

# 에너지소산 제어 알고리즘의 제어이득 산정

## Control-Gain Estimation of Energy Dissipation Control Algorithms

이 상 현\*      민 경 원†      강 상 훈\*\*

Lee, Sang Hyun      Min, Kyung-Won      Kang, Sang Hoon

(논문접수일 : 2004년 4월 12일 ; 심사종료일 : 2004년 11월 19일)

### 요 지

본 논문은 에너지소산 제어알고리즘의 제어이득 산정에 관하여 연구하였다. Lyapunov안정성이론에 기초하여 속도 되먹임 포화제어알고리즘, 뱅뱅제어 알고리즘 그리고 에너지계인 제어알고리즘을 제안하였고, 이 알고리즘의 성능을 평가하고 비교하였다. 속도 되먹임 포화제어알고리즘과 에너지계인 제어알고리즘에서는 포화현상을 고려하였고, 뱅뱅제어에서는 경계층을 이용하여 채터링현상을 고려하였다. 수치적인 해석을 통해서 제안된 제어알고리즘이 바람하중에 의해 야기되어지는 구조물의 에너지를 효과적으로 소산시킬 수 있음을 보여주었다.

**핵심용어** : Lyapunov함수, 속도 되먹임 포화제어, 뱅뱅제어, 에너지계인제어

### Abstract

This study is on control gain estimation of energy dissipation control algorithms. Velocity feedback saturated, bang-bang, and energy gain control algorithms are proposed based on the Lyapunov stability theory and their performances are evaluated and compared. Saturation problem is considered in the design of the velocity feedback saturated and energy-gain control algorithms, and chattering problem in bang-bang control is solved by using boundary layer. Numerical results show that the proposed control algorithms can dissipate the structural energy induced by wind loads efficiently.

**keywords** : *lyapunov function, velocity feedback saturated control algorithm, bang-bang control algorithm, energygain control algorithm*

## 1. 서 론

건축구조물은 초기부터 해체시까지 바람, 지진등의 외부 하중에 대해서 안정성을 유지하도록 설계되어야 한다. 최근에 건축물들이 고층화되면서 이와 같은 외부하중이 건축 구조물에 바람직하지 않은 영향을 유발하고 있어서 이런 영향을 최소화시킬 필요성이 대두되었고, 이와 같은 외부 하중으로부터 구조물의 거동을 억제함으로써 안정성을 증가시키고 신뢰성을 보장하기 위해서 많은 연구들이 진행되어져 왔다.

기준에 제안된 구조물의 강인성과 안정성을 보장하기 위

한 LQR,  $H_2$ ,  $H_\infty$ 같은 선형제어방법은 구조물의 상태에 따라 선형적으로 비례하는 제어력을 산출한다. 이 경우 구조물이 기대하지 않았던 큰 외력이 작용할 때, 구조물의 응답은 너무 커져서 요구되는 제어력이 가진기의 능력을 초과하게 된다. 그러므로 초과된 필요 제어력은 적용될 수 없고, 그것은 포화문제를 야기시키고, 따라서 이 같은 방법은 디자인 단계에서 최대제어력을 정할 수 없는 한계를 가진다. 더욱이 그 선형제어방법들은 정상상태 응답의 평균값을 줄이는데 맞추어져 있기 때문에 지진하중이나 바람하중 하에서 최대 비정상상태 응답을 효과적으로 제어할 수 없다. 이 같은 문제점을 해결하기 위해서, 다양한 비선

† 책임저자, 정희원 · 단국대학교 건축공학과 부교수 공학박사  
전화: 02-709-2731 ; Fax: 02-799-1154  
E-mail: kwmin@dankook.ac.kr

\* 서울대학교 공학연구소 객원연구원 공학박사

\*\* 단국대학교 건축공학과 석사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 3월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

형 제어방법들이 제안되었고, 이런 방법에는 뱅뱅제어(Bang-bang Control)과 슬라이딩 모드제어방법(Sliding Mode Control, SMC)가 있다.<sup>1)</sup> 이런 제어 알고리즘들은 제어기의 설계를 위해서 Lyapunov함수를 사용한다. Lyapunov함수에 의해서 설계된 제어력은 Lyapunov함수를 감소시키는 방향성을 가진다. 이것은 포화문제를 피하면서 구조물을 안정한 상태로 만들고, 이 방법은 특별히 선형제어방법과 비교했을 때 최대 응답을 크게 줄이는 효과를 가지고 있다.

본 연구에서는 Lyapunov제어기 설계이론을 기초하여, Lyapunov함수를 구조물의 에너지로 설정한 후, 항상 구조물의 에너지를 소산시키도록 제어 알고리즘들을 설계하였다. 그리고 Yang등에 의해 제안된 풍하중을 받는 76층 벤치마크 구조물<sup>2)</sup>에 적용함으로써 그 성능을 평가하였다. Lyapunov제어 알고리즘을 구현할 제어기로는 76층에 설치된 것으로 가정하였으며, 벤치마크 문제에서 규정된 제어력의 최대값과 RMS제한값을 만족하도록 설계하였다. 속도 되먹임 제어에서는 포화제어기를 고려하였고, 뱅뱅제어에서는 경계층(boundary layer)를 고려하여 채터링 현상을 방지하였다. 에너지소산 제어에서는 구조물의 에너지에 비례하는 게인의 형상에 따른 효과를 살펴보고 또한, 포화제어기를 고려하였다.

## 2. 76층 건물과 평가모델<sup>2)</sup>

예제 건물은 오스트레일리아 멜버른 시에 76층, 306미터의 사무실 타워로 제안된 것이다. 이 건물은 콘크리트 코어와 콘크리트 프레임으로 구성되어진 철근콘크리트 건물이다. 건물은 높이 대 폭이 306.1대42로 7.3의 비를 가지

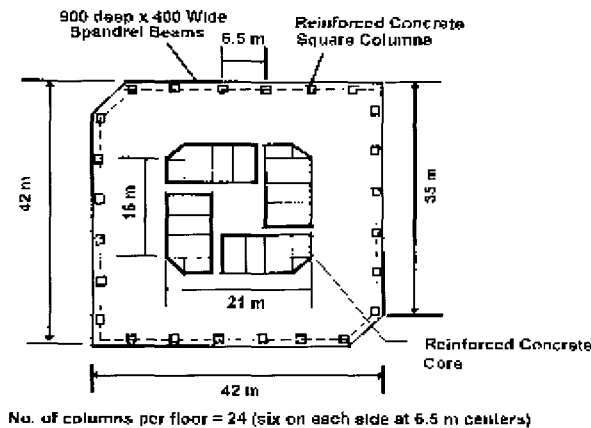
는 세장한 건물이고, 따라서 바람에 민감하다. 76층의 고층 건물은 수직 캔틸레버 보로 모델화하였다. 유한요소 모델은 똑같은 두께의 전형적인 보요소로서 두 개의 이웃한 바닥 사이에 건물의 비율을 고려하여 구축되었고, 76개의 수평자유도와 회전자유도를 고려하여 만들어졌고, 76개의 모든 회전자유도는 정적응축(static condensation)에 의해서 제거되었다. 첫 번째 다섯 개의 고유진동수는 0.160, 0.765, 1.992, 3.790 그리고 6.395Hz이다.

76개의 수평자유도를 가지는 건물의 감쇠행렬은 Rayleigh의 접근방법을 이용한 첫 번째 5개의 모드에 대하여 1%의 감쇠율을 가정하여 계산되었다. 76×76의 질량행렬, 감쇠행렬, 그리고 강성행렬을 가지는 이 모델은 "76자유도 모델"이라 언급되며, 벤치마크 문제에서는 이 76자유도 모델을 23자유도 모델로 줄여서 사용하였다. 본 연구에서도 23자유도 모델을 사용하여, 제어기를 설계하고 그 성능을 평가하기로 한다.

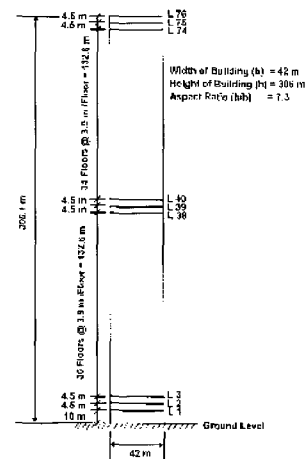
## 3. 응답평가지수

76층 건물에 설치된 제어시스템의 주요 목적은 사용자의 불안감을 완화하기 위해서 절대가속도를 줄이는 것이기 때문에, 제어기들의 첫 번째 성능평가기준( $J_1$ )은 바닥의 최대 RMS가속도를 줄이는 것이고, 두 번째 성능평가기준( $J_2$ )은 50층 이상의 선택된 층의 평균 가속도 성능이다. 세 번째 성능평가기준( $J_3$ )과 네 번째 성능평가기준( $J_4$ )은 변위에 대한 기준이다.

$$J_1 = \max(\sigma_{x_1}, \sigma_{x_{30}}, \sigma_{x_{50}}, \sigma_{x_{55}}, \sigma_{x_{60}}, \sigma_{x_{65}}, \sigma_{x_{70}}, \sigma_{x_{75}}) / \sigma_{x_{750}} \quad (1)$$



(평면도)



(입면도)

그림 1 76층 예제건물 (Yang등, 1998)

$$J_2 = \frac{1}{6} \sum_i (\sigma_{x_i} / \sigma_{x_{75}}) \quad i = 50, 55, 60, 65, 70, 75 \quad (2)$$

$$J_3 = \sigma_{x_{76}} / \sigma_{x_{76o}} \quad (3)$$

$$J_4 = \frac{1}{7} \sum_i (\sigma_{x_i} / \sigma_{x_{75}}) \quad i = 50, 55, 60, 65, 70, 75, 76 \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_{x_i}$ 는 i번째 층의 평균가속도,  $\sigma_{x_{75o}}$ 는 비제어 시 75층의 평균가속도,  $\sigma_{x_{76o}}$ 는 비제어 시의 i번째 층의 평균가속도,  $\sigma_{x_i}$ 는 제어 시 i번째 층의 평균변위, 그리고  $\sigma_{x_{76}}$ 는 비제어 시 i번째 층의 평균변위이다.

각 제안된 제어디자인은 반드시 가진기의 능력제한사항인  $\sigma_u \leq 100kN$ 과  $\sigma_{xm} \leq 30cm$ 를 만족해야 하는데, 여기서  $\sigma_u$ 는 평균제어력이고,  $\sigma_{xm}$ 은 가진기의 평균 스트로크이다. 위의 제한사항에 추가하여 제안된 제어디자인의 제어효과 요구조건은 다음에 나오는 비차수 가진기의 스트로크와 평균파워로 환산하여 평가되어야 한다.

$$J_5 = \sigma_{xm} / \sigma_{x_{76o}} \quad (5)$$

$$J_6 = \sigma_p = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T [\dot{x}_m(t)u(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

여기서,  $\sigma_{xm}$ 은 가진기의 평균 스트로크이고,  $\dot{x}_m(t)$ 는 가진기 속도이며, T는 적분구간의 전체시간,  $\sigma_p$ 는 평균 제어력을 나타낸다.

평균성능에 더하여서, 최대응답에 관한 성능 역시 중요하다. 이에 대한 성능지수는 다음과 같다.

$$J_7 = \max(\sigma_{x_{p1}}, \sigma_{x_{p30}}, \sigma_{x_{p50}}, \sigma_{x_{p55}}, \sigma_{x_{p60}}, \sigma_{x_{p65}}, \sigma_{x_{p70}}, \sigma_{x_{p75}}) / \sigma_{x_{p75o}} \quad (7)$$

$$J_8 = \frac{1}{6} \sum_i (\ddot{x}_\pi / \ddot{x}_{\pi o}) \quad i = 50, 55, 60, 65, 70, 75 \quad (8)$$

$$J_9 = x_{p76} / x_{p76o} \quad (9)$$

$$J_{10} = \frac{1}{7} \sum_i (x_\pi / x_{\pi o}) \quad i = 50, 55, 60, 65, 70, 75, 76 \quad (10)$$

여기서,  $x_\pi$ 와  $x_{\pi o}$ 는 각각 제어시 i층의 최대변위, 비제어 시 i층의 최대변위이고,  $\ddot{x}_\pi$ 와  $\ddot{x}_{\pi o}$ 는 각각 제어 시 i층 바닥의 최대가속도, 비제어 시 i층 바닥의 최대가속도이다.

가진기의 능력 제한사항은 최대제어력이 300kN이하이고, 최대 스트로크는 95cm이하이다.

## 4. 제어기의 설계

### 4.1 Lyapunov 제어

피드백 제어기의 디자인에서 안정성 해석을 위해서 Lyapunov의 직접 접근법을 이용할 수 있다.<sup>3)</sup> 이 방법은  $V(z)$ 라고 표시되는 Lyapunov함수를 이용해야하고, 그것은 반드시 시스템 상태변수(z)의 양의 한정 함수(positive definite function)이어야 한다. 초기조건이 안정한 평형점이라고 가정하면, Lyapunov안정성 이론에 따라 만약 Lyapunov함수의 변화율  $\dot{V}(z)$ 가 음의 반한정(negative semi-definite)이라면 구조물의 응답은 Lyapunov관점에서 안정하다. 따라서 제어법칙의 개발에서 그 목표는 가능한 한 음의 변화율( $\dot{V}$ )을 가져오도록 각 장치에 대한 제어 입력을 선택하는 것이다. 다음의 식은 상태공간방정식을 나타낸다.

$$\dot{z} = Az + Bf + HW \quad (11)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}K \end{bmatrix}, H = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}H_1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, A는 상태행렬, B는 제어기의 위치행렬, H는 바람하중의 영향행렬, W는 바람하중이다.

Leitmann(1994)등은 준능동 제어기의 디자인에 Lyapunov의 직접 접근법을 적용했다.

이 방법에서 Lyapunov함수는 다음과 같은 형태로 선택되었다.<sup>4)</sup>

$$V(z) = \frac{1}{2} \|z\|_P^2 \quad (13)$$

$$\|z\|_P = [z^T P z]^{1/2} \quad (14)$$

여기서,  $\|z\|_P$ 는 다음과 같이 안정된 상태의 P-norm이다. P는 실수, 대칭, 양의 한정행렬이고 선형시스템의 경우 행렬 P는 아래와 같은 Lyapunov등식을 이용해서 찾는다.

$$A^T P + PA = -Q_P \quad (15)$$

여기서,  $Q_p$ 는 양의 한정행렬이다.

식(11)과 (12)의 해를 얻기 위한 Lyapunov함수의 변화율은 다음과 같다.<sup>5)</sup>

$$\dot{V} = -\frac{1}{2}z^T Q_p z + z^T P B f + z^T P H W \quad (16)$$

제어 효과를 얻을 수 있는 항은 제어벡터  $f$ 를 포함하고 있는 항이다. 따라서  $\dot{V}$ 를 최소화시키는 제어방법은 다음과 같다.

$$v_i = V_{\max} H((-z)^T P B_i f_i) \quad (17)$$

여기서,  $H(\cdot)$ 은 Heaviside 단계함수(step function)이고,  $f_i$ 는  $i$ 번째 감쇠기에 의해서 생성되어 측정되어진 힘이고,  $B_i$ 는 식(11)에서 B행렬의  $i$ 번째 열이다.

본 연구에서는 구조물의 에너지를 Lyapunov함수로 설정한 후, 그 변화율이 음수가 되도록 하는 제어를 설계함으로써, 제어가 항상 구조물의 에너지를 흡수하도록 한다.<sup>6)</sup>

$$E = \frac{1}{2}z^T Q z, \quad Q = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \quad (18)$$

제어력의 방향은 Lyapunov제어기 디자인 개념에 기초하여 결정된다. 즉, Lyapunov제어기는 시간에 대해 Lyapunov함수를 1차 미분해서 디자인된다. 구조물의 에너지( $E$ )는 본 논문에서 Lyapunov함수로 간주되어지므로 시간에 대한 에너지의 변화율은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= z^T \dot{Q} z = z^T Q (A z + B u + H W) \\ &= -\dot{x}^T C \dot{x} + \dot{x}^T D u + \dot{x}^T H_1 W \end{aligned} \quad (19)$$

식(19)는 모든 시간에서 감쇠행렬  $C$ 가 에너지( $E$ )를 감소시키는 것을 보여준다. 바람하중이 작용하지 않는다면 에너지( $E$ )를 감소시키는 제어력의 방향은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{sgn}(u^T) = -\text{sgn}(x^T D) = -\text{sgn}(\dot{x}) \quad (20)$$

여기서,  $\text{sgn}(\cdot)$ 는 기호함수(sign function),  $x^T D = \dot{x}$ 이다.

#### 4.2 속도 되먹임 포화제어

일반적으로 구조물의 진동제어는 구조물의 감쇠비와 고

유진동수를 변화시킴으로써 구조물의 응답특성을 향상시키게 된다. 이 중에서 고유진동수의 변화에 의한 응답특성의 개선보다는 감쇠비의 증가에 의한 응답특성의 개선이 용이하다. 감쇠비 증가의 효과는 변위-속도 되먹임 보다는 속도 되먹임에 의한 효과가 더 좋으므로 속도만을 피드백하는 제어를 디자인하여도 제어의 성능이나 효율에는 큰 차이가 없다. 따라서 속도 되먹임 제어기에서 제어력은 다음과 같이 표현될 수 있다.<sup>7)</sup>

$$u = -u_{\max} \text{sat}\left(\frac{G}{u_{\max}} \dot{x}\right), \quad \text{sat}(a) = \begin{cases} 1 & (a > 1) \\ a & (|a| < 1) \\ -1 & (a < -1) \end{cases} \quad (21)$$

여기서,  $\text{sat}(\cdot)$ 는 다음과 같이 정의되는 함수이고,  $u_{\max}$ 는 제어력의 최대값이고,  $G$ 는 포화현상 발생 이전의 선형제어 구간 제어이득이다. 제어력을 비선형 제어이득을 가지는 속도 되먹임 형태로 다시 쓰면,

$$u = -f(\dot{x}) \dot{x}, \quad f(\dot{x}) = u_{\max} \text{sat}\left(\frac{G}{u_{\max}} \dot{x}\right) \frac{1}{\dot{x}} \quad (22)$$

단,  $f(\dot{x})$ 는 속도  $\dot{x}$ 에 대한 비선형 제어이득이다. 그림 2는 속도포화제어의 제어력 개념도이다.

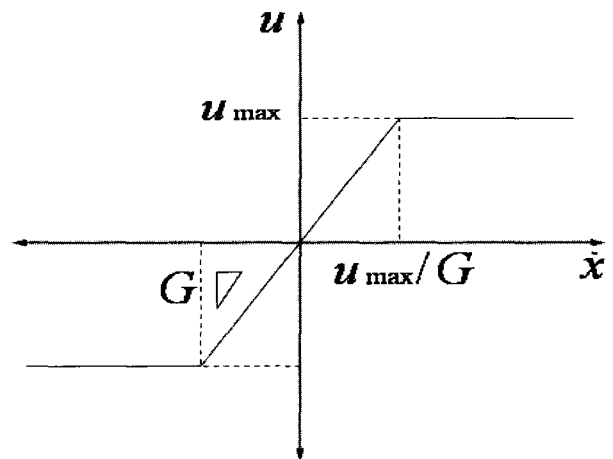


그림 2 포화제어의 제어력 개념도

다음 그림 3에서 6은 속도 되먹임 제어 알고리즘에서 제어이득과 최대제어력의 변화에 따른 성능지수의 변화경향을 보여준다.

그림 3과 그림 4에 나타난 속도 되먹임 포화제어 알고리즘에서 RMS가속도( $J_1, J_2$ ), RMS변위( $J_3, J_4$ )에 대한 성능을 나타내는 각각의 성능지수는 제어력이 증가할수록 좋아지고, 제어이득( $G$ )이 클수록 좋아지는 경향이 있지만

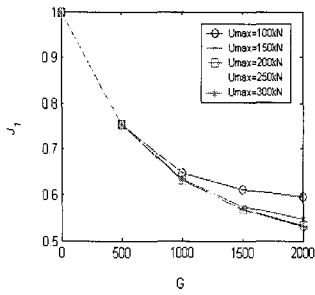


그림 3 제어이득과 성능지수(1)

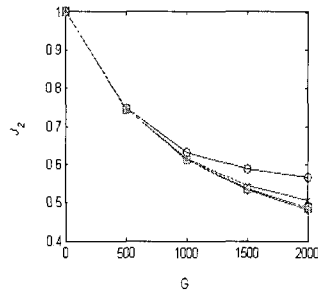


그림 4 제어이득과 성능지수(2)

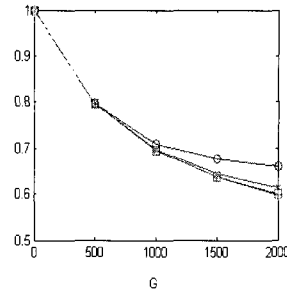


그림 5 제어이득과 성능지수(3)

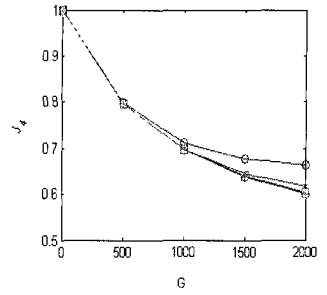
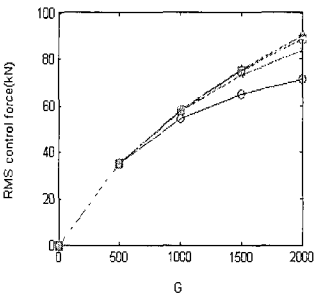
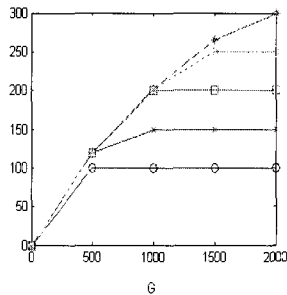
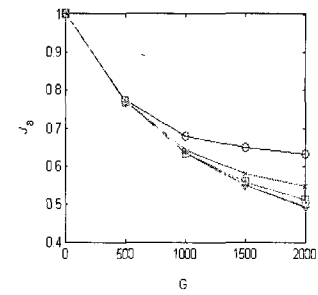
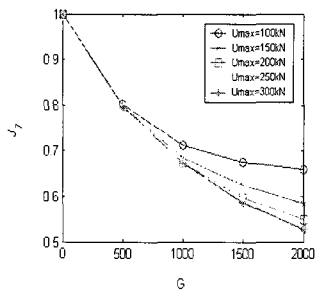


그림 6 속도 feedback 제어의 제어력



제어력이 150kN보다 클 때는 그 증가가 매우 작아서 제어력이 크더라도 별 차이를 보이지 않는다.

그림 4에서 최대가속도를 나타내는 성능지수인  $J_7$ 과  $J_8$  역시 제어력이 증가할수록 좋아지고, 제어이득( $G$ )이 클수록 좋아지는 경향이 있다. 하지만 최대제어력이 일정값 이상일 때는 그 변화가 극히 미소하다. 그림 6에서 최대제어력이 100kN인 경우에 제어이득이 500일 때까지는 제어력이 증가하지만, 제어이득이 500이상일 경우에는 포화현상이 일어난다. 100kN이상의 최대제어력에서도 포화현상이 발생하는 제어이득의 값은 다르지만 비슷한 경향을 보이고 있다. RMS제어력의 경우, 5가지 경우 모두 100kN 이하의 값을 가진다.

### 4.3 뱅뱅 제어<sup>8)</sup>

뱅뱅함수는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$u_j(t) = -sgn[b_j^T(X(t), t)P(t)] \quad , \quad j=1, 2, \dots, r \quad (23)$$

여기서,  $sgn$ 은 signum함수를 나타내고, 함수의 독립변수가 양이면 +1, 음이면 -1로 정의된다. 시간-최적 제어 문제가 평균이라면, 최적 제어  $u(t)$ 의 구성요소는 구분적으로 시간에 대한 상수함수이다. 이와같은 함수가 뱅뱅으로 알려져있고, 앞의 서술된 것은 뱅뱅이론이라 부른다. 위의

식(23)은 다음과 같은 벡터의 형태로 나타낼 수 있다.

$$u(t) = -SGN[B^T(X(t), t)P(t)] \quad (24)$$

여기서,  $SGN$ 은 벡터의 모든 구성성분에 적용된 signum 함수를 나타낸다. 뱅뱅이론은 시간-최적 제어가 목표에 도달할 때까지 최대 제어력을 쓰면서 얻어지는 이론이다.

최소시간을 들여서, 구조물의 에너지를 소산시키는 뱅뱅 제어력은 다음과 같다.

$$u_i = -sgn(\dot{x}_i)H(|\dot{x}_i| - \epsilon_0)u_{max} \quad (25)$$

여기서,  $H(|\dot{x}_i| - \epsilon_0)$ 는 경계층(Boundary Layer,  $\epsilon_0$ ) 안쪽의 원하지 않았던 채터링현상(chattering effect)를 제거하는 Unit step function이다.

그림 7에서, RMS가속도와 경계층과의 관계를 보면, 경계층의 값이 3~4를 전후하여 최대의 성능을 보이는 것을 볼 수 있으며 50층 이상에서는 약간 다르지만, 1~2사이에서 최대성능을 보이고 있다. 그림 8은 RMS변위에 대한 성능을 보여주고 있는데, 경계층의 값이 0에 가까울 때, 즉 RMS변위는 경계층이 없을 때 최대의 성능을 발휘하는 것으로 보여진다.

그림 9에서 최대가속도에 대한 경계층과 최대제어력의 관계는 최대제어력의 크기가 클수록 성능이 좋아지며, 경계층의 값이 250정도까지는 별다른 변화가 없지만, 250

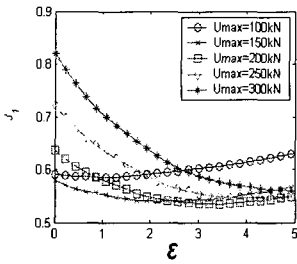


그림 7 경계층( $\epsilon$ )과 RMS가속도 성능지수(1)

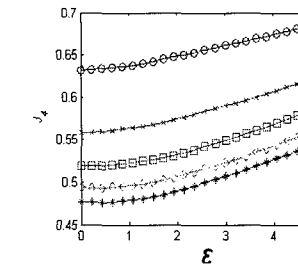
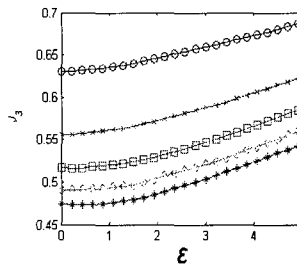
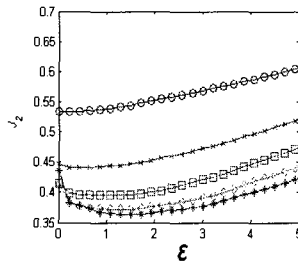


그림 8 경계층( $\epsilon$ )과 RMS가속도 성능지수(2)

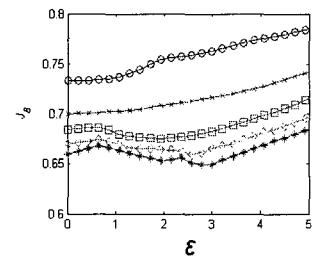
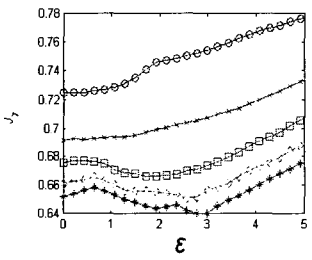


그림 9 경계층( $\epsilon$ )과 최대가속도 성능지수(3)

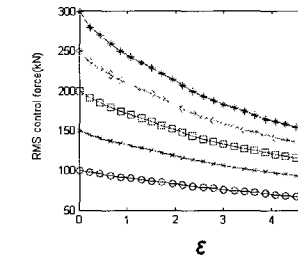
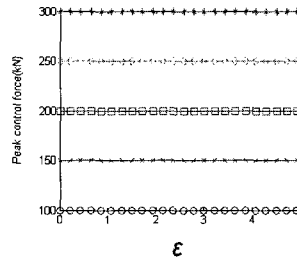


그림 10 뱅뱅제어의 제어력

이상에서는 경계층의 값이 커질수록 성능이 좋아지지 않는 경향을 가지며, 그림 10에서 볼 수 있듯이 경계층은 최대 제어력에는 상관이 없으며, RMS제어력은 경계층의 값이 클수록 줄어드는 경향을 보이고 있다.

#### 4.4 에너지소산 제어

기존의 속도 되먹임 제어가 항상 구조물의 속도에 비례하도록 제어력을 산정하는데, 이 경우 변위의 크기가 크고 속도의 크기가 작은 구간에서는 제어력이 작아지게 된다. 변위가 큰 구간이 구조물의 파괴위험률이 더 증가한다는 것을 고려할 때, 이 때 제어력을 작게 사용한다는 것은 제어목적이 변위인 경우 알맞지 않다. 따라서 변위와 속도의 함수로 제어이득을 산정하며, 이 때 산정된 제어이득은 구조물의 에너지에 비례하기 때문에 본 연구에서는 에너지 제어이득이라 명명한다.

구조물의 에너지를 최상층의 속도와 변위만으로 정의한다. 이는 대상구조물과 같이 구조물의 거동이 1차 모드에 의해 지배되는 경우에 유효하다.

$$E_g = \left| \frac{x_{76}}{SD_n} \right|^\alpha + \left| \frac{\dot{x}_{76}}{SV_n} \right|^\alpha \quad (26)$$

여기서,  $SD_n$ 과  $SV_n$ 은 에너지의 크기를 정규화하기 위해 사용된 상수이며, 본 연구에서는 제어시 예측되는 최대 변위와 최대속도를 사용하였다.  $\alpha$ 는 응답의 변화에 따른

제어이득의 변화율을 조정하기 위해 설계자에 의해 주어지는 양의 상수이다. 따라서, 제어력은 다음과 같다.

$$u_E = -E_g u_e \operatorname{sgn}(\dot{x}_{76}) \quad (27)$$

여기서,  $u_e$ 는 기준이 되는 제어력의 크기로  $SD_n$ ,  $SV_n$ ,  $\alpha$ 의 크기 그리고 설계제한조건에 따라 주어져야 한다. 이러한 에너지 제어이득이 과도한 제어력을 주는 경우, 상수  $SD_n$ 과  $SV_n$ 의 크기를 조정하거나, 제어력의 포화현상을 고려하여야 한다.

그림 11과 12에서, RMS가속도는  $u_e$ 값이 증가할수록 전반적으로 제어성능이 좋아지지만  $\alpha$ 값이 1이하에서는  $u_e$ 값이 150~200사이에서 제어성능이 가장 좋고, 증가할수록 오히려 제어성능이 나빠진다. 50층이상의 경우에는  $\alpha$ 값이 작을수록,  $u_e$ 값이 증가할수록 제어성능은 좋아지고 RMS변위의 경우도 이와같은 경향을 보인다.

그림 13에서 최대가속도에 대한 제어성능은  $\alpha$ 와  $u_e$ 가 작을수록 좋아지고  $\alpha$ 가 1이하일 때는,  $u_e$ 가 150에서 가장 좋은 성능을 보인다. 그림 14에서, 최대제어력은  $\alpha$ 와  $u_e$ 에 상관없이 모두 포화현상이 일어났고, RMS제어력의 경우는  $\alpha$ 와  $u_e$ 가 작을수록 제어력이 적음을 보여준다.

위치에너지가 증가하는 순간에만 제어하는 경우를 고려하면 제어력은 다음과 같다.<sup>9)</sup>

$$u_{E-II} = \begin{cases} -E_g u_e \operatorname{sgn}(\dot{x}_{76}) & \text{if } \operatorname{sgn}(x_{76} \cdot \dot{x}_{76}) > 0 \\ 0 & \text{if } \operatorname{sgn}(x_{76} \cdot \dot{x}_{76}) < 0 \end{cases} \quad (28)$$

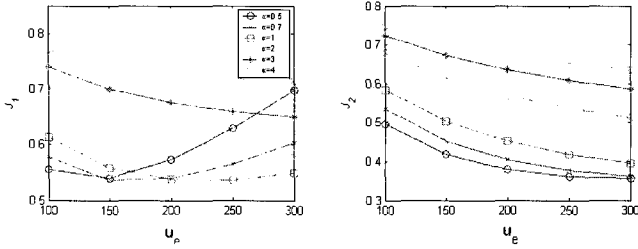


그림 11 에너지게인제어의 성능지수(1)

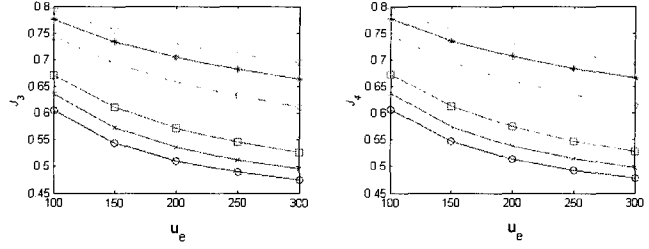


그림 12 에너지게인제어의 성능지수(2)

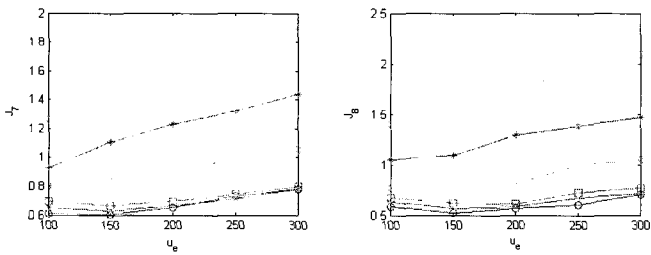


그림 13 에너지게인제어의 성능지수(3)

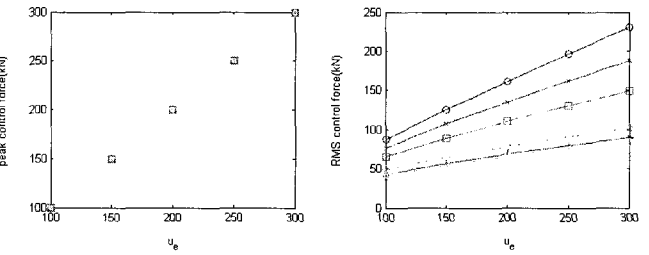


그림 14 에너지게인제어의 제어력

#### 4.5 각 제어 알고리즘의 성능 비교

300초까지의 시간이력에 대한 변위와 제어력을 보여주고 있는 그림 15, 16에서 비제어시 보다 제어시의 변위나 75층의 가속도가 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 제어력의 경우에 뱅뱅제어는 양의 최대값과 음의 최대값으로 스위치 되는 것을 볼 수 있고, 그 크기는 최상층의 변위에 상관없이 항상 일정한 것을 볼 수 있다. 반면에 속도 되먹임 제어는 변위는 적으면 적은 제어력으로, 변위가 크면 큰 제어력으로 제어하고 있음을 볼 수 있다. 에너지 게인 제어는 제어력이 뱅뱅제어와는 달리 구조물의 에너지에 비례하게 제어력을 사용하고 있음을 볼 수 있다. 다음의 표 1은 속도 되먹임 제어, 뱅뱅제어, 에너지게인제어(I), 그리고 위치에너지가 증가한 경우에만 제어한 경우의 에너지게인제어(II) 4가지의 성능지수결과를 나타낸 것이다. 변위 성능지수에서는 에너지게인제어가 뱅뱅제어나 속도 되먹임 제어보다 평균값이나 최대값에서 모두 뛰어난 것을 알 수 있고, 최대가속도 성능지수에서는 속도 되먹임 제어가 좀 더 나음을 알 수 있다. 제어력을 나타내는 성능지수인  $J_5$ 에서 평균값에서는 속도 되먹임 제어방법이 최대값에서는 뱅뱅제어와 에너지게인제어가 더 좋음을 알 수 있다. 하지만, 에너지게인제어에서 RMS제어력을 너무 많이 사용되는 단점이 있으므로, 이를 보완하기 위해서 위치에너지가 변할 때만 제어를 한 에너지게인제어 II를 사용하여 RMS제어력을 적게 사용하고, 최대가속도 응답의 성능을 가장 좋게 할 수 있다.

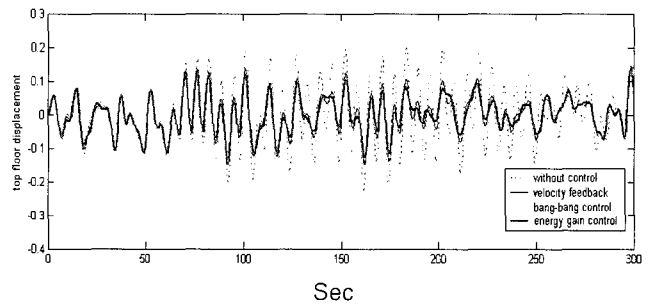


그림 15 최상층 변위

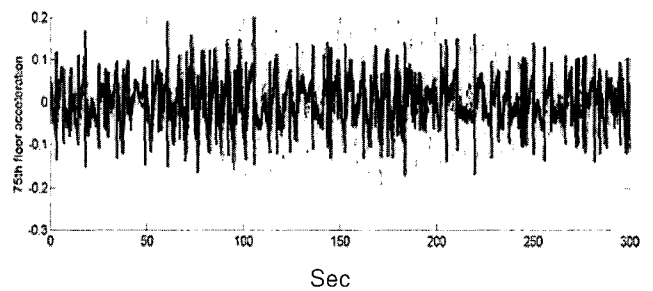


그림 16 75층 가속도

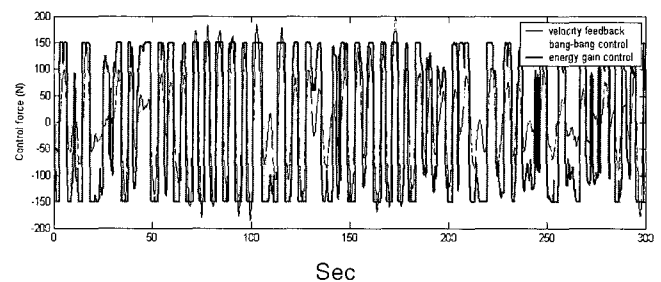


그림 17 속도 되먹임제어, 뱅뱅제어, 에너지게인제어의 제어력 비교

표 1 각 제어 알고리즘의 성능 비교

제어 알고리즘	속도되먹임 제어 알고리즘	뱅뱅제어 알고리즘	에너지계인 제어 알고리즘 I	에너지계인 제어 알고리즘 II
$J_1$	0.5430	0.5490	0.5505	0.5179
$J_2$	0.4998	0.4887	0.4514	0.5815
$J_3$	0.6114	0.6002	0.5685	0.6701
$J_4$	0.6133	0.6022	0.5707	0.6722
$J_7$	0.5442	0.6069	0.5815	0.6125
$J_8$	0.5116	0.5848	0.5704	0.6374
$J_9$	0.7299	0.7155	0.6945	0.7777
$J_{10}$	0.7380	0.7239	0.7034	0.7830
RMS제어력	84.6107	99.4837	125.3577	94.4714
최대제어력	297.8956	150.0000	150.0000	150.0000

5. 결 론

본 논문에서는 Lyapunov제어기 설계이론에 기초하여, Lyapunov함수를 구조물의 에너지로 설정하고 구조물의 에너지를 항상 소산시키도록 제어 알고리즘을 적용하여 풍 하중을 받는 구조물에 대한 수치해석을 수행하였다. 기존의 속도 되먹임 제어 알고리즘과 뱅뱅제어 알고리즘을 제안된 에너지계인제어 알고리즘과 비교 검토하였다. 기존의 제어 알고리즘들과 비교하여, 본 논문에서 제안된 에너지계인제어 알고리즘은 속도와 변위의 함수로 제어이득을 산정하고 제어이득을 구조물의 에너지에 비례하도록 설정하였기 때문에 기존의 속도가 작고, 변위가 큰 구간에서의 제어시에도 효과적으로 제어를 할 수 있음을 수치해석을 통하여 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 "건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연C103A1040001-03A0204-00110)에 의한 것임"을 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Yang, J.N., Wu, J.C., Agrawal, A.K., Li, Z., "Sliding mode control for seismic-excited linear and nonlinear civil engineering structures", Technical Report NCEER-95-0017, Notional Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1994
2. Yang, J.N., Wu, J.C., Samali, B., Agrawal, A. K., "A Benchmark Problem For Response Control of Wind-Excited Tall Buildings", *Proceedings Of Second World Conference on Structural Control*, Vol. 2, 1998, pp. 1407~1416.
3. Junkins, J. L., Kim, Y., Introduction to Dynamics and Control of Flexible Structures, *American Institute of Aeronautics and Astronautics, INC.*, 370 L'Enfant Promenade, SW, Washington, DC 20024-2518
4. Jansen, L. M., Dyke, S. J., "Semi- Active Control Strategies for MR Dampers: A Comparative Study", *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol.126, No.8, pp.795~803
5. Wang, X., Gordaninejad, F., "Lyapunov-based Control of a Bridge Using Magneto-Rheological Fluid Dampers", *Journal of Intelligent Material System and Structures*, in press, 2003
6. Min, K.W., Hwang, J.S., Lee, S.H., Chung, L., "Probabilistic approach for active control based on structural energy", *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2003, Vol.32, pp.2301~2318
7. 박지훈, "불규칙 가진에 대한 동적응답의 확률분포에 기초한 건축구조물의 진동제어", 박사학위논문, 서울대학교, 2002
8. Burghes, D.N., Graham, A., *Intorduction To Control Theory, Including Optimal Control*, JOHN WILEY & SON
9. 황재승, "건축구조물의 능동제어에 관한 실험적 연구", 박사학위논문, 서울대학교, 1998
10. Meirovitch, L., *Dynamics and Control of Structures*, A Wiley-Interscience Publication
11. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey, 1995