

# 2자유도 보상법에 의한 직류서보전동기의 강인한 속도제어시스템 구현

論 文

52P-2-5

## Implementation of the robust speed control system for DC servo motor using TDF compensator method

金 炯 完\*

(Dong-Wan Kim)

**Abstract** - In this paper, a robust two-degree-of-freedom(TDF) the speed control system using  $H_{\infty}$  optimization method and real genetic algorithm is proposed for the robust stability and the robust performance in dc servo motor system. This control system composed of feedback and feedforward controller. The feedback(FB) controller with  $H_{\infty}$  optimization method is designed for real genetic algorithm that is model matching problem using mixed sensitivity function. The feedforward(FF) controller with  $H_{\infty}$  optimization method is minimized the error between transfer function of the optimal model and the overall transfer function. The proposed robust two-degree-of-freedom speed control system is simulated to the dc servo motor. By the simulation, feedback controller can obtain the robust stability property and feedforward controller can obtain the robust performance property under modelling error. The performance of the dc servo motor is analyzed by the experiment setting. The validity of the proposed method is verified through being compared with pid(proportional integrated differential)control system design method for the dc servo motor.

**Key Words** : TDF(two-degree-of-freedom), RGA(real genetic algorithm), robust stability, optimization, modelling error

### 1. 서 론

최근에는 제어대상의 파라미터 변동, 모델링 오차 등으로 인해 시스템이 불확실함에도 불구하고 실제로 강인한 안정성 및 성능을 보장하는 강인성 제어이론에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 강인성 제어이론의 연구는 플랜트의 파라미터 변동 등에 대한 감도함수의  $H_{\infty}$ 노움(norm)을 최소화하는  $H_{\infty}$ 최적화 문제를 1981년 Zames가 제기한 이래 많은 연구가 있었다[1].

Yaesh(1991) 등은 2자유도제어계의  $H_{\infty}$  최적화방법을 제시하였으나  $H_{\infty}$  노움의 계산과정이 복잡하고 강인한 성능이 보장되지 않은 면이 있었고[2], Chang(1992) 등은 강인한 제어계의 설계에 혼합감도함수에 대한  $H_{\infty}$ 최적화문제를 다루고 있으나 강인한 안정성은 보장되지만 기준신호에 대한 목표치특성인 강인한 성능은 좋지 않은 문제점이 있었다[3-6].

따라서, 강인한 안정성과 목표치특성을 동시에 만족시키는 2자유도 제어계(two-degree-of-freedom:TDF)의 설계가 요구된다. 또한, Dhaouadi(1993) 등은 압연기의 속도제어에 2자유도 제어시스템의 구조를 사용하고, LTR방법 및 극배치방법을 사용하여 피드백과 피드포워드 제어기로 안정성과 성능을 개선하였으나 설계 방법이 임의적인 관계로 시행착오적인 문제점을 가지고 있었다[7]. Sugie(1993) 등은 2자유

도 제어시스템의 구조를 이용한  $H_2/H_{\infty}$  부최적제어기의 설계방법을 제시하고 자기부상계(magnetic levitation system)에 적용하여 그 유용성을 보였으나 루우프형상방법을 사용하여 피드백제어기를 설계한 관계로 제어기의 구조가 불확실한 면이 있었다[8].

현재 산업현장에서 주로 사용되고 있는 직류서보모터의 제어방법은 PLC제어 또는 PID제어방법 등이 있으나 이러한 제어방법은 시스템의 노후, 내부의 전기적신호, 외부의 잡음, 마찰 및 부하의 비선형 특성을 고려한 실질적인 시스템에 대하여는 외부신호 및 비선형 특성에 민감하여 시스템의 오동작 및 정상적인 정밀제어를 할 수 없는 결점이 있다.

따라서 본 연구에서는 2자유도 보상방법을 사용하여 내부의 파라미터변화와 전기적신호 및 외부의 잡음에 대하여 강인한 안정성과 강인한 성능을 가지는 직류서보모터의 강인한 2자유도 속도제어시스템을 구현하고자한다. 이를 위한 제어방법으로 기존의 1자유도 제어방법인 PID, LQG/LTR,  $H_{\infty}$  최적화제어방법 등이 가지는 결점을 보완하기위해 2자유도 보상방법을 사용하여 강인한 안정성 및 강인한 성능을 동시에 달성 할 수 있는 제어기의 설계 파라미터 모델을 구하여 제어기의 구조를 명확히 한다. 다음 강인한 안정성을 위한 피드백제어기의 설계 파라미터는 혼합감도함수에 대한 모델정합문제의  $H_{\infty}$  노움을 이용하여 구한다. 목표치특성을 위한 피드포워드제어기의 설계 파라미터는 모델의 출력과 실제 제어계의 출력과의 오차에 대해  $H_2$  노움을 이용하여 구한다. 설계과정의 시행착오를 해결하기 위해 진화연산 중에서 해의 다양성과 수렴 속도면에서 우수한 특성을 갖는 실수형 유전알고리즘(RGA : real genetic algorithm)을 이용하여 설계 파라미터의 최적값을 결정함으로써 설계의 편의성

\* 正 會 員 : 東明大 電氣電子自動化情報系列 助教授 · 工博  
接受日字 : 2003年 2月 8日  
最終完了 : 2003年 3月 7日

과 최적화 및 강인한 안정성과 강인한 성능을 가지는 2자유도 속도제어시스템을 구성한다. 구성된 제어시스템의 H/W와 S/W를 구현하여 실험을 하고 1자유도의 PID제어방법과 비교하여 제시된 설계방법의 유용성을 검증한다.

## 2. 2자유도 속도 제어시스템의 구성

본 연구에서는 직류서보모터를 대상으로 기존의 1자유도 제어시스템이 가지고있는 문제점을 해결하기위해 2자유도 보상방법을 사용하고 기존의 시행착오법에 의한 설계 파라미터 선택의 문제점을 해결하기위해 실수형 유전알고리즘을 사용하여 강인한 2자유도 H<sub>∞</sub>속도제어시스템을 구현하고자 한다. 이를 위해 1) 2자유도 속도제어시스템의 구성, 2) 실수형 유전알고리즘을 이용한 2자유도 H<sub>∞</sub>제어기의 설계방법 개발, 3) 실수형 유전알고리즘을 조합한 프로그램화, 4) 구동 시스템 및 신호처리를 위한 H/W와 S/W의 구현, 5) 구현된 제어시스템의 성능 검토를 시행하고 기존의 1자유도 PID제어시스템과 비교 및 검토한다.

### 2.1 2자유도 제어시스템의 안정조건

피드백형 2자유도 제어시스템은 전달함수 분해법에 의하면 RH<sub>∞</sub>상의 좌·우기약분해는 다음과 같다[9].

$$P = \tilde{D}_p^{-1} \tilde{N}_p = N_p D_p^{-1} \quad (1)$$

$$C_1 = \tilde{D}_{c1}^{-1} \tilde{N}_{c1} = N_{c1} D_{c1}^{-1} \quad (2)$$

$$C_2 = \tilde{D}_{c2}^{-1} \tilde{N}_{c2} = N_{c2} D_{c2}^{-1} \quad (3)$$

여기서, P는 제어대상, C<sub>1</sub>은 피드백제어기, C<sub>2</sub>는 피드포워드제어기, N은 분모다항식, D는 분자다항식, 첨자1은 피드백제어기의 약분해, 첨자2는 피드포워드제어기의 약분해, RH<sub>∞</sub>은 Re s>0에서 극점이 없는 RL<sub>∞</sub>에 속하는 전달함수행렬, RL<sub>∞</sub>는 허수축상에 극점이 없는 실유리함수 행렬의 공간을 의미한다.

또한, Bezout방정식과 Δ는 다음으로 가정한다.

$$\begin{bmatrix} Y & X \\ -N_p & D_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_p & -\tilde{X} \\ N_p & Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\Delta = \tilde{D}_{c2} D_p + \tilde{N}_{c2} N_p : \text{unimodular 행렬} \quad (5)$$

여기서, X와 Y는 RH<sub>∞</sub>에 속하는 다항식행렬, I는 단위행렬이다. 2자유도 제어시스템이 well-posedness되어 있다면 안정조건은 다음과 같다[12].

$$\text{안정조건 : } i) \Delta^{-1} \in RH_{\infty} \quad (6)$$

$$ii) \Delta^{-1} \tilde{D}_{c2} C_1 \in RH_{\infty} \quad (7)$$

## 2.2 제어기의 파라미터 표현

### 2.2.1 피드백제어기 C<sub>2</sub>의 파라미터 표현

식(4)의 Bezout방정식과 식(5)에서 안정조건 식(6)을 만족하는 피드백제어기 C<sub>2</sub>는 다음과 같이 구할 수 있다[9].

$$C_2 = N_{c2} D_{c2}^{-1} = \tilde{D}_{c2}^{-1} \tilde{N}_{c2} = (Y - Q \tilde{N}_p)^{-1} (X + Q \tilde{D}_p) \quad (8)$$

단,  $Q \in RH_{\infty}, \det(Y - Q \tilde{N}_p) \neq 0$

### 2.2.2 피드포워드 제어기 C<sub>1</sub>의 파라미터 표현

안정조건 식(7)로 부터 식(9)와 같이 정하면 P가 proper인 경우는 다음과 같다.

$$\Delta^{-1} \tilde{D}_{c2} C_1 = K, \quad K \in RH_{\infty} \quad (9)$$

식(5)와 식(8)로부터 C<sub>1</sub>은 다음과 같이 된다[9].

$$C_1 = \tilde{D}_{c2}^{-1} \Delta K = (Y - Q \tilde{N}_p)^{-1} K \quad (10)$$

제어대상의 변동이 없는 공칭치 제어대상에 대한 r→y의 전달함수 G<sub>yr</sub>는 식(1), 식(8), 식(10)로 부터 다음과 같이 구한다[9].

$$G_{yr} = N_p K \quad (11)$$

따라서, 강인한 안정성은 식(8)로 부터 피드백제어기의 파라미터 Q에 의해 결정되고, 목표치특성과 같은 강인한 성능은 식(10)과 식(11)로 부터 피드포워드제어기의 파라미터 K에 의해 결정됨을 알 수 있고, 피드백 및 피드포워드제어기를 독립적으로 설계 할 수 있다.

## 3. 강인한 2자유도 제어시스템의 설계

### 3.1 RGA에 의한 H<sub>∞</sub>피드백제어기 C<sub>2</sub>의 설계

강인한 안정성을 만족하는 피드백제어기 C<sub>2</sub>는 혼합감도함수로 모델정합 할 수 있는 H<sub>∞</sub>최적화방법을 사용하고 하중함수(weighting function)의 결정은 실수형 유전 알고리즘을 사용하여 설계파라미터 Q를 구하고 이것을 식(8)에 적용하여 구한다. 대부분의 1자유도 피드백시스템의 제어문제는 그림 1과 같이 기준 H<sub>∞</sub> 최적화문제에 공식화 할 수 있으며, 설계 목적에 따라 결정되는 하중함수와 오차 등을 포함하는 일반화된 플랜트 G는 [w u]<sup>T</sup>에서 [z y]<sup>T</sup>로 변환하는 전달함수로 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ \cdots & \ddots & \cdots \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기서, G<sub>11</sub> ∈ R<sup>p1×m1</sup>, G<sub>12</sub> ∈ R<sup>p1×m2</sup>, G<sub>21</sub> ∈ R<sup>p2×m1</sup>, G<sub>22</sub> ∈ R<sup>p2×m2</sup>

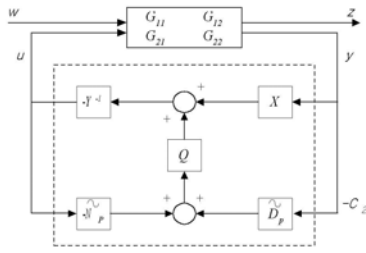


그림 1 Q파라미터에 의한 기준문제의 블록선도  
 Fig. 1 Block diagram of standard problem by Q-parameterization

이고  $R^{p \times q}$ 는 실계수를 가진  $p \times q$  proper유리함수의 집합이다. 제어입력  $u$ 와 제어기의 출력  $y$ 와의 관계는 다음과 같다.

$$u = -C_2 y \quad (13)$$

제어될 신호  $z$ 와 외란, 명령신호 등으로 구성된  $w$ 와의 관계를 구하면 다음과 같이 기준문제와 모델정합문제로 된다.

$$z = \{G_{11} - G_{12} C_2 [I + G_{22} C_2]^{-1} G_{21}\} w$$

$$= \text{minimize} \| F(G, C_2) \|_\infty \quad (14)$$

$$z = \{T_{11} + T_{12} Q T_{21}\} w = \text{minimize} \| F(T, Q) \|_\infty$$

$$= \left\| \begin{bmatrix} w_1 S(s) \\ w_2 T(s) \end{bmatrix} \right\|_\infty \quad (15)$$

$$\text{단, } T_{11} = \begin{bmatrix} w_1 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} w_1 P \\ -w_2 P \end{bmatrix} D_p X, \quad T_{12} = - \begin{bmatrix} w_1 P \\ -w_2 P \end{bmatrix} D_p$$

$$T_{21} = \tilde{D}_p$$

여기서,  $w_1$ 과  $w_2$ 는 감도함수  $S$ 와 상보감도함수  $T$ 에 대한 하중함수이다.

따라서, 식(14)에서 기준  $H_\infty$ 최적화문제는 페루우프제가 안정하고  $w$ 에서  $z$ 로의 페루우프 전달함수를 최소화하는 proper제어기  $C_2$ 를 찾는 문제이고, 식(15)에서 모델정합문제는  $Q$ 를 찾는 문제이다. 설계파라미터  $Q$ 를 결정하는 과정에서 사용되는 하중함수  $w_1$ 과  $w_2$ 의 결정에 실수형 유전알고리즘을 사용하여 최적의 설계파라미터  $Q$ 를 자동으로 튜닝하여 결정한다.

### 3.2 RGA에 의한 $H_\infty$ 피드포워드제어기 $C_1$ 의 설계

피드포워드제어기  $C_1$ 은 모델링 오차 등의 존재시에도 전체 제어계의 강인한 안정성을 유지하면서 기준신호에 대한 최적의 추종성능을 갖을 수 있는 강인한 성능에 달성하도록 설계되어야 한다.

기준입력  $r$ 에서 출력  $y$ 로의 전달함수  $G_{yr}$ 을 모델링

오차가 존재하는 경우 단위행렬  $I$ 로 근사화하는 것은 식(16)의 주파수영역에서 식(17)가 성립하는 경우이다.

$$0 \leq w \leq w_{sl} \quad (16)$$

$$\| S(jw) l(jw) \| \leq \epsilon \quad (17)$$

여기서,  $l(jw)$ 는 모델링 오차이다.

따라서,  $G_{yr}$ 이 식 (16)의 범위에서 최적의 모델  $G_{opt}$ 에 대해 식(18)과 같이 노음을 최소화 하고  $w \geq w_{sl}$ 에서 충분히 감쇄하는 피드포워드제어기  $C_1$ 을 설계해야 한다.

$$\text{minimize} \| G_{opt} - G_{yr} \|_2 \quad (18)$$

또한,  $C_1$ 에 대한 가격함수(cost function)는 식(17)과 식(18)로 부터 다음과 같이 선택할 수 있다.

$$J = \left\| \begin{bmatrix} W_{yr} [G_{opt} - G_{yr}] \\ \rho G_{ur} \end{bmatrix} \right\|_2 < \gamma \quad (19)$$

여기서,  $\rho$ 는 강인한 안정성과 성능의 상대적 중요성을 고려하는 하중 상수,  $G_{yr}$ 은  $r \rightarrow y$ ,  $G_{ur}$ 은  $r \rightarrow u$ 의 전달함수행렬이다.

식(19)의 평가함수  $J$ 를 최소화 하는 파라미터  $K$ 를 구하기 위해  $P$ 의 좌우기약분해 및 식(11)을 이용하면 식(19)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$J = \left\| \begin{bmatrix} w_{yr} [G_{opt} - N_p K] \\ \rho D_p K \end{bmatrix} \right\|_2 \quad (20)$$

식(20)을 일반화된 플랜트로 구성되는 기준  $H_\infty$ 문제로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \dots \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{yr} G_{opt} & \vdots & -w_{yr} N_p \\ 0 & \vdots & \rho D_p \\ \dots & \dots & \dots \\ I & \vdots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} \quad (21)$$

식(21)는 그림 2와 같이 블록선도로 표현할 수 있으며 다음과 같다.

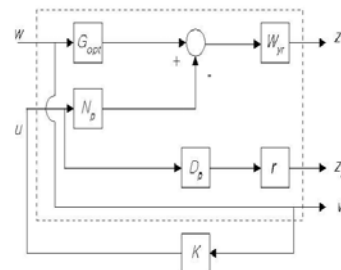


그림 2 파라미터 K를 구하는 블록선도  
 Fig. 2 Block diagram to find parameter K

$$u = Ky \tag{22}$$

식(20)을 최소로 하는 최적의 설계 파라미터  $K_{opt}$ 와 설계 파라미터  $Q$ 를 이용하여 피드포워드제어기  $C_1$ 은 식(10)에 의하여 구해진다.

### 3.3 RGA에 의한 제어기 $C_1$ 과 $C_2$ 의 설계과정

본 논문에서는 다양한 외란 및 제어대상의 파라미터 변동에 대해서 최적의 강인한 안정성과 성능을 얻기 위해서 피드백 및 피드포워드제어기의 설계파라미터인  $Q$ 와  $K$ 의 결정에 사용되는 하중함수의 이득을 실수형 유전알고리즘을 이용하여 실시간으로 튜닝하고 구해진 제어시스템이 최적의 값이 되도록 반복학습법을 사용하였다. 그림 3은 실수형 유전알고리즘을 이용하여 2자유도 제어시스템의 제어기를 튜닝하는 구성도이다. 그림 3에서 피드백 및 피드포워드  $H_\infty$ 제어기의 입력으로는 오차를 사용하였고, 유전알고리즘의 입력으로는 오차의 절대치 합을 사용하였다.

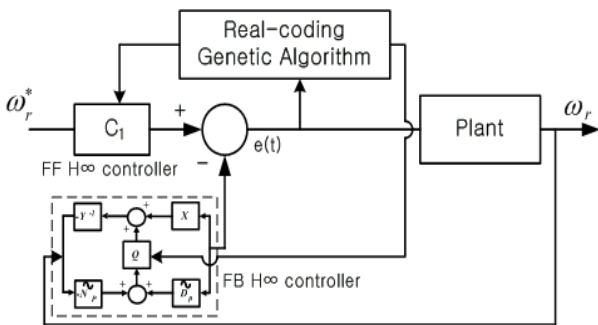


그림 3 실수형 유전알고리즘을 이용한  $H_\infty$  최적제어기의 튜닝을 위한 구성도  
**Fig. 3** Schematic diagram for  $H_\infty$  optimal controller tuning using RGA

실수형 유전알고리즘을 이용하여  $H_\infty$ 제어기의 이득을 튜닝하기 위한 해집단의 구조는 그림 4와 같다. 그림 4에서 실수형 유전알고리즘을 이용하여  $H_\infty$  최적제어기의 이득을 튜닝하는데 필요한 파라미터 수는 6개이고, 해집단의 각 스트링을 평가하기 위하여 사용된 적합도 함수는 식(23)과 같이 오차의 절대치 합을 사용하였다.

$$\text{적합도} = \frac{1}{1 + \int_{t=0}^T |\omega_r^*(t) - \omega_r(t)|} \tag{23}$$

여기서,  $\omega_r^*$  은 기준입력,  $\omega_r$ 는 제어대상의 출력,  $T$ 는 특정한 시간동안 획득한 데이터의 개수이다.

그림 4에서  $g_1, g_2, g_3$ 는 하중함수  $w_1$ 의 이득,  $g_4, g_5$ 는 하중함수  $w_2$ 의 이득,  $g_6$ 는 동특성 계수  $\gamma$ 의 이득,  $n$ 은 스트링 개수이다.

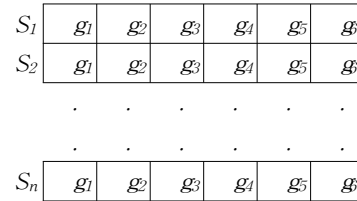


그림 4 해집단의 구조  
**Fig. 4** Construction of solution group

설계 과정은 표 1과 같고 그림 5는 유전알고리즘을 이용하여  $H_\infty$ 제어기를 설계하기 위한 전체적인 흐름도이다. 여기서,  $N$ 은 해집단의 크기,  $G$ 는 특정한 세대수를 의미한다.

표 1 RGA를 이용한 제어기 설계과정  
**Table 1** Design process of the controller using RGA

설계단계	과정
해집단 구성	하중함수 및 동특성계수의 이득에 대해 해집단 구성
평가	적합도함수를 이용하여 각 스트링을 평가
복제	룰렛휠 방법으로 복제
교배, 돌연변이	RGA의 연산자인 교배와 돌연변이로 손자의 생성
엘리티즘	적합도 가장높은 개체를 사용
수렴조건	특정 세대수까지 반복하고 평가한다.

본 논문의 사용 스트링수는 6, 세대수는 50세대, 교배확률은 0.7, 돌연변이 확률은 0.03이며 구해진 하중함수 및 동특성 계수의 이득 값은  $g_1$ 은 0.01,  $g_2$ 는 55.56,  $g_3$ 는 28.57,  $g_4$ 는 6.46,  $g_5$ 는 100,  $g_6$ 는 0.73이다.

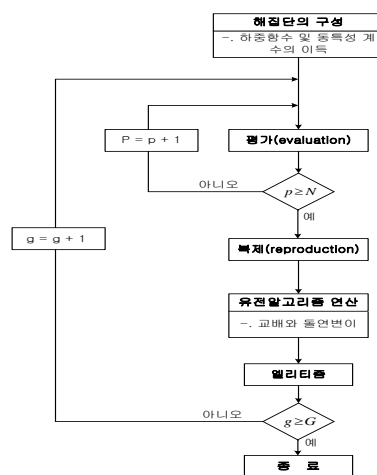


그림 5 실수형 유전알고리즘을 이용한  $H_\infty$ 제어기의 설계를 위한 흐름도  
**Fig. 5** Flow chart for design of the  $H_\infty$  controller using RGA

## 4. 실험 방법 및 결과

### 4.1 실험 방법

RGA를 이용한 2자유도 속도제어시스템의 유용성을 검증하기 위해 직류 서보모터의 속도제어를 위한 실험장치를 구성하였다. RGA를 이용한  $H_\infty$ 제어기 설계에 사용된 세대수는 50세대이고, 50세대 후 최적의  $H_\infty$ 제어기의 이득이 RGA에 의해서 구해진다. 전체 속도 제어 시스템은 전류 루프와 속도루프로 구성되어 있으며, 전류루프의 샘플링 시간은  $250[\mu\text{sec}]$ 이고, 속도루프의 샘플링 시간은  $4[\text{msec}]$ 이다.

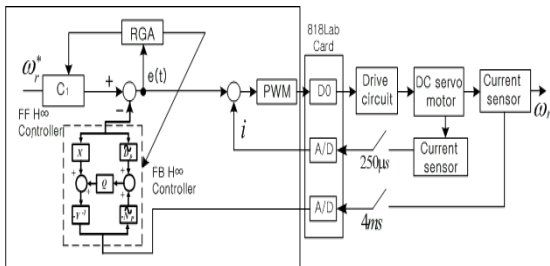


그림 6 직류 서보모터의 속도제어를 위한 실험장치  
Fig. 6 Experiment equipment for the speed control of DC servo motor

그림 6은 직류 서보모터의 속도제어를 위한 구성도이다. 그림 6에서 전류센서에 의해  $250[\mu\text{sec}]$ 로 측정된 전류값은 하드웨어 인터페이스 카드인 818Lab Card를 이용하여 A/D 변환을 거친 후 제어기의 출력과 비교된다. 이 전류값은 PWM제어기에 입력이 되고, PWM출력은 818Lab Card의 디지털 출력 port를 통해 구동회로로 들어간다. 구동회로는 이 신호를 이용하여 직류 서보모터를 제어한다. 속도루프에서는 엔코더를 이용하여  $4[\text{msec}]$ 로 서보모터의 속도를 측정하고 818Lab Card의 A/D변환을 거쳐 기준속도와 비교된 후,  $H_\infty$ 제어기의 입력신호로 사용된다.

실험에 사용된 전동기와 부하로 사용한 발전기의 사양은 표 2와 같다.

표 2 직류서보모터 및 발전기의 사양

Table 2 The specification of the DC servo motor and generator

분류	직류서보모터	발전기
정격 전압	75V	90V
정격 회전수	3000 rpm	3000rpm
정격 출력	200W	150W
정격 전류	3.3A	2A

그림 7은 직류 서보모터의 실험장치이다. 그림 7의 직류 서보모터 속도제어를 위한 전체 시스템은 PC 586 350MHz에서 구성된  $H_\infty$ 제어기, PWM전류제어기 및 구동회로로 구성된다.  $H_\infty$ 제어기와 PWM전류제어기는 C언어를 이용하여

구성하였고 속도 신호와 제어 신호를 PC와 인터페이스 하기 위해서 818 Lab Card를 사용하였다.

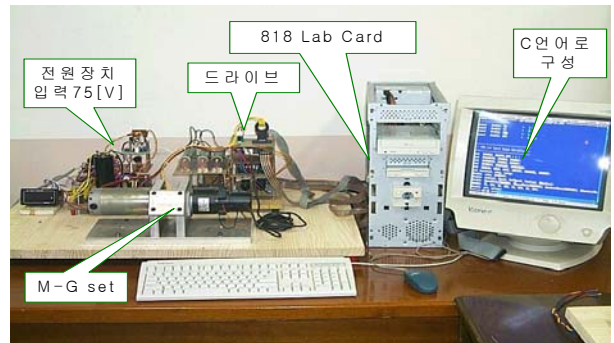


그림 7 직류 서보모터의 실험장치

Fig. 7 Experiment equipment for the DC servo motor

### 4.2 실험 결과

실험장치를 이용한 RGA- $H_\infty$ 제어기의 성능을 비교하기 위해 사용된 실험조건은 표 3과 같다.  $H_\infty$ 제어기의 설계에 사용된 조건은 실수형 유전알고리즘으로  $H_\infty$ 제어기의 튜닝에 사용된 조건은 표 3의 경우 1에서 기준속도가  $1200[\text{rpm}]$ 일 때를 이용하였다.

표 3 제어기 성능평가에 사용된 실험 조건

Table 3 The experimental condition for performance of the controller

실험 사례	동작조건	외란(부하 변화)	실험 시간
경우1 (일정부하)	400 [rpm]	100[W]	2 [sec]
	800 [rpm]	100[W]	2 [sec]
	1200 [rpm]	100[W]	2 [sec]
경우2 (부하변화) 1초 후	400 [rpm]	100[W]→200[W]	2 [sec]
	800 [rpm]	100[W]→200[W]	2 [sec]
	1200 [rpm]	100[W]→200[W]	2 [sec]

그림 8은 기준속도가  $400[\text{rpm}]$ ,  $800[\text{rpm}]$ ,  $1200[\text{rpm}]$ 일 때의 속도응답 특성을 나타내었다. 그림 8에서 RGA를 이용한 2자유도 속도제어시스템이 기존의 PI제어기보다 상승시간과 정정시간에 우수함을 알 수 있다. 제안한 방법의 강인성을 평가하기 위하여  $H_\infty$ 제어기의 설계에 사용되지 않은 기준속도 및 부하변화에 대해서 기존의 PI제어기와 제어 성능을 비교하였다.

그림 9는 속도가  $400[\text{rpm}]$ ,  $800[\text{rpm}]$ ,  $1200[\text{rpm}]$ 이고, 1초 후에 부하가 변화했을 때 속도응답 특성으로 제안한 2자유도 제어시스템은 기존의 PI제어기보다 미소한 성능향상을 보였다.

그림 10은 속도가  $800[\text{rpm}]$ 일때의 정역회전에 대한 결과이다. 제안한 2자유도 제어시스템은 기존의 PI제어기보다 우수한 성능을 보였다.

표 4는 이상의 결과를 요약한 것으로 경우1은 일정부하에 대해서 기준속도가  $400[\text{rpm}]$ 에서  $1200[\text{rpm}]$ 까지 변화했을

때 정정시간과 오버슈트를, 경우2는 1초 후에 부하가 증가했을 때의 기준속도에 대한 정정시간과 언더슈트를 비교한 것이다. 표 4에서 경우1은 제안한 2자유도 제어시스템이 기존의 PI제어기보다 정정시간에서는 0.05[sec]~0.14[sec] (25%~54%) 정도 더 빨리 정상상태에 도달하였고, 최대오버슈트에서는 4[%]~8[%] 정도 더 적었다. 경우 2에 대해서는 제안한 2자유도 제어시스템은 기존의 PI제어기와 정정시간과 언더슈트에 대해서 미소한 효과를 보인다.

표 4 기존의 PI제어기와 제안한 2자유도 제어시스템의 제어 성능 비교

Table 4 Controller performance comparison of PI conventional controller and proposed TDF control system

기준속도	방법	정정시간[sec]		오버 및 언더슈트[%]	
		TDF	PI	TDF	PI
경우1 (일정 부하)	400[rpm]	0.15	0.20	13.75	17.75
	800[rpm]	0.14	0.28	3.88	11.88
	1200[rpm]	0.12	0.26	1.67	8.58
경우2 (부하 증가)	400[rpm]	1.20	1.24	11.00	13.00
	800[rpm]	1.24	1.34	10.38	13.38
	1200[rpm]	1.28	1.34	10.33	12.17

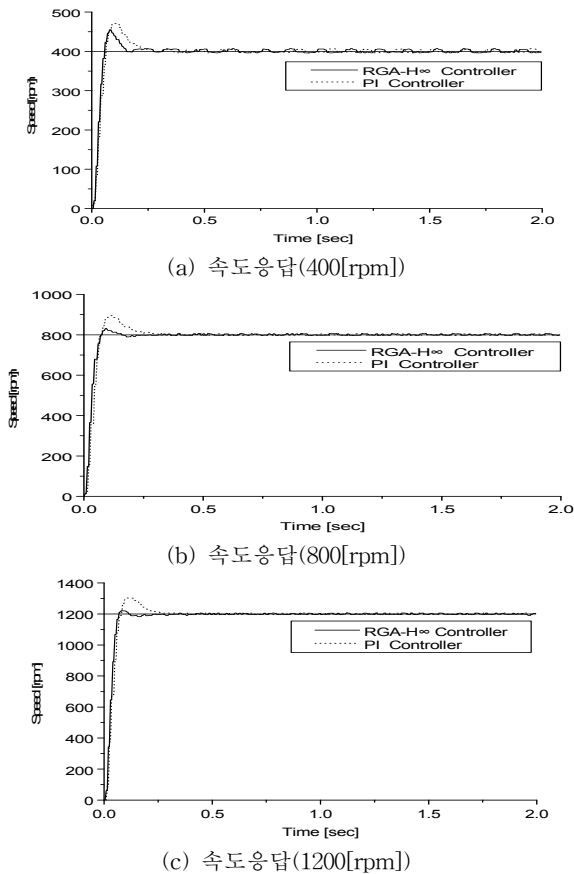
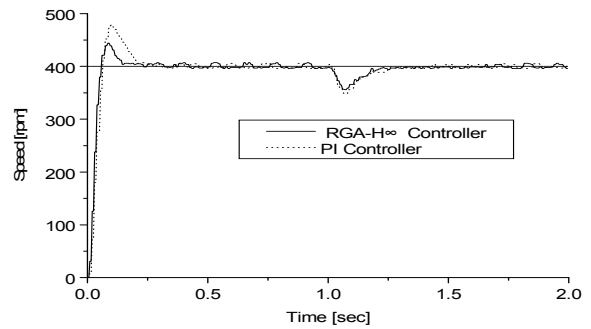
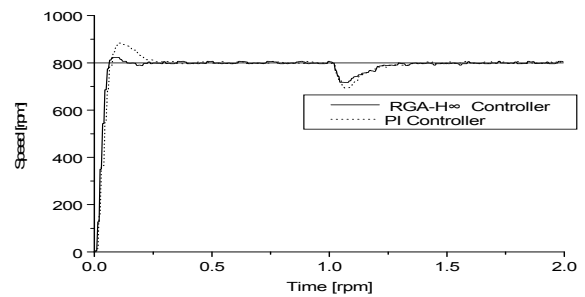


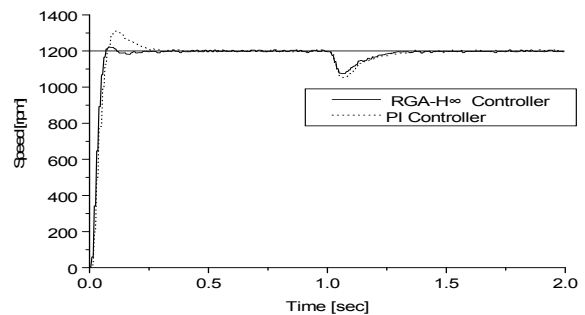
그림 8 직류서보모터의 속도응답(기준속도가 400[rpm], 800[rpm], 1200[rpm])  
 Fig. 8 The speed response of the DC servo motor (at 400[rpm], 800[rpm], 1200[rpm] reference speed)



(a) 속도응답(400[rpm])



(b) 속도응답(800[rpm])



(c) 속도응답(1200[rpm])

그림 9 부하가 변화했을 때의 직류 서보모터의 속도응답 (기준속도가 400[rpm], 800[rpm], 1200[rpm])

Fig. 9 The speed response of the DC servo motor for load perturbation (at 400[rpm], 800[rpm], 1200[rpm] reference speed)

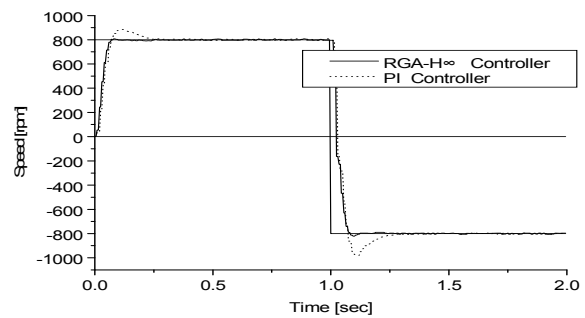


그림 10 직류서보모터의 정역속도응답(기준속도가 800[rpm])

Fig. 10 The constant-reverse speed response of the DC servo motor (at 800[rpm] reference speed)

### 5. 결 론

본 논문에서는 기존의 1자유도  $H_\infty$  최적화방법이 강인한 안정성과 강인한 성능을 동시에 만족할 수 없는 결점과 시행착오방법으로 하중함수를 결정함으로써 설계과정이 복잡하고 최적의 값을 선택할 수 없는 결점을 보완한 것이다. 이를 위해 2자유도 보상방법과 실수형 유전알고리즘을 사용하여 강인한 안정성과 성능을 동시에 만족하면서 자동으로 하중함수를 결정할 수 있는 기법을 연구한 것으로 제안한 방법의 유용성을 확인하기 위해서 직류서보모터를 대상으로 실험을 행하였다.

제어기의 설계파라미터의 결정을 자동으로 하기 위해서는 기존의 진화연산 중에서 해의 다양성과 수렴속도면에서 좋은 성능을 나타내는 실수형 유전알고리즘을 이용하여 2자유도 속도제어시스템을 설계하였다. RGA(실수형 유전알고리즘)를 이용한  $H_\infty$  제어기로 구성된 2자유도 속도 제어시스템의 유용성을 평가하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 직류 서보모터의 실험장치를 제작하여 실험을 수행하였으며, 본 논문에서 제안한 RGA를 이용한  $H_\infty$  제어기로 구성된 2자유도 속도제어시스템의 성능을 검증하기 위해서 시행착오방법으로 설계된 PI제어기와 비교·검토하였다.

직류서보모터의 실험결과, 일정부하에 대해서 기준속도가 400[rpm]에서 1200[rpm]까지 변화했을 때 제안한 시스템이 기존의 PI제어기보다 정정시간에서는 0.05[sec]~0.14[sec] (25%~54%) 정도 더 빨리 정상상태에 도달하였고, 최대오버슈트에서는 4[%]~8[%] 정도 더 적었다. 1초 후에 부하변화가 발생하였을 때 제안한 시스템은 기존의 PI제어기보다 정정시간과 언더슈트에 대해서 미소한 성능향상을 보였다.

이러한 결과는 직류서보모터라는 제어대상이 단순하여 나타난 결과이며 제어대상의 입력과 출력사이에 심한 커플링(coupling)이 존재하는 다변수시스템 및 비선형성이 높은 경우는 강인한 안정성과 성능의 관점에서 제안한 방법은 기존의 PI제어기보다 그 효과가 상당히 우수하리라 사료된다. 따라서, 향후 다변수 및 비선형성이 높은 제어대상을 대상으로 제안한 방법의 유효성을 검증하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 2000년도 동명대학 학술연구지원조성비에 의하여 이루어진 연구로서, 관계기관에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

[1] G. Zames, "Feedback and optimal sensitivity: Model reference transformation, multiplicative seminorms and approximate inverses", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-26, pp. 301-320, April 1981.

[2] I. Yaesh and U. Shaked, "Two-degree-of-freedom  $H_\infty$  optimization of multivariable feedback systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 36, no. 11, November 1991.

[3] X. P. Li, B. C. Chang, S. S. Banda, and H. H. Yeh, "Robust control systems design using  $H_\infty$  optimization theory", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 15, no. 4, July-August 1992.

[4] 김동완, 황기현, 신동률, "하중함수의 오토튜닝에 의한 강인한  $H_\infty$  속도제어기의 구현", 대한전기학회논문지, 제 50P권, 1호, pp. 27-34, 2001. 3.

[5] 황현준, 김동완, 박준호, 황창선, "유전 알고리즘을 이용한 모델추종형 최적 다변수 보일러-터빈  $H_\infty$  제어시스템의 설계", 대한전기학회논문지, 제48권, 2호, pp. 127-135, 1999. 2.

[6] 김동완, 황현준, "강인한 성능을 가지는 최적 PD제어시스템의 설계에 관한 연구", 제어·자동화·시스템공학 회논문지, 제5권, 6호, pp. 656-666, 1999. 8.

[7] R. Dhaouadi, K. Kubo, and M. Tobise, "Two-degree-of-freedom robust speed controller for high performance rolling mill drives", *IEEE Trans. on Industry application*, vol. 29, no. 5, September/October 1993.

[8] T. Sugie and Y. Tanai, " $H_2/H_\infty$  suboptimal controller design-Design example of a magnetic levitation system", *Proc. of int. workshop on robust control*, pp. 1-6, 1993.

[9] T. Sugie, T. Yoshikawa, "General solution of robust tracking problem in TDF control systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. AC-31, pp. 552-554, June 1986.

### 저 자 소 개



김 동 완 (金焯完)

1960년 2월 1일생. 1984년 동아대 전기공학과 졸업. 1987년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 보강하이텍 기술고문, 건축전기설비기술사, 동명대학 전기·전자자동화정보계열 조교수.

Tel : 051-620-3416

Fax : 051-620-3415

E-mail : dongwan@yongma.tmc.ac.kr