

퍼지제어를 이용한 굴삭기 작업장치 위치제어에 관한 연구

°이시천*, 이교일**

* 서울대학교 대학원 기계설계학과, ** 서울대학교 기계설계학과

A Study on the Position Control of Excavator Attachment using Fuzzy Control

°Si-Chun Lee*, Kyo-Il Lee**

Dept. of Mechanical Design & Production Eng., S.N.U.

ABSTRACT

The objective of this study is to design a fuzzy logic controller(FLC) which controls the position of excavator's attachment. a noble FLC is proposed, which is based on simple control rules while offering easy tuning of control parameters by utilizing real operation characteristics of an operator. The proposed FLC consists of two parts, the proportional controller part and the FLC part. Experiments are carried out on a test bed which is built around a commercial excavator. The controller is applied to the leveling of excavator's bucket tip, which is one of the main functions in an excavator's operation.

1. 서론

굴삭기 작업장치의 위치제어는 작업조건에 따라 시스템의 구동 특성이 다양하여 그 특성을 정확히 묘사하는 수학적 모델이 매우 복잡하고, 시스템 상태 변수간의 연계성과 비선형성이 강하여 이론적 해석을 통한 현대제어 이론의 적용이 곤란하다. 본 연구에서는 소위 잘 정의 되지 않은 시스템(ill-defined system)의 제어에 효과적으로 응용되고 있는 퍼지제어기법을 이용한 굴삭기 작업장치의 위치제어에 대하여 연구하였다. 그런데 굴삭기 작업장치는 제어특성이 복잡하여 일반적인 퍼지제어기 설계방법을 이용할 때 제어규칙 설계에 많은 시간과 노력이 필요할 뿐 아니라 제어성능의 달성에도 어려움이 많다. 즉 굴삭기 작업장치의 위치제어와 같이 작업환경과 작업조건이 변하는 시스템의 경우 제어성능의 보장을 위해서는 오차, 오차변화율과 더불어 더 많은 상태변수가 고려되어야하고 상태변수의 증가는 제어규칙선정과 동조를 어렵게하여 제어기 설계시 많은 시간과 노력이 필요하다.

본 연구에서는 굴삭기 작업장치의 운전자 제어특성을 이용하여 간편하게 제어기를 설계하는 퍼지제어기법을 제안하였다. 운전자 제어특성으로부터 알 수 있는 부분을 비례제어기부와 바람직한 출력곡선으로 구현하였고, 바람직한 출력곡선을 추종하며 정상상태오차를 제거하도록 퍼지제어기부를 구성하였다.

2. 대상 시스템

개략적인 제어시스템의 구성은 그림 1과 같다. 암과 버킷은 외란으로서 운전자에 의하여 조작되고 붐의 위치가 자동제어 된다. 즉 각 관절의 측정값으로부터 붐의 기준각도가 산출되고 이를 추종하도록 제어기가 구성된다. 제어기의 입력은 각 관절의 각도, 제어기의 출력은 비례제어밸브의 구동전류이다.

작업장치는 붐(boom), 암(arm), 버킷(bucket)의 3 관절(link) 구조로 되어 있으며, 각각 붐 실린더, 암 실린더, 버킷 실린더로써 구동된다. 작업장치를 구동하는 유압 시스템은 그림 2에서의 같이 유압 펌프, 비례제어밸브, 주 제어밸브(main control valve), 유압 실린더와 보조 밸브류로 구성되어 있다. 유압 펌프는 2개의 가변용량형 피스톤 펌프로서 디젤 엔진에 의해 구동된다. 각각의 펌프는 자기압력(self pressure), 상대압력(the other pump pressure)과 피로로부터의 파일럿압력에 의해 사판각 속도출유량이 제어된다. 주 제어밸브는 방향제어밸브로서 붐, 암, 버킷을 각각 제어한다. 주 제어밸브는 비례제어 밸브로부터의 파일럿압력에 의해 스톱의 위치가 제어되고 유로가 형성된다. 유압 실린더로서는 편로드 복동 실린더가 사용된다. 그리고 펌프의 사판각 제어용 파일럿 압력 형성과 유량 합류를 위한 로직 밸브(logic valve), 회로 보호를 위한 릴리프 밸브, 유량의 역류방지를 위한 체크 밸브등의 보조 밸브류가 사용된다.

3. 퍼지제어기 설계

퍼지제어기의 설계는 입출력 변수를 정의한 후 퍼지화 및 비퍼지화 방법과 추론방법을 결정하고, 지식기반의 소속함수와 제어규칙을 선정하는 것으로서 이들 중 제어규칙의 선정은 제어성능을 좌우하는 제어기 설계의 핵심이다. 그래서 퍼지제어기의 설계를 제어규칙의 설계로 표현하기도 한다. 보통 제어 규칙은 시스템 출력의 측정값과 목표값과의 오차(e : error)와 그 변화(Δe : change of error)에 의하여 제어입력의 증분(Δu)을 결정하도록 구성된다. 즉 제어기의 입력과 출력의 관계는 제어 규칙에 의하여

$$[e, \Delta e] \rightarrow \Delta u \quad (1)$$

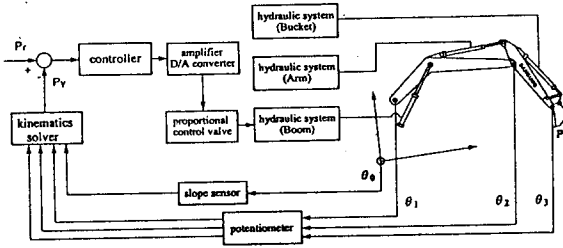


그림 1 작업장치 제어시스템 개략도

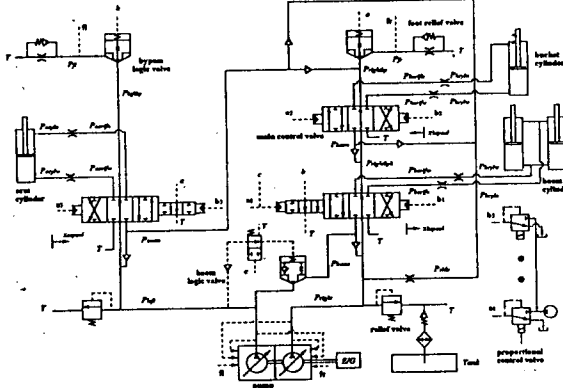


그림 2 작업장치 구동 유압 회로도

로서 표현된다. 그러나 일반적으로 제어 규칙 설계를 위한 체계적 방법은 없으며 전문가의 직관 또는 시행착오에 의존하고 있는 실정이다.

그런데 퍼지제어의 특성을 고려할 때 일반적으로 퍼지 제어를 이용하고자 하는 대상 시스템은 이미 사람에 의해 제어되고 있거나 기본적인 정적 성능이 알려져 있다. 또한 사람에 의한 운전제어특성과 전문가의 지식과 경험으로부터 바람직한 출력은 어떠한 형태이어야 한다는 것이 예상된다. 그러므로 대상 시스템에 대해 알고 있는 경험과 지식을 단순히 제어규칙 결정에 반영하기보다 이를 체계화하여 다른 형태로 표현함으로써 제어규칙을 단순화시킬 수 있을 것이다.

본 연구의 굴삭기 작업장치 제어에 있어서는 운전자의 제어특성으로부터 손쉽게 알 수 있는 안정한 비례제어특성과 바람직한 출력곡선특성을 고려한 제어기 설계 방법을 제안하였다. 즉 운전자의 제어특성으로부터 안정한 비례제어기부를 설계하고 제어목표로 설정한 바람직한 출력곡선과의 편차를 보상하고, 정상상태오차를 제거하도록 퍼지제어기부를 설계하였다.

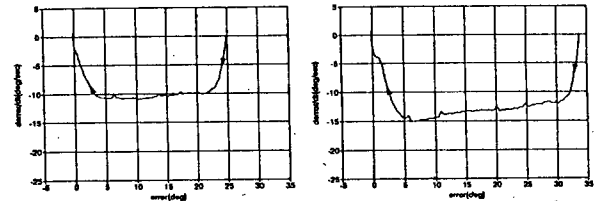
비례제어입력(proportional control input)을 u_p , 퍼지제어입력(fuzzy control input)을 u_f 라 할때 제어입력(control input) u 는

$$u = u_p + u_f \quad (2)$$

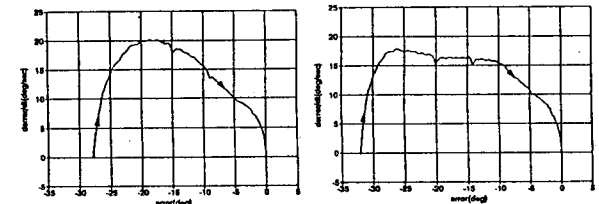
로서 산출하였다.

3.1 운전자 제어특성

운전자는 승차감과 제어정도(control accuracy)를 고려한 제어를 훌륭히 수행하는 일종의 비선형, 지능적 제어기로서 제어기 설계의 기준으로 삼을 수 있다. 그러므로 운전자 제어에 의한 가속과 감속의 제어성능을 파악하기 위하여 운전자의 수동조작에 의한 붐 위치(각도)제어를 수행하였고 그림 3과 같이 상평면에 나타내었다. 붐을 최대속도까지 가속한 후 승차감이 나쁘지 않는 한도에서 가능한 빨리 정지시키도록 하였다. 암의 위치와 붐의 상승, 하강에 따라 제어 특성이 다를을 고려하여 암 완전 펼침과 암 완전 오므림상태에 대하여 붐 상승과 붐 하강시의 특성을 나타내었다.



(1) 암 완전펼침상태에서의 붐상승 (2) 암 완전오므림상태에서의 붐상승



(3) 암 완전펼침상태에서의 붐하강 (4) 암 완전오므림상태에서의 붐하강

그림 3 운전자 제어특성(상평면)

3.2 비례제어기부 설계

비례제어기는 오차와 이득값(gain)의 곱, 즉

$$u_p = K_p \cdot e \quad (3)$$

로써 제어입력을 산출하는 가장 단순한 형태의 제어기로서 이득값의 조정으로써 손쉽게 제어특성을 파악하고 변화시킬 수 있다. 이득값(K_p)은 그림 3에서 제어입력의 포화상태 즉 최대속도상태에서 감속을 시작하는 오차(error)값으로부터 예측할 수 있다. 붐 상승시 오차 5° 근방에서 감속하기 시작하므로 제어입력의 포화 상태값이 $\pm 0.4A$ 임을 고려할 때 붐 상승 제어시 이득값은 약 0.08 A/deg, 붐 하강시 암 오므림상태는 오차 10° 근방, 암 펼침상태는 오차 20° 근방에서 감속하기 시작하므로 붐 하강 제어시 이득값은 암 오므림상태 약 0.04 A/deg, 암 펼침상태 약 0.02 A/deg임을 알 수 있었다.

3.3 퍼지제어기부 설계

정상상태오차의 제거와 타 작동기와의 동시 동작시에도 제어성능을 보장하도록 하기 위하여 퍼지제어기부를

구성한다. 정상상태오차를 제거하도록 하기 위하여 제어 출력은 적분형태를 취하도록 하고, 타 작동기와 동시 동작시 제어성능을 보장하도록 하기 위하여 바람직한 출력(Desired Trajectory, DT)을 도입하여 이를 추종하도록 한다.

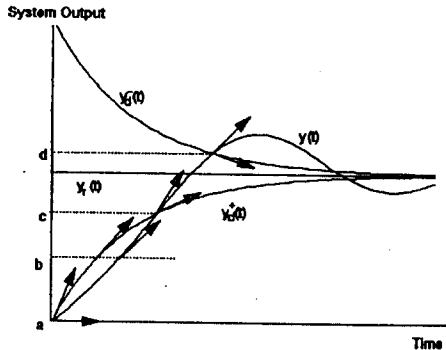


그림 4 시간역에서의 제어규칙 설계

그림 4에서 보는 바와 같이 기준입력(reference input)을 $y_r(t)$, 시스템출력(system output)을 $y(t)$, 바람직한 출력을 $y_d^+(t)$, $y_d^-(t)$ 라 하자. 여기서 바람직한 출력 $y_d^+(t)$, $y_d^-(t)$ 는 각각 기준입력(reference input) $y_r(t)$ 에 접근하는 단조증가함수, 단조감소함수로 정의한다. 그림 4에서 각 오차레벨(a, b, c, d)에서 시스템출력의 속도 즉 시스템출력곡선의 접선의 기울기는 바람직한 출력의 속도 즉 바람직한 출력 곡선의 접선의 기울기와 비교될 수 있고 속도차이의 부호로부터 제어입력의 수정 방향 즉 제어입력의 증감을, 속도차이의 크기로부터 제어입력의 수정 크기를 판단할 수 있다. 바람직한 출력은 설계자가 예상하는 바람직한 출력의 형태로서 오차의 양방향에서 다른 제어 특성을 갖도록 $y_d^+(t)$, $y_d^-(t)$ 를 다르게 정의할 수 있다.

이상의 시간역에서의 의미를 상평면상에서 나타내면 다음과 같다. 그림 5에서 $f(e)$ 를 시스템 출력 $y(t)$ 의 상평면으로의 사상(Output Error Trajectory, OET), $g(e)$ 를 바람직한 출력 $y_d^+(t)$, $y_d^-(t)$ 의 상평면으로의 사상(Desired Error Trajectory, DET) 즉

$$\begin{aligned} g(e) &= g^+(e) & e &\geq 0 \\ &g^-(e) & e &< 0 \end{aligned} \quad (4)$$

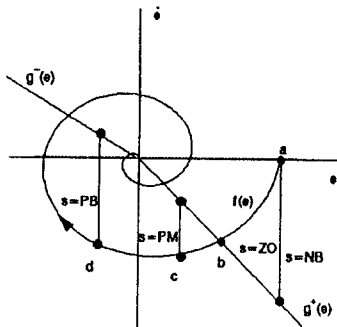


그림 5 상평면에서의 제어규칙 설계

라 하자.

시스템 출력의 속도와 바람직한 출력의 속도의 차이를 s 라 할 때

$$s = g(e) - f(e) = g(e) - \dot{e} \quad (5)$$

로써 정의한다. 제어입력의 수정 방향은 s 의 부호로부터, 제어입력의 수정 크기는 s 의 절대값의 크기로 부터 계산한다.

s 를 입력 퍼지변수로 고려하고 그림 6과 같이 7개의 언어항을 갖는다고 할 때 그림 5로부터 제어규칙은 가장 단순한 형태로서 "오차레벨 a 부근의 상태는 s 가 음으로 크므로(Negative Big) Δu 는 양으로 크게(Positive Big) 준다", "오차레벨 b 부근의 상태는 s 가 영 부근(Zero)이므로 Δu 는 영 부근(Zero)으로 준다" 등과 같이 정할 수 있다. 즉

phase a : If s is NB, then Δu is PB

phase b : If s is ZO, then Δu is ZO

와 같고 이를 정리하면 표 1과 같다.

표 1 제어 규칙

s	Δu
NB	PB
NM	PM
NS	PS
ZO	ZO
PS	NS
PM	NM
PB	NB

본 연구에서는 제어규칙으로서 표 1의 단순화된 규칙을, 소속함수로서는 입력변수에 대하여 7개의 언어값(linguistic value)을 갖는 그림 6과 같은 삼각형 형태를 사용하였으며 $[-3, 3]$ 사이의 값을 갖도록 정규화 하였다. 퍼지화 방법으로서 단일화값을, 비퍼지화 방법으로서 무게중심법을, 퍼지관계의 합성은 Zadeh가 제안한 최대-최소 합성법(sup-min compositional rule)을 사용하였다.

단순한 형태로서 DET를 1차 함수로 정의하여 제어를 설계하였다. 이 때 설계인자는 DET의 기울기, 입력

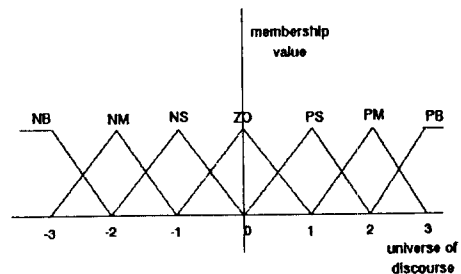


그림 6 소속 함수

력 변수 s 와 Δu 의 스케일값이 된다.

봄 상승과 봄 하강시 상이한 제어특성을 나타내므로 각각의 기울기를 m_{up} , m_{down} 으로 정의할 때 그림 3으로부터 m_{up} 은 약 2~4, m_{down} 은 약 1~2를 예측할 수 있다.

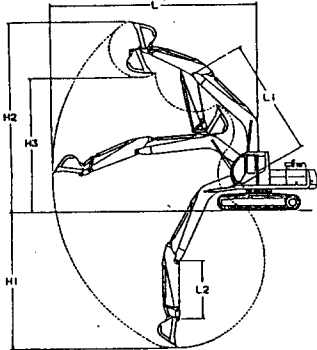
s 스케일값은 최대 속도를 기준으로 설계할 수 있으며, 봄 상승과 봄 하강의 평균 최대 속도는 약 15°/sec 이므로 정규화값(3)을 고려하여 5를 선정하였다.

Δu 스케일값은 운전자의 제어밸브 조작량을 기준으로 할 수 있으며, 최대속도상태 즉 제어전류의 포화상태값에서 정지시키는 즉 제어전류를 0으로 하는 운전자의 제어밸브 조작량으로부터 제어기의 샘플링 간격과 정규화값(3)을 고려하여 설계하였다.

4. 실험 결과

실험용 굴삭기의 기본적 제원은 그림 7과 같다.

제안한 퍼지제어기의 성능을 검증하기 위하여 암과 버킷을 일정 각도로 유지한 상태에서의 봄 각도의 위치제어와 암의 외란이 있을 때 버킷 선단(bucket tip)을 수평으로 유지하는 봄 각도의 위치 제어(수평정지작업)를 수행하였다.



Item		symbol	unit	dimension
Operating range	Max. digging radius	L	mm	10000
	Max. digging depth	H ₁	mm	6820
	Max. vertical wall digging	H ₂	mm	9510
	Max. dumping height	H ₃	mm	6700
Attachment	Boom lenght	L ₁	mm	5800
	Arm length	L ₂	mm	2900
	Bucket capacity		m ³	0.8

그림 7 굴삭기 제원

그림 8과 그림 10은 각각 암 완전 펼침과 암 완전 오므린 상태에서의 봄 각도 제어 출력을 나타낸다. 관성의 변화에도 불구하고 유사한 제어성능을 나타냄을 볼 수 있다.

그림 9와 그림 11은 각각 그림 8과 그림 10의 실험결과에서 시간 20~40초 구간의 거동을 상평면에 도시한 것으로서 봄 상승 제어 보다 봄 하강 제어시 바람직한 출력특성을 잘 추종하는 특성을 보였다. 이는 지연시간의 영향으로서 봄 상승 제어시 제어입력 변화의 효과가 즉시 봄의 각도변화로 나타나지 않기 때문이다.

수평정지작업(bucket tip leveling)은 버킷 선단을 지면과 수평이 되도록 제어하는 작업으로서 초기위치에서 외

란으로서 운전자가 암을 조작하도록 하였고 이로부터 발생하는 버킷 선단의 위치 변화에 따른 기준 수평면과의 오차를 줄이도록 봄의 위치(각도)를 제어하였다.

그림 12와 그림 13은 비례제어만 하였을 때의 실험 결과로서 각각 암의 조작을 느리고 빠르게 하였을 때의 결과이다. 암의 외란에 적용하지 못하고 오차가 크게 발생함을 알 수 있다.

그림 14와 그림 15는 제안한 제어를 적용한 실험 결과이다. 암의 외란에 적용하여 수평면을 유지하고 있음을 알 수 있다. 암을 빠르게 움직였을 경우 봄의 동특성에 기인하여 느리게 움직였을 때 보다 큰 오차가 발생하였으나 오차가 양(+)과 음(-)의 값을 가지면서 기준 수평면을 중심으로 진동함으로써 암의 각도변화에 잘 적용하고 있음을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 퍼지제어기법을 이용한 굴삭기 작업장치의 위치제어를 수행하는 데 있어서 운전자 제어특성으로부터 제어를 설계할 수 있는 제어기법을 제안하였고 실험을 통하여 이를 검증하였다.

제안한 제어기법을 이용함으로써 운전자의 제어특성과 기본적인 정적특성(static characteristics), 즉 시스템 최대속도, 제어입력의 포화상태값, 운전자의 제어입력 인가 방법을 고려하여 간편하게 설계할 수 있었다.

본 연구에서는 굴삭기 작업장치의 위치제어의 실용적인 목적과 손쉬운 제어기 설계인자의 동조(tuning)를 위하여 한 개의 상태변수와 간단한 삼각형 소속함수를 이용하여 퍼지제어기부를 구성하였으나 제어 대상 시스템의 특성에 따라 변화를 주므로써 적절한 제어기를 구현할 수 있을 것이다.

6. 참고 문헌

- L. A. Zadeh, "Fuzzy sets", *Informat. Control*, Vol. 8 pp 338-353, 1965
- E. H. Mamdani, S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", *Int. J. Man-Machine Studies*, Vol. 7 No. 12. pp 1-13, 1975
- S. Kawaji, N. Matsunaga, "Fuzzy Control of VSS type and its Robustness", *ENGINEERING, IFSA(1991 Brussels)*, pp 81-84
- 송 기무, 송 명훈, "유압 굴삭기에 대한 퍼지제어 응용", *SAITEC*, Vol. 4 No. 7, October, 1991
- H. E. Merrit, *Hydraulic control systems*, John Wiley and sons, Inc., 1967
- T. Terano *et al*, "Fuzzy Control Bulldozer", *ENGINEERING, IFSA(1991 Brussels)*, pp 219-222
- R. Palm, "Sliding Mode Fuzzy Control", *IEEE Int. Conf. on Fuzzy systems*, March 8-12, pp 519-526, 1992
- 이 지영, "퍼지제어이론을 이용한 굴삭기 봄의 위치제어에 관한 연구", 서울대학교 석사학위논문, 1992
- M. Shahipoor, *A Robot Engineering Textbook*, Harper & Row, Publisher, Inc., 1987

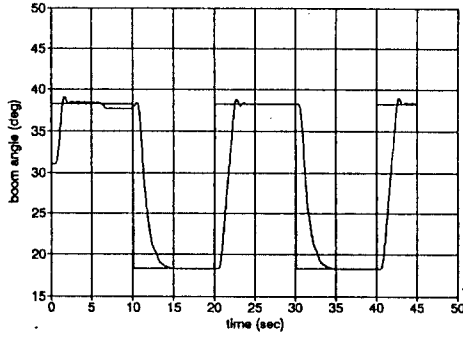


그림 8 계단파용답, 암 완전펼침상태(시간역)
 $K_p=0.003$, $m_{up}=2$, $m_{down}=1$, s scale=5, Δu scale=0.005

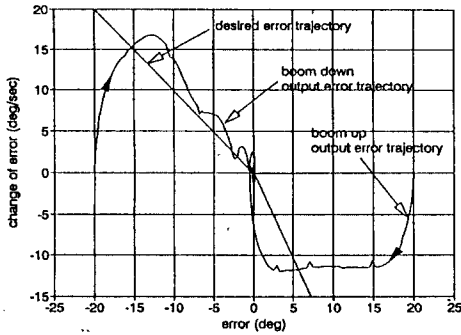


그림 9 계단파용답, 암 완전펼침상태(상평면)
 $K_p=0.003$, $m_{up}=2$, $m_{down}=1$, s scale=5, Δu scale=0.005

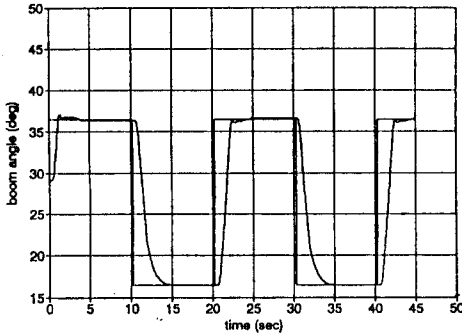


그림 10 계단파용답, 암 완전오므림상태(시간역)
 $K_p=0.003$, $m_{up}=2$, $m_{down}=1$, s scale=5, Δu scale=0.005

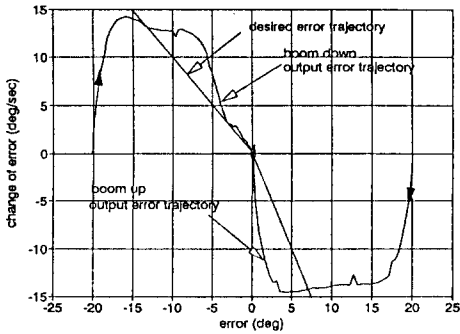


그림 11 계단파용답, 암 완전오므림상태(상평면)
 $K_p=0.003$, $m_{up}=2$, $m_{down}=1$, s scale=5, Δu scale=0.005

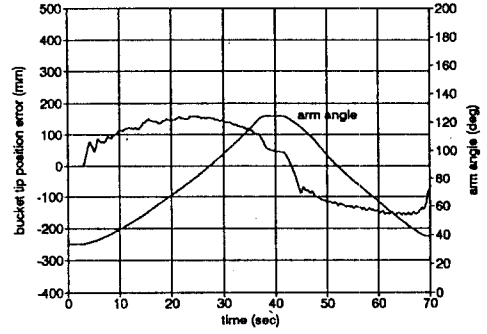


그림 12 수평정지작업, 암 천천히 구동, $K_p=0.1$

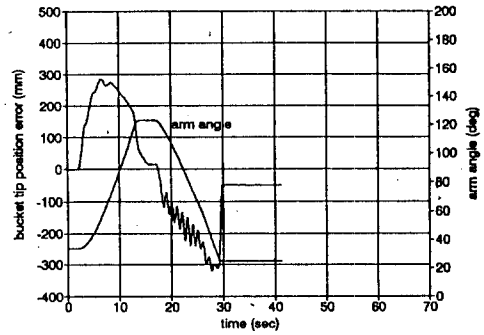


그림 13 수평정지작업, 암 빠르게 구동, $K_p=0.1$

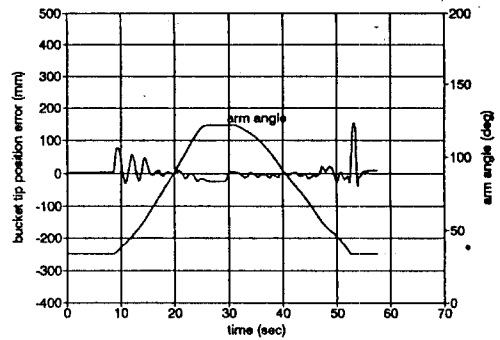


그림 14 수평정지작업, 암 천천히 구동
 $K_p=0.05$, $m_{up}=2$, $m_{down}=2$, s scale=5, Δu scale=0.003

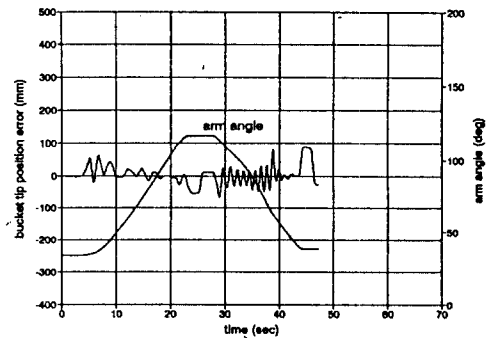


그림 15 수평정지작업, 암 빠르게 구동
 $K_p=0.05$, $m_{up}=2$, $m_{down}=2$, s scale=5, Δu scale=0.003