자기 동조형 퍼지 슬라이딩 모드 제어를 이용한 유압 굴삭기의 제어

Control of Hydraulic Excavator Using Self Tuning Fuzzy Sliding Mode Control

서 삼 준*, 김 동 식, 김 동 원, 박 귀 태
(Sam-Jun Seo, Dongsik Kim, Dongwon Kim, and Gwi-Tae Park)

Abstract : In this paper, to overcome drawbacks of FLC a self tuning fuzzy sliding mode controller is proposed, which controls the position of excavator's attachment, which can be regarded as an ill-defined system. It is reported that fuzzy logic theory is especially useful in the control of ill-defined system. It is important in the design of a FLC to derive control rules in which the system's dynamic characteristics are taken into account. Control rules are usually established using trial and error methods. However, in the case where the dynamic characteristics vary with operating conditions, as in the operation of excavator attachment, it is difficult to find out control rules in which all the working condition parameters are considered. Experiments are carried out on a test bed which is built around a commercial Hyundai HX-60W hydraulic excavator. The experimental results show that both alleviation of chattering and performance are achieved. Fuzzy rules are easily obtained by using the proposed method and good performance in the following the desired trajectory is achieved. In summary, the proposed controller is very effective control method for the position control of the excavator's attachment.

Keywords : hydraulic excavator, fuzzy logic control, fuzzy sliding mode control, self tuning fuzzy sliding mode control

I. 서론

유압 굴삭기는 그림 1과 같이 크게 하부 기구, 상부 선회체, 작업장치(attachment)로 구성이 되어 있다. 하부 기구는 장비 전체를 지지하며, 여기에는 주행을 위한 부품들이 설치되어 있다. 상부 선회체는 하부 기구에 대해 360도 회전이 가능하고, 여기에는 작업장치를 비롯하여 엔진 등 주요 부품이 설치되어 있다. 작업장치는 일반적으로 붐, 암, 버켓의 3관절 구조로 구성되며 작업 종류에 따라 특수한 장치를 설치할 수 있다. 현재의 굴삭기 작업장치는 운전자의 레버조작에 의한 제어 밸브의 개폐에 따라 속도 및 위치가 제어된다. 운전자의 목측과 수동조작에 의하여 제어되므로 운전자의 숙달 정도에 따라 작업 능률이 좌우되고 연속 반복 작업시 작업 효율이 떨어진다. 특히, 일정한 궤도를 따라 굴삭하는 경우 고도의 숙련과 집중력이 필요할 뿐만 아니라 숙련된 운전자라 할지라도 피로에 의해 작업 능률이 저하된다. 따라서 운전자의 작업 환경 개선과 작업 능률 향상의 측면에서 유압 굴삭기 작업장치의 자동화에 관한 연구는 상당히 의미 있는 과제이다. 굴삭기 작업장치는 작업조건에 따라 시스템의 구동 특성이 다양하여 그 특성을 정확히 묘사하는 수학적 모델을 세우기 어렵고, 수학적 모델을 세웠다 할지라도 비선형성과 시스템 상태변수간의 결합이 강하여 이론적 해석을 통한 현대 제어 이론의 적용이 곤란하다.

또한 작업 환경에 따라 외란이 다양하게 변하고, 제어 입력 영점 좌우의 제어 특성이 상이하여 PID 제어기의 적용에도 어려움이 있다. 반면 굴삭기 작업장치는 사람에 의해 수학적 모델과 이론적 해석 없이도 다양한 작업환경과 비선형적 제어 특성에 불구하고 훌륭히 제어되고 있다. 그리고 운전 특성 및 정적 성능을 운전 전문가와 설계 전문가를 통해 쉽게 얻을 수 있는 특징을 가지고 있다. 이상의 특징을 고려할 때 수학적 모델의 이론적 해석을 이용하기보다 운전 특성과 정적 성능을 이용한 제어기의 설계와 다양한 작업 환경에 대해서도 견실한 제어 성능을 보장하는 제어기가 요청된다.

가변 구조 제어 이론은 기존의 고전적인 제어 이론에 의한 기법과는 달리 과도 기간 중에 제어 계통의 구조를 편차나 상태 벡터들의 정보 또는 이들의 함수에 따른 스위칭 논리에 따라 의도적으로 변환함으로써 다른 제어 기법에서 얻기 어려운 속응성과 강인성을 동시에 구현할 수 있는 기법으로 알려져 있다[1,2]. 특히 계통의 상태가 슬라이딩 모드에 머물도록 제어 입력을 구성함으로써 계통의 응답이 외란이나 파라미터의 변동에 대하여 강인성을 유지하도록 할 수 있으며, 일반 적응 제어 기법에서와 같은 파라미터 추정 등의 과정이

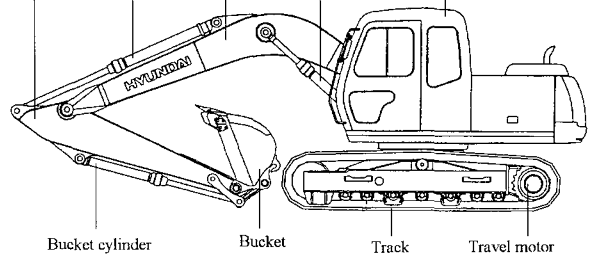


그림 1. 유압 굴삭기.
Fig. 1. Hydraulic excavator.

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수 : 2004. 8. 23., 채택확정 : 2004. 12. 13.
서삼준 : 안양대학교 전기전자공학과(ssj@anyang.ac.kr)
김동식 : 순천향대학교 정보기술공학부(dongsik@sch.ac.kr)
김동원, 박귀태 : 고려대학교 전기공학과
(upground@korea.ac.kr/gtpark@korea.ac.kr)

필요하지 않게 되어 쉽게 물리적으로 구현할 수 있는 장점이 있다[3-5]. 1965년 L.A.Zadeh에 의해 퍼지 집합 이론이 처음 소개된 후 활발히 연구되어 온 퍼지논리 제어기는 숙련된 조작자의 언어적 제어 규칙을 퍼지 알고리즘에 의하여 구현한 것으로 계통에 대한 적절한 제어 규칙을 수립하여 수학적 모델에 근거한 기존의 해석적인 제어기에 비하여 그 성능이 뒤지지 않을 뿐 아니라 파라미터 변화 및 외란에 대하여도 강인성이 뛰어나다는 장점을 가지고 있기 때문에 여러 가지 적용사례가 많이 발표되었다[6-9].

최근에 잘 정의되지 않은 복잡한 시스템에 적합한 퍼지 논리 제어기와 계통의 복잡성이나 비선형 등으로 인하여 수학적인 정보가 부족하거나 불확실성을 포함하는 계통에 대한 강인성을 보장하는 가변 구조 제어 기법을 결합한 퍼지 슬라이딩 모드 제어기의 연구가 활발히 진행되고 있다[10-12]. 이러한 퍼지 슬라이딩 모드 제어 기법은 기존의 가변 구조 제어의 장점을 가지면서 퍼지 논리 제어기의 특성을 가지고 있어 비선형성, 시변성 및 기타의 불확실성이 포함되어 있는 유압 굴삭기와 같이 잘 정의 되지 않는 시스템의 제어에 효과적으로 사용될 수 있다.

퍼지 논리 제어기에서 가장 중요한 제어 규칙은 경험자의 직관이나 경험으로부터 얻어져 언어적 법칙이나 퍼지 관계로 표현된다. 그러나 이러한 제어 규칙은 설계자의 경험과 시행 착오, 운전자의 조작 방법에 의존하여 설계되고 있어 체계적인 설계 방법이 없다는 문제점을 가지고 있다. 또한 불연속 제어 입력을 인가함으로써 지연시간이 존재하는 실제 계통에 적용할 때에는 제어기 설계시 고려되지 않은 동특성이 여기되어 상태가 채터링한다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 퍼지 규칙을 스스로 생성하여 주는 최대 경사법을 이용한 자기 동조형 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 제안하여 작업 환경과 작업 조건에 따라 동특성이 크게 변하고, 유압 시스템이 복잡하여 수학적 모델링이 어려운 반면 운전 전문가와 설계 전문가가 있어 동작 및 운전 특성을 언어적으로 표현하기 쉬운 제어 특성을 가지고 있는 유압 굴삭기 작업장치의 위치 제어에 적용하여 그 유용성을 입증하고자 한다.

II. 유압굴삭기의 모델링

1. 작업장치

굴삭기의 작업장치는 붐(boom), 암(arm), 버켓(bucket)의 3 관절 구조로 되어 있으며, 각각 붐 실린더(boom cylinder), 암 실린더(arm cylinder), 버켓 실린더(bucket cylinder)에 의해 붐, 암, 버켓의 위치 θ_1, θ_2, θ_3가 각각 제어된다. 버켓 실린더와 버켓은 넓은 작업 범위를 위해 4절 링크 구조로 연결되어 있다. 작업장치의 수학적 모델링을 수행하기 위해 그림 2와 같은 좌표계를 설정하여 굴삭기의 전체 관절의 모양과 무게 중심을 나타내었다.

Lagrange 운동 방정식을 이용하여 굴삭기 작업장치의 운동 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$J(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta,\dot{\theta}) + g(\theta) = \tau \qquad (1)$$

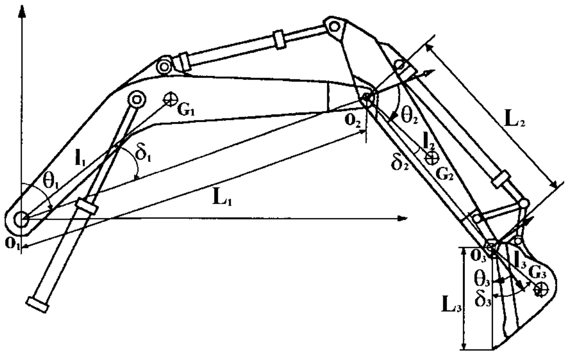


그림 2. 작업장치의 파라미터.
Fig. 2. Parameters for attachment.

여기서 $J(\theta)$ 는 관성항이고 $h(\theta,\dot{\theta})$ 는 Coliolis 힘과 원심력에 의한 항, $g(\theta)$ 는 중력항을 나타내고 τ 는 작업장치에 인가되는 토크이다.

2. 유압 시스템

굴삭기의 유압 시스템은 유압 펌프(hydraulic pump), 비례 제어 밸브(proportional control valve), 주 제어 밸브(main control valve), 유압 실린더(hydraulic cylinder)와 보조 밸브류로 구성이 되어 있다. 유압 펌프는 두개의 가변 용량형 피스톤 펌프(variable displacement piston pump)로서 디젤 엔진에 의해 구동된다. 각각의 펌프는 자기 압력(self pressure)과 상대 압력(the other pump pressure)과 회로로부터의 파일럿 압력(pilot pressure)에 의해 사판각, 즉 토출 유량이 제어된다. 주 제어 밸브는 방향 제어 밸브(directional control valve)로서 붐, 암, 버켓을 각각 제어한다. 주 제어 밸브는 비례 제어 밸브로부터의 파일럿 압력에 의해 스풀(spool)의 위치가 제어되고 유로가 형성된다. 유압 실린더는 편로드 복동 실린더로서 2개의 붐 실린더, 1개의 암 실린더와 1개의 버켓 실린더가 사용된다. 그리고, 유압 펌프의 사판각 제어용 파일럿 압력 형성과 유량 합류를 위한 로직 밸브(logic valve), 회로 보호를 위한 릴리프 밸브(relief valve), 유량의 역류 방지를 위한 체크 밸브(check valve)등의 보조 밸브류가 사용된다.

2.1 비례 제어 밸브의 모델링

비례 제어 밸브는 제어 전류에 상응한 압력을 출력하여 주 제어 밸브의 스풀 변위를 변화시키는 역할을 한다. 비례 제어 밸브의 수학적 모델은 구성 부품의 동적 모델링을 통하여 기술될 수 있으나 실제 시스템에서는 보통 구성 부품의 제원이 잘 알려져 있지 않으므로 근사적으로 특성 곡선을 사용함으로써 모델을 단순화시킬 수 있다. 본 논문에서는 제어 전류로부터 주 제어 밸브의 스풀 변위까지를 시상수 τ 의 1차 지연 요소로 아래와 같이 모델링 하였다.

$$\frac{X}{I} = \frac{K_c}{\tau s + 1} \qquad (2)$$

여기서 I 는 제어 전류(mA)이고 X 는 주 제어 밸브의 스풀 변위, τ 는 시정수(0.03sec)이고 K_c 는 비례이득이다.

2.2 주 제어 밸브의 모델링

주 제어 밸브는 중립 위치(neutral position)에서 바이패스

(bypass)회로를 갖는 3 위치 4 유로(three position four way) 방향 제어 밸브가 사용된다. 방향 제어 밸브의 유량 배분은 스풀 변위(spool displacement)에 따른 개구 면적(opening area) 특성에 좌우되며 굴삭기의 특성에 맞게 비선형적으로 구성되어 있다. 비선형 개구 면적 특성은 부하의 자중에 의한 자유낙하와 공동현상(cavitation)의 방지 및 작동기들의 동시 조작시 적절한 유량 배분을 위하여 작동기들의 부하 특성으로부터 결정된다. 이러한 의도적인 비선형성은 사람이 제어할 경우 좋은 성능을 보일 수 있으나 일반적인 제어기에 의한 제어의 경우 비선형성을 모두 고려할 수 없으므로 제어에 어려움이 따른다. 특히, 중립 위치 부근의 일정 스풀 변위 구간에서 개구 면적이 영으로 유지되는 불감대(dead zone)는 부하의 자중에 의한 자유 낙하를 방지하기 위해 만들어졌으나 제어시 불감 시간과 정상 상태 오차를 발생하는 요인으로 제어와 이론적 해석을 어렵게 한다. 따라서 본 논문에서는 이론적 해석의 편리성을 위하여 주 제어 밸브의 개구 면적은 비례 제어 밸브의 스풀 변위에 비례한다고 가정하기로 한다.

2.3 제어 밸브와 유압 실린더의 모델링

유압 굴삭기의 작업장치를 구동하는 유압 회로를 그림 3에 나타내었다.

굴삭기 작업장치에 공급되는 토크 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_i = G_i(\theta_i)\left[r_i A_i P_{ia} - A_i P_{ib} - D_i H_i(\theta_i)\dot{\theta}_i\right] \quad i = 1,2,3 \tag{3}$$

여기서, $G_i(\theta_i)$: 유압 실린더에서 발생한 힘 F_i 에서 관절 토크 τ_i 로의 링크 이득, $H_i(\theta_i)$: 관절의 각속도 $\dot{\theta}_i$ 에 서 유압 실린더의 속도, $\dot{x}_i(\theta_i)$ 에의 링크 이득, P_{ia} : 고압측의 유압, P_{ib} : 저압측의 유압, A_i : 유압 실린더의 부하측 단면적, $r_i A_i$: 유압 실린더의 하단부 단면적, D_i : 유압 실린더의 마찰 계수, $D_i H_i(\theta_i)\dot{\theta}_i$: 각 유압 실린더의 마찰력이다.

유압 실린더의 압력, 유량 특성으로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다. 여기서는 붐의 경우에만 고려하기로 한다. 암과 버켓의 경우에도 비슷한 방법으로 구할 수 있다.

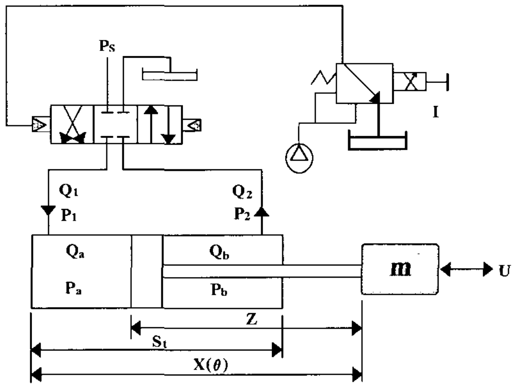


그림 3. 붐 제어 밸브와 실린더.
Fig. 3. Boom control valve and cylinder.

붐 팽창의 경우

$$Q_a = K_f X\sqrt{P_s - P_a} = r_1 A_1 \dot{x}(\theta) + \beta V_a \frac{dP_a}{dt} - \alpha(P_a - P_b) \tag{4}$$

$$Q_b = K_f X\sqrt{P_b} = A_1 \dot{x}(\theta) - \beta V_b \frac{dP_b}{dt} - \alpha(P_b - P_a) \tag{5}$$

붐 수축의 경우

$$Q_a = K_f X\sqrt{P_a} = r_1 A_1 \dot{x}(\theta) - \beta V_a \frac{dP_a}{dt} - \alpha(P_a - P_b) \tag{6}$$

$$Q_b = K_f X\sqrt{P_s - P_b} = A_1 \dot{x}(\theta) + \beta V_b \frac{dP_b}{dt} - \alpha(P_b - P_a) \tag{7}$$

여기서, α 는 유압유의 누출정수, β 는 유압유의 압축율이고 V_a, V_b 는 유압 실린더의 유의 체적이다.

굴삭기의 전체 동특성식을 보면 먼저 인가된 비례 제어 밸브의 전류에 비례하여 주 제어 밸브의 개구 면적이 변하고 이에 따라 유압 실린더의 유량과 압력이 변화되고, 변화된 압력에 의해서 링크 이득에 의해 공급 토크로 변환되고 이 토크에 의해 굴삭기 작업장치의 위치와 속도가 변화하게 된다.

III. 슬라이딩 모드 제어기

다음과 같이 주어지는 비선형 방정식을 고려해 보자.

$$\dot{x} = f(x,t) + g(x,t)u \tag{8}$$

여기서, $x \in R^n$ 는 시스템의 상태 벡터이고, $f, g : R^+ \times R^n$ 는 vector field, $u \in R$ 는 시스템에 인가되는 제어 입력이다. 가변 구조 제어기는 일반적으로 다음과 같은 두 단계에 의하여 설계된다.

1) 원하는 특성을 갖는 슬라이딩 평면 설계

$$S = \left\{x \in R^n \mid s(x) = 0\right\} \tag{9}$$

2) 시스템의 상태 벡터들을 슬라이딩 평면상에 위치하도록 하는 제어 입력 구성

$$u = \begin{cases} u^+(x) & when \quad s(x) > 0 \\ u^-(x) & when \quad s(x) < 0 \end{cases} \tag{10}$$

일단 슬라이딩 모드가 일어나면 시스템은 매개변수 불확실성과 외란에 둔감하게 된다. 그래서, 상태를 슬라이딩 평면으로 도달하게 하는 조건을 결정하는 것이 중요하다. 이러한 조건을 도달 조건(reaching condition)이라 부른다.

이러한 도달 조건을 구하기 위해 다음과 같은 Lyapunov function candidate를 정의하자.

$$V(x,t) = \frac{1}{2}s^2(x) \tag{11}$$

여기서, $s(x)$ 는 스위칭 함수이고, $x \in R^n$ 는 시스템의 상태 벡터이다. 슬라이딩 모드를 존재하게 하는 도달 조건은 다음과 같이 구하여진다.

$$\dot{V}(x,t) = s(x)\dot{s}(x) < 0 \quad for \quad x \in R^n - S \tag{12}$$

일반적으로 가변 구조 제어 시스템의 동특성은 도달 모드와 슬라이딩 모드로 이루어진다. 원하는 슬라이딩 모드 동특성은 적절한 스위칭 함수 $s(x)$ 를 설계함으로써 결정된다. 슬라이딩 모드 제어 설계에 있어서 중요한 부분이 도달 조건을 만족하는 제어 입력을 선정하는 것이다. 즉 도달 모드 설계시 원하는 시스템 동특성 뿐만 아니라 슬라이딩 모드를 얻을 수 있는 제어 입력을 결정하여야 한다.

일반적으로 다음과 같은 도달 법칙을 많이 사용한다.

$$\dot{s}(x) = -K\,\mathrm{sgn}(s), \quad K > 0 \tag{13}$$

여기서 수렴속도는 스위칭 이득 K 에 의해 결정된다.

스위칭 함수 $s(x)$ 를 (8)의 궤적에 따라 시간에 대해 미분을 하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial s}{\partial x} f(x) + \frac{\partial s}{\partial x} g(x)u = -K\,\mathrm{sgn}(s) \tag{14}$$

(14)를 제어 입력에 대해 정리하면 다음의 식이 유도된다.

$$\begin{aligned} u &= -\left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x)\right]^{-1}\left[\frac{\partial s}{\partial x} f(x) + K\,\mathrm{sgn}(s)\right] \\ &= u_{eq} + u_s \end{aligned} \tag{15}$$

여기서, u_{eq} 는 등가 제어 입력이고, u_s 는 가변 제어 입력이다.

IV. 자기 동조형 퍼지 슬라이딩 모드 제어

유압 굴삭기는 비선형성이 강할 뿐만 아니라 계통의 파라미터를 정확하게 알기 어렵기 때문에 등가 입력 u_{eq} 를 직접 구하기가 어렵다. 설사 정확한 등가 입력 u_{eq} 을 구할 수 있더라도 계산이 아주 복잡하여 실제 적용에는 상당한 어려움이 따른다. 따라서 논문에서는 실제 적용의 편의성을 위하여 퍼지 제어기를 이용하여 등가 입력 u_{eq} 을 추정하였다.

n 개의 입력변수와 p 개의 입력에 대한 언어적 변수를 갖는 퍼지 시스템의 제어규칙은 p^n 개의 규칙을 가지기 때문에 계통의 차수가 증가하면 제어규칙의 수는 기하급수적으로 증가한다.

슬라이딩 평면을 퍼지규칙의 입력변수로 정의하면 오차와 오차변화율을 입력변수로 정의할 때 보다 제어규칙의 수가 많이 감소하기 때문에 다음과 같은 퍼지 규칙을 사용하였다.

$$\text{Rule } i\text{: IF } s \text{ is } F_s^i, \text{ THEN } u \text{ is } \alpha_i \tag{16}$$

전건부와 후건부의 소속함수를 각각 삼각형과 싱글톤 형으로, 비퍼지화 방법을 무게 중심법으로 사용하면 퍼지 시스템의 출력은 다음과 같다.

$$\hat{u}_{eq} = u_{fz}(s) = \frac{\sum_{i=1}^{m} w_i \times \alpha_i}{\sum_{i=1}^{m} w_i} \tag{17}$$

여기서, α_i, $i = 1, 2, \cdots, m$ 은 퍼지 싱글톤 제어량, m 은 제어규칙의 수이고 w_i 는 i 번째 규칙의 여기된 성분(firing weight)이다. 제안한 퍼지 슬라이딩 모드 제어 입력을 나타내면 다음과 같다.

$$u = \hat{u}_{eq} + u_s = u_{fs} + K\,\mathrm{sgn}(s) \tag{18}$$

도달 법칙을 갖는 슬라이딩 모드 제어 설계를 위해 제어이득 K 에 대해서는 다음과 같은 사항을 고려하여서 선정해야 한다. 가변구조 제어 시스템의 불변성은 슬라이딩 모드에서만 존재하고 도달 모드에서는 시스템의 섭동이나 외란에 민감하다. 따라서 슬라이딩 평면에 도달하는 시간을 최소하는 것이 중요하다. 도달 시간을 줄이는 한가지 방법이 큰 이득을 적용하는 것이지만 이것은 포화(saturation) 문제와 채터링(chattering) 현상을 발생시킨다. 슬라이딩 모드시 제어 이득 K 를 작게 선정하면 채터링을 감소한다. 그래서 일단 시스템의 궤적이 슬라이딩 평면에 거의 도달하면 채터링을 줄이기 위해 가능한 한 K 를 작게 한다. 스위칭 입력 u_s 에서 K 가 클수록 외란과 불확실성에 둔감해지지만 채터링이 발생하는 문제를 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 상태가 원점에 가까이 있고 스위칭 함수에도 가까이 있는 경우에는 K 의 값을 아주 작은 값으로 선정하여 채터링을 줄이고 상태가 원점에서 매우 멀리 떨어져 있고 스위칭 함수에서도 아주 멀리 떨어져 있는 경우에는 빠르게 슬라이딩 모드에 도달시키기 위해 K 의 값을 크게 선정하기 위해 다음과 같은 퍼지 규칙을 사용하였다.

여기서, $|s|$ 는 스위칭 평면과의 거리이다. $|s|$ 를 크리스프 입력으로 사용하여 퍼지 규칙을 결정하기 위해 Z, S, M, L 의 네 가지로 각각 퍼지 분할한다. 제어 이득 K 에 대한 언어적 변수는 K_Z, K_S, K_M, K_L 로 각각 선정하였다.

위의 규칙을 보면 상태가 원점에 가까이 있고 스위칭 함수에도 가까이 있는 경우에는 K 의 값을 아주 작은 값으로 선정하여 채터링을 줄이고 상태가 원점에서 매우 멀리 떨어져 있고 스위칭 함수에서도 아주 멀리 떨어져 있는 경우에는 빠르게 슬라이딩 모드에 도달시키기 위해 K 의 값을 크게 선정했다. 제어 이득 K 를 추론하기 위해 제안한 제어 규칙을 사용하고 퍼지 관계의 합성은 Mandani의 최대 최소 연산자를 사용했으며 비퍼지화법으로 면적 중심법(center of area method)을 사용하면 FLC에 의해 추론되는 제어 이득 K 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} K &= \frac{\mu_L K_L + \mu_M K_M + \mu_S K_S + \mu_Z K_Z}{\mu_L + \mu_M + \mu_S + \mu_Z} \\ &= \frac{\sum_{j \in J} \mu_j K_j}{\sum_{j \in J} \mu_j} \end{aligned} \tag{19}$$

표 1. K 에 대한 퍼지 규칙.

Table 1. Fuzzy rules for K.

$\lvert s \rvert$	L	M	S	Z
K	K_L	K_M	K_S	K_Z

여기서, $J = \{L, M, S, Z\}$ 로 정의되는 색인집합(index set)이다. 퍼지 논리 제어기에 사용되는 제어 규칙은 전문가의 직관과 경험에 의해 얻어지며 언어적 규칙이나 퍼지 관계에 의해 표현된다. 그러나, 퍼지 규칙은 획득하기가 힘들어 제어기의 설계를 어렵게 한다. 따라서 논 논문에서는 최대 경사법을 이용하여 스위칭 입력의 후건부 파라미터를 자동으로 생성하는 생성하는 적응 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 제안하였다. 적응 알고리즘은 시스템 궤적을 슬라이딩 모드에 머무르게 하는 제어 규칙의 결론부 파라미터를 수정하는 방법을 이용한다. 슬라이딩 모드 조건($s\dot{s} < 0$)이 만족된다면 스위칭 함수는 0이 되고 원하는 시스템의 동특성을 얻을 수 있다. 이러한 슬라이딩 모드 조건에 의해 항상 양인 ($-s\dot{s}$) 값을 최소화하는 방향으로 결론부 파라미터를 수정하면 채터링이 감소하고 도달 법칙에 슬라이딩 모드 조건도 만족이 된다.

최대 경사법에 의해 결론부 파라미터는 다음과 같이 수정된다.

$$\dot{K}_j = -\Gamma \frac{\partial(-s\dot{s})}{\partial K_j} \tag{20}$$

여기서, Γ 는 적응 이득이다. chain rule에 의해 (20)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{K}_j = \Gamma \frac{\partial s\dot{s}}{\partial u}\frac{\partial u}{\partial K_j} = \Gamma \frac{\partial s\dot{s}}{\partial \hat{u}_{eq}}\frac{\partial \hat{u}_{eq}}{\partial K_j} + \Gamma \frac{\partial s\dot{s}}{\partial u_s}\frac{\partial u_s}{\partial K_j} \tag{21}$$

등가 제어 입력 $\hat{u}_{eq}$ 는 FLC에 의해 s 에만 의존하기 때문에 $\frac{\partial \hat{u}_{eq}}{\partial K_j} = 0$ 이다. 따라서 (21)은 다음과 같이 된다.

$$\dot{K}_j = -\Gamma |s| \frac{\partial u_s}{\partial K_j} \tag{22}$$

(22)를 (19)에 대입하면 다음과 같은 제어 규칙의 결론부 파라미터를 수정하는 적응 알고리즘을 유도할 수 있다.

$$\dot{K}_j = -\Gamma |s| \frac{\mu_j}{\sum_{j \in J} \mu_j}, \quad j = L, M, S, Z \tag{23}$$

여기서, Γ 는 결론부 파라미터의 수렴속도를 결정하는 설계인자이다.

V. 실험 및 결과 고찰

실험용 굴삭기는 현대중공업의 HX-60W를 사용하였으며 실험 장치의 기본적인 구성은 그림 4에 나타내었다.

실험 장치는 실제 굴삭기의 위치를 포테시오미터와 증폭기, A/D 변환기를 통해서 측정하고 제어기에서 계산된 제어 입력은 D/A 변환기를 통해서 아날로그 전압으로 변환되며 전압/전류 변환기를 통해 비례 제어 밸브를 구동하며 비례 제어 밸브의 파일럿 압력에 의해 주제어 밸브의 스풀 변위가 발생하여 각각의 유압 실린더를 신축하는 형태로 제어된다. 제어기(controller)는 제작한 TMS320C31 DSP 보드를 사용하고 A/D, D/A 변환기는 Analog Device사의 AD 7874와 DA 7247을 사용하였고 포텐시오미터(potentiometer)는 Midori사의 CPP-45B를 사용하였다. 비례 제어 밸브의 입력 전류가 약 0.33A 까지는 스풀 변위가 0인 불감대가 존재하며 0.66A에서 최대 변위를 갖도록 설계되었다. 이를 그림 5에 도시하였다.

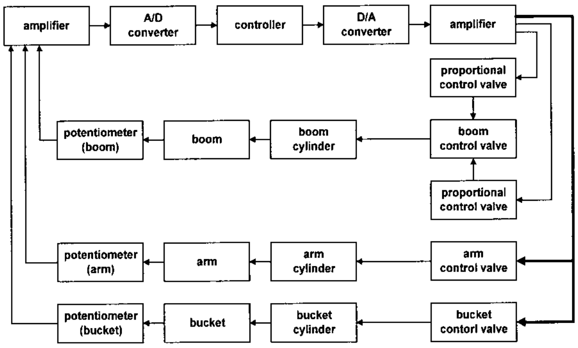


그림 4. 실험장치의 기본구성.

Fig. 4. Basic configuration of excavator for experiment.

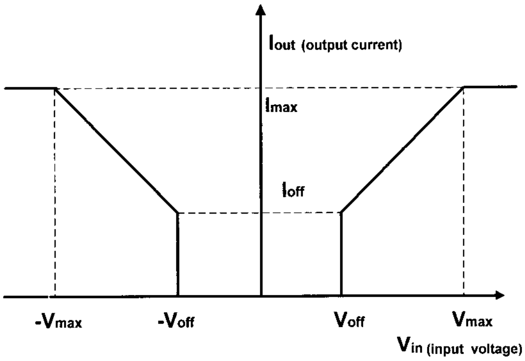


그림 5. 비례제어밸브에 대한 앰프 특성.

Fig. 5. Characteristics of amplifier for proportional control valve.

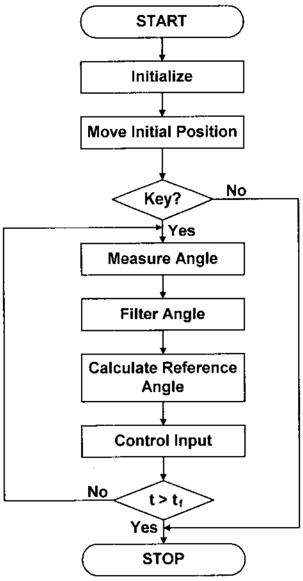


그림 6. 제어 프로그램의 순서도.

Fig. 6. Flowchart of experimental program.

실험용 제어 프로그램은 C 언어로 작성하였으며 샘플링 간격은 2msec으로 선정하고 그림 6에 제어 프로그램의 순서도를 도시하였다. 제안한 제어기의 유용성을 입증하기 위하여 작업장치를 초기 위치에서 3초까지 붐, 암, 버켓을 각각 20°, 20°, 50° 증가하고 나머지 5초까지 그 상태를 유지하며 8초까지는 다시 붐, 암, 버켓을 각각 20°, 20°, 50° 감소한 뒤 10초까지 그 상태를 유지하는 기준 궤적을 추종하도록 하였다. 그림 7, 8, 9에 퍼지 논리 제어기에 의한 붐, 암, 버켓의 응답을 나타내었고 그림 10, 11, 12에 제안한 자기 동조형 퍼지 슬라이딩 모드 제어기에 의한 붐, 암, 버켓의 응답을 나타내었다. 응답 특성을 살펴보면 유압 굴삭기는 자중의 영향으로 붐 상승시 가속은 늦고 감속은 빠른 특성을 하강시는 가속은 빠르고 감속이 늦은 특성을 가진다. 또한, 암과 버켓의 상태에 따라 가감속 특성이 변하는 성질을 가지고 있다. 이로 인해 퍼지 제어기의 경우에 자중이 아주 큰 붐의 경우에 붐이 하강할 때 보다 상승할 때의 응답 특성이 느린 현상이 나타났지만 제안한 제어기에서는 이러한 자중의 영향을 받지 않는 응답 특성을 나타내었다.

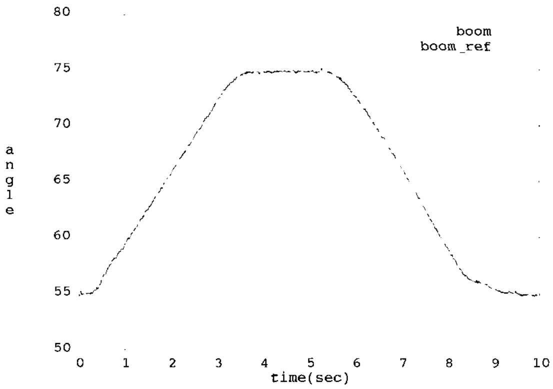


그림 7. 퍼지 제어기의 붐 응답.

Fig. 7. Boom response of FLC.

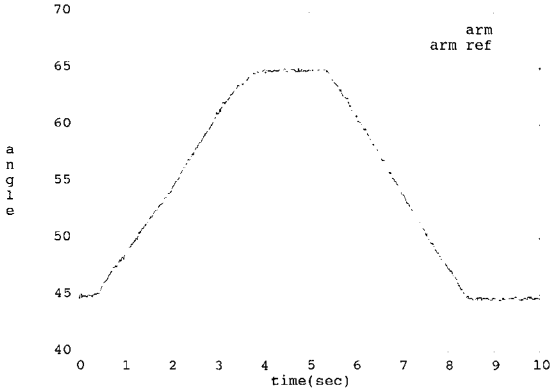


그림 8. 퍼지 제어기의 암 응답.

Fig. 8. Arm response of FLC.

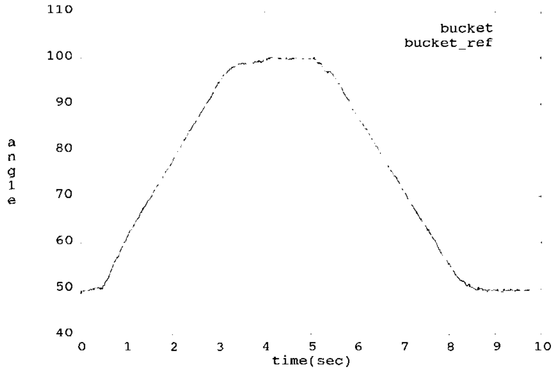


그림 9. 퍼지 제어기의 버켓 응답.

Fig. 9. Bucket response of FLC.

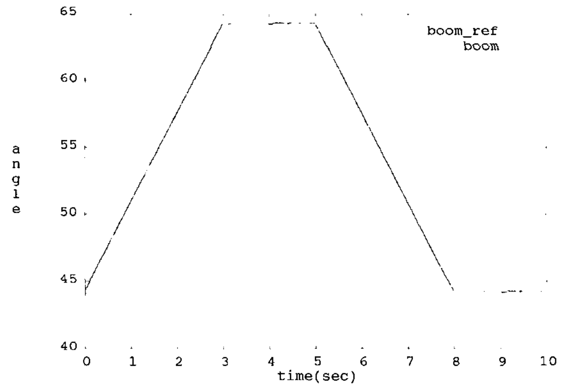


그림 10. 제안한 제어기의 붐 응답.

Fig. 10. Boom response of proposed controller.

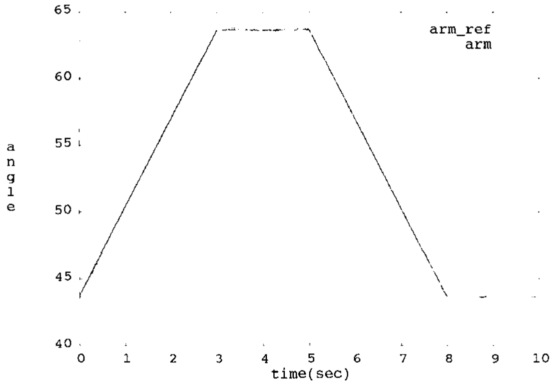


그림 11. 제안한 제어기의 암 응답.

Fig. 11. Arm response of proposed controller.

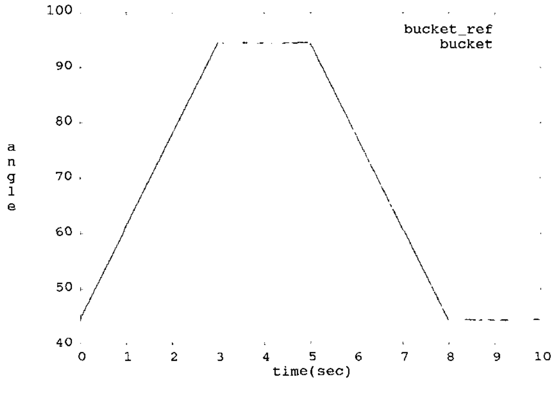


그림 12. 제안한 제어기의 버켓 응답.

Fig. 12. Buck response of proposed controller.

VI. 결론

본 논문에서는 정확한 수학적 모델이 필요하지 않고 가변구조 제어기의 단점인 채터링현상을 제거함으로 실제 적용시 문제점을 완화하고 주로 전문가의 경험이나 직관, 시행착오법에 의존한 퍼지 규칙을 스스로 동조하는 적응칙을 제시하는 자기 동조형 퍼지 슬라이딩 모드를 제안하였다.

제안한 자기 동조형 퍼지 슬라이딩 모드 제어기의 유용성을 입증하기 위하여 유압 굴삭기 작업장치 제어에 적용하여 기존 궤적 추종 실험을 수행하였다. 현재 운전자가 시각에 의한 정보에 전적으로 의존하여 운전되고 있는 유압 굴삭기 작업장치 구동 시스템을 미묘한 조작을 직관과 경험에 의존하지 않고 반복 작업과 복합 작업을 기계에 맡겨 운전자의 조작량을 경감함으로써 유압 굴삭기의 자동화를 구현하고자 TMSC31을 사용하여 소프트웨어 유압 서보 시스템을 구성하였다. 제안한 자기 동조형 퍼지 슬라이딩 모드 제어기를 기준 궤적 추종 실험에 적용한 결과 퍼지 제어기보다 굴삭 오차가 작을 뿐만 아니라 채터링 현상이 거의 나타나지 않고 퍼지 규칙을 스스로 동조하는 적응칙에 의해 제어 이득을 쉽게 동조할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

참고문헌

[1] V. I. Utkin, *Sliding Modes in Control Optimization*, Springer-Verlag, 1981.

[2] J. Y. Hung, W. Gao, and J. C. Hung, "Variable structure control: a survey", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 40, no. 1, pp. 1-21, 1993.

[3] R. A. DeCarlo, S. H. Zak, and G. P. Matthews, "Variable structure control of nonlinear multivariable systems: A Tutorial", *Proceedings of IEEE*, vol. 76, no. 3, pp. 212-232, 1988.

[4] D. Q. Zhang and S. K. Panda, "Chattering-free and fast-response sliding mode controller", *IEE*, vol. 146, no. 2, pp. 171-177, 1999.

[5] P. Kachroo and M. Tomizuka, "Chattering reduction and error convergence in the sliding mode control of a class of a nonlinear systems", *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 41, no. 7, pp. 1063-1068, 1996.

[6] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems: fuzzy logic controller-part I, II", *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, vol. 20, no. 2, pp. 404-435, 1990.

[7] E. Czogala and W. pedrycz, "Control problem in fuzzy systems", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 7, pp. 257-273, 1982.

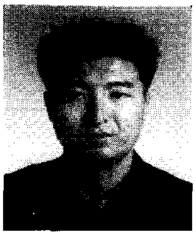
[8] M. Jamishidi, N. Vadiee and T. Ross, *Fuzzy Logic and Control*, Prentice-Hall, 1993.

[9] H. J. Zimmerman, *Fuzzy set theory and its application*, 2nd ed., Kluwer Academic Publishers, 1991.

[10] Palm, R., "Robust control by fuzzy sliding mode", *Automatica*, vol. 30, no. 9, pp. 1429-1437, 1994.

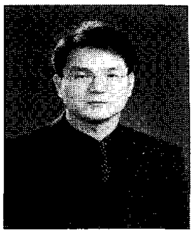
[11] S. W. Kim and J. J. Lee, "Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 71, pp. 359-367, 1995.

[12] B. J. Choi, S. W. Kwak, and B. K. Kim, "Design of a single-input fuzzy logic controller and its properties", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 106, pp. 299-308, 1999.



서 삼 준

1966년 4월 16일생. 1997년~현재 안양대학교 전기전자공학과 조교수. 관심분야는 비선형제어, 지능제어 이론, 퍼지추론 시스템, 신경망, 원격 조종 시스템.

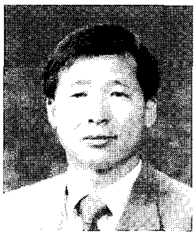


김 동 식

1963년 9월 10일생. 1992년~현재 순천향대학교 정보기술공학부 교수. 관심분야는 웹기반 교육용 컨텐츠 개발, 웹기반 가상실험실 개발, 네트웍을 통한 원격 실험실 개발.

김 동 원

1974년 3월 15일생. 2002년~현재 고려대학교 전기공학과 박사수료. 관심분야는 소프트 컴퓨팅기반 뉴로-퍼지 시스템, 시스템 모델링 및 지능제어.



박 귀 태

1947년 10월 25일생. 1981년~현재 고려대학교 전기공학과 교수. 2000~현재 (사)IBS KOREA 회장. 관심분야는 퍼지 및 신경망, 이동로봇, 컴퓨터 비전, 지능제어, 인텔리전트 빌딩시스템 및 정보통신.