

불규칙 외란을 받는 유연한 계에 대한 「모드선택 퍼지제어」

「Mode Selecting Fuzzy Controller」 to suppress the response of flexible system under irregular disturbance

°윤영수· 김용관**· 고헌원*· 여운주· 허훈***

°Y. S. Yoon*, Y. K. Kim**, K. W. Ko*, W. J. Yeo and H. Heo***

Key Words : Fuzzy control(퍼지 제어), Modal analysis(모달 해석), Irregular disturbance(불규칙 외란), Piezo actuator(압전소자 작동기), Flexible structure(유연한 구조체)

ABSTRACT

A fuzzy logic controller design technique is proposed to apply for the control of flexible system under irregular disturbance. The fuzzy rules of 「Mode Selecting Fuzzy Controller」 are constructed using displacement, velocity information and modal characteristics of the system. The frequency information of flexible system is picked up from 「Mode Selecting Unit」 based on Fast-Fourier transform algorithm. Experiment is conducted to verify the proposed theoretical approach. Piezo ceramic and laser accelerometer are used as actuator and sensor in the experiments respectively

1. 서론

자연계에 존재하는 동적시스템은 내부 또는 외부로부터의 다양한 외란에 노출되어 있다. 이러한 외란은 정형화 되어 있지 않은 불규칙한 외란이 그 주를 이룬다.

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

제어시스템의 물리적 구성에서 볼 때 스마트물질은 유용한 수단이 되고 있다. 스마트물질의 제어기로서의 가능성이 제시된 이후[3], 동적시스템 제어에서의 그 응용 및 연구는 괄목할만한 성과를 보여왔다. 특히, 스마트물질 중 대표적인 응용물질인 Piezo 세라믹의 경우, 형태상의 구속이 적다

는 이유와 전기적 에너지와 역학적 에너지의 자유로운 변환이 가능하다는 독특한 특성에 의해 유연한 구조물의 제어 및 감지기로써 폭넓게 연구 및 활용되고 있다.

본 논문에서는 불규칙한 외란을 받는 유연한 구조물에 대한 새로운 제어기법을 소개하고 이를 실험을 통하여 입증하였다. 새롭게 제시되는 「모드선택 퍼지제어」 방식(Mode-Selecting Fuzzy Control : MSFC)은 변위오차와 오차변화율 외에 변위오차의 주파수 정보까지 활용하게 된다. 이는 유연한 구조물의 독특한 주파수 응답 특성인 Mode 응답에 기반하는 것으로써, 시스템에 대한 Modal 분석을 통하여 이에 대한 논리적 근거를 제시하였다. 이러한 근거를 통해 특정주파수의 외란에서 우수한 제어특성을 보이는 제어기일지라도 다양한 주파수를 포함하는 불규칙한 외란에서는 제 성능을 발휘하지 못한다는 사실을 보이고, 새롭게 제시된 MSFC를 통해 그를 극복하는 과정 및 방법을 보였다.

또한, 제어기 내에 포함되어 실시간으로 주파수정보를 추출하는 「모드선택장치」(Mode-Selecting Unit : MSU)의 구조와 원리를 소개하고, 주파수 해석범위를 적절하게 설정하는 방법을 통해 MSU의 성능을 개선할 수 있다는 사실을 제시하였다.

본 이론을 뒷받침하기 위하여 Piezo 세라믹을 기저부에 장착하고, 이를 외란발생기에 구속시킨 알루미늄 유연보를 실험대상으로 하였으며 Hamilton의 법칙을 통하여 복합유연보를 모델링하여 Galerkin의 기법을 적용하여 2차모드까지 근사하여 수치모의 실험을 실행하였다.

* 고려대학교 제어계측공학과 대학원
E-mail : youngsoo@cie.korea.ac.kr
Tel : (02) 3290-3995, Fax : (02) 929-7808

** 국방 과학 연구소

*** 고려대학교 제어계측공학과 교수

Table. 1. Experiment Materials Specification

parameter		Beam	Piezo ceramic	unit
Length	L	0.28	0.055	m
Width	W	0.055	0.055	m
Thickness	h	0.0003	0.000191	m
Density	ρ	2700	7700	kg/m^3
Young's modulus	E	70Giga	50Giga	N/m^2
Piezoelectric strain coefficient	d_{31}		-180Pico	m/V

2. 시스템 모델링

2.1 작동기 모델

압전세라믹에 전압 $V(t)$ 가 가해졌을 때 압전세라믹에서 일어나는 변형은 복합재료보에 변형을 야기한다. beam의 축방향을 y 축이라할 때 piezo ceramic에 의한 휨모멘트 (bending moment)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 M_{p.c}(t) &= \int_A L_b \sigma_{p.c} dA \\
 &= -d_{31} \frac{E_{p.c} W_{p.c} [E_b h_b (h_b + h_{p.c})]}{2(E_b h_b + E_{p.c} h_{p.c})} V(t) \quad (1) \\
 &= c_{p.c} V(t)
 \end{aligned}$$

여기서 내부응력은 $\sigma_{p.c}(t) = E_{p.c} \frac{d_{31}}{h_{p.c}} V(t)$ 이다.

2.2 복합재료보의 지배방정식

복합재료보의 운동방정식을 유도하기 위하여 Hamilton의 법칙을 사용한다.[4]

$$Const = \int_{t_1}^{t_2} (T - U + W_{nc}) dt \quad (2)$$

Piezo 세라믹의 크기가 유연보 길이의 0.2배의 크기일 때, 유연보에 작용하는 토크는 다음의 관계를 만족한다.

$$\begin{aligned}
 F_M(x, t) &= - \frac{\partial \tau(x, t)}{\partial x} \\
 &= M_{p.c}(t) \delta'(x - 0.2L), \quad (3)
 \end{aligned}$$

외력 $F_M(x, t)$ 에 의한 비보존력 W_{nc} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 W_{nc} &= \int_0^L F_M(x, t) u(x, t) dx \\
 &= \int_0^L M_{p.c}(t) \delta'(x - 0.2L) u(x, t) dx. \quad (4)
 \end{aligned}$$

식(3)과 (4)를 식(2)의 Hamilton의 법칙에 대입하여 변분법을 적용하면, 보의 휨변형에 대한 지배방정식을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 \rho A \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x, t) + \frac{\partial^2}{\partial x^2} (EI \frac{\partial^2}{\partial x^2} u(x, t)) \\
 = - \rho A \frac{d^2}{dt^2} z(t) + c_{p.c} V(t) \delta'(x - 0.2L), \quad \text{for } 0 < x < L \quad (5)
 \end{aligned}$$

2.3 모달 해석 (Modal Analysis)

다음과 같이 modal 변수를 사용하는 급수를 도입한다.

$$u(x, t) = \sum_j q_j(t) \phi_j(x) \quad (6)$$

여기서 $q_j(t)$ 는 generalized modal coordinate이고, $\phi_j(x)$ 는 mode shape function이다. 수정된 지배방정식에서 $\phi(x)$ 에 대하여 x 로 편미분한 후 이를 수치해석을 수행하면 각 mode의 고유주파수를 얻을 수 있다.

$$\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho}} = (\beta_n L)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho L^4}} \quad (7)$$

Table. 2. Clamped-free beam

mode, n	$\beta_n \cdot L$	$(\beta_n \cdot L)^2$	ω_n / ω_1
1	1.8751	3.5160	1.0000
2	4.6941	22.0345	6.2669

Galerkin method는 모달분할로 근사할 경우 나타나는 잉여항을 가중적분할 때 그 가중값을 모드형 함수로 택하는 방법이다. 이를 이용하여 지배방정식을 상미분방정식으로 변환할 수 있다. 지배방정식에서 잉여를 정리하여 2모드 근사를 하면 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned}
 (\phi_i(t), R) &= \int_0^L \left\{ \sum_{j=1}^2 \left[\rho A \phi_i(x) \phi_j(x) \frac{d^2 q_j(t)}{dt^2} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + EI \frac{d^4 \phi_j(x)}{dx^4} \phi_i(x) q_j(t) \right] + \rho A \phi_i(t) \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} \right. \\
 &\quad \left. - \phi_i(t) c_{p.c} V(t) \delta'(x - 0.2L) \right\} dx = 0 \quad (8) \\
 &\quad \text{for } i = 1, 2
 \end{aligned}$$

위 근사식을 고유주파수항을 포함하는 ODE형태의 모달방정식으로 정리하면 다음과 같이 정리된다.

$$\ddot{x}_i(t) + 2\zeta \omega_i \dot{x}_i(t) + \omega_i^2 x_i(t) = p_i d(t) + b_i u(t) \quad (9)$$

for $i = 1, 2.$

이 때 p_i 와 b_i 는 각각 외란과 제어입력의 행렬이며, ζ 는 실험체의 자유진동응답을 통해 구해지는 감쇠계수이다.

3. 제어기 설계

3.1 모드 선택 장치 (Mode Selecting Unit: MSU)

입력신호를 실시간으로 주파수정보로 변환을 하기 위하여 Radix-2 FFT 알고리즘을 사용한다.[5]

$$\begin{aligned}
 X(k) &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} f_1(m) W_{N/2}^{km} + W_N^k \sum_{m=0}^{(N/2)-1} f_2(m) W_{N/2}^{km} \\
 &= F_1(k) + W_N^k F_2(k) \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10)
 \end{aligned}$$

식(7)에서 구해진 고유주파수가 ω_{1st} , ω_{2nd} 일 때 FFT 변환된 주파수영역에서의 해당위치(index)는 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$k_1 = N \frac{\omega_1/2\pi}{f_s}, \quad k_2 = N \frac{\omega_2/2\pi}{f_s} \quad (11)$$

구해진 값의 반올림된 정수값을 취하여 FFT 변환식에 대입하면 1st모드와 2nd모드의 주파수응답의 차를 추출할 수 있다.

$$\Delta X_{mode} = X(k_{1st}) - X(k_{2nd}) \quad (12)$$

주파수해석을 위해서는 일정시간의 데이터가 필요하게 된다. 정밀한 주파수 정보를 얻기 위해서는 많은 양의 데이터가 요구된다. 그러나 데이터의 양이 많아질수록, 즉, 해석시간이 길어질수록 제어신호가 공급되는 시점의 주파수 정보와 동떨어진 과거의 주파수 정보를 얻게 되는 역효과가 발생된다. 이러한 문제를 보완하기 위해서는 정밀한 주파수 성분을 얻을 수 있는 해석시간과 제어신호 공급시점의 상태를 반영을 동시에 만족할 수 있는 해석시간 설정이 이루어져야 한다. 이의 설정은 수치실험을 통해 Fig.1의 MSFC의 제어응답을 비교하므로써 이루어졌다.

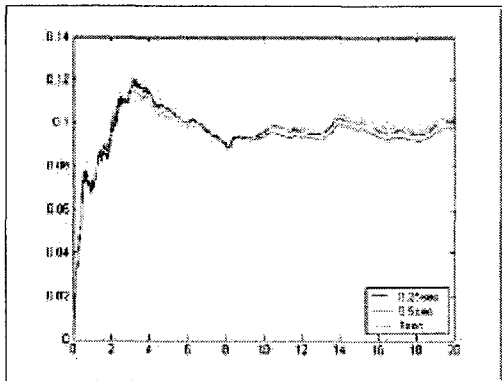


Fig.1. MSU의 주파수해석시간에 따른 제어응답비교

3.2. 퍼지 제어기 설계

변위오차와 오차변화를 그리고 출력변수의 퍼지집합은 각각 3단계의 퍼지멤버쉽함수로 구성되었으며, 주파수정보는 2단계로 구분하였다.[6] 이는 Fig.2, 3, 4, 5와 같다. Fig.4의 입력을 통해 유연보의 형태정보를 추출할 수 있다.

$$\mu_{A_i \text{ and } B_j} = \begin{cases} p(x-r)+1 & \text{when } x \in \left[\frac{r-1}{p}, r \right] \\ p(r-x)+1 & \text{when } x \in \left[r, \frac{r+1}{p} \right] \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

여기서 p 는 함수의 기울기, r 은 최고점의 위치이다.

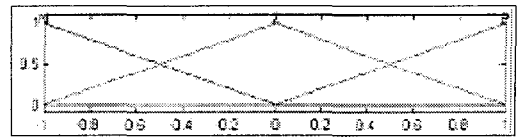


Fig. 2. Input fuzzy set $A_1 (e(k))$

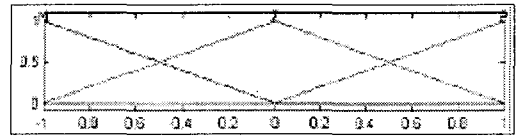


Fig. 3. Input fuzzy set $A_2 (\dot{e}(k))$

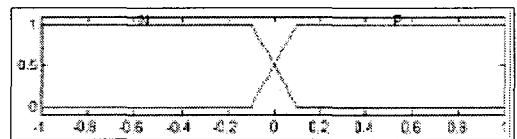


Fig. 4. Input fuzzy set $A_3 (\Delta X_{mode})$

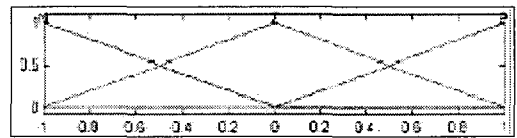


Fig. 5. Output fuzzy set $B (u(k))$

control rule은 다음의 관계식을 갖고 이를 정리하면 Table 3과 4과 같다.

$$R^{(i)} : \text{IF } e(k) \text{ is } A_{1i} \text{ and } \dot{e}(k) \text{ is } A_{2i} \text{ and } \Delta X_{mode} \text{ is } A_{3i}, \text{ THEN } u(k) \text{ is } B_i \quad (14)$$

Table 3. Control rule base 1

$\Delta X_{mode} = P$		$e(k)$		
		N	Z	P
$\dot{e}(k)$	N	P	P	Z
	Z	P	Z	N
	P	Z	N	N

Table 4. Control rule base 2

$\Delta X_{mode} = N$		$e(k)$		
		N	Z	P
$\dot{e}(k)$	N	N	N	Z
	Z	N	Z	P
	P	Z	P	P

Table 3과 4를 보면 주파수정보(Fig.4)에 따라 제어신호가 반전되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 각 모드에 따른 유연보의 형태상의 차이에서 연유된다. 모달해석에 의한 1st모드와 2nd모드의 형태는 Fig.6과 같다. 이러한 형태정보를 실시간으로 추출하기 위하여 MSU가 요구되며, MSU의 주파수 정보가 인가되지 않는 기존의 제어방식, 즉, 1st모드 제어방식과 2nd모드 제어방식에는 Table 3과 Table 4의

Control Rule을 각각 독립적으로 적용하여 MSFC방식의 응답과 성능을 비교하였다.

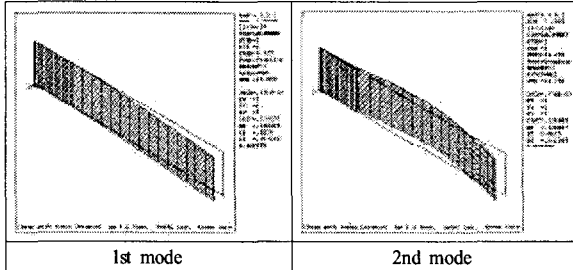


Fig. 6. Modal analysis plot of the flexible beam

linguistic description으로 설정된 입력변수와 Rule Base로부터 출력값을 도출하기 위한 추론 방법으로는 Mandani방식의 max-min composition을 사용하였다.

$$\mu_B(y) = \bigvee_x [\mu_{A_1}(x) \wedge \mu_{A_2}(x) \wedge \mu_{A_3}(x) \wedge \mu(x,y)] \quad (15)$$

출력신호생성을 위해 Center of Area방식을 채택하였다.[7]

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \mu_B(u_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_B(u_i)} \quad (16)$$

여기서 u_i 는 출력퍼지값을 N개로 이산화한 값이다.

4. 수치실험

첫 번째 수치모의실험은 불규칙한 외란을 2차모드 근사한 시스템에 인가하여 실제시스템의 응답과 비교하는 과정을 수행하였다.

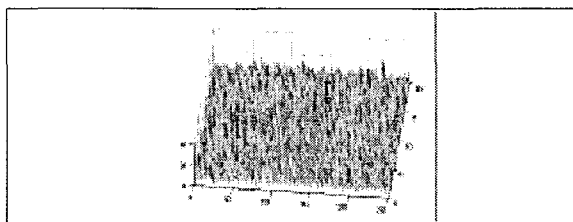


Fig. 7. Spectrogram of irregular disturbance

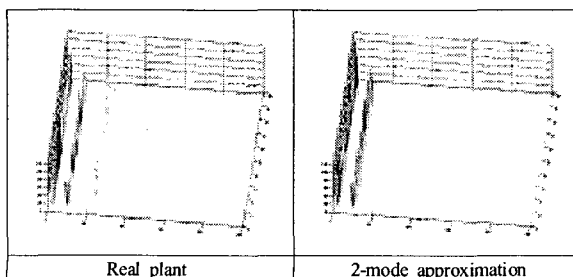


Fig. 8. Spectrogram of irregular disturbance response

불규칙 외란은 PSD = 0.0007인 White Noise를 생성하여 사용하였다. Fig.8의 실제시스템 응답을 볼 때 3rd mode 이후의 주파수응답은 총 응답에서 미미한 양을 차지하므로, 2-mode 근사가 유효함을 확인할 수 있다.

Table. 5. Natural frequencies of the system

	Real Plant	Modeling System
1st natural frequency	4.34Hz	4.24Hz
2nd natural frequency	23.96Hz	23.24Hz

다음은 시스템 모델에 1st모드와 2nd모드의 공진주파수를 인가하여, 끝단의 변위정보와 오차변화율정보만 갖는 기존의 제어방식으로 설계된 제어기들과 주파수정보를 포함한 제어기(MSFC)의 응답을 비교하였다.

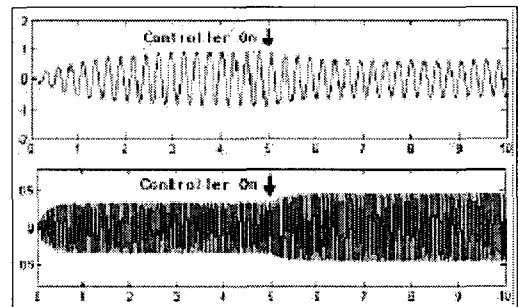


Fig. 9. 1st mode Fuzzy controller [Simulation]

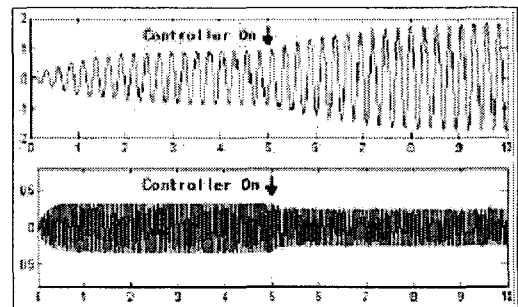


Fig. 10. 2nd mode Fuzzy controller [Simulation]

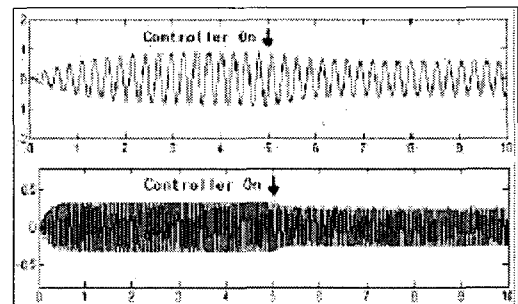


Fig. 11. Mode Selecting Fuzzy Controller [Simulation]

Fig.9와 Fig.10에서 볼수 있듯이 기존의 제어방식은 설계된 해당주파수에서는 좋은 성능을 나타내지만, 다른 주파수에

서는 오히려 응답을 가진시킨다는 사실을 확인할 수 있다. Fig.11에서 확인할 수 있듯이 MSFC는 인가된 외란의 주파수에 관계없이 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 다양한 주파수를 포함하고 있는 불규칙한 외란에 대해서도 적용을 할 수 있다는 실험적 배경이 된다. 불규칙한 외란을 공급한 상태에서의 각각의 제어응답을 비교하는 수치실험을 수행하였으며, MSFC의 제어응답이 기존의 제어기보다 성능이 우수하다는 사실을 Fig.12를 통해 확인할 수 있었다.

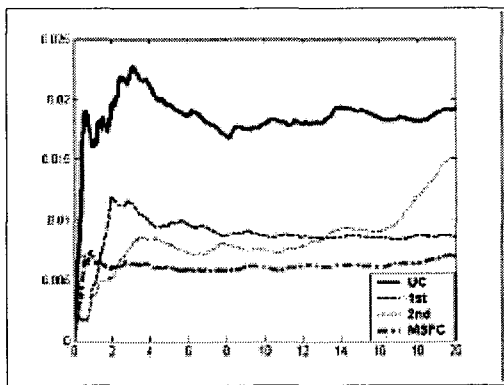


Fig. 12. Mean-Square response under irregular disturbance [Simulation]

5. 실험

실험장비설치의 개략도를 Fig.13에 나타내었다. 작동기인 Piezo ceramic은 Piezo System의 PSI-5A-S3를 사용하였고, 가진기는 B&K의 Mini Shaker를 사용하였다. 또한, NAIS의 ANL1561R 레이저 센서로 끝단 변위를 측정하였으며, 센서신호 검출과 제어신호 및 외란신호의 공급은 NI사의 NI-6024를 통해 이루어졌다. 실험에서의 샘플링 주파수는 500Hz로 설정되었으며, FFT 상수는 $N = 256$ 으로 설정하였다. 이는 MSU의 성능이 가장 우수한 0.5초에 맞추어 설정된 것이다. 이때의 1st모드와 2nd모드의 주파수 영역에서의 해당위치는 각각 $k_{1st} = 2$ 와 $k_{2nd} = 12$ 이다.

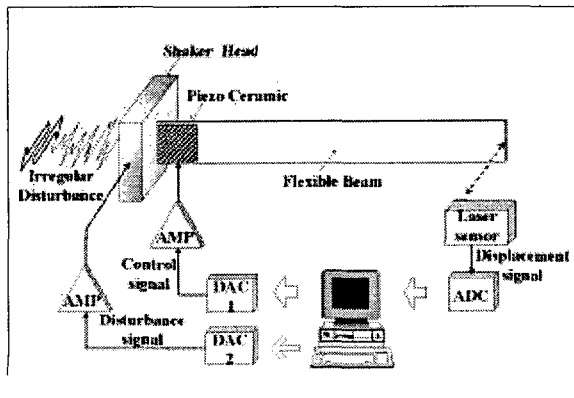


Fig. 13. Schematic diagram of the experimental setup

6. 결 과

6.1 공진주파수 공급상태에서의 제어응답

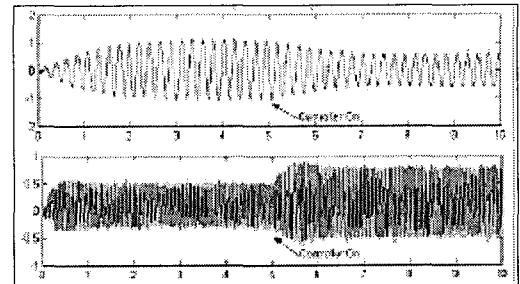


Fig. 14. 1st mode Fuzzy controller [Experiment]

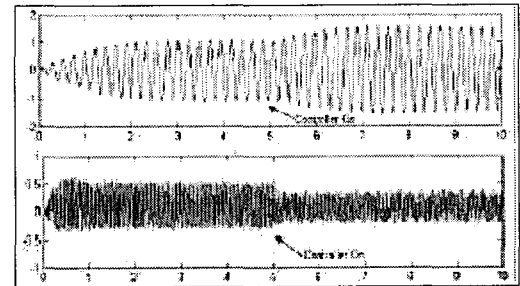


Fig. 15. 2nd mode Fuzzy controller [Experiment]

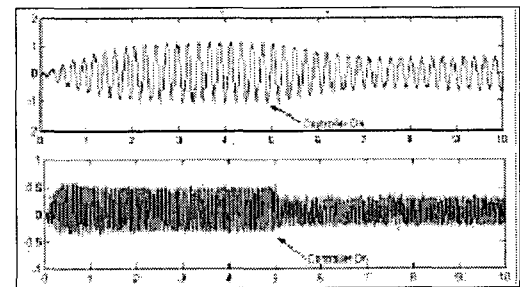


Fig. 16. Mode Selecting Fuzzy Controller [Experiment]

6.2 불규칙한 외란 공급상태에서의 제어응답

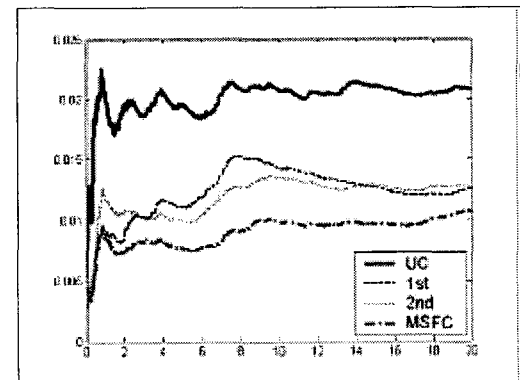


Fig. 17. Mean-Square response under irregular disturbance [Experiment]

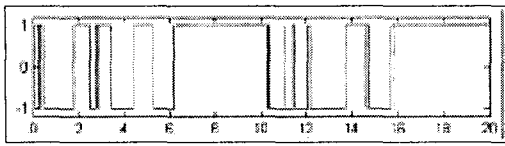


Fig. 18. Output of mode selecting unit(MSU)

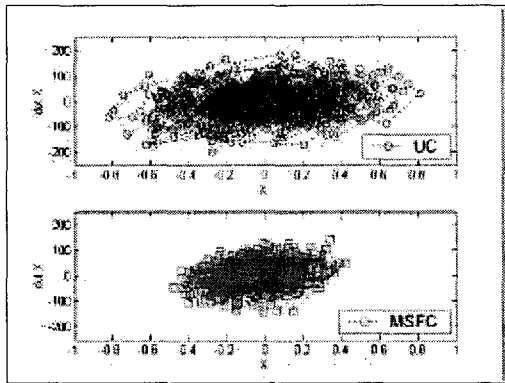


Fig. 19. Phase portrait of responses

7. 결론

본 논문에서는 불규칙한 외란을 받는 동적시스템에 대한 제어기로서 변위오차정보와 오차변화율정보 이외에 주파수 정보를 사용하는 「모드선택 퍼지제어기」를 제안하였다. 외란에 의해 형태상의 변형이 발생하는 동적시스템에 대한 제어기를 설계할 때, 무엇보다 중요한 것은 오차에 대한 정의이다. 특정위치에서 변위오차를 검출하였을 경우 그 오차 정보만으로는 시스템의 형태상의 변형여부를 확인할 수 없다. 이러한 경우 변위오차의 귀환만으로 생성된 제어신호가 오히려 외란에 의한 시스템 응답을 배가시킬 수 있다는 사실을 수치실험(Fig.9, 10)과 실험(Fig.14, 15)을 통해 확인할 수 있었다. 이러한 문제점은 FFT알고리즘을 이용한 MSU를 추가함으로써 개선할 수 있다는 사실을 MSFC의 수치실험(Fig. 11)과 실험(Fig.16)을 통해 확인할 수 있었다.

불규칙한 외란에 노출되어 있는 시스템일지라도 응답신호에 대한 주파수 분석을 통해 형태정보를 추출할 수 있고, 이러한 형태정보가 제어신호 생성에 귀환될 수 있다면 시스템은 좀더 안정화 될 수 있다는 것 역시 수치실험(Fig.12)과 실험(Fig.17, 19)을 통해 확인할 수 있었다.

본 제어기에서는 형태정보를 양과 음의 두가지 구분만으로 1st모드와 2nd모드 여부를 판단한다. 여기에 형태변형정도를 검출하여 Rule Base에 반영한다면 보다 나은 성능의 제어기 구성이 가능할 것이다. 이것이 추후연구과제이다.

참고 문헌

- [1] 허 훈, 조윤현, 김대중, 한정엽, "확률 영역에서의 제어기 설계 방법", 특허번호 0327508, 특허청, 2002.
- [2] Hoon Heo, Yun Hyun Cho "Stochastic control of Flexible beam in Random flutter" accepted, in print, Journal of Sound and Vibration
- [3] E.F. Crawley, J. de Luis, Use of piezoelectric actuators as elements of intelligent structures, AIAA J. 10(1987) 1373- 1385
- [4] William T. Thomson, Marie Dillon Dahleh, "Theory of Vibration with Applications", 5th Ed., Prentice Hall, 1998
- [5] Sophocles J. Orfanidis "Introduction to Signal Processing", Prentice Hall, 1996
- [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