

## 퍼지 제어를 이용한 유압 굴삭기의 일정각 굴삭 제어

서삼준\*, 박귀태\*, 신동목\*, 김관수\*\*, 임종형\*\*  
 \*고려대학교 전기공학과 \*\*현대중공업 (주)

### The Constant Angle Excavation Control of Excavator's Attachment using Fuzzy Logic Controller

Sam-Joon Seo\*, Gwi-Tae Park\*, Dong-Mok Shin\*, Kwan-Soo Kim\*\*, Jong-Hyung Yim\*\*

\*Dept. of Electrical Eng., Korea University

\*\*Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

**Abstracts :** To automate an excavator the control issues resulting from environmental uncertainties must be solved. In particular 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. Excavation experiments are carried out to check the performance of the FLC.

### 1. 서 론

건설 기계는 공사가 대형화되고 공기 단축, 원가 절감 및 품질 향상의 필요에 따라 그 중요도가 증가되고 있으며, 인간의 힘에 의한 시공이 불가능하거나 위험한 작업을 할 경우 그 역할이 더욱 중요시 되고 있다.

건설 중장비 중 굴삭기는 인간의 팔과 유사한 구조를 가지고 있으며 다기능성과 경제성 등의 장점으로 많이 사용되고 있는 실정이며 앞으로 사용 비중이 증가할 것으로 예상된다. 특히 유압 굴삭기의 경우 건설 중장비 생산액의 60% 이상을 차지할 정도로 비중이 높아 자동화를 위한 연구가 적극 추진되고 있다.[1]

이러한 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.[2]-[4]

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 일정각 굴삭작업에 적용하여 그 유용성을 입증하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 굴삭기 작업장치의 운동 방정식과 유압 시스템의 동특성식을 모델링하고 3장에서는 일정각 굴삭작업에 퍼지 제어를 적용하여 유용성을 입증하였고, 마지막으로 4장에서는 결론을 실었다.

### 2. 유압 굴삭기

#### 2.1 굴삭기 작업장치

굴삭기의 작업장치는 붐(Boom), 암(Arm), 버킷(Bucket)의 3관절 구조로 구성되어 있으며 유압 실린더에 의해 붐, 암, 버킷의 위치  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$  가 각각 제어된다.

본 논문의 굴삭기 작업장치 모델링에서 굴삭기의 본체는 강체로 보고 관절의 모양과 마찰은 무시하며 굴삭기 전체의 선회(Swing)는 고려하지 않는다고 가정한다. 그림 1에 굴삭기 작업장치의 파라미터들을 표시하였다.

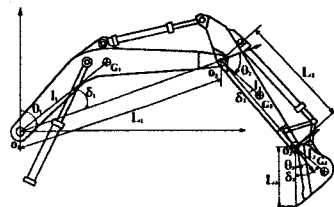


그림 1 굴삭기 작업장치의 파라미터들  
 Fig.1 Parameters of excavator's attachment

굴삭기 작업장치의 운동 방정식을 유도하기 위하여 붐, 암, 버킷의 무게중심을 구하고 각각의 미분과 내적을 구하면 시스템 전체의 운동 에너지와 위치 에너지를 구할 수 있다.

LAGRANGE 방정식을 이용하여 굴삭기 작업장치의 운동 방정식을 구하면 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.[8]

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

여기서,  $J(\theta)$ 는 Inertia 항,  $h(\theta, \dot{\theta})$ 는 Coriolis 力과 원심력에 의한 항,  $g(\theta)$ 는 중력항,  $\tau$ 는 작업장치에 공급되는 토크를 각각 나타낸다.

계산 결과 각각의 항은 다음과 같이 표현된다.

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} J_{11} &= a_1 + 2c_1 + 2c_2 + 2c_3 + 2c_4 \\ J_{12} = J_{21} &= a_2 + c_1 + c_2 + c_3 + 2c_4 \\ J_{13} = J_{31} &= a_3 + c_3 + c_4 \\ J_{22} &= a_2 + 2c_4 \\ J_{23} = J_{32} &= a_3 + c_4 \\ J_{33} &= a_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_1 &= a_2 + m_1 l_1^2 + m_2 L_1^2 + m_3 L_1^2 + I_1 \\
 a_2 &= a_3 + m_2 l_2^2 + m_3 L_2^2 + I_2 \\
 a_3 &= m_3 l_3^2 + I_3 \\
 c_1 &= m_2 L_1 l_2 \cos(\theta_2 - \delta_2) \\
 c_2 &= m_3 L_1 L_2 \cos \theta_2 \\
 c_3 &= m_3 L_1 l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 - \delta_3) \\
 c_4 &= m_3 L_2 l_3 \cos(\theta_3 - \delta_3)
 \end{aligned}$$

$$h(\theta, \dot{\theta}) = [h_1, h_2, h_3]^T \quad g(\theta) = [g_1, g_2, g_3]^T$$

$$\begin{aligned}
 h_1 &= -(s_1 + s_2 + s_3)(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\dot{\theta}_2 \\
 &\quad - (s_3 + s_4)(2\dot{\theta}_1 + 2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)\dot{\theta}_3 \\
 h_2 &= (s_1 + s_2 + s_3)\dot{\theta}_1^2 - s_4(2\dot{\theta}_1 + 2\dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3)\dot{\theta}_3 \\
 h_3 &= (s_3 + s_4)\dot{\theta}_1^2 + s_4(2\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)\dot{\theta}_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 g_1 &= -m_1 l_1 g \sin(\theta_1 - \delta_1) - (m_2 + m_3) L_1 g \sin \theta_1 \\
 &\quad - m_2 l_2 g \sin(\theta_1 + \theta_2 - \delta_2) - m_3 L_2 g \sin(\theta_1 + \theta_2) \\
 &\quad - m_3 l_3 g \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - \delta_3) \\
 g_2 &= -m_2 l_2 g \sin(\theta_1 + \theta_2 - \delta_2) - m_3 L_2 g \sin(\theta_1 + \theta_2) \\
 &\quad - m_3 l_3 g \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - \delta_3) \\
 g_3 &= -m_3 l_3 g \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 - \delta_3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 s_1 &= m_2 L_1 l_2 \sin(\theta_2 - \delta_2) \\
 s_2 &= m_3 L_1 L_2 \sin \theta_2 \\
 s_3 &= m_3 L_1 l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 - \delta_3) \\
 s_4 &= m_3 L_2 l_3 \sin(\theta_3 - \delta_3)
 \end{aligned}$$

## 2.2 유압 시스템

굴삭기의 유압 시스템은 유압 펌프, 비례 제어 밸브, 주 제어 밸브, 유압 실린더와 보조 밸브류로 구성되어 있다. 유압 펌프는 두개의 가변 용량형 피스톤 펌프로서 디젤 엔진에 의해 구동된다. 각각의 펌프는 자기 압력과 상대 압력과 회로로부터의 파일릿 압력에 의해 사판과, 즉 토출 유량이 제어된다. 주 제어 밸브는 방향 제어 밸브로서 붐, 암, 버킷을 각각 제어한다. 주 제어 밸브는 비례 제어 밸브로부터의 파일릿 압력에 의해 스톱의 위치가 제어되고 유로가 형성된다. 유압 실린더는 편로드 복동 실린더로서 2개의 붐 실린더, 1개의 암 실린더와 1개의 버킷 실린더가 사용된다. 그리고, 유압 펌프의 사판과 제어용 파일릿 압력 형성과 유량 한류를 위한 로직 밸브, 회로 보호를 위한 릴리프 밸브, 유량의 역류 방지를 위한 체크 밸브 등의 보조 밸브류가 사용된다.

유압 시스템의 모델링에 있어서 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) 공동현상(cavitation)은 발생하지 않는다.
- (2) 유압유의 밀도와 온도는 일정하다.
- (3) 귀환 압력(return pressure)은 대기압과 같다.

### 2.2.1 비례 제어 밸브

비례 제어 밸브는 제어 전류에 상응한 압력을 출력하여 주 제어 밸브의 스톱 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 연구에서는 제어 전류로부터 주 제어 밸브의 스톱 변위까지를 시상수  $\tau$ 의 1차 지연 요소 아래와 같이 모델링 하였다.

$$\frac{X}{J} = \frac{K_c}{\tau s + 1} \quad (2)$$

여기서,

- I : 제어 전류(mA)
- X : 주 제어 밸브의 스톱 변위
- $\tau$  : 시정수(0.03sec)
- Kc : 비례 이득

### 2.2.2 주 제어 밸브

주 제어 밸브는 중립 위치(neutral position)에서 바이패스(bypass)회

로를 갖는 3 위치 4 유로(three position four way) 방향 제어 밸브가 사용된다. 방향 제어 밸브의 유량 배분은 스톱 변위(spool displacement)에 따른 개구 면적(opening area) 특성에 좌우되며 굴삭기의 특성에 맞게 비선형적으로 구성되어 있다.

비선형 개구 면적 특성은 부하의 자중에 의한 자유 낙하와 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.

따라서, 본 연구에서는 이론적 해석의 편리성을 위하여 주 제어 밸브의 개구 면적은 비례 제어 밸브의 스톱 변위에 비례한다고 가정하기로 한다.

### 2.2.3 제어 밸브와 유압 실린더의 모델링

작업장치를 구동하는 유압 시스템은 그림 2에 나타난 것과 같이 유압 펌프, 주 제어 밸브, 유압 실린더와 보조 밸브류로 구성되어 있다. 유압 펌프는 가변 용량형 피스톤 펌프로서 디젤 엔진에 의해 구동되고 주 제어 밸브는 방향 제어 밸브로서 붐, 암, 버킷을 각각 제어한다.

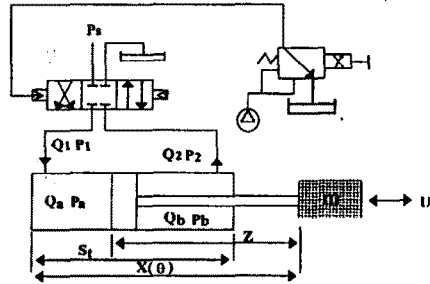


그림 2 굴삭기의 유압 회로  
Fig.2 Hydraulic circuit of excavator

굴삭기 작업장치에 공급되는 토크 방정식은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_i = \begin{cases} G_i(\theta_i) [r_i A_i P_m - A_i P_b - D_i H_i(\theta_i) \dot{\theta}_i] & i=1 \\ G_i(\theta_i) [r_i A_i P_m - A_i P_m - D_i H_i(\theta_i) \dot{\theta}_i] & i=2,3 \end{cases} \quad (3)$$

여기서,

- $G_i(\theta_i)$  : 유압 실린더에서 발생한 힘에서 관력 토크로의 Link gain
- $H_i(\theta_i)$  : 관절의 각속도에서 유압 실린더의 속도에서의 Link gain
- $P_m$  : 고압측의 유압
- $P_b$  : 저압측의 유압
- $A_i$  : 유압 실린더의 Load측 단면적
- $r_i A_i$  : 유압 실린더의 Bottom측 단면적
- $D_i$  : 유압 실린더의 마찰계수
- $D_i H_i(\theta_i) \dot{\theta}_i$  : 각 유압 실린더의 마찰력

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

#### 1) 붐 팽창의 경우

$$\begin{aligned}
 Q_a &= K_f X \sqrt{P_s - P_a} \\
 &= r_1 A_1 \dot{x}(\theta) + \beta V_a \frac{dP_a}{dt} + a(P_a - P_b) \quad (4)
 \end{aligned}$$

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

#### 2) 붐 수축의 경우

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

$$Q_b = K_f X \sqrt{P_s - P_b}$$

$$= A_1 \dot{x}(\theta) + \beta V_b \frac{dP_b}{dt} + \alpha (P_b - P_a) \quad (7)$$

여기서,

$\alpha$  : 유압유의 누출 정수

$\beta$  : 유압유의 압축률

$V_a, V_b$  : 붐 실린더의 유의 체적

또한, 유압 실린더의 체적은 다음과 같이 각각 구할 수 있다.

$$V_{a_i}(\theta_i) = r_i A_i [x_i(\theta_i) - z_i] \quad (8)$$

$$V_{b_i}(\theta_i) = A_i [S_i + z_i - x_i(\theta_i)] \quad (9)$$

여기서,

$x_i(\theta_i)$  : 유압 실린더의 길이

$S_i$  : 유압 실린더의 스트로크 길이

$z_i$  : 유압 피스톤 길이

$V_{a_i}, V_{b_i}$  : 유압 실린더의 유의 체적

$i=1$ (붐),  $i=2$ (암),  $i=3$ (버킷)

### 3. 퍼지 제어를 이용한 유압 굴삭기의 일정각 굴삭제어

#### 3.1 퍼지 제어기의 기본 구조

퍼지 제어기는 시스템의 특성이 복잡하여 기존의 정량적인 방법으로는 해석할 수 없거나, 얻어지는 정보가 정성적이고 부정확하여 불확실한 경우 기존 제어기를 보다 우수한 제어 성능을 나타내며 기존의 정확한 수학적 모델을 기초로 한 제어기의 단점을 보완하고, 인간의 의사결정 방식을 도입하여 보다 인공 지능적인 제어기가 될 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 제어기를 설계하는데 있어서 일반적인 체제가 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 퍼지 제어를 계산하는 비퍼지화부(defuzzifier), 소속 함수와 제어 규칙등의 정보를 제공하는 지식 기반(knowledge base)으로 구성되어 있다.

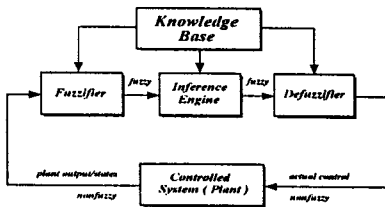


그림 3 일반적인 퍼지 제어기의 구조  
Fig.3 Structure of general FLC

#### 3.2 일정각 굴삭 작업

퍼지 논리 제어기를 굴삭기 작업장치의 일정각 굴삭작업에 적용하여 실험을 수행하였다. 작업 경사각은 30°, 굴삭 길이 3m, 굴삭 시간 10sec, 샘플링 시간은 2msec로 선정하고 붐, 암, 버킷의 초기 위치는  $\theta_1=55^\circ, \theta_2=45^\circ, \theta_3=50^\circ$  로 하고 실험을 수행하였다.

제어 규칙은 표 1의 규칙을, 소속함수는 입력 변수에 대해 7개의 언어 변수를 갖는 그림 4와 같은 삼각형 형태를 사용하였으며 각각 정규화 하였다. 퍼지화 방법으로는 단일화법, 비퍼지화 방법으로는 무게중심법을 퍼지 관계의 합성은 Mamdani가 사용한 최대 최소 합성법을 사용하였다.

실험용 굴삭기는 현대중공업의 HX-60W를 사용하였으며 실험장치의 기본적인 구성은 그림 5에 나타내었다. 실험장치는 실제 굴삭기의 위치를 포텐시오펜터와 증폭기, A/D 변환기를 통해서 측정하고 제어기에서 계산된 제어입력은 D/A 변환기를 통해서 아날로그 전압으로 변환되며 전압/전류 변환기를 통해 비례 제어 밸브를 구동하며 비례 제어 밸브

의 파일럿 압력에 의해 주 제어 밸브의 스톱 변위가 발생하여 각각의 유압 실린더를 신속하는 형태로 제어 된다.

제어기는 TMS320C31 보드를 사용하고 A/D, D/A 변환기는 Analog Device사의 AD 7874와 DA 7247를 사용하였다. 그림 6에 제어 프로그램의 순서도를 도시하였다.

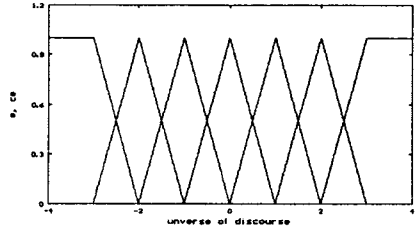


그림 4 사용된 소속함수  
Fig.4 Used membership function

표 1 사용된 퍼지 규칙  
Table 1 Used fuzzy rules

|    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|
|    | 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 | ZO | PS | PS | PS |
| NM | NB | NB | NB | NM | ZO | ZO | PS |
| NB | NB | NB | NB | NB | NM | NS | ZO |

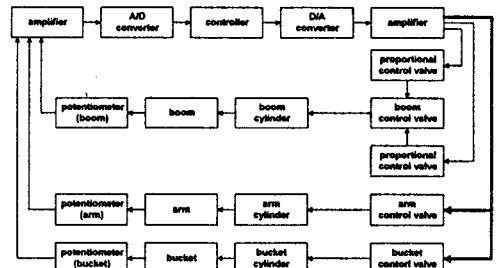


그림 5 실험 장치의 블록선도  
Fig 5 Block diagram of experimental equipments

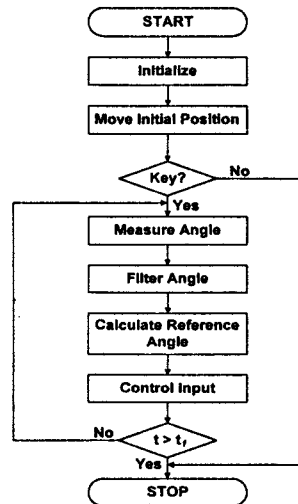


그림 6 실험용 프로그램의 흐름도

Fig.6 Flowchart of experimental program

그림 7, 그림 8, 그림 9는 붐, 암 버킷의 원하는 궤적과 실제 궤적을 비교하여 나타내었다.

그림 10에서는 실제 굴삭 궤적을 도시하였고, 그림 11에서는 굴삭 오

차를 나타내었다. 최대 오차가 12cm 정도로 만족할 만한 수준은 아니나 적절한 스케일 인자를 조종하면 오차는 더 줄어들 것으로 생각된다.

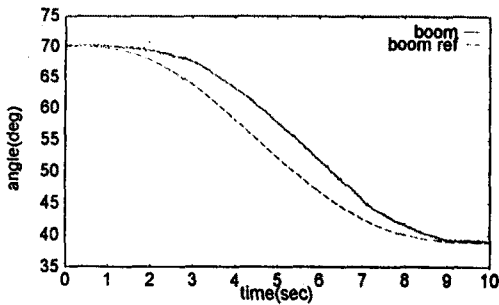


그림 7 붐의 응답  
Fig.7 Response of boom

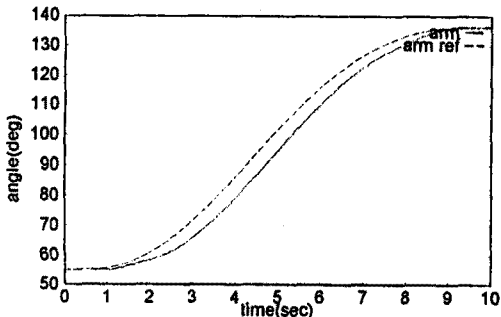


그림 8 암의 응답  
Fig.8 Response of arm

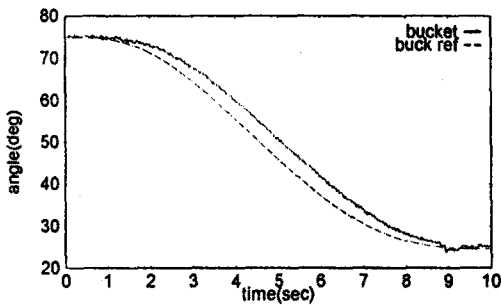


그림 9 버킷의 응답  
Fig.9 Response of bucket

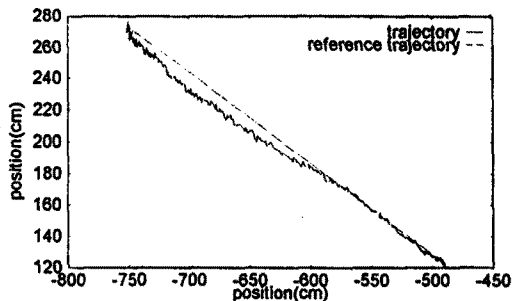


그림 10 굴삭 궤적  
Fig.10 Trajectory of excavation

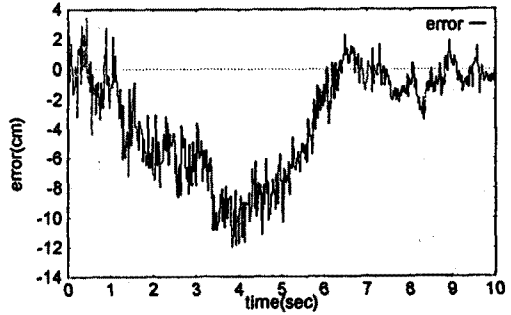


그림 11 굴삭 오차  
Fig.11 Excavation error

#### 4. 결 론

본 논문에서 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 일정과 굴삭 작업에 적용하여 그 유용성을 입증하였다.

#### 참고 문헌

- [1] H. Nakamura & Matsuzaki, "Automation in construction machinery", *Hitachi 평론* Vol. 57, No. 3, 1975
- [2] N. Kimura, H. Araya, M. Kakuzer, "Automatic control system for hydraulic excavator", *kobe steel engineering reports*, Vol. 37, No. 2, 1987
- [3] Paul J.A. Lever, Fei-Yue Wang and Deqian Chen, "A fuzzy control system for an automated mining excavator", *Proceedings IEEE Robotics and Automation*, pp.3284-3289, 1994
- [4] T. Terano et al, "Fuzzy control bulldozer", *ENGINEERING, IFSA(Brussels)*, pp.219-222, 1991
- [5] B. Kosko, "Neural Networks and Fuzzy Systems", Prentice-Hall, 1992
- [6] M.Jamshidi, N.Vadiei and T.Ross, "Fuzzy Logic and Control", Prentice-Hall, 1993
- [7] T. Morita, Y. Sakawa, "Modeling and control of a power shovel", *계측자동제어학회논문집* Vol. 22, No. 1, 1986
- [8] 서 삼준, 권 대익등, "다중 신경 회로망을 이용한 굴삭기의 위치 제어", '95 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp.705-709, 1995