

구동기의 성능 한계를 고려한 구조물의 진동 제어 알고리즘의 적용에 관한 연구

A Study on the Applicability of Structural Vibration Control Algorithm Considering the Performance Limit of Actuator

임 채 욱* 정 태 영** 문 석 준** 김 광 준***
Lim, Chae Wook Chung, Tae Young Moon, Seok Jun Kim, Kwang Joon

국문요약

본 논문에서는 구조물이 과도한 기진력을 받을 때에 구조물의 진동 제어를 위하여 제안되어진 여러가지 포화 제어 알고리즘들의 유용성을 실제적인 관점에서 살펴보았다. 제안된 포화 제어 알고리즘 중에서 수정된 뱅뱅 제어 알고리즘이 매우 유용한 것임을 확인할 수 있었으나, 이는 제어력 파형 결정 파라미터의 어떤 범위 내에서만 효과적이며 그 범위를 넘어서는 경우에 있어서는 제어를 불안정하게 할 수 있음을 확인할 수 있었다. 따라서 수정된 뱅뱅 제어 알고리즘의 적용 시에 과도한 외부 기진력에 대하여 제어기의 안정적인 작동에 의한 구조물의 진동 제어 효과를 얻기 위해서, 제어력 파형 결정 파라미터를 과도 기진력의 크기에 따라 변화시키는 적응형의 방법을 제안하였고, 이의 유용성을 수치실험 및 유압식 질량 감쇠기를 장착한 축소 구조물 검증 실험을 통하여 확인하였다.

주요어 : 포화 제어, 적응형 뱅뱅 제어, 제어력 파형 결정 파라미터, 유압식 능동 질량 감쇠기

ABSTRACT

Several saturation control algorithms have been proposed as more effective ones than linear control algorithms for the control of the structural vibration when the peak response occurs during the first few cycles like the building structures under earthquakes. In this paper, the usefulness of existing saturation control algorithms for the structural vibration control under severe exciting loads is investigated from the practical point of view. As a result the modified bang-bang control algorithm is confirmed to be very effective. However, it is effective only under the certain range of the parameter determining the wave shape of control force and can be unstable outside of the range. Based on this investigation, an adaptive method which can be stably applied to the structural vibration control under severe external excitations is proposed using the modified bang-bang control algorithm. Its usefulness is shown through numerical simulation and experiments using a test structure with an active mass driver.

Key words : saturation control, adaptive bang-bang control, parameter determining the wave shape of control force, hydraulic active mass driver

1. 서 론

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⁾⁻⁽⁴⁾ 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

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 정회원 · 한국기계연구원 구조시스템 연구부

*** 한국과학기술원 기계공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2000년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

제어는 고정된 되먹임 이득을 가지게 된다.⁽⁵⁾ 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 형태가 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⁽⁶⁾ 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 주장하였고, Indrawan^{(9),(10)} 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 제어력이 시스템의 상태 함수가 아니라 상호상태(co-state)의 함수로 표현되는 단점을 가진다. Wu⁽¹¹⁾ 등은 Lyapunov 함수를 이용하여 뱅뱅 제어의 제어력을 시스템의 상태 함수로 표현하였고, 사각파 형태의 제어력에 대한 구동기의 실제 추종 성

능 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.

본 연구에서는 먼저 지금까지 포화 제어 이론으로 제안된 뱅뱅 제어, 준최적 뱅뱅 제어와 수정된 뱅뱅 제어 이론에 대하여 살펴보고, Wu 등이 제안한 수정된 뱅뱅 제어 이론을 설계자가 고려한 이상의 과도한 외부 기진력에 대해 적용함에 있어 발생할 수 있는 문제점을 보이고 이를 극복하기 위한 방법을 제안하였다. 또한 제안된 제어 방법을 유압식 AMD시스템이 장착된 단층의 모형 구조물에 적용하여 제어 성능을 수치실험 및 실험을 통하여 검증하였다.

2. 포화 제어 이론

2.1 뱅뱅 제어 이론

시스템이 선형이고 시불변이라고 가정하면 n 자유도를 갖는 구조물-AMD의 초기 외란에 의한 운동 방정식은 상태 공간에서 식 (1)과 같이 표현된다.

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

여기서 \mathbf{x} 는 $2n \times 1$ 크기를 가지는 상태 벡터이고, u 는 스칼라 제어력이다. \mathbf{A} 는 $2n \times 2n$ 크기의 시스템 행렬이고, \mathbf{b} 는 $2n \times 1$ 크기의 제어 입력 벡터이다.

뱅뱅 제어에서의 제어 목표는 다음의 성능 지수를 최소화하는 것이다.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^t [\mathbf{x}^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t)] dt \quad (2)$$

여기서 Q 는 반양정 가중 행렬이다. 이때의 제어력은 다음의 제한 조건에 의해 구속된다.

$$|u(t)| \leq u_{\max} \quad (3)$$

Pontryagin의 최소 원리를 적용하여 구해진 최적 제어력은 다음과 같다.⁽¹²⁾

$$u(t) = -u_{\max} \cdot \text{sgn}[b^T p(t)] \quad (4)$$

이 때의 $p(t)$ 는 상호 상태로 식 (5)의 미분 방정식을 풀어 얻게 된다.

$$\dot{p}(t) = -Qx(t) - A^T p(t) \quad (5)$$

식 (4)에 의하면 뱅뱅 제어에 의한 최적의 제어력은 측정 또는 추정 가능한 시스템 상태의 향으로 표현된 것이 아니라 식 (5)의 시스템 상호 상태의 미분 방정식으로 표현되어져 있음을 주목해야 한다. 실 시간 제어 시에 식 (5)를 계산하려면 계산 시간이 길게 요구되며, 이에 따라 시간 지연에 의해서 원하는 제어 성능을 얻기가 어렵다. 따라서 식 (5)의 미분 방정식으로부터 시스템의 상태 공간에서 제어력의 부호를 바꾸어 주는 전환 면(switching surface)을 찾기 위한 연구^{(8),(12)}가 진행되었지만 이론적으로는 2자유도, 수치적으로는 3자유도 이상인 시스템에 대해서는 전환 면을 찾기가 매우 어렵다. 또한 식 (4)의 적용은 시스템의 상태 공간의 원점 근처에서 큰 제어력에 의한 제어 채터링 문제가 발생할 수 있다.

2.2 준최적 뱅뱅 제어 이론

준최적 뱅뱅 제어 이론에서는 시스템의 Lyapunov 함수의 시간 미분치를 최소화하여 최적의 제어력을 계산한다.

$$V = x^T(t) S x(t) \quad (6)$$

여기서 행렬 S 는 다음 식 (7)의 Lyapunov 행

렬 식의 해이고 대칭 행렬이며 양정 행렬이다.

$$A^T S + S A = -Q \quad (7)$$

식 (3)의 제어력 제한 조건하에서 식 (6)의 시간 미분치를 최소화하는 최적의 제어력은 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$u(t) = -u_{\max} \cdot \text{sgn}[b^T S x(t)] \quad (8)$$

식 (8)에 의해 주어지는 제어력은 측정 또는 추정 가능한 시스템의 상태의 함수로 표현되기 때문에 뱅뱅 제어의 경우와 같이 식 (5)의 상호 상태의 미분 방정식을 풀어야 되는 단점을 보완하지만 시스템의 상태 공간의 원점 근처에서의 큰 제어력에 의한 제어 채터링 문제를 극복하지 못한다.

2.3 수정된 뱅뱅제어 이론

수정된 뱅뱅 제어 이론은 제어 채터링 문제를 해결하기 위해서 도입되었다. 여기에서는 식 (8)에서 제어력의 방향을 결정하는 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$v(t) = b^T S x(t) \quad (9)$$

새로운 설계 파라미터 α 를 도입하여 $\beta(t)$ 를 식 (10)과 같이 정의하면

$$\beta(t) = [v^2(t) - \alpha^2] / \alpha^2 \quad (10)$$

$|v(t)|$ 는 식 (11)과 같이 α 와 $\beta(t)$ 의 향으로 표시된다.

$$|v(t)| = \alpha \sqrt{1 + \beta(t)} \quad (11)$$

식 (11)을 0점 근처에서 $\beta(t)$ 에 대해 급수 전개하면 제어력은 식 (12)와 같이 표현된다.⁽¹¹⁾

$$\begin{aligned} u(t) &= -u_{\max} \cdot \frac{v(t)}{|v(t)|} \\ &= -u_{\max} \cdot \frac{v(t)}{\alpha \left[1 + \frac{1}{2} \beta(t) - \frac{1}{8} \beta^2(t) + \frac{3}{16} \beta^3(t) + \dots \right]} \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)는 설계자가 새로운 설계 파라미터 α 를 선택해야 하는 단점이 있지만, α 를 잘 선택해 주면 제어력 항이 시스템 상태의 함수이기 때문에 시스템의 상태 공간의 원점 근처에서의 제어 채터링 문제를 극복할 수 있는 장점을 갖는다.

3. 적응형 뱅뱅 제어 이론

3.1 α 의 값에 따른 제어력의 형태

식 (12)를 사용하기 위해서는 설계자가 α 의 값을 결정해 주어야 함으로 우선 α 의 값에 따른 제어력의 파형을 살펴보고자 한다. 식 (11)로부터 α 는 전 제어되는 시간 동안의 $v(t)$ 의 최대값에 무차원 파라미터 c 를 곱한 값으로 정의될 수 있다.

$$\alpha = c \cdot \max |v(t)| \quad (13)$$

식 (9)의 $v(t)$ 를 진폭이 1 이고 주파수가 1Hz 인 사인파 형태라고 가정하고 최대 제어력 $u_{\max} = 1N$ 으로 가정해 보자.

$$v(t) = v_0 \sin(2\pi ft), \quad v_0 = 1, f = 1Hz \quad (14)$$

Fig. 1은 뱅뱅 제어인 경우의 제어력과 식 (12)를 이용한 1차, 2차 및 3차의 다항식으로 근사화한 경우에 대하여 c 의 값에 따른 제어력의 형태를 보여주고 있다. $c=1$ 인 경우는 1차, 2차 및 3차식 모두 사각파에 근사한 제어력 형태를 보

여 뱅뱅 제어 효과를 얻게 된다. 그러나 $c=4$ 인 경우는 1차, 2차 및 3차식 모두 최대의 제어력에 이르지 못하여 뱅뱅 제어 효과를 얻지 못하게 된다. 또한 $c < 0.4$ 인 경우에는 1차, 2차 및 3차식 모두 최대의 제어력에는 이르지 않지만 지속적으로 최대의 제어력을 내어야 하는 곳에서 이보다 작은 제어력으로 계산되어진다. 특히 이 경우 2차식에 의한 제어력은 최대의 제어력을 내어야 하는 곳에서 제어력의 방향이 반대로 계산되어지므로 원하는 제어력을 얻을 수 없을 뿐만 아니라 이로 인하여 시스템의 안정성에 문제가 생기게된다. 따라서 c 의 값을 너무 크게 선정하면 제어력 $u(t)$ 가 최대 제어력 u_{\max} 에 이르지 못함으로 뱅뱅 제어의 효과를 얻지 못하게 되고, 또한 너무 작게 선정하면 최대의 제어력에는 이르지 않지만 지속적으로 최대의 제어력을 내어야 하는 곳에서 이보다 작은 제어력을 얻거나 음의 제어력을 얻게 되므로, 식 (12)에서 설계자가 α 의 값을 정할 때에 원하는 사각파 형태와 유사한 제어력을 얻기 위해서는 식 (13)에서 c 의 값을 결정함에 신중해야 함을 알 수 있다. 위에서 살펴 본 것처럼 제어력의 계산 시에 선정해 주어야 하는 α 의 값을 결정할 때에 c 의 값에 따라 제어력 파형이 결정되어진다. 따라서 c 를 제어력 파형 결정 무차원 파라미터로, α 를 제어력 파형 결정 파라미터로 부르기로 한다.

본 논문에서는 2차식으로 제어력을 표현하였는데, 이 경우에 최대 제어력을 이용하는 제어력 파형을 얻고 또한 시스템의 안정성을 보장

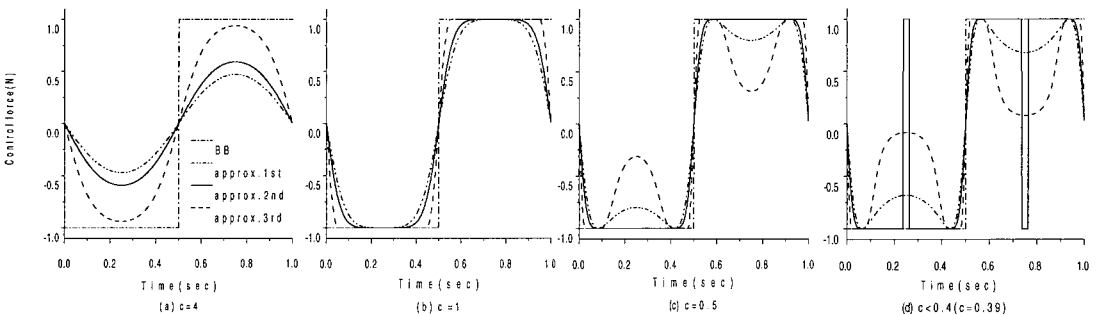


Fig. 1 Control force with respect to the value of nondimensional parameter c

하기 위해서는 0.5~1의 범위 내에서 제어력 파형 결정 무차원 파라미터 c 를 선택하는 것이 타당하다.

3.2 적응형 뱅뱅 제어 이론의 제안

본 논문의 관심은 설계자가 고려한 이상의 과도한 기진력에 대해서도 식 (12)의 제어력을 적용하여 제어 시스템을 안정하게 작동하도록 하는 것이다. 지진과 같은 외부 기진력은 예측할 수 없으므로 식 (13)의 $\max|v(t)|$ 를 알 수 없다. 지진 기진력이 커질수록 설계자가 이미 선정한 α 의 값은 구조물의 응답에 비해 상대적으로 작은 값이 된다. 이 때의 제어력은 Fig. 1 (d)의 형태가 되어서 제어기의 안정성을 보장할 수 없게 된다. $c=1$ 경우, 외부의 기진력이 설계치보다 더 커지면 α 를 $v(t)$ 로 바꾸어 주는 적응형 제어 방법을 적용하면, 식 (12)에서 제어력은 $\beta(t)$ 의 차수에 상관없이 최대의 값이 되고 제어력 방향은 보장되므로 제어기의 안정성이 보장된다. 따라서 지진 기진력이 설계자가 설계시에 고려한 것보다 더 큰 경우에, 시스템의 안정과 제어 효과를 위해서 제어력 파형 결정 파라미터 α 의 값을 바꾸어 주어야 한다. 본 논문에서는 제어 대상 구조계의 응답에 따라 α 의 값을 바꾸어 주는 적응형 제어 방법을 Fig. 2와 같이 제안한다.

Fig. 2에서 초기값 α_{init} 은 설계자가 고려한 기진력에 대하여 구조계의 응답을 예측하여 식 (13)을 만족하도록 선정한다. 그러나 실제 설계 기진력을 너무 작게 고려한 경우에는 식 (13)을 만족하도록 α_{init} 을 선정하더라도 제어 채터링이 생기므로 설계 기진력의 크기의 선정 시에는 주의가 요구된다. 또한 설계자가 고려한 이하의 기진력에 대하여 더 좋은 제어 성능을 얻기 위해서 α_{init} 을 더 작은 값으로 선정하면 최대의 제어력을 이용할 수는 있지만 제어 채터링이 생길 수 있다. 그러나 설계 기진력으로부터 제어 채터링이 생기지 않도록 선정된 α_{init} 을 사용하면 최대의 제어력을 이용하지는 않더라도

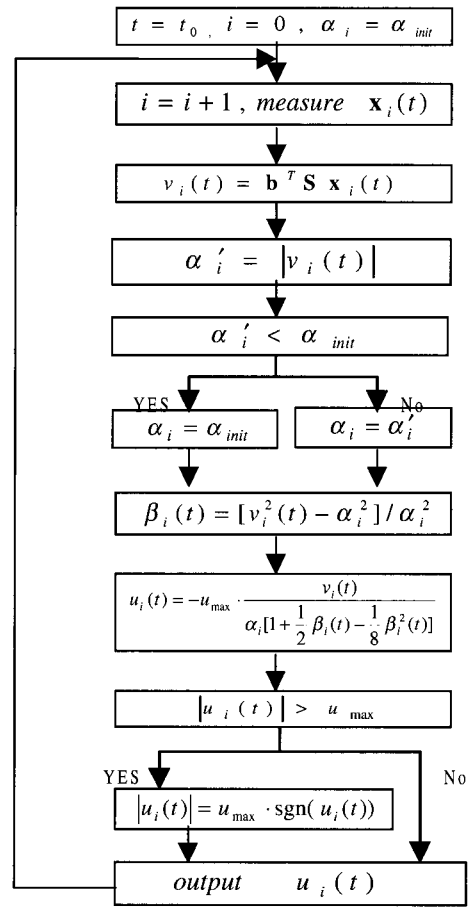


Fig. 2 Flowchart of the proposed adaptive bang-bang control algorithm

도 원하는 제어 성능을 얻을 수가 있다. 따라서 제어 대상 구조계의 응답이 작은 곳에서 제어 채터링을 방지하기 위해서는 i 번째 단계에서 계산되어진 α'_i 값이 α_{init} 보다 작으면 α_i 는 α_{init} 로 두고, 설계 시에 고려된 이상의 과도한 기진력에 대해서도 제어 효과를 얻기 위해서는 α'_i 값이 α_{init} 보다 크면 α_i 를 α'_i 값으로 바꾼다.

4. 유압식 AMD를 이용한 검증 실험

4.1 시스템 모델링

제안된 적응형 뱅뱅 제어 알고리즘의 진동 제어 효과를 확인하기 위해 4기둥지지 후판 구조물 (가로×세로×높이=1200mm×800mm×1600mm)

에 소형 유압식 AMD를 설치하고 설계 기준력 이상의 과도한 기진력을 주어 제안된 알고리즘의 유효성을 확인하였다. 구조물의 상부에 AMD를 설치하였을 때에 동특성 실험에 의해 제어 대상인 가로축 방향의 고유 진동수가 14.2Hz임을 확인하였고 보조 질량이 10kg(구조물 질량의 약 2%)인 유압식 AMD의 입력 전압 대 보조 질량 변위 출력 전압 사이의 동특성을 실험하고, 이를 커브-피팅하여 다음의 2차함수로 근사화된 전달함수의 계수를 산정하였다.⁽¹³⁾

$$G(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \frac{a_3}{s^2 + a_1s + a_2} \quad (15)$$

여기서 $a_1 = 183$, $a_2 = 51023$, $a_3 = 5100$ 이다. 따라서 계의 제어력 항은 유압 서보 제어기의 입력 전압의 함수로 모델링 됨으로 입력 전압에 한계를 두어 수치실험 및 실험을 수행 하였다.

4.2 지반 가속도의 가정

설계 지반 가속도는 실험 대상인 AMD가 설치된 시험 구조물의 제어 대상인 가로축 방향의 고유 진동수가 14.2Hz이므로 Fig. 3과 같이 14Hz 근방에서 협대역의 주파수 성분을 가지는 것으로 하였다. Fig. 3은 El Centro 지진 데이터의 샘플링 시간을 짧게 한 후 제어 대상 시험 구조물의 고유 진동수 근처에서 피크치를 가지도록 설계된 대역 통과 필터를 거쳐서 만들어진 가속도 신호로서 지반 가속도 신호의 최대값이 $2m/s^2$ 인 경우이다.

4.3 실험 시스템 구성

실험적 검증을 위하여 한국 기계 연구원에서 보유하고 있는 6자유도 대형 진동대에 제작된 시험 구조물의 하판을 고정하고, 진동대에 묘사된 지반 가속도 신호를 입력하여 시험 구조물을 가진하였다.

A/D채널 간의 샘플링 주파수는 160kHz로, 데이터 취득 주기는 500Hz로 설정하여 유압 서

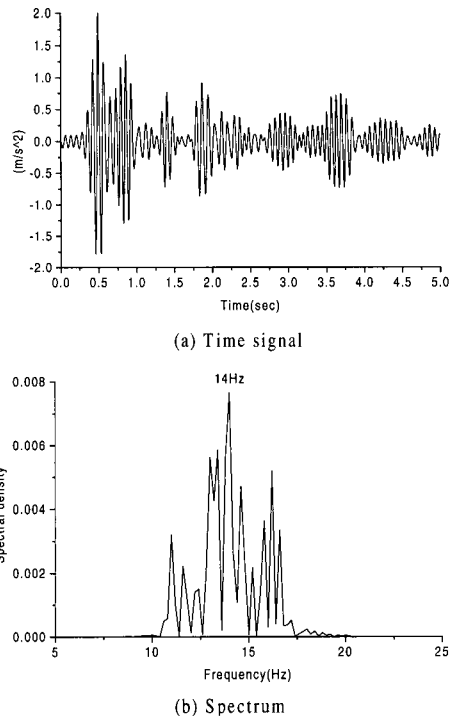


Fig. 3 Simulated acceleration of ground

보 제어 신호를 2msec 간격으로 출력하도록 하였다. 따라서 제어 알고리즘 상의 모든 연산은 2msec안에 수행된다. 이는 시험 구조물의 주 관심 진동형 고유주기의 약 1/30에 해당한다.

제어 알고리즘은 시험 구조물과 AMD의 보조 질량의 변위와 속도를 상태량으로 사용하며 모든 상태량은 계측 또는 추정해야 한다. 본 실험에서는 시험 구조물과 보조 질량의 변위를 측정하기 위하여 2개의 LVDT를 사용하여 이를 측정하였다. 시험 구조물의 지반에 대한 상대 변위를 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 LVDT를 고정할 지그를 설치하였다. 이 지그는 고유 진동수가 78Hz로서 제어 대상 시험 구조물의 변위 신호를 계측함에 있어서 정확도에 큰 영향을 미치지 않는다. 속도 신호는 직접 계측하지 않고 계측이 용이한 가속도 신호를 적분하여 추정하였다. 이 과정에서 원하지 않는 주파수 성분이 포함되어 증폭되는 것을 방지하기 위해서 중심 주파수는 14Hz이고 대역 폭은 12Hz인 4차의 butterworth 대역통과 필터를 설계하여

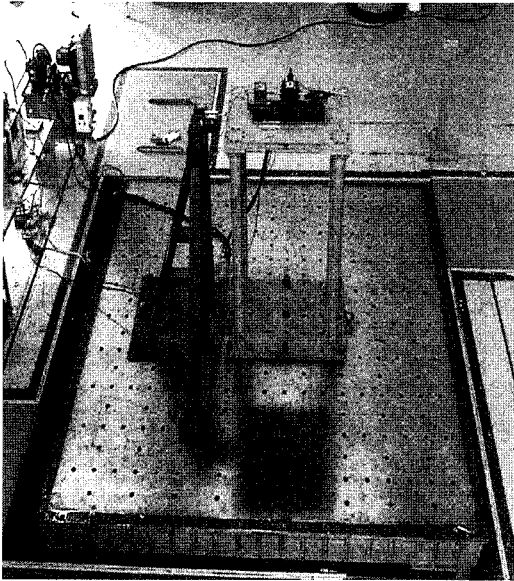


Fig. 4 Experimental set-up

사용하였다. 또한 실제 제어 시에는 디지털 속도 추정 필터를 사용하였는데 이는 아날로그 속도 추정 필터를 데이터 취득 주기를 고려하여 Tustin 변환을 이용하여 근사화 하였다.

4.4 제어 알고리즘의 적용

본 논문에서는 Fig. 3의 PGA(peak ground acceleration)= 2m/s^2 인 경우를 설계 기준 지진 가속도로 고려하였고, 설계자가 수정된 뱁뱁 제어 이론을 적용하기 위해 식 (9)로 정의되는 $v(t)$ 로부터 설계 요소인 제어력 파형 결정 파라미터 $\alpha = \max |v(t)|$ 로 정하였다. α 의 값을 임의로 정해 수치실험을 수행하여 이때의 $v(t)$ 로부터 $\alpha = \max |v(t)|$ 의 값과 이미 설정한 값과 같을 때까지 여러 차례 수치실험을 수행하였다. 수치실험으로부터 $\max |v(t)| = 9.4814\text{e-}3$ 에 대하여 $\alpha = 9.4814\text{e-}3$ 으로 정할 수 있었다. 따라서 이 값을 이용하여 수정된 뱁뱁 제어 이론을 적용할 때에 고정된 α 의 값을 이용하는 경우의 제어 성능 한계를 확인하고, α 의 값을 구조계의 응답에 따라 바꾸어 주는 제안된 적응형 제어 방법을 적용함으로써 이의 한계를 극복함을 살펴보았다. 입력 전압의 한계는 $|V_m| \leq 6\text{V}$ 로 가정하였다.

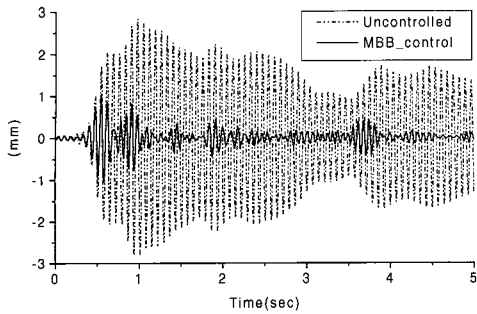
4.4.1 고정된 α 값의 적용

첫째, 설계시 고려한 기준 가속도의 지진을 시험 구조물이 받는 경우의 제어 성능을 알아 보면, $\text{PGA} = 2\text{m/s}^2$ 인 경우 수치실험을 통해 선정된 값을 사용한 실험 결과는 Fig. 5와 같다. 이로부터 제어 알고리즘의 적용이 시험 구조물의 변위 및 가속도의 응답을 줄임에 매우 효과적임을 알 수 있다. 지반에 대한 시험 구조물의 최대 변위는 제어 전 2.839mm 에서 제어 후 1.060mm 로 62.67%만큼 줄었으며 5초 동안의 제어 시간 동안 RMS 값은 83.50%만큼 감소하였고, 시험 구조물의 절대 가속도는 제어 전 22.09m/s^2 에서 제어 후 8.46m/s^2 로 61.70%만큼 감소하였으며 5초 동안의 제어 시간 동안 RMS 값은 81.82%만큼 감소하였다. 또한 제어력을 결정하는 입력 전압의 신호는 0.5-1초 사이에 최대값을 내는 현상을 볼 수 있다.

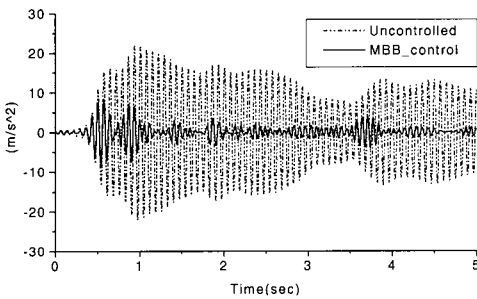
따라서 수정된 뱁뱁 제어는 구조물의 응답을 줄이기 위해 제어 채터링이 발생하지 않게 제어력 파형 결정 파라미터 α 를 선택한다면, 입력 전압의 제한 범위 내에서 좋은 제어 성능을 낼 수 있음을 확인할 수 있었다.

둘째, 지진 기진력이 설계 시에 고려한 기진력보다 더 큰 경우에 대하여 제어력 파형 결정 파라미터 $\alpha = 9.4814\text{e-}3$ ($\text{PGA} = 2\text{m/s}^2$ 인 경우 선정된 값)으로 고정하여 수정된 뱁뱁 제어 이론의 적용을 통해 이의 제어 성능 한계를 확인해 보았다. $\text{PGA} = 4\text{m/s}^2$ 이상이 되면 제어 입력 전압이 부분적으로 반대로 출력되는 현상을 수치 실험 및 실험적으로 확인 할 수 있었다. 이런 현상은 제어기 및 시스템의 안정성을 보장하지 못한다. Fig. 6은 $\text{PGA} = 5\text{m/s}^2$ 인 경우의 실험 결과를 보여주고 있는데, 0.58초 이후부터는 제어력의 방향이 반대로 계산되어져 출력되는 곳이 있기 때문에 제어 입력 전압이 원하는 제어력을 내지 못하고 제어 역효과를 내어 시험 구조물의 응답이 불안정해지는 현상을 확인할 수 있었다.

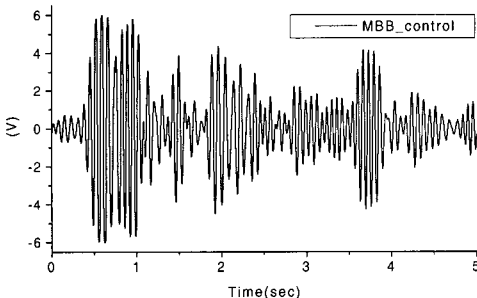
따라서 위의 예로부터 구조물의 진동 제어에 있어 고정된 제어력 파형 결정 파라미터 α 를 사용하는 수정된 뱁뱁 제어의 적용은 어떤 범위



(a) Displacement of the test structure relative to ground

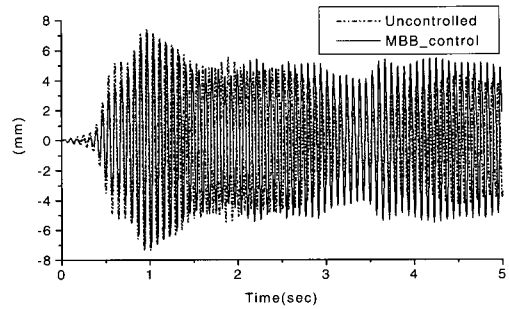


(b) Absolute acceleration of the test structure

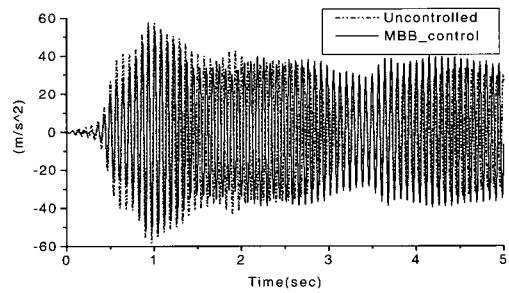


(c) Control input voltage

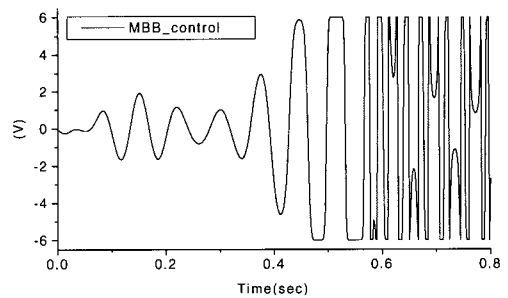
Fig. 5 Time history of the test structure and control input voltage using modified bang-bang control at $PGA=2m/s^2$: experiment



(a) Displacement of the test structure relative to ground



(b) Absolute acceleration of the test structure



(c) Control input voltage

Fig. 6 Time history of the test structure and control input voltage using modified bang-bang control at $PGA=5m/s^2$: experiment

내에서는 효과적이지만 그 범위를 넘어서는 경우에는 제어 대상 구조물을 불안정하게 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

4.4.2 제안된 적응형 제어의 적용

위의 경우에 발생하는 제어 역효과를 방지하기 위하여 3.2절에서 제안된 제어력 파형 결정 파라미터 값을 구조계의 응답에 따라 바꾸어 가는 적응형 제어 방법을 적용했을 때의 제어

효과에 대해 살펴보았다.

Fig. 2에서 제안된 방법의 적용 시에 가장 중요한 것은 초기값 α_{init} 의 선정이다. 이의 값을 너무 작게 선정하면 구조계의 응답이 작을 때에 제어 채터링이 생길 수 있기 때문이다. $PGA=2m/s^2$ 인 경우에 대해 고정된 α 를 이용할 때 선정된 값으로 초기값($\alpha_{init}=9.4814e-3$)을 선정하면 제어 채터링은 발생하지 않으며 설계 기준 기진력에 대해 좋은 제어 성능을 얻을 수 있었다.

이로부터 $PGA=5m/s^2$ 인 경우에 대해 $\alpha_{init}=9.4814e-3$ 으로 두고 제안된 적응형 제어 방법을 적용한 실험 결과는 Fig. 7과 같다. α 의 값이 0.5~1.5초 사이에서 구조계의 응답에 따라 바뀌므로 인해 제어력의 제어 역효과는 발생하지 않았다. 지반에 대한 시험 구조물의 최대 변위 및 절대 가속도는 제어 전 7.648mm, $50.91m/s^2$ 에서 제어 후 3.798mm, $25.61m/s^2$ 로 각각 50.35%, 49.69%만큼 감소하였고, 5초 간의 제어 시간 동안 RMS값은 각각 74.78%, 74.23%만큼 감소하였다. $PGA=7m/s^2$ 까지 실험을 수행하였는데 이 경우에 대해서도 제안된 적응형 제어 방법의 제어 성능을 확인할 수 있었다(Fig. 8 참조).

Table 1에서는 수정된 뱀뱀 제어 이론을 적용할 때 제안된 적응형 제어 방법을 이용함으로써 얻어진 제어 효과를 보여 주고 있다. 제어 입력 전압은 6V의 한계를 가지므로 지반 가속도가 커짐에 따라 시험 구조물에 대한 제어 성능은 줄어들지만 제한된 제어 입력 내에서 더 큰 지반 가속도에 대해서도 제어 시스템이 원활히 작동함을 알 수 있다. Table 1에서 특기할 만한 것은 설계 기준 기진력보다 작은 경우 ($PGA=1m/s^2$)에 대해서는 제어 입력 전압의 최대치를 이용하지는 못하지만 제어 성능은 좋을 수 있다. 이 경우에는 지반 가속도의 크기가 작으므로 구조물의 응답 또한 작다. 그러므로 제어 입력 전압의 최대치를 이용하지

않더라도 구조물의 응답을 2/3정도 줄일 수 있으므로 실제적인 측면에서 유용한 것임을 생각할 수 있다.

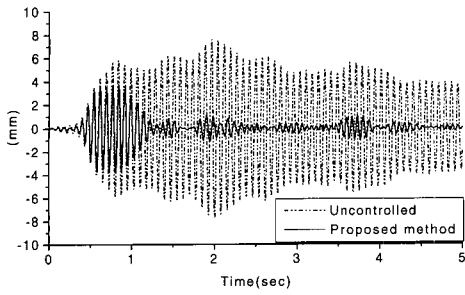
위로부터 제어력 파형 결정 파라미터 α 의 값을 구조계의 응답에 따라 바꾸는 제안된 적응형 제어 방법의 적용은 설계자가 고려한 지진 기진력보다 더 큰 경우에 대해서도 제어 시스템의 용량 안에서 제어기를 안정하게 작동시켜 원하는 제어 성능을 낼 수 있음을 확인할 수 있었다.

4.5 수치실험 결과와 실험 결과의 비교

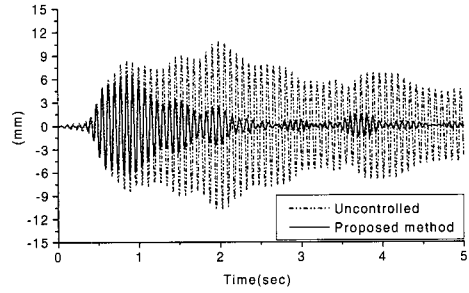
모든 실험은 사전에 수치실험을 통하여 대략의 제어 성능을 확인한 후 실시 되었는데, 전반적으로 수치실험과 실험 결과는 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 9는 그 일례로서 지반 가속도 $PGA=2m/s^2$ 인 경우의 수치실험과 실험의 결과를 보여주고 있다. 이때 수치실험은 실험에서와 같은 조건하에서, 즉 실험 시에 측정된 지반 가속도를 이용하여 수행되었다. Fig. 9를 보면 5초 동안 전체적으로 대체로 일치된 결과를 보이지만 시험 구조물의 응답이 가장 큰 0.5~1초 사이에서 시험 구조물의 지반에 대한 상대 변위 및 절대 가속도의 피크 값에서 약 10%이내의 오차가 있음을 알 수 있다. 실험에 의한 시험 구조물의 실제 응답이 수치실험에

Table 1 Response of test structure and control performance results using the proposed adaptive method : experiment

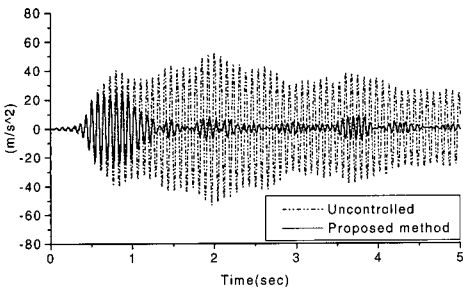
PGA (m/s^2)	Relative displacement				Absolute acceleration				Maximum input voltage (V)	α_{init} (e-3)	α_{max} (e-3)
	Peak response		RMS value		Peak response		RMS value				
	Value (mm)	Reducti on(%)	Value (mm)	Reducti on(%)	Value (m/s^2)	Reducti on(%)	Value (m/s^2)	Reducti on(%)			
1	0.431	67.82	0.083	86.63	3.75	64.02	0.74	84.69	4.51	9.481	9.481
2	1.060	62.67	0.204	83.50	8.46	61.70	1.75	81.82	6.0	9.481	9.481
3	1.802	58.23	0.364	79.99	14.22	57.62	2.90	79.48	6.0	9.481	15.37
4	2.619	54.42	0.614	78.76	20.17	53.49	4.42	77.40	6.0	9.481	25.56
5	3.798	50.35	0.905	74.78	25.61	49.69	6.27	74.23	6.0	9.481	35.62
6	5.096	48.08	1.250	70.77	37.69	44.88	8.80	70.42	6.0	9.481	51.89
7	6.469	40.77	1.702	64.78	46.40	38.78	11.87	64.09	6.0	9.481	62.55



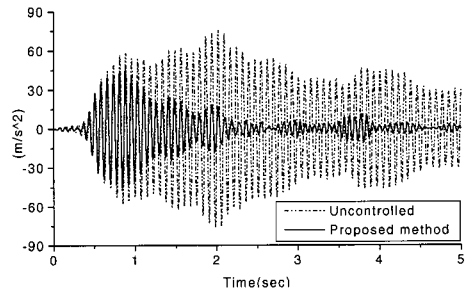
(a) Displacement of the test structure relative to ground



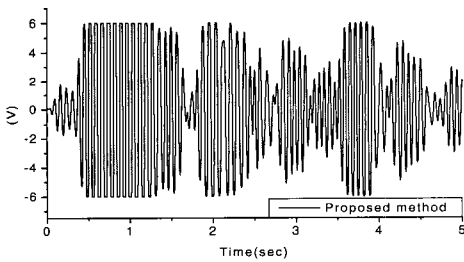
(a) Displacement of the test structure relative to ground



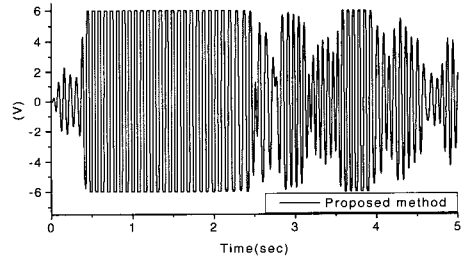
(b) Absolute acceleration of the test structure



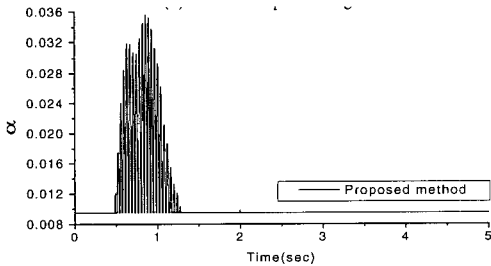
(b) Absolute acceleration of the test structure



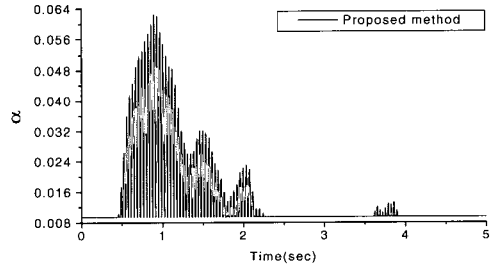
(c) Control input voltage



(c) Control input voltage



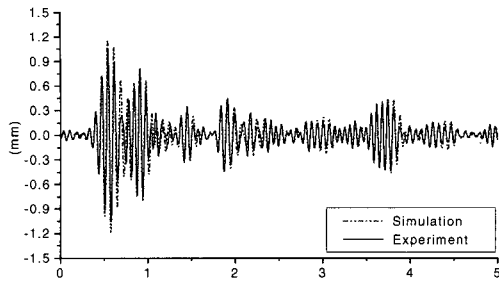
(d) Chang of α



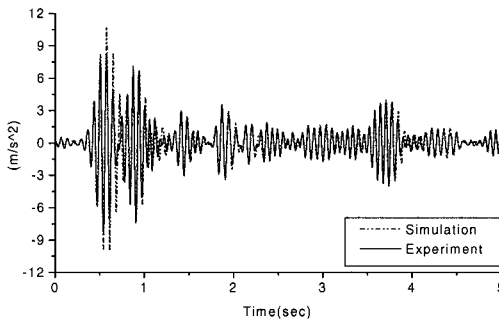
(d) Chang of α

Fig. 7 Time history of the test structure, control input voltage and changed value of α using the proposed adaptive method at $PGA=5m/s^2$: experiment

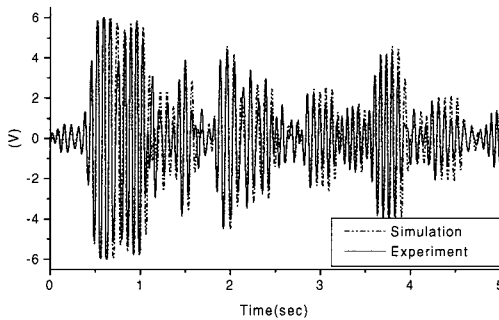
Fig. 8 Time history of the test structure, control input voltage and changed value of α using the proposed adaptive method at $PGA=7m/s^2$: experiment



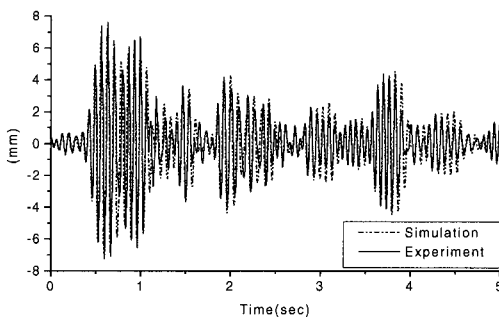
(a) Displacement of the test structure relative to ground



(b) Absolute acceleration of the test structure



(c) Control input voltage



(d) Displacement of auxiliary mass

Fig. 9 Comparison of simulation and experimental results using the proposed adaptive method at $PGA=2m/s^2$

의한 예측 응답보다 작은 것은 유압식 구동기의 모델링 오차로 사료된다. 즉 제어 입력 전압이 최대값이 되는 0.5~1초 사이에서 유압식 구동기의 오버슈트로 인한 보조질량 변위가 AMD를 2차 함수로 근사화한 모델을 이용한 수치실험 시의 값보다 실제 실험 시에 약간 크게 나타났기 때문이다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 수행된 연구 결과를 요약, 정리하면 다음과 같다.

1. 제어력 한계를 넘는 기진력에 대하여 구조물의 진동 제어 시에 적용되는 포화 제어 이론을 살펴 보았다. 그 중 수정된 뱅뱅 제어 이론은 사각파 형태의 제어력을 다항식으로 근사화한 것으로서 뱅뱅 제어 이론 및 준최적 뱅뱅 제어 이론의 실제 적용 시에 문제가 되는 시스템의 상태 공간의 원점 근처에서 발생하는 제어 채터링 문제를 제어력 파형 결정 파라미터 α 의 도입으로 극복할 수 있음을 확인하였다.
2. 수정된 뱅뱅 제어 이론에서 도입된 제어력 파형 결정 파라미터 α 를 선정함에 있어 원하는 제어 성능을 얻기 위해서는 이의 선정 범위가 제한되어 있다. 제어력 파형 결정 파라미터 α 의 값을 너무 크게 선정하면 최대의 제어력을 이용하지 못하여 뱅뱅 제어의 효과를 얻지 못하게 되고, 또한 이를 너무 작게 선정하면 최대의 제어력에는 이르지만 지속적으로 최대의 제어력을 내어야 하는 곳에서 이 보다 작은 제어력을 얻게 되며 심지어는 오히려 역의 제어력을 내어 시스템을 불안정하게 만들 수도 있다. 예로서 사각파 형태의 제어력을 2차식으로 근사화 하였을 때에 최대 제어력을 이용하는 제어력 파형을 얻고 시스템의 안정성을 보장하기 위해서는 제어력 파형 결정 파라미터 α 의 값의 결정 시에 0.5~1의 범위 내에서 제어력 파형 결정 무차원 파라미터 c 를 선택함이 타당함을 알 수 있었다.

3. 수정된 뱅뱅 제어 이론의 실제 적용에 있어, 설계 기진력보다 더 큰 기진력이 발생했을 경우에는 선정된 제어력 곡형 결정 파라미터 α 의 값이 구조계의 응답에 비해 너무 작게 되어 제어 역효과가 일어나 시스템을 불안정하게 할 수 있음을 시험 구조물에 대한 검증 실험을 통하여 확인하였다. 따라서 이의 문제점을 극복하기 위하여 수정된 뱅뱅 제어의 적용 시에 제어 기간 중 제어력 곡형 결정 파라미터 α 의 값을 구조계의 응답에 따라 바꾸어 주는 적응형 제어 방법을 제안하였고, 시험 구조물에 대하여 제안된 적응형 제어 방법을 적용함으로써 설계 기준 기진력 이상의 큰 지진 기진력에 대해서도 제어기와 시험 구조물의 안정성 및 제어 성능이 확보됨을 수치실험 및 실험을 통하여 검증하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. 문석준, 정태영, “가속도가 포함된 순간최적 제어 알고리즘을 이용한 구조물 진동의 능동 제어”, 한국 소음 진동 공학 회지, 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_∞ 제어 이론과 bilinear transform을 적용한 불확실한 구조계

의 능동적 진동 제어”, 대한토목학회논문집, 제19권 제2호, 1999, pp. 241-252.

5. Kobori, T., Koshika, N., Yamada K., and Ikeda, Y., “Seismic-response-controlled structure with active mass drive system. Part1 : design,” *Earthquake Engng. Struct., Dyn.*, Vol. 20, 1991, pp. 133-149.
6. 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.
7. 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.
8. Mongkol, J., Bhartia, B., and Fujino, Y., “On linear-saturation(LS) control of buildings,” *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 25, 1996, pp. 1353-1371.
9. 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.
10. Indrawan, B., Kobori, T., Sakamoto, M., Koshika, N., and Ohru, S., “Experimental verifaion of bounded-force control method,” *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 25, 1996, pp. 179-193.
11. 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.
12. Meirovitch, L., *Dynamics and Control of Structures*, Wiley, New York, 1990.
13. 임채욱, “제어력 한계를 넘는 기진력에 대한 구조물의 진동 제어 알고리즘 적용 연구”, 공학 석사 학위 논문, 한국과학기술원 기계공학과, 2000. 2.