

확률론적 가진을 받는 동적계에 대한 자기구성 퍼지제어기의 구현

A Simulation of 「Self-Organizing Fuzzy Controller」 for a Dynamic System under Irregular Disturbance

°여 운 주* · 오 용 설** · 정 근 용** · 허 훈***

Woon Joo Yeo*, Yong Sul Oh**, Quen Yong Jung**, and Hoon Heo***

Key Words : Fuzzy control(퍼지 제어), Self-Organizing(자기 구성), Modal analysis(모달 해석),
Irregular disturbance(불규칙 외란), Piezo actuator(압전소자 작동기)

ABSTRACT

This paper proposes a self-organizing fuzzy controller (SOFC) design technique applied to the vibration control of a dynamic system under irregular disturbance. In this controller, the fuzzy rules generate control signal continuously using the array of input and output pairs without using any special controller model. The generated rules are saved in the fuzzy rule matrix in real-time by self-organizing methods. This fuzzy logic control is demonstrated by simulation and shows the efficiency of the real-time self-organizing fuzzy controller in this system.

1. 서 론

자연계에서 동적계는 다양한 외란에 노출된다. 특히 불규칙 가진은 가장 두드러진 경우로써 이와 같은 불규칙 가진을 받는 동적계의 예로는 대기중이나 경계층의 잔류와 제트유동에 노출되는 항공기와 노면에 의해 야기되는 진동을 받는 차량과 항공기, 바람과 지진에 노출되는 지상구조물 그리고 파도에 영향 받는 해상구조물 등이 있다. 이 때 각각의 물리적 변수들은 시간과 공간 모두에서 불규칙적으로 변하게 된다.

여기서 본 논문에서 제시한 동적 구조체에 대한 기존의 제어기법들은 외란을 배제하거나, 그 형태를 정형화시킨 상태에서의 제어성능을 비교하는 경우가 많았다. 불규칙한 외란은 유연한 구조체에 대한 많은 연구에서 한계상황이나, 논의대상으로 여겨져 왔으나, 최근 들어 시스템과 외란을 확률영역에서 해석하여 제어신호를 생성하고자 하는 일련의 연구들이 수행되었다[1][2].

제어시스템의 물리적 구성의 관점에서 스마트재료은 유용한 수단이 되어 왔는데 스마트재료의 제어기로서의 가능성이 제시된 이후[4], 수많은 동적시스템 제어에서의 응용 및 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 특히, 스마트재료 가운데 대표적인 Piezo 세라믹의 경우, 형태상의 구속이 적다는 이유와 전기적 에너지와 역학적 에너지의 자유로운 변환이 가능하다는 독특한 특성에 의해 유연한 구조물의 제어기 및 감지기로써 폭넓게 연구 및 활용되고 있다.

본 논문에서는 불규칙한 가진을 받는 유연한 구조물에 대한 제어 이론으로써 「자기구성 퍼지 제어」 방식 (Self-Organizing Fuzzy Control : SOFC)을 제시한다. 이는 특별한 제어기의 모델링 없이 벤위 신호와 제어 신호의 array를 사용하여 퍼지화하고, 추론 결과를 얻기 위하여 망제어영역(Net Control Range : NCR)을 구한다[8]. 또한 제어신호를 얻기 위한 비퍼지화 과정에서는 느린 속도를 개선하기 위하여 Newton backward-difference formula를 사용한다[9]. 이 때 퍼지 규칙은 매 샘플링시간마다 새롭게 만들어지게 되는데, 채워 나가게 된다. 본 이론을 확인하기 위하여 Hamilton의 법칙을 통하여 복합유연보를 모델링하여 Galerkin의 기법을 적용하여 범의 2차모드까지 근사하여 수치모의 실험을 실행하였다[3].

* 고려대학교 제어계측공학과 대학원

E-mail : jooclub@korea.ac.kr

Tel : (02) 329-3995, Fax : (02) 929-7808

** 고려대학교 제어계측공학과 대학원

*** 고려대학교 제어계측공학과 교수

2. 시스템 모델링

고유주파수항을 포함하는 ODE 형태의 모달방정식으로 정리하면 다음과 같이 정리된다.

$$\ddot{x}_i(t) + 2\xi\omega_i \dot{x}_i(t) + \omega_i^2 x_i(t) = p_i d(t) + b_i u(t) \quad (1)$$

for $i = 1, 2$.

이 때 p_i 와 b_i 는 각각 불규칙한 외란과 제어입력의 행렬이며, ξ 는 실험체의 자유진동응답을 통해 구해지는 감쇠계수이다[3].

3. 퍼지제어기 설계

3.1. 입력/출력 변수 정의

일반적으로 시스템의 출력응답은 이전의 플랜트의 상태와 공급된 제어신호, 그리고 외란의 누적합수로 묘사할 수 있다. 이를 이산화된 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$x(k+1) = f(x(k), x(k-1), \dots, u(k), \dots, u(k-1), \dots) \quad (2)$$

본 제어기는 기존의 제어기와는 달리 입력 신호에 입력/출력 신호와 reference신호만을 사용한다.

$$u(k) = g(x_{ref}, x(k), x(k-1), \dots, u(k-1), u(k-2), \dots) \quad (3)$$

3.2. 제어규칙의 정의

제어규칙은 다음과 같이 정리한다.

$R^{(i)} : \text{IF } x(k) \text{ is } A_{1i} \text{ and } x(k-1) \text{ is } A_{2i}, \dots,$

$$x(k-n+1) \text{ is } A_{ni}, \text{ and } u(k-1) \text{ is } B_{1i}, \dots, \quad (4)$$

$$u(k-m) \text{ is } B_{mi}, \text{ and } u(k) \text{ is } C_i$$

여기서 A_{ij} , B_{ij} 는 i 번째 규칙에 대한 과거 언어값이고, C_{ij} 도 i 번째 규칙에 대한 결과 언어값이다.

3.3. 퍼지화 과정

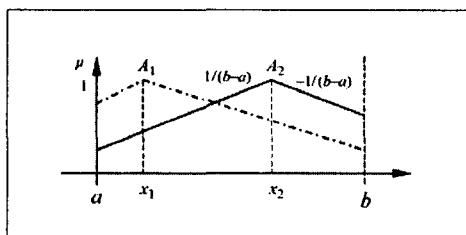


Fig. 1. 퍼지화 과정 (A_{ij}, B_{ij} or C_{ij})

기준의 결정되어져 있는 퍼지 멤버쉽 함수와는 달리 본

제어기에서는 매 샘플링 과정마다 새로운 퍼지 언어값들을 결정한다.

Fig. 1. 은 식(5)를 사용하여 A_1, A_2 가 구간 $[a, b]$ 에서 정의된 멤버쉽 함수들을 가지도록 하여 상용하는 퍼지 언어값들(fuzzy sets)이 되게 하는 새로운 변수 x_1, x_2 를 구하기 위한 퍼지화 과정을 보여준다.

$$\mu_{A_i} = \begin{cases} \frac{(b-a)+(x-x_i)}{b-a} & \text{when } a \leq x < x_i \\ \frac{(b-a)-(x-x_i)}{b-a} & \text{when } x_i \leq x < b \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

3.4. 퍼지 추론 과정

퍼지 셋의 출력을 얻기 위해서는 각 규칙에 대해서 입력 퍼지 셋의 멤버쉽정도(membership degree)를 결정해야 한다. 각 규칙의 입력 퍼지 변수에 대한 멤버쉽정도는 다음과 같이 정의된 특정한 operator(AND)로써 구할 수 있다.

$$w_i = \min [(A_{1i} \wedge x_1), \dots, (A_{(n+1)i} \wedge x_{(n+1)}), (B_{1i} \wedge u_1), \dots, (B_{mi} \wedge u_m)], \quad (6)$$

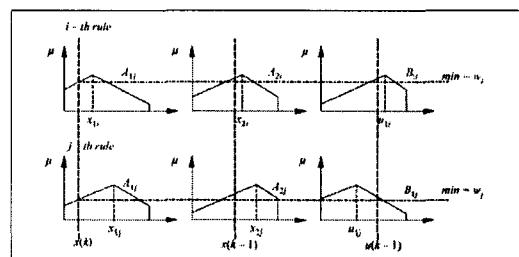


Fig. 2. 추론 원리

Fig. 2에서 보여지는 것처럼 이 원리는 입력 퍼지 변수와 과거 언어값들 사이의 교차점의 최소정도를 나타낸다.

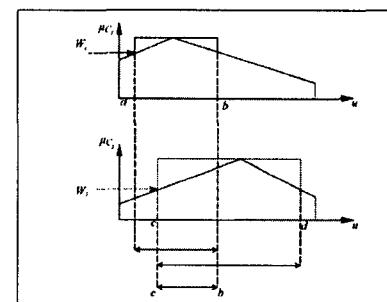


Fig. 3. 두 규칙을 가진 망제어영역(NCR)

NCR(망제어영역)은 모든 제어 영역들의 교차영역으로 나타낼 수 있다. 따라서 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 NCR은 $[c, b]$ 가 된다.

3.5. 비퍼지화 과정

NCR내에서의 어떤 제어 값이더라도 제어를 가능케하지만 몇몇 값들은 overshoot을 발생시키고, 속도를 느리게 한다.

이를 막기 위하여 사전조치를 취한다. 이때 이용하는 것이 Newton backward-difference formula이다[9].

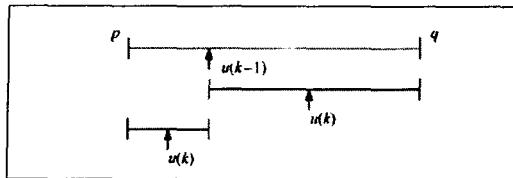


Fig. 4. 비퍼지화 과정

Fig.4와 식(7)에서 알 수 있듯이 최종적으로 새롭게 얻은 제어값 $u(k)$ 는 NCR의 중간값으로 선택될 수 있다.

$$u(k) = \begin{cases} \frac{u(k-1) + a}{2} & \text{for Case 1} \\ \frac{p + u(k-1)}{2} & \text{for Case 2} \end{cases} \quad (7)$$

여기서 p, q 는 상위/하위 제한범위이다.

3.6. Rule-Base의 자기 구성

퍼지 규칙 매트릭스는 유한한 개수의 영역으로 구성이 되어있다. Fig.5와 같이 두 개의 출력 변수 $x(k)$ 와 $x(k-1)$ 로 되는 예를 보여 주고 있다. 이때 규칙의 섹션이 구해져 있다면 먼저 규칙 위에 업데이트하고 비어 있다면 Fig.5와 같이 채워 넣게 되는 것이다.

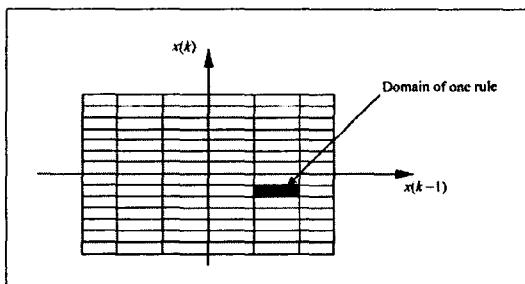


Fig. 5. 이차원 규칙 매트릭스

결과적으로 「Rule-base의 자기 구성」은 매 샘플시간 k 마다 시스템의 「학습」이라고 말할 수 있다.

3.7. 기존의 퍼지 제어기

여기서 기존의 퍼지제어기와 함께 비교해 보기로 하겠다. 먼저 기존 퍼지 제어기의 구성은 다음과 같다.

error와 error rate의 기준(식8)에 의해 rule base를 구성한다.(Fig. 6.)

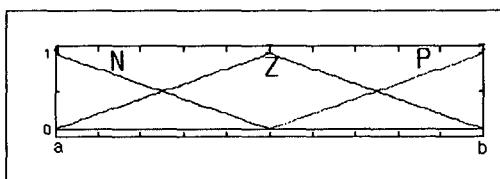


Fig. 6. Input fuzzy set A_2 ($e(k)$)

$$R^{(i)} : \text{IF } e \text{ is } A_{1i}, \Delta e \text{ is } A_{2i}, \text{ then } u \text{ is } C_i \quad (8)$$

Table. 1. Control rule base

e	Δe		
	N	Z	P
N	P	P	Z
Z	P	Z	N
P	Z	N	N

Table. 1를 보면 beam이 한쪽 방향으로 쏠렸을 때 반대 방향으로 돌리기 위하여 Control rule base가 구성되어 있는 것을 쉽게 알 수 있다.

4. 수치실험

먼저 불규칙 외란에 대한 SOFC를 평가하기 이전에 기본적 성능을 평가하기 위해서 beam에 30Hz sine파를 인가하였다. 결과를 Mean-square response로 관찰해 보면 처음에 급격히 제어되는 것을 알 수 있다. SOF-UC는 자기구성제어기 control 안한 상태이며, ConvF-C는 '기존퍼지제어기 (Conventional Fuzzy Controller)로 제어 했을 때이며, 마지막 SOF-C가 자기구성퍼지제어기로 control 했을 때이다. (Fig.7.)

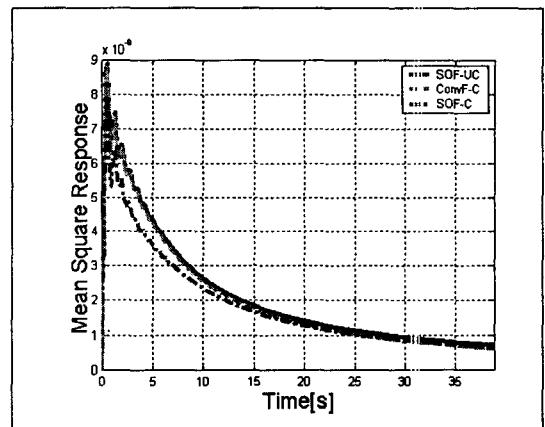


Fig. 7. Mean Square Response under Sinusoidal signal

수치 실험을 위하여 Fig.8과 같은 불규칙 기진을 사용하였다. 그림에서 보는바와 같이 전 주파수 영역 및 시간에 대해서 고른 Amplitude를 가진 불규칙 외란을 Matlab에서 구성하였다.

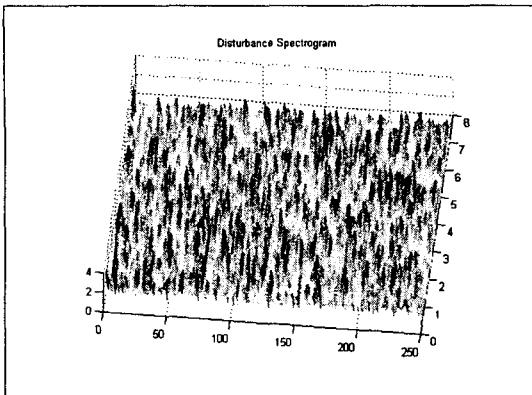


Fig. 8. 불규칙 가진의 Spectrogram

불규칙 외란은 Fig. 9에서 볼 수 있듯이 전주파수에 대해서 평균적으로 $PSD = 0.07$ 인 White Noise를 생성하여 사용하였다.

수치실험 시간은 충분히 과도응답이라 생각되는 시간인 40초까지 수행하였다.

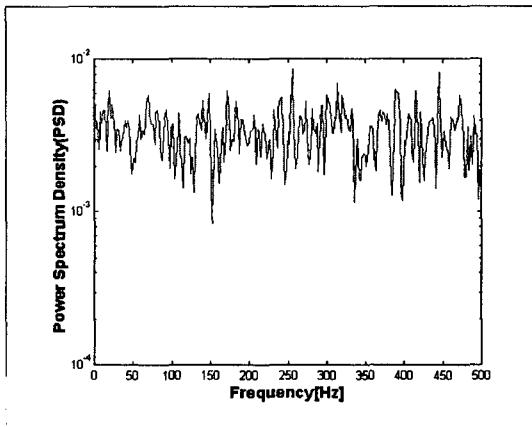


Fig. 9. 불규칙 가진의 PSD

beam에 불규칙 외란을 가할 때 변하게 되는 NCR은 다음과 같이 분포하게 된다.(Fig. 10.)

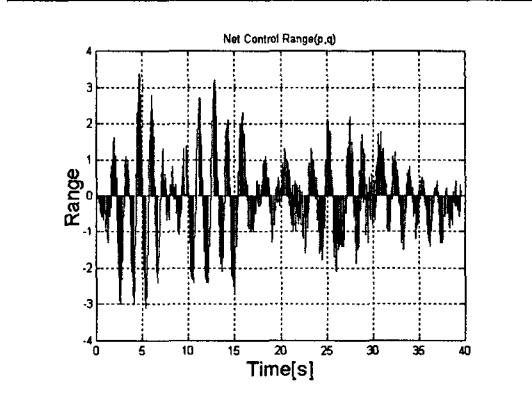


Fig. 10. Net Control Range(p, q)

또한, control 신호 $u(k)$ 의 분포는 다음과 같다.(Fig. 11)
그림에서도 알 수 있지만 control 신호 $u(k)$ 와 NCR은 앞서 이론에서 알 수 있듯이 모양은 비슷하나 amplitude가 절반정도임을 알 수 있다.

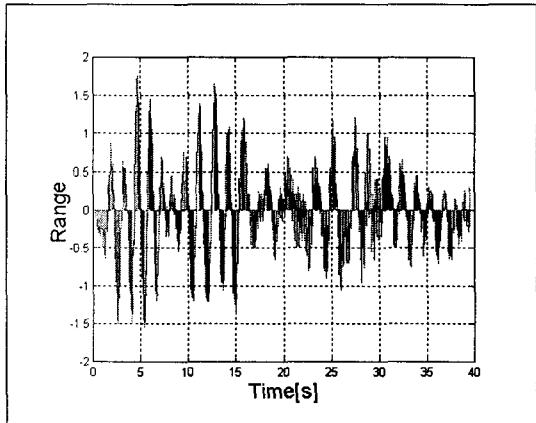


Fig. 11. Crisp Control signal, $u(k)$

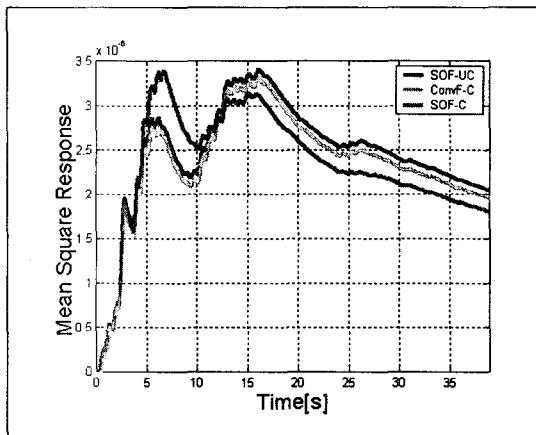


Fig. 12. Mean Square Response under irregular disturbance

Fig. 12의 Mean Square Response를 보면 알 수 있듯이 응답 후 5초에서 10초 사이에는 오히려 Control 효과가 나타나지만 이후 점점 SOFC의 응답이 좋아진다. 기존 퍼지 제어기는 어느 그 구간에서도 좋은 반응을 보이나 10초 이후에는 SOF보다 성능이 떨어진다.

5. 결 론

본 논문에서는 동적 시스템에 불규칙한 외란이 가해졌을 경우 제어하기 위한 몇 가지 기법 가운데 자기 구성 퍼지 제어기에 대해 논하였다. 이 제어기의 독특한 점은 일반적인 제어기가 변위오차정보와 오차변화정보를 가지고 제어한다면 변위오차정보와 입력정보를 사용하는 것이다. 이는 몇단계 이전의 변위 위치와, 함께 입력되는 신호를 조합

하여 다음의 입력 신호를 결정해주게 된다. 따라서 규격화된 Control rule base가 있는 것이 아니며 매 샘플링 시간마다 새로운 rule base를 구성하게 되는 것이다.

그러나 본 논문에서 제시된 자기구성 제어기는 deterministic signal에 대해서는 즉각적인 반응을 보이며 좋은 성능을 보이나 Random 외란에 대해서 동작하기까지 어느 정도의 시간이 필요하다는 것을 알 수 있다. 최소한 어느 정도 이상의 현재 변위와 전 변위에 대해서 Fig. 5의 이차원 규칙 메트릭스를 채워야 만이 비로소 정상적인 동작을 하는 것이다.

따라서 시뮬레이션을 반복하여 적절한 크기의 메트릭스를 구성하고 알고리즘을 연구하여 연산속도를 조금 더 빨리 할 수 있다면 Self-Organizing Fuzzy Controller는 충분히 개선될 수 있다고 생각하며 추후 과제로 남겨둔다.

참 고 문 현

- [1] 허훈, 조윤현, 김대중, 한정엽, "확률 영역에서의 제어기 설계 방법", 특허번호 0327508, 특허청, 2002.
- [2] Hoon Heo, Yun Hyun Cho, Dae Jung Kim, "Stochastic control of Flexible beam in Random flutter", in print, Journal of Sound and Vibration, 2003
- [3] 윤영수, 김용관, 여운주, 고광원, 허훈, "불규칙 외란을 받는 유연한 계에 대한 모드선택 퍼지제어", 추계소음진동 공학회, 2002
- [4] E.F. Crawley, J. de Luis, Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures, AIAA J. 10(1987) 1373-1385
- [5] William T. Thomson, Marie Dillon Dahleh, "Theory of Vibration with Applications", 5th Ed., Prentice Hall, 1998
- [6] George J. Klir, Bo Yuan, "Fuzzy Sets and Fuzzy Logic Theory and Applications", Prentice Hall, 1995
- [7] Lefteri H. Tsoukalas, Robert E. Uhrig, "Fuzzy and Neural Approaches in Engineering", A Wiley-Interscience publication, 1996
- [8] Gustavo Luiz C.M. de Abreu, Jose F. Ribeiro "A Self-organizing fuzzy logic controller for the active control of flexible structures using piezoelectric actuators ", Elsevier Science B.V., 2002
- [9] R.L. Burden, J.D. Faires, Numerical Analysis, PWS-KENT, 1989