

# 회전형 역진자 시스템에 대한 계층적 공정 경쟁 기반 유전자 알고리즘을 이용한 최적 Fuzzy 제어기 설계

## Design of Optimized Fuzzy Controller by Means of HFC-based Genetic Algorithms for Rotary Inverted Pendulum System

정승현 · 최정내 · 오성권

Seung-Hyun Jung, Jeoung-Nae Choi, Sung-Kwun Oh

수원대학교 전기공학과

### 요약

본 논문은 회전형 역진자 시스템(Rotary Inverted Pendulum System : RIPS)에 대한 계층적 공정 경쟁 기반 유전자 알고리즘(Hierarchical Fair Competition-based Genetic Algorithms : HFCGA) 기반 최적 퍼지 제어기 설계를 제안한다. 회전형 역진자 시스템의 제어를 위해 퍼지제어기를 사용하였으며, 이때 퍼지제어기의 규칙은 LQR(Linear Quadratic Regulator) 제어기를 기반으로 하여 설계하였다. 유전자 알고리즘은 전역해를 구할 수 있는 장점이 있어 많은 분야에 성공적으로 적용되고 있지만 조기수렴 문제로 인하여 지역해에 빠질 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 병렬유전자 알고리즘이 개발되었으며, HFCGA는 병렬유전자 알고리즘을 개선한 방법 중의 하나이다. 본 논문에서는 퍼지 제어기의 파라미터의 최적화를 위해 계층적 공정 경쟁 기반 유전자 알고리즘을 사용하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통하여 LQR 제어기, 기존 단순유전자 알고리즘(SGA)을 이용한 퍼지제어기와 제안된 HFCGA 기반 퍼지제어기의 성능 비교를 통하여 제안된 방법의 우수성을 보인다.

### Abstract

In this paper, we propose an optimized fuzzy controller based on Hierarchical Fair Competition-based Genetic Algorithms (HFCGA) for rotary inverted pendulum system. We adopt fuzzy controller to control the rotary inverted pendulum and the fuzzy rules of the fuzzy controller are designed based on the design methodology of Linear Quadratic Regulator (LQR) controller. Simple Genetic Algorithms (SGAs) is well known as optimization algorithms supporting search of a global character. There is a long list of successful usages of GAs reported in different application domains. It should be stressed, however, that GAs could still get trapped in a sub-optimal regions of the search space due to premature convergence. Accordingly the parallel genetic algorithm was developed to eliminate an effect of premature convergence. In particular, as one of diverse types of the PGA, HFCGA has emerged as an effective optimization mechanism for dealing with very large search space. We use HFCGA to optimize the parameter of the fuzzy controller.

A comparative analysis between the simulation and the practical experiment demonstrates that the proposed HFCGA based fuzzy controller leads to superb performance in comparison with the conventional LQR controller as well as SGAs based fuzzy controller.

Key Words : RIPS(Rotary Inverted Pendulum System), HFCGA(Hierarchical Fair Competition-based Genetic Algorithms), LQR(Linear Quadratic Regulator), optimized fuzzy controller

### 1. 서론

회전형 역진자 시스템(Rotary Inverted Pendulum System : RIPS)은 로봇이나 2족 보행 로봇의 자세제어의 기본이 되는 비선형 시스템의 대표적인 예로서, 동역학적인 구조나 장치가 단순하며 수학적 모델이 잘 알려져 있다.[1] 비선형이며 불안정한 운동을 하는 회전형 역진자 시

스템은 회전 지렛대(Rotating arm) 위의 진자(Pendulum)가 적당한 제어 입력이 없는 상황에서 중력에 의해 어느 한 쪽 방향으로 넘어지려고 할 때, 외부에서 회전지렛대에 힘을 가하여 회전지렛대의 특정위치와 진자의 각도를 유지시키는 시스템이다. 이러한 회전형 역진자 시스템에서 제어 목적은 회전 지렛대를 원하는 위치에 오게 하고 그 위치에서 진자를 수직 위치의 불안정 평형 점에 위치하도록 하는 것이다.

기존의 PID제어기가 선형 시스템에서는 우수한 성능을 보이거나 비선형 동적 시스템, 고차 시스템, 수학적 모델 선정이 어려운 시스템에서는 비효과적인 것에 반해 퍼지 제어기 [2-3]는 인간의 지식과 경험을 이용한 지적 제어 방식으로

접수일자 : 2007년 11월 20일

완료일자 : 2007년 12월 18일

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(F01-2007-000-10058-0).

IF-THEN 형식의 규칙으로부터 제어 입력을 결정하는 병렬형 제어이다. 제어 규칙과 멤버쉽함수로 표현된 전문가의 지식을 이용하여 적절한 제어출력을 내는 퍼지 제어기는, 과도상태에서 큰 오버슈트 없이 설정치에 도달하게 하는 속응성과 강인성이 좋은 제어기법으로 비선형성이 강하고 불확실하며 복잡한 시스템을 쉽게 제어 할 수 있는 장점을 가진다. 퍼지제어기는 PID제어기와 비슷한 형태의 제어 파라미터들을 가지고 있다[4]. 이 파라미터들은 제어기의 핵심으로 이것의 설정에 따라 보다 빠르고 안정한 제어 결과를 얻을 수 있다. 그러나 퍼지 제어기의 파라미터들은 수학적으로 결정하기가 매우 어렵기 때문에, 시행착오를 거쳐 구하거나 유전자 알고리즘 같은 최적화 알고리즘을 이용하여 구한다.

유전자 알고리즘(Genetic Algorithms : GA)[5]은 자연세계의 진화과정(유전자적 특성, 적자생존)을 이용한 탐색 알고리즘이다. 일반적으로 유전자 알고리즘은 전역 해를 찾을 수 있는 최적화 알고리즘으로 잘 알려져 있으며, 많은 응용에 성공적으로 사용되고 있다. 그렇지만 탐색 공간이 크거나, 파라미터 수가 많은 경우 세대가 증가하여도 더 좋은 최적 해를 찾지 못하고 지역해에 빠지는 조기 수렴 문제를 내재하고 있다. 이러한 조기 수렴을 억제하고 전역해를 찾기 위한 해결 방안으로써 병렬 유전자 알고리즘(Parallel Genetic Algorithm : PGA)[6]이 개발되었다. 병렬 유전자 알고리즘은 전체 유전자를 부분 모 집단으로 나누어 병렬로 진화시키며, 특히 병렬 유전자 알고리즘의 한 구조인 계층적 공정 경쟁 구조(Hierarchical Fair Competition-based Genetic Algorithms: HFCGAs)[7-8]는 큰 탐색 공간을 갖는 문제에 효과적이다.

본 논문에서는 비선형이며 불안정한 운동을 하는 회전형 역 진자 시스템의 제어를 위해 Rotating Arm의 각도 ( $\theta$ )와 Pendulum의 각도 ( $\alpha$ )를 제어하는 Fuzzy 제어기를 구성한다. 구성된 Fuzzy 제어기의 입·출력 및 제어 규칙은 LQR(Linear Quadratic Regulator) 제어기의 형태 및 제어 동작에 기반 하여 설계하고[3], 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘을 이용하여 Fuzzy 제어기의 제어 파라미터들을 최적화한다. 그리고 Inverted Pendulum의 최적제어에 자주 응용되는 LQR 제어 및 기존의 유전자 알고리즘을 이용한 최적 퍼지 제어기와 시뮬레이션 및 실제 플랜트에 적용한 결과를 비교한다.

## 2. 회전형 역 진자 시스템(RIPS)

회전형 역 진자 시스템은 Rotating Arm, Pendulum, Potentiometer, 모터로 이루어지고, 전압의 인가를 통해 모터를 구동시켜 Rotating Arm을 회전시키고, 이를 통해 Pendulum의 움직임을 제어하게 된다. 회전형 역 진자 시스템에서 제어목적은 Rotating Arm을 원하는 위치에 오게 하고 그 위치에서 진자를 수직 위치의 불안정 평형 점에 위치하도록 하는 것이다.

회전형 역 진자 시스템의 전체적인 구성과 동작은 그림 1과 같고, 모터의 구동이 Rotating Arm의 원운동으로 연결되어 Pendulum을 제어하도록 되어있다. Rotating Arm의 각도 ( $\theta$ )는 회전축을 기준으로 왼쪽으로 기울어진 방향을 + 방향으로, Pendulum의 각도 ( $\alpha$ )는 수직축으로부터 기울어진 경사각이라 정의하고 오른쪽으로 기울어진 방향을 +방

향으로 하였다. Euler-Lagrange 방정식과 Lagrangian 방정식을 이용하여 수학적 모델을 구하면 식(1~3)과 같다.

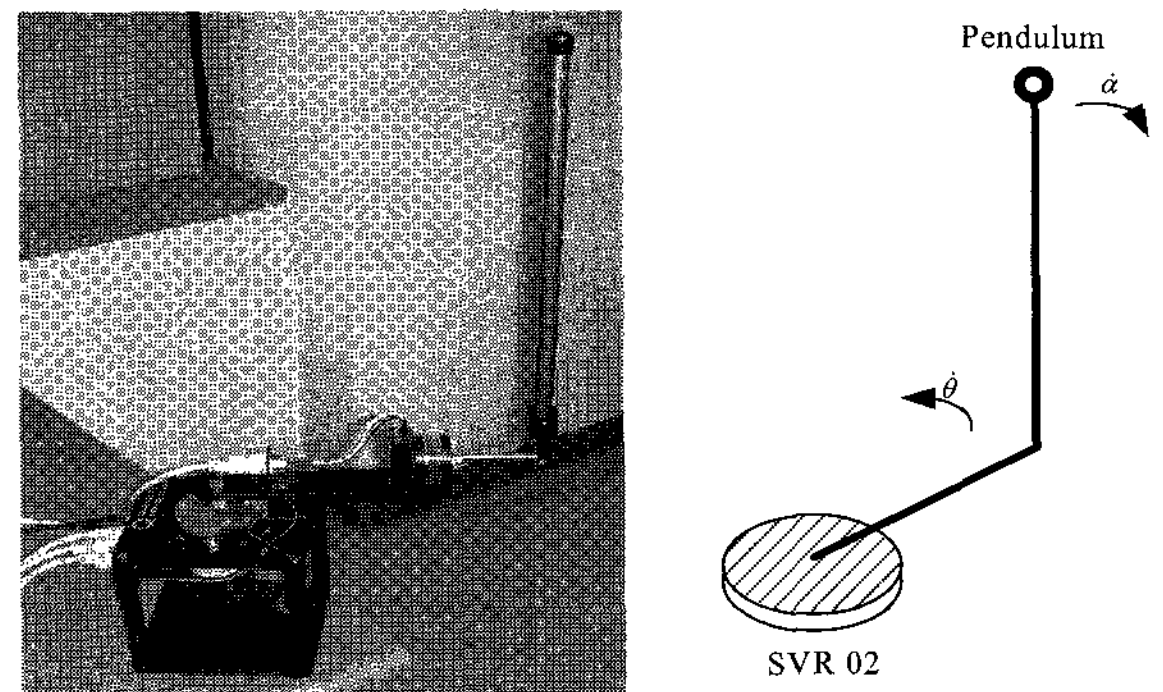


그림 1. 회전형 역 진자 시스템의 구성 및 동작  
Fig 1. Structure and action of rotary inverted pendulum system

$$(J_{eq} + mr^2)\ddot{\theta} - mLr\cos(\alpha)\ddot{\alpha} + mLr\sin(\alpha)\dot{\alpha}^2 = T_{output} - B_{eq}\dot{\theta} \quad (1)$$

$$\frac{4}{3}mL^2\ddot{\alpha} - mLr\cos(\alpha)\ddot{\theta} - mgL\sin(\alpha) = 0 \quad (2)$$

$$T_{output} = \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g (V_m - K_g K_m \dot{\theta})}{R_m} \quad (3)$$

표 1. Pendulum의 파라미터  
Table 1. Parameters of the pendulum

Parameter	Description
$J_{eq} = 0.0036$	Equivalent Inertia as seen at the Load ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )
$B_{eq} = 0.004$	Equivalent Viscous Damping Coefficient as seen at the Load (N.m.s/rd)
$r = 0.158$	Length of rotating arm (meters)
$m = 0.125$	Mass of Pendulum (kg)
$L = 0.168$	Length of Pendulum centre of mass
$g = 9.8$	Gravitational Constant on Earth ( $\text{m/s}^2$ )
$\eta_m = 0.69$	Motor Efficiency
$\eta_g = 0.9$	Gearbox Efficiency
$T$	Torque on the load from the motor
$k_t = 0.007$	Motor Torque Constant (N.m/A)
$k_g = 19$	Total Gear Ratio
$k_m = 0.007$	Motor Back-EMF Constant (V.s/rd)
$R_m = 2.6$	Motor Armature Resistance (Ohm)
$V_m$	Motor Input voltage
$\theta$	Rotating arm angle
$\alpha$	Pendulum angle

그리고 Pendulum의 각 ( $\alpha$ )을 아주 작다고 가정하고, 식 (1)~(3)을 선형화하여 상태방정식을 만들면 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{bd}{E} & -\frac{cG}{E} & 0 \\ 0 & \frac{ad}{E} & -\frac{bG}{E} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ c \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{R_m E} \\ b \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{R_m E} \end{bmatrix} V_m \quad (4)$$

여기서,  $a = J_{eq} + mr^2$ ,  $b = mLr$ ,  $c = \frac{4}{3}mL^2$ ,  $d = mgL$ ,

$$E = ac - b^2, \quad G = \frac{\eta_m \eta_g K_t K_m K_g^2 + B_{eq} R_m}{R_m}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{\theta} \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 33.2953 & -16.7347 & 0 \\ 0 & 67.4805 & -11.8392 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 29.4327 \\ 20.8226 \end{bmatrix} V_m \quad (5.1)$$

$$\begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \alpha \\ \dot{\theta} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$S = [B, AB, A^2B, \dots, A^{n-1}B], \text{rank}(S) = 4 \quad (6)$$

표 1의 수식을 대입하여 식 (4)를 다시 정리하면 식 (5)와 같다. 회전형 역 진자 시스템을 상태 공간 표현식으로 나타낸 식 (5)에서 시스템 행렬 A의 고유치를 구하여 보면,  $s = \{0, -18.2242, -5.6498, 7.1393\}$  이다. 여기에서 알 수 있듯이 회전형 역 진자 시스템은 s-평면상의 우반면에 특성근을 하나 가지는 불안정한 시스템이다. 그리고 제어기 설계에 앞서 먼저 가제어성을 판별하여야 한다. 가제어성 판별은 아래의 식 (6)과 같이 하며, 이때 가제어 행렬이 full-rank이면 가제어이다. 위의 회전형 역 진자 시스템을 확인해보면 가제어 행렬의 계수가 4이므로 시스템은 완전 상태 가제어이다.

### 3. Fuzzy 제어기 설계

퍼지 제어기는 인간의 지식과 경험을 이용한 지적 제어 방식으로 IF-THEN 형식의 규칙으로부터 제어입력을 결정하는 병렬적 제어이다. 본 논문에서 제어기의 구조 및 제어 규칙은 최적 제어에 자주 응용되는 LQR(Linear Quadratic Regulator) 제어기의 형태 및 제어 동작에 기반하여 설계하였다[3]. LQR 제어기의 형태는 그림 2와 같고, 식 (5)과 같은 상태 공간 모델로 표현한 시스템에서 제어 대상 시스템을 안정화 시키면서 식 (7)의 성능지수  $J$ 를 최소화하는 최적 제어입력  $u(t)$ 를 구한다.

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t) Q x(t) + u^T R u(t)] dt \quad u(t) = -Kx(t) \quad (7)$$

식 (7)에서 Recatti 방정식을 통해  $K$  행렬을 구하고, 성능지수의 Q, R 행렬은 제어의 수렴속도와 안정성에 영향을 주는 변수로 설계자의 경험이나 시행착오에 의해 보통 구하게 된다. 그림 2에서 LQR 제어기의 형태 및 제어 동작을 보면 Rotating arm의 각도 ( $\theta$ ), Rotating arm의 각도의 변화분 ( $\dot{\theta}$ ), Pendulum의 각도 ( $\alpha$ ), 그리고 Pendulum의 각도

의 변화분 ( $\dot{\alpha}$ )를 입력으로 하고 각각의 입력에  $K$  matrix를 곱한 후 합산하여 시스템의 입력전압 ( $V$ )를 출력하게 된다.

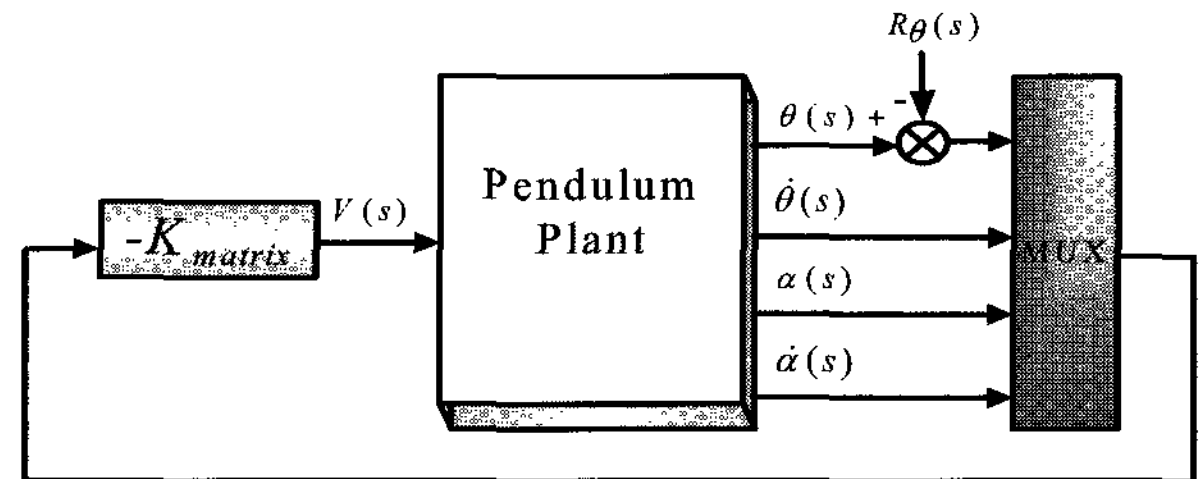


그림 2. LQR 제어기의 구조  
Fig 2. Structure of LQR controller

그림 3은 설계된 Fuzzy 제어기의 구조를 보여준다. Rotating Arm의 각도( $\theta$ )와 Pendulum의 각도( $\alpha$ )를 제어하기 위해, LQR 제어기의 형태와 같이 Rotating arm의 각도( $\theta$ ), Rotating arm의 각도의 변화분( $\dot{\theta}$ ), Pendulum의 각도( $\alpha$ ), 그리고 Pendulum의 각도의 변화분( $\dot{\alpha}$ )를 입력으로 하고 시스템의 입력전압 ( $V$ )를 출력으로 하는 4입력 1출력의 Fuzzy Inference System(FIS)을 구성하였다. 여기서 GE, GD, GE1 및 GD1는 규준화된 퍼지 값으로 표현하는 수치를 의미하는 오차변화의 퍼지 환산계수이고 GC는 퍼지 추론 규칙의 출력을 공정의 차원과 일치시키는 제어 출력의 퍼지 환산계수이다. 이 환산계수들은 Fuzzy 제어기의 핵심 중 하나인 멤버십 함수의 제어영역을 결정하는 제어 파라미터로서, 최적의 제어기 설계에서 가장 중요한 관건으로 본 논문에서는 다음 장에서 설명하는 최적화 알고리즘 중 하나인 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘(HFCGA)을 이용하여 동조한다.

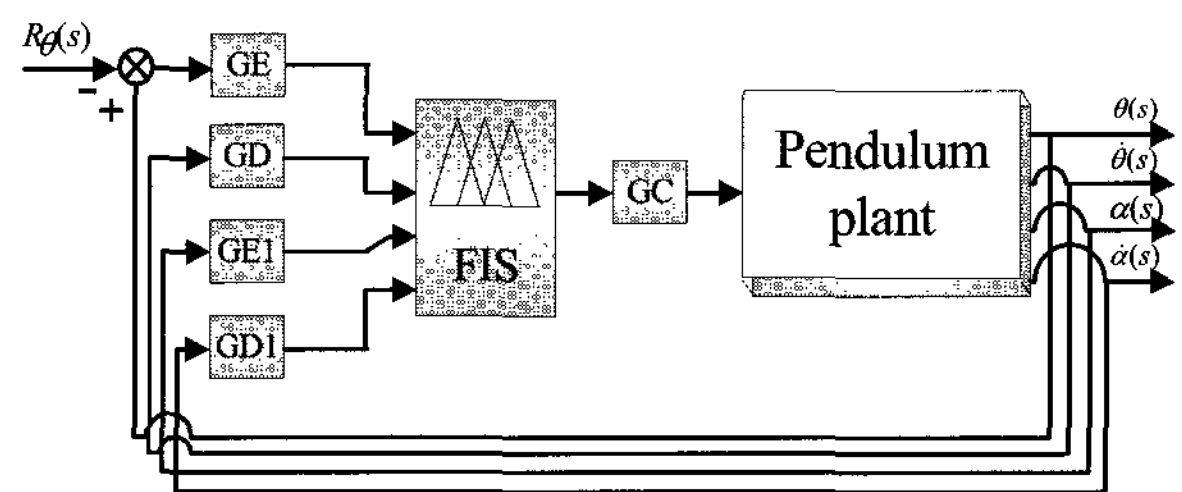


그림 3. 설계된 Fuzzy 제어기의 구조  
Fig 3. Structure of designed fuzzy controller

LQR(Linear Quadratic Regulator) 제어기의 합산 동작에 기반한, IF-THEN 형태를 취하는 Fuzzy 제어 규칙은 식 (9)과 같고, 그림 4는 Fuzzy 제어기의 입·출력 멤버십 함수를 보여준다. 4개의 입력 멤버십 함수는 모두 동일하고, 멤버십 함수 위의 숫자들은 멤버십 함수의 Index를 의미한다. Index 값은 제어 규칙에서 식 (8)에 의한 후반부 멤버십 함수의 중심값과 후반부 멤버십 함수를 결정할 때 사용된다. 후반부 멤버십 함수는 싱글톤(Singleton)을 사용하였다.

$$(j+k+l+m) \times \frac{2}{(N-1).n} \quad (8)$$

$j, k, l, m$  : 각 입력 멤버십 함수의 Index 값,  
 $N$  : 멤버십 함수의 개수,  $n$  : 입력의 개수

IF  $\theta$  is  $j$  and  $\dot{\theta}$  is  $k$  and  $\alpha$  is  $l$  and  $\dot{\alpha}$  is  $m$ ,

$$\text{THEN } Z_i \text{ is } z = j + k + l + n \quad (9)$$

$z$  : 출력 멤버십 함수의 Index 값

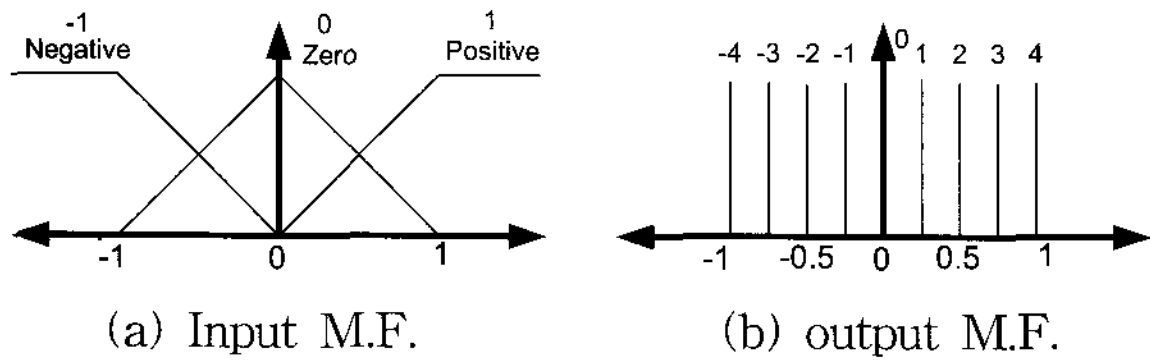


그림 4. 입·출력 멤버십 함수

Fig 4. Membership functions of input and output

본 연구에서 퍼지 추론의 전반부 적합도 연산은 식 (10)을 사용하고, 식 (11)을 통해 최종 추론 결과를 구한다. 퍼지 추론에 의해서  $V_m^*$ 을 구하고, 퍼지 추론 규칙의 출력을 공정의 차원과 일치시키는 제어 출력의 퍼지 환산계수인 GC를 곱하여 시스템의 입력 전압  $V_m$ 을 최종적으로 출력한다.

$$w_i = \min \mu_{A_i}(\theta - R_\theta), \mu_{B_i}(\dot{\theta}), \mu_{C_i}(\alpha), \mu_{D_i}(\dot{\alpha}) \quad (10)$$

$$V_m^* = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot Z_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad V_m = V_m^* \cdot GC \quad (11)$$

#### 4. 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘을 이용한 제어기의 최적화

유전자 알고리즘은 최적화 알고리즘으로써 다차원의 해의 탐색 능력이 뛰어나며, 현재 많은 응용분야에 적용되고 있는 실정이다. 하지만, 단순 유전자 알고리즘은 염색체들의 다양성이 결여되어 모든 개체들이 최적의 해가 아닌 일정지역의 부분 최적해 안으로 수렴하게 되는 조기 수렴 문제를 내포한다.[6].

이러한 조기 수렴을 억제하고 전역해를 찾기 위한 해결 방안으로써 여러 개의 집단을 사용하여 집단 간의 개체가 이주하는 구조를 갖는 병렬 유전자 알고리즘(PGA)[6]이 많이 연구되고 있다. 병렬 유전자 알고리즘은 기존 유전자 알고리즘의 단일 모집단을 여러 개의 부분 모집단으로 나누어 격리시키고, 서로 격리된 각 부분 모집단이 독립적이면서 병렬적으로 진화해 가는 유전자 알고리즘이다. 병렬 유전자 알고리즘은 크게 세 가지 방법, 즉 전역 모델(global model)과 이주 모델(migration model), 그리고 확산 모델(diffusion model)로 나눌 수 있고, 이주 모델에서 이주 과정에 따라 완전 네트워크, 링 구조, 이웃 이주구조 그리고 본 연구에서 사용한 계층적 경쟁 방법(Hierarchical Fair Competition : HFC)을 도입한 HFCGA[7-8]가 있다.

본 연구에서 사용한 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘은 사회적 교육 시스템에서 동등 수준을 가진 그룹으로 나누어 학습에 대한 경쟁을 하며, 우수한 인재를 상위 그룹으로 진급하는 체계를 병렬 유전자 알고리즘에 적용한 것으로써, 유전자 알고리즘의 수행과정에서 각 개체들을 적합도별

로 나누어 경쟁을 시킴으로써 공정한 경쟁을 통해 처음 생성된 낮은 수준의 개체가 개선될 기회도 없이 탈락하는 경우를 방지한다. 낮은 수준의 개체도 다음 세대에서 높은 성능을 갖는 개체로 진화하면 그 수준에 맞는 집단으로 바로 이동할 수 있다. 이와 같은 원리를 통해서 항상 아래 수준의 집단으로부터 높은 수준의 개체가 올라올 수 있는 통로를 만들어 놓음으로써 조기 수렴을 최대도로 방지할 수 있다. HFCGA는 여러 개의 집단이 계층적으로 구성되어있으며, 각 집단은 특정 범위의 적합도를 갖는 개체들로 구성되어 있고, 하위 수준의 집단으로부터 개체의 진입을 위한 문턱적합도를 갖고 있다. 그리고 진화과정은 기존의 유전자 알고리즘과 비슷하지만 이주과정이 있다는 것이 다른 점이다.

HFCGA에서 이주과정은 정해진 일정한 세대 간격마다 수행하게 된다. 이주과정은 다음처럼 3 단계로 구현된다. [Step 1] 각각의 집단 개체들의 적합도를 정규화한다.

$$nf_{j,i} = f_{j,i}/f_{\max} \quad (11)$$

$f_{j,i}$ 는 j집단(demo)의 i번째 개체 적합도,  $f_{\max}$ 는 전체 집단의 최대 적합도

[Step 2] 정규화된 적합도를 정해진 문턱적합도들과 비교하여 적합도 수준에 맞는 임시버퍼(Admission buffer)에 개체들을 저장한다.

[Step 3] 각각의 임시버퍼에 저장된 개체들과 해당하는 집단의 낮은 수준의 개체들을 바꾸어준다. 그리고 최하위수준의 집단은 모든 개체들을 랜덤하게 다시 생성한다.

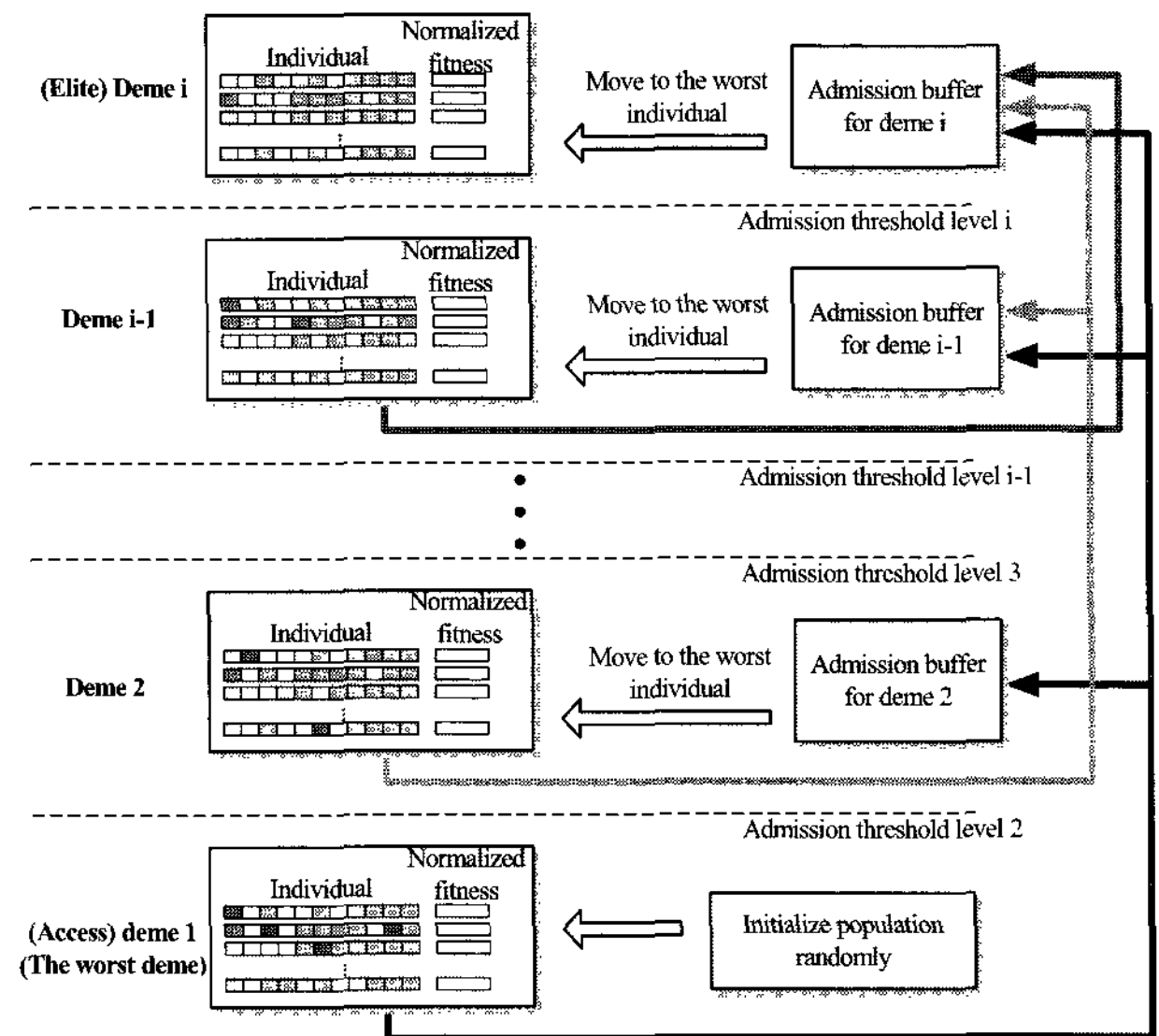


그림 5. HFCGA의 이주구조

Fig 5. The migration topology of HFCGA

각 집단은 독립적으로 진화하게 되며 진화과정 중 우수한 개체는 자기수준에 맞는 상위 집단으로 이주하게 된다. 그림 5는 HFCGA의 이주구조를 보여주며 화살표는 개체들의 이동 가능한 방향을 의미한다.

본 논문에서 사용된 HFCGA는 실수 코딩을 기반으로 하였으며 선형 순위 선택알고리즘, 수정된 단순교배 알고리즘, 균일 돌연변이 알고리즘 및 엘리트 전략을 사용하였다. 그리고 전체 세대수의 10%마다 이주 과정을 수행하였다.

HFCGA를 이용하여 탐색하고자 하는 값은 Fuzzy 제어



기의 환산계수 (GE, GD, GE1, GD1, GC)이다. 염색체 구조는 실수 코딩을 사용하였기에 제어 파라미터와 유전자간에 일대일 대응되고, 유전자 알고리즘에서 목적함수(적합도)를 평가하기 위해 성능지수( $f$ )로써 식 (12)과 같이 플랜트 출력인 Rotating Arm의 각도 ( $\theta$ )와 Pendulum의 각도 ( $\alpha$ )의 ITAE (Integral of the Time multiplied by the Absolute value of Error) 합을 사용하였다.

$$f = ITAE_{\theta} + ITAE_{\alpha}, ITAE = \int t |E(t)| dt \quad (12)$$

### 5. 시뮬레이션 및 결과고찰

본 논문에서는 회전형 역진자 시스템에 대해 계층적 고정 경쟁 유전자 알고리즘을 사용하여 최적화된 Fuzzy 제어기를 설계하였으며, 설계된 최적 퍼지 제어기를 기존의 유전자 알고리즘을 사용한 최적 제어기 및 Inverted Pendulum의 최적제어에 자주 응용되는 LQR 제어와 비교하여 그 성능을 평가한다. 시뮬레이션에서 시스템의 초기값은 Rotating Arm의 각도 ( $\theta$ )는 0.5[rad], Pendulum의 각도 ( $\alpha$ )는 -0.016[rad]으로 설정하였고, Rotating Arm의 각도 ( $\theta$ )의 목표 값은 0[rad]으로 설정하였다.

본 논문에서 사용한 실수코딩 기반 HFCGA의 파라미터 및 수행 전략은 표 2와 같다. 병렬 유전자 알고리즘의 특성을 나타내기 위하여 5개의 부분 집단을 나누고 각 부분집단마다 서로 다른 환경을 주어 독립적인 진화가 이루어지게 하였다.

표 2. SGA와 HFCGA의 파라미터 및 수행 전략.  
Table 2. Parameters and operators of SGA and HFCGA

	GA	HFCGA
세대수	100	100
집단크기	150	[30 30 30 30 30]
Parameter	교배율	[0.95 0.75 0.65 0.65 0.65]
	돌연변이율	[0.2 0.15 0.1 0.1 0.1]
	이주	전체 세대수의 10%마다
	문턱적합도	[0 0.1 0.3 0.5 0.85]
Operator	선택	선형 순위 선택 알고리즘
	교배	수정된 단순 교배 알고리즘
	돌연변이	균일 돌연변이 알고리즘
	엘리트전략	사용

그림 6은 HFCGA와 GA의 세대별 최적 목적함수 값을 보여준다. 최적 목적함수 값이 세대가 거듭할수록 조금씩 수렴해 가는 모습을 볼 수 있는데 이것은 최적의 해를 찾아가는 것이다. 그림 6에서 값이 작을수록 더 최적의 해를 나타냄으로 GA보다 HFCGA의 성능이 우수함을 알 수 있다.

그림 7의 시뮬레이션 결과를 보면 HFCGA를 이용한 최적 퍼지 제어기가 GA를 사용한 Fuzzy 제어기보다 수렴속도가 빠름을 볼 수 있다. 시뮬레이션에서의 제어 성능을 비교한 표 3에서 Pendulum의 각도 ( $\alpha$ )의 최대 오버슈트를 제외한 다른 부분에선 HFCGA를 이용한 최적 퍼지제어기

의 성능이 더 좋았고, 제어기 둘 다 목표 값에 수렴함을 볼 수 있었다. 전체적으로 평가하였을 때 제안된 최적 퍼지 제어기의 성능이 우수함을 확인하였다.

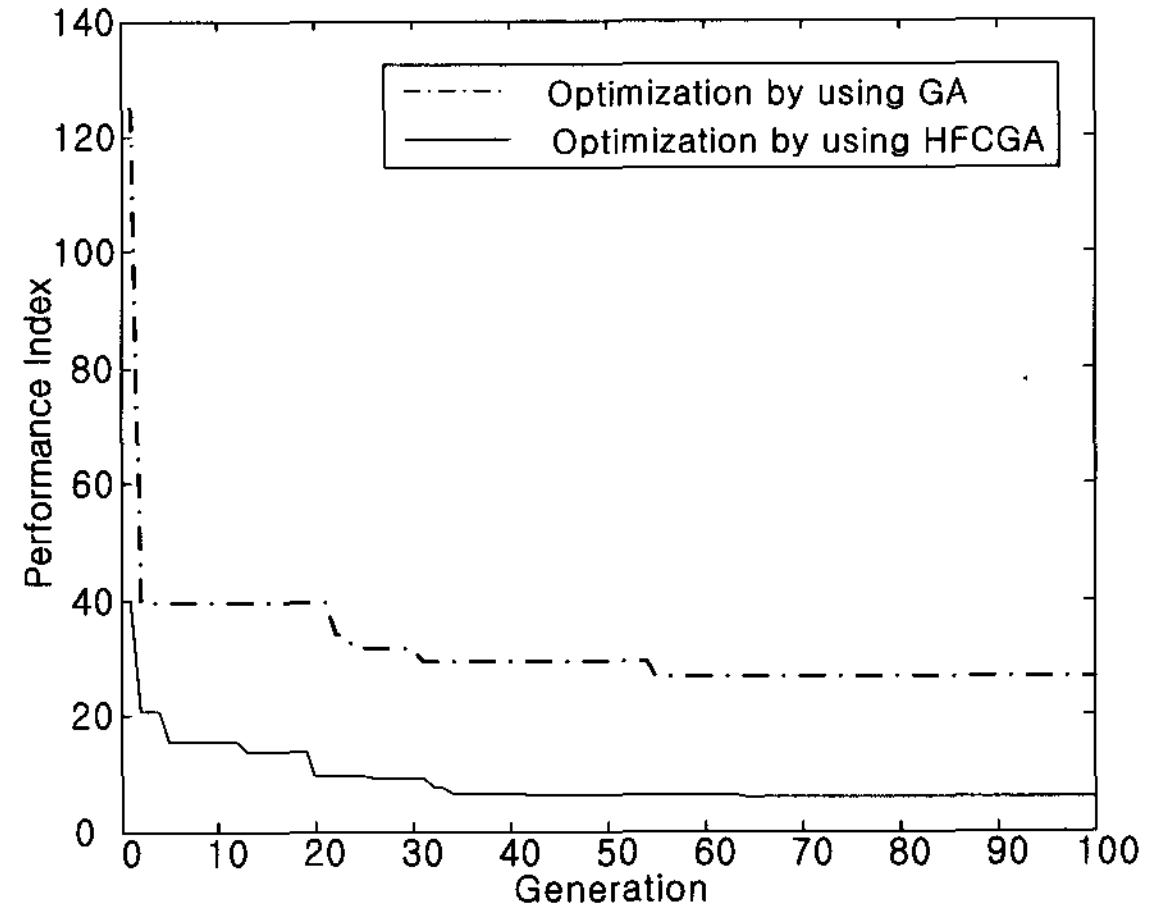
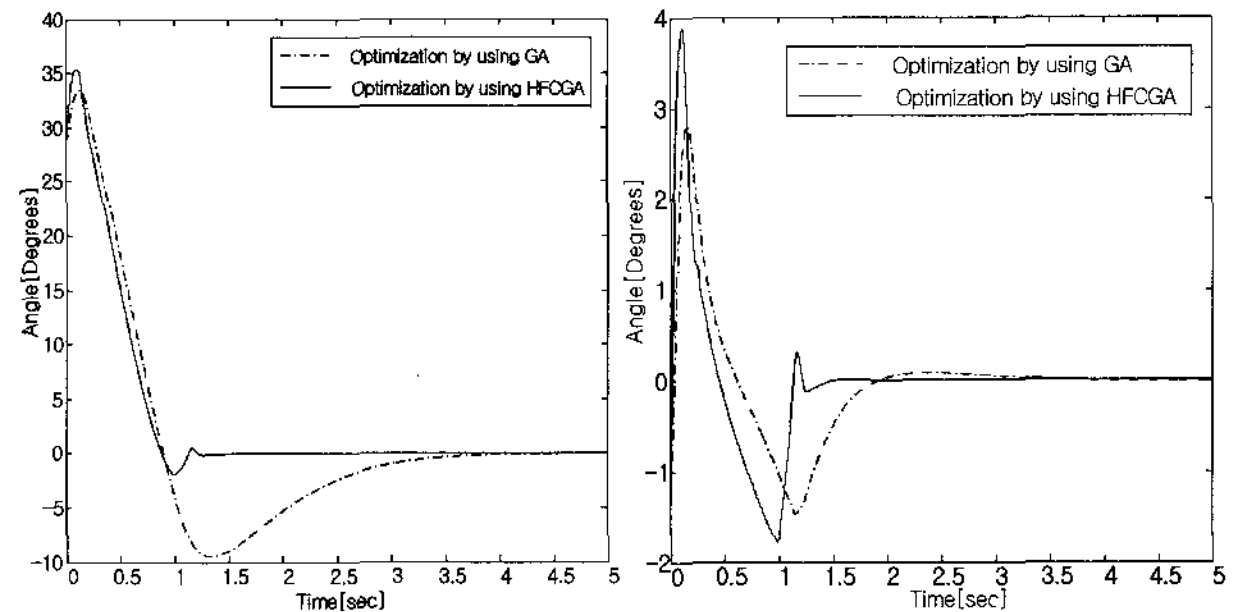


그림 6. GA 와 HFCGA의 세대수 증가에 따른 성능지수 값  
Fig 6. The values of performance index of GA and HFCGA according to the increase of the number of generations



(a)  $\theta$  시뮬레이션 결과 (b)  $\alpha$  시뮬레이션 결과  
그림 7. 시뮬레이션 결과  
Fig 7. Simulation results

표 3. 시뮬레이션에서의 제어 성능 비교  
Table 3. Comparison with performance of controller in simulation

		Optimization by using GA	Optimization by using HFCGA
Max Overshoot (max point)	$\theta$	-9.47 degree	-1.91 degree
	$\alpha$	2.81 degree	3.87 degree
Settling Time (2%이내)	$\theta$	4.75sec	1.50sec
	$\alpha$	3.61sec	1.45sec
정상상태 오차		0	0
목적함수값 (ITAE합)		26.5637	5.6598

그림 8은 실제 플랜트에 LQR 제어기, 제안된 HFCGA를 이용한 최적 퍼지 제어기 및 GA를 사용한 최적 퍼지 제어

기를 적용한 결과를 보여준다. 실제 플랜트에서는 Pendulum을  $-180$ 도(degree)에서 시작하여 Pendulum을 위로 세우기 위한 Swing 동작을 하고, Pendulum의 각도 ( $\alpha$ )가  $|1|$ 도(degree)에 도달할 때부터 제어기가 동작하도록 설정하였다. Rotating Arm의 각도 ( $\theta$ )의 결과에서는 본 연구에서 제안된 퍼지 제어기는 우수한 성능을 보인 반면 LQR 제어기와 GA를 이용한 최적 퍼지 제어기는 시뮬레이션 결과와는 다르게 수렴하지 않고 진동하였다. 그리고 LQR 제어기와 GA를 이용한 최적 퍼지 제어기를 비교해보면 두 제어기 모두 진동하였지만 퍼지 제어기가 좀 더 안정된 제어 주기를 보였다. Pendulum의 각도 ( $\alpha$ )의 결과에서 제안된 퍼지제어기와 GA를 이용한 최적 퍼지 제어기는 비슷한 결과를 보였다. 참고로 실제 플랜트결과에서 초기부분의 큰 진동들은 Pendulum을 위로 세우기 위한 Swing 동작이다.

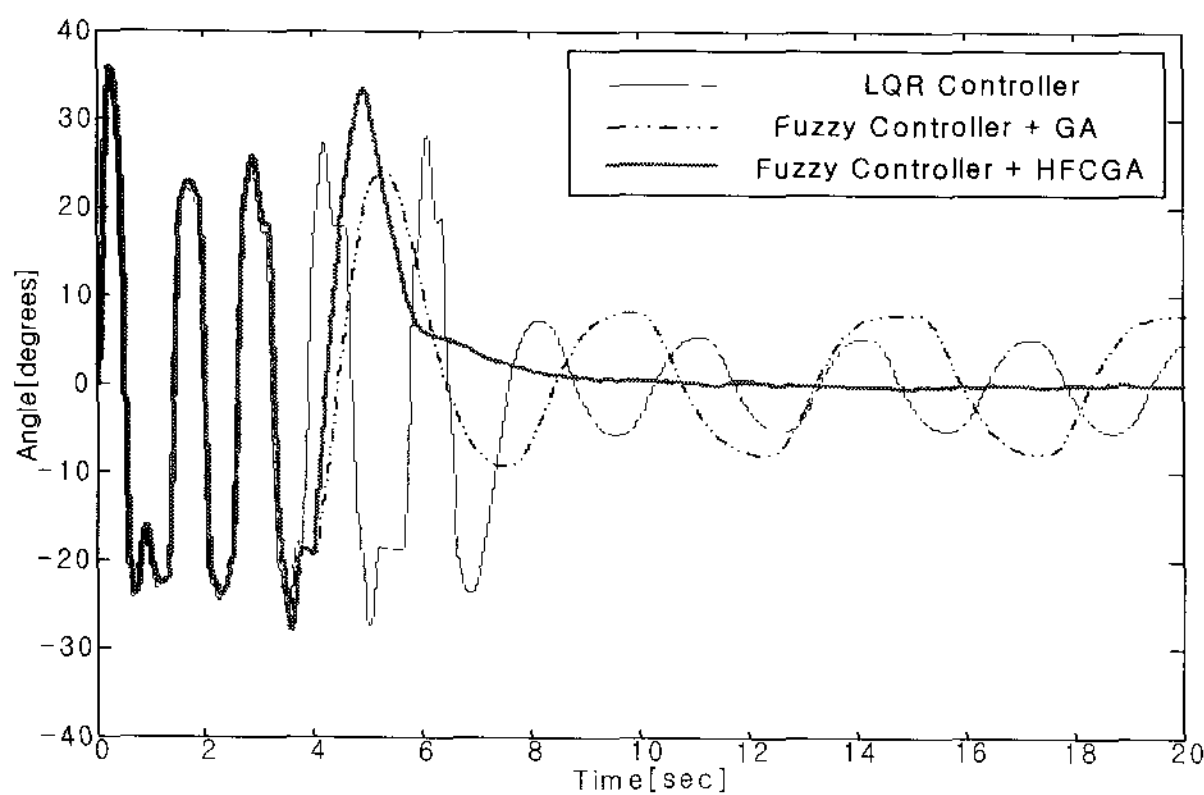
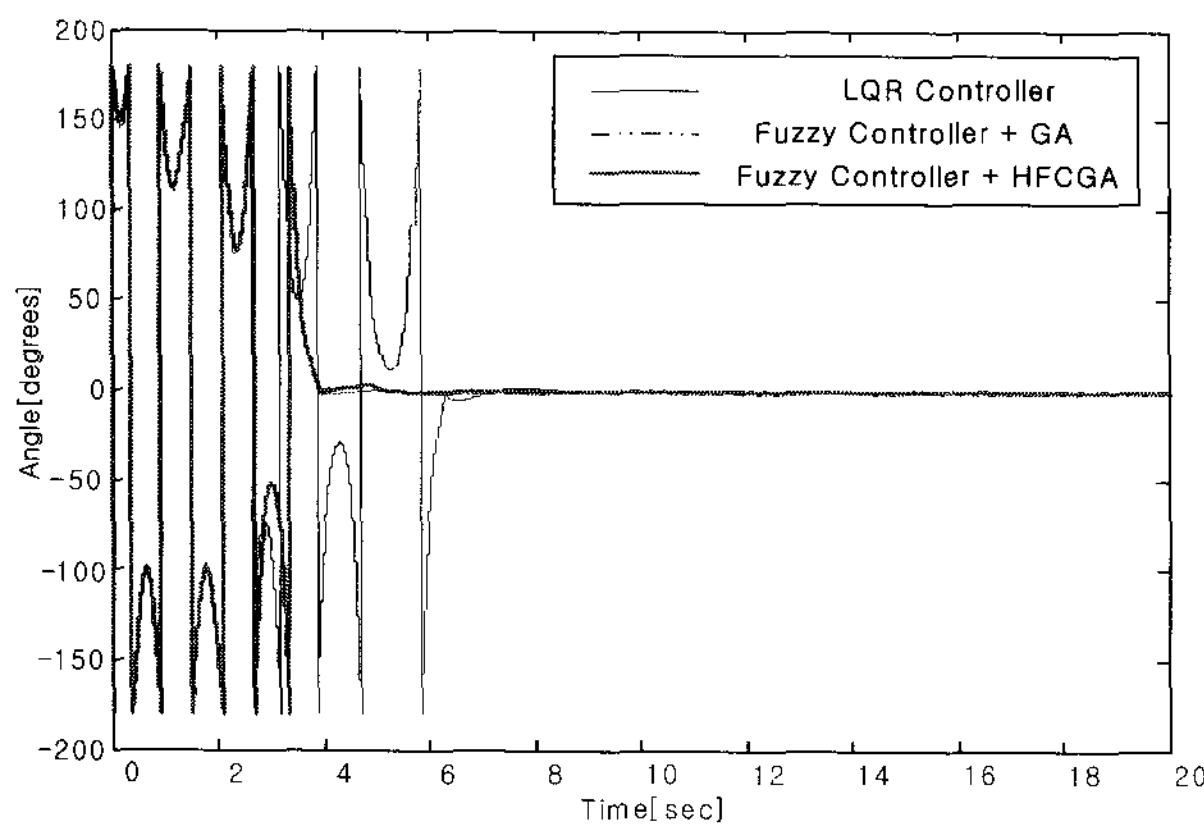
(a)  $\theta$  플랜트 결과(b)  $\alpha$  플랜트 결과

그림 8. 실제 플랜트 결과

Fig 8. Results of real plant

## 6. 결 론

본 논문에서는 계층적 공정 경쟁 유전자 알고리즘을 이용하여 비선형이며 불안정한 운동을 하는 회전형 역진자 시스템의 최적 Fuzzy 제어기를 설계하였다. 회전형 역진자 시스템에서 제어목적은 Rotating Arm을 원하는 위치에 오게 하고 그 위치에서 진자를 수직 위치의 불안정 평형 점에 위치하도록 하는 것으로, Rotating Arm의 각도 ( $\theta$ )와

Pendulum의 각도 ( $\alpha$ )를 제어하는 Fuzzy 제어기를 구성하였다. 구성된 퍼지제어기는 Inverted Pendulum의 최적제어에 자주 응용되는 LQR 제어기의 형태 및 제어 동작에 기반하여 설계하였고, 제어기에서 중요한 비중을 차지하는 제어 파라미터를 HFCGA를 이용하여 최적화하였다.

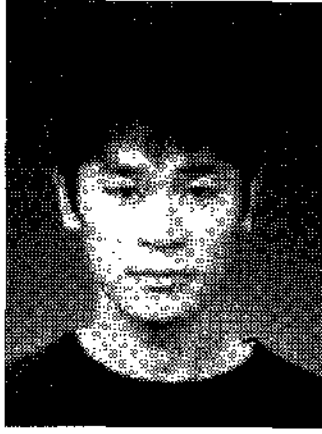
본 논문에서 제안된 HFCGA를 이용한 최적 퍼지 제어기는 시뮬레이션 및 실제 플랜트에 적용하여 성능의 우수함을 확인하였다. 시뮬레이션 결과에서 GA를 사용한 최적 퍼지 제어기와 비교해 보았을 때, 제안된 HFCGA를 이용한 최적 퍼지 제어기의 성능이 우수하였다. 실제 플랜트에서는 제안된 퍼지 제어기는 우수한 성능을 보였지만, LQR 제어기와 GA를 사용한 최적 퍼지 제어기는 시뮬레이션 결과와는 다르게 수렴하지 않고 진동하였다. 이는 HFCGA가 기존의 GA보다 최적해를 찾는 능력이 우수함을 입증한다.

시뮬레이션 결과와 실제 플랜트 결과와의 차이는 관성, 위치 측정 오차, 초기 값의 차이 및 실험의 장소와 환경 등에 의해서 비선형적 특성이 달라지기 때문으로, 플랜트의 비선형 특성이 고려된 모델을 기반으로 최적 Fuzzy 제어기를 설계한다면 더욱 우수한 성능의 제어기를 얻을 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] F. Grasser, A. D. Arrigo, S. Colombi, and A. C. Rufer, "JOE: a mobile, inverted pendulum," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 1, pp. 107-114, Feb 2002.
- [2] S.-K. Oh, "Fuzzy Model & Control System by C-Programming", Naeha Publishing Co., 2002.
- [3] K. Passino i S. Yurkovich, "Fuzzy Control", Addison-Wesley Longman, Ohio 1998.
- [4] Zhen-yu Zhao, Massayoshi Tomizuka, Satoru Isaka. "Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers," *IEEE Transactions on systems, man and Cybernetic*. Vol. 23, No. 5, Sep./Oct. 1993.
- [5] K.-K. Jin, "Genetic Algorithms and Their Applications", KyoWoo Press, 2002
- [6] R. Lohmann, " Application of Evolution Strategy in Parallel Populations," *Parallel Problem Solving from Nature*, Vol. 496, pp198-208, 1991.
- [7] J. Hu, E. Goodman, K. Seo, Z. Fan, R. Rosenberg, " The Hierarchical Fair Competition (HFC) Framework for Continuing Evolutionary Algorithms," *Evolutionary Computation*, The MIT Press, Vol. 13, Issue 2, pp 241-277, 2005
- [8] J. Hu, E. Goodman, K. Seo, M. Pei, "Adaptive Hierarchical Fair Competition(AHFC) Model for Parallel Evolutionary Algorithms," *Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference 2002*, New York, July 2002, pp. 772-779.

저 자 소 개



정승현(Seung-Hyun Jung)  
2006년: 수원대 전기전자공학부 졸업.  
2006년~2008: 동 대학원 전기공학과  
(공학석사).  
2008년~현재: LG전자(주) 연구소

관심분야: 퍼지추론시스템, 신경회로망, 유전자 알고리즘  
및 최적화이론, 지능시스템 및 제어 등

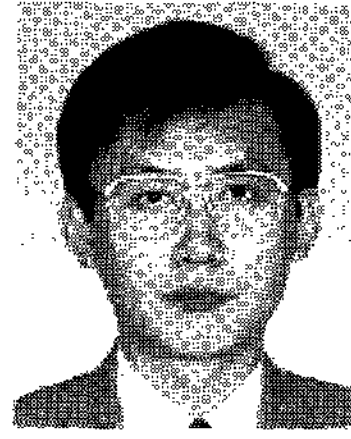
Phone : (031) 222-6544  
E-mail : jinhealim@suwon.ac.kr



최정내(Jeoung-Nae Choi)  
1997년: 원광대 제어계측과 졸업.  
1999년: 동 대학원 제어계측과 졸업  
(공학석사).  
2004년: 동 대학원 전기공학과 졸업  
(공학박사).  
2006년~현재: 수원대학교 전기공학과  
Post-Doc.

관심분야: 지능 제어, 최적화 기법, 퍼지이론, 신경망 이론 등.

Phone : (031) 222-6544  
E-mail : jnchoi@suwon.ac.kr



오성권(Sung-Kwun Oh)  
1981년: 연세대학교 전기공학과 졸업.  
1983년: 연세 대학원 전기공학과 졸업  
(공학석사).  
1983~1989년: 금성산전연구소  
(선임연구원).  
1993년: 연세대 대학원 전기공학과 졸업  
(공학박사).

1996~1997년: 캐나다 Manitoba대학 전기 및 컴퓨터공학  
과 Post-Doc.

1993~2005년: 원광대 전기전자 및 정보공학부 교수

2005년~현재: 수원대 전기공학과 교수.

2002년~현재: 대한전기학회, 퍼지및지능시스템학회 및 제  
어자동화시스템 공학회 편집위원.

관심분야: 시스템 자동화, 퍼지이론, 신경회로망 응용 및  
제어, 컴퓨터 지능 등.

Phone : (031) 229-8162  
E-mail : ohsk@suwon.ac.kr