ 가 1보다 커지면 급수 전개 시의 조건식 (10)을 만족하지 못하므로 원하는 사각파 형태의 제어력 파형을 보장할 수 없고, 경우에 따라서는 제어력의 방향이 반대가 되어 제어기의 성능뿐만 아니라 제어기의 안정성에 문제가 발생하게 된다.<sup>(13)</sup> 외부의 기진력이 설계치보다 더 커지는 경우에  $\alpha$ 를 실시간적으로 구조계의 응답에 따라 더 큰 값으로 바꾸어 주는 적응형 제어 방법을 적용하면, 이 때의 제어력은 최대 값이 되어 좋은 제어 성능을 낼 수 있고, 제어력 방향 또한 보장되므로 제어기의 안정성이 보장된다. 따라서 시스템의 안정성과 제어 효과를 위해서 외부 기진력의 크기에 따라  $\alpha$ 의 값을 더 큰 값으로 바꾸어 주는 다음의 적응형 뱅뱅 제어 알고리즘을 제시한다. Fig. 1에서는  $c=1$ 로 두고, 제어력 항에서  $\beta(t)$ 의 차수를 2차로 둔 경우를 보여주고 있는데, 이 경우에는 구조계의 응답이 작을 때는  $\beta(t)$ 의 값이 -1에 가까운 값을 가지고, 구조계의 응답이 큰 경우에는  $\beta(t)$ 의 값은 0을 가지게 된다. 이 때 초기값  $\alpha_{init}$ 을 너무 작게 선정하면 약한 지진 신호에 대해 제어 채터링이 생길 수 있기 때문에 주의가 요구된다. 그러나  $\alpha_{init}$ 의 값은 수치실험적으로 선정할 수 있으므로 구조계의 응답이 작을 때에 발생하는 제어 채터링 문제는 극복할 수 있다.

### 3. 시험 구조물

시험 구조물은 5층의 구조물로서 각 층은 후판 구조물(가로×세로×높이=1200mm×800mm×50mm, 중량 377kg)이 4기둥으로 지지되어 있다. 각 기둥의 높이는 600mm이고 시험 구조물의 총 질량은 약 2,260kg이다. 시험 구조물의 하판은 한국기계연구원에서 보유하고 있는 대형 6자유도 진동대

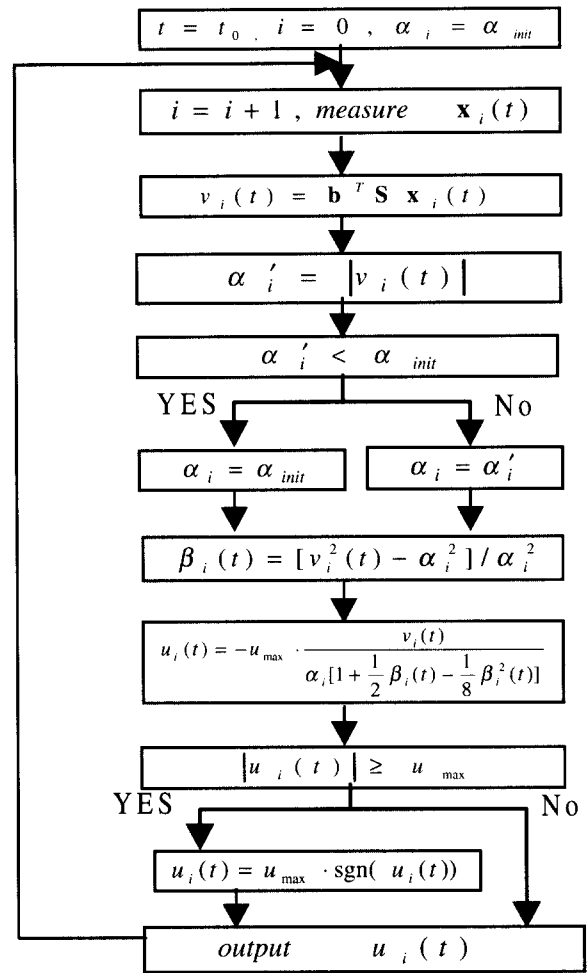


Fig. 1 Flowchart of the proposed adaptive bang-bang control algorithm

에 취부할 수 있도록 제작하였다.

### 3.1 동특성 실험

동특성 실험은 6자유도 진동대에 시험 구조물을 고정시킨 후, 랜덤 파형을 이용하여 진동대를 수평 방향으로 가진시키면서 수행하였다. 시험 구조물의 각 층에는 가속도계를 부착하여 기반 가진에 의한 각 층에서의 응답을 계속하였다. 계측된 응답으로부터 각 층에서의 전달 함수를 구하여 고유 진동수, 감쇠비, 모드 형상 등을 추정하였다. 추정된 시험 구조물의 고유 진동수 및 감쇠비는 Table 1과 같다. 감쇠비는 각 모드에서의 반동력점(half-power bandwidth)을 이용하여 추정하였다.

Table 1 Natural frequencies and damping ratios 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.

$$M_s \ddot{x}_s(t) + C_s \dot{x}_s(t) + K_s x_s(t) = f_s \ddot{u}_g \quad (12)$$

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

시스템 모델링 결과를 실험 데이터와 비교하여 이를 검증

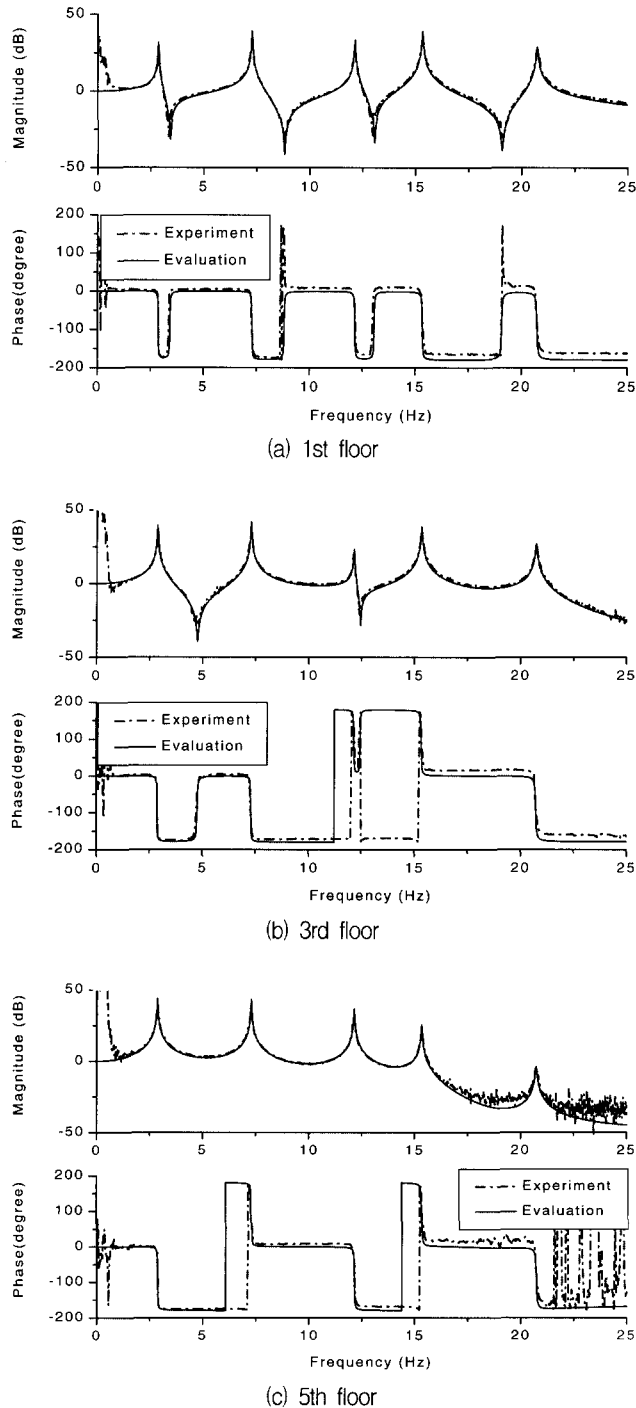


Fig. 2 Transfer function of the test structure

해 보았다. Fig. 2는 진동대 랜덤 가진 입력에 대한 1,3,5층의 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 랜덤 파형의 진동대 가진 입력에 대하여 1,3,5층의 가속도 응답의 시간 이력을 보여주고 있다. 모델링에 의한 결과가 실험 결과보다 약간 작은 것은 감쇠비가 실제보다 큰 값으로 추정되었기 때문인 것으로 사료된다.

## 4. 유압식 AMD를 이용한 검증 실험

### 4.1 시스템의 모델링

제안된 적응형 뱁뱁 제어 알고리즘의 진동 제어 효과를 확인하기 위하여 5층 시험 구조물의 최상층에 소형 유압식 AMD를 설치하여 설계 시에 고려된 기진력 및 그 이상의 기진력을 주어 제시된 알고리즘의 유효성을 확인하였다.

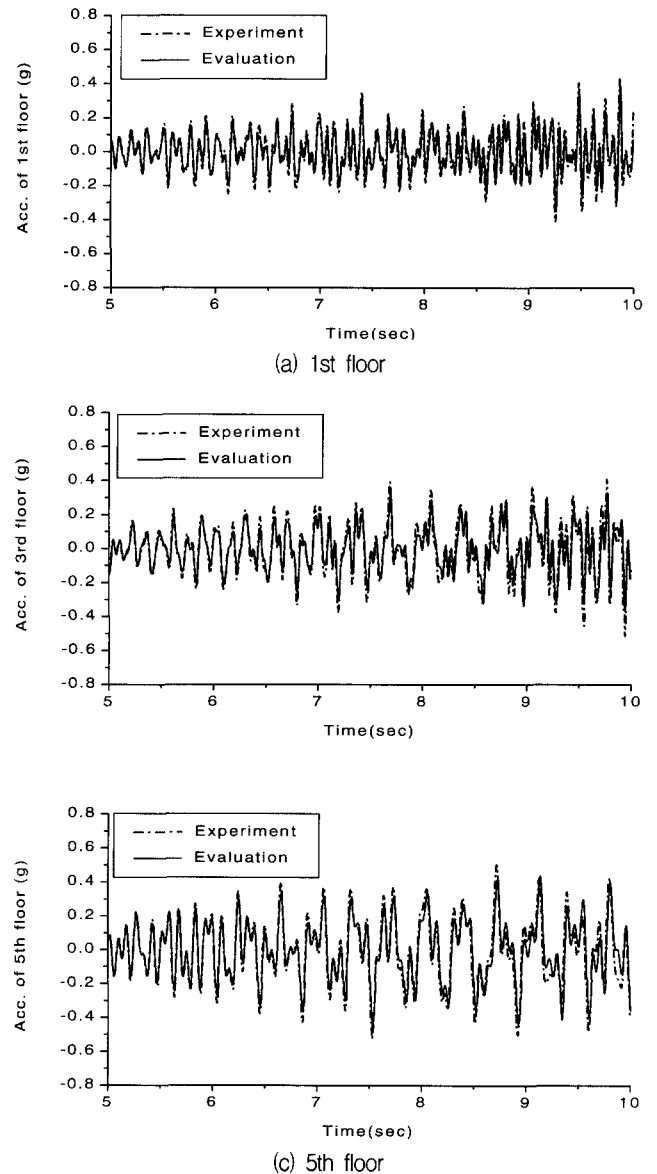


Fig. 3 Time history of the test structure

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 2차함수로 근사화된 전달함수를 얻어 다음과 같이 AMD 시스템을 모델링하였다.<sup>(11)</sup>

$$\ddot{x}_a(t) + a_1 \dot{x}_a(t) + a_2 x_a(t) = -a_3 V_{in}(t) \quad (13)$$

여기서  $x_a$ 는 AMD의 보조 질량 변위,  $V_{in}$ 은 명령 입력 전압이며,  $a_1=183$ ,  $a_2=51023$ ,  $a_3=43141$ 이다.

식 (12)와 식 (13)을 연성하면 전체 시스템의 운동 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = \mathbf{b}V_{in}(t) + \mathbf{f}\ddot{u}_g(t) \quad (14)$$

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

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

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{z}(t) + \mathbf{B}V_{in}(t) + \mathbf{E}\ddot{u}_g(t) \quad (15)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{z}(t) + \mathbf{D}V_{in}(t) + \mathbf{F}\ddot{u}_g(t) \quad (16)$$

여기서  $\mathbf{z}=[\mathbf{x}^T \ \dot{\mathbf{x}}^T]^T$ 로 시스템의 상태 벡터이고,  $\mathbf{y}=[\ddot{x}_{a1} \ \ddot{x}_{a2} \ \ddot{x}_{a3} \ \ddot{x}_{a4} \ \ddot{x}_{a5} \ \ddot{x}_{am} \ x_a]^T$ 로 실시간 제어 시에 센서로부터 직접 측정되어지는 출력 벡터이며, 이는 시험 구조물의 각 층에서의 절대 가속도와 보조 질량의 절대 가속도 및 보조 질량의 변위를 나타낸다.

## 4.2 실험 시스템 구성

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

A/D채널 간의 샘플링 주파수는 160kHz로, 데이터 취득 주기는 500Hz로 설정하여 유압 서보 제어 신호를 2msec 간격으로 출력하도록 하였다. 따라서 제어 알고리즘 상의 모든 연산은 2msec안에 수행된다. 이는 시험 구조물의 1차 진동형 고유주기의 약 1/170에 해당되며 5차 진동형 고유주기의 약 1/25에 해당된다.

제어 알고리즘을 적용하기 위해서는 시스템의 상태 벡터(변위 및 속도)를 모두 측정해야 한다. 그러나 실제 실험 시에 센서를 통해 직접 측정할 것은 시험 구조물의 각층에서의 절대 가속도와 보조 질량의 변위 및 이의 절대 가속도이다. 그러므로 측정된 물리량으로부터 시스템의 상태량을 추정하는 Kalman-Bucy 필터를 설계하였다. 본 실험에서는 시험

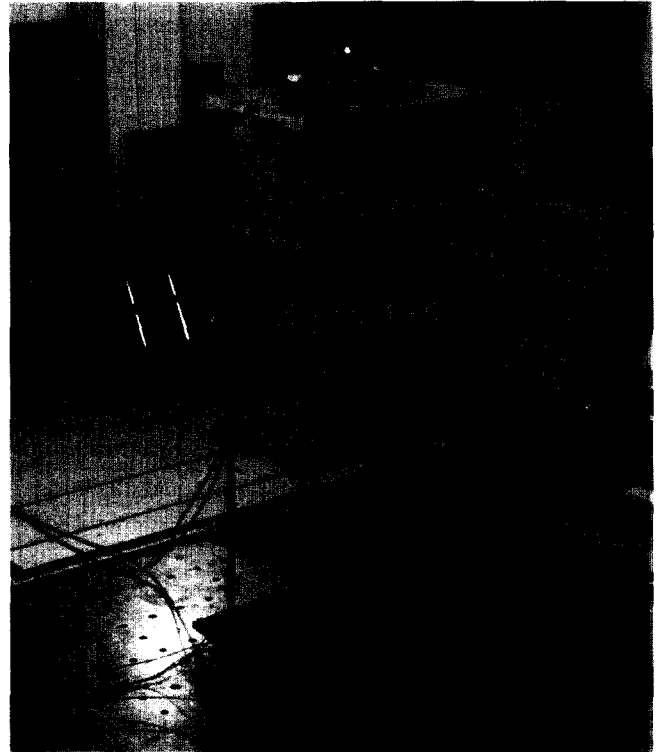


Fig. 4 Experimental set-up

구조물의 1,3,5층의 가속도계 센서의 신호를 이용하여 이를 설계하였다.

또한 입력 전압의 한계는  $|V_{in}| \leq 7V$ 로 두었는데, 이는 유압식 AMD의 동특성 실험을 통하여 확인된 사용 한계치였다. 유압식 AMD의 동특성 실험 결과 입력 전압이 7V이하 일 때 20Hz이하에서는 입력 전압 대 보조 질량 변위의 전달 함수의 크기 및 위상이 거의 일치하였으나, 전달 함수의 피크치가 생기는 주파수는 입력 전압이 커질수록 낮아짐을 확인하였는데, 입력 전압이 7V인 경우에는 21Hz에서 피크치가 생겼다. 이는 시험 구조물의 5차 모드와 거의 일치하는 주파수이므로 실제 제어 실험 시에는 제어 입력에서 21Hz 성분을 걸러주는 노치필터를 설계하였다. 따라서 제어기는 시험 구조물의 1차에서 4차까지의 모드만을 제어한다.

## 4.3 제어 알고리즘의 적용

우선 설계 기준 기진력으로 PGA(peak ground acceleration) = 0.02g인 El Centro NS지진(NS, 1940)을 고려하였고, 설계 파라미터  $\alpha$ 의 값을 임의로 정해 수치실험을 수행하여 제어되는 전 시간 동안의  $v(t)$ 로부터  $\alpha = \max|v(t)|$ 의 값과 이미 설정한 값과 같을 때까지 여러 차례 수치실험을 수행하였다. Fig. 1에서 제안된 방법의 적용 시에 가장 중요한 것은 초기값  $\alpha_{init}$ 의 선정이다. 이의 값을 너무 작게 선정하면 구조계의 응답이 작을 때에 제어 채터링이 생길 수 있기 때문이다. PGA=0.02g인 경우에 대해 수치실험으로부터  $\max|v(t)|=0.006$ 이었고, 이 값으로부터  $\alpha_{init}=0.006$ 으로 정하였다. 이 경우에 구조계의 응답이 작은 영역인 상태 공간의 원점 근처에서 제어 채터링 현상은 발생하지 않았으며 설계 기준 기진력에

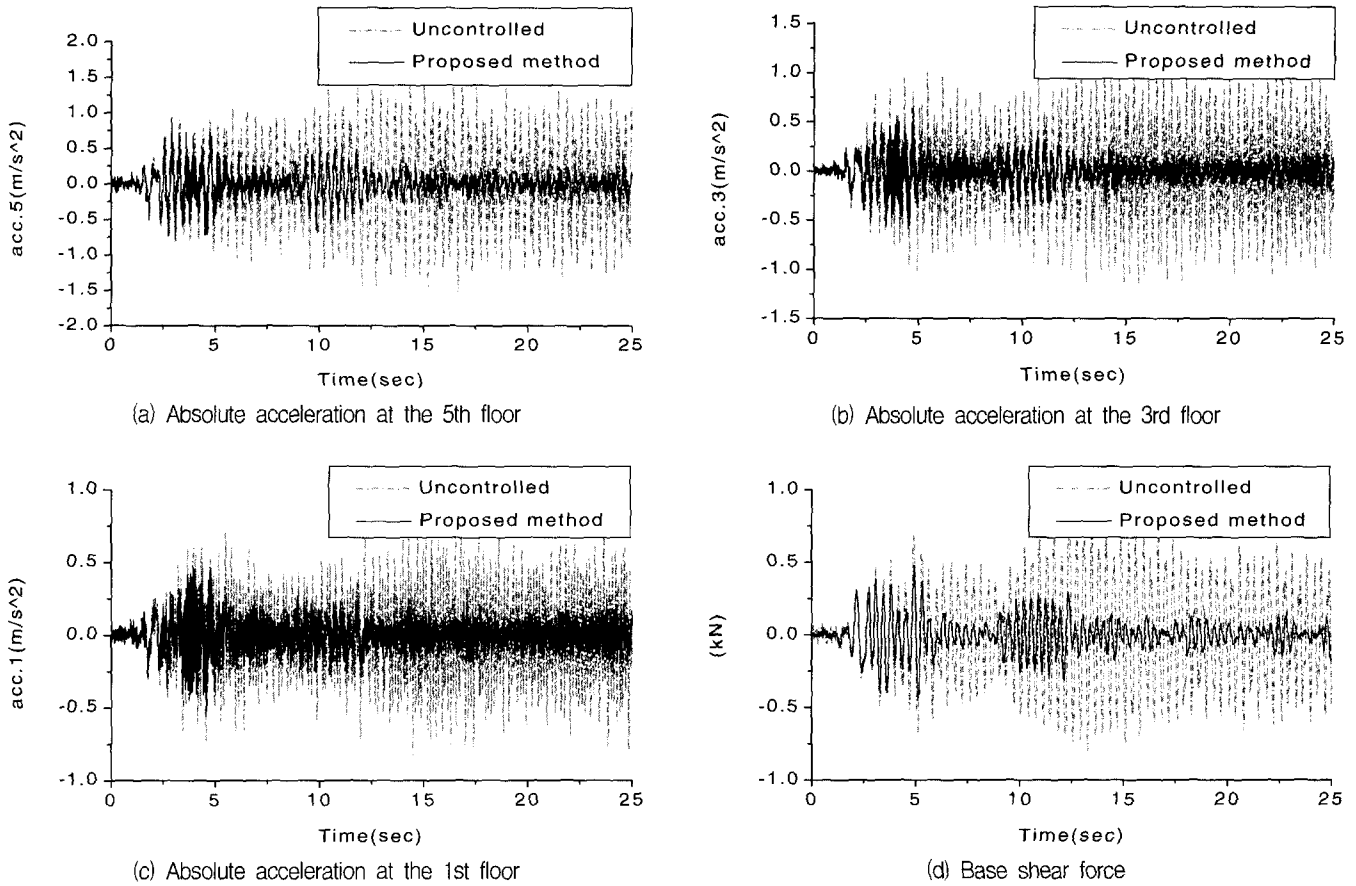


Fig. 5 Time history of absolute acceleration and base shear force of the test structure applying the proposed adaptive bang-bang control under El Centro earthquake at PGA=0.02g : experiment

대해 좋은 제어 성능을 얻을 수 있었다. 따라서  $\alpha_{ini}=0.006$ 의 값을 이용하였고,  $\alpha$ 의 값을 구조계의 응답에 따라 바꾸어 주는 제안된 적응형 뱅뱅 제어 방법을 적용하여 5층 시험 구조물에 대한 제어 성능을 확인해 보았다.

수치실험에서 확인된 것처럼 실험을 통해서도 PGA=0.02g 인 El Centro 지진에 대하여 제어성능 실험을 수행하였을 때, 선정된 설계 파라미터 값에 대하여 제어 채터링은 발생하지 않았고 시험 구조물의 응답을 줄임에 효과적임을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 시험 구조물의 1,3,5층에서의 절대 가속도와 최하층에서의 기저 전단력의 시간 이력을 제어 전·후와 비교하여 보여주고 있다. 이의 제어 성능을 선형 최적 제어 이론인 LQG 제어 방법을 적용했을 경우와 비교해 보았다(Fig. 6). 동일한 입력 전압 제한 조건하에서 구조물 응답의 피크치 및 rms값과 기저 전단력을 줄임에 있어서, 제안된 적응형 제어 방법은 LQG 제어 방법보다 더 효과적임을 확인할 수 있었다.

다음으로 PGA의 값이 0.02g보다 더 큰 El Centro 지진과 Hachinohe 지진(NS, 1968)의 지반가속도를 입력해 주었을 때 제안된 적응형 뱅뱅 제어 방법에 의한 제어 성능을 살펴 보았다. 이 경우에  $\alpha_{ini}$ 의 값은 PGA=0.02g인 El Centro 지진인 경우에 대하여 앞에서 선정된 값( $\alpha_{ini}=0.006$ )을 이용하였다. 제어 성능은 지반 가속도가 커질수록 조금씩 감소하지만 제어력 파형 결정 파라미터  $\alpha$ 의 값이 구조물의 응답이 커짐에 따라 더 큰 값으로 바뀔수록 인해 제어 역효과는

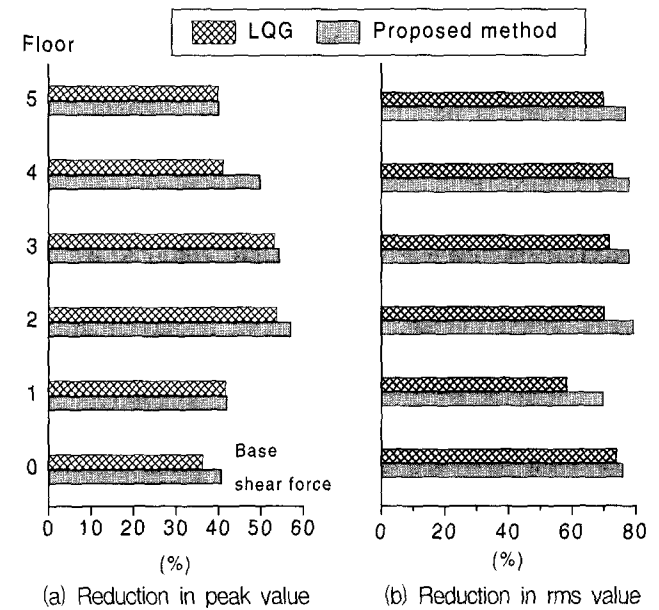
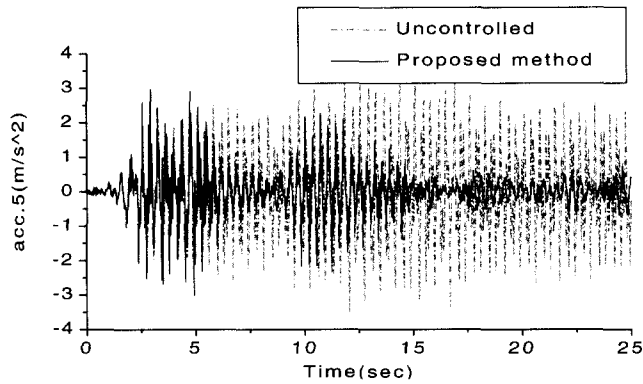
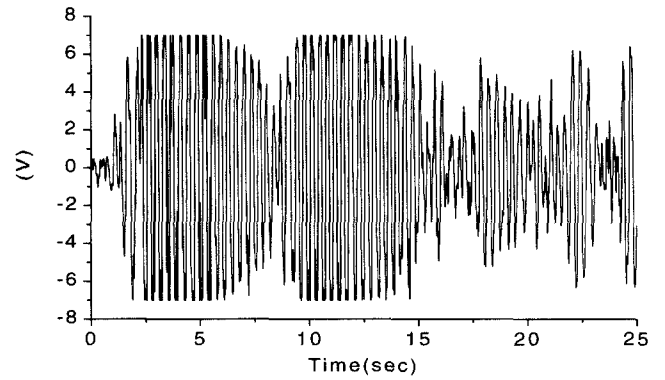


Fig. 6 Comparison of control performance between LQG and the proposed adaptive bang-bang control : absolute acceleration and base shear force of the test structure under El Centro earthquake at PGA = 0.02g : experiment

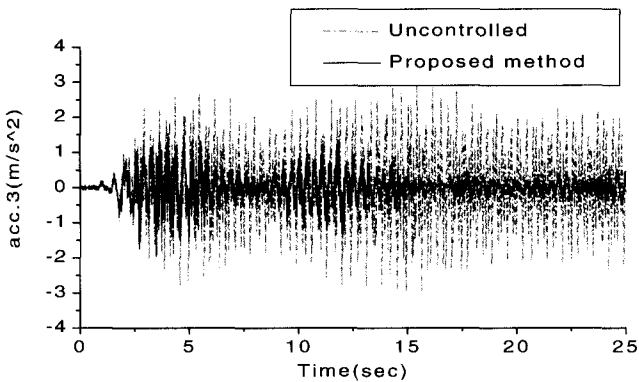
발생하지 않음을 확인하였고, 이로 인해 구조계의 안정성이 보장되는 가운데 시험 구조물의 진동을 줄이는 제어 성능을 확인할 수 있었다. 그 중에서 Fig. 7과 Fig. 9는 각각 PGA= 0.05g



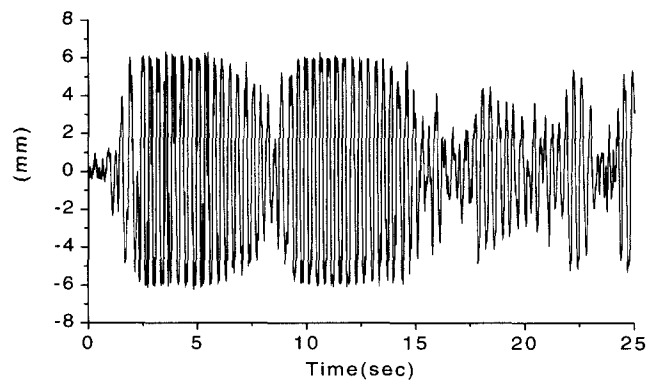
(a) Absolute acceleration at the 5th floor



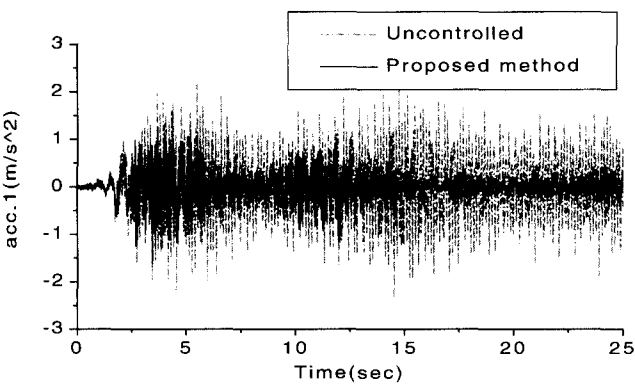
(a) Control input voltage



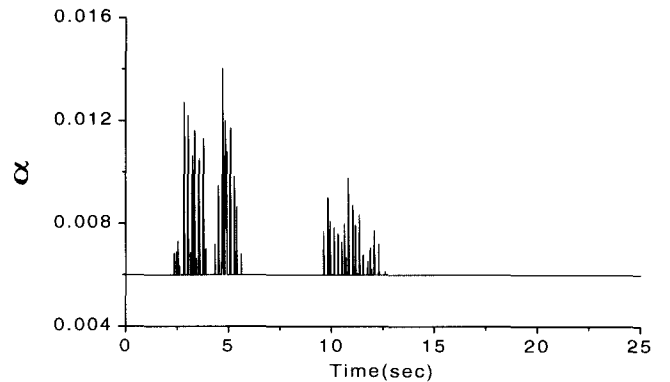
(b) Absolute acceleration at the 3rd floor



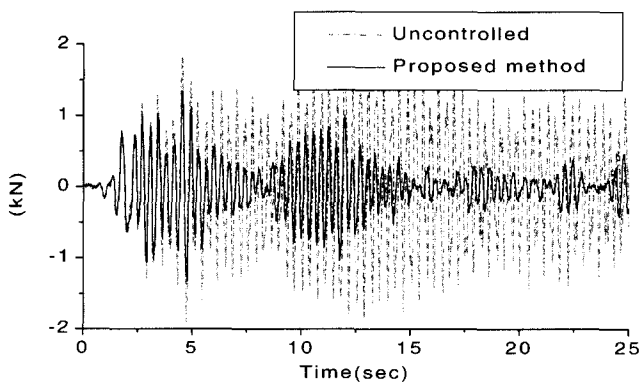
(b) Displacement of auxiliary mass



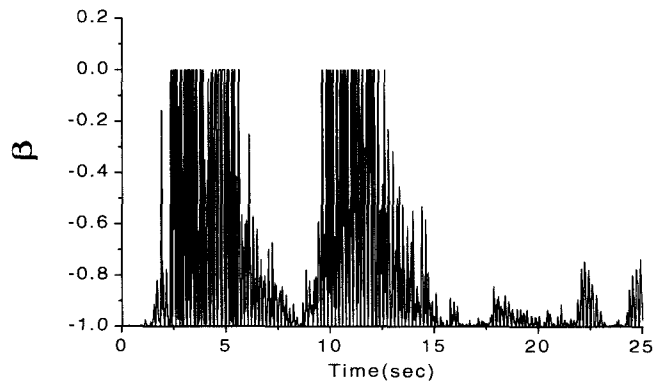
(c) Absolute acceleration at the 1st floor



(c) Change of  $\alpha$



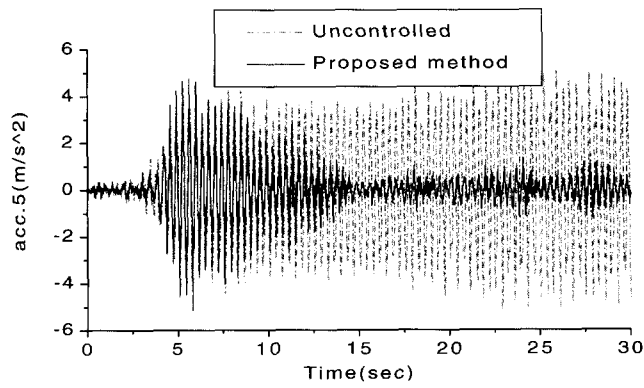
(d) Base shear force



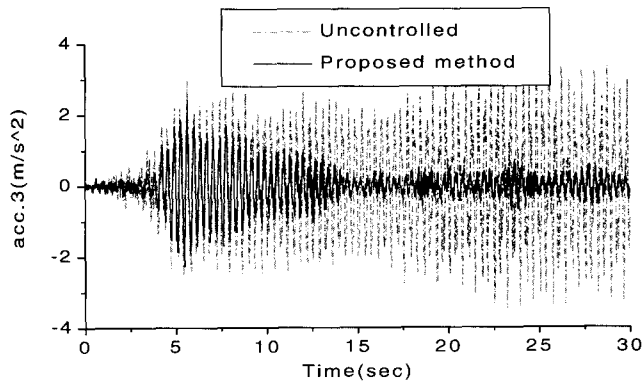
(d) The value of  $\beta$  according to  $\alpha$

Fig. 7 Time history of absolute acceleration and base shear force of the test structure applying the proposed adaptive bang-bang control under El Centro earthquake at PGA = 0.05g : experiment

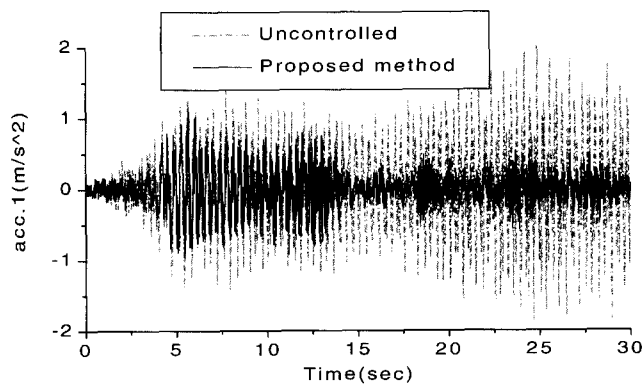
Fig. 8 Time history of control input voltage, displacement of auxiliary mass, changed value of  $\alpha$ , and the value of  $\beta$  applying the proposed adaptive bang-bang control under El Centro earthquake at PGA = 0.05g : experiment



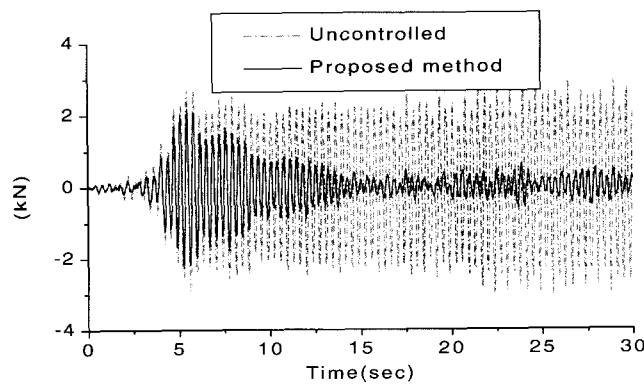
(a) Absolute acceleration at the 5th floor



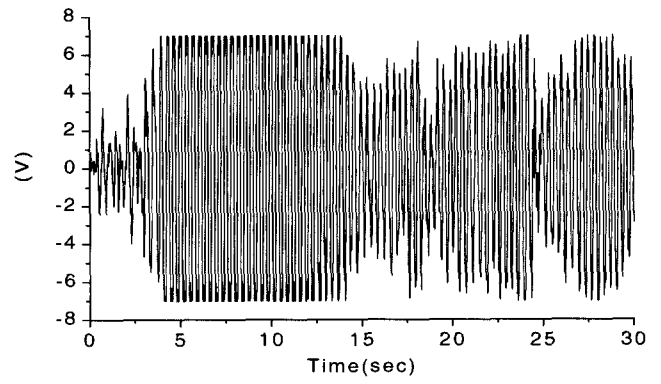
(b) Absolute acceleration at the 3rd floor



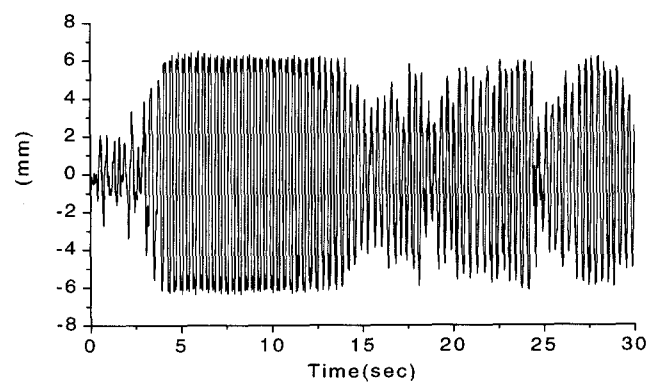
(c) Absolute acceleration at the 1st floor



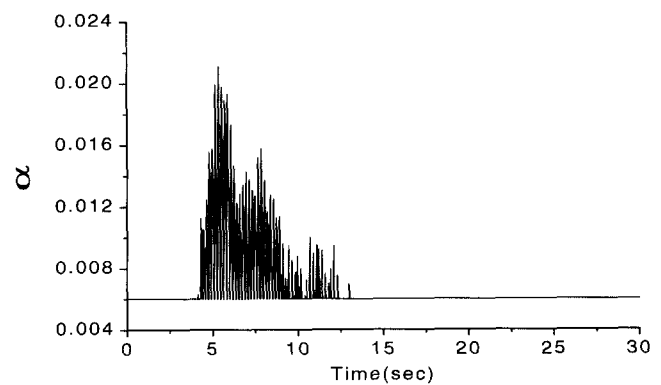
(d) Base shear force



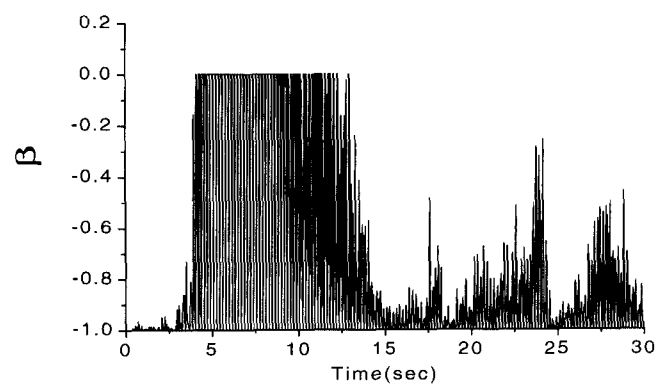
(a) Control input voltage



(b) Displacement of auxiliary mass



(c) Change of  $\alpha$



(d) The value of  $\beta$  according to  $\alpha$

Fig. 9 Time history of absolute acceleration and base shear force of the test structure applying the proposed adaptive bang-bang control under Hachinohe earthquake at PGA=0.04g : experiment

Fig. 10 Time history of control input voltage, displacement of auxiliary mass, changed value of  $\alpha$ , and the value of  $\beta$  applying the proposed adaptive bang-bang control under Hachinohe earthquake at PGA = 0.04g : experiment



## 참고 문헌

인 El Centro 지진과 PGA = 0.04g인 Hachinohe 지진인 경우에 시험 구조물의 1,3,5층에서의 절대 가속도, 기저 전단력을 보여주고 있으며, Fig. 8과 Fig. 10은 각각 이 경우의 제어 입력 전압, AMD의 보조 질량 변위,  $\alpha$  및  $\beta$  값의 시간에 대한 변화를 보여 주고 있다. 구조계의 응답이 작을 때에  $\beta$ 의 값은 -1에 가까운 값을 가지므로 이때의 제어 입력 전압의 값은 작은 값이 된다. 그러므로 구조계의 응답이 작을 때에 뱅뱅 제어의 적용 시에 큰 제어 입력에 의해 발생하는 제어 채터링 문제를 극복할 수 있음을 확인할 수 있다.

또한 설계 기준 이상의 큰 기진력으로 인해 구조계의 응답이 커지는 경우에  $\beta$ 의 값은 0이 되므로  $|\beta(t)| \leq 1$ 의 조건을 항상 만족하며, 이때의 제어 입력 전압은 최대값을 가지게 되며 제어기의 안정성이 보장됨을 확인할 수 있다. Fig. 7과 Fig. 9에서 PGA = 0.05g인 El Centro 지진인 경우는 약 2.5~5초 사이에서, PGA = 0.04g인 Hachinohe 지진인 경우에는 약 5~6초 사이에서 AMD가 설치된 시험 구조물의 5층에서의 가속도 응답이 비제어시 보다 약간 커지는 것은 제어 입력이 사각파에 가까운 값을 가지므로 홀수 차수의 하모닉 성분이 가진되기 때문에 나타난 현상이다.

## 5. 결 론

수정된 뱅뱅 제어 이론의 실제 적용에 있어, 설계 기진력보다 더 큰 기진력이 발생했을 경우에는 선정된 제어력 파형 결정 파라미터  $\alpha$ 의 값이 구조계의 응답에 비해 너무 작게 되어 제어 역효과가 일어나 구조계를 불안정하게 할 수 있다. 이의 문제점을 극복하기 위하여 제어 기간 중 제어력 파형 결정 파라미터  $\alpha$ 의 값을 구조계의 응답에 따라 실시간적으로 바꾸어 줌으로 제어기의 안정성을 보장하는 적응형 뱅뱅 제어 방법을 제안하였다.

본 논문에서는 다자유도계의 구조물에 대하여 제안된 적응형 뱅뱅 제어 방법의 유용성을 검증하기 위해 총 질량이 약 2,260kg인 5층의 시험 구조물을 제작하여 동특성 실험을 수행하였고, 구조물의 전체 질량의 약 0.5%에 해당하는 보조 질량을 갖는 유압식 AMD를 이용하여 설계 기준 기진력 및 그 이상의 큰 기진력에 대해서도 제어기와 시험 구조물의 안정성 및 제어 성능이 확보됨을 실험을 통하여 검증하였다. 이 실험을 통하여 제안된 적응형 뱅뱅 제어 방법은 제어 대상 모드인 1,2,3,4차 성분을 모두 제어함에 효과적이며 넘침효과는 발생하지 않음을 확인하였고, 또한 동일한 입력 전압 제한 조건하에서 구조물 응답의 최대값 및 rms값과 기저 전단력을 줄임에 있어서, 제안된 적응형 제어 방법은 선형 최적 제어 이론인 LQG 제어 방법보다 더 효과적임을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 국가 지정 연구실 사업으로 수행 중인 "제진 장치를 활용한 제진 설계 기술 개발 과제"의 결과 중 일부이다.

1. 문석준, 정태영, "가속도가 포함된 순간최적제어 알고리즘을 이용한 구조물 진동의 능동 제어", 한국소음진동공학회지, 제6권, 제2호, 1996, pp. 215-224.
2. Chung, T. Y., Moon, S. J., and Jang, S. M., "Active control on the structural vibration under base excitations using a linear oscillatory actuator," *Int. J. of Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol. 10, 1999, pp. 203-214.
3. 고현무, 박관순, 박원석, "설계제한조건이 고려된 출력되먹임 최적제어에 의한 구조물 진동의 능동 제어", 대한토목학회논문집, 제15권, 제6호, 1995, pp. 1535-1544.
4. 고현무, 박관순, 박원석, " $H_\infty$  제어 이론과 bilinear transform을 적용한 불확실한 구조계의 능동적 진동 제어", 대한토목학회논문집, 제19권, 제2호, 1999, pp. 241-252.
5. Nagashima, I. and Shinozaki, Y., "Variable gain feedback control technique of active mass damper and its application to hybrid structural control," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 26, 1997, pp. 815-838.
6. Bhartia, B., Fujino, Y., and Mongkol, J., "Control algorithm for AMD with constraints," *Proc. 1st World Conference on Structural Control*, TP2, 1994, pp. 70-78.
7. Mongkol, J., Bhartia, B., and Fujino, Y., "On linear-saturation(LS) control of buildings," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 25, 1996, pp. 1353-1371.
8. Indrawan B. and Higashihara, H., "Analytical study on a new power-efficient active control method," *Proc. 2nd Int. Conf. on Motion and Vibration Control*, Yokohama, 1994, pp. 687-692.
9. Indrawan, B., Kobori, T., Sakamoto, M., Koshika, N., and Ohri, S., "Experimental verification of bounded-force control method," *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 25, 1996, pp. 179-193.
10. Wu, Z. and Soong, T. T., "Modified bang-bang control law for structural control implementation," *J. Eng. Mech.*, ASCE, Vol. 122, 1996, pp. 771-777.
11. 임채욱, "제어력 한계를 넘는 기진력에 대한 구조물의 진동 제어 알고리즘 적용 연구", 공학석사학위논문, 한국과학기술원 기계공학과, 2000.2.
12. 임채욱, 정태영, 문석준, 김광준, "과도 기진력을 받는 구조물의 진동 제어를 위한 포화 제어 이론의 적용", 한국소음진동공학회 추계학술대회논문집, 1999, pp. 188-193.
13. 임채욱, 정태영, 문석준, 김광준, "구동기의 성능 한계를 고려한 구조물의 진동 제어 알고리즘의 적용에 관한 연구", 한국지진공학회논문집, 제4권, 제2호 (통권 제14호), 2000, pp. 25-36.
14. Preumont, A., "Spillover alleviation for nonlinear active control of vibration," *J. Guidance Control*, Vol. 11, 1988, pp. 124-130.