

# 필드로봇용 원격 굴삭 시스템의 궤적제어에 관한 연구

## A Study on Tracking Control of Remote Operated Excavator for Field Robot

양순용 · 진성민 · 최정주 · 이창돈 · 김용석

S. S. Yang, S. M. JIN, J. J. Choi, C. D. Lee and Y. S. Kim

**Key Words** : Field Robot (필드 로봇), Remote operation excavator (원격굴삭기), Tele-operation excavator(원격 굴삭기), Adaptive Sliding Mode control (적응 슬라이딩모드 제어), Excavator (굴삭기)

**Abstract:** Hydraulic excavators are the representative of field robot and have been used in various fields of construction. Since the excavator operates in the hazardous working environment, operators of excavator are exposed in harmful environment. Therefore, the hydraulic excavator automation and remote operation system has been investigated to protect from the hazardous working environment. In this paper, remote operation excavator system is developed using the mini hydraulic excavator and the tracking control system of each links of excavator is designed. To apply the tracking control system, the adaptive sliding mode control algorithm is proposed. It is found that the performance of the proposed control system is improved through experimental results of using the remote operation excavator system.

### 기호 설명

$x_b$  : 붐 끝단의 x방향의 위치좌표  
 $y_b$  : 붐 끝단의 y방향의 위치좌표  
 $x_a$  : 암 끝단의 x방향의 위치좌표  
 $y_a$  : 암 끝단의 y방향의 위치좌표  
 $x_k$  : 버켓 끝단의 x방향의 위치좌표  
 $y_k$  : 버켓 끝단의 y방향의 위치좌표  
 $L_1$  : 붐의 길이  
 $L_2$  : 암의 길이  
 $L_3$  : 버켓의 길이  
 $\theta_1$  : 붐의 회전각도  
 $\theta_2$  : 암의 회전각도  
 $\theta_3$  : 버켓의 회전각도  
 $\theta_k$  : 기준모델 각도  
 $\Gamma$  : 시행착오로 얻은 계수 전치 행렬

$\phi(t)$  : 센서 측정 각도 전치행렬  
 $\hat{\theta}_k$  : 실시간 추종 각도  
 $R(t)$  : 실시간 추종 이동거리  
 $\theta_r$  : 실시간 측정 각도  
 $e$  : 실제와 기준모델의 각도 차  
 $u_k$  : 제어 입력  
 $V$  : 리아푸노프 함수  
 $r_a(t)$  : 암 선단의 수평 이동거리  
 $\dot{r}_a(t)$  : 암 선단의 수평 이동속도  
 $\ddot{r}_a(t)$  : 암 선단의 수평 이동가속도

### 1. 서 론

필드 로봇(Field Robot)은 건설, 임업, 농업, 해저 등 다양한 옥외 작업에서 인간을 대신하여 위험하거나 반복적이고 힘든 일을 수행 할 수 있는 것을 의미한다. 특히, 유압 굴삭기는 다기능성과 경제성 등의 장점으로 인해 가장 많이 사용되고 있으며 그 역할이 점차 확대되고 있다.

한편, 굴삭기를 이용하여 수행하는 평탄 작업, 덩핑 작업, 토사 작업 등의 작업들은 작업자가 많은 작업 장치들을 동시에 조작하여야 하므로 고도의 숙련

---

접수일 : 2009년 9월 7일, 게재확정일: 2009년 10월 29일  
 진성민 : 울산대학교 자동차선박대학원  
 최정주 : 동아대학교 고기능성밸브 기술지원지역혁신센터  
 이창돈 : 울산대학교 BK21 지능형자동차부품기술개발팀  
 김용석 : 울산대학교 기계자동차공학부  
 양순용(책임저자) : 울산대학교 기계자동차공학부  
 E-Mail : soonyy@ulsan.ac.kr Tel : 052-259-2820

이 필요로 한다. 따라서 굴삭 작업의 정도나 작업효율은 작업자의 능력에 좌우된다고 할 수 있고, 비록 숙련자라 할지라도 장시간 조작할 때 상당한 피로를 느끼게 된다. 이에 따라, 다양한 작업이 가능한 건설기계의 자동화 및 지능화에 따른 필드 로봇화에 대한 연구가 적극 진행되고 있다. 특히, 자동 굴삭기의 전체 논문에서 굴삭기의 작업장치(뿔, 암, 버켓)의 역학적 기구모델(운동방정식) 구축 및 제어기 개발에 약 56%가 차지하는 것으로 나타나고 있다. 이는 필드 로봇에서 자동 굴삭을 수행하기 위해서는 위치제어가 기본적으로 갖추어져야 하기 때문이다<sup>1-2)</sup>.

유압 굴삭기는 작업 조건과 환경에 따라 시스템 동특성이 변하여 수학적 모델을 구축하는데 상당한 어려움이 따르며, 적절한 모델식을 얻었다 할지라도 시스템의 많은 비선형성 및 상태변수 간 연성이 강하여 이론적 해석을 통한 제어이론의 적용 및 설계가 곤란하다. 또한 작업 성질 및 환경에 따라 시스템에 대한 외란이 변하고, 제어입력 영점의 좌우에서 제어특성이 상이하여 고전 제어기로는 한계를 갖는다<sup>3-5)</sup>. 이러한 문제를 극복하고자 수학적 모델을 사용하지 않은 입출력 정보를 이용한 제어기가 제안되었다<sup>6-7)</sup>.

본 논문에서는 1.5톤 소형굴삭기를 필드 로봇화하기 위하여 무선 통신을 이용하여 원격 굴삭 시스템을 구축하였다. 또한, 굴삭기 작업장치 각도의 입출력 정보만을 이용하여 실시간으로 굴삭기 모델식을 추정하고 이를 바탕으로 비선형 강인 제어기법인 슬라이딩 모드 제어기를 설계하였다.

본 연구는 원격 굴삭 시스템을 실시간으로 작업장치 끝단 제어(end effector control)하기 위한 선행 연구로서 생성한 수평계적 신호를 기반으로 구축한 시스템의 성능을 실험하였다.

## 2. 기구학적 모델링

필드 로봇의 자동굴삭 구현을 위하여 기구학 및 역기구학 해석을 수행하였다. 본 논문에서는 굴삭기의 주행과 선회를 제외한 작업장치의 작업만을 고려하였다.

기구학적 모델링을 위한 좌표계를 Fig. 1과 같이 정의하고, 뿔 조인트  $O_1$ 을 원점으로 하여 뿔, 암, 버켓의 선단 위치좌표를 나타내면 식(1)과 식(2) 그리고 식(3)과 같이 된다.

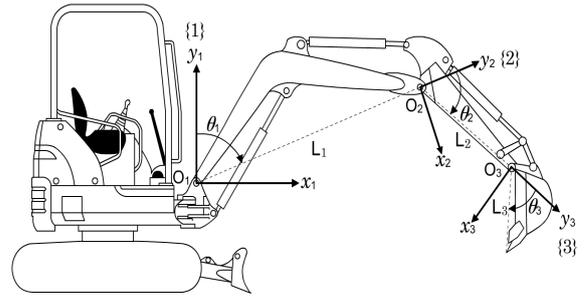


Fig. 1 Schematic diagram of attachment

$$\begin{aligned} x_b &= L_1 \sin \theta_1 \\ y_b &= L_1 \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} x_a &= L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \\ y_a &= L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x_k &= L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \\ &\quad + L_3 \sin (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ y_k &= L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \\ &\quad + L_3 \cos (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{aligned} \quad (3)$$

암에 대한 역기구학 해석을 통하여 뿔 조인트 각도  $\theta_1$ 과 암 조인트 각도  $\theta_2$ 는 식(4)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_1 &= \sin^{-1} \left( \frac{x_a^2 + y_a^2 + L_1^2 - L_2^2}{2 L_1 \sqrt{x_a^2 + y_a^2}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{y_a}{x_a} \right) \\ \theta_2 &= \cos^{-1} \left( \frac{x_a^2 + y_a^2 - L_1^2 - L_2^2}{2 L_1 L_2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

다음으로, 식(2)을 시간에 대해 미분하여 뿔과 암의 관절 각속도와 관절 각가속도로 나타내면 각각 식(5)와 식(6)으로 표현 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} = R(\theta)^{-1} \begin{bmatrix} \ddot{x}_a + L_1 \sin \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \\ \ddot{y}_a + L_1 \cos \theta_1 \dot{\theta}_1^2 + L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

단,  $R(\theta)$ 는 다음 식(7)과 같이 나타나는 자코비안(Jacobian)이다.

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) & L_2 \cos (\theta_1 + \theta_2) \\ -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) & -L_2 \sin (\theta_1 + \theta_2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3. 시스템 구축

구축한 필드 로봇용 원격 굴삭 시스템은 크게 굴삭기와 컨트롤러를 포함한 작동부와 조이스틱과 컴퓨터를 포함한 조작부로 나눌 수 있다. 원격 굴삭 시스템의 구성과 개략도는 Fig. 2와 같다.

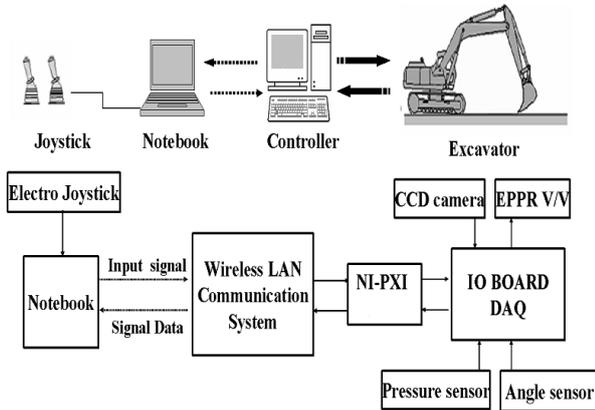


Fig. 2 Remote control system

일반적인 유압 굴삭기를 필드 로봇화하기 위해서는 작업자가 조작하는 유압식 원격제어밸브(RCV, Remote Control Valve)를 전기식 조이스틱과 전자비례 감압밸브로 대체할 필요가 있다. 이는 컨트롤러에서의 출력전압으로 유압 굴삭기의 편로드 실린더를 제어하기 위함이다. 따라서 본 연구에서도 이와 같이 구성하였고, 또한 작업장치의 각 관절의 변위를 검출하기 위해 각도센서를 부착하고, 버킷 끝단 및 각 부분에서의 힘 및 토크를 검출하기 위해 실린더 입출구 포트 양단에 압력센서를 장착하였다. 또한 센서 값의 A/D 변환과 전자비례 감압밸브의 D/A 변환, 센서 및 감압밸브로의 전원 공급, 제어 알고리즘 등을 수행하는 컨트롤러를 구축하였다. 컨트롤러는 NI사의 PXI-8186을 사용하여 랩뷰(LabVIEW)의 Real Time Module을 이용하여 실시간으로 구동되는 시스템을 구축하였다. 향후의 원격 굴삭 시스템을 위하여 작업 화면을 촬영하는 CCD카메라와 카메라의 위치를 조정하는 팬/틸트(pan/tilt)를 장착하였으며, 시스템의 작동부와 조작부 사이의 작업 화면과 데이터 전송을 위해 무선랜 통신장비를 구축하였다. 구축한 필드로봇용 원격 굴삭 시스템의 작동부는 Fig. 3과 같다.

원격 굴삭 시스템의 조작부는 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4와 같이 데이터 전송을 위한 무선랜 통신과 작업화면의 모니터링이 가능한 노트북을 사용하

였다. 이때, 작동부와 통신 속도는  $54[Mbps]$ 이며 통신범위는  $200[m]$  반경이다.

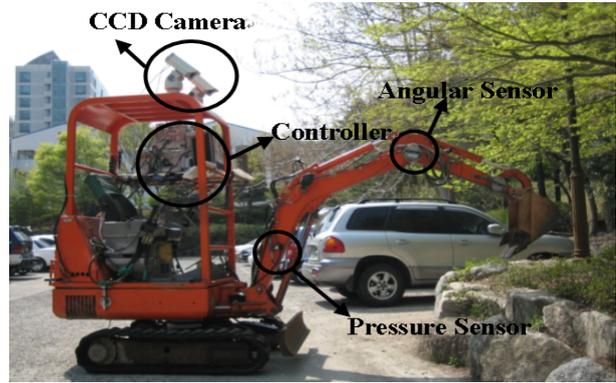


Fig. 3 Excavator & Its components



Fig. 4 Remote operator station

### 4. 제어기 설계

일반적으로 건설현장에 사용되고 있는 굴삭기는 원격제어밸브의 조작에 따른 개루프 제어가 이루어지고 있으나 자동 굴삭기 시스템의 구축을 위해서는 구동 액추에이터에 대한 안정성과 강인성이 보장되는 제어기를 이용한 폐루프 시스템으로 설계하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 각 링크부의 회전각을 이용한 적응 슬라이딩 제어기를 설계하였다. 제어기 설계에 앞서 굴삭기 시스템의 파라미터는 작업 환경 따라 변하는 것으로 간주하여 식(8)과 같이 자동회귀 변수 부분만으로 구성된 AR(Auto Regressive)모델을 기준모델로 고려하였다.

$$\theta_k = a_1\theta_{k-1} + a_2\theta_{k-2} + a_3\theta_{k-3} + b_0u_k + b_1u_{k-1} \quad (8)$$

$$\theta_k = \Gamma^T \phi(t) \quad (9)$$

여기서,  $\Gamma = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ b_0 \ b_1]^T$

$$\phi(t) = [\theta_{k-1} \ \theta_{k-2} \ \theta_{k-3} \ u_k \ u_{k-1}]^T$$

이때 각 파라미터는 실시간으로 추정할 수 있도록 식(10)과 같이 순환 최소 자승법(recursive least square) 알고리즘을 이용하였다.

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_k &= \hat{\theta}_{k-1} + R^{-1}(t)\phi(t)\{\theta(t) - \phi^T\hat{\theta}_{k-1}\} \\ R(t) &= \hat{\lambda}(t)R(t-1) + \phi(t)\phi^T(t)\end{aligned}\quad (10)$$

여기서,  $\lambda(t)$ 는 가중행렬이다.

식(8)과 식(10)과 같이 실시간으로 근사화된 3차의 이산 모델식을 바탕으로 본 논문에서는 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. 이를 위해 슬라이딩 평면을 식(11)과 같이 선정하였다.

$$s = \ddot{e} + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2e \quad (11)$$

여기서,  $e = \theta_r - \theta_k$ 이다.

선정된 슬라이딩 평면의 도함수는 식(12)와 같이 된다.

$$\begin{aligned}\dot{s} &= \ddot{e} + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2\dot{e} \\ &= \ddot{\theta}_r - \ddot{\theta}_k + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2e\end{aligned}\quad (12)$$

여기서  $\ddot{\theta}_k$ 는 샘플링 타임  $t_s$ 를 이용하여 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\theta}_k = \frac{\theta_k - 3\theta_{k-1} + 3\theta_{k-2} - \theta_{k-3}}{t_s^3} \quad (13)$$

식(13)과 슬라이딩 모드 제어시스템의 도달법칙을 이용하기 위해서 슬라이딩 평면의 도함수를 식(14)와 같이 선정하였다.

$$\begin{aligned}\dot{s} &= \ddot{\theta}_r - \frac{\theta_k - 3\theta_{k-1} + 3\theta_{k-2} - \theta_{k-3}}{t_s^3} + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2e \\ &= -Ds - K \operatorname{sgn}(s)\end{aligned}\quad (14)$$

여기서,  $D$ 와  $K$ 는 양의 한정(positive definite)인 파라미터이다. 식(14)에 포화함수(saturation)로  $\operatorname{sgn}(s)$ 를  $\operatorname{sat}(s/\phi)$ 로 바꾸면 식(15)와 같이 되고 채터링 발생을 줄일 수 있다.

$$\dot{s} = -Ds - K\operatorname{sat}(s/\phi) \quad (15)$$

식(8)과 식(15)을 이용하여 슬라이딩 모드 제어시스템의 도달 법칙을 만족하는 제어입력을 식(16)과 같이 선정하였다.

$$\begin{aligned}u_{eq} = u_k &= \frac{1}{b_0} \left[ t_s^3 (\ddot{\theta}_r + 2\lambda\ddot{e} + \lambda^2e + Ds + K\operatorname{sat}(s/\phi)) + \right. \\ &\quad \left. \theta_{k-1}(a_1 + 3) + \theta_{k-2}(a_2 - 3) + \theta_{k-3}(a_3 + 1) - b_1u_{k-1} \right]\end{aligned}\quad (16)$$

선정된 제어시스템의 안정도는 리아푸노프(Lyapunov) 안정도 조건을 이용하여 검토하였다. 이를 위해 식(17)과 같은 리아푸노프 함수( $V$ )를 선정하였다.

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (17)$$

식(17)에서 리아푸노프 함수의 도함수는 식(15)을 이용하면 식(18)과 같다.

$$\begin{aligned}\dot{V} &= s\dot{s} \\ &= s(-Ds - K\operatorname{sat}(s)) \leq 0\end{aligned}\quad (18)$$

따라서, 이 시스템은 안정하다.

## 5. 실험

구축한 원격 굴삭 시스템의 수평작업을 하기 위하여 입력신호로 수평궤적을 생성하였다.

### 5.1 궤적 생성

5차 다항식을 이용한 암 선단의 위치와 속도 그리고 가속도는 식(19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}r_a(t) &= a_{r0} + a_{r1}t + a_{r2}t^2 + a_{r3}t^3 + a_{r4}t^4 + a_{r5}t^5 \\ \dot{r}_a(t) &= a_{r1} + 2a_{r2}t + 3a_{r3}t^2 + 4a_{r4}t^3 + 5a_{r5}t^4 \\ \ddot{r}_a(t) &= 2a_{r2} + 6a_{r3}t + 12a_{r4}t^2 + 20a_{r5}t^3\end{aligned}\quad (19)$$

이 때, 초기 위치를  $r_{a0}$ , 마지막 위치를  $r_{af}$ 로 하면, 경계조건은 식(20)과 같다.

$$\begin{aligned}r_a(0) &= r_{a0}, & r_a(t_f) &= r_{af} \\ \dot{r}_a(0) &= 0, & \dot{r}_a(t_f) &= 0 \\ \ddot{r}_a(0) &= 0, & \ddot{r}_a(t_f) &= 0\end{aligned}\quad (20)$$

따라서, 식(19)와 식(20)에 의해 궤적계획 다항식의 계수는 식(21)과 같이 표현된다.

$$a_{r0} = r_{a0}$$

$$a_{r1} = 0$$

$$a_{r2} = 0$$

$$\begin{aligned}
 a_{r3} &= \frac{20(r_{af} - r_{a0})}{t_f^3} \\
 a_{r4} &= \frac{-30(r_{af} - r_{a0})}{t_f^4} \\
 a_{r5} &= \frac{6(r_{af} - r_{a0})}{t_f^5}
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

여기서 생성된 궤적은 2장에서 기구학적 해석을 통하여 나타낸 식을 이용하면 작업장치의 좌표가 결정된다. 식(19)에 의해 암 선단의 위치, 속도, 가속도가 주어지면, 식(4)와 식(8)에 의해 각 관절의 기준 각도  $\theta_i(t)$ 가 계산되고, 식(5)와 식(6)에 의해 각 관절의 기준 각속도  $\dot{\theta}_i(t)$ 와 기준 각가속도  $\ddot{\theta}_i(t)$ 가 구해진다. 또한, 식(1)과 식(2) 그리고 식(3)을 통하여 붐, 암, 버킷의 기준 위치 좌표가 계산된다.

### 5.2 실차 시험

설계된 제어 시스템의 성능을 평가하기 위해서 기존 필드 로봇에 적용된 PID 제어기와 제안된 적응 슬라이딩모드 제어기를 비교하였다. 각 제어기의 설계 파라미터는 반복 실험을 통해 추정성능이 뛰어난 개인을 시행착오적으로 선정하였다. 이때, 입력 신호로 생성한 궤적은 버킷의 절대각도를 180[°]로 하고 암 선단의 초기 위치를 1400[mm], 최종 위치를 2200[mm]로 하여 20[sec] 동안 수평궤적을 유지하도록 설정하였다. 이때, 암 끝단의 높이는 600[mm]이며 샘플링 타임은 10[msec]으로 설정하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 수평궤적에 따른 암 선단의 추종결과와 그때의 오차를 각각 나타내고 있다. Fig. 6의 결과에서와 같이 PID 제어기의 경우  $\pm 110[mm]$ 범위에서 작동을 하는 반면에 적응 슬라이딩모드 제어기의 경우는 오차범위  $\pm 45[mm]$ 이내의 오차응답을 보임을 알 수 있다. 특히, PID 제어기의 경우 암 선단의 위치가 멀어질수록 오차가 증가함을 알 수 있다. 이는 관성에 의하여 발생하는 요인으로 PID 제어기의 경우 굴삭기의 동특성 변화에 대처하지 못하기 때문이다. 붐, 암의 추종궤적을 따라 이동시의 추종결과와 그때의 오차를 각각 나타내면 Fig. 7~Fig. 10과 같다. 추종궤적 선도 Fig. 7과 Fig. 9에서 a와 b는 적응 슬라이딩모드 제어기와 PID 제어기의 추종결과를 각각 나타내고, PID 제어에 비해 적응 슬라이딩모드 제어가 좋은 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. Fig. 8과 Fig. 10의 오차 선도의 결과에서와 같이 적응 슬라이딩모드 제어기의 경우 붐  $\pm 2[^\circ]$ , 암  $\pm 2.1[^\circ]$ 이

내의 오차범위 내에서 작동하지만 PID 제어기의 경우 붐  $\pm 2.3[^\circ]$ , 암  $\pm 3.5[^\circ]$ 범위의 오차응답을 보임을 알 수 있다. 이와 같이 굴삭기의 동특성을 고려한 최적제어를 위해서는 PID제어에 비해 적응 슬라이딩모드 제어가 유리함을 확인할 수 있다.

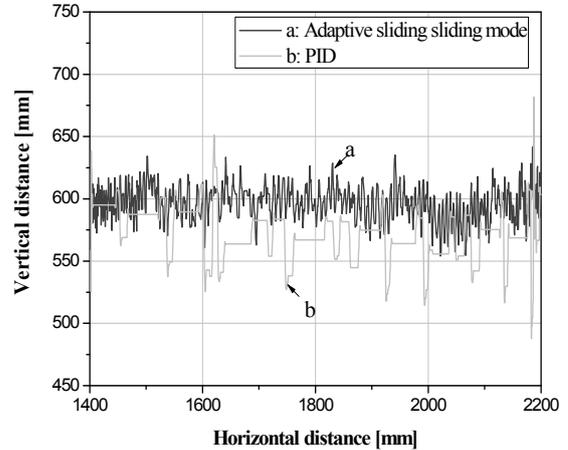


Fig. 5 Tracking response of end effector

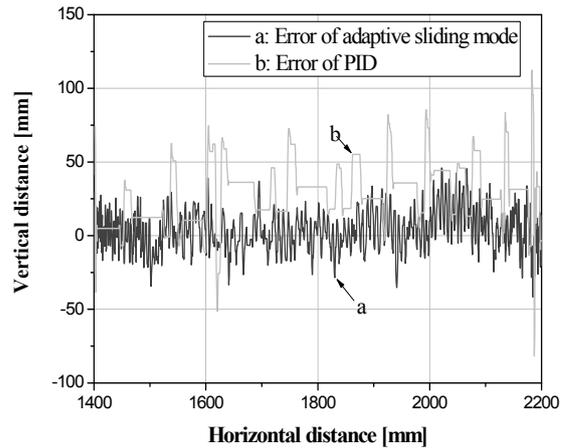


Fig. 6 Error response of end effector

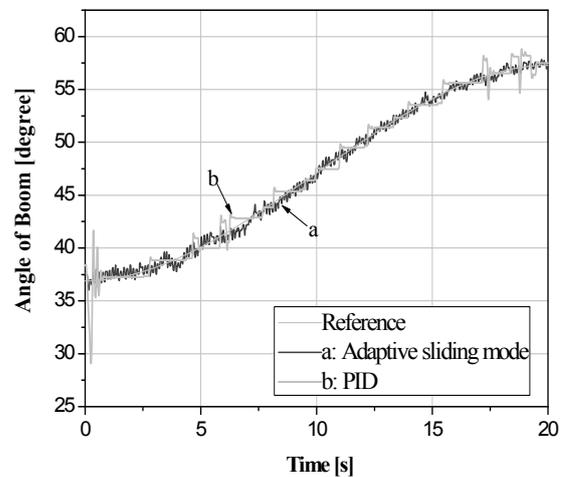


Fig. 7 Tracking response of boom joint

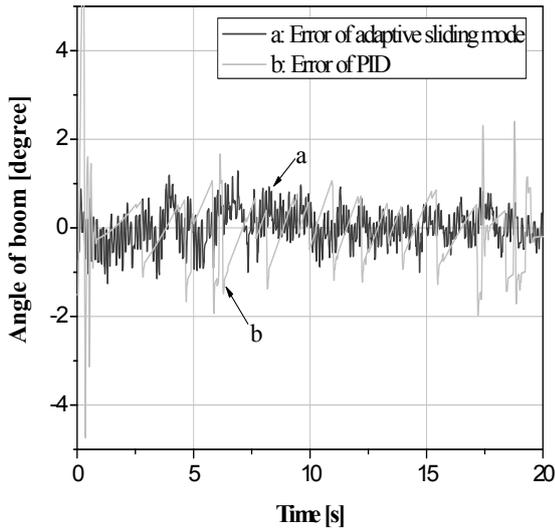


Fig. 8 Error response of boom joint

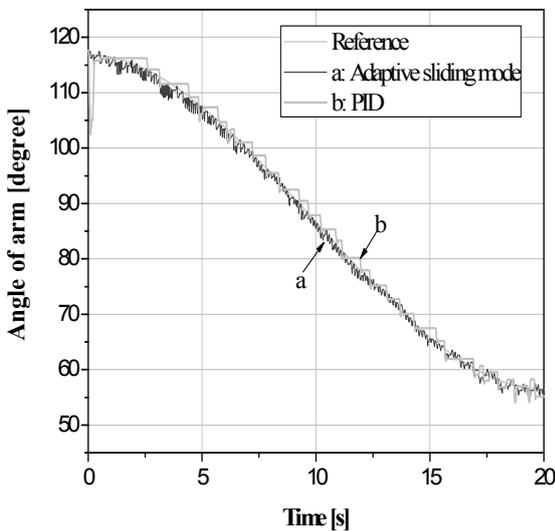


Fig. 9 Tracking response of arm joint

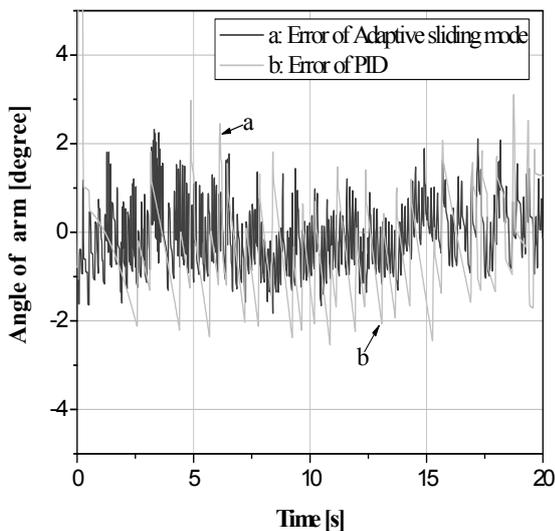


Fig. 10 Error response of boom joint

## 5. 결론

필드 로봇으로 대표되는 유압 굴삭기는 다기능성으로 인하여 산업현장에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 원격 굴삭 가능한 필드 로봇을 구축하고 원격 조작으로 작업하기 어려운 수평작업을 극복하기 위한 선행연구로서 입력신호로 생성한 수평궤적을 이용하여 제안한 적응 슬라이딩 모드제어 시스템과 PID 시스템의 제적제어를 수행하였다. 원격 굴삭 시스템의 수평 작업을 수행하기 위해서는 제안한 적응 슬라이딩 모드 제어기가 적합함을 검증하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 암선단의 수평 이동시 적응 슬라이딩 모드 제어기는 오차범위가  $\pm 45[mm]$  이내였으며, PID 제어기는 오차범위가  $\pm 110[mm]$ 로 나타났다.

(2) PID 제어의 경우 암 선단의 위치가 멀어질수록 오차가 증가하였으나 적응 슬라이딩모드 제어는 그의 변화가 없었다.

(3) 붐, 암의 추종오차에서는 적응 슬라이딩모드 제어에서는 붐  $\pm 2[^\circ]$ , 암  $\pm 2.1[^\circ]$ 이내의 오차응답을 보였고, PID 제어에서는 붐  $\pm 2.3[^\circ]$ , 암  $\pm 3.5[^\circ]$ 범위의 오차응답을 보였다.

## 참고 문헌

- 1) 임태형, 이홍선, 양순용, “유압 굴삭기용 페루프 타입 MCV”, 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문 요약집, pp. 180, 2005.
- 2) 이홍선, 이민희, 임태형, 천세영, 양순용, “크레인 기능 부착 지능형 유압 굴삭기 시스템개발”, 한국공작기계학회 논문집 제 15권, 제 5호, pp. 29~36, 2006.
- 3) S. S. Kim., W. S. Seo., S. Y. Yang., B. R. Lee and K. K. Ahn, “Trajectory control of field robot using adaptive control and system identification”, Journal of Control Automation and Systems Engineering, Vol. 8, No. 9, pp. 728~735, 2002.
- 4) 이지영, 이시천, 이교일, “퍼지 제어 이론을 이용한 굴삭기 작업장치의 위치제어에 관한 연구”, 대한기계학회추계학술대회, pp. 497~500, 1992.
- 5) Y. H. Zweiri, L. D. Seneviratne and K. Althoefer, “Model-Based Automation for Heavy Duty Mobile Excavator”, IEEE/RSJ International Conference of Intelligent Robots and Systems,

- Switzerland, pp. 2967~2972, 2002.
- 6) B. Song and A. J. Koivo, "Neural Adaptive Control of Excavators", IEEE, pp. 162~167, 1995.
- 7) Q. P. Ha and D. C. Rye, "Robotic Excavator Swing Control using Fuzzy Rotating Sliding Mode", IEEE, pp. 332~335, 2001.