

퍼지관리제어기법을 이용한 지진응답의 능동제어

Active Control of Earthquake Responses Using Fuzzy Supervisory Control Technique

박 관 순*
Park, Kwan Soon

고 현 무**
Koh, Hyun Moo

옥 승 용***
Ok, Seung Yong

국문요약

지진하중을 받는 구조물의 능동제어를 위한 퍼지관리제어기법(fuzzy supervisory control technique)에 관하여 연구하였다. 제시하는 제어기법은, 구조물에 발생하는 변위 및 속도 등의 정보를 이용하여 퍼지추론과정을 거쳐서 구조물의 상태를 파악함으로써 기설계된 제어이득들을 실시간으로 관리 및 조정한다. 알고리즘의 검증을 위하여 지진하중을 받는 3자유도 구조물에 대하여 수치모사를 수행하여 정적이득을 갖는 LQR제어기와 비교하였으며, 해석결과 제시한 제어기는 지진응답의 제어에 매우 효과적임을 알 수 있다.

주요어 : 지진하중, 능동제어, 퍼지추론과정, 관리제어기법

ABSTRACT

Fuzzy supervisory control method is studied for the active control of earthquake excited structures. The proposed algorithm supervises and tunes previously designed control gains by evaluating the state of a structure through the fuzzy inference mechanism, which uses the information of relative displacements and velocities. Example designs and numerical simulations of earthquake excited three degrees of freedom structures are performed to prove the validity of the proposed control algorithm. Comparative results with conventional LQR method show that the proposed method is effective for the vibration suppression of earthquake excited structures.

Key words : earthquake load, active control, fuzzy inference mechanism, supervisory control method

1. 서 론

최근에 건설되는 고층빌딩이나 타워 및 장대교량 등의 장대구조물들은 기존의 구조물에 비하여 심미적인 요소가 강조되기도 하며 이에 따라서 더욱 유연하고 낮은 감쇠비를 특징으로 하며 이는 더욱 가속화될 전망이다. 이러한 특성들로 말미암아 장대-유연구조물들은 지진이나 바람과 같은 자연적인 외부하중에 대하여 보다 취약하게 되며, 이에 따라서 구조물에 발생하는 진동을 보다 효율적으로 억제하는 방법에 관한 연구와 적용이 이루어져왔다.^{(1),(2)} 특히, 1990년대이후 개념적인 연구로서만 제시되었던 능동제어시스템이 컴퓨터, 센서 및 하중전달메카니즘 등 여러 분야의 기술발달로 인하여 실구조물에 직접 적용되고 있다.^{(3),(5)} 현재까지는 주로 풍하중에 의한 사용성 개선에 매우 효율적인 것으로 알려져 있으나^{(6),(8)}, 보다 적극적인 개념으로 지진에 의한 구조물의 피해를 최소화하기 위하여 능동제어시스템을 통하여 구조물의 안정성까지도 개선하려는 연구가 이루어지고 있다.⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾ 이러한 능동제어시스템의 도입을 통한 구조제어의 목표는 제어법칙에 의하여 얻어진 보상기를 원시스템에 첨가함으로써 외란에 의한 구조물의 응답을 감소시켜 구조물의 사용성과 안정성을 확보하는 데에 있다.

일반적으로 주어진 구조물에 대한 능동제어시스템은 제어대상이 되는 구조물의 주요 응답 등을 제어변수로 선정하고 이들을 주어진 제어법칙에 따라서 최소화하는 제어기로 구성된다. 이 때, 대부분의 제어기 설계는 대상 구조물에 대하여 선택된 하나의 제어이론에 의하여 이루어지는 것이 보통이다. 여기서 주어진 제어법칙이란 선택된 제어변수들로 구성되어지는 하나의 목적함수를 의미하기도 하므로 어떠한 제어법칙을 적용하느냐에 따라서 같은 하드웨어를 가진 시스템이라 할지라도 다른 성능을 보이게 된다. 그러나 구조물의 응답은 주어지는 외부하중에 따라서 매 순간 다양하게 발생하게 되므로 여러 개의 제어목적에 따라 설계한 제어기들을 제어력이 가해지는 순간마다 효과적으로 사용할 수 있다면, 하나의 제어법칙에 의하여 얻어진 제어기보다 바람직한 성능을 얻을 수 있을 것이다.

이 연구에서는 제어력이 가해지는 매 순간마다 되먹임 신호의 특성에 따라서 기설계된 제어기들을 적절하게 조율함으로써 보다 효율적인 제어성능을 갖도록 하는 퍼지관리제어기법(fuzzy supervisory control technique)을 제시한다.

제시하는 방법은 대상 구조물에 대한 여러 가지 입력정보를 통하여 구조물의 현재 상태의 거동에 따라 여러 가지 목적으로 설계된 제어기를 적절히 적용함으로써 보다 높은 제어성능을 발휘하도록 하는 제어기법으로서, 기존의 제어법칙들로부터 얻어지는 제어이득들을 구조물의 상태에 따라서 조절하고 분배하는 계층적인 구조를 띄게 된다. 퍼지관리제어를 위한 입력으로는 외부하중입력, 구조물의 출력응답, 제

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 계약조교수(대표전자 : kspark@sel.snu.ac.kr)

** 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

*** 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2001년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 5. 29 / 심사종료일 : 2001. 6. 30)

여기의 출력뿐만 아니라 기술자의 공학적인 판단까지도 포함시킬 수 있다. 특히 지진하중을 받는 구조물의 경우 층간 상대변위는 구조물의 안정성에 영향을 주는 중요한 인자가 된다. 따라서 지진 하중발생시 전체적인 응답을 감소시키기 보다는 각 층에 발생하는 최대변위를 줄일 수 있도록 각각 제어기들을 설계하고 이들간의 참여도를 퍼지연산에 의하여 판단하고 제어력을 결정한다.

이 연구에서 제시하는 퍼지관리제어기법의 적용성과 제어효과를 검증하기 위하여 지진하중을 받는 구조물에 대하여 제어기를 설계하고 수치모사를 수행한다. 3자유도 전단 빌딩에 능동형텐던제어시스템(active tendon control system)이 장착된 경우에 대하여, 널리 알려진 LQR방법⁽¹²⁾을 이용하여 특정 층의 응답을 제어하는 제어기들을 설계하고 퍼지관리제어기법을 적용한다. 또한 결과들을 LQR로부터 얻어지는 정적제어이득만을 가지는 제어기와 비교함으로써 제시한 방법의 제진성능을 검증한다.

2. 퍼지관리제어기법

여기에서는 대상구조물의 제어목적에 따른 선형제어기들로부터 얻어지는 제어이득들을 퍼지추론과정을 통하여 조정하는 제어기법을 제시한다. 지진발생시 구조물에 발생하는 변위, 속도 등의 정보를 입력자료로 사용하여 퍼지연산을 수행함으로써 각 제어이득을 실시간으로 조정하는 방법과 지진하중을 받는 구조물의 운동방정식으로부터 퍼지관리제어기법을 적용한 능동제어장치가 장착된 폐루프시스템(closed-loop system)의 상태공간방정식 등을 기술한다.

2.1 개요

이 연구에서 제시하고자 하는 퍼지관리제어기법은 대상 구조물에 대한 여러 가지 입력정보를 이용하여 구조물의 현재 상태의 거동을 평가하고 퍼지연산을 수행함으로써, 매 순간 보다 효율적인 제어성능을 발휘할 수 있도록 미리 설계된 제어기들을 조율하는 제어기법으로서, 그림 1과 같은 계층적인 구조를 띄게 된다.

이러한 퍼지제어기법은 선형제어이론을 적용한 제어기의 설계와 제어기들간의 조율을 위한 제어이득의 실시간 관리 시스템을 설계하는 2단계로 구성된다. 먼저, 선형제어기의 설계는 제어목적에 해당하는 제어변수를 모두 고려하는 기존의 제어기 설계와는 달리, 제어변수를 독립적으로 고려한 제어기를 각각 설계한다. 즉, 지진응답의 최적제어를 위하여 특정 층의 상대변위만을 제어변수로 선정하여 여러 개의 제어기들을 설계한다. 선형제어기의 설계에는 제어목적에 따라 서로 다른 제어법칙을 혼합하여 적용할 수도 있으나 여기에서는 구조물의 안정성(stability)을 보장하는 LQR제어방법을 사용한다. 널리 알려진 LQR등의 제어법칙에서 층간상대변위를 제어변수로 선정하는 것은 가중행렬의 조정을 통하여 이루어진다.⁽⁹⁾ 이렇게 설계된 각각의 제어기들은

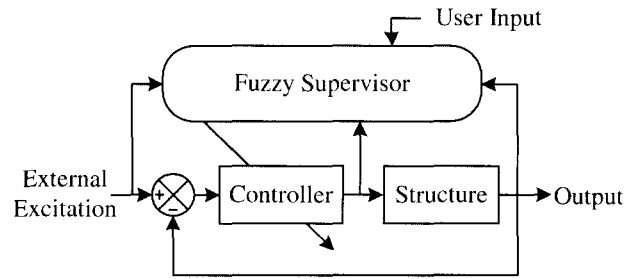


그림 1 퍼지관리제어시스템의 개념도

각층의 상대변위를 모두 제어변수로 하여 설계된 제어기보다 전반적인 제어성능은 떨어질 수 있으나 고려한 특정 층의 응답에는 매우 효과적일 수 있다. 따라서 제시하는 방법은, 특정목적용을 가지고 다르게 설계된 제어기들부터 얻어지는 제어력을 구조물에 작용하는 하중과 거동특성에 따라 적절히 분배함으로써 보다 뛰어난 제진효과를 얻을 수 있다.

2.2 퍼지연산을 통한 제어이득의 조정

이 연구에서는 매 순간 변화하는 구조물의 거동특성에 따라서 제어이득을 조정하는 방법으로 퍼지이론⁽¹³⁾을 사용한다. 즉, 관리제어시스템의 설계는 입력정보를 바탕으로 여러 개의 설계된 선형제어기들을 조율하기 위한 퍼지연산과정을 갖게 된다. 이러한 퍼지 연산은 그림 2와 같이 퍼지화(fuzzification), 퍼지규칙에 근거한 퍼지추론엔진(inference engine), 비퍼지화(defuzzification)의 3단계로 구성되고, 각 단계는 입력에 대한 소속함수(membership function), 퍼지규칙표(fuzzy rule table), 그리고 출력에 대한 소속함수를 구성요소로서 갖는다.

퍼지화과정은 식 (1)과 같이 주어진 입력을 퍼지 제어시스템 내에서 정의되는 퍼지 변수들에 대한 확실성의 정도를 나타내는 퍼지값으로 변환하는데, 이러한 입력에 대한 퍼지값으로의 사상관계를 나타내는 것이 소속함수이다.

$$\mu(x) = \begin{cases} \mu_i(x) & \text{if } x \in [x_{\min}^i, x_{\max}^i] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

여기서, x 는 입력, $\mu_i(x)$ 는 i 번째 소속함수, $[x_{\min}^i, x_{\max}^i]$ 는 i 번째 소속함수가 정의되는 x 축의 범위를 의미한다.

퍼지관리제어시스템에서 입력 소속함수는 설계된 선형제어기의 참여도를 평가하기 위하여 구조물의 응답을 물리적인 의

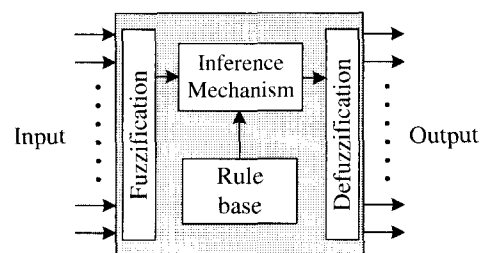


그림 2 퍼지 연산과정

미를 갖는 여러 개의 퍼지 변수들로 나누어 각 변수에 따라 정의한다. 예를 들면, 그림 3에서 x 축은 구조물의 변위나 속도 등의 구조물 응답에 해당하는 입력정보이고, 퍼지변수는 입력의 크기에 따라 VL(very large), L(large), M(moderate), S(small), VS(very small) 등으로 정의할 수 있다. 이 때, 소속함수는 퍼지변수들에 따라 $\mu(x) = \{\mu_{VS}(x), \mu_S(x), \mu_M(x), \mu_L(x), \mu_{VL}(x)\}$ 으로 구성된다.

그리고, 추론엔진은 미리 결정된 퍼지규칙표에 따라 퍼지화 과정을 통하여 결정되는 입력퍼지값들을 출력에 해당하는 퍼지값으로 변환시켜주는 역할을 수행한다. 입력과 출력에 대한 변수들의 조합관계는 조건문(if-then)을 사용함으로써 표현할 수 있다. 여기에서는 지진응답의 진동제어를 위하여 i 층 변위와 속도의 입력정보로부터 i 층 선형제어기의 참여도를 결정하는 규칙을 식 (2)와 같이 표현함으로써 관리제어를 수행한다.

$$\text{퍼지규칙 : If } x_i \text{ is } \Omega \text{ and } \dot{x}_i \text{ is } \Omega, \text{ then } a_i \text{ is } \Omega \quad (2)$$

여기서, x_i 는 i 층의 변위입력, \dot{x}_i 는 i 층의 속도입력, a_i 는 i 층 선형제어기의 참여도, Ω 는 퍼지변수로서 { VS, S, M, L, VL}에 해당하며, AND, OR 논리관계에 대한 퍼지연산에는 각각 Min, Max방법을 적용하였다.

마지막 단계인 비퍼지화과정은 추론과정에서 전제들간의 논리적연산에 의해 결정된 출력값을 물리적인 의미를 갖는 출력정보로 역환산하는 과정으로서, 일반적인 퍼지제어시스템에 적용되는 경우 비퍼지화에 의해 결정되는 정보는 구조시스템에 가하는 제어력에 해당하지만, 제안하는 방법에서는 제어목적에 따라 기설계된 제어기들의 참여도를 의미한다. 따라서, 그림 4와 같은 출력에 대한 소속함수를 사용하는 경우, x 축은 기설계된 제어기들의 참여도이고, y 축은 추론과정에서 수행된 전제들간의 논리적 연산을 통한 퍼지값이 된다.

각 선형제어기들의 참여도는 해당하는 층의 응답을 입력 정보로 하여 무게중심법(center of gravity method)을 적용하여 식 (3)으로 표현될 수 있다.

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_R} b_j^i \mu_j^i}{\sum_{j=1}^{N_R} \mu_j^i} \quad (3)$$

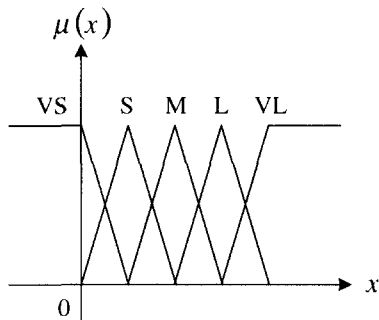


그림 3 입력 소속함수

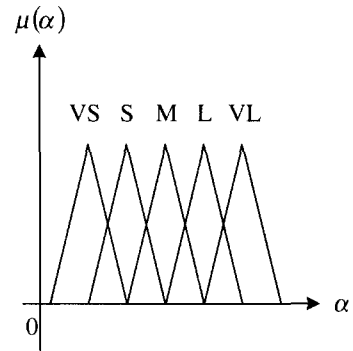


그림 4 출력 membership함수

여기서, N_R 은 주어진 입력에 대하여 적용되는 규칙의 개수, μ_j^i 는 i 층의 입력정보에 대하여 j 번째 규칙에 따른 출력 소속함수값, b_j^i 는 그림 4에서의 x 축의 값으로서, 해당하는 출력 소속함수의 무게중심을 의미한다.

2.3 퍼지관리제어기를 적용한 페루프시스템의 상태공간방정식

외부하중을 받는 n 개의 자유도를 갖는 구조시스템은 일반적으로 식 (4)와 같은 2차의 미분방정식으로 표현된다.

$$M\ddot{q}(t) + C\dot{q}(t) + Kq(t) = E_w f(t) + E_u u(t) \quad (4)$$

여기서, M, C, K 는 각각 $[n \times n]$ 차수를 갖는 질량, 감쇠, 강성행렬, $\ddot{q}(t), \dot{q}(t), q(t)$ 는 $[n \times 1]$ 차수를 갖는 시스템의 가속도, 속도, 변위벡터, $f(t)$ 는 외부하중벡터, $u(t)$ 는 제어력벡터, 그리고 E_w, E_u 는 각각 외부하중과 제어력의 작용위치를 자유도별로 표현하는 벡터이다.

상태벡터(state vector)를 식 (5)와 같이 시스템의 변위와 속도벡터로서 정의하면,

$$x(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

전체 구조시스템의 운동방정식은 식 (6)과 같은 1차의 미분방정식으로 표현되는 상태공간방정식으로 변환된다.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B_w f(t) + B_u u(t) \quad (6)$$

여기서, $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$ 으로 표현되는 시스템행렬이고, $B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E_w \end{bmatrix}$, $B_u = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E_u \end{bmatrix}$ 는 각각 외란행렬과 제어행렬이다.

퍼지관리제어기법은 퍼지연산과정을 통하여 기설계된 제어기들에 대하여 매 순간 참여도를 결정하게 되므로, 식 (7)과 같은 페루프시스템을 구성하고, 그림 5와 같은 블록선도로 표현될 수 있다.

$$\dot{x}(t) = \left(A - \sum_{i=1}^p \alpha_i(t) B_u G_i \right) x(t) + B_w f(t) \quad (7)$$

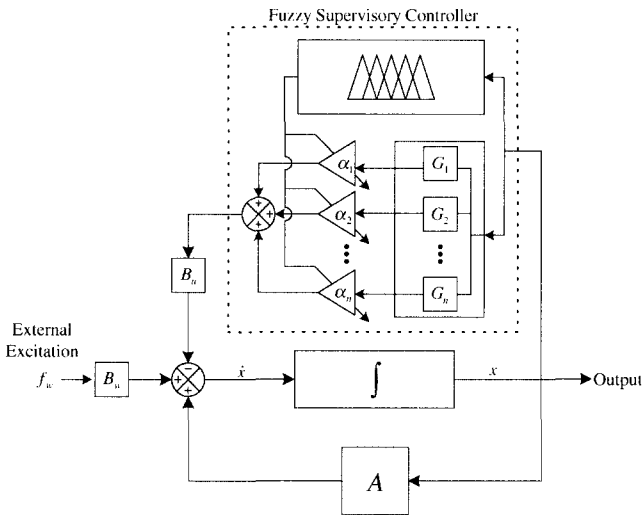


그림 5 퍼지 제어관리시스템의 블록선도

여기서, p 는 전체 제어목적의 개수, G_i 는 i 번째 제어목적에 해당하는 선형제어기, $\alpha_i(t)$ 는 퍼지관리제어기법에 의해 시간 t 에서 결정되는 i 번째 제어이득의 참여도로서 양의 값을 갖는다.

3. 제어기 설계 및 수치모사

제어기 설계 및 수치모사를 위한 대상구조물로 그림 6의 3층 전단빌딩모형을 사용하였으며, 제어형식은 active tendon system을 각 층에 설치하였다고 가정하였다. 각 층의 질량과 강성은 각각 345,600kg, $1.2 \times 10^5 \text{ kN/m}$ 으로 모든 층에 대하여 동일하고, 감쇠비는 모든 모드에 대하여 1%라고 가정하였다. 해석대상 구조물의 고유진동수는 1.32, 3.70, 5.34(Hz)이다. 외부입력으로는 El Centro 지진입력(1940)과 Mexico 지진입력(1985)을 사용한다.

퍼지관리제어기법을 적용하기 위한 선형제어기는 식 (8)과 같이 정의되는 성능지수를 최소화하는 LQR제어기법을 이용하여 설계하였다.

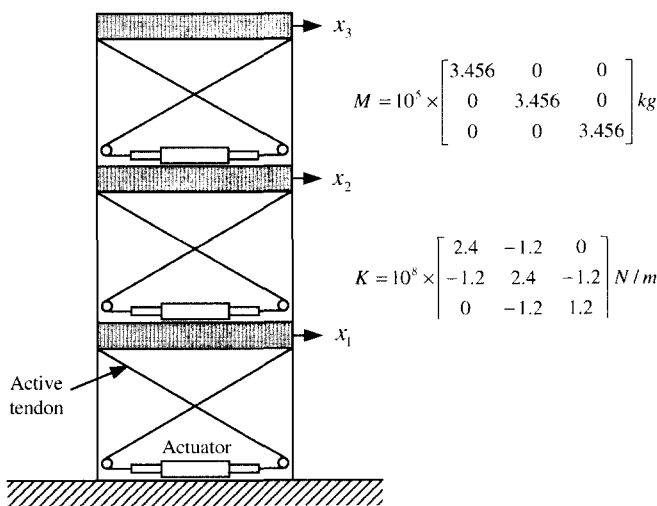


그림 6 3층 전단빌딩 모형

$$PI = \int_0^{\infty} \{x^T Q x + u^T R u\} dt = \int_0^{\infty} \{x^T C_i^T C_i x + u^T r \cdot I_{3 \times 3} u\} dt \quad (8)$$

여기서, x 는 지반에 대한 각 층의 상대변위, C_i 는 i 층의 상대변위 x 를 층간 상대변위로 변환시켜주는 행렬, u 는 제어력, $r = 10^{-16}$ 은 제어력에 대한 가중값이다.

주어진 가중행렬 $R = r \cdot I_{3 \times 3}$ 에 대하여, 각 층의 층간 상대변위만을 제어변수로 선정하여 3개의 선형 제어기를 각각 설계하였고, 이 연구에서 제안하는 알고리즘의 제어성능을 비교하기 위한 제어기로서 전 층의 층간 상대변위를 제어변수로 선정하여 응답의 전체 합을 최소화하는 일반적인 LQR 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기들을 적용한 해석 결과로 각 층의 최대응답, RMS(root mean square)응답 및 최대 제어력이 표 1에 제시되어 있다. 표 1에서 전 층을 제어변수로 고려한 경우($Q = C_a^T \cdot C_a$), 1, 2, 3층에 설치한 가진기들에 발생하는 최대 제어력이 각각 2111, 1606, 863(kN)이고, 1, 2, 3층의 각각 최대 층간 상대변위는 1.481, 1.261, 0.79(cm)인 반면, 1층만을 제어변수로 고려한 경우($Q = C_1^T \cdot C_1$)의 1층 가진기에 발생하는 최대 제어력은 1847(kN)이면서도 1층의 최대 층간 상대변위는 1.309(cm)임을 확인할 수 있다. 이러한 경향은 2층만 고려한 경우($Q = C_2^T \cdot C_2$)와 3층만 고려한 경우($Q = C_3^T \cdot C_3$)에서도 유사한데, 이로부터 각 층만을 제어변수로 설정하여 제어기를 설계하는 경우가 전 층을 모두 고려한 경우보다 작은 제어력을 사용하면서도 특정층의 제어효과가 높다는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 해당하지 않는 층의 제어효과는 떨어진다.

한편, C_1, C_2, C_3 를 사용하여 얻어진 LQR제어이득을 각각 G_1, G_2, G_3 라 하고, 이들을 조정하기 위한 퍼지관리제어기법을 적용한다. 퍼지관리제어기는 입력정보에 대하여 아래의 case 1과 2의 두 가지 경우를 고려하여 설계하였다.

- Case 1 : 1, 2, 3층의 변위응답의 절대값만을 입력정보로 사용한 경우
- Case 2 : 1, 2, 3층의 변위응답과 속도응답의 절대값을 입력정보로 사용한 경우

입력은 응답에 대한 선형제어기의 참여정도를 결정하기 위한 정보이므로 응답의 절대값을 사용하였고, 출력도 식 (5)의 퍼지관리제어기법에 의해 결정되는 각 제어이득의 참여도이므로 역시 크기만을 고려하여 양의 값이 되도록 하였다. 이에 대한 소속함수는 그림 7, 8에 도시하였으며, 이 때 사용한 퍼지규칙을 표 2, 3에 각각 나타내었다.

Case 2에서는 입력정보에 따라 퍼지연산을 통하여 rule surface를 얻을 수가 있는데, 그림 9에 G_1 에 대한 rule surface를 나타내었다. 도시된 바와 같이, x 축에 1층의 변위응답, y 축에 1층의 속도응답에 따라서 제어이득 G_1 에 대한 참여도 α_1 이 결정된다.

표 1 선형제어기의 해석결과 비교(EI Centro 지진입력)

| 설정된 제어변수 | 가중행렬 ($Q = C^T C$) | 응답층 | 최대 층간 상대 변위(cm) | 층간 상대변위 RMS(cm) | 최대 제어력(KN) |
|----------|---|-----|-----------------|-----------------|------------|
| 전층 | $C_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 1층 | 1.481 | 0.324 | 2,111 |
| | | 2층 | 1.261 | 0.249 | 1,606 |
| | | 3층 | 0.729 | 0.137 | 863 |
| 1층 | $C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 1층 | 1.309 | 0.315 | 1,847 |
| | | 2층 | 2.219 | 0.464 | 1,130 |
| | | 3층 | 1.537 | 0.284 | 703 |
| 2층 | $C_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 1층 | 2.486 | 0.610 | 1,361 |
| | | 2층 | 1.235 | 0.267 | 1,394 |
| | | 3층 | 1.430 | 0.277 | 614 |
| 3층 | $C_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | 1층 | 2.981 | 0.771 | 784 |
| | | 2층 | 2.535 | 0.609 | 690 |
| | | 3층 | 0.787 | 0.183 | 827 |

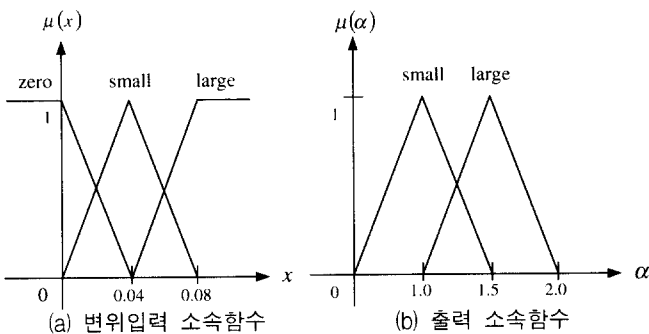


그림 7 Case 1에 대한 입력과 출력의 소속함수

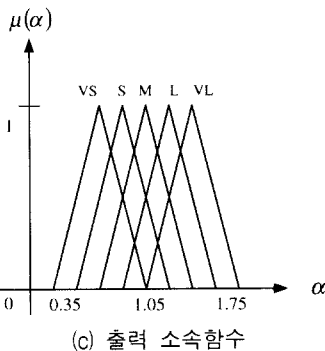
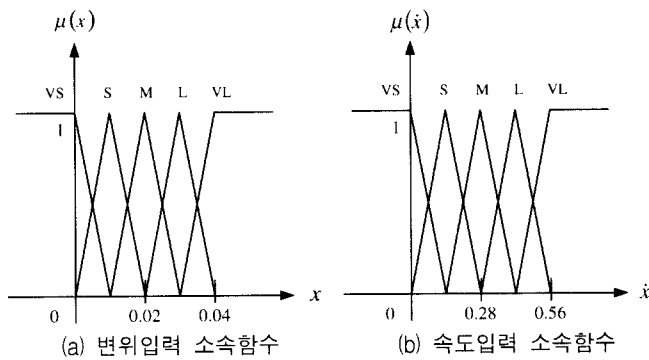


그림 8 Case 2에 대한 입력과 출력의 소속함수

표 3 K_i 제어이득에 대한 rule table

| i층 응답 | 변위 | 속도 | | | | |
|-------|----|----|----|---|---|----|
| | | VS | S | M | L | VL |
| 변위 | VS | VS | VS | S | S | M |
| | S | VS | S | S | M | M |
| | M | S | S | M | M | L |
| | L | S | M | M | L | L |
| | VL | M | M | L | L | VL |

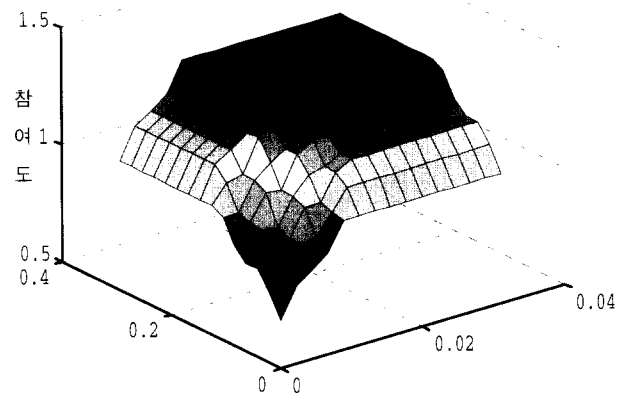


그림 9 G_1 에 대한 rule surface

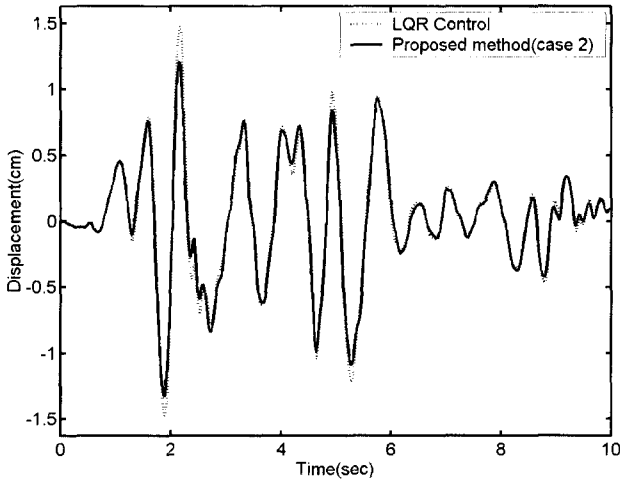
EI Centro 지진입력(1940)에 대하여 case1과 case 2인 경우의 퍼지관리제어기법을 적용하여 수치해석을 수행하였고, 전 층을 고려한 LQR제어와 비교하여 1층의 응답 및 제어력의 시간이력을 그림 10에 나타내었다.

그림 10에 나타난 바와 같이 유사한 최대제어력을 사용하면서도 층간상대변위에서는 약 12%의 감소효과가 있음을 알 수 있다. 다른 층의 응답도 비슷한 양상을 보이며 이 결과를 표 4에 정리하였다.

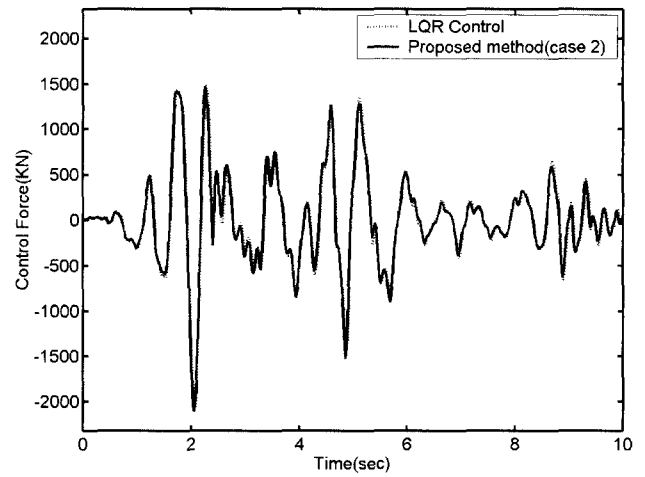
LQR제어와 비교하여 퍼지관리제어 case 1은 1, 2, 3층의 최대 층간상대변위에서 각각 10%, 9%, 12%의 감소효과를 갖는데 반해, 각 층의 최대 제어력은 근소하게 작은 값을 갖

표 2 Case 1에 대한 rule table

| | | | |
|----------------|-------|-------|-------|
| 입력(변위) | Zero | Small | Large |
| 출력(α) | Small | Large | Large |



(a) 1층의 층간 상대변위



(b) 1층의 제어력

그림 10 1층의 층간 상대변위 및 제어력의 시간이력곡선

는다. Case2의 경우도 비슷한 경향을 띄는데, 유사한 최대 제어력을 가지면서도 각 층의 층간상대변위의 감소효과는 10%, 4%, 8%정도를 갖는 것을 확인할 수 있다.

Mexico City 지진입력(1985)에 대하여도 수치모사결과를 비교하여 표 5에 제시하였는데, 비슷한 제어력을 사용하면 서로 최대 13%의 최대응답의 감소효과를 보인다.

두 개의 지반운동에 대한 응답해석결과에서, 변위응답

만을 이용하여 퍼지관리제어기를 구성한 경우도 변위와 속도를 모두 이용한 경우와 비교하여 제어효과의 차이가 없으며, 제시한 방법은 기존의 선형제어기에 간단한 퍼지연산을 추가함으로써 제어성능을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

지진하중을 받는 구조물에 발생하는 진동을 제어하기 위한 능동제어기의 설계에 있어서, 선형제어기의 한계를 극복하고 보다 향상된 제어성능을 갖는 퍼지관리제어기법을 제시하였다. 퍼지관리제어기법의 적용대상이 되는 선형제어기로는 LQR제어기를 사용하였으며, 지진하중에 대한 제어특성을 극대화할 수 있도록 구조물의 제어목적을 분리하여 여러 개의 제어기를 구성하였다. 이 때, 각각의 LQR제어기들은 지진응답의 최적 제어를 위하여 층간 상대변위를 제어변수로 설정하여 설계되었으며 제어가 이루어지는 매 순간 퍼지관리기법에 의하여 최대변위응답을 줄일 수 있도록 입력정보에 따라서 각각의 이득 행렬이 조절된다. 즉, 되먹임신호에 따른 제어기자체의 동특성 변경을 퍼지기법에 의하여 용이하게 구현할 수 있다.

알고리즘의 효율성을 검증하기 위하여 퍼지관리제어기를 설계하여, EL Centro지진입력(1940)과 Mexico지진입력(1985)을 받는 3자유도 전단빌딩 모형에 대한 수치모사를 수행하였으며, 그 결과를 하나의 정적제어이득만을 갖는 LQR제어기를 적용한 해석결과와 비교하였다. 제시한 제어기법은 유사한 제어용량을 사용하면서도 기존의 LQR제어기보다 효과적인 지진성능을 갖는다는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 2000년도 두뇌한국21사업 핵심분야 사업비와 첫번째 저자에 대한 한국과학재단의 1999년도 후반기 해외 박사후 연수과정 지원사업에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

표 4 El Centro 지진입력에 대한 해석결과 비교

| El Centro 지진입력 | | 최대 층간 상대변위(cm) | 층간 상대변위 RMS(cm) | 최대 제어력(kN) |
|----------------------------------|----|----------------|-----------------|------------|
| LQR ($Q = C_a^T \cdot C_a$) | 1층 | 1.481 | 0.324 | 2,111 |
| | 2층 | 1.261 | 0.249 | 1,606 |
| | 3층 | 0.729 | 0.137 | 863 |
| 퍼지관리제어 Case 1 | 1층 | 1.331 | 0.293 | 2,109 |
| | 2층 | 1.147 | 0.246 | 1,600 |
| | 3층 | 0.641 | 0.129 | 854 |
| 퍼지관리제어 Case 2 | 1층 | 1.327 | 0.307 | 2,105 |
| | 2층 | 1.214 | 0.275 | 1,569 |
| | 3층 | 0.669 | 0.146 | 844 |

표 5 Mexico City 지진입력에 대한 해석결과 비교

| Mexico City 지진입력 | | 최대 층간 상대변위(cm) | 층간 상대변위 RMS(cm) | 최대 제어력(kN) |
|----------------------------------|----|----------------|-----------------|------------|
| LQR ($Q = C_a^T \cdot C_a$) | 1층 | 0.382 | 0.099 | 472 |
| | 2층 | 0.308 | 0.076 | 340 |
| | 3층 | 0.175 | 0.042 | 184 |
| 퍼지관리제어 Case 1 | 1층 | 0.346 | 0.092 | 471 |
| | 2층 | 0.294 | 0.076 | 333 |
| | 3층 | 0.162 | 0.040 | 179 |
| 퍼지관리제어 Case 2 | 1층 | 0.333 | 0.095 | 471 |
| | 2층 | 0.313 | 0.085 | 335 |
| | 3층 | 0.172 | 0.045 | 184 |

참 고 문 헌

1. "Special Issue: structural control: past, present, and future," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 9, 1997.
2. 고현무, 박관순, 박원석, " H_∞ 제어이론과 Bilinear Transform 을 적용한 불확실한 구조계의 능동적 진동제어", 대한토목학회논문집, 제19권, 제I-2호, 1999, pp. 241-252.
3. Sakamoto, M., Kobori, T., Yamada, T., and Takahashi, M., "Practical applications of active and hybrid response control systems and their verification by earthquake and strong wind observations," *Proc., First World Conf. on Struct. Control*, WP2, 1994, pp. 90-99.
4. Koike, Y., Murata, T., Tanida, K., Kobori, T., Ishii, K., and Takenaka, Y., "Development of V-shaped hybrid mass damper and its application to high-rise buildings," *Proc., First World Conf. on Struct. Control*, FA2, 1994, pp. 3-12.
5. Ohru, S., Kobori, T., Sakamoto, M., Koshika, K., Nishimura, I., Sasaki, K., Kondo, A., and Fukushima, "Development of active-passive composite tuned mass damper and an application to a high-rise building," *Proc., First World Conf. on Struct. Control*, TP1, 1994, pp. 100-109.
6. 고현무, 박관순, 박원석, "질량감쇠기가 설치된 고층구조물의 풍하중에 대한 사용성 평가," 대한토목학회논문집, 제21권, 제1-A호, 2001, pp. 53-63.
7. Cao, H., Reinhorn, A. M., and Soong, T. T., "Design of an active mass damper for wind response of Nanjing TV tower," *J. Engineering Structures*, Vol. 20, No. 3, 1997, pp. 134-143.
8. Hirai, J., Abiru, H., and Tsuji, E., "Study on tuned active damper for control tower of kansai international airport," *International Workshop on Structural Control*, Honolulu, 1993, pp. 206-213.
9. 고현무, 박관순, 박원석, 조익선, "고차 모우드 불확실성을 고려한 지진응답의 강인제어", 한국지진공학회논문집, 제4권, 제2호, 2000, pp99-108.
10. Ohtori, Y., Christenson, R. E., Spencer, Jr., B. F., and Dyke, S. J., "Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings," *Special issue of the ASCE Journal of Engineering Mechanics*.
11. 임채욱, 정태영, 문석준, "과도한 기진력을 받는 다자유도 계 구조물의 진동 제어를 위한 적응형 뱁뱁 제어 알고리즘의 유용성에 관한 연구", 한국지진공학회논문집, 제5권, 제1호, 2001, pp. 53-61.
12. Kirk, D. E., *Optimal Control Theory - An Introduction*, Prentice Hall, 1970.
13. Garcia-Benitez, E., Yurkovich, S., and Passino, K. M., "Rule-based supervisory control of a two-link flexible manipulator," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 7, No. 2, 1993, pp. 195-213.