

퍼지 PID 제어를 이용한 추종 제어기 설계

Design of Fuzzy PID Controller for Tracking Control

김 봉 주, 정 정 주

(Bong-Joo Kim and Chung Choo Chung)

Abstract : This paper presents a fuzzy modified PID controller that uses linear fuzzy inference method. In this structure, the proportional and derivative gains vary with the output of the system under control. 2-input PD type fuzzy controller is designed to obtain the varying gains. The proposed fuzzy PID structure maintains the same performance as the general-purpose linear PID controller, and enhances the tracking performance over a wide range of input. Numerical simulations and experimental results show the effectiveness of the fuzzy PID controller in comparison with the conventional PID controller.

Keywords : fuzzy PID controller, PID control, simplified fuzzy reasoning method, digital control

I. 서론

본 논문에서는 선형적인 퍼지 추론 방식[1][2]을 사용한 퍼지 PID 제어 시스템을 제안한다. 퍼지 제어 규칙과 소속 함수를 통해 제어 성능에 미치는 영향을 구체적으로 설명할 수 있는 형태로 출력표면에 비선형성을 구현하고 이를 조정하는 방법을 제시한다. 기존의 선형 PID 제어 시스템에서 비례 신호와 미분 신호 부분이 2-입력 퍼지 시스템에 의해서 가변 이득을 갖는 퍼지 PID 제어기 구조를 제안한다. 퍼지 시스템이 제공하는 가변 이득은 추종 오차값에 따라 비례 신호와 미분 신호의 가중치가 달라지도록 하며, 이를 통해서 추종 성능이 각 이득의 변화와 파라미터 변화에 대해서 선형 제어기에 비해 덜 민감해지는 효과를 가져오게 된다. 모의 실험과 실제 추종 실험을 통해 선형 PID와 퍼지 PID의 성능을 비교하고 분석한다.

Mamdani가 최초로 제어 시스템에 2-입력 1-출력의 퍼지 시스템을 적용한 이후 퍼지 제어기는 불확실한 대상이나 비선형적인 대상을 제어하는 효과적인 도구로써 널리 이용되어 왔다[3]. 그 이후로 퍼지 제어기에 대한 연구에서 주류를 이루고 있는 것은 2-입력의 퍼지 시스템을 이용하는 제어기 설계 방식이다[4]. Ying 등[5][6]은 입력 변수로써 오차값(error)과 오차의 변화율(change in error)을 사용하여 제어 입력 영역이 20개로 분할되는 2-입력 퍼지 PI 제어기를 설계하고 분석하였으며, 2-입력 퍼지 제어기의 일반적 형태를 확립하였다. 그 이후 많은 2-입력 제어기에 대한 연구가 있었으나 2-입력 퍼지 제어기 자체는 크게 2가지의 형태로 분류 가능하다. 그 중 하나는 PD형 퍼지 제어기로써 이것은 입력 변수인 오차값과 오차의 변화율로부터 직접 제어 신호를 생성하는 위치형(position type) 제어기이다. 또 다른 하나는 PI형 퍼지 제어기로써 이 형태는 PD형과 동일하게 오차값과 오차의 변화율을 입력 변수로써 사용하지만 제어 신호의 증가분(incremental control

output)을 출력으로 갖는 속도형(velocity type) 제어기이다[7].

그러나 PD형 퍼지 제어기만을 단독으로 사용하면 정상 상태 오차를 제거할 수 없게 되고, PI형 퍼지 제어기 단독으로는 과도응답의 특성이 좋지 않게 된다. 또한 3-입력 1-출력의 퍼지 시스템을 설계하여 퍼지 PID 제어기를 구성하는 것은 복잡도가 지나치고 직관적으로 제어 규칙을 결정하기가 매우 어렵게 된다[8]. 이러한 문제를 해결하기 위하여 2-입력 퍼지 제어기를 여러 개 사용한 퍼지 PID 제어기나 선형 PID 제어기의 일부분을 2-입력 퍼지 제어기로 변형한 형태의 퍼지 PID 제어기에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. Misir 등[9]은 Ying 등이 제안한 퍼지 제어기를 변형시켜 2개의 2-입력 1-출력 퍼지 제어기로 구성된 디지털 형태의 퍼지 PID 제어기를 설계하였다. Li[10]는 제어 입력 영역이 36개로 분할되는 2-입력 퍼지 제어기를 설계하여 기존의 선형 PID 제어기의 비례 제어 부분을 대체하였다. 그밖에도 매우 다양한 형태의 퍼지 PID 제어기들이 시도되었는데, Mann 등[4][11]은 퍼지 PID 제어기를 구성하는 구조적인 요소들(fuzzy PID structural elements)을 조합함으로써 나타낼 수 있는 퍼지 PID 제어기의 구조들을 퍼지 시스템의 입, 출력 개수와 형태에 따라 잘 분류하고 있다. 그러나 아직까지 퍼지 PID 제어기의 설계 절차는 경험 의존적인 면이 많고, 선형 PID 제어기와는 직접적인 성능 비교가 잘 이루어지지 못하고 있다.

본 논문에서 제안한 퍼지 PID 제어기의 구조에서는 PD형의 2-입력 퍼지 제어기를 과도 응답시의 동적 특성에 크게 영향을 미치는 부분인 비례 신호와 미분 신호 부분에 추가하여 가변 이득을 구현하였다. 그러나 정상상태 오차를 제거하기 위한 적분 신호는 기존 선형 PID 제어기에서와 같이 고정된 이득을 갖도록 하였다. 즉, 제안된 퍼지 PID 제어기는 퍼지 PD + 선형 I 형태가 된다. 퍼지 PID의 성능을 고찰하기 위해 동일한

PID 동조 상태에서 선형 PID 제어기와 퍼지 PID 제어기의 성능을 서로 비교하고 분석하였다. 이처럼 선형 PID와 직접적인 성능 비교를 수행하기 위해서는, 본 논문에서는

접수일자 : 2000. 8. 29., 수정완료 : 2001. 4. 12.

김봉주 : 한양대학교 전자통신전공학과(ultrabong@pulsus.co.kr)

정정주 : 한양대학교 전자전기공학부(cchung@hanyang.ac.kr)

※ 본 결과는 정보통신부의 정보통신우수시범학교 지원사업에 의해서 수행된 것입니다.

지금까지 가장 일반적으로 쓰이고 있는 퍼지 추론 방식인 min-max-gravity 방식을 사용하지 않고 Mizumoto[1][2]가 제안한 선형 추론 방식을 적용하였다. 본 논문에서는 먼저 선형 추론 방식을 사용해서 선형 제어기와 동일한 성능을 구현한 후에, 원하는 비선형성을 소속함수와 제어 규칙에 의해서 추가해 가는 설계 방식을 제안한다. 기존의 비선형적인 퍼지 추론 방식으로는 설계자가 의도하지 않은 비선형성이 퍼지 시스템에서 발생하게 된다, 그러나 Mizumoto가 제안한 product-sum-gravity 방식이나 이 방식이 보다 간략화 된 형태인 simplified reasoning 방식을 사용하게 되면 퍼지 제어기의 출력 표면에 추종 성능 향상을 위해 설계자가 추가한 비선형성만이 나타나도록 할 수 있다. 이렇게 함으로써 추가된 비선형성이 추종 성능에 미칠 영향을 제어 규칙과 소속함수를 통해 직관적으로 이해할 수 있게 되며, 비례 신호와 미분 신호에 대한 비선형성의 정도를 각각 독립적으로 조정할 수 있게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 제안한 전체 퍼지 PID 제어기의 구조를 도식적으로 설명하고 3장에서는 전체 퍼지 PID 구조에서 2-입력 퍼지 시스템이 적용된 부분인 PD 부분에 대한 설계 과정을 보였다. 4장에서는 기존의 산업용 보이스코일모터 PID 제어기 회로의 비례 신호와 미분 신호를 2장에서 설계한 퍼지 PD 제어기로 처리한 전체 퍼지 PID 제어기 구조와 동작을 보다 상세히 설명하였고 5장에서는 모의 실험을 통해 동일한 동조 상태에서 선형 PID 제어기와 퍼지 PID 제어기의 성능을 서로 비교하였다. 최종적으로 6장에서는 실제 추종 실험을 통해서 퍼지 PID 제어기와 선형 PID 제어기를 서로 전환해 가면서 양쪽 제어기의 성능을 비교하고 모의 실험 결과를 검증하였다.

II. 퍼지 PID 제어기의 구조

추종 오차(tracking error)에 대한 비례, 적분, 미분 신호를 합해서 제어 신호를 만드는 것이 가장 전형적인 PID 제어 방식이지만, 기준 입력(reference input)이 바뀌는 순간에는 추종 오차가 급격하게 변하기 때문에 추종 오차의 미분 신호는 시스템에 충격을 가할 소지가 있다. 따라서 시스템의 출력 위치(output position)만을 미분기에 통과시켜 미분 신호로써 사용하는 PID방식이 실용적으로 널리 쓰이고 있다. 본 논문에서는 출력 위치를 미분한 신호를 사용하는 PID 구조를 따르고 있다.

본 논문에서 제안하는 퍼지 PID 제어기는 그림 1에 나

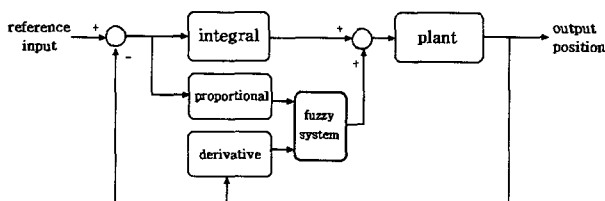


그림 1. 퍼지 PID 제어기의 블록다이어그램.
Fig. 1. Block diagram of fuzzy PID controller.

타난 것과 같은 구조를 갖는다. 이것은 퍼지 PD + 선형 I 구조의 퍼지 PID 제어기이며 선형 PID 제어기에서 비례 신호와 미분 신호만을 퍼지 시스템을 이용하여 처리하고 적분 신호는 기존의 선형적인 방식을 그대로 사용한 것이다.

적분 신호의 주된 역할은 정상 상태 오차(steady state error)를 제거하는 것이며 과도응답의 동적 특성에 큰 영향을 미치는 것은 비례 신호와 미분 신호 부분이다. 따라서 본 논문에서는 과도 응답시의 동적 특성 개선을 위해 비례 신호와 미분 신호 부분에 퍼지 시스템을 도입하여 가변 이득을 구현하였다. 퍼지 시스템의 제어 규칙과 소속함수에 의해 추가된 비선형성은 추종 오차가 상대적으로 큰 제어 초기 단계에는 비례 이득이 강조되도록 하여 추종 오차의 감소 속도를 가속시켜 주게 된다. 그리고 정착(settling) 단계부터는 미분 이득이 강조되도록 하면서 오버슈트(overshoot)를 억제하고 감쇠 효과(damping effect)를 증가시키게 된다. 본 구조에서 퍼지 시스템은 신호의 최대 범위에 대해서 정규화(normalize) 되었으며, 퍼지 시스템을 단순한 합산 블록으로 바꾸면 기존의 선형 PID와 동일한 구조가 된다. 이같은 특성을 이용해서 5장과 6장의 실험에서는 동일한 PID 동조 상태에서 퍼지 PID와 선형 PID를 서로 전환하면서 성능을 비교하였다.

III. 퍼지 PD 제어기의 설계

1. 선형 PD 제어기의 출력 표면

일반적으로 선형 PD 제어기는 다음과 같이 주어진다.

$$u = \alpha e + \beta \Delta e \tag{1}$$

여기서 α, β 는 각각 비례, 미분 이득이며 e 는 추종오차, Δe 는 오차의 변화율이다. 이러한 PD 제어기의 입력 $e, \Delta e$ 와 출력 u 사이의 관계를 3차원 공간에 나타내어 보면 그림 2와 같이 출력 표면(output surface)이 평면이 됨을 알 수 있다.

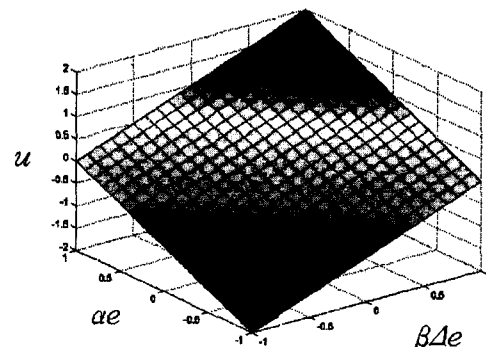


그림 2. 선형 PD 제어기의 출력 표면.
Fig. 2. Output surface of the linear PD controller.

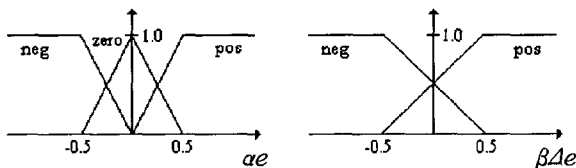
제안된 퍼지 PD 제어기 설계 방식은 선형 PD제어기의 근사화에서부터 출발한다. 선형 PD 제어기와 직접적인 성능 비교를 가능하게 하기 위해 먼저 퍼지 PD 제어기로 선

형 제어기와 동일한 성능을 구현한 뒤 퍼지 제어기에 비선형성을 추가해 가면서 양쪽 제어기의 성능을 비교하게 된다. 정확한 근사화를 위해서 선형적인 추론 방법을 사용하여 퍼지 PD 제어기를 구현하였다. 퍼지 추론 방법으로 가장 일반적으로 쓰이고 있는 min-max-gravity 방식이나 다른 비선형적인 추론 방식을 사용하게 되면, 설계시 의도하지 않은 비선형성이 발생하기 때문에 선형 제어기와 동일한 성능을 얻을 수 없고 성능을 예측하기도 어렵다[1]. 제안된 퍼지 PD 제어기에는 Mizumoto[1][2]가 제안한 선형 추론 방식인 product-sum-gravity 방식을 사용하여 모의 실험을 수행하였고 product-sum-gravity 방식을 간략화 한 형태인 simplified reasoning 방식도 적용하여 모의 실험을 수행하였다. 모의 실험을 통해서 두 방식 모두 선형 제어기와 동일한 출력 표면(output surface)과 성능을 갖는 퍼지 제어기를 구현할 수 있음을 확인하였다.

2. 소속함수(membership function)의 설계

비례 신호에 대한 입력소속함수는 그림 3의 (a)에 보인 바와 같이 zero에 해당되는 한 개의 삼각형 소속함수와 positive, negative를 의미하는 두 개의 사다리꼴 소속함수로 구성된다.

소속 정도(degree of membership)는 0과 1사이의 값으로 결정되며, 소속함수 'pos'의 경우 입력값이 0.5를 초과하면 소속도가 1이 되도록 하고, 'neg'의 경우 입력값이 -0.5 미만이면 1의 소속도를 갖도록 한다. 이처럼 비례 신호 입력 소속함수 'zero'와 'positive', 'negative'를 서로 분리해 줌으로써 오차가 클 때와 오차가 적을 때에 각각 다른 제어 규칙이 적용될 수 있도록 하였다. 미분 신호에 대해서는 그림 3의 (b)에 보인 것과 같이 'pos'와 'neg' 두 개의 사다리꼴 소속함수를 서로 중첩되도록 설계하였다.



(a) 비례 입력 소속 함수 (b) 미분 입력 소속 함수

그림 3. 입력 소속 함수.
Fig. 3. Input membership function.

출력소속함수는 그림 4에 나타난 것과 같이 총 6개의 삼각형 소속함수들로 이루어진다. 각 소속함수들을 균일하게 배치하였을 때 모든 삼각형이 절반씩 중첩되도록 밑변의 길이는 0.8로 하였고 각 삼각형의 높이는 1로 하였다. 각 소속함수들의 위치는 가운데 축에 대해서 좌우 대칭이 되도록 한다. 즉, 'psmall'과 'nsmall'은 가운데 축으로부터의 거리가 양쪽 모두 c1으로 대칭이 되며, 'pmid'와 'nmid'의 경우 모두 가운데 축으로부터 0.5+c2의 거리를 갖는다. 소속함수 'pbig'과 'nbig'의 경우에는 퍼지 시스템 출력의 최대 값이 +1과 -1이므로 삼각형 중심의 위치를 각각 +1과 -1로 선정한다. 본 퍼지 시스템 구조에서는 설계 변수(design

variable)인 c1과 c2의 값이 결정되면 모든 소속 함수의 설계가 완성된다. c1, c2값에 따라 퍼지 시스템이 갖는 비선형성의 정도가 결정되며 변수 값의 선정은 PID 동조 과정과 같이 경험적인 방법에 의해 수행된다. 3절에서는 c1과 c2 각각의 역할을 좀 더 구체적으로 고찰한다.

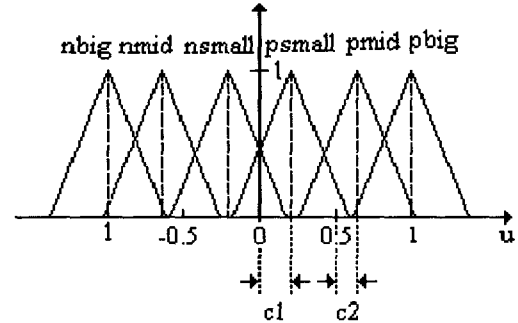


그림 4. 출력 소속 함수.
Fig. 4. Output membership function.

3. 퍼지 제어 규칙의 결정

표 1. 퍼지 제어 규칙.
Table 1. Fuzzy control rule-base.

e	neg	zero	pos
Δe			
pos	nsmall	pmid	pbig
neg	nbig	nmid	psmall

- R1) If (e is neg) and (Δe is neg) then (out is nbig)
- R2) If (e is pos) and (Δe is pos) then (out is pbig)
- R3) If (e is neg) and (Δe is pos) then (out is nsmall)
- R4) If (e is pos) and (Δe is neg) then (out is psmall)
- R5) If (e is zero) and (Δe is pos) then (out is pmid)
- R6) If (e is zero) and (Δe is neg) then (out is nmid)

입력 변수인 e가 3개의 입력 소속 함수를 갖고, Δe 가 2개의 입력소속함수를 가지기 때문에 모든 가능한 경우를 조합해 보면 표 1과 같이 총 6개의 퍼지 제어 규칙이 만들어질 수 있다.

R1과 R2는 시스템 출력이 기준입력(reference input)위치로부터 멀어지고 있을 때 반대쪽으로 끌어당기는 큰 제어신호(control signal)를 만들어 내고, R3와 R4는 시스템 출력이 기준입력위치를 향해 가고 있을 때 가속시켜주는 역할을 하며, R5와 R6은 추종 오차가 감소한 후에 미분이득을 증가시켜준다. 즉, 과도응답에서의 상승시간에 관계된 출력소속함수는 R3와 R4의 결과인 'psmall'과 'nsmall'이고, 가속 정도는 이들 소속함수의 위치를 결정하는 설계 변수(design variable)인 'c1'값에 의해서 결정된다. 그리고 정착시간 이후의 damping값을 결정하는 출력소속함수는 R5와 R6의 결과인 'pmid'와 'nmid'로써, 이들의 위치를 결정하는 설계변수인 'c2'값에 의해서 정착이후에 더해질

감쇠(damping)의 정도가 결정된다. 만약 c_1 과 c_2 를 모두 0으로 설정한다면 이 퍼지 시스템은 선형 PD 제어기와 동일한 평면적인 출력 표면을 형성하게 되며, 선형 PD 제어기와 동일한 성능을 갖게 된다. 따라서 이 경우 선형 PD 제어기는 퍼지 제어기의 하나의 특수한 경우(special case)가 된다.

4. 퍼지 추론(fuzzy reasoning)과 비퍼지화(defuzzification)

퍼지 추론으로 가장 일반화 된 방식은 min-max-gravity방식이다. 본 논문에서는 이러한 비선형적인 추론 방식으로는 선형 제어기와 동일한 출력 표면을 구현할 수가 없으므로, Mizumoto[1][2]가 제안한 선형 추론 방식인 product-sum-gravity방식을 적용하였으며 이 알고리즘이 보다 간소화 된 형태인 simplified reasoning 추론 방식도 적용해 보았다. 이 두 가지 방식은 본 논문의 퍼지 시스템 구조에서 동일한 출력 표면을 형성하며, 따라서 동일한 성능을 갖게 됨을 모의 실험을 통해 확인하였다. 실제 실험에서는 계산 속도가 상대적으로 빠른 simplified reasoning 방식으로 퍼지 추론 알고리즘을 구현하였다. 먼저 product-sum-gravity방식의 추론 과정은 그림 5에 나타낸 것과 같다[1].

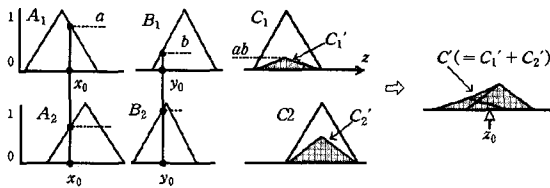


그림 5. Product-sum-gravity 방식.
Fig. 5. Product-sum-gravity method.

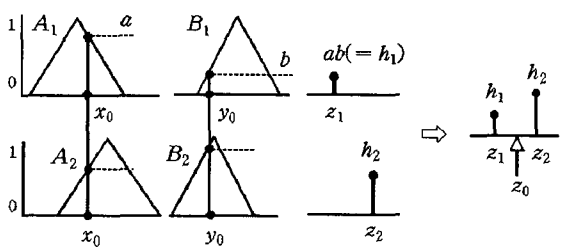


그림 6. Simplified reasoning 방식.
Fig. 6. Simplified reasoning method.

소속도 함수를 $\mu(\cdot)$ 로 표현하면 이 방식은 다음과 같이 수식적으로 표현할 수 있다.

$$\mu_{C'}(z) = \mu_{A_1}(x_0) \cdot \mu_{B_1}(y_0) \cdot \mu_{C_1}(z) \quad (2)$$

여기서 \cdot 는 대수적인 곱(algebraic product)을 의미한다. 최종 추론결과인 C' 는 각 퍼지 제어규칙의 결과인 C_1', C_2', \dots, C_n' 의 합으로써 (3)과 같이 만들어진다.

$$\begin{aligned} C' &= C_1' + C_2' + \dots + C_n' \\ \mu_{C'}(z) &= \mu_{C_1'}(z) + \dots + \mu_{C_n'}(z) \end{aligned} \quad (3)$$

비퍼지화 방법으로는 무게중심법(center of gravity)이 사용된다. 따라서 퍼지 시스템의 출력값 z_0 는 C' 의 무게중심으로써 (4)에 의해 계산된다.

$$z_0 = \frac{\int z \cdot \mu_{C'}(z) dz}{\int \mu_{C'}(z) dz} \quad (4)$$

실제의 추종 실험을 위해서 C-언어로 작성된 디지털 퍼지시스템에서는 product-sum-gravity방식이 간소화 된 형태인 simplified reasoning방식을 사용하였다. 이 때 추론 결과는 product-sum-gravity방식의 결과와 동일하며, product-sum-gravity방식에 비해 퍼지 알고리즘의 수행 속도를 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 그림 6에 도식적으로 simplified reasoning방식의 추론과정을 나타내었다.

Simplified reasoning 방식에서 i 번째 퍼지 제어 규칙의 적합도(degree of fitness)는 (5)와 같이 계산된다.

$$h_i = \mu_{A_i}(x_0) \cdot \mu_{B_i}(y_0) \quad (5)$$

(5)에서 구해진 각 퍼지 제어 규칙의 적합도 h_i 를 각 규칙의 추론 결과인 z_i 의 가중치로써 사용하여 (6)에 의해 z_i 의 평균을 구하면(weighted average of z_i by the degree h_i) 비퍼지화 과정이 모두 완료된다.

$$z_0 = \frac{h_1 \cdot z_1 + h_2 \cdot z_2 + \dots + h_n \cdot z_n}{h_1 + h_2 + \dots + h_n} \quad (6)$$

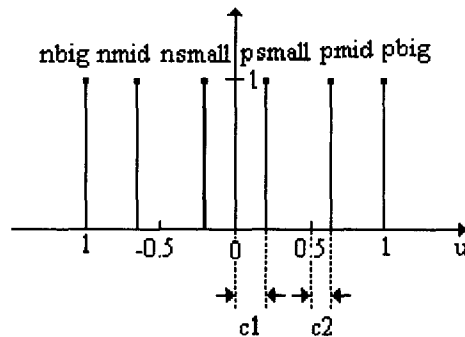


그림 7. Simplified reasoning방식을 위해서 변형된 출력 소속 함수.
Fig. 7. Modified output membership function for simplified reasoning method.

이러한 simplified reasoning방식을 사용하기 위해서는 그림 4에 나타낸 삼각형 형태의 출력소속함수 대신에 그림 7에 나타낸 것과 같이 싱글톤(singleton)형태의 소속 함수를 사용해야 한다. 이 때에도 퍼지 시스템의 설계 변수로는 여전히 c_1 과 c_2 가 사용되며 그 역할도 동일하다.

5. 퍼지 제어기의 출력 표면

설계된 2-입력 퍼지 시스템의 출력 표면을 min-max-gravity방식에 의해서 구현된 퍼지 시스템과 비교해 보고, 설계변수 c_1, c_2 값이 출력 표면에 미치는 영향을 고찰함으로써 PID 제어기를 완성하였을 때의 추종 성능의 변화를

예측해 볼 수 있다.

그림 8은 min-max-gravity 방식으로 구현된 퍼지 PD 제어기의 출력표면이다. 가장자리는 퍼지 시스템의 출력이 포화(saturation)되는 영역이며 중앙의 마름모꼴 부분이 실제로 제어 동작 중에 사용되는 부분이다. 그림 8에서 보면 추론 과정에서 생기는 비선형성으로 인해서 중앙의 제어 동작 영역의 표면이 완전한 평면을 이루지 못하고 있음을 알 수 있다. 따라서 선형 PD 제어기를 그림 8의 제어기로 대체했을 때는 선형 제어기와 동일한 성능을 보장할 수 없게 되며 입력 신호의 크기와 적용 영역에 따라서 제어 성능이 일정치 못하게 된다[1].

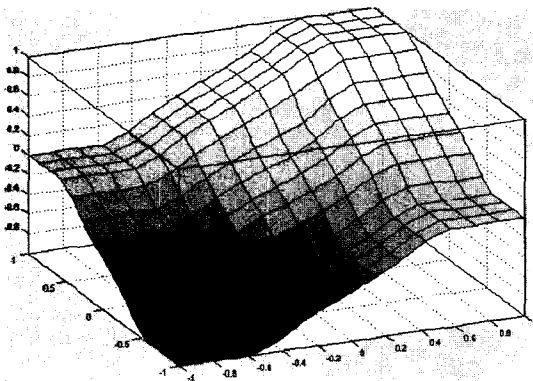


그림 8. Min-max-gravity 방식으로 구현된 퍼지 PD 제어기의 출력 표면.

Fig. 8. Output surface of the fuzzy PD controller using min-max-gravity method.

그림 9는 product-sum-gravity 방식, 또는 simplified 방식으로 구현된 퍼지 PD 제어기의 출력 표면을 보이고 있다. 이것은 $c1=c2=0$ 으로 설정된 경우이며 중앙의 제어 동작 영역 표면이 완전한 평면을 이루고 있다. 따라서 이 퍼지 PD 제어기는 선형 PD 제어기와 동일한 성능을 갖는다[1].

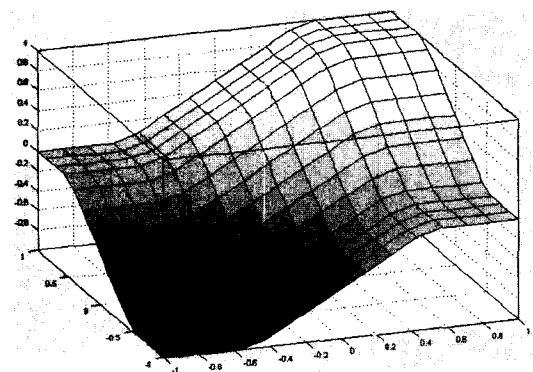


그림 9. Product-sum-gravity 방식, 또는 simplified 방식으로 구현된 퍼지 PD 제어기의 출력 표면 ($c1=c2=0$).

Fig. 9. Output surface of the fuzzy PD controller using product-sum-gravity method or simplified method ($c1=c2=0$).

그림 10은 퍼지 PD 제어기의 설계변수인 $c1, c2$ 의 값을 0 대신 각각 0.25와 0.1로 설정했을 때의 출력 표면을 나타낸 것이다. 이 출력 표면을 살펴보면 우선 좌우 양 끝 부분이 선형 PD 제어기와 같이 0에 있지 않으며, 왼쪽이 내려가고 오른쪽이 올라간 형태로 기울어 있다. 이것은 R3과 R4의 출력소속함수인 'psmall'과 'nsmall'의 위치를 결정하는 변수 $c1$ 이 양의 값을 가지기 때문이며, 추종 오차의 감소 속도를 가속시키는 효과를 나타내고 있다. 그리고 이 표면은 ae 값이 변화함에 따라서 βde 축 방향의 기울기가 달라지고 있다. 이것은 미분이득이 추종 오차에 따라 변화하는 것을 의미하며, 추종 오차 e 가 0인 부분을 잘라보면 기울기가 가장 크고 오차가 커질수록 점진적으로 기울기가 작아지고 있다. 따라서 추종 오차가 0에 가까워 질수록 큰 미분이득을 가지게 됨을 알 수 있다. 이러한 가속효과와 기준입력위치 근처에서의 감쇠(damping) 증가효과는 각각 $c1, c2$ 의 값을 크게 설정 할수록 커지게 된다.

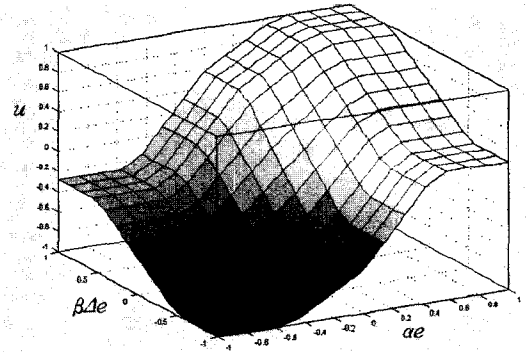


그림 10. Product-sum-gravity 방식, 또는 simplified 방식으로 구현된 퍼지 PD 제어기의 출력 표면 ($c1=0.25, c2=0.1$).

Fig. 10. Output surface of the fuzzy PD controller using product-sum-gravity method or simplified method ($c1=0.25, c2=0.1$).

IV. 퍼지 PD + 선형 I 구조의 퍼지 PID 제어기

설계된 퍼지 제어기의 특성을 알아보기 위해서 선형 아날로그 PID 제어기에 의해 제어되는 산업용 보이스코일모터(voice coil motor)시스템을 대상으로 모의 실험과 실제 추종 실험을 수행하였다. 그림 11은 실험에 사용된 PID 제어 시스템을 블록 다이어그램으로 나타낸 것이다. 선형 PID와 퍼지 PID의 성능 비교를 위해, 비례 신호와 미분 신호를 선형적으로 처리하거나 또는 퍼지 PD로도 처리할 수 있도록 스위치를 포함시켰다. 본 PID 구조는 미분신호로써 추종 오차의 변화율을 사용하는 방식이 아니고 출력 위치의 변화율을 사용하는 구조인데, 이러한 경우에도 앞서 설계한 퍼지 제어기를 변형 없이 그대로 사용할 수 있다.

실제의 실험을 위해서 아날로그 PID 회로가 제작되었으며, 비례신호와 미분신호를 처리하기 위한 퍼지 PD 제어기 부분이 그림 13과 같이 2-채널 16bit AD/DA 보드와 TMS320C32 DSP를 이용하여 구현되었다. 퍼지 알고리즘

은 simplified reasoning 방식을 사용하여 C언어로 작성되었고, 샘플링 속도는 20KHz로 하였다.

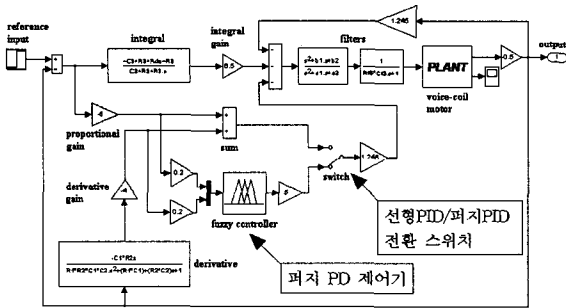


그림 11. 퍼지 PD 제어가 포함된 아날로그 PID 제어 시스템의 simulink용 블록 다이어그램.
Fig. 11. Block diagram of analog PID control system including fuzzy PD controller.

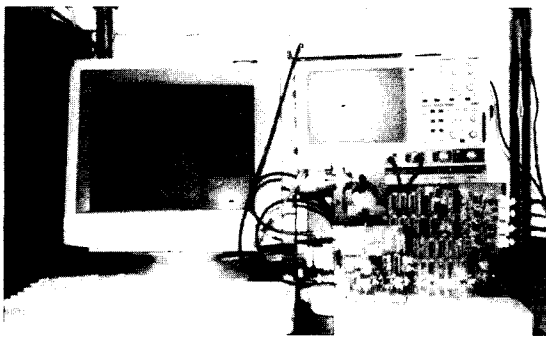


그림 12. 퍼지 PID 제어 실험에 사용된 보이스코일모터 PID제어 시스템.
Fig. 12. PID control system of voice coil motor for fuzzy PID experiment.

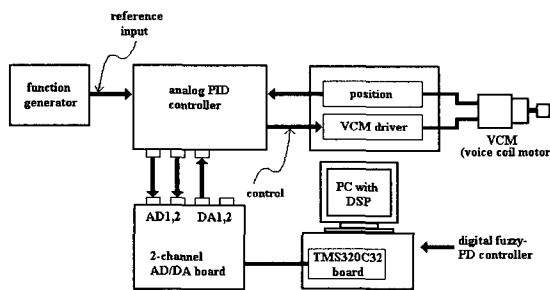


그림 13. 퍼지 PID 제어기와 선형 PID 제어기의 성능 비교를 위한 실험 구성.
Fig. 13. Experimental set-up for the comparison between fuzzy PID controller and linear PID controller.

V. 모의 실험 결과

제안된 퍼지 PID 제어기의 성능을 고찰하기 위해서 Matlab과 Simulink를 이용하여 모의 실험을 수행하였다.

먼저 최적화된 PID 이득값을 찾고, 이 값을 중심으로 적분 이득, 비례이득, 미분이득 각각을 조금씩 증가, 감소 시키면서 선형 PID와 퍼지 PID의 추종 성능을 비교하였다.

그림 14는 적분 이득을 변화시키면서 선형 PID와 퍼지 PID의 계단 응답을 본 것이다. 이 때 퍼지 제어기의 설계 변수는 $c1=0.33$, $c2=0.08$ 로 설정하였다. 그림에서 점선으로 나타난 응답이 선형 PID를 사용하여 얻은 것이고, 실선이 퍼지 PID에 의한 결과이다. 그림 14로부터 적분이득 K_i 의 증가로 인해 발생하는 오버슈트가 퍼지 시스템을 사용함으로써 감소되고 있음을 알 수 있으며, K_i 가 작을 때 생기는 오차값도 퍼지 시스템을 사용했을 때 더 작아짐을 알 수 있다. 그리고 전반적으로 응답곡선의 상승시간이 퍼지 시스템의 사용으로 인해 단축되고 있으며, 퍼지 PID를 사용한 쪽의 성능이 선형 PID보다 적분 이득의 변화에 대해서 덜 민감한 특성을 보이고 있다.

그림 15과 그림 16은 각각 비례이득 K_p 와 미분이득 K_d 의 변화에 대해서 선형 PID와 퍼지 PID의 추종 성능을 비교한 것이다. 이 경우에도 마찬가지로 퍼지 PID쪽이 선형 PID에 비해서 대체적으로 적은 오버슈트와 빠른 상승시간을 갖는 것을 알 수 있다. 전반적으로 퍼지 PID를 사용하였을 경우 선형 PID를 사용한 경우에 비해서 비례, 적분, 미분 이득 각각의 변화에 대한 성능 변화의 민감도가 작아지는 특성을 보였다.

그림 17은 보이스코일모터의 토크상수 K_t 를 변화시키면서 계단 응답을 나타낸 것이다. 이 때 PID 이득은 최적 동조 상태인 $P=5$, $I=8$, $D=4$ 로 설정하였다. K_t 가 20% 증가하였을 때는 선형 PID와 퍼지 PID 양쪽이 비슷한 성능을 보였으며, K_t 가 20% 감소하였을 때는 시스템 출력에 오버슈트가 유발되었는데, 이 경우 선형 PID에 비해 퍼지 PID의 응답이 더 적은 오버슈트를 가짐을 알 수 있다. 그리고 각 제어이득의 변화에 대한 경우에서의 결과와 유사하게 토크상수가 변화한 경우에 대해서도 퍼지 PID는 전체 성능 변화의 폭이 선형 PID에 비해 적음을 알 수 있다.

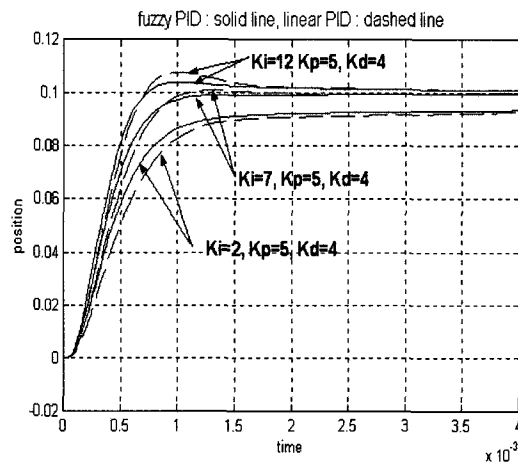


그림 14. 적분이득의 변화에 따른 선형 PID와 퍼지 PID의 계단 응답 비교.
Fig. 14. Step response of the linear PID and fuzzy PID with varying integral gain.

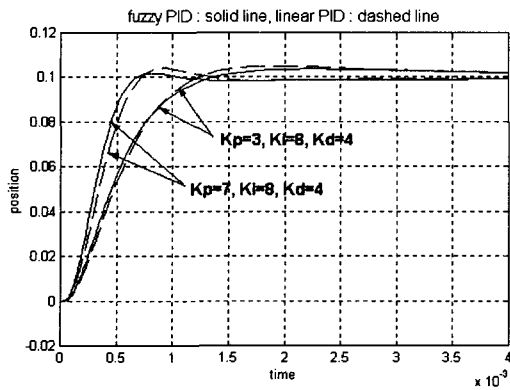


그림 15. 비례이득의 변화에 따른 선형 PID와 퍼지 PID의 계단 응답 비교.

Fig. 15. Step response of the linear PID and fuzzy PID with varying proportional gain.

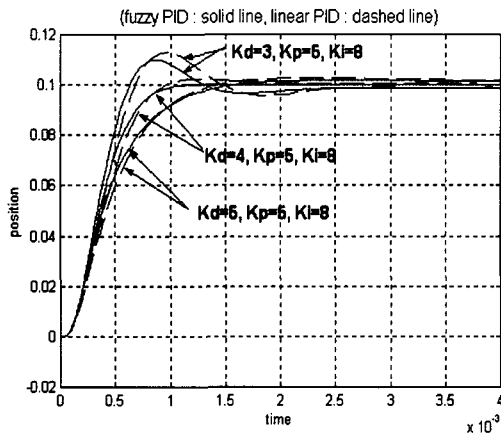


그림 16. 미분이득의 변화에 따른 선형 PID와 퍼지 PID의 계단 응답 비교.

Fig. 16. Step response of the linear PID and fuzzy PID with varying derivative gain.

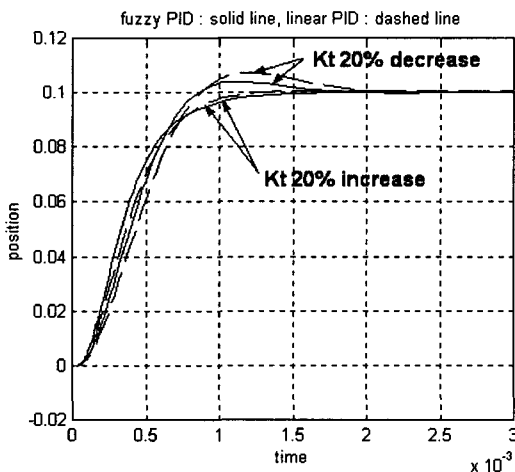
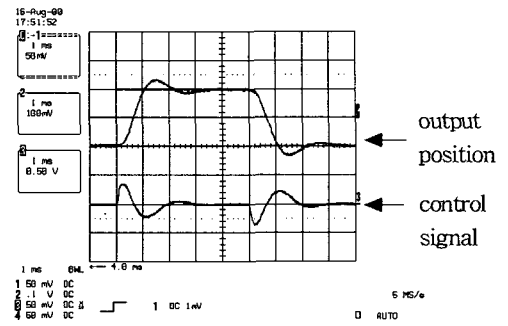
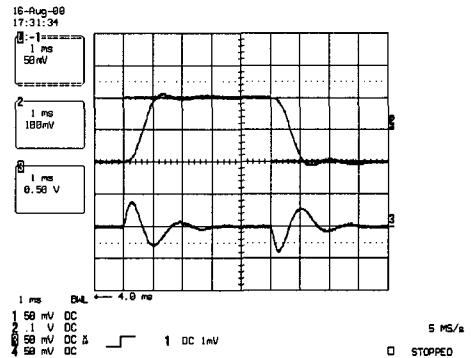


그림 17. 토크상수의 변화에 따른 선형 PID와 퍼지 PID의 계단 응답 비교.

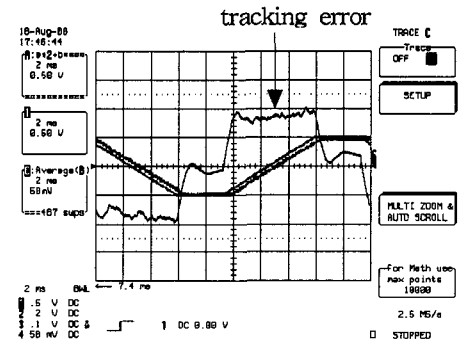
Fig. 17. Step response of the linear PID and fuzzy PID with varying torque constant.



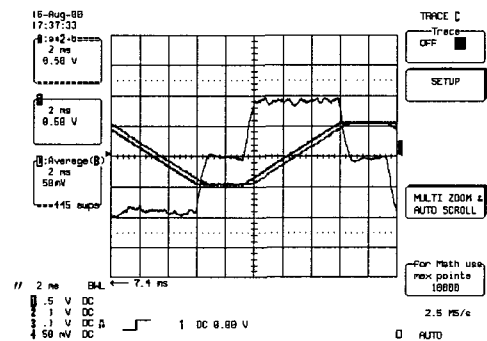
(a) 선형 PID의 계단 응답



(b) 그림 (a)와 동일한 동조 상태에서 퍼지 PID의 계단 응답



(c) 사다리꼴 입력에 대한 선형 PID의 오차신호



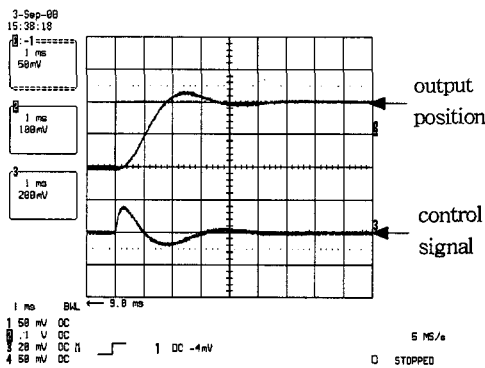
(d) 그림 (c)와 동일한 동조 상태에서 사다리꼴 입력에 대한 퍼지 PID의 오차신호

그림 18. 최적 동조되지 않은 동일한 PID이득에서의 선형 PID와 퍼지 PID의 응답 비교(c1=0.2, c2=0.07).

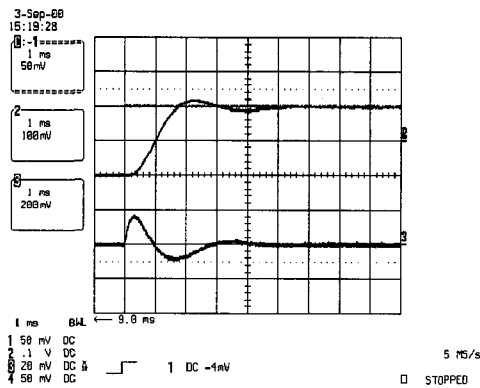
Fig. 18. Comparison between linear and fuzzy PID under roughly tuned same PID gains.(c1=0.2, c2=0.07).

VI. 실험 결과

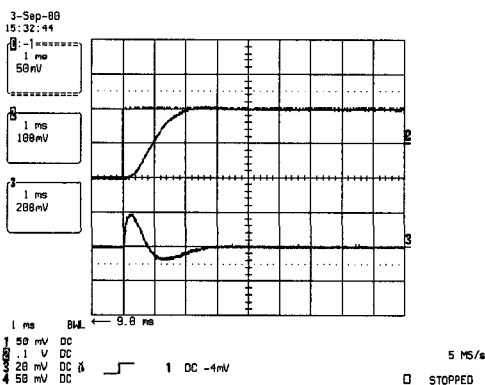
실제 추종 실험에서는 그림 13에 보인 것과 같이 신호발생기(function generator)의 출력 신호를 기준 입력 신호로 사용하였으며 모터의 위치 센서(position sensor)로부터 검출된 출력 위치 신호를 되먹임(feedback) 신호로 사용하였다. 비례 이득과 미분 이득을 통과한 신호는 2-채널 16bit AD/DA 보드에서 20KHz로 샘플링하여 DSP 보드에서 C 언어로 작성된 퍼지 PD 알고리즘을 적용시킨 후 다시 아날로그 제어기로 되돌려 보내진다. 그러면 이 퍼지 출력 신호를 적분 신호와 합쳐서 모터에 들어갈 PID 제어 출력 신호를 만들어 내게 된다.



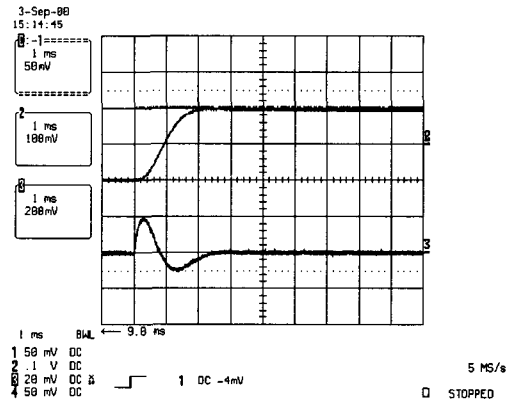
(a) 선형 PID (K_t : -20%)



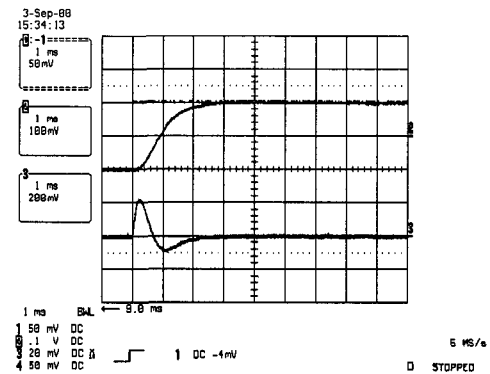
(b) 퍼지 PID (K_t : -20%)



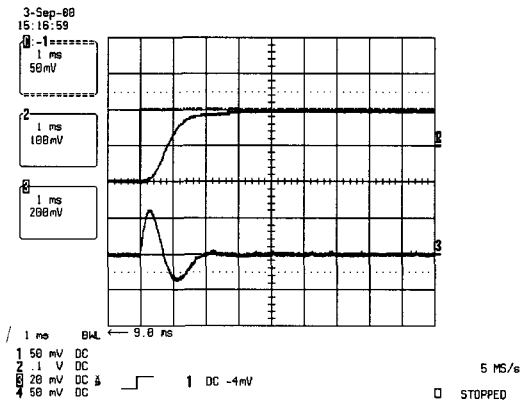
(c) 선형 PID (K_t 변화없음)



(d) 퍼지 PID (K_t 변화없음)



(e) 선형 PID (K_t : +20%)



(f) 퍼지 PID (K_t : +20%)

그림 19. 토크상수의 변동에 따른 선형 PID와 퍼지 PID의 응답 비교.

Fig. 19. Comparison between linear PID and fuzzy PID with torque constant variation.

그림 18에 보인 실험 결과는 PID 이득이 최적으로 동조(tuning)되지 못한 상황에서 선형 PID와 퍼지 PID의 추종 성능을 비교한 것이다. 그림 18의 (a)와 (c)는 각각 선형 PID의 계단응답과 사다리꼴 기준입력에 대한 추종오차를 측정된 것인데, 계단응답이 오버슈트를 가지고 있으며, 사다리꼴 입력에 대한 추종오차도 균일하지 못함을 알 수 있

다. 이에 반해서 그림 18의 (b)와 (d)에 각각 나타낸 퍼지 PID의 추종 성능을 보면, 계단응답에서의 오버슈트가 크게 감소되었고 사다리꼴 기준입력에 대한 추종 오차도 상당히 균일해 졌음을 알 수 있다 또한 사다리꼴 수평부분의 추종 오차도 퍼지 PID쪽이 더 효과적으로 제거하고 있다.

그림 19는 모터의 토크상수가 원래의 값으로부터 변동이 있을 때의 계단응답을 본 것이다. 실제 토크상수를 바꿀 수 없으므로 실험에서는 PID 제어기로부터 출력되는 모터 제어를 위한 제어 입력의 이득을 변화시켜서 토크상수가 변한 것과 동일한 효과를 얻었다. 그림 19의 (a)와 (b)는 각각 토크상수가 20% 감소했을 때의 선형 PID의 계단응답과 퍼지 PID의 계단응답을 측정된 것으로, 양쪽 모두 상승시간이 원래의 토크상수를 가졌을 때인 (c)와 (d)에 비해 늦어지고 오버슈트도 발생하고 있다. 그러나 퍼지 PID의 오버슈트 감소 효과는 여기서도 나타나고 있다. 그리고 토크상수를 20% 증가시킨 경우인 (e)와 (f)에서는 모의실험에서도 나타났던 것처럼 양쪽의 성능이 비슷하게 나타나고 있지만 (f)에서 초기 상승시간이 (e)에 비해 빠르고 정착시에 damping이 증가하는 퍼지 PID의 특징을 확인할 수 있다.

VII. 결론

본 연구에서는 기존의 선형 PID 제어기에서 비례 신호와 미분 신호 부분을 2-입력 1-출력의 퍼지 시스템을 사용해서 처리함으로써 추종 성능의 향상을 도모한 퍼지 PD + 선형 I 구조의 퍼지 PID 제어기를 설계하고 구현하였다. 그리고 이를 산업용 보이스코일모터 시스템의 PID제어에 응용하여 모의실험과 실제 추종실험을 통해 선형제어기와 비교하면서 그 효용성을 입증하였다. 선형적인 퍼지 추론 방법을 사용함으로써 출력 표면에 성능 향상을 위해 의도된 비선형성만을 설계하여 추가할 수 있도록 하였다. 비선형성은 퍼지 제어 규칙과 소속 함수의 설계를 통해 구현되며, 비례 이득과 미분 이득이 제어 상황에 따라서 점진적으로 변화하며 역할 분담을 이룰 수 있도록 해준다. 즉, 추종 오차가 비교적 큰 상황에서는 비례 이득이 주도하게 하고, 추종 오차가 적어지면 미분이득이 강조되도록 한다. 이렇게 설계된 퍼지 PID 제어기는 선형 제어기에 비해 빠른 상승시간을 가지며 오버슈트를 효과적으로 억제하여 주기 때문에 선형 제어기와 비교하였을 때 추종성능이 각 제어 이득과 파라미터의 변화에 대해서 보다 덜 민감해지는 특성을 보였다. 본 논문에서 제시된 퍼지 PID 제어기는 복잡도를 가능한 한 최소화하여 두 개의 설계변수만으로 비례이득과 미분이득의 변화율을 조정할 수 있도록 하였으나 여전히 퍼지 제어기의 동조가 시행착오를 통해 경험적으로 이

루어지므로 향후 뉴로 퍼지나 유전자 알고리즘 등과 접목을 시도하여 최대한 동조 과정의 자동화를 꾀할 수 있는 여지도 남아있다.

참고문헌

- [1] M. Mizumoto, "Realization of PID controls by fuzzy control methods", *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 70, pp. 171-182, 1995
- [2] Wu Zhi Quao and M. Mizumoto, "PID type fuzzy controller and parameter adaptive method", *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 78, pp. 23-35, 1996
- [3] L.-X. Wang, *A Course in Fuzzy System and Control*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1997.
- [4] G. K. I. Mann, B. G. Hu, and R. G. Gosine, "Analysis of direct action fuzzy PID controller structures", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 29, no. 3, pp. 371-388, 1999.
- [5] H. Ying, W. Siler, and J. J. Buckley, "Fuzzy control theory: A nonlinear case", *Automatica*, vol. 26, pp. 513-520, 1990.
- [6] H. Ying, "Theory and application of a novel fuzzy PID controller using a simplified Takagi-Sugeno rule scheme", *Information Sciences*, vol. 123, pp. 281-293, 2000.
- [7] H. -X. Li and H. B. Gatland, "Conventional fuzzy control and its enhancement", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. B*, vol. 26, pp. 791-797, 1996.
- [8] 채창현, "간편 간접추론방법을 이용한 퍼지 디지털 PI+D 제어기의 설계", *Journal of Control, Automation and System Engineering*, vol. 6, no. 1, pp. 35-41, 2000.
- [9] D. Misir, H. A. Malki, and G. Chen, "Design and analysis of a fuzzy proportional-integral-derivative controller", *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 79, pp. 297-314, 1996
- [10] W. Li, "Design of a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 6, no. 4, pp. 449-463, 1998.
- [11] B. G. Hu, G. K. I. Mann, and R. G. Gosine, "New methodology for analytical and optimal design of fuzzy PID controller", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 7, no. 5, pp. 521-539, 1999.



김 봉 주

1999년 한양대 전자통신전파공학과 졸업. 1999년~현재 한양대 전자통신전파공학과 석사과정. 관심분야는 비선형 제어, 디지털 제어, 퍼지 제어 및 지능 제어.



정 정 주

1981년 서울대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 석사. 1993년 USC 공학박사. 1983~1985 LG 전자 중앙연구소 주임 연구원. 1994~1997 삼성 종합기술원 수석 연구원 1997~현재 한양대학교 전자전기공학부 조교수. 관심분야는 비선형 제어, 로봇틱스, 디스크 드라이브 서보제어, 듀얼 액추에이터 정밀제어 등임.