

모델기준 PID 유전제어기를 이용한 DC 서보 전동기 제어

°손재현, 조양행, 김제홍
* 영동전문대학 전기과

DC Servo Motor Control using Model Reference PID Genetic Controller

°Jae-Hyun Son, Yang-Heang Cho, Jae-Hong Kim
Yeong Dong College

Abstract - In this paper, model reference PID genetic controller was proposed in order to overcome the difficulty of reflecting control performance required in the overall control system and defects of the adaptation performance in the PID genetic controller. The proposed controller comprised inner feedback loop consisting of the PID controller and plant, and outer loop consisting of an genetic algorithm which was designed for tuning a parameter of the controller. A reference model was used for design criteria of a PID controller which characterizes and quantizes the control performance required in the overall control system. Tuning parameter of the controller is performed by the genetic algorithm. The performance of proposed algorithm was verified through experiment for the DC servo motor.

1. 서 론

PID 제어는 제어장치의 구성이 간단하고 최적동조가 가능하여 다양한 분야에서 사용되고 있다.[1] 그러나 제어기에 의해 원하는 출력응답을 얻기 위해서는 최적 매개변수를 찾기 위한 수많은 시행착오를 거쳐야 하는 어려움이 따르며, 외란 및 플랜트 동특성이 변하는 경우 충분한 보상이 이루어지지 않아 매개변수를 재조정하여야 하는 단점이 있다.

유전 알고리즘은 자연계의 진화현상에 기초한 최적화 탐색 기법으로, 염색체가 복제, 교배, 돌연변이를 반복하여 진화하듯이 시스템의 최적해를 찾는 방법이다.[1, 2] 따라서 비선형, 고차원함수 등 복잡한 탐색 공간에서 최적값을 스스로 찾는 학습능력을 가짐으로서[3, 4] PID 제어기의 매개변수 결정 및 적응능력 향상에 적용되는 등 다양한 분야에서 응용되고 있다.[5] 그러나 유전 알고리즘은 목적함수만을 이용하여 해 집단을 탐색하기 때문에 플랜트 운전자가 원하는 제어성능을 구체적으로 명시하여 제어에 반영할 수 없는 단점이 있다. 또한, 유전 알고리즘은 기준입력값이 크게 바뀔 경우 전혀 다른 시스템으로 인식하여 새로운 탐색을 수행함으로써, 속도 및 위치명령의 변화가 빈번하고 부하가 심하게 변동하는 동적 시스템에 대해 적응성능에 한계가 있는 것으로 알려져 있다.[6]

본 논문에서는 이러한 단점들을 극복하기 위해서 PID 유전 제어기 설계시 최적화 평가를 위한 목적함수에 기준모델을 적용한 PID 유전제어기를 제안하였다. 여기서, 기준모델은 기준입력에 대한 전체 제어시스템에 요구되는 제어성능을 특성화하고 수량화하는 PID 유전제어기 설계기준으로 사용하였다. 또한, 이것은 미지 플랜트의 동특성을 식별하고 정보를 얻는데 이용되었다. 즉, 기준모델과 플랜트 출력사이의 추종오차 정보가 유전알고리즘의 입력으로 사용되어 기준모델을 추종하기 위한 최적화를 수행하고 PID 매개변수 동조에 필요한 수정량을 발생시키도록 하였다.

제안한 제어기의 타당성 및 실제 산업플랜트에 적용하는 사례연구로 로봇 매니플레이터용 직류서보전동기를 선정하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

2. 모델기준 PID 유전 제어기

제안한 모델기준 PID 유전제어기는 그림 1과 같이 PID 제어기와 기준모델, 적응 메카니즘의 역할을 수행하는 유전 알고리즘으로 구성되어 있다.

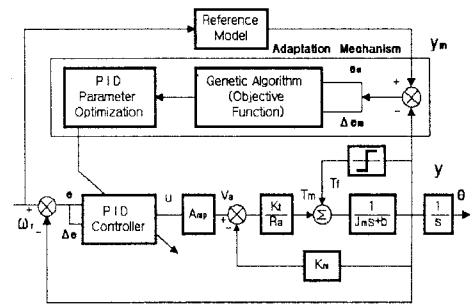


그림 1. 모델기준 PID 유전제어기의 블록선도
Fig 1. Block diagram of reference model PID genetic controller

2.1 기준모델

기준모델은 전체 제어시스템에 요구되는 제어성능을 반영하고 플랜트응답이 기준모델과 같은 응답이 되도록 하기 위한 제어기 설계기준이다. 기준모델을 결정하기에 앞서 고려해야 하는 제어기 설계사양은 계단응답 파형 또는 주파수응답의 특징에 따라서 지정하는 것이 일반적이다. 즉, 계단응답 파형의 오버슈트는 안정도, 지연시간과 최대치까지의 시간은 속응성, 정착시간은 속응성과 안정성을 표현할 수 있으며, 주파수 응답파형의 공진 첨두치는 안정도, 대역폭은 속응성 등의 특성을 표현한다. 그러나 이러한 설계 사양들을 표현할 수 있고, 이에따라 기준모델을 결정하는 것은 간단하지 않다. 그런데, 물리 시스템에서 특별한 경우를 제외하고, 페루프 시스템은 대부분 감쇠진동 특성을 갖는다. 따라서 가장 단순한 표현으로 2차 진동 시스템의 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{ref}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

즉, 앞에서 기술한 설계사양들은 감쇠비 ζ(damping ratio)와 비감쇠 자연주파수 ω_n(undamped natural frequency)로 해석적

표현이 가능하므로, 요구출력 성능을 용이하게 규정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기준입력에 대한 전체 제어시스템에 요구되는 제어성능(오버슈트, 지연시간, 상승시간, 정착시간 등)을 특성화하고, 수량화하기 위해 2차 진동시스템의 표현을 기준모델로 사용하였다.

2.2 적응 메카니즘

적응 메카니즘은 플랜트가 기준모델과 같이 동작하도록 PID 제어기의 매개변수를 동조하는 역할을 수행한다. 즉, 유전알고리즘은 매 세대 개체집단의 각 개체들을 탐색하고, 평

가하여 적합도를 산출하고, 이 적합도 정도에 따라 최적화값(수렴량)을 선정하여 매개변수 수정 및 저장을 실행한다.

성능평가를 위한 기준 목적함수로는 기준입력과 플랜트 출력사이의 오차 e_i 를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_1 = \sum_{i=0}^N e_i^2 t^2$$

(2)

여기서, t 는 세대를 의미하며 세대가 증가될수록 잔류편차를 감소시키기 위해 사용된다.[6] 또한, 오버슈트를 감소시키기 위해 사용되는 목적함수는 식(3)으로 표현된다.

$$F_2 = \sum_{i=0}^N e_i^2 + e c_i^2$$

여기서, $e c_i = e_i - e_{i-1}$ 를 나타낸다.

제어에너지를 감소시키기 위한 목적함수는 식(4)로 표현된다.

$$F_3 = \sum_{i=0}^N e_i^2 + u_i^2$$

여기서, u_i 는 플랜트의 제어입력이다.

동적 시스템에 구형과와 같이 급변하는 입력이 입력될 경우 식(2)~(4)와 같은 기존의 목적함수를 사용하여 성능평가를 수행하면 유전알고리즘은 동작점 경계치에서 최대값을 최적값으로 인식할 가능성이 크다. 따라서, 이러한 방법으로 유전 알고리즘을 전동기 제어에 적용할 경우 전동기는 허용치 이상의 제어량이 입력되어 탈조하거나, 제어를 할 수 없는 상태가 될 수 있다. 따라서 본 논문에서는 유전 알고리즘의 목적함수 입력자료로 기준입력과 플랜트 출력사이의 오차와 오차변화를 사용하는 기존의 방법을 이용하지 않고, 기준모델의 출력과 플랜트 출력사이의 추종오차와 추종오차변화를 사용하였으며 식(5)로 표현할 수 있다. 식(6)은 본 논문에서 사용한 목적함수이다.

$$em(kT) = ym(kT) - y_t(kT) \quad (5)$$

$$\Delta em(kT) = em(kT) - em(kT-T)$$

여기서, $em(kT)$: 기준모델과 플랜트출력의 추종오차,
 $\Delta em(kT)$: 추종오차의 변화, $ym(kT)$: 기준모델의 출력,
 $y_t(kT)$: 플랜트 출력

$$F = \sum_{i=0}^N (em_i^2 + \Delta em_i^2) \times t \quad (6)$$

식(6)의 목적함수에 의해 매 세대 개체집단의 각 개체들을 평가하고 최소값을 우성개체로 선정한다. 최소값은 추종오차와 추종오차 변화가 최소임을 반영하는 것이므로 제어의 결과가 가장 우수한 것임을 의미한다. 따라서, 매 세대마다 선정된 우성개체는 플랜트 출력이 기준모델 출력을 추종할 수 있도록 PID 제어기의 매개변수를 반복적으로 개선시키게 된다. 그리고, 식(7)을 이용하여 식(6)의 최소값(적합도값)을 0에서 100 사이의 최대값으로 변환시켜 적합도를 쉽게 판별할 수 있도록 하였다.

$$f(F) = \exp(-\sqrt{\frac{F}{t}}) \times 100 \quad (7)$$

여기서, F : 목적함수(objective function), f : 적합도함수(fitness function)이다.

3. 시뮬레이션

3.1 제어대상

제어대상은 직류 서보전동기로 사양은 표 1과 같다. 일반적으로 제어대상이 추종하여야 할 기준모델은 실제 플랜트를 운전하는 전문가가 경험과 제어지식에 근거하여 선정해야 하므로 본 연구에서는 상승시간 50[ms]이하, 오버슈트 5[%]이내, 정착시간 100[ms]이하인 설계사양을 임의로 선정하였으며, 이를 만족하는 $\zeta=1$, $\omega_n=2$ 인 2차 시스템을 기준모델로 선정하였고 샘플링시간(Sampling time)은 5[ms]로 하였다.

3.2 방법 및 절차

급격한 속도변화 및 회전방향 변화에 대한 적응능력을 평가하기 위해 동일제어 조건하에서 기존의 PID 유전제어기와

성능을 비교하였다. 또한, 유전 알고리즘은 돌연변이율, 개체집단수 및 개체수 등의 매개변수에 따라 성능이 크게 좌우되며, 각 제어대상마다 각각의 최적 돌연변이율과 개체수가 존재한다.[1,2] 따라서 직류 서보전동기 추종제어를 위한 최소 개체수 및 최적 돌연변이율을 찾기위해 돌연변이율과 개체수

표 1. 직류 서보전동기 사양

Table 1. Parameter of DC servo motor

전기자 인덕턴스	La=1.02 mH
토크정수	Kt=2.01 Kgf · cm/A
전기자관성	Jm=1.33×10 ⁻³ Kgf · cm sec ²
전기자저항	Ra=2.12 Ω
마찰토크	Tf=0.5 Kgf · cm
유기전압정수	Ke=22.50 V/K rpm

를 다양하게 변화시켜서 시뮬레이션 하였다. 즉, 개체집단은 개체수가 비교적 작은 10개와 50개를 선정하였고 돌연변이율은 전체 개체수의 10[%] 미만일 경우 국부 최소치(local minima)에서 빠져 나오기 어렵다는 본 연구진의 경험규칙에 의해 최소치는 0.15로 선정하였고 최대치는 0.4로 크게 선정하였다.

3.3 결과

그림 2(a)는 돌연변이율이 [0.15 0.4], 개체수가 10인 조건하에서 기준속도 입력을 1500[rpm]~0, 0~1500[rpm]의 형태로 연속적인 정·역회전 방향변화를 주었을 경우의 PID 유전 제어기의 출력응답을 나타낸 것이다. 초기응답은 첫 번째 상승구간에서 상승시간이 0.85[sec]이었고, t=1[sec] 등의 변속점에서는 35[%](약 525 rpm)의 오버슈트가 나타났으며, 그림 2(b)와 같이 변속점에서 오차의 크기는 지속적으로 유지되었다. 또한, 돌연변이율이 0.4와 0.15일 경우의 오차크기가 상당한 차이를 나타내어 돌연변이율의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 반면 제한한 제어기의 경우는 그림 3(a)와 같이 초기 상승구간에서 0.3[sec]의 지연현상이 나타났으나, t=1, 2, 3 [sec]등의 회전방향변화(변속점)에서는 그림 3(b)와 같이 150[rpm] 이하의 오차로 기준모델을 추종하였다. 또한, 돌연변이율 0.15, 0.4와의 응답차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이것은 미세조정 성능은 좋으나 국부 최소치에 빠질 우려가 있는 0.15의 경우와 국부 최소치에 빠질 우려는 없으나 40[%]의 돌연변이를 발생시킴으로서 이미 학습되어 최적치에 근접된 값을 오히려 더욱 멀어지게하는 현상에 대해 기준모델을 이용하는 제안 알고리즘이 PID 제어기의 매개변수를 효과적으로 적용시킨 결과로 해석할 수 있다.

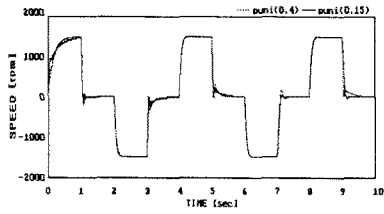
그림 4(a)(b)는 돌연변이율이 [0.15 0.4], 개체수가 10인 조건하에서 기준속도 입력을 -1500~500, 500~-1000, -1000~1500, 1500~0 [rpm]의 형태로 회전방향 및 속도를 빈번하게 변화시켰을 경우의 PID 유전제어기의 출력응답 및 오차변화를 나타낸 것이다. 초기 응답은 t=1[sec]에서 40[ms]의 상승시간과 12[%](약 240 rpm)의 오버슈트를 나타내었으며 오차는 지속적으로 유지되었다. 또한, 돌연변이율 0.4인 경우가 0.15인 경우보다 더 빠른 적응성능을 보였다.

그림 5(a)(b)는 제한한 제어기의 출력응답으로서 t=1[sec]의 초기 상승구간에서는 지연현상이 나타났으나 t=2[sec] 이후의 변속점부터는 기준모델을 추종하여 오차가 현저히 감소되었음을 알 수 있다. 그림 6(a)는 돌연변이율이 0.4이고 개체수가 [10 50]인 조건하에서 정·역회전 방향변화에 대한 PID 유전제어기의 출력응답을 나타낸 것이다. 개체수가 적은 10의 경우가 개체수가 많은 50보다 상승시간이 약 25[ms]정도 지연된 것으로 나타났으나 오버슈트는 개체수가 많은 경우가 적은 경우보다 10[%](약 150rpm) 더 크게 발생되었다. 반면에 그림 6(b)는 제안 알고리즘의 출력응답으로 초기상승에서는 지연현상이 나타났으나 t=2[sec]이후의 회전방향 변속점부터는 기준모델을 거의 추종하였다.

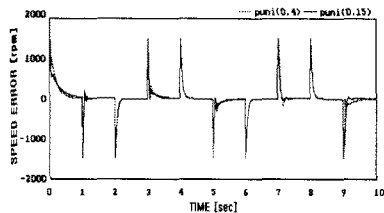
4. 실험

4.1 실험장치 및 방법

실험을 위하여 제작한 디지털 토크 서보시스템은 HITACHI의 고성능 마이크로 프로세서인 H8/532를 적용한 시스템으로,

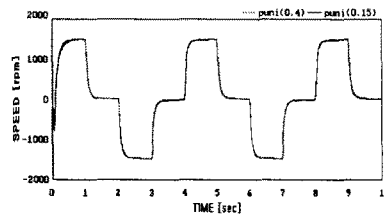


(a) 속도

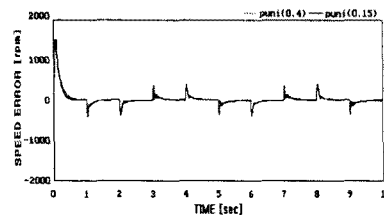


(b) 오차

그림 2. 회전방향 변화에 대한 PID 유전제어기의 시뮬레이션
Fig 2. Simulation results of PID genetic controller for the changes of the revolving direction

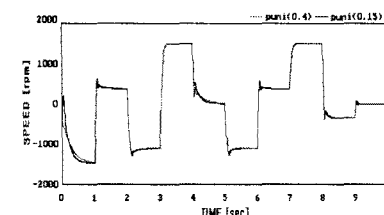


(a) 속도

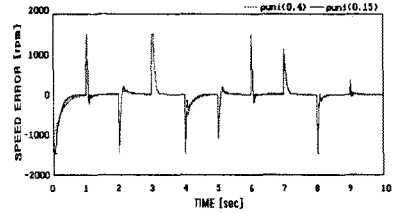


(b) 오차

그림 3. 회전방향 변화에 대한 모델기준 PID 유전제어기의 시뮬레이션 결과
Fig 3. Simulation results of model reference PID genetic controller for the changes of the revolving direction

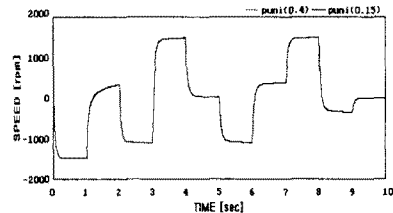


(a) 속도

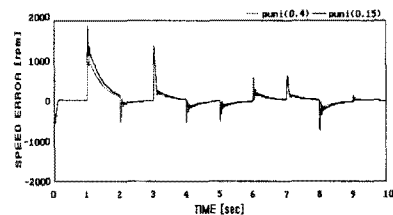


(b) 오차

그림 4. 속도변화에 대한 PID 유전제어기의 시뮬레이션 결과
Fig 4. Simulation results of PID genetic controller for the changes of the speed

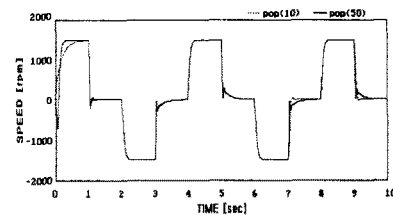


(a) 속도

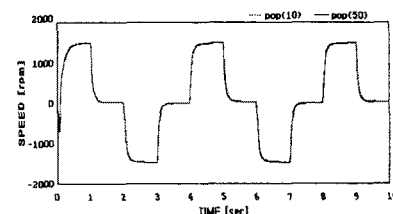


(b) 오차

그림 5. 속도변화에 대한 모델기준 PID 유전제어기의 시뮬레이션 결과
Fig 5. Response of model reference PID genetic controller for the changes of the speed



(a) PID 유전제어기



(b) 모델기준 PID 유전제어기

그림 6. 회전방향 변화에 대한 시뮬레이션 결과
Fig 6. Simulation results for the changes of the revolving direction

PWM주파수는 6.7[kHz]이며, PWM 펄스폭 조정에 따라 전동기에 가해지는 전류를 조절하여 전동기의 회전을 제어하는 방식이다. 실험에서 사용한 전동기는 출력 200W(LG, FMD-E20EA)이며, 속도 및 위치 측정은 1000[펄스/회전]의 분해능을 갖는 엔코더(LG기전, TRD-J1000-RZ)를 사용하였다.

실험을 하기 전에 PID 매개변수의 최대, 최소치를 구하는 간단한 실험을 시행착오법으로 수행한 결과 PID 유전제어기의 PD 계수는 최대치 5 이상일 경우 탈조하거나 제어불능 상태가 되는 결과를 나타내었다. 따라서 PD 계수의 제약조건은

[0 5] 로 선정하였다. 반면에 제안한 알고리즘은 0과 10 사이에서도 정상적인 제어가 가능하여 PD 계수의 제약조건을 [0 10]으로 선정하여 실험을 수행하였다. 또한, 돌연변이율 및 개체수는 시뮬레이션에서 가장 양호한 결과를 나타낸 0.15와 10개로 선정하였으며 샘플링시간은 알고리즘의 연산시간 및 실시간 처리를 고려해서 5[ms]로 선정하여 실험을 수행하였다.

4.2 결과

그림 7(a)는 정·역회전 방향 변화시 PID유전제어기의 출력응답을 나타내고 있으며 대부분의 회전방향 변화점에서 평균 50[rpm] 정도의 작은 오버슈트 및 오차로 양호한 제어결과를 나타내었다. 그러나 실험에 사용된 서보전동기 시스템의 정·역회전 특성이 증폭기의 문제로 서로 상이하여 t=2~3[sec], t=6~7[sec] 구간에서 기준속도에 미치지 못하였고 심한 오실레이션이 발생하였다. 이 결과는 그림 7(b)의 지령전류치가 심하게 변화하고 그 크기도 상당히 다르다는 것에서도 알 수 있다. 그림 7(c)는 50세대까지의 적합도 변화과정을 나타내고 있다. 평균적합도는 77.5[%]로 82세대에서 달성되었으며, 정상상태에서의 미세한 오실레이션은 불균등 돌연변이로 인하여 최적값에서 미세조정이 이루어지는 것을 나타낸다. 그림 8(a)는 제안한 제어기의 출력응답을 나타내고 있으며 전 구간에서 지연 및 오버슈트 없이 기준모형을 양호하게 추종하였다. 이것은 제안한 제어기의 구조적 특성상 PID 매개변수 동조과정 중에서 처리하는 자료의 크기가 기준모형과 전동기 출력의 오차와 같이 항상 작은 값들을 사용하므로 기준입력 변화가 크거나 외란 투입시에도 PID 매개변수 수정 정도가 크지 않아 학습 안정성이 개선되었기 때문이라고 생각된다. 그림 8(b)는 지령 전류치를 나타내고 있으며, 전동기 정·역회전 특성이 상이한 동특성 변화에서도 신속히 동조하여 기준모형을 추종하였음을 알 수 있다. 이러한 관점에서 볼때 동조속도 및 적응성능면에서 제안한 제어기가 기존의 제어기보다 우수함을 알 수 있다. 그림 8(c)는 제안한 제어기의 적합도 변화과정을 나타낸다. 적합도가 77.7[%]까지 도달하는데 53세대에서 달성되었고, 평균적합도 93.2[%]까지의 도달은 114 세대였다. 따라서, 최적치 도출속도의 경우도 기존 제어기보다 우수한 것으로 나타났다.

5. 결 론

PID유전제어기 설계시 전체 제어시스템에 요구되는 제어성능을 구체적으로 명시하여 반영할 수 없는 단점과 기준입력이 크게 변화할 경우 전혀 다른시스템으로 인식하여 새로운 탐색을 수행하는 적응성능면에서의 단점을 극복하기 위해 모델기준 PID유전제어기를 제안하였다. 제안한 제어기의 설계측면에 대한 타당성 및 적응제어 성능을 평가하기 위해 직류 서보전동기에 대한 다양한 실험으로 얻은 결과는 다음과 같다.

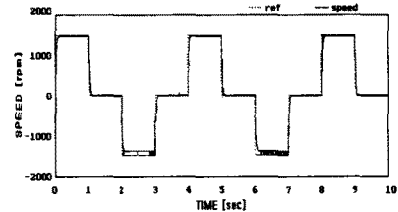
- (1) 기준모형을 도입함으로써 전체 제어시스템에 요구되는 제어성능을 구체적으로 명시하여 제어에 반영할 수 있었으며 기준모형과 같은 특성을 갖는 PID 제어기 설계가 가능하였다.
- (2) 기준입력이 급격하게 변화하는 경우 PID 유전제어기는 새로운 탐색을 수행하는 반면에 제안한 제어기는 매개변수 동조과정에서 처리하는 자료의 크기가 기준모형과 전동기 출력의 오차, 오차변화와 같은 작은 값들을 사용하므로 학습 안정성이 개선되었다.
- (3) 정·역회전 특성이 상이한 동특성 변화 실험에서 PID 유전제어기는 기준속도에 미달되고 오실레이션이 발생된 반면, 제안한 제어기는 오차크기는 감소하고 신속히 기준모형을 추종하여 전체적인 적응제어 성능이 개선되었다.

[참 고 문 헌]

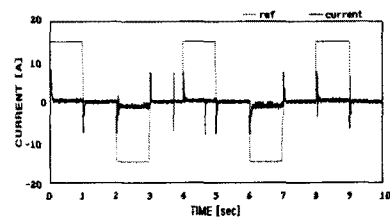
[1] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms In Search, Optimization and Machine-Learning", Addison Wesley, pp.29~45, 1989.
 [2] Zbigniew Michalewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures

= Evaluation programs", Springer Verlag, pp.21~54, 1995.

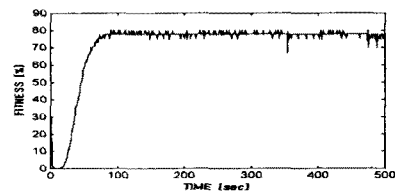
[3] K. A. Dejong, "Genetic Algorithms : A 10-year perspective", Proc. of the 1st int. Conf. on Genetic Algorithms, pp.24~26, Pittsburgh, PA, July, 1985.
 [4] L. Davis, "Genetic Algorithms and Simulated Annealing", PITMAN, London, pp.157~172, 1985
 [5] K. C. Ng and Li, Y., "Design of Sophisticated Fuzzy Logic Controller Using Genetic Algorithms", Proc. 3rd IEEE Int. conf. on Fuzzy Systems, Vol.3, pp.1708~1712, Orlando, FL, 1994.
 [6] C. Buiu, and I. Dumitrache, "Genetic Algorithms in Intelligent Control Systems Design", Preprints of the 2nd IFAC Symposium, SICICA' 94, pp.188~193, Budapest, Hungary, June, 1994.



(a) 속도

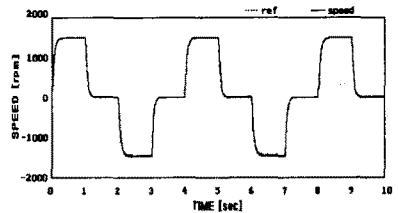


(b) 지령전류

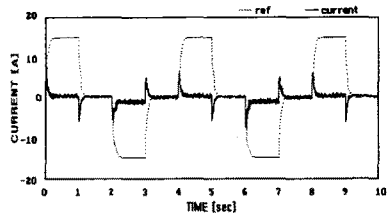


(c) 적합도

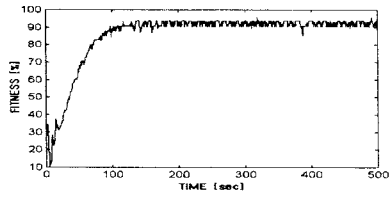
그림 7. 회전방향 및 속도변환시 PID 유전제어기의 실험결과
 Fig 7. Experimental results of PID genetic controller for the changes of the revolving direction and speed



(a) 속도



(b) 지령전류



(c) 적합도

그림 8. 회전방향 및 속도변화시 모델기준 PID 유전제어기의 실험결과

Fig 8. Experimental results of model reference PID genetic controller for the changes of the revolving direction and speed