

전기 유압 서어보 시스템의 퍼지제어

주해호*, 이재원*, 장우석*

Fuzzy Control for An Electro-hydraulic Servo System

Joo H.H. *, Lee J.W. *, Jang W.S. *

ABSTRACT

In this paper an electro-hydraulic servo system is designed by using a fuzzy control algorithm. In order to drive an optimal fuzzy control system, a simulation program for the control system has been developed. By this program the fuzzifier and defuzzifier, a fuzzy inference method, a fuzzy relational matrix, and a fuzzy inference method are investigated. As a result, Larsen inference method, 9x9 fuzzy relational matrix, and center of area defuzzifier are turned out the best as parameters. Finally this method is compared with the conventional PID algorithm, and showed that the fuzzy control performs better than PID algorithm. The fuzzy control performs very well adaptation against uncertain disturbances.

Key Words : Hydraulic servo system(유압 서어보 시스템), Fuzzy control(퍼지제어), Fuzzy inference engine(퍼지추론기), Fuzzifier(퍼지화기), Defuzzifier(비퍼지화기), Larsen inference method(라센 추론법),

1. 서론

전기 유압 서어보 기구는 유압 시스템의 큰 출력 및 응답성이 다른 동력 시스템보다 뛰어난 장점과 전기적 요소의 신호전달, 연산, 검출 등의 우수한 기능을 조화 결합한 제어 시스템으로써 우주 항공분야, 공작기계 및 산업기기분야, 선박, 자동차 분야, 그리고 군사병기 분야 등의 고속, 고정밀도의 위치결정 및 속도제어 등에

널리 사용되고 있으며, 특히 유압모터를 이용한 안테나, 레이다와 포신의 추적제어, 공작기계의 이송제어, 연속경로 제어형 로봇트등의 속도제어에 많이 이용되고 있다⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾.

이런 여러가지 구동장치에 이용되고 있는 유압 서어보 시스템은 시스템 고유의 비선형적인 특성때문에 시스템의 정확한 수학적 모형을 구하기가 어려울 뿐만 아니라, 유압구동장치의 운동에 있어서 외부부하 및 속도

* 영남대학교 기계공학과

의 변화가 발생하고, 이러한 비선형 시스템의 최적응답을 얻기 위해서 여러가지 제어기법을 적용한 활발한 연구가 진행되어 왔다. 윤지섭 과 조형석⁽⁴⁾은 유압 서어보 속도제어 시스템에 대해서 외부부하 토크의 변화에 따른 최적의 이득값이 자동적으로 조절되는 적응 제어기를 설계하였고, 장효환, 안병천⁽⁵⁾ 등은 마이크로 컴퓨터를 사용하여 전기 유압 서어보 시스템의 속도를 제어하는데 있어서 제어기법 및 마이크로 프로세서와 A/D, D/A 변환기의 비트수가 시스템의 과도응답 특성에 미치는 영향에 대해서 비교 연구하였다. S.D.Kim 과 H.S.Cho⁽⁶⁾는 가변펄프를 사용한 Load-Sensing 유압 서어보 시스템의 속도제어를 위해서 Suboptimal PID 제어기법을 적용하여 제어기의 이득값과 최적의 시스템 설정압력을 계산할 수 있는 방법을 제시하였다.

Pey-Chung CHEN 과 Ming-Chang SHIH⁽⁷⁾는 PID 와 Fuzzy-PID 제어기를 설계하고, 가변부하가 작용하는 유압 서어보 위치제어 시스템에 적용하여 기존의 PID 제어방법과 비교 연구하였으며, H.J.Park 과 H.S.Cho⁽⁸⁾는 유압식 단조기계의 압력을 제어하기 위해서 퍼지규칙에 바탕을 둔 반복학습 제어기법을 적용하였다.

Behmenburg⁽⁹⁾는 유압 실린더의 위치를 제어하기 위해서 퍼지 논리 제어기를 설계하였으며, 주해호, 이재원, 박창선⁽¹⁰⁾은 퍼지 제어 시스템을 위한 마이크로 컴퓨터 지원 설계에 관한 연구를 하였다.

일반적으로 고전적인 제어이론을 도입하여 제어기를 설계할 때는 시스템의 해석에 필요한 구체적인 수학적 모델링이 중요한 역할을 하는 반면에, 최근 활발한 연구가 되고 있는 퍼지이론에 바탕을 둔 퍼지제어 알고리즘은 수학적 모델링이 어려운 복잡한 공정제어에 시스템 조작자인 엔지니어의 풍부한 경험이나 직관, 학습능력 등을 바탕으로 한 언어적인 제어규칙을 근사추론함으로써 시스템의 구체적인 수학적 모형을 필요로 하지 않는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 퍼지제어 알고리즘의 장점을 이용하여 퍼지 제어기를 설계하고, 이를 전기 유압 서어보 시스템의 속도제어에 적용하여 퍼지제어 알고리즘의 제어성능을 평가하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 여러가지 퍼지 추론법의 특성을 분석하여 전기 유압 서어보 시스템에 가장 적합한 퍼지제어 알고리즘을 제시하였고, 퍼지제어 알고리즘의 제어성능을 확인하기 위하여 PID제어와 비교하였다. 시스템의 동특성이 변

한 경우(외부부하의 관성 모멘트가 변하는 경우)에 퍼지제어가 PID제어 보다 더 우수한 제어성능을 보여 주었다. 퍼지제어는 Larsen 추론법과 9×9 퍼지 관계행렬, 등간격의 퍼지 입출력 변수, 오차의 퍼지집합과 오차 변화분의 퍼지집합을 각각 40 과 5 로 선택했을때 전기 유압 서어보 시스템의 회전속도 제어가 가장 우수하였다.

2. 전기 유압 서어보 시스템의 구성

본 논문에서 유압모터의 속도를 제어하는 전기 유압 서어보 시스템(electro-hydraulic servo system)⁽⁵⁾의 개략도는 Fig.1 과 같다.

마이크로 컴퓨터에서 D/A 변환기를 통하여 나오는 제어신호는 전압으로 출력이 되는데, 이 전압량을 VCCS (Voltage Controlled Current Source) 를 통하여 전류로 변환시킨 후, 토크 모터로 작동되는 미끄럼 스플 2단형의 전기 유압식 서어보 밸브에 인가한다. 서어보 밸브에 의해서 유량을 제어하게 되고, 내접 치차형 유압모터를 회전시킨다. 이때 유압모터에 연결된 관성부하의 회전속도를 타코메타(tachometer)로 검출하여, A/D 변환기를 통해서 다시 마이크로 컴퓨터에 피이드백(feedback) 된다.

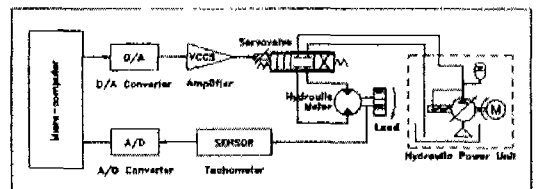


Fig. 1 Schematic diagram of an electro-hydraulic servo system

2-1. 시스템 방정식

본 논문에서 사용한 전기 유압 속도제어 시스템의 블록선도는 Fig.2 와 같다.

(1) 전기 유압 서어보 시스템

전압 제어 신호를 전류 제어 신호로 변환시켜주는 증폭기(VCCS)의 전달함수 $K_e(s) = K_e$ 와 $G_p(s)$ 를 합한 전체 제어 시스템의 전달함수 $G_t(s)$ 는 식(1)과 같이 표현된다.⁽³⁾⁽⁵⁾

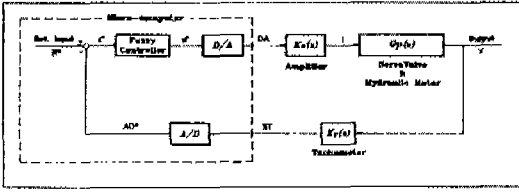


Fig. 2 Block diagram of an electro-hydraulic servo system

$$G_t(s) = \frac{K_r K_q / D_m \left(1 + \frac{K_{ce} B_m}{D_m^2}\right)}{(\tau_v s + 1) \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + 2\delta_h \frac{s}{\omega_h} + 1\right)} \quad (1)$$

여기서, K_q 는 증폭기의 이득, D_m 은 유압모터의 배체용적, B_m 은 모터의 점성감쇠계수, $K_q = K_q' / K_v$, K_3 은 유량이득, K_v 는 서어보 밸브의 이득, $K_{ce} = K_c + C_{lm}$, K_{ve} 는 총 유량압력계수, K_c 는 유량압력계수, C_{lm} 은 총 누설계수, τ_v 는 서어보 밸브의 시정수, ω_h 는 고유진동수, δ_h 는 감쇠비, β_e 는 유효체적 탄성계수, V_t 는 총 압축체적, J_t 는 유압모터와 부하의 등가 관성 모우먼트 이고, ω_h 와 δ_h 는 각각 식(2), (3)과 같다.

$$\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e D_m^2}{J_t V_t} \left(1 + \frac{K_{ce} B_m}{D_m^2}\right)} \quad (2)$$

$$\delta_h = \frac{1}{D_m} \left(\frac{V_t B_m}{4\beta_e} + K_{ce} J_t\right) \sqrt{\frac{\beta_e}{J_t V_t \left(1 + K_{ce} B_m / D_m^2\right)}} \quad (3)$$

식(1)에 시스템 파라메타 값들^[5]을 대입하여 계산하면 $G_t(s)$ 는 식(4)와 같다.

$$G_t(s) = \frac{Y(s)}{DA(s)} = \frac{1.357 \times 10^6}{(s+33)(s+68)(s+387)} \quad (4)$$

식(4)를 차분방정식으로 표현하면 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$Y(k) = b_1 \cdot DA(k-1) + b_2 \cdot DA(k-2) + b_3 \cdot DA(k-3) - [a_1 \cdot Y(k-1) + a_2 \cdot Y(k-2) + a_3 \cdot Y(k-3)] \quad (5)$$

여기서, $Y(k)$ 는 k 번째 시스템의 출력값, $DA(k-1)$ 는 $k-1$ 번째 D/A 변환기의 출력값이다. 각각의 계수는 다음과 같다

$$\begin{aligned} a_1 &= -(e^{-aT} + e^{-bT} + e^{-cT}) \\ a_2 &= e^{-(a+b)T} + e^{-(b+c)T} + e^{-(a+c)T} \\ a_3 &= e^{-(a+b+c)T} \\ b_1 &= \\ &= -C_1(e^{-aT} + e^{-bT} + e^{-cT}) - C_2(1 + e^{-bT} + e^{-cT}) \\ &= -C_3(1 + e^{-aT} + e^{-cT}) - C_4(1 + e^{-aT} + e^{-bT}) \\ b_2 &= \\ &= C_1(e^{-(a+b)T} + e^{-(b+c)T} + e^{-(a+c)T}) + C_2(e^{-bT} + e^{-cT} + e^{-(b+c)T}) \\ &= C_3(e^{-aT} + e^{-cT} + e^{-(a+c)T}) + C_4(e^{-aT} + e^{-bT} + e^{-(a+b)T}) \\ b_3 &= \\ &= -C_1 \cdot e^{-(a+b+c)T} - C_2 \cdot e^{-(b+c)T} - C_3 \cdot e^{-(a+c)T} - C_4 \cdot e^{-(a+b)T} \end{aligned}$$

$a=33.3333$, $b=68.4151$, $c=386.9107$

$C_1=1.5379$, $C_2=-3.2820$, $C_3=1.7752$, $C_4=-0.0311$

여기서, T 는 샘플링 시간(sampling time)이다.

(2) D/A 변환기

D/A 변환기는 unipolar 형으로 비트수를 임의로 선택할 수 있으며, 차분방정식으로 표현하면 식(6)과 같다.

$$DA(k) = \frac{U^*(k) * OMAXV}{(2^n - 1)} \quad (6)$$

여기서, $DA(k)$ 는 k 번째 D/A 변환기의 출력값, $U^*(k)$ 는 k 번째 피지제어기의 출력값(디지털값), n 은 D/A 변환기의 비트수, $OMAXV$ 는 D/A 변환기의 정격 출력 전압의 최대값이다.

(3) 속도센서

속도센서는 속도검출용 DC 타코메타를 사용하고, 이것의 수학모형은 상수항으로 표시된다. 타코메타의 차분방정식은 식(7)과 같다.

$$ST(k) = K_T * Y(k) \quad (7)$$

여기서, $ST(k)$ 는 k 번째 타코메타의 출력값, K_T 는 타코메타의 이득이다.

(4) A/D 변환기

A/D 변환기는 bipolar 형으로 비트수를 임의로 선택할 수 있으며, 차분방정식으로 표현하면 식(8)과 같다.

$$AD^*(k) = \frac{(2^n - 1) * (ST(k) + IMAXV)}{(IMAXV - IMINV)} \quad (8)$$

여기서, $AD^*(k)$ 는 k 번째 A/D 변환기의 출력값(디지털값), n 은 A/D 변환기의 비트수, $IMAXV$, $IMINV$ 는 각각 A/D 변환기 정격 입력 전압의 최대값과 최소값이다.

(5) 퍼지 제어기

퍼지 제어기에 대해서는 3장에서 설명한다.

3. 퍼지 제어기의 설계

Fig.3은 퍼지 제어기의 구조를 블록 선도⁽¹⁰⁾로 표시한 것이다. 퍼지제어기는 퍼지화기(fuzzifier), 퍼지 추론기(fuzzy inference engine)와 비퍼지화기(defuzzifier)로 구성되어 있는 퍼지 추론 메카니즘(fuzzy inference mechanism)과 퍼지 제어 규칙을 기억하고 있는 퍼지 규칙 메모리(fuzzy rule memory)로 구성되어 있다.

본 논문에서는 여러가지 퍼지 추론방법과 여러가지 비퍼지화 방법에 따라 컴퓨터 시뮬레이션한 후, 전기 유압 서어보 시스템에 가장 좋은 제어성능을 나타내는 Larsen 추론법⁽¹⁷⁾과 등간격의 삼각형 퍼지 입력 출력 변수와 비퍼지화 방법으로 무게 중심법을 선택하여 퍼지 제어 시스템을 설계하였다.

3-1. 퍼지화기 (Fuzzifier)

퍼지 제어기의 입력인 시스템의 오차 e 와 한 샘플링 구간에서의 오차의 변화분 de 에 척도 계수(scaling factor) k_1, k_2 를 곱하여 -1과 1사이의 값으로 정규화(normalization)시켜 퍼지 부분집합인 퍼지 입력 변수

x 와 dx 에 해당하는 퍼지변수의 등급 $E(x)$ 과 $dE(dx)$ 를 출력시킨다. 이를 수학모형으로 표현하면 식(9), (10)과 같다.

$$E_{i1}[x(k)] = k_1 * [R - AD(k)] \quad (9)$$

$$dE_{i2}[dx(k)] = k_2 * [AD(k-1) - AD(k)] \quad (10)$$

여기서, $E_{i1}[x(k)]$ 는 k 번째 퍼지 입력 변수 x 에 해당하는 퍼지변수의 등급, $x(k)$ 는 k 번째 퍼지 입력 변수 E 의 퍼지 부분집합(fuzzy subset), $dE_{i2}[dx(k)]$ 는 k 번째 퍼지 입력 변수 dx 에 해당하는 퍼지변수의 등급, $dx(k)$ 는 k 번째 퍼지 입력 변수 dE 의 퍼지 부분집합, i 는 k 번째 해당하는 규칙의 수, R 은 요구 입력값, $AD(k)$ 는 k 번째 A/D변환기의 출력값, k_1, k_2 는 퍼지 변수의 퍼지집합(E, dE)을 정규화 시키기 위한 척도 계수로써 각각 $k_1 = 1/T_1, k_2 = 1/T_2$ 로 정의하며,

T_1 은 오차의 퍼지집합, T_2 는 오차 변화분의 퍼지집합이다.

본 논문에서는 세가지 퍼지 추론 방법을 적용하여 각 추론법에 따라 퍼지 입력 변수의 언어적인 등급을 나타내는 소속 함수(membership function)를 다음과 같이 정의 하였다. Larsen 추론법 에서 퍼지 입력 변수인 x 와 dx 의 소속 함수를 Fig.4 와 같은 등간격인 삼각형 형태의 언어적 퍼지등급을 사용하였다.

3-2. 퍼지 규칙 메모리(Fuzzy Rules Memory)

퍼지 입 출력 변수가 선정되면 퍼지 제어 규칙을 결정하게 된다. "If - then" 형태의 언어적인 표현을 Table.1과 같은 2차원 행렬 형태인 결정표(look-up table)로 나타낼 수가 있다.

Larsen 추론법에서 정방 행렬(square matrix)인 퍼지 관계 행렬(fuzzy relational matrix) FRM에 제어 규칙이 기억되어 있으며, 수학모형으로 표현하면

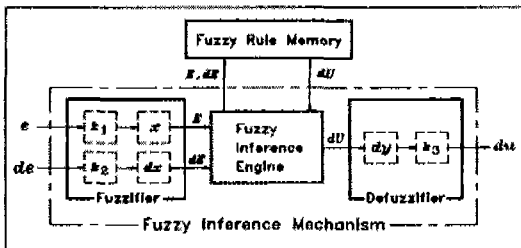


Fig. 3 Block diagram of a fuzzy controller

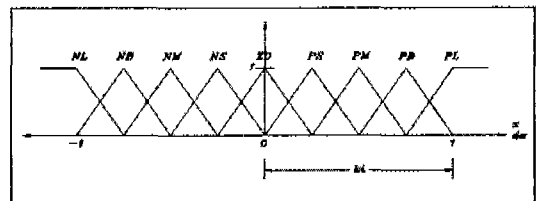


Fig. 4 Membership function of a triangular fuzzy variable

Table. 1 Fuzzy relational matrix

$\begin{matrix} dE \\ E \end{matrix}$	NL	NM	ZO	PM	PL
NL	-1.0	-0.75	-0.5	-0.25	0.0
NM	-1.0	-0.75	-0.25	0.0	0.25
ZO	-0.75	-0.25	0.0	0.25	0.5
PM	-0.25	0.0	0.25	0.5	0.75
PL	0.0	0.25	0.5	0.75	1.0

식(11)과 같다.

$$dU_i(k) = FRM\{E_{i1}[x(k)], dE_{i2}[dx(k)]\} \quad (11)$$

여기서, $dU_i(k)$ 는 k번째 퍼지 출력 변수 dU의 퍼지 등급이며, FRM은 제어 규칙에 기억되어 있는 퍼지 관계 행렬이고, $E_{i1}[x(k)]$ 는 k번째 퍼지 입력 변수 x에 해당하는 퍼지변수의 등급, $dE_{i2}[dx(k)]$ 는 k번째 퍼지 입력 변수 dx에 해당하는 퍼지변수의 등급이다.

3-3. 퍼지 추론기 (Fuzzy Inference Engine)

퍼지 입력 변수를 이용해서 퍼지 규칙 메모리에 있는 퍼지 출력 변수를 찾는 퍼지 추론 연산을 이행하며, 퍼지 추론기에서 이루어지는 퍼지 연산은 각 추론법에 따라 달라진다⁽¹²⁾⁽¹⁴⁾. 곱 합성연산자(product compositional operator, “*”)를 사용한 Larsen 추론법은 식(12)와 같다.

$$w_i(k) = E_{i1}[x(k)] * dE_{i2}[dx(k)] \quad (12)$$

여기서, $w_i(k)$ 는 k번째 규칙의 적합도(weight), $E_{i1}[x(k)]$, $dE_{i2}[dx(k)]$ 는 k번째 퍼지 입력변수 x, dx에 해당하는 퍼지변수의 등급이다. Fig.5는 Larsen 추론법을 도식화 한 것이다.

3-4. 비퍼지화기 (Defuzzifier)

퍼지 추론에 의해 추론된 퍼지 출력 변수를 비퍼지화기가 실제 시스템의 조작량으로 변환시켜 준다. 비퍼지화 방법은 무게 중심법을 사용하였다. 그리고 퍼지 출력 변수인 dy의 소속 함수는 Fig.4와 같은 등간격인 삼각형 형태의 언어적 퍼지등급을 사용하였다. 수학적

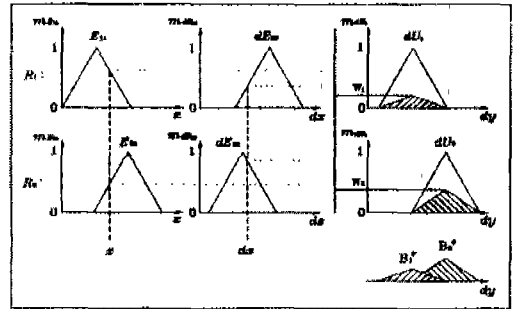


Fig. 5 Diagrammatic representation of Larsen inference method

형은 식(13)과 같다.

$$dy(k) = \sum_{i=1}^n [w_i(k) * dU_i(k) / w_i(k)] \quad (13)$$

여기서, $dy(k)$ 는 k번째 비퍼지화 된 값, $w_i(k)$ 는 k번째 규칙의 적합도, n은 k번째 해당되는 규칙의 수, $dU_i(k)$ 는 퍼지 출력 변수의 퍼지등급이다.

비퍼지화 방법에 따라 계산된 퍼지 입력 변수의 크리 스프 값(crisp value)을 척도 계수(scaling factor) k_3 를 사용하여 퍼지 제어기의 출력값을 계산한다. 이를 수학적모형으로 표시하면 식(14)와 같다.

$$dy(k) = k_3 * du(k) \quad (14)$$

여기서, $du(k)$ 는 k번째 시스템의 조작량이고, k_3 는 D/A 변환기의 정격 출력 전압(10V)에 해당하는 디지털 값(4095)을 가지는 척도 계수이다.

4. 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션은 실물을 직접 실험하지 않고 시스템의 수학적 모형을 만들어 수치해석적인 방법으로 컴퓨터가 풀이해 줌으로써 시스템을 해석하고 설계하는데 상당한 시간의 절약, 비용의 절감, 계산의 신속성 및 정확성 등의 장점이 있다⁽¹⁵⁾. 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램은 IBM-PC 호환기종(80286, 80386, 80486)에서 사용가능하고, 그래픽을 지원하는 Turbo-C 언어를 사용하여 작성 하였다.

시뮬레이션 프로그램을 이용하여 유압 서버보 시스템에 퍼지 추론방법과 비퍼지화 방법에 따른 제어성능을 비교 분석하고, 가장 우수한 제어성능을 나타내는 퍼지

Table. 2 Computer simulation cases for the Larsen inference method

CASE	FRM	T ₁	T ₂	FIG	CASE	FRM	T ₁	T ₂	FIG
1	9x9	40	1	6-a	16	5x5	30	5	6-f
2	9x9	40	5	6-a	17	9x9	30	5	6-f
3	9x9	40	50	6-a	18	11x11	30	5	6-f
4	9x9	5	5	6-b	19	9x9	51.4	1	6-g
5	9x9	40	5	6-b	20	9x9	51.4	5	6-g
6	9x9	100	5	6-b	21	9x9	51.4	50	6-g
7	5x5	40	5	6-c	22	9x9	40	5	6-h
8	9x9	40	5	6-c	23	9x9	51.4	5	6-h
9	11x11	40	5	6-c	24	9x9	60	5	6-h
10	9x9	30	1	6-d	25	5x5	33.5	5	6-i
11	9x9	30	5	6-d	26	9x9	51.4	5	6-i
12	9x9	30	50	6-d	27	11x11	47	5	6-i
13	9x9	5	5	6-e	28	9x9	40	5	6-j
14	9x9	30	5	6-e	29	9x9	30	5	6-j
15	9x9	100	5	6-e	30	5x5	33.5	5	6-j

(Note)FRM : Size of fuzzy rule memory.
 FIG : Figures
 T₁ : Fuzzy set of error (E)
 T₂ : Fuzzy set of error rate (dE)

추론방법과 비퍼지화 방법, 최적의 퍼지 관계 행렬의 크기, 최적의 오차의 퍼지집합(T₁)과 오차 변화분의 퍼지집합(T₂)을 찾아내기 위하여 시뮬레이션을 시행착오 방법으로 수행하였다.

시뮬레이션 결과, 샘플링 시간을 0.004초, A/D 및 D/A 변환기의 비트수는 12비트 이상이 적당함을 알 수 있었다.

각 추론법에 대해서 새가지 비퍼지화 방법을 적용시키고, 각각의 퍼지 관계 행렬의 크기에 대한 T₁과 T₂를 변화시키면서 시스템의 시간반응을 분석하여 각 추론법에 대해서 가장 우수한 제어성능을 나타내는 비퍼지화 방법과 최적의 퍼지 관계 행렬, 그리고 T₁과 T₂를 결정하였다. 추론방법에 따른 시스템의 시간반응을 비교한 결과, Larsen 추론법이 전기 유압 서어보 시스템에 가장 적합하였다. 따라서 본 논문에서는 Larsen 추론방법을 적용한 제어성능을 분석하였다.

Table. 2는 Larsen 추론법을 이용한 유압 서어보 시스템에 대한 컴퓨터 시뮬레이션의 경우(CASE)를 열거한 것이다.

CASE 1에서 6까지는 비퍼지화 방법은 무게 중심법, 퍼지 관계 행렬은 9x9, 퍼지 입출력 변수는 등간격으로 하고, T₁과 T₂를 각각 변화시키면서 시뮬레이션

하는 경우이다.

CASE 7에서 9까지는 비퍼지화 방법은 무게 중심법, 퍼지 입출력 변수는 등간격, T₁과 T₂를 40과 5로 하고, 퍼지 관계 행렬을 5x5, 9x9, 11x11로 변화시키면서 시뮬레이션 하는 경우이다.

CASE 10에서 15까지는 비퍼지화 방법은 최대 평균법, 퍼지 관계 행렬은 9x9, 퍼지 입출력 변수는 등간격으로 하고, T₁과 T₂를 각각 변화시키면서 시뮬레이션 하는 경우이다.

CASE 16에서 18까지는 비퍼지화 방법은 최대 평균법, 퍼지 입출력 변수는 등간격, T₁과 T₂를 30과 5로 하고, 퍼지 관계 행렬을 5x5, 9x9, 11x11로 변화시키면서 시뮬레이션 하는 경우이다.

CASE 19에서 24까지는 비퍼지화 방법은 최대값 방법, 퍼지 관계 행렬은 9x9, 퍼지 입출력 변수는 등간격으로 하고, T₁과 T₂를 각각 변화시키면서 시뮬레이션 하는 경우이다.

CASE 25에서 27까지는 비퍼지화 방법은 최대값 방법, 퍼지 입출력 변수는 등간격, T₁과 T₂를 각각 33.5와 5, 51.4와 5, 47과 5로 하고, 퍼지 관계 행렬을 5x5, 9x9, 11x11로 변화시키면서 시뮬레이션 하는 경우이다.

CASE 28에서 30까지는 각 비퍼지화 방법에 대해서 가장 좋은 경우를 추출하여 비교하는 시뮬레이션 경우이다. 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

Fig.6(a)는 퍼지 추론법을 Larsen, 비퍼지화 방법을 무게 중심법, FRM의 크기를 9x9, 오차의 퍼지집합(T₁)을 40으로 고정시키고, 오차 변화분의 퍼지집합(T₂)을 1, 5, 50으로 변화시켜 시뮬레이션하여 T₂가 시스템의 시간반응에 미치는 영향을 분석하였다. T₂가 증가할수록 상승시간은 빨라지지만 초과치(over-shoot)가 크며 진동현상을 보였다. T₂가 5일때 가장 제어가 잘 되었다.

Fig.6(b)는 위와 같은 조건하에서 T₂를 5로 고정시키고, T₁을 5, 40, 100으로 변화시켜 시뮬레이션하여 T₁에 대한 영향을 분석하였다. T₁이 감소할수록 진동현상을 보이면서 전혀 제어가 되지 않았고, T₁이 증가할수록 상승시간과 안정시간이 길어짐을 알 수 있었다. T₁이 40일때 가장 제어가 잘 되었다.

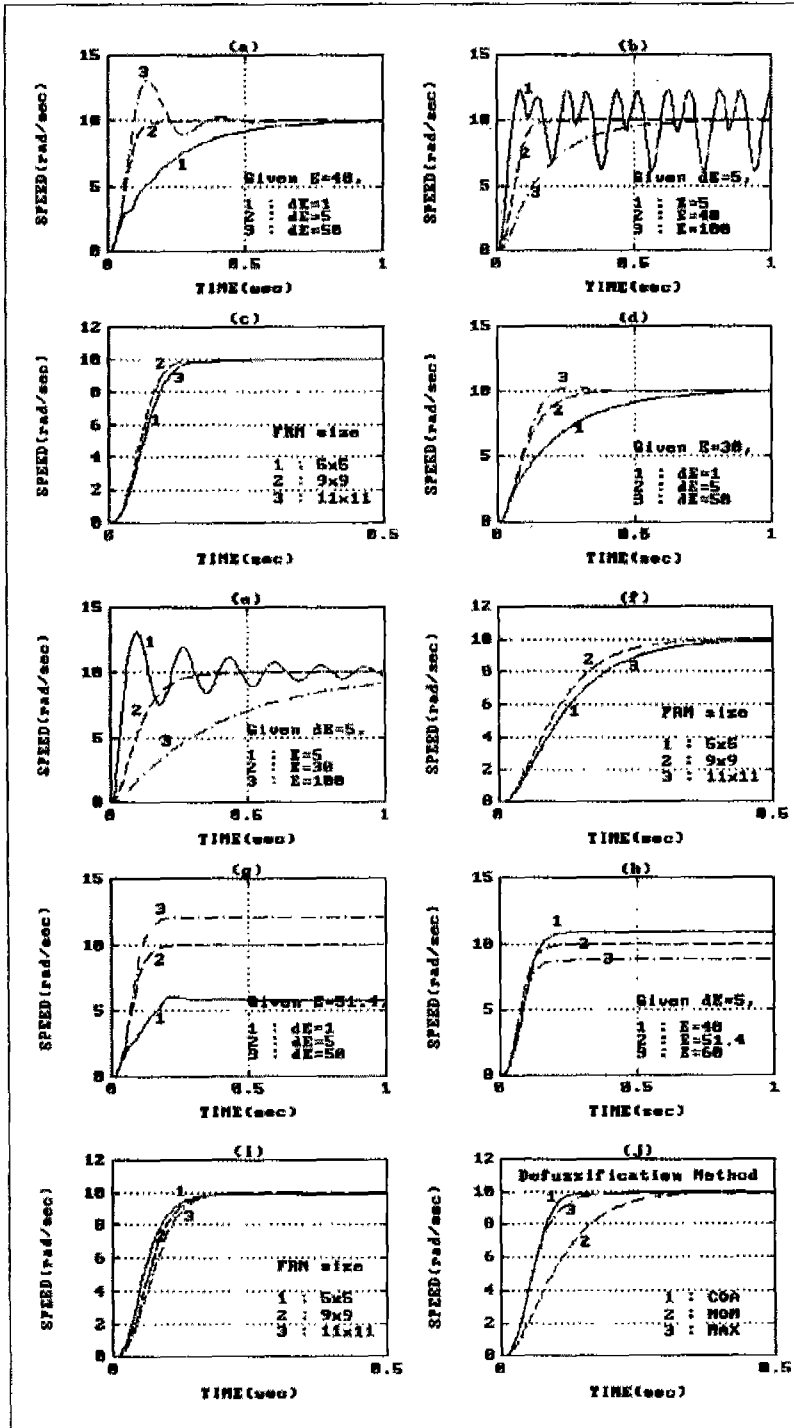


Fig. 6 Time responses for the various fuzzy control systems

Fig. 6(c)는 위와 같은 퍼지 추론법과 비퍼지화 방법에 대해서 T_1 을 40, T_2 를 5로 고정시키고, FRM의 크기를 5×5 , 9×9 , 11×11 로 변화시켜 시뮬레이션하여 퍼지 관계 행렬의 크기에 따른 영향을 분석하였다. FRM의 크기가 9×9 일때가 가장 빠른 반응을 보였다.

Fig. 6(d)는 퍼지 추론법을 Larsen, 비퍼지화 방법을 최대 평균법, FRM의 크기를 9×9 , T_1 을 30으로 고정시키고, T_2 를 1, 5, 50으로 변화시켜 시뮬레이션하여 T_2 가 시스템의 시간반응에 미치는 영향을 분석하였다. T_2 가 증가할수록 상승시간은 빨라지지만 초과치가 발생하였다. T_2 가 5일때 가장 제어가 잘 되었다.

Fig. 6(e)는 위와 같은 조건하에서 T_2 를 5로 고정시키고, T_1 을 5, 30, 100으로 변화시켜 시뮬레이션하여 T_1 에 대한 제어성능을 조사하였다. T_1 이 감소할수록 진동현상을 보였고, T_1 이 증가할수록 상승시간과 안정시간이 현저하게 길어짐을 알 수 있었다. T_1 이 30일때 가장 제어가 잘 되었다.

Fig. 6(f)는 위와 같은 퍼지 추론법과 비퍼지화 방법에 대해서 T_1 을 30, T_2 를 5로 고정시키고, FRM의 크기를 5×5 , 9×9 , 11×11 로 변화시켜 시뮬레이션하여 퍼지 관계 행렬의 크기에 따른 영향을 분석하였다. FRM의 크기가 9×9 일때가 가장 빠른 반응을 보였다.

Fig. 6(g)는 퍼지 추론법을 Larsen, 비퍼지화 방법을 최대값 방법, FRM의 크기를 9×9 , T_2 을 51로 고정시키고, T_1 을 1, 5, 50으로 변화시켜 시뮬레이션하여 T_2 가 시간반응에 미치는 영향을 분석하였다. T_2 가 증가할수록 양의 오프셋(positive offset)이 발생하고, T_2 가 감소할수록 음의 오프셋(negative offset)이 발생하였다. T_2 가 5일때 가장 제어가 잘 되었다.

Fig. 6(h)는 위와 같은 조건하에서 T_2 를 5로 고정시키고, T_1 을 40, 51, 60으로 변화시켜 시뮬레이션하여 T_1 에 대한 영향을 조사하였다. T_1 이 감소할수록 양의 오프셋(positive offset)이 발생하고, T_1 이 증가할수록

음의 오프셋(negative offset)이 발생하였다. T_1 의 미세한 변화에 대해서 시스템이 민감하게 반응한다는 것을 알 수 있었으며, T_1 이 51일때 가장 제어가 잘 되었다.

Fig. 6(i)는 위와 같은 퍼지 추론법과 비퍼지화 방법에 대해서 T_1 을 51, T_2 를 5로 고정시키고, FRM의 크기를 5×5 , 9×9 , 11×11 로 변화시켜 시뮬레이션하여 퍼지 관계 행렬의 크기에 따른 영향을 분석하였다. 이 경우 FRM의 크기가 5×5 일때가 가장 빠른 반응을 보였다.

Fig. 6(j)는 Larsen 추론법에 대해서 세가지 비퍼지화 방법에 대해서 시뮬레이션한 결과이며, 무게 중심법(COA)과 최대값 방법(MAX)이 최대 평균법(MOM)보다 우수한 제어성능을 나타냈으며, 무게 중심법이 최대값 방법보다 상승시간이 조금 빠를 뿐 거의 유사한 반응을 나타내었다. 그러나 최대값 방법의 경우에는 Fig. 6(h)에서 T_1 의 미세한 변화에 대해서도 시스템이 민감하게 반응을 나타내므로 최적의 T_1 과 T_2 의 영역을 선정하기가 대단히 어렵다. 그에 비해 무게 중심법은 제어가능한 T_1 과 T_2 의 영역이 넓기 때문에 그 값들을 찾기가 용이하다. 그러므로 비퍼지화 방법으로는 무게 중심법을 선정하는 것이 퍼지 제어를 설계하는데 편리하다. 그리고 FRM의 크기는 9×9 , T_1 과 T_2 는 각각 40과 5로 선정할 때 가장 우수한 제어성능을 나타내었다.

이상과 같은 시뮬레이션 결과로 선정된 가장 우수한 성능을 보인 퍼지제어 알고리즘을 적용한 시스템의 시간반응과 PID제어를 적용한 시스템의 시간반응을 비교하였다. PID 제어기의 파라메타 값들은 Ziegler-Nichols 조정방법^[16]을 사용하여 구하였으며, 그 값은 $K_p = 7.3$, $K_i = 563.26$, $K_d = 0.024$ 이다. Fig. 7은 두 제어 알고리즘에 대한 시스템의 시간반응이다. 퍼지제어를 적용한 경우에는 안정시간이 빠르고 초과치(overshoot)도 발생하지 않았고, PID 제어를 적용한 경우에는 초과치가 발생하고, 안정시간도 느리게 나타났다.

여러가지 이유로 시스템의 동특성이 변하는 경우에 대해서 퍼지제어와 PID제어가 잘 적응하는가를 알아보기 위해서 시뮬레이션하였다. 유압 서어보 시스템의 동특성을 변화시키기 위해서 유압모터와 관성부하의 등가 관성모멘트(J_v)의 값을 변화시켰다.

Fig. 8은 유압 서어보 시스템의 동특성이 변한 경우에 대하여 퍼지제어 알고리즘을 적용한 경우의 시스템

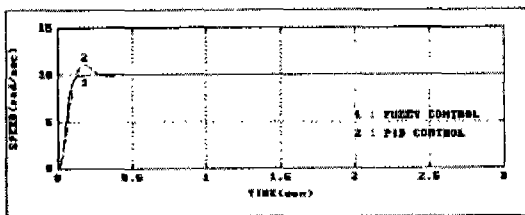


Fig. 7 Comparison of fuzzy and PID control algorithm

시간반응과 PID제어 알고리즘을 적용한 경우의 시스템 시간반응을 비교한 것이다. 정상상태에서 시스템의 동특성을 변화시켰을때 퍼지제어 알고리즘인 경우에는 제어가 잘 되고, PID제어 알고리즘의 경우에는 제어가 잘 되지 않음을 알 수 있었다. PID제어 경우는 시스템의 반응에 따라 최적의 PID제어 파라미터를 결정해야 하기 때문에 변화된 시스템의 경우는 잘 적용되지 않는다. 반면에 퍼지제어는 시스템 동특성의 변화에 관계없이 시스템의 반응으로부터 오차와 오차율을 최소화 시켜주는 제어방법이므로 동특성변화에 잘 적용됨을 알 수 있다.

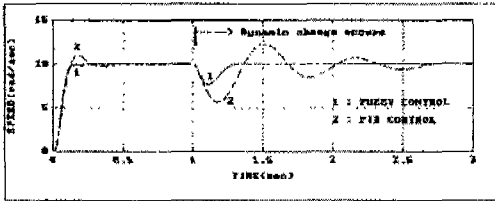


Fig. 8 Comparison of fuzzy and PID control algorithm for the changed dynamics

6. 결 론

전기 유압 서어보 시스템의 속도제어 있어서 효과적이고 우수한 제어성능을 얻을 수 있도록 최적의 퍼지제어 알고리즘을 선정하고 제어 시스템을 해석하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램을 개발하여 퍼지제어 시스템을 설계하였다.

시뮬레이션 결과, 최적의 샘플링 시간은 0.004 초, A/D 및 D/A 변환기의 최적의 비트수는 12비트가 가장 적합하다는 것을 알 수 있었다.

세가지 퍼지 추론 방법과 세가지 비퍼지화 방법을 각각 적용하고, 퍼지 관계 행렬의 크기를 5×5 등간격, 9×9 등간격, 11×11 등간격으로 변화시켜 가면서 시뮬레이션 한 결과, 퍼지 추론 방법은 Larsen 추론법, 비퍼지화 방법은 무게 중심법, 퍼지 관계 행렬의 조건은 9×9 등간격, 오차의 퍼지집합(T_1)은 40, 오차 변화분의 퍼지집합(T_2)은 5일때가 전기 유압 서어보 시스템에 대한 최적의 퍼지제어 알고리즘으로써 가장 우수한 시스템의 시간반응을 보였다.

퍼지 제어기 설계에 있어서 오차의 퍼지집합(T_1)과 오차 변화분의 퍼지집합(T_2)의 설정이 제어 시스템의

시간반응에 상당한 영향을 준다는 것을 알았다.

퍼지제어 알고리즘의 제어성능을 PID제어 알고리즘과 비교분석한 결과, 퍼지제어를 적용한 경우에는 안정 시간이 빠르고 초과치도 발생하지 않았고, PID제어를 적용한 경우 보다 우수한 제어성능을 보였다.

시스템의 동특성이 변하는 경우, 퍼지제어는 잘 적용하였고, PID제어의 경우는 진동현상이 발생하면서 제어가 잘 되지 않았다.

퍼지제어 알고리즘은 수학적인 이론식에 의해서 해석할 수 없으므로 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 통해서만이 제어 시스템의 설계가 가능하다.

참고문헌

1. 주해호, "유압공학", 3판, 대광서림, 1992
2. 주해호, 조덕상, "항공기 유압 시스템 해석을 위한 마이크로 컴퓨터 지원 설계", 한국항공우주학회지, 18권 2호, PP.69-78, 1990
3. H.E.Merritt, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, Inc., 1967
4. 윤지섭, 조형석, "유압 서어보 시스템의 속도제어를 위한 적응 제어기의 설계에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 3권 1호, pp.29-39, 1986
5. 장효환, 안병천, 김영준, "마이크로 컴퓨터에 의한 전기 유압 서어보 시스템의 속도제어", 대한기계학회 논문집, 12권 2호, pp.221-230, 1988
6. S.D.Kim and H.S.Cho, "A Suboptical Controller Design Method for the Energy Efficiency of a Load-Sensing Hydraulic Servo System", ASME Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control, Vol.113 No.3, pp.487-493, 1991
7. Pey-Chung CHEN and Ming-Chang SHIH, "An Experimental Study on the Position Control of a Hydraulic Cylinder using a Fuzzy Logic Controller", JSME International Journal (Series III), Vol.34 No.4, pp.481-489, 1991
8. H.J.Park, H.S.Cho, "A Fuzzy Rule-Based Iterative Learning Control Method with Application to Hydroforming Processes", Mechatronics, Vol.2 No.6, PP.577-593,

- 1992
9. C.Behmenburg, "Model Reference Adaptive Systems with Fuzzy Logic Controllers", IEEE Conference on Control Application, pp.171-176, 1993
 10. 주해호, 이재원, 박창선, "퍼지 제어 시스템을 위한 마이크로컴퓨터 지원 설계", 93년 한국정밀공학회 추계학술대회, pp.187-191, 1993
 11. Chuen Chien Lee, "Fuzzy logic in control systems : Fuzzy logic controller" — Part I, IEEE.Transaction on systems, man and cybernetics, Vol.20, No.2, 1990
 12. Chuen Chien Lee, "Fuzzy logic in control systems : Fuzzy logic controller" — Part II, IEEE.Transaction on systems, man and cybernetics, Vol.20, No.2, 1990
 13. 이광형, 오길록, "퍼지이론 및 응용 I 권 : 입문", 홍릉과학출판사, 1992
 14. 이광형, 오길록, "퍼지이론 및 응용 II 권 : 응용", 홍릉과학출판사, 1992
 15. 주해호, "Simulation language", 전기학회지, 25권 3호, pp.242-251, 1976
 16. Franklin, "Feedback Control System", 2nd Ed., Addison-Wesley, 1991
 17. 주해호, 이재원, 서영수, "퍼지 추론법의 비교 연구," 한국정밀공학회추계학술대회, PP539-544, 1994