

직류 서보 전동기 제어를 위한 퍼지-슬라이딩 관측기 설계

論 文

53D-5-5

Design of a Fuzzy-Sliding Observer for Control of DC Servo Motor

高 奉 云* · 金 洛 教**

(Bong Woon Ko · Lark kyo Kim)

Abstract - This paper presents a sensorless speed control of a DC servo motor using a fuzzy-sliding observer in the presences of load disturbances. A fuzzy-sliding observer is proposed in order to estimate the speed of a motor rotor. First, a sliding observer is used to estimate the derivative of the armature current directly using the armature current mesured in the DC servo motor. Second, the optimal gain of the Luenberger observer is set up using the fuzzy control. Experimental results show the good performance in the DC servo motor system with the proposed fuzzy-sliding observer.

Key Words : fuzzy-sliding observer, Luenberger observer, Sensorless speed control, DC Servo motor

1. 서 론

전동기 센서리스 운전에 대한 초기의 연구에서는 전동기의 전압과 전류를 측정하여 전동기 모델로부터 속도를 연산하는 방식을 취해왔으나, 근래에는 현대제어 이론 중 관측기 이론을 적용하여 속도 추정 및 센서리스 운전을 위한 다양한 연구가 시도되고 있다[1][2]. 센서리스 운전을 위해 센서를 대체할 관측기는 제어대상의 수학적 모델을 대상으로 하여 설계되므로 실제 제어시스템에 존재하는 다양한 비선형성과 불확실성이 고려되지 않거나 제어대상에 대한 모델링 오차가 존재할 경우에 정확하게 시스템의 상태를 추정할 수 없게 되고 본래 시스템 상태 값과의 오차가 필연적으로 발생한다[3][4].

센서리스 운전을 위한 대표적인 관측기로는 Luenberger 관측기와 슬라이딩 관측기를 고려할 수 있다. Luenberger 관측기는 1964년 D. G. Luenberger에 의해 제안된 이후에 많은 연구가 진행되고 있으며 상태를 관측하기 위해 시스템의 동특성이나 내부파라미터를 알아야 한다는 문제 및 관측기 이득에 따라 시스템의 특성이 달라지는 문제점을 가지고 있다. 이러한 Luenberger 관측기의 문제점을 해결하기 위해서는 불확실한 시스템 동특성에 대해 강인한 구조를 갖는 관측기를 설계하거나, 별도의 파라미터 적응규칙이 필요하게 된다[5][6][7]. 슬라이딩 제어이론을 이용한 슬라이딩 관측기는 제어이론 특성상 시스템의 매개변수 변동 및 측정 잡음 등에 강인하고, 구현이 용이하기 때문에 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가진다. 그러나 시스템 동특성에 대한 정보를 필요로 하는 단점이 있다[8][9]. 이러한 여러 관측기들의 문제점을 극복하기 위하여 현재 지능형 제어기법이 다양하게 도입되고 있으며, 그 중 대표

적인 방식이 퍼지제어 기법이다[10][11].

따라서 본 논문에서는 적응 제어 기법 중 퍼지 제어 기법을 이용하여 관측기의 이득 값을 적절히 선정하였으며, 기존의 방식에 비해 과도특성이 우수하고 구현이 용이한 퍼지 슬라이딩 관측기를 설계하였다. 또한, 본 논문에서 설계한 퍼지 슬라이딩 관측기를 이용하여 직류 서보 전동기에서 측정된 전기자 전류 값으로 전기자 전류의 도함수를 직접 추정한다. 또 이 추정 값으로 회전자의 속도를 추정하고 추정된 속도를 이용하여 속도제어를 수행하는 새로운 방식의 속도 센서 리스 제어 방식을 제안하였다.

본 논문에서 설계한 퍼지 슬라이딩 관측기의 속도추정 성능을 검증하기 위해 먼저 슬라이딩 관측기를 이용하여 전기자 전류의 도함수를 추정하고 속도관측기인 Luenberger 관측기의 이득을 퍼지 제어 기법을 이용하여 관측기 이득을 최적 값으로 선정하고 이것을 이용하여 직류 서보 전동기의 속도제어에 적용하였다. 또한, 설계한 퍼지 슬라이딩 관측기를 200[W] 직류서보전동기에 적용하여 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 Luenberger 관측기를 이용한 경우 및 퍼지 슬라이딩 관측기를 이용하여 속도를 추정한 경우를 부하가 없는 경우와 부하가 있는 경우로 나누어서 비교 실험하여 본 논문에서 설계한 퍼지-슬라이딩 관측기의 타당성을 입증하였다.

2. 퍼지 슬라이딩 관측기의 설계

2.1 상태 관측기

측정할 수 없는 상태변수를 추정하는 장치를 상태관측기(state observer) 또는 간단히 관측기(observer)라고 하고 상태 관측기로부터 얻어지는 관측신호 $\hat{x}(t)$ 는 실제상태 $x(t)$ 와 똑같은 값이지만 빠른 시간 안에 실제 상태에 수렴하도록 구성 한다.

제어 대상이 다입력 다출력 선형 제어 시스템은 다음과 같은 형태의 상태방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

위 식에서 실제로는 초기상태 $x(0)$ 를 알 수 없기 때문에

* 正 會 員 : 건국大學 전기공학科 博士課程

** 正 會 員 : 건국大學 전기공학科 教授 · [博

接受日字 : 2004年 3月 16日

最終完了 : 2004年 4月 2日

이것을 상태관측기로 사용할 수는 없다. 초기값 $\hat{x}(0)$ 가 실제의 초기 상태값 $x(0)$ 와 다르면 상태관측기로 관측한 상태 $\hat{x}(t)$ 는 실제상태 $x(t)$ 와 다른 값을 갖기 때문이다. $\hat{x}(t)$ 가 $x(t)$ 와 같은지 아닌지를 판단하려면 두 신호를 비교해보면 되지만 $x(t)$ 를 알 수 없으므로 두 신호 대신에 플랜트의 측정출력 $y(t)$ 와 관측된 상태변수 값으로부터 얻는 관측출력 $\hat{y}(t)$ 를 비교하면 된다. 관측출력 $\hat{y}(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) + Du(t) \quad (2.2)$$

이때 관측출력이 측정출력 $y(t)$ 와 다르면 $\hat{x}(t)$ 가 $x(t)$ 와 분명히 다른 것이고 $\hat{y}(t)$ 가 $y(t)$ 와 같으면 $\hat{x}(t)$ 가 $x(t)$ 와 같아질 가능성이 있다. 이러한 출력관측오차 $\hat{y}(t) - y(t)$ 에 관한 정보를 고려하여 상태 관측기에서 상태 관측오차를 줄이도록 상태관측기의 형태를 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] \quad (2.3)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t) + Du(t) \quad (2.4)$$

여기서 L 은 관측기의 상태관측오차를 보정하기 위해 도입한 Luenberger 관측기 이득상수이다.

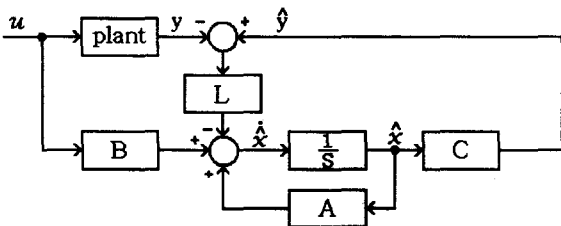


그림 1 상태 관측기 구조
Fig. 1 Structure of state observer

식(2.3)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[y(t) - \hat{y}(t)] \\ &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + L[Cx(t) - \hat{y}(t)] \\ &= A\hat{x}(t) + Bu(t) + LCx(t) - LC\hat{x}(t) \\ &= (A - LC)\hat{x}(t) + LCx(t) + Bu(t) \end{aligned} \quad (2.5)$$

식(2.3)과 식(2.4)을 이용하면 상태관측오차에 관한 식은 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}}(t) - \dot{x}(t) = (A - LC)[\hat{x}(t) - x(t)] \quad (2.6)$$

여기서 상태관측오차를 $e(t) = \hat{x}(t) - x(t)$ 로 정의하면 식(2.7)로 나타낼 수 있다.

$$\dot{e}(t) = (A - LC)e(t) \quad (2.7)$$

여기서 $A - LC$ 가 안정하도록 행렬 L 을 선택하면 초기관측오차 $e(0) = \hat{x}(0) - x(0)$ 가 있더라도 $t \rightarrow \infty$ 일 때 $e(t) \rightarrow 0$, 즉 $\hat{x}(t) \rightarrow x(t)$ 의 성질을 가지면서 식(2.3)은 구하고자 하는 상태관측기가 된다.

2.2 퍼지 시스템

퍼지 제어 시스템(fuzzy control system)은 1965년에 자데(L. A. Zadeh)가 제안한 퍼지 이론(fuzzy theory)의 응용분야로써, 시스템 정보가 정성적이고 불확실한 경우에 퍼지 집합(fuzzy set), 퍼지 논리(fuzzy logic), 퍼지 숫자(fuzzy number) 등의 개념을 이용하여 그 값을 정량적으로 바꾸어 제어에 이용하는 방법이며 제어 대상의 수학적 모델링 없이 퍼지 규칙(fuzzy rule)이라고 불리는 여러 개의 If-Then 형식의 제어규칙에 정성적 동작 특성을 포함하여 그 규칙들에 의해 제어입력이 결정되는 병렬 분산형 제어이다. 따라서 제어 대상이 비선형성이 클 때 효과적으로 적용될 수 있는 특징을 갖고 있다.

퍼지 제어 시스템 내에서는 모든 값을 0과 1사이의 퍼지 값(fuzzy value)으로 변환하여 사용하므로, 기존의 명확한 값(crisp value)을 퍼지 값으로 변환하고, 계산 및 추론(inference)을 시행한 후, 계산되어진 퍼지 값을 다시 명확한 값으로 바꾸는 절차를 필요로 하게 된다. 따라서 퍼지 제어 시스템은 그림 2와 같다.

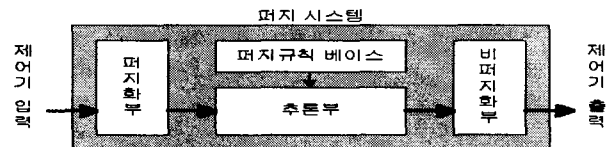


그림 2 퍼지 시스템의 구조
Fig. 2 Structure of a fuzzy system

2.3 슬라이딩 모드 관측기

제어 대상이 다입력 다출력 선형 제어 시스템이고 행렬 (A, C) 가 가관측성을 갖는 상태 방정식은 식(2.8)과 식(2.9)와 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + \Delta f \quad (2.8)$$

$$y = Cx \quad (2.9)$$

여기서 Δf 는 제어대상의 매개변수 변동분이나 외란을 표시한다.

이러한 시스템에서 슬라이딩 평면을 $s = \hat{y} - y = 0$ 으로 하는 슬라이딩 모드 관측기를 구성하면 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K \cdot \text{sgn}(\hat{y} - y) \quad (2.10)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} \quad (2.11)$$

여기서 $\text{sgn}(\)$ 함수는 슬라이딩 영역에서 무한 이득을 갖는 OP-amp로 생각할 수 있다. 좀 더 구체적으로 표현하면 다음과 같은 입·출력 관계를 갖는 시스템으로 표현할 수 있다.

$$y = \text{sgn}(x) \quad (2.12)$$

$$S_g(x_i) = \begin{cases} -1, & x < 0 \\ 0, & x = 0 \\ +1, & x \leq 0 \end{cases} \quad (2.13)$$

여기서, $\text{sgn}(\)$ 의 이득, G 를 고려해 보면 다음과 같다.

$$G = \frac{\text{sgn}(x)}{x} = \frac{1}{|x|} \quad (2.14)$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} G = \infty \quad (2.15)$$

따라서 시스템이 슬라이딩 모드 영역에 존재한다면 이 시스템은 매개변수의 변동이나 외란에 강하다는 것을 알 수 있다. 한편, 다른 시각에서는 이러한 $sgn(\cdot)$ 를 뱅뱅(bang-bang) 함수라고도 하며 뱅뱅 제어기는 시스템에 최대의 입력을 가하면서 최소의 시간에 목표점에 도달하는 제어기로 알려져 있다.

식(2.8)과 식(2.9)는 가관측 시스템이므로 다음과 같이 표현 가능한 것으로 가정한다.

$$\dot{x}_1 = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + B_1u + \Delta f_1 \quad (2.16)$$

$$\dot{x}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u + \Delta f_2 \quad (2.17)$$

$$y = Cx = [1 \ 0 \ \dots \ 0]x = x_1 \quad (2.18)$$

이 때 앞에서 서술했던 슬라이딩 모드 관측기는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\hat{x}}_1 = A_{11}\hat{x}_1 + A_{12}\hat{x}_2 + B_1u + K_1 \cdot sgn(\hat{y} - y) \quad (2.19)$$

$$\dot{\hat{x}}_2 = A_{21}\hat{x}_1 + A_{22}\hat{x}_2 + B_2u + K_2 \cdot sgn(\hat{y} - y) \quad (2.20)$$

$$\hat{y} = \hat{x}_1 \quad (2.21)$$

식(2.16) ~ 식(2.21)로부터 오차 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{e}_1 = A_{11}e_1 + A_{12}e_2 - \Delta f_1 + K_1 \cdot sgn(\hat{y} - y) \quad (2.22)$$

$$\dot{e}_2 = A_{21}e_1 + A_{22}e_2 - \Delta f_2 + K_2 \cdot sgn(\hat{y} - y) \quad (2.23)$$

여기서 $e_1 = \hat{x}_1 - x_1$, $e_2 = \hat{x}_2 - x_2$ 이다.

슬라이딩 모드를 발생시키기 위한 조건은 $s\delta < 0$ 이지만, 이것은 $sgn(\cdot)$ 함수의 이득인 K 를 충분히 크게 함으로써 만족되어지므로 이상적이 슬라이딩 모드 제어에서 이득 K 는 무한대 값을 갖는다. 슬라이딩 모드 제어에서의 상태궤적은 시스템의 해의 궤적을 나타내고 슬라이딩 모드 관측기의 궤적은 추정오차 해의 궤적을 나타내며 슬라이딩 관측기의 구조는 그림 3과 같다.

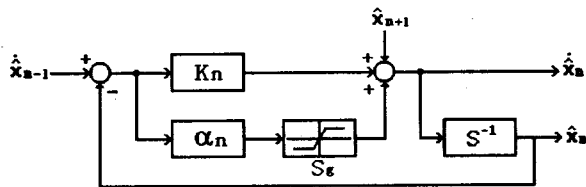


그림 3 슬라이딩 관측기 구조
Fig. 3 Structure of sliding observer

슬라이딩 모드 관측기의 추정오차는 슬라이딩 면에 도달하기 전까지 동일차원 관측기의 해의 궤적을 만족하고 슬라이딩 면에 도달하면 최소차원 관측기의 특성을 갖고 슬라이딩 면에 구속된다. 이상적인 슬라이딩 모드 관측기는 동일차원 관측기와 최소차원 관측기의 특성을 동시에 갖고 있으므로 슬라이딩 모드 관측기의 추정오차 궤적은 매개변수 변동이 슬라이딩 면 밖의 영역에서 발생하더라도 슬라이딩 면으로 구속되도록 한다.

2.4 퍼지-슬라이딩 관측기 설계

본 논문에서는 Luenberger 관측기의 문제점인 관측기 이득 값을 적절히 선정하기 위하여 관측기 이득을 적절히 조정할 수 있는 퍼지-슬라이딩 관측기를 설계하고 이것을 직류 서보 전동기의 속도 센서리스 제어에 적용하려 한다. 따라서 퍼지-슬라이딩 관측기의 기본 구조는 직류 서보 전동기의 속도 센서리스제어에 적용하기 위하여 전기자 전류의 도함수를 추정하는 슬라이딩 관측기 부분과 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 이용하여 Luenberger 관측기의 관측기 이득 L 을 설정하는 퍼지 제어 부분과 전동기 속도 추정을 위한 Luenberger 관측기의 세 가지 부분으로 구성된다.

2.4.1 슬라이딩 관측기 설계

본 논문에서는 직류 서보 전동기의 속도 센서리스 제어를 수행하기 위해서 직류 서보 전동기의 전기적 동특성을 이용하여 속도를 관측하며 그림 4와 같다.

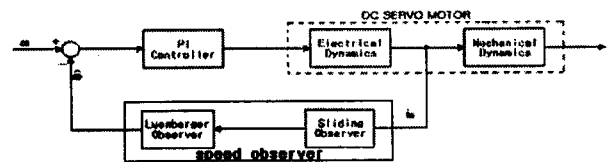


그림 4 슬라이딩 관측기를 이용한 속도관측기
Fig. 4 speed observer using sliding observer

그러나 직류 서보 전동기의 전기적 동특성만으로 속도를 관측한다는 것은 문제점이 있기 때문에 직접 속도를 추정하는 것은 어렵게 된다.

직류 서보 전동기의 전기적 동특성은 식(2.24)와 같이 나타낼 수 있다.

$$e_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + k_b \omega \quad (2.24)$$

속도를 추정하기 위해서 식(2.24)을 식(2.25)로 나타낼 수 있다.

$$\hat{\omega} = \frac{1}{k_b} [e_a(t) - R_a \hat{i}_a(t) - L_a \frac{d\hat{i}_a(t)}{dt}] \quad (2.25)$$

그러나 식(2.25)에서 전류 도함수 $(\frac{di_a(t)}{dt})$ 을 알 수 없기 때문에 속도를 직접 추정하는 것은 어려우며, 속도를 추정하기 위해 전류 도함수를 추정해야 한다. 전류 도함수 추정 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\hat{i}_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} [e_a(t) - R_a i_a(t) - k_b \omega] + L (i_a - \hat{i}_a) \quad (2.26)$$

식(2.25)와 식(2.26)에서 속도를 관측하기 위해서는 전류 도함수를 알아야 하고 전류 도함수를 관측하기 위해서는 속도를 알아야 하며 직류 서보 전동기의 전류와 전류 도함수를 추정하기 위해 슬라이딩 관측기를 이용하여 추정한 전류와 전류 도함수를 이용하여 속도를 관측한다.

본 논문에서 제안한 직류 서보 전동기의 전류와 전류 도함수를 추정하기 위한 슬라이딩 관측기 설계식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{\tilde{i}}_1 = \tilde{i}_2 + k_1(i - \tilde{i}_1) + a_1 S_g(i - \tilde{i}_1) \\ \dot{\tilde{i}}_2 = \tilde{i}_3 + k_2(\tilde{i}_1 - \tilde{i}_2) + a_2 S_g(\tilde{i}_1 - \tilde{i}_2) \end{cases} \quad (2.27)$$

여기서, \tilde{i}_1 와 \tilde{i}_2 는 전기자전류와 추정값이며 K_i 와 a_i 는 슬라이딩 관측기 이득 상수들을 나타낸다.

2.4.2 퍼지 동조기법을 이용한 관측기 설계

슬라이딩 관측기를 이용하여 직류 서보 전동기의 전기자 전류의 도함수를 추정하는 것은 가능하지만 속도 관측기인 Luenberger 관측기의 관측기 이득 L 을 최적 값으로 선정하지 않으면 관측기의 성능 저하로 인해 정확한 속도 추정이 어렵게 된다. 따라서 본 논문에서는 퍼지 제어기법을 통하여 직류 서보전동기의 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 사용하여 Luenberger 관측기 이득 L 을 선정하였으며 퍼지-슬라이딩 관측기의 구조는 그림 5와 같다.

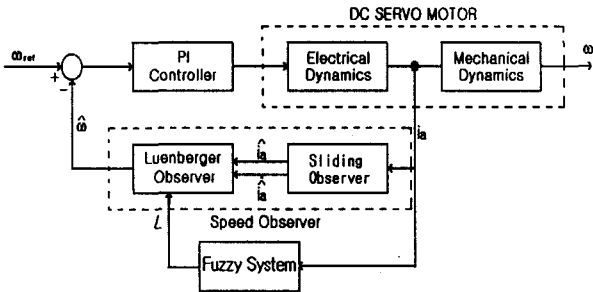


그림 5 퍼지 슬라이딩 관측기 구조
Fig. 5 Structure of fuzzy sliding observer

(1) 퍼지화부

본 논문은 속도관측기로 사용된 Luenberger 관측기의 관측기 이득을 조정하기 위하여 퍼지 시스템을 도입하였으며 퍼지 시스템의 입력 값으로는 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 사용하였다. 따라서 입력 값을 정성화된 퍼지 값으로 변환하기 위해서는 그림 6의 비선형 소속 함수와 양자화 방법을 가지고 퍼지화 과정을 수행하였다.

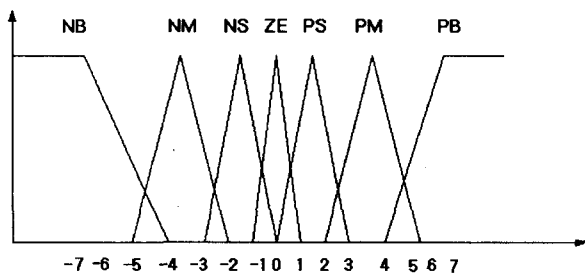


그림 6 비선형 삼각형 소속 함수
Fig. 6 Nonlinear triangle membership function

전기자 전류와 전기자 전류의 도함수의 값이 0을 기준으로 절대 값이 증가함에 따라 각각의 퍼지 변수에 해당하는 소속 함수의 폭도 커지도록 설계한 것으로, 오차가 큰 구간에서는 개략제어(coarse control) 특성이 나타나고, 오차가 작은 구간에서는 미세제어(fine control) 특성이 나타나도록 한 것이다.

(2) 퍼지규칙 및 추론

본 논문에서 제안한 퍼지-슬라이딩 관측기의 설계에 사용

된 퍼지 규칙의 형태는 조건부 및 결론 부를 혼합 명제로 하였으며 표 1과 같다. 또한 본 논문에서 적용한 퍼지 시스템의 추론은 Mamdani의 Min-Max 연산을 이용하여 수행하였다.

표 1 관측기 이득 L 에 관한 퍼지 규칙
Table 1 Fuzzy rule for observer gain L

ΔI_a	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB						
NM	NB	NB	NM	NM	NM	ZO	ZO
NS	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PM	PM	PM
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	PB						

(3) 비퍼지화

본 논문의 비퍼지화 방법은 일반적으로 가장 우수한 성능을 보이는 무게중심법을 사용하였다. 이 방법은 합성된 출력부 퍼지 집합에서 무게중심을 구하는 방법으로 식(2.28)과 같다.

$$u_0 = \frac{\sum_{j=1}^k \mu(u_j) \cdot u_j}{\mu(u_j)} \quad (2.28)$$

3. 실험

본 논문에서는 직류 서보 전동기의 속도센서리스 속도제어를 하기 위하여 퍼지-슬라이딩 관측기를 적용하였다. 이를 위하여 제작된 디지털 서보 시스템을 이용하여 속도센서를 장착한 경우와 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 적용하여 속도를 추정한 경우를 동일한 조건으로 무부하 및 부하상태에서 비교실험을 하였으며, 속도제어기로는 PI제어기를 사용하였다. 그림 7은 실험장치 구성도를 나타낸 것이다.

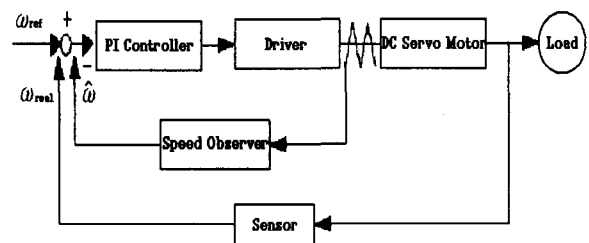


그림 7 실험장치 구성도
Fig. 7 Configuration of experimental system

본 실험에서 사용한 전동기는 최대출력 200W(LG기전, FMD-E205A)이며 속도추정을 위한 센서로1000[펄스/회]의 분해능을 갖는 엔코더를 사용하였다.

실험대상인 직류 서보 전동기 특성을 표 2에 나타내었다.

표 2 직류 서보 전동기의 사양
Table 2 DC Servo motor specification

정격출력	Pr	200W
정격토크	Tr	6.50 Kgf.cm
정격회전수	Nr	3000 rpm
정격전류	Ir	3.3A
정격전압	Er	75V
유기전압정수	Ke	22.50V/K rpm
토크정수	Kt	2.10 Kgf.cm/A
전기자관성	Jm	$1.33 \times 10^{-3} \text{Kgf.cm Sec}^2$
전기자저항	Ra	2.12 Ω
전기자인덕턴스	La	1.02mH
마찰토크	Tf	0.5 Kgf.cm
순시최대토크	Tp	27.36Kgf.cm
기계적시정수	tm	6.25ms
전기적시정수	te	0.48ms

3.1 실험방법 및 절차

이 논문에서는 직류 서보 전동기의 속도제어에 있어서 속도센서를 사용하지 않고 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용하여 속도 관측기를 설계하여 속도를 제어하는데 있다. 따라서 본 논문에서는 설계된 관측기를 직류 서보 전동기의 속도제어에 적용시켜 관측기의 속도추정 성능을 입증하기 위해 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 Luenberger관측기와 본 논문에서 설계한 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용하여 속도제어를 수행한 경우를 비교 실험하였다.

3.2 무부하 정속운전 실험 I

목표값이 2,000[rpm]일 때, 각각 센서를 이용한 경우와 Luenberger 관측기와 퍼지-슬라이딩 관측기를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 8에 나타내었으며 결과를 표 3에 정리하였다.

표 3 무부하 정속운전 실험결과표 (2,000[rpm])
Table 3 The results table of constant speed control with no load (2,000[rpm])

응답특성	Sensor	Luenberger	Fuzzy-Sliding
최대초과량 [rpm]	2049	2257	2202
최대 백분율 초과량 [%]	2.45	12.85	10.1
상승시간 [sec]	0.0198	0.0286	0.0259
정착시간 [sec]	1.1268	2.17	1.35

표 3의 결과와 같이 스텝입력 실험에서의 출력응답은 최대 초과량 백분율에서 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비하여 약 7.7[%]정도 증가했으며, 정착시간에 있어서도 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비해 약 6.1[msec] 정도 느리게 나타났다. 따라서 퍼지-슬라이딩 관측기가 과도상태와 정상상태에서 추정성능이 우수하며, 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우의 응답 특성에 근접하다는 것을 입증하였다.

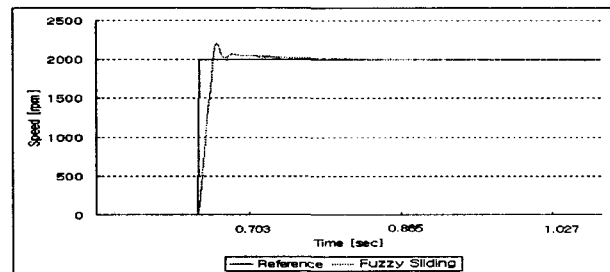
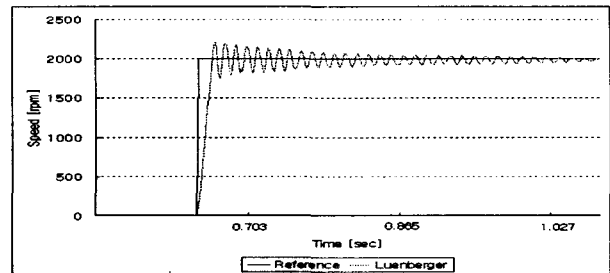
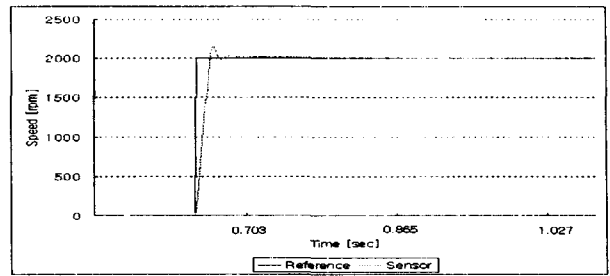


그림 8 무부하 정속운전 실험결과 (2,000[rpm])
Fig. 8 The results of constant speed control with no load (2,000[rpm])

3.3 무부하 정속운전 실험 II

목표값이 500[rpm]일 때, 각각 센서를 이용한 경우와 Luenberger 관측기와 퍼지-슬라이딩 관측기를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 9에 나타내었으며 결과를 표 4에 정리하였다.

표 4 무부하 정속운전 실험결과표 (500[rpm])
Table 4 The results table of constant speed control with no load (500[rpm])

응답특성	제어기	Sensor	Luenberger	Fuzzy-Sliding
최대초과량 [rpm]		572	683	564
최대 백분율 초과량 [%]		14.4	36.6	10.1
상승시간 [sec]		0.0102	0.0101	0.0092
정착시간 [sec]		1.1214	1.395	1.118

표 4의 결과와 같이 저속운전(500rpm) 실험에서의 출력응답은 최대초과량 백분율에서 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비하여 약 3.3[%]정도 감소했으며, 정착시간에 있어서도 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비해 약 0.01초 정도 빠르게 나타났다. 저속영역에서의

운전 시 퍼지-슬라이딩 관측기가 과도상태와 정상상태에서 추정성능이 우수하며, 속도센서가 있는 경우의 응답 특성보다 우수하다는 것을 입증하였다.

딩 관측기가 부하인가시 속도센서에 비해 오차가 감소하므로 속도센서에 비해 부하인가시에는 퍼지-슬라이딩 관측기가 속도센서에 비해 강인한 특성을 보였다.

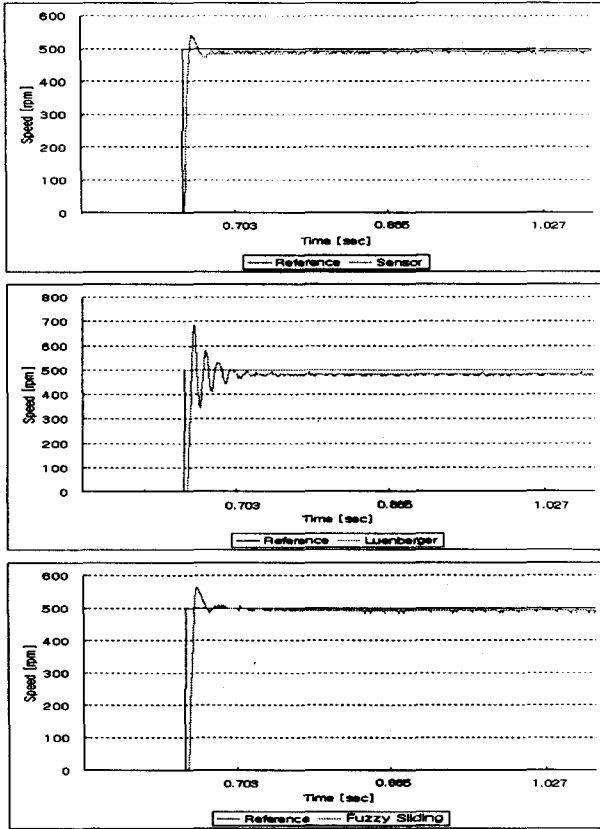


그림 9 무부하 정속운전 실험결과 (500[rpm])
Fig. 9 The results of constant speed control with no load (500[rpm])

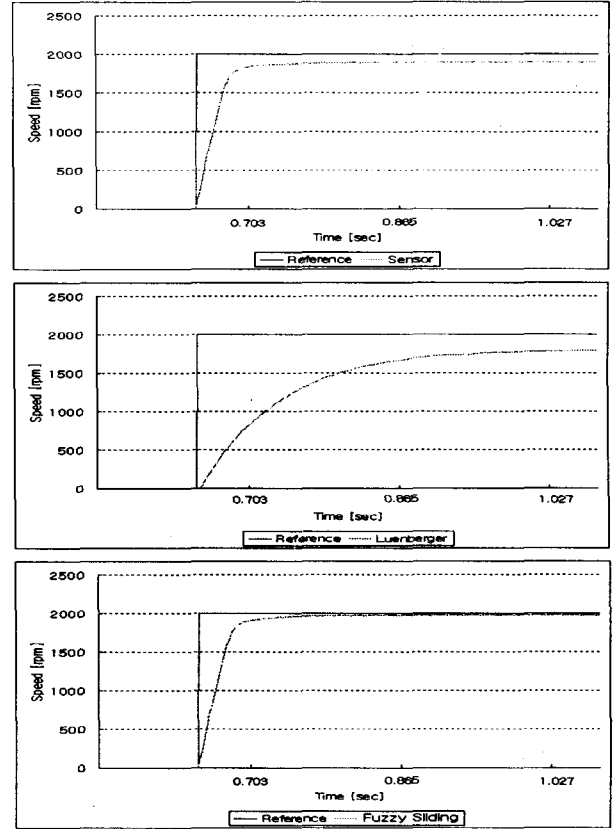


그림 10 부하 정속운전 실험결과 (2,000[rpm])
Fig. 10 The results of constant speed control with load (2,000[rpm])

3.4 부하 정속운전 실험 I

부하를 인가하고 목표값을 2,000[rpm]으로 하는 경우, 각각 센서를 이용한 경우와 Luenberger 관측기와 퍼지-슬라이딩 관측기를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 10에 나타내었으며 결과를 표 5에 정리하였다.

3.5 부하 정속운전 실험 II

부하를 인가하고 목표값을 500[rpm]으로 하는 경우, 각각 센서를 이용한 경우와 Luenberger 관측기와 퍼지-슬라이딩 관측기를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 11에 나타내었으며 결과를 표 6에 정리하였다.

표 5 부하 정속운전 실험결과표 (2,000[rpm])
Table 5 The results table of constant speed control with load (2,000[rpm])

응답특성	Sensor	Luenberger	Fuzzy-Sliding
최대값 [rpm]	1911	1826	1976
최대 백분율 초과량 [%]	0	0	0
상승시간 [sec]	0.072	0.0992	0.061

표 5의 결과와 같이 부하인가시 스텝입력 실험에서의 출력 응답은 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우가 1976[rpm]이고, 속도센서가 있는 경우는 1911[rpm]으로 나타났으며, 부하인가시 오차는 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비해 약 3.25[%]정도 감소하였다. 따라서 퍼지-슬라이

표 6 부하 정속운전 실험결과표 (500[rpm])
Table 6 The results table of constant speed control with load (500[rpm])

응답특성	Sensor	Luenberger	Fuzzy-Sliding
최대값 [rpm]	476	421	484
최대 백분율 초과량 [%]	0	0	0
상승시간 [sec]	0.135	0.184	0.126

표 6의 결과와 같이 부하인가시 저속운전(500[rpm]) 실험에서의 부하인가시 오차는 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우가 속도센서가 있는 경우에 비해 약 1.6[%]정도 감소하였다.

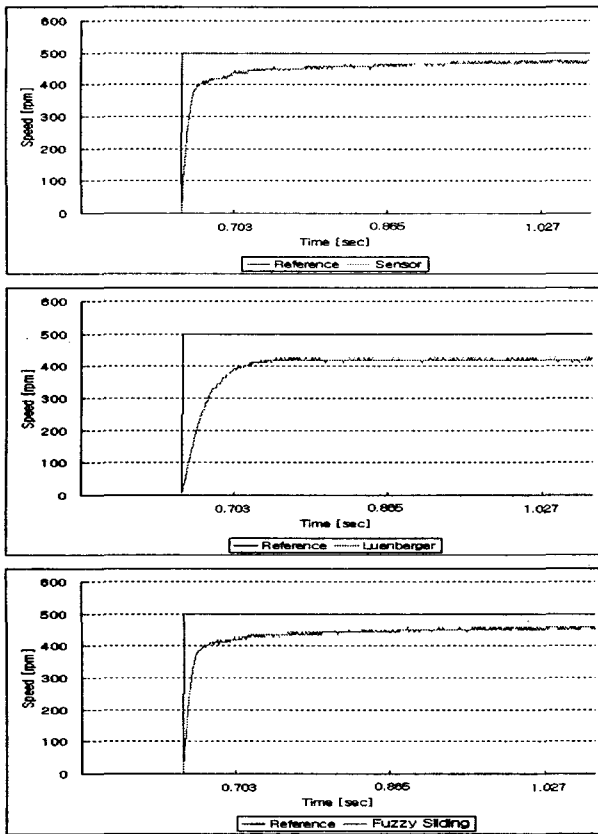


그림 11 부하 정속운전 실험결과 (500[rpm])
 Fig. 11 The results of constant speed control with load (500[rpm])

4. 결 론

본 논문에서는 직류 서보 전동기의 속도센서리스 속도제어를 수행하기 위하여 관측기에 대한 연구로서 전동기의 동특성 및 내부파라미터에 대한 정보를 필요로 하지 않는 강인한 특성을 갖는 퍼지-슬라이딩 관측기를 제안했다. 또한 과도상태에서의 응답특성 개선과 저속에서의 운전 특성 향상을 입증하기 위하여 직류 서보 전동기의 무부하 및 부하 시 정속과 저속 실험을 통하여 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 퍼지-슬라이딩 관측기를 이용한 경우를 비교 실험한 결과 본 논문에서 제안한 퍼지-슬라이딩 관측기를 직류 서보 전동기에 적용하여 정속 운전 시 과도상태와 정상상태에서 안정성 및 추정성능이 우수하다는 것을 입증하였으며, 속도센서가 있는 제어시스템의 응답에 근접한 특성을 나타내었다. 또한 부하의란에 대하여 강인한 성능을 가짐을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] M. Takigawa, et. al. "A Wide Speed Control System for Brushless DC Motor Regarding to the Transient Response Characteristics," Trans. IEEE Japan, Vol. 113-D, No. 2 pp. 151-158, 1993.
 [2] K. N. Pradeep, "Analog and Digital Speed Control of DC Drives Using Proportional-Integral and Integral-Proportional control techniques," IEEE Trans. Ind. Elect., Vol. IE-34, No. 2, pp. 227-233, 1987.

[3] T. Furuhashi, S. Sangwanish, and S. Okuma, "A Position and Velocity Sensorless Control of Brushless DC Motors Using an Adaptive Sliding Observer," Trans. IEEE Japan, pp. 1188-1192, 1990.
 [4] Z. Iwai, A. Inoue, and S. Kswaji, "Observer," Corona Pub., 1994. (in Japanese)
 [5] H. Nakano and I. Takahashi, "Speed Sensorless Field-Orientation Control of the Induction Motor Using an Instantaneous Slip Frequency Estimation Method", IEEE PESC., pp. 847-854, 1988.
 [6] J. Holtz, "Speed Estimation and Sensorless Control of AC Drives," IEEE IECON, pp. 649-654, 1993.
 [7] H. Kubota, "DSP-Based Speed Adaptive Flux Observer of Induction Motor," IEEE Trans, Ind. Appl., Vol. 29, No. 2, pp. 344-348, 1993.
 [8] T. Ahmed-Ali and F. Lamnabhi-Lagarrige, "Sliding Observer-Controller Design for Uncertain Triangular Nonlinear Systems," IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. 44, No. 6, pp. 1244-1249, 1999.
 [9] G. B. Wang, S. S. Peng, and H. P. Huang, "A Sliding Observer for Nonlinear Process Control," Chemical Engineering Science, Vol. 52, pp. 787-805, 1997.
 [10] E. H. Mamdani, "Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis," IEEE Trans. on Computer, Vol. c-26, No. 12, pp. 1182-1199, 1997.
 [11] W. J. M. Kickert and E. H. Mamdani, "Analysis of Fuzzy Logic Controller," Fuzzy Set and System, Vol. 1, pp. 29-44, 1978.

저 자 소 개



고 봉 운(高奉云)

1964년 7월 13일생. 1983년 2월 명지대학교 공대 전기공학과 졸업. 1990년 2월 건국 대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정수료. 현재 제주산업정보대학 디지털 전기과 조교수
 Tel : 064) 754-0295, Fax : 064) 754-0295
 E-mail : bwko_et@jeju.ac.kr



김 낙 교(金洛教)

1949년 2월 4일생. 1973년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1977년 연세대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986-87 Oregon State Univ. 교환교수. 1996-97 Ohio State Univ. 교환교수. 1978-80 한국원자력연구소 선임연구원. 1980-현재 건국대학교 전기공학과 교수
 Tel : 02) 450-3485, Fax : 02) 447-9186
 E-mail : lkkim@konkuk.ac.kr