

진화 프로그래밍을 이용한 다기준 퍼지 제어

Multicriteria Fuzzy Control using Evolutionary Programming

김 광 춘*, 김 종 환*

Kuang-Choon Kim*, Jong-Hwan Kim*

요 약

본 논문에서는 진화 프로그래밍을 이용한 다기준 퍼지 제어(MFC : Multicriteria Fuzzy Control)를 제안한다. MFC의 기본적인 아이디어는 출력응답의 속성을 분석하여 기존의 퍼지 제어에 퍼지 척도와 퍼지 적분 이론을 적용한 것이다. 퍼지 적분 평가를 위해서 rise time, overshoot, settling time의 세가지 속성이 사용된다. MFC를 통해서 이 세가지 속성을 조정할 수 있다. 진화 프로그래밍은 원하는 조정 특성을 갖도록 MFC의 퍼지 척도를 최적화한다. 모의실험을 통해서 제안된 방법이 기존의 퍼지 제어보다 우수함을 보인다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a MFC(Multicriteria Fuzzy Control) using evolutionary programming. The basic idea underlying the MFC is based on analyzing the source of attributes of the system output responses and applying the fuzzy measure and integral theory to the existing fuzzy control. Time-domain specifications including rise time, overshoot, and settling time are used as the attributes for the fuzzy integral evaluation. Through the MFC, we can tune the three attributes. Evolutionary programming optimizes fuzzy measures of the MFC for the desired tuning property. It is demonstrated by computer simulations that our scheme has superior control performance compared to conventional fuzzy control.

I. 서 론

1974년에 Sugeno는 주관적인 평가문제를 위하여 퍼지적분(fuzzy integral)을 도입하였다[1]. 그 이후 많은 사람들에 의해서 퍼지척도(fuzzy measure)와 퍼지적분 이론이 연구되어 왔다. 퍼지적분은 다기준 해석(multicriteria analysis)을 위한 융합(fusion) 혹은 종합(aggregation)하는 방법으로 생각되어질 수 있다. 사실 퍼지적분은 여러 기준을 포함하는 의사결정문제에서 종합하는 방법으로 주로 사용된다. 이때 퍼지척도는 일반적으로 기준에 대한 가중치 또는 특징을 나타낸다. 퍼지척도와 퍼지적분은 유용성을 보여주기 위해서 Murofushi와 Sugeno[2] 그

*한국 과학 기술원 전기 공학과

*Dept. of Electrical Eng., KAIST

리고 Grabisch[3, 4]등에 의해 이론적인 연구가 행해졌다. 그러나 그들의 이론적인 연구에도 불구하고 퍼지척도와 퍼지적분은 응용분야에 널리 사용되지 않았다. 몇가지 응용된 예로는 prediction of wood strength[5], evaluation of printed color images[6], design of speakers[7], human reliability analysis[8]등이 있다.

퍼지제어는 Mamdani에 의해서 처음 도입되었으며[9], 여기에서 그는 퍼지제어를 모형 증기기관의 제어에 직접 응용하였다. Mamdani가 퍼지제어를 시도하게 된 동기는 Zadeh의 이론적인 연구가 바탕이 되었다. Zadeh는 일련의 연구발표[10]를 통해서 퍼지이론의 수학적인 바탕을 마련하고 퍼지집합 이론을 바탕으로 시스템을 기술하는 방법론을 제창하였다. 그 이후 최근까지 퍼지제어는 산업계에 널리 응용되어 왔다.

최적화 문제를 해결하기 위해 최근 다윈의 진화론에 근거를 둔 진화 연산들 즉, 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm), 진화 프로그래밍(Evolutionary Programming), 진화 기법(Evolution Strategy)등의 방법들이 연구되고 있다. 이는 자연계의 진화가 적자생존의 원리를 통하여 최적의 개체를 얻도록 이루어진다는 개념을 이용한 방법들이다. 최근 들어 유전자 알고리즘은 비교적 많이 연구되고 있으나 진화 프로그래밍의 지식과 기술은 이제 막 태동의 단계에 있다. 진화 프로그래밍은 “돌연변이법”을 통하여 새로운 자손 세대를 만들어 내고 이를 확률적으로 선택하여 점차 최적의 개체를 찾아가는 방법이다[11, 12]. 이의 응용분야는 상당히 넓어서 “여행객 문제”에서 최적의 여행 순서를 찾아내는 문제뿐만 아니라 조립 공정에서의 최적 조립 순서를 찾는 문제, 자동 위치 측정 시스템(GPS)에서의 최단 거리 경로를 찾는 문제, 항공기의 최적 항로 결정, 프린트 기관에서의 최적 회로 설계, 지능 제어에의 적용등 여러가지 다양한 최적화 문제에 응용될 수 있다.

본 논문에서는 진화 프로그래밍을 이용한 다기준 퍼지 제어(MFC : Multicriteria Fuzzy Control)를 제안한다. MFC의 기본적인 아이디어는 출력응답의 속성을 분석하여 퍼지척도와 퍼지적분 이론을 적용한 것이다. 규칙에서 *rise time*, *overshoot*, *settling time*과 같은 세가지 속성을 정의하여 원하는 출력응답을 얻기 위해서 퍼지규칙들이 평가되어진다. 각 규칙에 세가지 부분평가를 주고 퍼지척도도 중요도를 주어 퍼지적분을 통해 종합된다. 제안된 방법을 통해서 같은 퍼지규칙하에서 출력응답의 세가지 속성을 조절할 수 있다. 진화 프로그래밍은 원하는 조정 특성을 갖도록 MFC의 퍼지 척도를 최적화한다. 모의실험을 통해서 제안된 방법의 우수성을 보여준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 기본 개념으로 퍼지 척도와 퍼지 적분에 대해서 알아본다. III장에서는 가중치를 갖는 퍼지 제어에 대해서 알아보고 MFC를 제안한다. 그리고 진화 프로그래밍을 이용하여 퍼지 척도를 최적화하는 방법을 제안한다. IV장에서는 모의 실험을 통해서 제안된 방법의 유용성을 보이며 마지막으로 V장에서는 본 연구에서 얻은 결론 및 앞으로의 연구 방향을 제시하고 본 논문을 맺는다.

II. 기념 개념

우리가 어느 퍼지집합을 이야기할 때는 집합의 원소가 구간 $[0, 1]$ 의 값을 가지는 경우였다. 즉, 원소가 그 집합에 소속될 가능성을 나타내는 값을 표시하였다. 이제는 어느 원소가 여러 개의 집합(crisp set)중에 임의의 집합에 소속될 가능성을 논의하여 보자. 이와같이 한 원소가 어느 집합에 속하는지에 대한 가능성이 애매한 상황(ambiguity)일 때 이 소속정도를 나타내는 척도를 퍼지척도(fuzzy measure)라 부른다. 퍼지 척도는 다음과 같이 정의된다. 이때, $P(X)$ 는 전체 집합 X 의 멱집합을 표시한다.

[정의] 퍼지 척도

임의의 유한집합 X 에 대해서 퍼지 척도 $g : P(X) \rightarrow [0, 1]$ 는 다음과 같은 성질을 만족하여야 한다.

(1) 경계조건(boundary condition)

$$g(\emptyset) = 0, g(X) = 1$$

(2) 단조성(monotonicity)

$$\forall A, B \in P(X), A \subseteq B \text{ 이면 } g(A) \leq g(B)$$

Sugeno에 의해서 제안된 λ -퍼지 척도가 널리 사용되면 다음과 같이 정의된다.

$$\forall A, B \in P(X), A \cap B = \emptyset \text{ 일 때 } -1 < \lambda \text{ 에 대해서 } g(A \cup B) = g(A) + g(B) + \lambda g(A)g(B).$$

퍼지 적분은 어떤 대상을 여러 항목(또는 관점)에 대해서 평가할 때 이들 각 항목에 대한 평가치(evaluation value)를 종합(aggregation)하는 방법으로 사용될 수 있다. 특히, 이 퍼지 적분은 주관적인 판단이 개입되는 평가 문제에서 유용하게 사용될 수 있다. 퍼지 적분의 특별한 경우로서 Choquet의 퍼지 적분에 대해서 알아보자. Choquet의 퍼지 적분은 다음과 같이 정의된다.

[정의] Choquet의 퍼지 적분

임의의 유한집합 X 에 대해서 퍼지 척도 $g: P(X) \rightarrow [0, 1]$ 가 정의되어 있고 함수 $h: X \rightarrow [0, 1]$ 가 정의되고 있다고 하자. 이때 X 에서의 함수 h 의 퍼지 척도 g 에 대한 Choquet의 퍼지 적분 $\int_X h \circ g$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\int_X h \circ g = \sum_{i=1}^n (h(x_i) - h(x_{i-1}))g(E_i), h(x_0) = 0$$

여기에서 $x_i \in X, i = 1, \dots, n$ 에 대해서 $h(x_i) \leq h(x_{i+1})$ 라 하고 $E_i = \{x_k \mid k = i, \dots, n\}$ 라 하자.

III. 다기준 퍼지 제어

3.1 가중치를 갖는 퍼지 제어

기존의 퍼지 제어와 유사하게 다음과 같이 n 개의 퍼지규칙을 정의할 수 있다. 다른점은 각 규칙마다 가중치를 갖는다는 것이다.

Rule 1: If e_1 is $E_1^{(1)}$ and ... and e_m is $E_m^{(1)}$, then u is $U^{(1)}$ with $w^{(1)}$

Rule 2: If e_1 is $E_1^{(2)}$ and ... and e_m is $E_m^{(2)}$, then u is $U^{(2)}$ with $w^{(2)}$

⋮

Rule n : If e_1 is $E_1^{(n)}$ and ... and e_m is $E_m^{(n)}$, then u is $U^{(n)}$ with $w^{(n)}$

Fact: If e_1 is e_1^* and ... and e_m is e_m^*

Cons: then u is u^*

여기에서 $w^{(i)}$ 는 i 번째 규칙의 가중치이다.

물리적인 값을 갖는 e_1^*, \dots, e_m^* 이 들어오면 각 규칙에 대한 적합 정도(degree of fitness)인 $f^{(i)}, i = 1, \dots, n$ 를 줄 수 있다. Mamdani의 추론방법[9]을 사용하면 적합 정도는 다음과 같이 구해진다.

$$f^{(i)} = \min(\mu_{E_1^{(i)}}(e_1^*), \dots, \mu_{E_m^{(i)}}(e_m^*))$$

보통(crisp) 값인 u^* 를 구하는 비퍼지화 방법은 center-of-area/gravity defuzzification, center-of-sums defuzzification, center-of-largest-area defuzzification, first-of-maxima defuzzification, middle-of-maxima defuzzification, height defuzzification, quality defuzzification 등이 있다[13].

비퍼지화 방법으로 height defuzzification 방법을 사용하면 u^* 는 다음과 같이 구해진다[14].

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^n c^{(i)} w^{(i)} f^{(i)}}{\sum_{i=1}^n w^{(i)} f^{(i)}}$$

여기에서 $c^{(i)}$ 는 $U^{(i)}$ 의 peak 값이다.

3.2 다기준 퍼지 제어

본 논문에서는 퍼지척도와 퍼지적분을 기존의 퍼지논리 제어에 적용하고자 한다. 우선 평가할 대상을 “출력응답”으로 하고 l 가지 속성으로 나눈다. 속성들의 집합을 $X = \{x_1, \dots, x_l\}$ 라 하자. l 가지 속성에 대해서 각 규칙을 평가한다. i 번째 규칙에 대한 부분평가를 $h^{(i)}$ 라 하자. 원하는 출력 응답을 얻도록 퍼지척도 g 를 주어 퍼지적분을 통해서 종합한다. 이를 정리하면 다음과 같다.

$$\text{Rule 1} \Rightarrow h^{(1)}(x_1), \dots, h^{(1)}(x_l) \rightarrow w^{(1)} = \int_X h^{(1)} \circ g$$

$$\text{Rule 2} \Rightarrow h^{(2)}(x_1), \dots, h^{(2)}(x_l) \rightarrow w^{(2)} = \int_X h^{(2)} \circ g$$

⋮

$$\text{Rule } n \Rightarrow h^{(n)}(x_1), \dots, h^{(n)}(x_l) \rightarrow w^{(n)} = \int_X h^{(n)} \circ g$$

위에서 구한 $w^{(i)}$ 를 i 번째 규칙의 가중치로 사용하고 비퍼지화 방법으로 defuzzification 방법을 사용하면 u^* 는 다음과 같이 구해진다.

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^n c^{(i)} w^{(i)} f^{(i)}}{\sum_{i=1}^n w^{(i)} f^{(i)}}$$

$$\text{여기에서 } w^{(i)} = \int_X h^{(i)} \circ g.$$

기존의 퍼지 PI 제어기에 제안한 방법을 적용해 보자. 우선 평가할 대상을 “출력응답”으로 하고 출력응답을 세 가지 속성으로 나눈다. 세가지 속성은 $x_1 = \text{rise time}$, $x_2 = \text{overshoot}$, $x_3 = \text{settling time}$ 이다.

사용할 언어변수를 다음과 같이 설정하자.

$$L = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

그리고 적합도 함수(membership function)는 그림 1과 같으며 각 언어변수의 의미는 그 약자로부터 알 수 있다. 예를 들면 NB는 *Negative-Big*, NM은 *Negative-Medium*, NS는 *Negative-Small*, ZO은 *ZerO*를 의미한다.

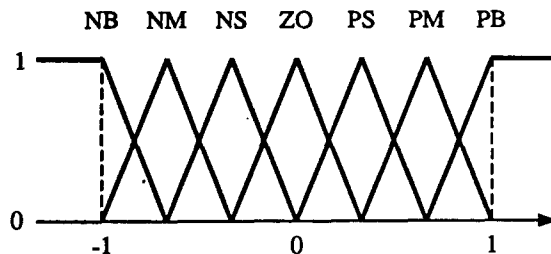


그림 1. 적합도 함수

Fig 1. Membership Functions

제어규칙은 기존의 퍼지 PI 제어중 일반적인 19개의 규칙을 사용하였다[15]. 제어규칙과 속성들에 대한 부분 평가는 표 1과 같고 사용한 기호는 표 2과 같다. 여기에서 $e(k)$ 와 $\Delta e(k)$ 는 제어기의 입력이고 $\Delta u(k)$ 는 제어기의 출력이다. 그러므로 PI 형태의 제어기가 된다. $e(k)$ 는 출력의 오차로 $y_r(k) - y(k)$ 이고 $\Delta e(k)$ 는 출력오차의 변화율로서 $e(k) - e(k-1)$ 을 나타낸다. 이때 $y_r(k)$ 는 기준입력이고 $y(k)$ 는 공정의 출력이다.

표 1. 제어규칙과 부분평가($a=1.0, b=a/2, c=b/2, d=c/2, e=d/2$)

Table 1. Fuzzy control rules and partial evaluations($a=1.0, b=a/2, c=b/2, d=c/2, e=d/2$)

$\Delta u(k)$		$\Delta e(k)$													
		NB		NM		NS		ZO		PS		PM		PB	
$e(k)$	NB							NB	$\frac{e}{a}$ $\frac{e}{b}$	NM	$\frac{e}{b}$ $\frac{e}{b}$				
	NM							NM	$\frac{e}{b}$ $\frac{e}{b}$						
	NS							NS	$\frac{e}{c}$ $\frac{e}{c}$	ZO	$\frac{d}{d}$ $\frac{d}{d}$			PM	$\frac{e}{d}$ $\frac{e}{d}$
	ZO	NB	$\frac{e}{a}$ $\frac{e}{b}$	NM	$\frac{e}{b}$ $\frac{e}{b}$	NS	$\frac{e}{c}$ $\frac{e}{c}$	ZO	$\frac{d}{d}$ $\frac{d}{d}$	PS	$\frac{e}{d}$ $\frac{e}{c}$	PM	$\frac{e}{d}$ $\frac{e}{b}$	PB	$\frac{e}{d}$ $\frac{e}{b}$
	PS	NM	$\frac{e}{b}$ $\frac{e}{b}$			ZO	$\frac{d}{d}$ $\frac{d}{d}$	PS	$\frac{c}{d}$ $\frac{c}{d}$						
	PM							PM	$\frac{b}{d}$ $\frac{b}{d}$						
	PB					PM	$\frac{b}{d}$ $\frac{b}{d}$	PB	$\frac{a}{d}$ $\frac{a}{b}$						

표 2. 기호

Table 1. Notation

ith	$h^{(i)}(x_1)$
Rule	$h^{(i)}(x_2)$
(R_i)	$h^{(i)}(x_3)$

x_1 의 부분평가는 그림 2에서와 같은 효과가 일어나도록 평가치를 주었다. 그림의 화살표 방향에서 보듯 *rise time*에 많은 영향을 주는 규칙은 $e(k)$ 와 $\Delta u(k)$ 가 모두 양의 값을 갖는 규칙들이다. 이 규칙들에 높은 평가치를 주었고 $\Delta u(k)$ 가 클 때 *rise time*에 더 큰 영향을 주므로 $\Delta u(k)$ 가 클수록 더 높은 평가치를 주었다.

x_2 의 부분평가는 그림 2에서와 같은 효과가 일어나도록 평가치를 주었다. 그림의 화살표 방향에서 보듯 *overshoot*에 많은 영향을 주는 규칙은 $\Delta u(k)$ 가 음의 값을 갖는 규칙들이다. 이 규칙들에 높은 평가치를 주었고 $\Delta u(k)$ 의 절대치가 클 때 *overshoot*에 더 큰 영향을 주므로 $\Delta u(k)$ 의 절대치가 클수록 더 높은 평가치를 주었다.

x_3 의 부분평가는 그림 4에서와 같은 효과가 일어나도록 평가치를 주었다. 그림의 화살표에서 보듯 거의 모든 규칙들이 *settling time*에 영향을 준다. $\Delta u(k)$ 의 절대치가 클 때 *settling time*에 더 큰 영향을 주므로 $\Delta u(k)$ 의 절대치가 클수록 더 높은 평가치를 주었다.

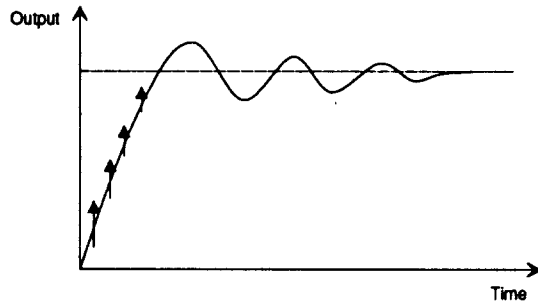


그림 2. x_1 의 평가
Fig 2. Partial evaluation about x_1

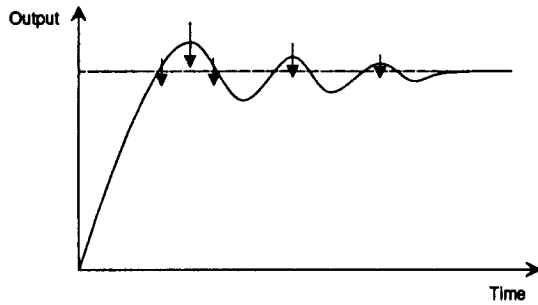


그림 3. x_2 의 평가
Fig 3. Partial evaluation about x_2

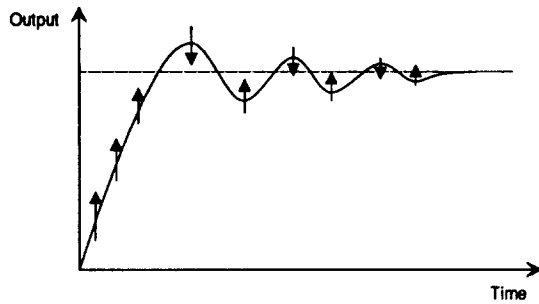


그림 4. x_3 의 평가
Fig 4. Partial evaluation about x_3

3.3 진화 프로그래밍을 이용한 MFC의 퍼지 척도 최적화

진화 프로그래밍은 다음과 같은 MFC의 퍼지 척도를 최적화한다.

$$g(\{x_1, x_2\}) = \min(1.0, g(\{x_1\}) + g(\{x_2\}) + \lambda_1 g(\{x_1\})g(\{x_2\}))$$

$$g(\{x_1, x_3\}) = \min(1.0, g(\{x_1\}) + g(\{x_3\}) + \lambda_2 g(\{x_1\})g(\{x_3\}))$$

$$g(\{x_2, x_3\}) = \min(1.0, g(\{x_2\}) + g(\{x_3\}) + \lambda_3 g(\{x_2\})g(\{x_3\}))$$

여기에서 사용한 퍼지 척도는 λ -퍼지 척도이고, $\lambda_i, i=1, 2, 3$ 가 최적화의 대상이다. λ_i 는 $-1 < \lambda_i$ 를 제외하고 제약이 없기 때문에 적당한 값을 찾기가 어렵다. 그래서 진화 프로그래밍을 사용하여 이를 해결하고자 한다.

이 문제를 해결하기 위해서 진화 프로그래밍은 다음과 같이 구현된다.

(1) 개체군(population)을 초기화한다.

초기 개체군 즉, 부모 세대를 $[-1, 1]$ 에서 임의로 P 개를 생성한다.

(2) 개체군을 평가한다.

평가함수는 다음과 같이 정의된다.

$$J = a \sum_{i=1}^3 (\max(0, -\lambda_i - 1))^2 + b \sum_{i=1}^3 \iiint_{g(\{x_1\}), g(\{x_2\}), g(\{x_3\})} \left(\frac{R_i - X_i}{n_i} \right)^2$$

여기에서 X_i 는 x_i 에 대한 실제 조정 특성이고 R_i 는 x_i 에 대한 원하는 조정 특성이다. 그리고 n_i 는 정규화 상수이다. J 의 첫째 항은 $-1 < \lambda_i$ 의 제약을 표현한 것이다.

(3) 새로운 개체군 즉, 자손 세대를 부모 세대로부터 생성할때는 다음과 같이 부모 세대에 외란을 주어서 생성한다.

$$\text{자손세대} = \text{부모세대} + N(0, J)$$

여기에서 $N(m, \sigma^2)$ 은 평균 m 과 분산 σ^2 을 갖는 Gaussian 확률 변수이다.

(4) 새로운 개체군을 평가한다.

(5) Q 개의 평가 비교 대상을 확률적인 선정을 통해서 승의 계수를 한다. 여기에서 평가치 J 가 작은 것이 승이다.

(6) 모든 개체군을 승수가 많은 순서대로 서열화하고 그 중에서 P 개를 선택한다.

(7) 만족한 해이면 끝나고 그렇지 않으면 (3)으로 돌아간다.

IV. 모의실험

모의실험할 플랜트는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{2.2}{s(8.959 \times 10^{-6} s^2 + 7.268 \times 10^{-3} s + 0.9449)}$$

플랜트는 DC Motor의 전달함수이다. 모의실험에서 360°를 1.0으로 정규화하였다. 이산화시간은 0.02초, $y_r(k)$ 는 1.0, $e(k)$ 의 배율은 1.0, $\Delta e(k)$ 의 배율은 15.0, $\Delta u(k)$ 의 배율은 1.0으로 하였다.

그림 5는 진화 프로그래밍을 이용하여 퍼지 척도를 최적화하는 진화 과정을 보여준다. 100 세대후 $\lambda_1 = 2.39$, $\lambda_2 = 14.23$, $\lambda_3 = 0.77$ 으로 수렴하였다. 진화 프로그래밍에서 다음과 같은 평가 함수를 사용하였다.

$$J = a \sum_{i=1}^3 (\max(0, -\lambda_i, -1))^2 + \frac{b}{(M+1)(M+2)/2} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^j \left(\frac{R_i(j, k) - X_i(j, k)}{n_i} \right)^2$$

여기에서 $X_i(j, k)$ 는 $g(\{x_1\}) = j/M$, $g(\{x_2\}) = k/M$, $g(\{x_3\}) = 1.0 - (j+k)/M$ 에서의 x_1 의 값이고 $R_i(j, k)$ 는 $g(\{x_1\}) = j/M$, $g(\{x_2\}) = k/M$, $g(\{x_3\}) = 1.0 - (j+k)/M$ 에서의 기준값으로 선형특성을 갖도록 하였다. 즉, 다음과 같은 기준값을 사용하였다.

$$R_1(j, k) = 0.40g(\{x_1\}) + 0.44g(\{x_2\}) + 0.40g(\{x_3\})$$

$$R_2(j, k) = 13.14g(\{x_1\}) + 0.35g(\{x_2\}) + 1.98g(\{x_3\})$$

$$R_3(j, k) = 1.56g(\{x_1\}) + 0.74g(\{x_2\}) + 0.70g(\{x_3\})$$

그리고 $n_1 = 0.04$, $n_2 = 12.78$, $n_3 = 0.86$, $M = 20$, $a = 100$, $b = 10$, $P = 20$, $Q = 10$ 이다.

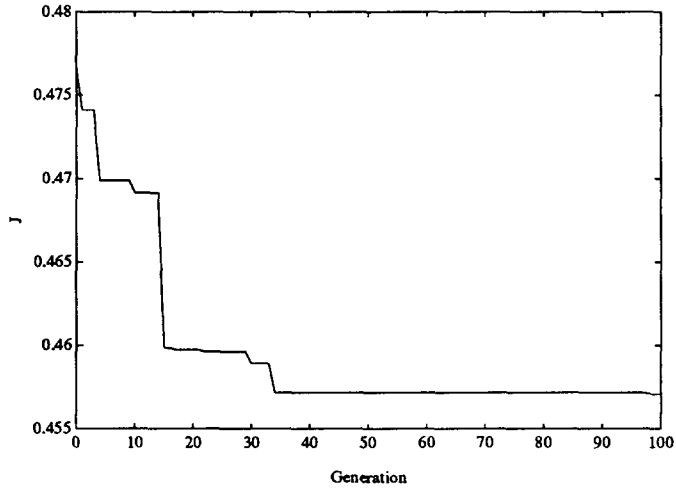


그림 5. 진화 결과
Fig 5. Evolution Result

모의실험 결과는 그림 6에 있고 그림에서 보듯 x_1 에 대한 항목만을 고려하면 *rise time*이 감소하고 x_2 에 대한 항목만을 고려하면 *overshoot*가 현저하게 감소한다. 그리고 x_3 에 대한 항목만을 고려하면 *settling time*이 감소한다.

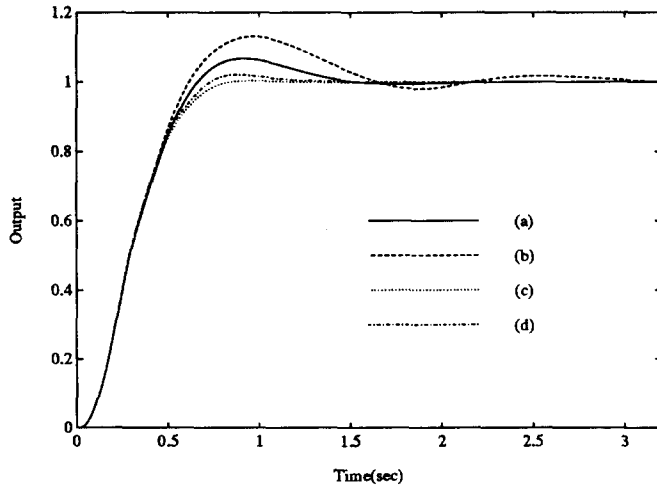


그림 6. 모의실험 결과 (a) Well-tuned fuzzy output (b) $g(\{x_1\}) = 1$, $g(\{x_2\}) = 0$, $g(\{x_3\}) = 0$ (c) $g(\{x_1\}) = 0$, $g(\{x_2\}) = 1$, $g(\{x_3\}) = 0$ (d) $g(\{x_1\}) = 0$, $g(\{x_2\}) = 0$, $g(\{x_3\}) = 1$

Fig 6. Simulation results (a) Well-tuned fuzzy output (b) $g(\{x_1\}) = 1$, $g(\{x_2\}) = 0$, $g(\{x_3\}) = 0$ (c) $g(\{x_1\}) = 0$, $g(\{x_2\}) = 1$, $g(\{x_3\}) = 0$ (d) $g(\{x_1\}) = 0$, $g(\{x_2\}) = 0$, $g(\{x_3\}) = 1$

즉, 제안된 방법의 부분평가가 잘 되었음을 알 수 있다.

퍼지최도의 값을 변화시킬 때에 세가지 속성이 어떻게 변하는가에 대해서 알아보자. 그림 7~9는 속성에 대한 중요도를 연속적으로 변화시켜서 옮겨 종합되고 있는지를 알아보는 모의실험이다. 모의 실험에서 진화 프로그래밍을 이용하여 얻은 $\lambda_1=2.39$, $\lambda_2=14.23$, $\lambda_3=0.77$ 을 사용하였다. 그림 7은 $g(\{x_1\})$, $g(\{x_2\})$ 를 연속적으로 변화시킬 때에 *rise time*이 변하는 정도에 대한 모의실험이고 그림 8은 $g(\{x_1\})$, $g(\{x_2\})$ 를 연속적으로 변화시킬 때에 *overshoot*가 변하는 정도에 대한 모의실험이다. 그리고 그림 9는 $g(\{x_1\})$, $g(\{x_3\})$ 를 연속적으로 변화시킬 때에 *settling time*이 변하는 정도에 대한 모의실험이다. 이때 $g(\{x_1\}) + g(\{x_2\}) + g(\{x_3\}) = 1$ 을 만족한다. 여기에서 *rise time*은 출력응답이 기준치의 10%에서 90%로 도달하는데 걸리는 시간을 사용하고 *overshoot*는 percent overshoot를 사용하였다. 그리고 *settling time*은 출력응답이 2%미만의 오차를 갖는데 걸리는 시간을 사용하였다. 그림 7~9에서 보듯 $g(\{x_1\})$ 가 클수록 x_1 가 감소함을 알 수 있다. 즉, 옮겨 종합되고 있음을 알 수 있다.

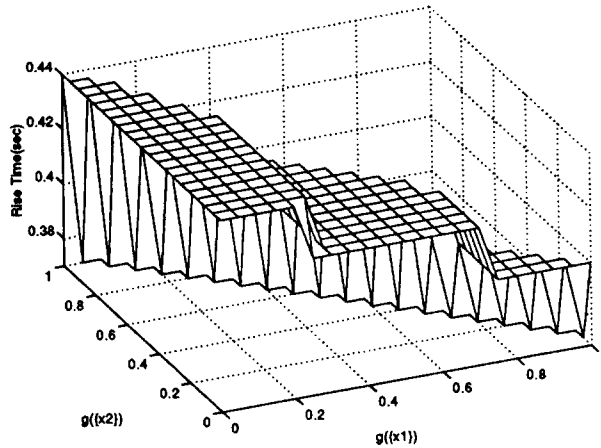


그림 7. Rise time ($g(\{x_1\}) + g(\{x_2\}) + g(\{x_3\}) = 1$)

Fig 7. Rise time ($g(\{x_1\}) + g(\{x_2\}) + g(\{x_3\}) = 1$)

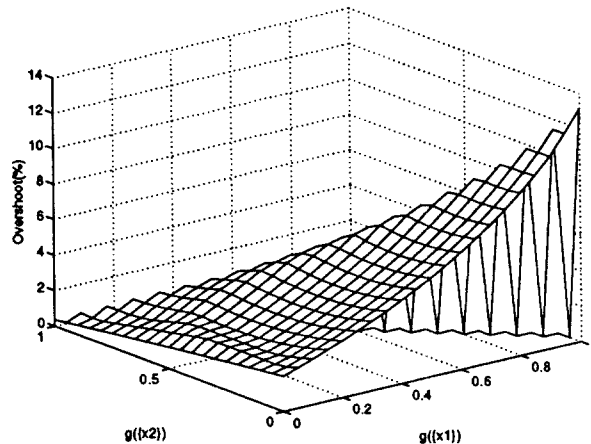


그림 8. Overshoot ($g(\{x_1\}) + g(\{x_2\}) + g(\{x_3\}) = 1$)

Fig 8. Overshoot ($g(\{x_1\}) + g(\{x_2\}) + g(\{x_3\}) = 1$)

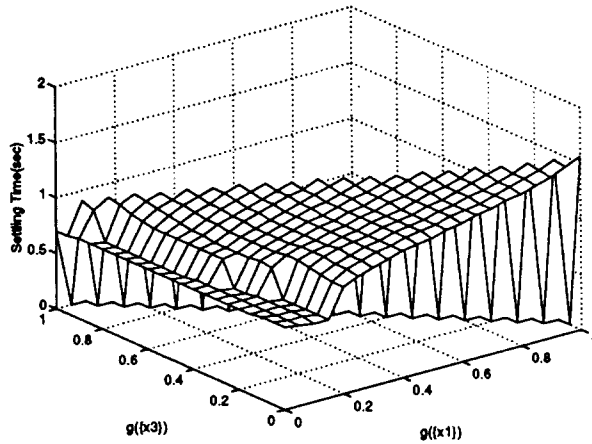


그림 9. Settling time ($g(\{x_1\}) + g(\{x_2\}) + g(\{x_3\}) = 1$)
 Fig 9. Settling time ($g(\{x_1\}) + g(\{x_2\}) + g(\{x_3\}) = 1$)

V. 결 론

본 논문에서는 진화 프로그래밍을 이용한 다기준 퍼지 제어를 제안하였다. 제안된 제어 방법은 *rise time*, *overshoot*, *settling time*과 같은 세가지 속성을 정의하여 원하는 출력응답을 갖도록 퍼지척도로 중요도를 주어 퍼지적분을 통해서 원하는 결과를 얻었다. 이때 진화 프로그래밍을 이용하여 퍼지 척도를 최적화하였다. 모의실험을 통해서 속성에 대한 부분평가가 잘 되었음을 알 수 있고 윽게 종합(agggregation)되고 있음을 알 수 있다. 제안된 제어기는 기존의 퍼지규칙을 가지고 성능을 향상시키는데 사용될 수 있고 미세조정을 하는데 사용될 수 있다. 그리고 제안된 제어기의 장점은 중요도를 주어 조정하기 때문에 조정이 손쉽다는데 있다. 추후과제로는 다양한 플랜트의 적용이 필요하리라 본다.

참 고 문 헌

1. M.Sugeno, "Theory of fuzzy integrals and its applications," *Doct. Thesis*, Tokyo Institute of Technology, 1974.
2. T.Murofushi, M.Sugeno, "Non-additivity of fuzzy measures representing preferential independence," *2nd Int. Conf. on Fuzzy Systems and Neural Networks*, pp. 617-620, Iizuka, Japan, July 1992.
3. M.Grabisch, M.Yoneda, S.Fukami, "Subjective evaluation by fuzzy integral : the crisp and possibilistic case," *Int. Fuzzy Engineering Symposium*, Yokohama, Japan, November 1991.
4. M.Grabisch, "On the use of fuzzy integral as a fuzzy connective," *2nd IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, San Francisco, U.S.A., March 1993.
5. K.Ishii, M.Sugeno, "A Model of Human Evaluation Process Using Fuzzy Measure," *Int. J. Man-Machine Studies*, vol. 22, pp. 19-38, 1985.
6. K.Tanaka, M.Sugeno, "A study on subjective evaluation of color printing images," *Int.J. of Approximate Reasoning*, vol. 5, pp. 213-222, 1991.
7. K.Inoue, T.Anzai, "A study on the industrial design evaluation based upon non-additive measures," *7th Fuzzy system Symp.* pp. 521-524, Nagoya, Japan, June 1991.

8. T.Washio, H.Takahashi, M.Kitamura, "A method for supporting decision making on plant operation based on human reliability analysis by fuzzy integral," *2nd Int. Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks*, pp. 841-845, Iizuka, Japan, July 1992.
9. Mamdani, E.H., "Application of fuzzy algorithms for control of simple plant," *IEEE Proc. Control & Science*, vol. 121, no. 12, pp. 1585-1588, Dec. 1974.
10. Zadeh, Lotfi A., "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes," *IEEE Tr. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-3, no. 1, pp. 28-44, January 1973.
11. D. B. Fogel, "An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization," *IEEE Tr. on Neural Networks*, vol. 5, no. 1, pp. 3-14, 1994.
12. D. B. Fogel, "Applying Evolutionary Programming to Selected Control Problems," *Computers Math. Applic.*, vol. 27, no. 11, pp. 89-104, 1994.
13. Hans Hellendoorn, Christoph Thomas, "Defuzzification in fuzzy controllers," *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, vol. 1, pp. 109-123, 1993.
14. M.Mizumoto, "Fuzzy controls by fuzzy singleton-type reasoning method," *5th IFSA World Congress*, pp. 945-948, 1993.
15. C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller-Part I, Part II," *IEEE Trans. on Sys. Man and Cyber.*, vol. 20, no. 2, pp. 404-435, 1990.
16. M.Grabisch, "A Survey of fuzzy measures and integrals," *5th IFSA World Congress*, pp. 294-297, 1993.