

퍼지제어기를 이용한 토크 표준기의 정밀제어

김갑순*, 강대임**

Precision Control of a Torque Standard Machine Using Fuzzy Controller

Gab-Soon Kim* and Dae-Im Kang**

ABSTRACT

This study describes the precision control of the torque standard machine using a self-tuning fuzzy controller. The torque standard machine should generate the accurate torque for calibrating a torque sensor. In order to reduce the relative expanded uncertainty of the torque standard machine, when a weight is hanged to the end of the torque arm for generating the torque, the sloped torque arm should be accurately controlled to the horizontal level. If the slope of the torque arm is larger from the inaccurate control, the uncertainty of the torque standard machine due to the control will be larger. This applies the inaccurate torque to a torque sensor to calibrate, and the measuring error of the torque sensor generate from it. Therefore the torque arm of the torque standard machine is accurately controlled. In this paper, the self-tuning fuzzy controller was designed using a fuzzy theory, and the torque arm of the torque standard machine was accurately controlled. The control gain of the fuzzy controller, that is the membership function size of the error, the membership function size of the error change and the membership function size of the controller were determined from the self-tuning. The control results of the torque standard machine were the overshoot within 0.0076 mm, the rise time within 16.70 sec and the steady state error within 0.0076 mm.

Key Words : Fuzzy controller(퍼지제어기), Self-tuner(자기조정 튜너), Torque standard machine(토크 표준기), Torque arm(토크암), Overshoot(오버슈트), Steady state error(정상상태오차), Rise time(상승시간)

기호설명

$e(k)$: error at the sampling time k
 $ce(k)$: change in error at the sampling time k
 $\mu_{DU}(k)$: membership grade of the controller output
 $\mu_E(k)$: membership grade of the error
 $\mu_{CE}(k)$: membership grade of the error change
 $U_F(k)$: output of the controller
 $Dui(k)$: length form DZ0 to center of linguistic variable
of the controller output
 $R(k)$: reference value

$Y(k)$: output value of torque standard machine
 $e(k)$: error at the sampling time k
 $e(k-1)$: error at the sampling time $k-1$
 $ce(k)$: change in error at the sampling time k
 OV : overshoot
 RT : rise time
 EO : error at the steady state

1. 서론

토크센서(torque sensor)는 교정(calibration) 혹은

2000년 10월 24일 접수
* 경상대학교 제어계측공학과, 생산기술연구소
** 한국표준과학연구원 물리표준부

시험(test)되어 신뢰성이 확보되어야 토크 측정에 사용될 수 있다. 이것은 토크 표준기(torque standard machine)로 교정된다. 토크 표준기는 추(weight)와 토크암(torque arm) 등으로 정확한 토크를 발생시킬 수 있는 기기이다. 토크센서의 교정(calibration)은 각각의 교정점(calibration point)에서 토크 표준기를 이용하여 증가 및 감소순으로 토크센서에 토크를 순차적으로 발생시켜서 실시한다. 토크 표준기를 이용하여 토크를 발생시킬 때는 추를 토크암에 걸고, 이것으로 인해 기울어진 토크암이 수평이 되도록 제어장치를 이용하여 제어한다. 이것은 토크의 정의가 길이에 직각으로 작용되는 힘을 곱한 것이기 때문에 추(가해지는 힘)와 토크암이 직각이 이루어도록 하여 정확한 토크를 발생시키기 위한 것이다. 기존의 토크 표준기는 토크암이 수평이 되도록 하기 위해서는 실험자가 토크암 위에 설치된 수평계를 보면서 수동으로 조정하였다. 그러므로 큰 오차가 발생할 수 있다.

토크센서는 히스테리시스(hysteresis) 특성을 가지고 있으므로 토크암을 제어할 때 오버슈트(overshoot)가 발생하면 토크센서의 측정값이 오차를 발생하게 된다. 따라서 토크 표준기의 제어는 오버슈트가 발생되지 않도록 해야 한다. 또한 토크센서로부터 토크를 측정하기 위해서는 토크 표준기가 토크를 발생시킨 후 일정한 시간동안 발생한 토크를 유지시켜야 한다. 발생한 토크를 유지하기 위해서는 토크암을 수평으로 유지되도록 정밀제어를 해야 한다.

퍼지제어(fuzzy control)는 산업에서 각종 시스템에 널리 사용되고 있으며,^[1,2] 이 제어의 응용은 자동열차 조작시스템^[3], 자동컨테이너 크레인 조작시스템^[4], 엘리베이터 제어^[5], 핵원자로제어^[6], 자동차 변속기 제어^[7] 등이 있다. 퍼지제어는 성능이 PID 제어와 대등한 수준일 뿐만 아니라 제어기의 제어개인을 자동으로 결정할 수 있는 자기조정 튜너(self-tuner)로서 쉽게 적용될 수 있다.^[8,9,10]

본 논문에서는 자기조정 퍼지제어기를 구성하여 토크 표준기의 토크암을 정밀하게 제어하였다. 퍼지제어기의 제어개인인 오차의 소속함수의 크기, 오차변화의 소속함수의 크기, 제어기 출력의 소속함수의 크기는 자기조정을 통하여 결정되었다. 자기조정 퍼지제어기를 이용하여 토크 표준기를 정밀제어 한 결과 매우 안정되고 정확함을 보였다.

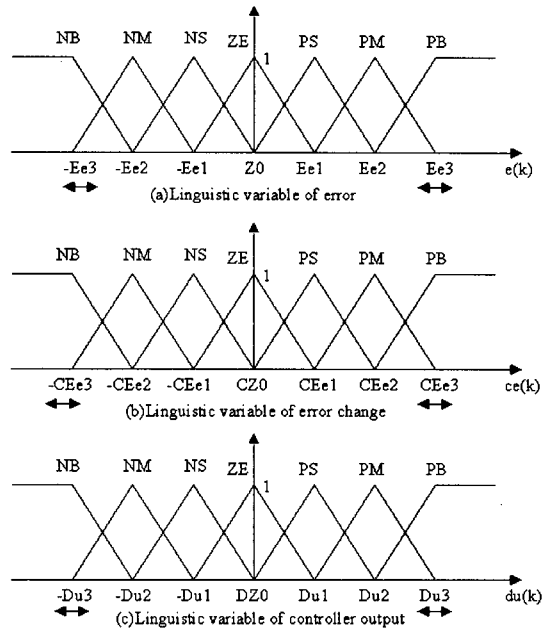


Fig. 1 Membership function for a fuzzy control

2. 퍼지 이론

퍼지제어기는 퍼지화부(fuzzification part), 지식기반부(knowledge base part), 퍼지추론부(fuzzy inference part), 비퍼지화부(defuzzification part)로 구성된다. 퍼지화부는 퍼지제어기의 추론부가 변수인 오차, 오차변화, 퍼지출력을 퍼지값으로 출력하므로 각 변수들을 퍼지화하는 것이다. 각 변수들의 퍼지값은 소속함수(membership function)를 이용하여 소속정도(membership grade)로 나타낸 것이다. Fig. 1은 퍼지제어기의 소속함수를 나타낸 것이며, (a)는 오차의 언어변수(linguistic variable of error), (b)는 오차변화의 언어변수(linguistic variable of error change), (c)는 제어기 출력의 언어변수(linguistic variable of controller output)를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB는 다음과 같은 의미를 갖는 언어변수들이다. NB는 Negative Big, NM는 Negative Medium, NS는 Negative Small, ZE는 Zero, NS는 Positive Small, PM은 Positive Medium, PB는 Positive Big이다. -Ee3, -Ee2, -Ee1, Z0, Ee1, Ee2, Ee3는 오차의 언어변수 크기, -CEe3, -CEe2, -CEe1, CZ0, CEe1, CEe2, CEe3는 오차변화의 언어변수 크기, -Du3, -Du2, -Du1, DZ0, Du1, Du2,

Du3 는 제어기출력의 언어변수 크기이다.

지식기반부는 제어규칙(control rule)이다. 제어 입력변수를 오차 $e(k)$ 와 오차변화 $ce(k)$ 로 하면 각각은 7 개의 퍼지집합을 가지고 룰의 조합은 7×7 행렬이므로 49 개가 된다. Table 1 에 49 개의 룰을 나타내었다.

Table 1 Control rule

$\begin{matrix} ce \\ e \end{matrix}$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

퍼지추론은 각각의 룰들을 통합하여 전체관계 행렬을 구함으로써 이루어진다. 자기조정퍼지제어기와 자기조정퍼지제어기는 Mamdani 의 minimum 추론법을 이용하여 추론하였다. Mamdani 의 minimum 추론법의 소속정도는 식 (1)으로 나타낼 수 있다.

$$\mu_{Du}(k) = \mu_e(k) \cap \mu_{ce}(k) \tag{1}$$

시스템의 제어에서 오차 $e(k)$ 를 ZE 와 PS, 오차변화 $ce(k)$ 를 PS 와 PM 이라 가정하고 이것을 Table 1 에 대입하여 추론하면 다음과 같다.

- If $e(k)$ is ZE and $ce(k)$ is PS, Then $Du(k)$ is PS
- If $e(k)$ is ZE and $ce(k)$ is PM, Then $Du(k)$ is PM
- If $e(k)$ is PS and $ce(k)$ is PS, Then $Du(k)$ is PM
- If $e(k)$ is PS and $ce(k)$ is PM, Then $Du(k)$ is PB

추론된 $Du(k)$ 는 Fig. 1 에 대입하여 제어기 출력의 언어변수를 결정하는데 사용된다.

비퍼지화부는 제어기에 입력된 퍼지값을 시스템에 출력시키기 위하여 비퍼지화하는 것을 말한다. 제어기의 출력값은 무게중심법에 의해 비퍼지

화할 수 있으며, 그것은 식 (2)에 의해 계산된다.

$$U_F(k) = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{Dui}(k) \times Dui(k))}{\sum_{i=1}^n \mu_{Dui}(k)} \tag{2}$$

3. 토크 표준기의 제어계

Fig. 2 의 (a)는 토크 표준기의 개략도, (b)는 토크 표준기의 사진을 나타내었고, Fig. 3 은 토크 표준기의 제어계(control system)를 나타내었다. 이것은 자기조정 퍼지제어기(self-tuning fuzzy controller), (1)토크암(torque arm), (2)AC 모터 드라이브(AC motor drive, M/N : HA-600-1)와 카운터 모터(counter motor, M/N : FHA-40B), (3)토크센서(torque cell), (4) 추(외란 : disturbance, torque applied by weights), (5)추 지지대(weight supporter), (6)몸체(body), (7)위치센서(position sensor, M/N : SRP-250-C) 등으로 구성되었다. 기준값(reference value)은 토크암이 수평인 상태 일 때 위치센서의 출력값이다. 퍼지제어기는 토크 표준기를 제어하는 퍼지이론을 이용한 제어기이고, AC 모터 드라이브와 카운터 모터는 추와 토크암에 의해서 토크센서에 발생하는 토크방향과 반대 방향으로 역토크를 발생시키기 위하여 사용된다. 토크센서는 토크암과 카운터 모터 사이에 고정되며, 토크 표준기로부터 발생하는 토크를 기준으로 교정된다. 외란은 추와 토크암에 의해 발생하는 토크이며, 위치센서는 토크암의 수직위치를 감지하는 것이다. 제어의 순서는 다음과 같다.

- (1) 추와 토크암을 이용하여 토크를 발생시킨다.
- (2) 위치센서에서 토크암의 수직위치를 감지한다.
- (3) 기준값과 위치센서의 출력을 비교하여 오차를 계산한다.
- (4) 퍼지제어기를 이용하여 카운터 모터의 입력값을 결정한다.
- (5) 토크센서에 추와 토크암이 발생한 토크의 방향과 반대방향으로 역토크를 가한다.
- (6) (2) ~ (5)를 반복하여 토크암이 수평이 되도록 제어한다.

토크 표준기의 구성요소중 카운터 모터와 AC 모터 드라이브의 전달함수를 구할 수 없으므로

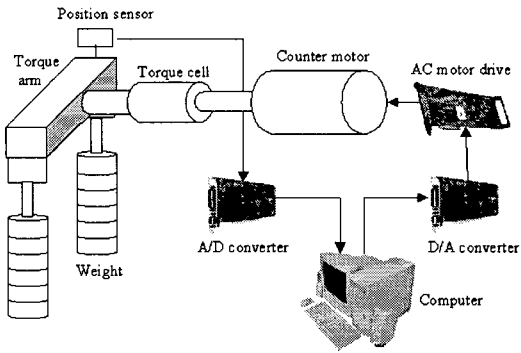


Fig. 2 (a) Schematic diagram of a torque standard machine

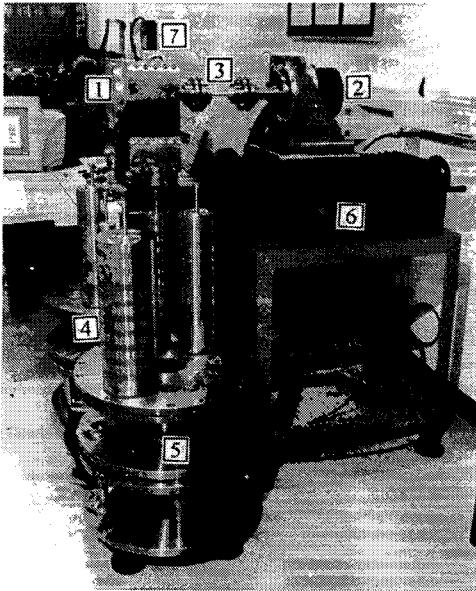


Fig. 2 (b) Photograph of a torque standard machine

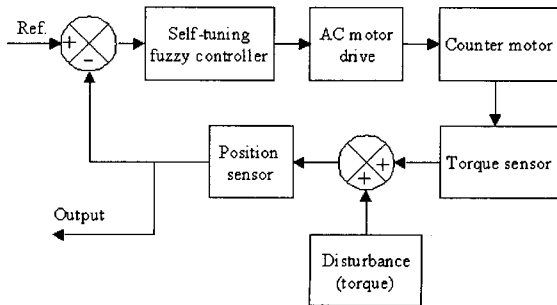


Fig. 3 Block diagram for controlling a torque standard machine

이론해석이 불가능하게 되며, 이 때문에 토크 표준기의 폐루프계를 해석하고 시뮬레이션할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 제어게인을 구하기 위하여 자기조정(self-tuning)을 실시하였다.

4. 퍼지제어기

퍼지제어기는 Fig. 4 에서 나타낸 것과 같이 퍼지제어기와 자기조정 튜너로 구성되어 있으며, 토크암을 수평위치로 정밀하게 제어하는데 사용된다. 제어기의 제어는 기준값 $R(k)$ 를 기준으로 토크 표준기의 출력값 $Y(k)$ 의 오차 $e(k)$ 와 오차변화 $ce(k)$ 가 제어기에 입력된다. 제어기는 입력된 제어게인의 오차와 오차변화를 이용하여 제어기의 출력값 $U_F(k)$ 을 계산하며, 이것을 토크 표준기에 입력한다. 오차와 오차변화의 계산식은 각각 식 (3), (4)과 같다.

$$e(k) = Y(k) - R(k) \quad (3)$$

$$ce(k) = e(k) - e(k-1) \quad (4)$$

자기조정 퍼지제어기의 자기조정 튜너는 퍼지제어기의 오차 $e(k)$, 오차변화 $ce(k)$, 제어기출력 $U_F(k)$ 의 소속함수의 크기, 즉 $Ee3$, $CEe3$, $Du3$ 를 변화시킨다. 오차 소속함수의 크기인 $Ee3$ 를 변화시키면 Fig. 1 에서 보는 것과 같이 $Z0$ 와 $Ee1$, $Ee1$ 과 $Ee2$, $Ee2$ 와 $Ee3$, $Z0$ 와 $-Ee1$, $-Ee1$ 과 $-Ee2$, $-Ee2$ 와 $-Ee3$ 간격의 비가 일정하기 때문에 $Ee3$ 값의 1/3 의 값으로 각각의 간격은 변한다. 오차변화와 제어기 출력의 소속함수 크기도 오차의 소속함수 크기와 마찬가지로 변화한다. 자기조정방법은 Fig. 5 에 나타낸 것과 같이 $Du3$ 를 한 지점에 고정하고 $Ee3$ 와 $CEe3$ 를 일정한 크기로 변화시키며, 또한 $Du3$ 또한 일정한 크기로 변화시킨다. $Du3$ 의 크기는 0.05 부터 0.8 까지 0.01 단계, $Ee3$ 의 크기는 0.1 부터 0.4 까지 0.05 단계, $CEe3$ 의 크기는 0.005 부터 0.009 까지 0.001 단계로 변화시킨다.

자기조정 퍼지제어기의 퍼지수행은 최대값으로부터 목표값을 빼서 계산되는 오버슈트, 목표값에 도달할 때까지의 시간인 상승시간, 정상상태의 오차에 따라 평가되며, 평가식 FP_R 은 식 (5)과 같다.

$$FP_R = f(OV, RT, EO) \quad (5)$$

자기조정 퍼지제어기의 퍼지수행 평가는 오버슈트, 도달시간, 정상상태 오차를 계산하여 설정한 각각의 오버슈트, 도달시간, 정상상태오차를 비교하여 수행을 계속할 것인지를 결정한다. 이와 같이 설정값과 평가된 값을 비교하여 수행여부를 결정하는 것은 토크 표준기에서는 최적의 조건을 얻기 위해서 소요되는 시간과 표준기의 안전성을 고려하여 시뮬레이션할 때와 같이 수없이 많은 실험을 반복할 수 없기 때문이다.

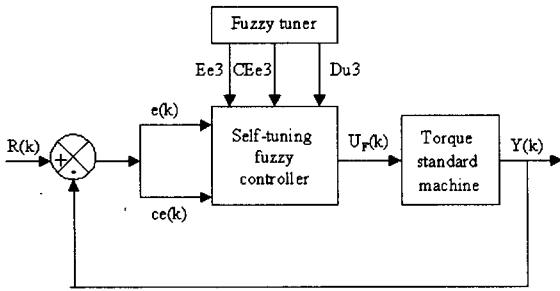


Fig. 4 Self-tuning fuzzy controller

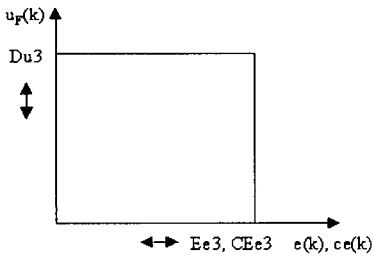


Fig. 5 Determination method of three control gain

Fig. 6 은 자기조정 퍼지제어기의 제어 흐름도를 나타낸 것이다. 제작된 프로그램은 다음 순서에 의해 실행된다.

- (1) 토크 표준기를 제어하기 위해 프로그램을 초기화한다.
- (2) 토크 표준기의 출력값과 기준값을 비교하여 오차 $e(k)$ 와 오차변화 $ce(k)$ 를 계산한다.
- (3) 자기조정 퍼지제어기일 경우에는 설정한 시간동안 수행한 결과를 이용하여 오버슈트, 상승시간, 정상상태오차를 평가한다.
- (4) 평가결과를 설정한 값과 비교하여 평가한 결과가 설정한 값보다 작으면 프로그램 수

행을 끝내고, 그렇지 않으면 자기조정 튜너와 퍼지제어기에 평가결과를 보낸다.

- (5) 자기조정 튜너는 평가된 결과에 따라 제어기출력 $U_F(k)$ 의 소속함수 크기인 $Du3$ 를 한 지점에 고정하고 오차 $e(k)$, 오차변화 $ce(k)$ 의 소속함수 크기인 $Ee3$ 와 $CEe3$ 를 일정한 크기로 변화시키며, $Du3$ 또한 일정한 크기로 변화시킨다.
- (6) 오차 $e(k)$ 와 오차변화 $ce(k)$ 를 퍼지이론에 적용하여 제어기의 출력 $U_F(k)$ 를 계산하여 토크 표준기에 입력시킨다.
- (7) 위의 (2)로 되돌아간다.

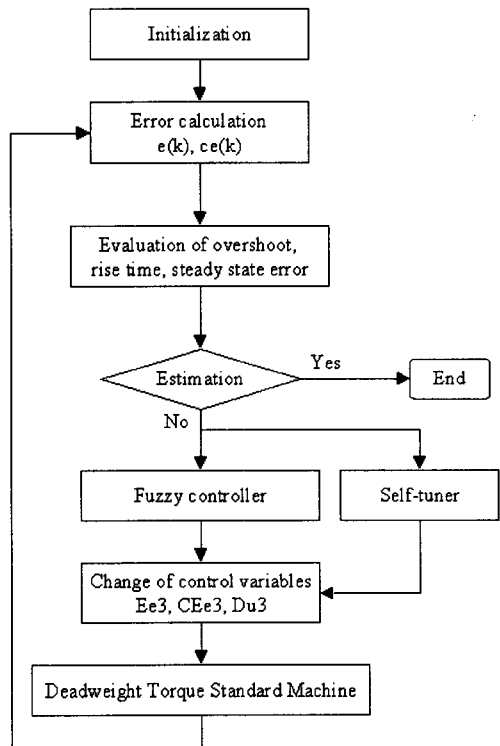


Fig. 6 Flow chart for a self-tuning fuzzy controller

5. 실험결과 및 고찰

Fig. 7 의 (a)와 (b)는 자기조정 퍼지제어기의 응답결과를 나타낸 것이다. Fig. 7 에 나타낸 결과는 여러 번의 자기조정을 실시한 것중 4 회만 나타내었다. 이 때 실험시간은 50 초이며, 샘플링시간은 0.05 초이다. 토크 표준기의 정확도 및 안전성을 고려하여 설정한 오버슈트, 도달시간, 정상상태오

차는 각각 0.008 mm, 18 초이내, 0.008 이내이다. 실험시 토크암의 끝은 수평으로부터 1 mm 기울어진 상태이다. 자기조정은 식 (5)이 만족될 때까지 수행되었다. 그것 중 Fig. 7 에 나타낸 자기조정 퍼지 제어기의 제어계인은 1 회일 때 오차 $e(k)$ 의 소속함수의 크기 $Ee3$ 가 0.3, 오차변화 $ce(k)$ 의 소속함수의 크기 $CEe3$ 가 0.007, 제어기의 출력 $U_F(k)$ 의 소속함수의 크기 $Du3$ 가 0.3, 2 회일 때 $Ee3$ 가 0.3, $CEe3$ 가 0.007, $Du3$ 가 0.2, 3 회일 때 $Ee3$ 가 0.3, $CEe3$ 가 0.007, $Du3$ 가 0.17, 4 회일 때 $Ee3$ 가 0.3, $CEe3$ 가 0.007, $Du3$ 가 0.1 이다.

오버슈트는 1 회 때 0.0312 mm, 2 회 때 0.0586 mm, 3 회 때 0.0076 mm, 4 회 때 0.0123 mm 이내로 3 회 때 가장 적었으며, 1 회 때 흔들림이 발생하는 것은 상승시간이 빠르므로 토크암에 매달린 추가 상하 혹은 좌우로 진동하였기 때문이다. 상승시간은 1 회 때 6.45 초, 2 회 때 8.50 초, 3 회 때 16.70 초, 4 회 때 19.65 초 이내로 1 회 때 가장 빨랐다. 1~3 회때의 상승시간동안 흔들림이 발생한 것은 토크암에 매달린 추가 상하 혹은 좌우로 진동하였기 때문이다.

정상상태에서는 1 회 때에는 -0.0771~0.1270 mm 범위 내에서 흔들림이 발생되었고, 2 회 때에는 26 초 이후에 0.0082 mm 이내로 안정하게 제어되었으며, 3~4 회 때에는 목표값에 도달한 이후 각각 0.0076 mm 과 0.0123 mm 이내의 편차로 안정되게 제어되었다. 정상상태오차는 3 회 때 가장 적었다. 따라서 자기조정 퍼지제어기의 제어계인은 설정한 오버슈트, 도달시간, 정상상태오차를 만족하는 3 회 때 $Ee3$ 가 0.3, $CEe3$ 가 0.007, $Du3$ 가 0.17 로 결정되었다.

토크 표준기를 제어할 때 정상상태오차에 의해 기울어진 작은 토크암의 길이 l_t 와 정상상태오차 $e(k)$ 에 의해 다음과 같은 식 (6)에 의해 계산될 수 있다.^{[11],[12]}

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{e(k)}{l_t} \quad (6)$$

정상상태오차에 의해 기울어진 작은 토크암의 길이가 200 mm 와 정상상태오차가 0.0076 mm 를 식 (6)에 대입하여 계산한 결과 0.0022 °이었다.

정상상태오차로 인해 발생하는 토크 표준기의 제어에 의한 불확도는 식 (7)에 의해 계산될 수

있다.

$$u_{\alpha} = 1 - \cos \alpha \quad (7)$$

토크 표준기의 제어에 의해 불확도는 식 (7)에 정상상태오차에 의한 기울어진 각 0.0022 ° 를 대입한 결과 7×10^{-10} 이었다.

본 논문에서 구성한 자기조정 퍼지제어기는 오버슈트, 상승시간, 정상상태오차는 각각 0.0076 mm 이내, 16.70 초 이내, 0.0076 mm 이내로 토크 표준기의 토크암을 정밀하게 제어할 수 있었다. 정상상태오차에 의해 발생하는 토크 표준기의 제어에 의한 불확도는 7×10^{-10} 로 토크 표준기의 상대확장불확도 1×10^{-4} 보다 매우 작았다. 따라서 제어에 의한 불확도는 상대확장불확도에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었으며, 토크 표준기는 정상 상태에서 토크센서에 흔들림없이 안정되게 토크를 발생시킴을 알 수 있었다. 또한 퍼지제어기를 이용하여 토크 표준기를 제어할 경우 제어를 시작한 후 토크센서의 출력안정시간(약 20 초)을 포함하여 40 초 후에 피교정체인 토크센서의 출력을 정밀하게 측정할 수 있었다.

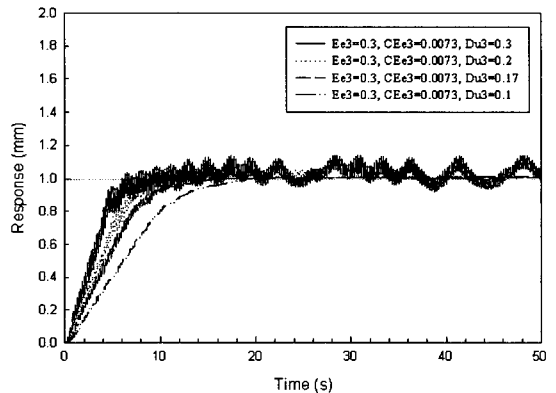


Fig. 7 Response of a self-tuning fuzzy controller

6. 결론

본 논문에서는 자기조정 퍼지제어기를 구성하여 토크 표준기의 토크암을 정밀하게 제어하였다.

자기조정으로 얻은 퍼지제어기의 제어계인은 오차 $e(k)$ 의 소속함수의 크기 $Ee3$ 가 0.3, 오차변화 $ce(k)$ 의 소속함수의 크기 $CEe3$ 가 0.007, 제어

기의 출력 $U_F(k)$ 의 소속함수의 크기 Du_3 가 0.17 이었다. 퍼지제어기를 이용하여 토크 표준기의 토크암을 제어한 결과는 오버슈트가 0.0076 mm 이내, 상승시간이 16.70 초 이내, 정상상태오차가 0.0076 mm 이내이었다.

정상상태오차에 의해 발생하는 토크 표준기의 제어에 의한 불확도는 7×10^{-10} 로 토크 표준기의 상대확장불확도 1×10^{-4} 보다 매우 작았다. 따라서 제어에 의한 불확도는 상대확장불확도에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었으며, 수동에 의해 조작되는 기존의 토크 표준기보다 매우 안정되고 정확하게 토크를 발생시킴을 알 수 있었다. 또한 구성한 퍼지제어기를 이용하여 토크 표준기를 제어할 경우, 제어를 시작한 후 토크센서의 출력안정시간(약 20 초)을 포함하여 40 초 후에 피교정체인 토크센서의 출력을 정밀하게 측정할 수 있었다.

참고문헌

1. Lee C.C., "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Controller-Part 1," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, pp. 404-418, 1990.
2. Lee C.C., "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Controller-Part 2," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, pp. 419-435, 1990.
3. Yasunobu S., S. Miyamoto, and H. Ihara, "Fuzzy control for automatic train operation system," Proc. 4th IFAC/IFIPIFORS Int. Congress on Control in Transportation Systems, Baden-Baden, April, pp. 230-239, 1983.
4. Yasunobu S., and T. Hasegawa, "Evaluation of an automatic container crane operation system based on predictive fuzzy control," Control theory Adv. Technol., Vol. 2, No. 3, pp. 419-432, 1986.
5. Fujitec F., "FLEX-8800 series elevator group control system," Fujitec Co., Ltd., Osaka, Japan, pp. 156-163, 1988.
6. Kinoshita M., T. Fukuzaki, T. Satoh, and M. Miyake, "An automatic operation method for control rods in BWR plants," Proc. Specialists' Meeting on In-Core Instrumentation and Reactor Core Assessment, Cadarache, France, pp. 234-243, 1988.
7. Kasia Y., and Morimoto Y., "Electronically controlled continuously variable transmission," Proc. Int. Congress on Transportation Electronics, Dearborn, MI, pp. 29-44, 1988.
8. Jung C.H., and Ham C.S., "A real-time self-tuning fuzzy controller through scaling factor adjustable for the steam generator of NPP," Fuzzy Sets and Systems, 74, pp. 53-60, 1995.
9. Maeda M., Murakami and S., "A self-tuning fuzzy controller," Fuzzy Sets and Systems, 51, pp. 29-40, 1992.
10. 최승민, 김훈모, "Adaptive Dual Fuzzy 알고리즘을 이용한 고층 빌딩의 엘리베이터 군 제어에 관한 연구," 한국정밀공학회, 제 18 권 4 호, pp. 112-120, 2001.
11. OIML, "Guide to the expression of uncertainty in measurement," OIML, pp. 9-28, 1993.
12. Jong N. S., et al, KRISS, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement(KRISS-98-096-SP)," KRISS, pp. 17-40, 1998.