

---

# 유전자-퍼지 논리를 사용한 도립진자의 제어

이상훈\*.박세준\*\*.양태규\*\*

A Control of Inverted pendulum Using Genetic-Fuzzy Logic

Sang-Hun Lee\*.Se-Jun Park\*\*.Tae-Kyu Yang\*\*

## 요약

본 논문에서는 유전자-퍼지 제어 알고리즘에 대하여 논의하고 그 성능을 평가하였다. 이 알고리즘은 퍼지 논리와 유전자알고리즘의 융합된 형태이며, 제어 대상으로는 도립진자 시스템을 모델링 하였다. 퍼지 제어기는 두 개의 입력과 한 개의 출력 변수를 설계하기 위해 적용되며, GA(Genetic Algorithm)는 퍼지 규칙과 소속 함수를 선택, 교차, 돌연변이의 진화 연산을 통해 최적화 한다. 컴퓨터 시뮬레이션에 퍼지 제어의 경우 초기 함수  $f(0.3, 0.3)$ 일 때 최대 언더슈트가  $-5.0 \times 10^{-2}[\text{rad}]$ , 최대 오버슈트가  $3.92 \times 10^{-2}[\text{rad}]$ 으로 측정되었으나, 유전자-퍼지 알고리즘의 경우 최대 오버슈트와 언더 슈트가 각각  $0.0[\text{rad}]$ 으로 측정되었다. 또한 정상상태 도달시간이 퍼지제어의 경우  $2.12[\text{sec}]$ , 유전자-퍼지 알고리즘은  $1.32[\text{sec}]$ 로 비교적 안정적으로 나타났다. 컴퓨터 시뮬레이션으로 이 알고리즘을 도립진자 시스템에 적용시키고, 그 성능의 우수성과 효율성을 증명하였다.

## ABSTRACT

In this paper, Genetic-Fuzzy Algorithm for Inverted Pendulum is presented. This Algorithms is combine Fuzzy logic with the Genetic Algorithm. The Fuzzy Logic Controller is only designed to two inputs and one output. After Fuzzy control rules are determined, Genetic Algorithm is applied to tune the membership functions of these rules. To measure of performance of the designed Genetic-Fuzzy controller, Computer simulation is applied to Inverted Pendulum system. In the simulation, In the case of  $f(0.3, 0.3)$  Fuzzy controller is measured that maximum undershoot is  $-5.0 \times 10^{-2}[\text{rad}]$ , maximum overshoot is  $3.92 \times 10^{-2}[\text{rad}]$  individually however, Designed algorithm is zero. The Steady state time is approximated that Fuzzy controller is  $2.12[\text{sec}]$  and designed algorithm is  $1.32[\text{sec}]$ . The result of simulation, Designed algorithm is showed it's efficient and effectiveness for Inverted Pendulum system.

## Keywords

Genetic-Fuzzy, Inverted Pendulum, Fuzzy logic, Genetic Algorithm

---

\* (주)비전컴 중앙연구소 연구원

\*\* 목원대학교 공과대학 전자정보통신공학부

접수일자: 2001. 10. 6

## I. 서론

기존의 제어 시스템은 제어대상의 모델링이 어렵거나 강한 비선형성을 가지는 경우, 또는 외부의 환경이 불확실하게 변하는 경우에는 원하는 제어 목적을 얻을 수 없는 문제점을 갖고 있다. 그러나 퍼지 제어 시스템은 전문가의 경험을 언어적인 변수를 바탕으로 퍼지논리의 형태로 표현하고, 언어 규칙들로 이루어진 제어기를 구성하기 때문에 제어 대상의 플랜트의 정확한 수학적 모델을 알지 못하더라도 좋은 제어 성능을 얻을 수 있으며, 구현 또한 간단하다[1]. 그러나 퍼지 규칙들이 시스템에 정확히 반영되도록 하려면 규칙에 사용된 퍼지변수의 소속함수 모양 등을 조정해야 한다.

퍼지 제어기의 설계는 일반적으로 시행 착오적으로 이루어지며 이러한 경험적 방법은 시스템이 복잡해지거나 돌발적인 문제를 해결하지 못했을 경우, 제어 성능이 떨어지기 쉽다.

1970년대 초 미국의 Holland는 자연 생태계의 진화 과정에 관찰된 몇 가지 처리 과정 중에서 적자생존의 원리(Survival of the fittest)를 컴퓨터의 알고리즘과 결합시킨 유전자알고리즘(GA: Genetic Algorithm)을 발표하였다[2][3]. 그러나 이 알고리즘은 초기에는 컴퓨터 분야에 응용되지 않았으나, 1980년대에 들어서면서 또 다른 신경회로망의 한 모델로 인식되어 왔으며 1990년에 들어서면서 상당한 발전을 이루고 있다.

유전자알고리즘은 작업숍 스케줄링(Job shop scheduling), 훈련 신경회로망, 이미지 특징 추출 및 인식, 최적화 문제 등의 여러 분야에 응용되고 있다. 유전자알고리즘은 정립된 최적화 알고리즘이다. 따라서 GA는 본질적으로 강인하고 전역적 최적해에 근사한 값을 결정할 수 있으며, 풀고자 하는 문제에 가능한 해들을 염색체로 표현하고, 이를 적당한 알고리즘에 의해 변형하여 최적해를 구한다.

본 논문은 비선형성이 강한 시스템인 도립진자(Inverted Pendulum)를 퍼지 논리에 의한 제어기의 안정성을 제어하며, 유전자알고리즘을 이용하여 퍼지 추론을 최적화하는 유전자-퍼지 알고리즘(Genetic-Fuzzy Algorithm)을 제시한다. 이 알고리즘의 적합성을 확인하기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하였으며, 퍼지 제어기와 비교하여 이 알고리즘의 우수성을 입증한다.

## II. 도립진자의 수학적 모델

본 논문은 시스템의 제어 대상으로 도립진자 시스템(Inverted pendulum)을 적용한다[4][5]. 그림 1은 도립진자시스템의 모델을 보여준다. 그림 1과 같이 수레(Cart)에 도립진자가 달려있어 힘을 가하게 되면 수레가 이동하며, 이 이동은 도립진자의 운동에 영향을 주는 시스템이다. 즉 도립진자는 조금만 기울여 놓아도 쓰러지는 불안정한 시스템이다.

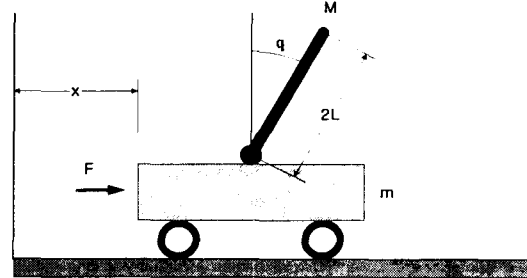


그림 1. 도립진자 시스템  
Fig. 1 The Inverted Pendulum System

도립진자의 출력은 진자의 운동각( $\theta$ )과 수레의 위치( $x$ )인 다변수 출력 시스템이다. 이 두 변수를 제어하기 위해 퍼지 제어기를 적용하였다. 일반적으로 퍼지 제어기는 수학적 모델링이 필요하지 않다. 그러나, 본 논문은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제시된 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 그림 1과 같은 시스템을 제안하고, 수학적 모델링을 하였다. 수레의 질량이  $m$ , 진자의 질량은  $M$ , 그리고 진자의 길이가  $2L$ 인 균일한 질량 분포를 갖는 도립진자가 수레에서 자유롭게 회전할 수 있는 구조로 연결되어 있다. 수레는 평면상의  $x$  축을 따라 이동하며, 진자는 불안정하여 옆으로 넘어지려고 한다. 따라서 수레에 지속적으로 적당한 힘  $F$ 를 가하여 진자를 세우고, 원하는 곳까지 이동하는 것이 도립진자의 안정화 및 위치제어의 목적이다. 진자와 수직으로 이루는 각도를  $\theta$ 라 할 때, 도립진자의 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\ddot{x} = \frac{u + m l (\dot{\theta}^2 - \ddot{\theta} \cos \theta)}{(M + m)} \quad (1)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta + \cos \theta \left[ \frac{-u - m l \dot{\theta}^2 \sin \theta}{(M + m)} \right]}{l \left[ \frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{M + m} \right]} \quad (2)$$

### III. 유전자-퍼지 알고리즘을 이용한 제어

퍼지 제어는 추론방법과 규칙 설계 방법에 따라 효율적이고 강인한 결과를 얻는다. 일반적으로 제어 시스템의 설계 과정에서 중요한 점은 어떤 제어 기법과 제어 규칙을 적용하는가이며, 주어진 성능 지표에 대하여 설계된 전체 폐환 시스템의 안정도와 강인성을 보장할 수 있다. 즉 퍼지제어의 안정성과 강인성은 어떤 퍼지 규칙을 적용하는가 하는 문제로 귀결된다. 퍼지 제어에서 규칙을 유도하는 학습방법들이 연구되고 있으며, 학습방법에 따라 성능평가를 할 수 있다. 퍼지 제어 규칙을 유도하는 학습 기법은 전문가의 경험 및 숙련된 조작을 바탕으로 규칙을 만드는 방법과 유전자 알고리즘에 의한 학습 기법 등이 있다[6]-[8].

본 장에서는 유전자알고리즘을 이용하여 제어목적에 적합한 퍼지규칙의 소속함수를 자동으로 설정하는 방법을 제안한다.

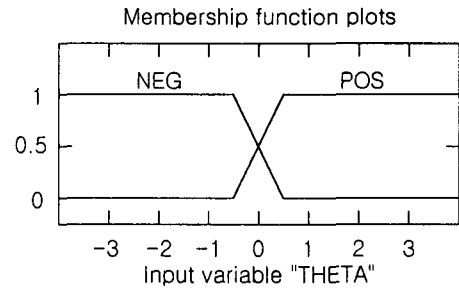
#### 3-1 GA에 의한 퍼지 규칙 베이스의 설정

본 논문은 도립진자를 수직으로 세우는 것을 그 목적으로 한다. 따라서 입력으로 사용되는 변수는 제어 각도  $\theta$ 와 각도의 변화량  $\dot{\theta}$ 와 제어량  $u$ 를 설정하였다. 그림 2는 실험에서 사용된 퍼지 제어에 사용된 소속함수이다. 각도  $\theta$ 와 각속도  $\dot{\theta}$ 는 양수와 음수의 값을 가지며 수직에 대하여 서로 대칭적이다.

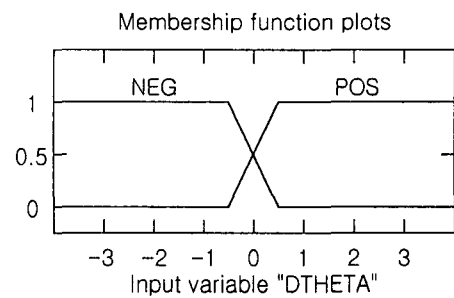
퍼지 규칙에서 N개로 구성되어 있는 규칙 베이스를 제어 대상에 맞게 조정할 수 있는 방법은 각 규칙은 전건부(antecedent)와 후건부(consequent)의 퍼지 변

표 1. 소속함수의 초기치  
Table 1. The initial value of MF

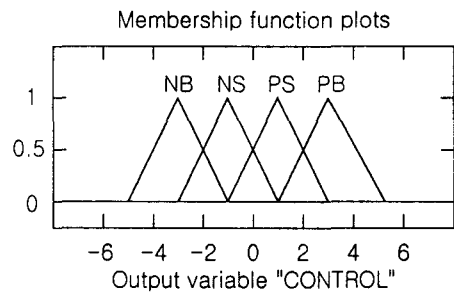
$\theta$	$\theta$	NEG	POS
NEG		(4.0, 5.5)	(1.5, 5.5)
POS		(-1.5, 5.5)	(4.0, 5.5)



(a)  $\dot{q}$ 에 대한 소속함수



(b)  $\dot{q}$ 에 대한 소속함수



(c)  $u$ 에 대한 소속함수

그림 2.  $\theta, \dot{\theta}, u$ 에 대한 퍼지 변수와 소속함수

Fig. 2 Fuzzy set and membership functions for  $\theta, \dot{\theta}, u$

수 소속함수(Membership Function : MF)들을 변경하거나 입력을 scaling factor로 조정하는 것이다. 초기의 퍼지 분할을 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

그림 3은 실제 실험에 사용된 퍼지 제어규칙의 출력평면 상태를 나타낸다.

추론방법으로는 Mamdani의 max-min 추론방법을 선택하였으며, 비퍼지화 방법으로는 간략화된 무게중심법(Simplified Center Of Gravity)을 사용하였다. 그

림 4는 퍼지 입력에 대한 Mamdani의 추론과정을 보여 주고 있다.

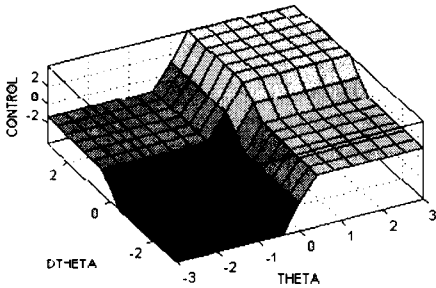


그림 3. 퍼지 제어규칙의 출력 평면  
Fig. 3 The Graph of fuzzy controller rule

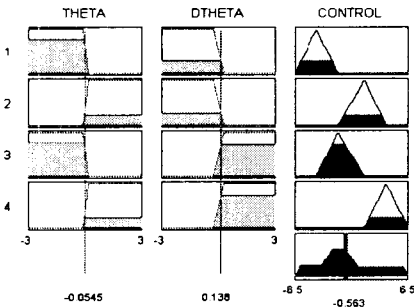


그림 4. Mamdani의 추론과정  
Fig. 4 Fuzzy inference under crisp inputs

3-2 퍼지 소속함수의 염색체 표현

본 논문에서는 제어 환경에 맞는 최적 퍼지 제어 규칙 베이스를 자동 생성하기 위해 규칙 베이스의 전건부  $A_i$  와  $B_i$  ( $i=1 \dots N$ )의 소속함수의 중심값과 중심폭을 제안된 유전자-퍼지 알고리즘을 이용하여 최적화한다. 퍼지 제어기에서 최적화되어야 할 요소는 전건부의 입력변수는 각도  $\theta$ 와 각속도  $\theta_d$ 이며, 소속함수는 각각 POS(Positive), NEG(Negative)이다. 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 염색체의 구조는 그림 5와 같이 표현된다.

CNETER(1)	CNETER(2)	CNETER(3)	CNETER(4)	WIDTH(1)	WIDTH(2)	WIDTH(3)	WIDTH(4)
-----------	-----------	-----------	-----------	----------	----------	----------	----------

그림 5. 퍼지 규칙의 염색체 구조  
Fig. 5 The structure of fuzzy rule strings

```

객체      유전자      적합도
[ 1] 0000010100001001010000001010 0.573
[ 2] 0011000000101000100000000001 0.442
[ 3] 0000001000000000000000010110 0.320
[ 4] 0001010000000001000010010100 0.618
[ 5] 0100001001000000000111000110 0.291
    
```

```

[45] 0000110000000100001001000001 0.719
[46] 0000000010001000010000000010 0.573
[47] 0010000100000000010000000010 0.323
[48] 0110010010000000001000100000 0.301
[49] 0110000010000000010010000000 0.336
[50] 00000110100100000001001011000 0.719
    
```

[gen 0] max=0.7191, min=0.2792,  
avg= 0.426, sum=21.286

초기 세대



진화 후

```

객체      유전자      적합도
[ 1] 00001001001001000101111001110 0.689
[ 2] 0011000100101000101111001110 0.749
[ 3] 0011000110001000001111001110 0.694
[ 4] 0010000110001000101111001110 0.730
[ 5] 0011100100001000101111001110 0.750
    
```

```

[45] 0011000110001000101111001110 0.720
[46] 0010100100000000101111001110 0.743
[47] 0010100100101000101111001110 0.750
[48] 0001100100100000101011001110 0.740
[49] 0000100100100000101111001110 0.684
[50] 0011000100101000101111001110 0.749
    
```

[gen 200] max= 0.753 avg= 0.744  
sum = 37.18 nmutation= 364 ncross = 4275

최종 세대

그림 6. 유전자의 표현방법

Fig. 6 The structure of chromosome

퍼지에 사용된 소속함수는 삼각형 모양을 선택하였다. 퍼지 규칙을 염색체(chromosome)로 표현하기 위해 소속함수의 중심값과 중심폭을 0과 1의 2진 문자열(strings)로 표현하였다. 소속함수의 중심값과 중심폭은 각각 7비트로 구성하였으며, 염색체의 총 길이는 28비트이다. 그림 6은 초기 세대의 유전자와 진화한 후의 유전자를 보여준다.

3-3 적합도 함수의 결정

개체군내에서 각 개체에 대하여 유전자알고리즘을 적용하기 위해서는 그 개체가 풀고자 하는 문제에 어느 정도 적합한지를 평가하는 적합도 함수를 사용해야 한다. 적합도 함수는 제어대상에 따라 특정하게 결정이 되며 일반적으로 역수나 지수의 함수를 사용하여 정의한다. 본 논문에서는 적합도 함수(fitness function)를 퍼지제어기의 에너지 함수  $J(t)$ 로 정의하였다. 에너지 함수  $J(t)$ 는 각도와 각속도로 표현되며,

적합도는 식 (4)와 같고 [0 1]의 값을 갖는다.

$$J(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \{e_i^2 + \dot{e}_i^2\} \quad (3)$$

$$fitness = \frac{1}{1 + J(t)} \quad (4)$$

식 (4)에서, 높은 적합도는 에러 및 에러변화율의 감소를 의미하기 때문에, 집단 내에서의 높은 적합도를 갖는 스트링은 제어 목적에 좀 더 접근한 제어 규칙들로 구성된 규칙 베이스를 의미한다.

### 3-4 유전자 연산자

본 논문에서 제안된 유전자-퍼지 알고리즘은 초기에 발생시킨 랜덤한 해집단에 대하여 식 (4)로 표현된 적합도를 평가한 후 복제, 교차, 돌연변이를 수행하고 반복횟수가 설정값 이하가 될 때까지 반복 수행한다. 유전자알고리즘에 사용된 파라미터 값들은 다음과 같다. 세대크기  $G = 200$ , 개체군의 크기  $P = 50$ , 교차확률  $P_c = 0.85$ , 돌연변이 확률  $P_m = 0.013$ 이다.

## N. 시뮬레이션 및 결과 고찰

본 논문은 유전자알고리즘을 이용하여 퍼지 제어 규칙의 전건부 소속함수의 중심값과 폭을 재배치하는 유전자-퍼지 알고리즘을 적용하였다. 제안된 알고리즘의 성능평가를 위해 전형적인 비선형 시스템인 도립진자를 모델링하여 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다.

표 2. 수레의 파라미터  
Table 2 The parameters for cart

파라미터	정의	값	단위
M	수레의 무게	1.0	kg
m	진자의 무게	0.1	kg
L	진자의 1/2길이	0.5	m
$\theta$	진자의 각도	0.0~ 3.0	rad
$\dot{\theta}$	진자의 각속도	0.0~ 3.0	rad/sec
u	수레에 작용되는 힘	-6 ~ 6	N

컴퓨터 시뮬레이션은 유전자-퍼지 알고리즘의 우수성을 확인하기 위해 도립진자의 각도 제어만을 수행하였다. 도립진자의 수학적 모델링은 식 (2)에 나타나 있으며, 컴퓨터 시뮬레이션에 사용된 수레의 파라미터는

표 2와 같다. 제시된 알고리즘의 성능 평가를 위해서 식 (5)와 같이 도립진자의 초기 각도  $\theta$ 와 각속도  $\dot{\theta}$ 의 초기함수를 사용하였다.

$$f(\theta_i, \dot{\theta}_{dj}) = \{(\theta_i, \dot{\theta}_{dj}), i=0.1,0.3,0.7, j=0.0,0.3\} \quad (5)$$

그림 7은 각도  $\theta$ 와 각속도  $\dot{\theta}$ 의 변화를 시간에 따라 표현한 그래프이다. 그래프 상에서 각도와 각속도는 최종적으로 0으로 수렴함을 알 수 있다.

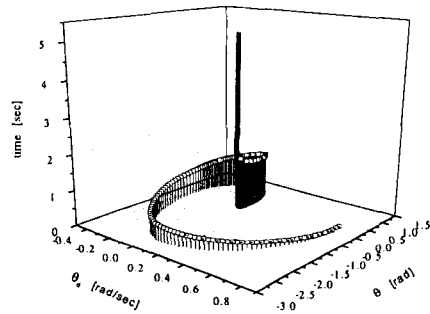


그림 7. 퍼지제어기의  $\theta$  와  $\dot{\theta}$  궤적  
Fig. 7 The Trajectory for  $\theta, \dot{\theta}$

표 3은 퍼지제어 시스템과 유전자-퍼지 제어시스템의 성능 비교를 나타낸다.

표 3. 퍼지제어 시스템과 유전자-퍼지 제어시스템의 성능 비교  
Table 3. The comparison of fuzzy and genetic-fuzzy system

소속함수 $f(\theta, \dot{\theta})$	최대 언더슈트 [rad]		최대 오버슈트 [rad]		정상상태 도달시간 [sec]	
	퍼지 제어	유전자 퍼지 제어	퍼지 제어	유전자 퍼지 제어	퍼지 제어	유전자 퍼지 제어
(0.1, 0.0)	$-4.0 \times 10^{-5}$	0.0	$2.2 \times 10^{-4}$	0.0	3.66	3.68
(0.3, 0.3)	$-5.0 \times 10^{-2}$	0.0	$3.92 \times 10^{-2}$	0.0	2.12	1.32
(0.7, 0.0)	$-3.38 \times 10^{-1}$	$-3.36 \times 10^{-1}$	$6.92 \times 10^{-2}$	$1.94 \times 10^{-2}$	3.50	3.42

초기함수  $f(0.1, 0.0)$  일 때, 퍼지제어시스템의 경우 최대언더슈트가  $-4.0 \times 10^{-5}[\text{rad}]$ 이 발생하였으며, 정상상태 도달시간은  $3.68[\text{sec}]$ 이며, 유전자-퍼지 알고리즘은 최대언더슈트가  $0.0[\text{rad}]$ 이고 정상상태 도달 시간은  $3.66[\text{sec}]$ 이다. 퍼지제어 시스템이 유전자-퍼지 시스템보다 2 step 정도 빠른 응답이 있었다. 그러나 정상상태까지 도달하는데 오버슈트 및 언더슈트가 발생하였다. 초기함수  $f(0.3, 0.3)$ 일 때, 퍼지제어시스템의 경우 최대언더슈트가  $-5.0 \times 10^{-2}[\text{rad}]$ , 최대오버슈트가  $3.92 \times 10^{-2}[\text{rad}]$ 로 측정되었으며, 제안된 알고리즘의 경우 최대오버슈트와 언더슈트가 각각  $0.0[\text{rad}]$ 으로 측정되었다. 또한 정상상태 도달시간이 퍼지제어의 경우  $2.12[\text{sec}]$ , 제안된 알고리즘은  $1.32[\text{sec}]$ 로 비교적 안정적으로 나타났다. 그림 8은 유전자-퍼지 알고리즘의 각 세대별 적합도를 나타내며, 그림 9와 그림 10은 소속함수의 최적화 된 상태를 보여준다. 초기함수  $f(0.7, 0.0)$ 일 때, 퍼지제어시스템과 유전자-퍼지 시스템의 최대언더슈트는  $-3.38 \times 10^{-1}[\text{rad}]$ 과  $-3.36 \times 10^{-1}[\text{rad}]$ 으로

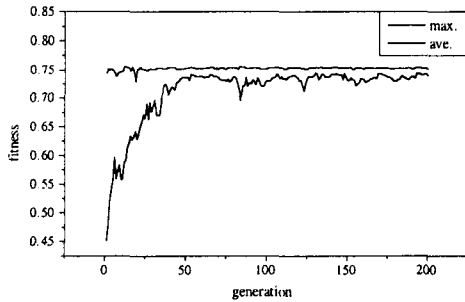


그림 8. 유전자-퍼지알고리즘의 적합도  
Fig. 8 The fitness of GA-Fuzzy algorithm

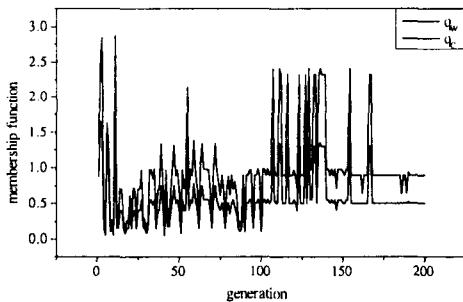


그림 9. 소속함수  $\theta$ 의 중심값과 폭  
Fig. 9 Center & width for MF  $\theta$

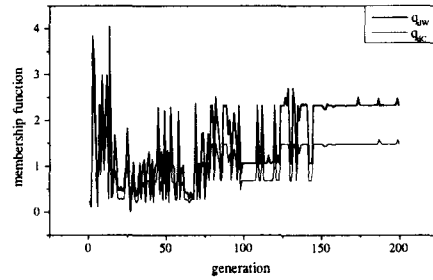


그림 10. 소속함수  $\theta_d$ 의 중심값과 폭  
Fig. 10 Center & width for MF  $\theta_d$

나타났으며, 최대오버슈트는  $6.92 \times 10^{-2}[\text{rad}]$ 과  $1.92 \times 10^{-2}[\text{rad}]$ 으로 유전자-퍼지 시스템이 비교적 안정적으로 나타났다. 정상상태 도달시간은 8 step 정도 앞서 있다.

그림 11 ~ 그림 13은 초기함수  $f(0.3, 0.3)$  일 때 각도  $\theta$ , 각속도  $\theta_d$ , 및 제어량  $u$ 의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

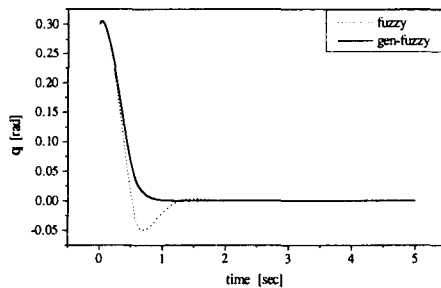


그림 11. 초기함수  $f(0.3, 0.3)$  일 때 각도  $\theta$ 의 궤적  
Fig. 11 The trajectory of  $\theta$  for  $f(0.3, 0.3)$

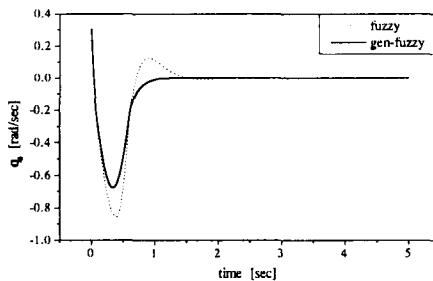


그림 12. 초기함수  $f(0.3, 0.3)$  일 때 각속도  $\theta_d$ 의 궤적  
Fig. 12 The trajectory of  $\theta_d$  for  $f(0.3, 0.3)$

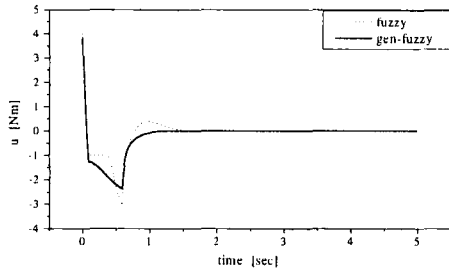


그림 13. 초기함수 f(0.3, 0.3) 일 때 제어량 u  
Fig. 13 The control result of u for f(0.3, 0.3)

### V. 결론

본 논문에서는 우주 부스터(space booster)의 자세 제어(attitude control)에 대한 모형이라 할 수 있는 도립진자의 제어를 위해 퍼지논리제어시스템과 진화연산의 일종인 유전자알고리즘과 퍼지 논리 시스템을 융합한 유전자-퍼지제어기를 사용하였다.

유전자 알고리즘을 적용한 퍼지 제어기는 소속함수의 중심값과 폭을 염색체로 나타내었으며, 염색체가 진화과정을 거치면서 소속함수의 최적해를 이끌어 내었다.

시뮬레이션에 사용된 파라미터들은 세대크기  $N_G = 200$ , 개체군의 크기  $N_P = 50$ , 교차확률  $P_c = 0.85$ , 돌연변이 확률  $P_m = 0.013$ 이며, 퍼지 소속함수의 경우 입력 각도  $\theta$ 와 각속도  $\theta_d$ 로 언어값은 Positive와 Negative로 하였다. 시뮬레이션 결과 퍼지 입력변수의 소속함수의 중앙값  $\theta_c = 0.5$ , 중심폭  $\theta_w = 0.891$ ,  $\theta_{dc} = 1.475$ ,  $\theta_{dw} = 2.47$ 으로 최적화되었다.

퍼지 제어의 경우 초기함수 f(0.3, 0.3)일 때 최대 언더슈트가  $-5.0 \times 10^{-2}$ [rad], 최대 오버슈트가  $3.92 \times 10^{-2}$ [rad]로 측정되었으며, 제안된 알고리즘의 경우 최대 오버슈트와 언더슈트가 각각 0.0[rad]으로 측정되었다. 또한 정상상태 도달시간이 퍼지제어의 경우 2.12[sec], 제안된 알고리즘은 1.32[sec] 비교적 안정적으로 나타났다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과, 유전자-퍼지 알고리즘을 도립진자 시스템에 적용시키고, 그 성능의 우수성과 효율성을 증명하였다.

### 참고문헌

- [1] 채석, 오영석, "퍼지이론과 제어", 청문가, 1995.
- [2] J. H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial System", The Univ. Michigan Press, 1975.
- [3] 도용태, 김일곤, 김종완, 박창현, "인공지능의 개념 및 응용", 희중당, 1997.
- [4] M. Beale, H. Demuth, "Fuzzy System Toolbox for use with MATLAB", PWS Publishing Co., 1994.
- [5] J. S. R. Jang, N. Gulley, "Fuzzy Logic Toolbox for use with MATLAB", The Math Works, Inc. 1995.
- [6] A. Zakharov, S. Halasz, "Genetic Algorithms Based Identification Method for a Robot Arm", Proceedings of the IEE Intl' Symposium on Industrial Electronics, V.3, pp.1014-1019.
- [7] Man Gyun Na, "Design of a Genetic Fuzzy Controller for the Nuclear Steam Generator Water Level Control", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 45, No. 4, 1998.
- [8] Geoff Roberts, "Intelligent Mechatronics", IEE Control Division: Charman's Addresss, Computer & Control Engineering Journal, Dec. 1998.

이상훈(Suk-Bum Kang)

1996년 2월 목원대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
2000년 2월 목원대학교 대학원 전자 및 컴퓨터공학과 졸업(공학석사)  
2000년~현재 (주)비전컴 중앙연구소 연구원  
관심분야 : 로봇제어, 퍼지제어



박세준(Se-Jun park)

1992년 2월 목원대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
1997년 8월 목원대학교 대학원 전자 및 컴퓨터공학과 졸업(공학석사)  
2000년~현재 목원대학교 대학원 전자 및 컴퓨터공학과 박사과정  
관심분야 : 로봇제어, 퍼지제어, 신경회로망



양태규(Tae-Kyu Yang)

1982년 2월 광운대학교 전자공학과 졸업(공학사)

1984년 2월 광운대학교 대학원 전자동학과 졸업(공학석사)

1989년 광운대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)

1991년~현재 목원대학교 전자공학과 부교수

관심분야 : 로봇제어, 퍼지제어, 신경망제어