

퍼지 제어를 이용한 유압 굴삭기의 굴삭 제어

서삼준*, 김동식, 박귀태
 안양대 전기전자공학과, 순천향대 정보기술공학부, 고려대 전기전자전파공학부

Excavation Control of a Hydraulic Excavator with Fuzzy Logic Controller

Sam-Jun Seo, Dong-Sik Kim, Gwi-Tae Park
 Anyang University, SoonChunHyang University, Korea University

Abstract - The interactions between the excavation tool and the excavation environment are dynamic, unstructured and complex. In addition, operating modes of an excavator depend on working conditions, which makes it difficult to derive the exact mathematical model of excavator. Even after the exact mathematical model is established, it is difficult to design of a controller because the system equations are highly nonlinear and the state variable are coupled. The objective of this study is to design a fuzzy logic controller (FLC) which controls the position of excavator's attachment. This approach enables the transfer of human heuristics and expert knowledge to the controller. Experiments are carried out to check the performance of the FLC.

1. 서 론

유압 굴삭기는 작업 조건에 따라 시스템의 구동 특성이 다양하여 그 특성을 정확히 묘사하는 수학적 모델을 세우기 어렵고, 수학적 모델을 세웠다 할지라도 비선형성과 시스템 상태 변수간의 연관성(coupling)이 강하여 이론적 해석을 통한 현대 제어 이론의 적용이 곤란하다. 또한 작업 환경에 따라 외란이 다양하게 변하고, 제어 입력의 영점 좌우의 제어 특성이 상이하여 실제 산업 현장에 많이 사용되고 있는 PID 제어기의 적용에도 어려움이 있다. 반면, 굴삭기는 숙련된 운전자에 의해 수학적 모델과 이론적 해석 없이도 다양한 작업 환경과 비선형적 제어 특성에도 불구하고 훌륭히 제어되고 있다.

최근에 많이 연구되고 있는 퍼지 논리 제어 기법은 1965년 Zadeh 교수에 의하여 소개된 이후, 인간의 언어적 표현에서 흔히 발견되는 비확률적 불확실성의 수학적 처리에 매우 유용한 퍼지 집합을 기본으로 퍼지 논리로 확장되어 의사 결정 문제, 모델 식별 및 제어, 전문가 계통, 패턴 인식 문제, 고장 진단 계통등 많은 분야에서의 문제 해결에 성공적으로 응용되고 있다.

본 논문에서는 수학적 모델이 불필요하고 숙련자의 복잡한 작업 지식을 표현할 수 있는 능력이 있으며 언어적 제어 규칙만으로 기존의 제어기보다 성능이 우수한 퍼지 제어 기법을 이용하여 고도의 숙련도가 요구되는 굴삭기 작업장치의 굴삭 작업에 적용하기 위하여 DSP(TMS320C31) 제어기로 실제 실험을 통하여 그 유용성을 입증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 유압 굴삭기의 구성

유압 굴삭기는 그림 1과 같이 크게 하부 기구, 상부 선회체, 작업장치(attachment)로 구성되어 있다. 하부 기구는 장비 전체를 지지하며, 여기에는 주행을 위한 부품들이 설치되어 있다. 상부 선회체는 하부 기구에 대해 360도 회전이 가능하고, 여기에는 작업장치를 비롯하여 엔진 등의 주요 부품이 설치되어 있다. 작업장치는 일반적으로 붐, 암, 버킷의 3관절 구조로 구성되며 작업 종류에 따라 특수한 장치를 설치할 수 있다. 굴삭기의 동력계는 동력원으로서 디젤 엔진, 엔진으로부터 원유를 공급받아 유압유를 생산하는 유압 펌프, 공급된 유압유를 분배하는 제어 밸브, 상부 선회체를 회전시키는 선회용 유압 모터, 하부 기구에 장착되어 장비를 주행시키는 주행용 유압 모터 및 작업장치를 구동하는 유압 실린더로 구성된다.

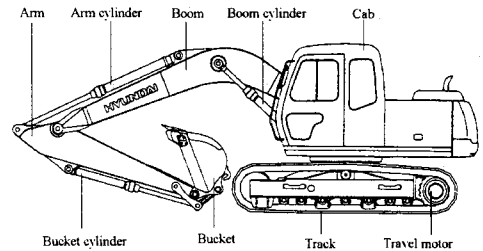


그림 1 유압 굴삭기

2.2 굴삭기 작업장치

굴삭기의 작업장치는 붐(boom), 암(arm), 버킷(bucket)의 3 관절 구조로 되어 있으며, 각각 붐 실린더(boom cylinder), 암 실린더(arm cylinder), 버킷 실린더(bucket cylinder)에 의해 붐, 암, 버킷의 위치 θ_1 , θ_2 , θ_3 가 각각 제어된다. 버킷 실린더와 버킷은 넓은 작업 범위를 위해 4절 링크 구조로 연결되어 있다. 그림 2에 굴삭기의 작업장치를 나타내었다.

굴삭기 작업장치는 작업조건에 따라 시스템의 구동 특성이 다양하여 그 특성을 정확히 묘사하는 수학적 모델을 세우기 어렵고, 수학적 모델을 세웠다 할지라도 비선형성과 시스템 상태변수간의 커플링이 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

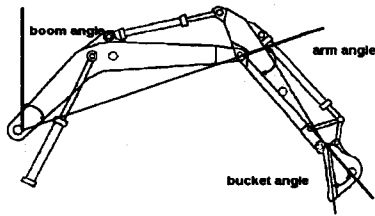


그림 2 굴삭기 작업장치

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 건실한 제어 성능을 보장하는 퍼지 논리 제어기가 요청된다.

2.3 퍼지 논리 제어기

퍼지 제어기는 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로는 해석할 수 없거나, 얻어지는 정보가 정성적이고 부정확하여 불확실한 경우 기존 제어기들 보다 우수한 제어 성능을 나타내며 기존의 정확한 수학적 모델을 기초로 한 제어기의 단점을 보완하고, 인간의 의사결정 방식을 도입하여 보다 지능적인 제어기가 될 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 제어기를 설계하는데 있어서 일반적인 체계가 정립되어 있지 않고 안정성과 제어 성능을 해석할 수 있는 이론적 바탕이 구축되어 있지 않다.

일반적인 퍼지 제어기의 구조는 그림 3과 같다. 측정값으로부터 유도된 오차 값을 퍼지 입력으로 만드는 퍼지화부(fuzzifier), 퍼지 입력으로부터 퍼지 출력을 추론하는 추론부(inference engine), 퍼지 출력으로부터 실제 이용 가능한 값인 제어 입력을 계산하는 비퍼지화부(defuzzifier), 소속 함수와 제어 규칙 등의 정보를 제공하는 지식 기반(knowledge base)으로 구성되어 있다.

FLC 설계는 일반적으로 다음의 과정에 의해 설계된다.

- 퍼지화 (fuzzification)
- 제어 규칙 (control rule) 의 선정
- 퍼지 추론 (fuzzy inference)
- 비퍼지화 (defuzzification)

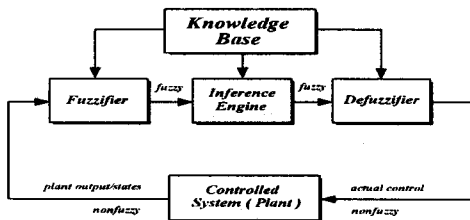


Fig. 3 퍼지 제어기의 기본 구조

2.4 제어기 구조

현재 유압 굴삭기 작업장치 구동 시스템은 그림 4와 같은 개회로 제어 개념으로 구성되어 있어 운전자가 시각에 의한 정보에 전적으로 의존하여 운전되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 그림 4와 같은 개회로 제어(open loop control) 개념의 현재의 굴삭기 작업장치 구동 시스템을 그림 5와 같은 폐회로 제어(closed loop control) 개념의 제어기를 이용한 자동 제어 시스템으로 변환시키고자 한다. 수학적 모델링이 어렵고 수학적 모델을 세웠다 할지라도 비선형

이 강하여 이론적 해석에 의한 제어기의 설계가 곤란한 굴삭기 작업장치 구동 시스템에 대해 퍼지 논리 제어기를 이용하여 고도의 숙련도가 요구되는 굴삭기 작업에 실제 적용하여 그 유용성을 입증하고자 한다.

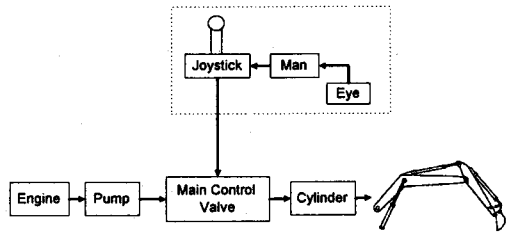


그림 4 개회로 제어 시스템

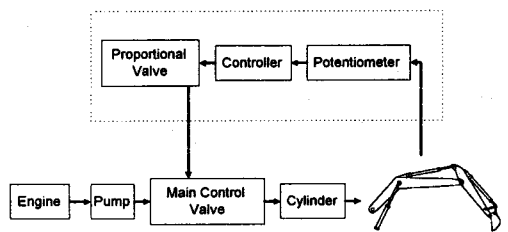


그림 5 폐회로 제어 시스템

2.4 실험 및 결과고찰

실험 장치는 실제 굴삭기의 위치를 포텐시옴터와 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 스톱 변위가 발생하여 각각의 유압 실린더를 신축하는 형태로 제어된다.

제어기(controller)는 DSP(TMS320C31) 보드를 제작하여 사용하고 A/D, D/A 변환기는 Analog Device사의 AD 7874와 DA 7247을 사용하였고 포텐시옴터(potentiometer)는 Midori사의 CPP-45B를 사용하였다.

실험에 사용된 유압 굴삭기는 현대 중공업 HX60W이다.

실험에 사용된 굴삭작업은 작업장치를 초기 위치에서 5초까지 붐, 암, 버킷을 각각 20°, 20°, 50° 증가하고 나머지 5초 동안은 초기 위치로 되돌아가는 설정치 응답 실험을 수행하였다. 퍼지 논리 제어기에 사용되는 제어 규칙은 표 2와 같고 퍼지 전체 집합과 스케일 인자는 표 3과 같이 선정하였고 퍼지 변수 e , ce , s_{cs} , u 의 소속함수는 대칭 삼각형으로 선정하였다

표 2 퍼지 제어 규칙

$e \backslash ce$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO

표 3 퍼지 전체집합과 스케일 인자

FLC	e	ce	u	se	sce	su
boom	1	1	1	5	1	2047
arm	1	1	1	5	1	2047
bucket	1	1	1	4	1	2047

실험용 제어 프로그램은 C 언어로 작성하였으며 샘플링 간격은 2msec으로 선정하였다. 그림 6에 제어 프로그램의 순서도를 도시하였다.

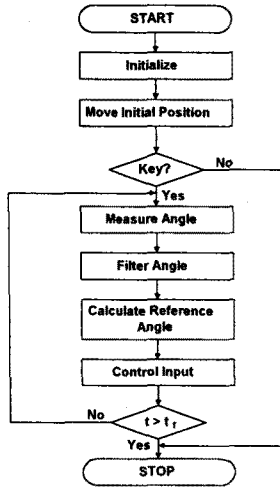


그림 6 실험 사용된 순서도

설정치 응답 실험에 대한 붐, 암, 버킷 응답을 그림 7, 8, 9에 각각 나타내었다. 실험 결과를 퍼지 논리 제어기의 응답 특성이 우수함을 보인다. 실험에서 나타난 바와 같이 붐과 암이 먼저 움직이고 난 뒤 버킷이 설정치에 도달하는 것으로 나타나는데 이는 유압 시스템에서 발생하는 유량이 한정되어 있기 때문에 붐, 암, 버킷을 동시에 움직일 때는 적절한 유량 분배를 하는데서 기인한다. 유압 굴삭기는 자체 중량의 영향으로 붐 상승시 가속은 느리고 감속은 빠른 특성을 하강시에는 가속은 빠르고 감속은 느린 특성을 가진다. 또한, 암, 버킷의 상태에 따라 가속 특성이 변하는 성질을 가지고 있다. 이로 인해 실험결과 자중이 큰 붐의 경우에 하강할 때보다 상승할 때의 응답이 느리게 나타났다.

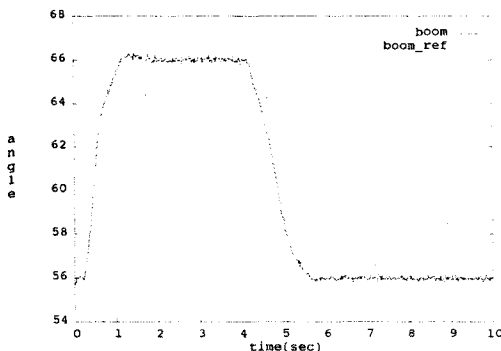


그림 7 붐 응답

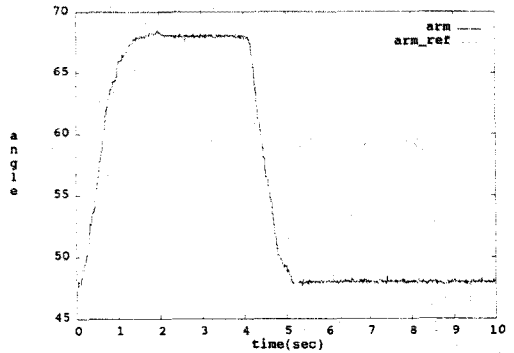


그림 8 암 응답

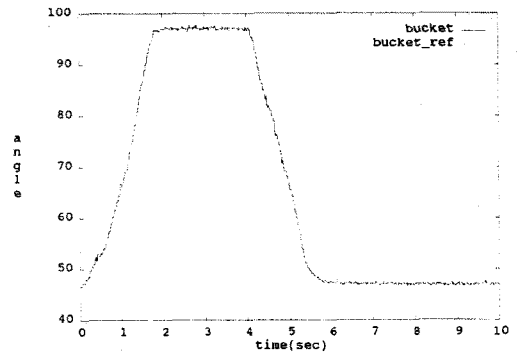


그림 9 버킷 응답

3. 결 론

본 논문에서는 수학적 모델이 불필요하고 숙련자의 복잡한 작업 지식을 표현할 수 있는 능력이 있으며 언어적 제어 규칙만으로 기존의 제어기보다 성능이 우수한 퍼지 제어 기법을 이용하여 고도의 숙련도가 요구되는 굴삭기 작업장치의 굴삭 작업에 적용하기 위하여 DSP (TMS320C31) 제어기로 실제 실험을 통하여 그 유용성을 입증하였다. 퍼지 논리 제어기를 이용한 실험 결과 붐, 암, 버킷에 대한 응답 모두 우수함을 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 서삼준, "적용 퍼지 슬라이딩 모드 제어를 이용한 유압 굴삭기의 굴삭 자동화", 고려대학교 대학원 박사학위논문 1996
- [2] 신동목, "퍼지 논리 제어기를 이용한 힘케환 제어", 고려대학교 대학원 석사학위논문 1996
- [3] M.Jamshidi, N.Vadiei and T.Ross, "Fuzzy Logic and Control," Prentice-Hall, 1993
- [4] 이상락, 박귀태, C 언어로 쉽게쓰는 TMS320C31, 대영사 1995
- [5] 이광형, 오길복, 퍼지 이론 및 응용, 홍릉과학 출판사