

# 적응슬라이딩 모드 제어를 이용한 공압굴삭기 시스템의 위치 제어

임태형\*, 천세영\*, 양순용\*\*, 최정주#

## Position Control of the Pneumatic Excavator System Using Adaptive Sliding Mode Controller

Tae Hyeong Lim\*, Se Young Cheon\*, Soon Yong Yang\*\* and Jeong Ju Choi #

### ABSTRACT

Excavator has been used in wide field since the attachment in the end effect can be changeable according to the purpose of working. However, efficiency of work using excavator mainly depends on an operator's ability. For the purpose of improving the efficiency of work and reducing the fatigue of operator, the automatic excavator system has been researched. In this paper, the tracking control system of each links of excavator is designed before developing the automatic excavator system. In order to apply the tracking control system, the pneumatic excavator system is developed and the tracking control system is applied. For designing the tracking control system, the adaptive sliding mode control algorithm is proposed. The performance of the proposed control system is evaluated through experiments using the pneumatic excavator system.

**Key Words** : Excavator (굴삭기), Field Robot (필드 로봇), Pneumatic System (공압시스템), Adaptive Control (적응 제어), Sliding Mode Control (슬라이딩모드 제어)

### 1. 서론

굴삭기는 끝 단의 작업장치를 탈 부착할 수 있는 구조로 되어 있기 때문에 높은 작업 효율과 다양한 기능을 제공할 수 있어 건설현장에서 널리 사용되고 있다. 그러나 굴삭기를 이용한 작업 효율은 작업자의 조작능력에 따라 많은 차이를 보이고 있으며 거친 작업 환경으로 인해 다른 중장비 운전자에 비해 작업자로 하여금 더 많은 피로를 느끼

게 한다. 이러한 피로감은 굴삭작업에 있어 작업 효율 및 능률을 떨어뜨리는 원인이 된다. 굴삭기 시스템에서 작업자의 작업 능률을 떨어뜨리는 많은 요인 중에 진동에 의한 문제점은 선행연구자들에 의해 능동 피치운동제어 시스템등과 같은 진동을 완화할 수 있는 방법들이 제시되었다.<sup>1,2</sup> 또한 굴삭기 시스템의 성능 개선을 위해 굴삭기 시스템의 동특성 해석 및 평가에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>4,5</sup> 굴삭기의 성능 향상을 위한 연구 중 자동

접수일: 2007 년 5 월 2 일; 게재승인일: 2007 년 10 월 23 일

\* 울산대학교 대학원 기계자동차공학과

\*\* 울산대학교 기계자동차공학부

# 교신저자: 부산대학교 기계공학부

E-mail: matrox12@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-3096

굴삭기 시스템 구축에 관한 연구는 굴삭기 각 링크부의 구동시스템에 대한 안정도 강인성이 보장되는 강인 제어시스템 설계에 관한 연구가 진행되고 있다.<sup>6,7</sup> 이러한 강인제어시스템은 일반적으로 시스템의 모델에 근거하여 제어시스템이 설계되므로 굴삭기 시스템의 특성상 외란 및 모델 불확실성이 많아 페루프 시스템에 대한 안정도를 보장하기가 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 인공지능 알고리즘을 이용하여 굴삭기 시스템의 수학적 모델에 기반하지 않고 입출력 정보를 이용한 제어시스템이 제안되었다.<sup>8-10</sup> 또한 실시간 추종알고리즘을 이용하여 굴삭기의 작업장치와 작업환경 사이의 외란 및 굴삭기 시스템의 마찰을 추정하는 알고리즘이 제안되었다.<sup>11-12</sup>

본 논문에서는 자동 굴삭기 시스템의 구축에 앞서 소형 공압 굴삭기 시스템을 구성하고 이를 바탕으로 굴삭기 시스템의 각 구동부에 대한 위치 추종 시스템을 구성하고자 한다. 추종 알고리즘은 모델 불확실성과 외란에 강인한 제어시스템을 구성하기 위하여 각 링크부의 입출력 정보만을 이용하여 실시간으로 시스템의 모델을 파악하고 안정도 강인성이 보장되는 시스템을 구성했고, 제안된 제어시스템은 실험을 통해 그 성능을 검증했다.

## 2. 공압 굴삭기 시스템

산업 현장에서 사용되는 굴삭기 시스템은 험한 작업환경에서 이용되며, 높은 구동 토크를 필요로 하는 작업을 수행하므로 일반적으로 유압시스템을 사용한다. 또한 굴삭기 시스템의 자동화를 위해서는 굴삭기 시스템의 유압회로에서 MCV(Master Control Valve)를 대신하여 각 링크부의 구동을 위한 개별 유압회로를 구성하거나 MCV 구동을 위한 파일렛압력 제어밸브를 이용한 방법 등이 연구되고 있다. 그러나 실험실 환경에서 실제 굴삭기 시스템을 이용하여 자동 굴삭기 시스템을 구축하는 것은 각 개별 구동 유압라인을 구성하기 위한 많은 경제적 비용과 실험 중 발생할 수 있는 위험요소가 존재하므로 Fig. 1 과 같이 소형 굴삭기 시스템을 제작하였고 각 링크 구동은 Fig. 2 와 같이 각 링크별로 개별 공압 회로를 구성하여 작동되도록 설계하였다.

이때, 봄에는 충분한 구동 토크를 보장하기 위해서 두 개의 실린더를 평행하게 설치했다. 각 관

절 부에는 링크의 회전각도를 검출하기 위한 포텐션미터 타입의 엔코더를 장착했다. 구성된 공압 굴삭기의 봄과 암에 대한 기구학적 좌표계는 Fig. 3 과 같이 설정했다. Fig. 3 과 같은 굴삭기 시스템의 좌표계를 바탕으로 봄과 암의 작동 범위는  $5^\circ < \theta_1 < 85^\circ$ ,  $30^\circ < \theta_2 < 140^\circ$  이내에서 작동하도록 설계했다.

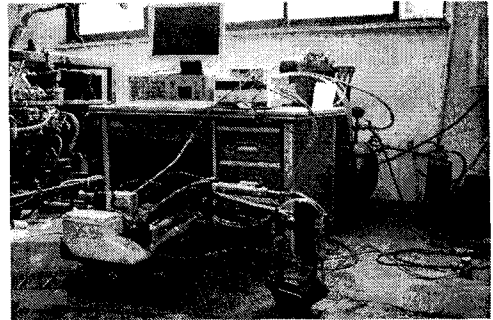


Fig. 1 Appearance of pneumatic excavator

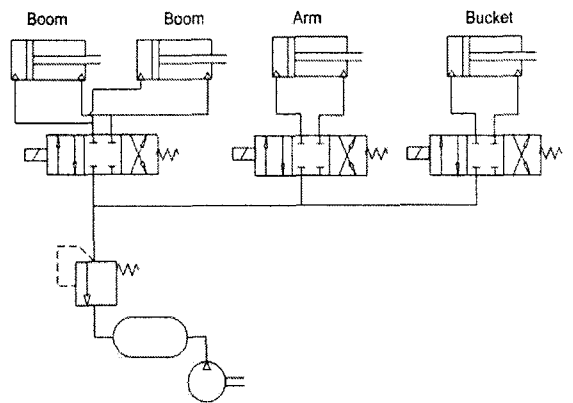


Fig. 2 Schematic of pneumatic circuit

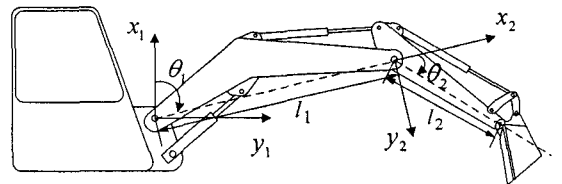


Fig. 3 Coordinate of pneumatic excavator system

Table 1 은 제작된 소형 공압 굴삭기 시스템의 구동 실린더 및 밸브의 세부 사양이다.

공압 시스템의 구동은 N.I.사의 6036E DAQ 장비를 이용하여 각 링크의 각도 및 공압 실린더의 구동 전압을 인가할 수 있도록 구성했다. 붐, 암, 버킷에 장착된 각도 검출 센서의 보정을 위해서 10 도 간격으로 각 링크의 위치를 변화시키고 이때 검출된 각도 센서의 전압값을 이용하여 센서로부터의 각도 값을 일차 선형함수로 근사화했다. Fig. 4 는 실험을 통해 센서로부터 검출된 전압( $v$ )과 각도( $\theta$ )관계를 도시한 그래프이다.

실험의 결과를 바탕으로 근사화된 일차 선형함수는 식 (1)과 같다.

$$\theta = 30.77v - 4.47 \quad (1)$$

Table 1 Specification of the experimental equipments

항목	모델명	사양
각도 검출 센서	JJ30-120-500	0~10[V] 0~360[degree]
실린더	FESTO DSAS Series	Boom stroke:60[mm] Arm stroke:110[mm] Bucket stroke:80[mm]
비례압력 조절밸브	MPPE3-3-1	작동압력 0~10[V], 출력압력 0~8[bar]
DAQ	6036E	Input 4channels AO : 2 channel

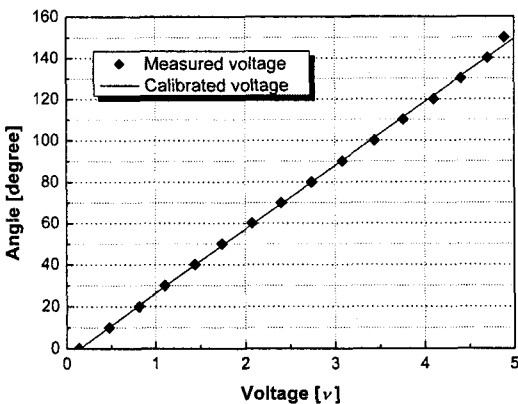


Fig. 4 Plot for the angular sensor calibration

### 3. 제어 시스템 설계

일반적으로 현장에 사용되고 있는 굴삭기는 조

이스틱 조작에 의한 개루프 제어가 이루어지고 있으나 자동 굴삭기 시스템의 구축을 위해서는 구동 액츄에이터에 대한 안정도 강인성이 보장되는 제어를 이용하여 폐루프 시스템을 설계하여야 한다. 그러나 실제 굴삭기에는 각 링크 부에 많은 검출 센서를 부착하기 힘들고 또한 험지 작업이 많기 때문에 신뢰성과 안전성이 보장된 고가의 센서를 이용하여야 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 각 링크 부에 각도 검출 센서만을 부착하여 출력 정보만을 이용한 제어를 설계했다. 출력 정보만을 이용한 제어기 설계에 앞서 굴삭기 시스템의 파라미터는 작업환경에 따라 변하는 것으로 간주하여 식 (2)와 같이 AR(Auto Regression)모델을 고려했다. 이때 각 링크부는 1 차의 액츄에이터 동역학과 2 차의 굴삭기 동역학을 고려하여 3 차의 이산 모델식으로 간주하였다.

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

$$\theta_k = \Gamma^T \phi(t) \quad (3)$$

여기서  $\Gamma$  는 이산 모델식의 파라미터 벡터로써  $\Gamma = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ b_0 \ b_1]^T$  이고, 회귀 벡터  $\phi(t)$  는  $[\theta_{k-1} \ \theta_{k-2} \ \theta_{k-3} \ u_k \ u_{k-1}]^T$  이다.

이때 각 파라미터는 실시간으로 추정할 수 있도록 식 (4)와 같이 recursive least square 알고리즘을 이용했다.

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + R^{-1}(t)\phi(t)\{\theta(t) - \phi^T \hat{\theta}_{k-1}\} \quad (4)$$

$$R(t) = \delta(t)R(t-1) + \phi(t)\phi^T(t) \quad (5)$$

여기서  $\delta(t)$  는 가중행렬이다.

식 (4), (5)와 같이 실시간으로 근사화된 3 차의 이산 모델식을 바탕으로 본 논문에서는 슬라이딩 모드 제어를 설계하였다. 이를 위해 슬라이딩 평면을 다음과 같이 선정했다.

$$s = \ddot{e} + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2e \quad (6)$$

여기서  $e = \theta_r - \theta$  ( $\theta_r$  는 기준각도),  $\lambda > 0$  는 설계 파라미터 이다.

선정된 슬라이딩 평면의 도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{e} + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2e \\ &= \ddot{\theta}_r - \ddot{\theta}_k + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2e \end{aligned} \quad (7)$$

여기서  $\theta_k$  는 이산시간계에서 각 링크부의 각도를 나타내고 식 (7)의  $\ddot{\theta}_k$  는 샘플링 타임  $t_s$  를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ddot{\theta}_k = \frac{\theta_k - 3\theta_{k-1} + 3\theta_{k-2} - \theta_{k-3}}{t_s^3} \quad (8)$$

식 (8)과 슬라이딩 모드 제어시스템의 도달법칙을 이용하기 위해서 슬라이딩 평면의 도함수를 다음과 같이 선정했다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= \ddot{\theta}_r - \frac{\theta_k - 3\theta_{k-1} + 3\theta_{k-2} - \theta_{k-3}}{t_s^3} + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e \\ &= -Ds - K \operatorname{sgn}(s) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $D$  와  $K$  는 양의한정인 설계 파라미터이다.

식 (3), (4) 그리고 (7)를 이용하여 슬라이딩 모드 제어시스템의 도달 법칙을 만족하는 등가 제어 입력을 다음과 같이 선정했다.

$$\begin{aligned} u_{eq} = u_k &= \frac{1}{b_0} \left[ t_s^3 (\ddot{\theta}_r + 2\lambda\dot{e} + \lambda^2 e) + \theta_{k-1}(a_1 + 3) \right. \\ &\quad \left. + \theta_{k-2}(a_2 - 3) + \theta_{k-3}(a_3 + 1) - b_1 u_{k-1} \right] \end{aligned} \quad (10)$$

리아푸노브 안정도 조건을 만족하는 강인 제어 항을 추가하기 위해서 식 (11)과 같은 리아푸노브 함수( $V$ )를 선정했다.

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (11)$$

식 (11)에서 리아푸노브 함수의 도함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} \\ &= s(-Ds - K \operatorname{sgn}(s)) \end{aligned} \quad (12)$$

선정된 등가제어입력과 연속구조 강인 제어 항을 포함하여 최종적으로 설계된 슬라이딩모드 제어기는 다음과 같다.

$$u_k = u_{eq} + Ds + K \operatorname{sgn}(s) \quad (13)$$

#### 4. 시뮬레이션 및 실험

설계된 제어 시스템의 성능을 평가하기 위해서 N.I.사의 Labview 소프트웨어를 이용하여 산업현장에서 널리 사용되고 있는 PID 와 제안된 슬라이

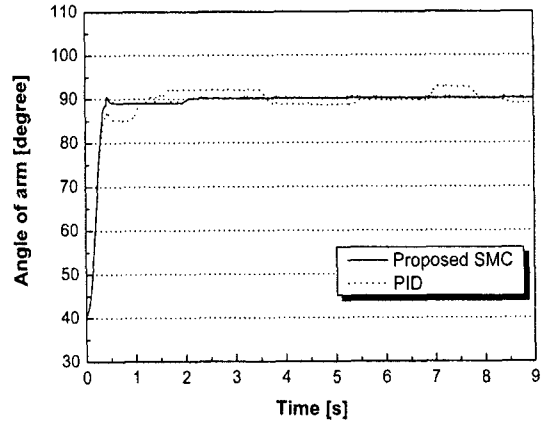


Fig. 5 Step responses for the proposed and PID controller

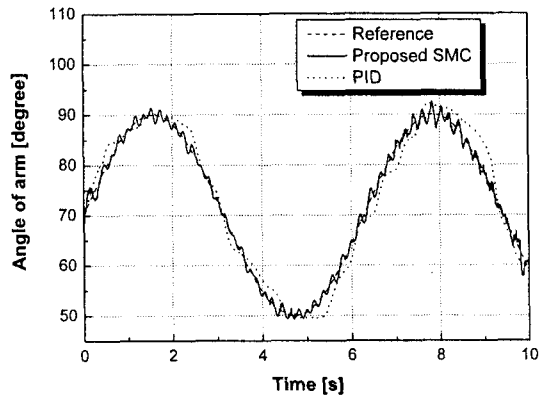


Fig. 6 Tracking response for arm link

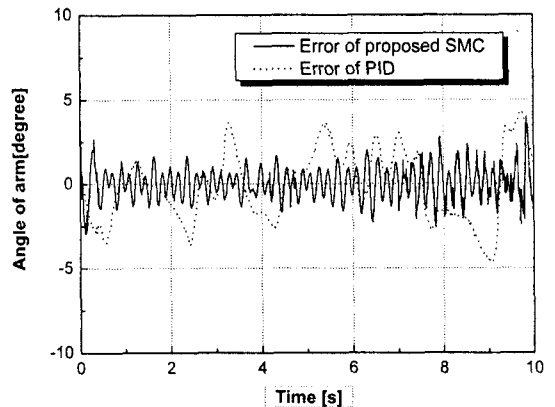


Fig. 7 Error responses

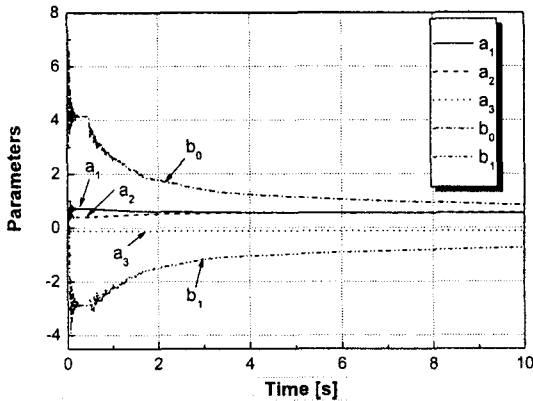


Fig. 8 Estimated parameters for the proposed SMC

딩 모드 제어기를 비교했다. 설계된 두 제어기의 구현을 위해 샘플링 주기는 5ms 가 유지되도록 프로그램의 루프타임을 설정하였다. 실험에 사용된 PID 제어기의 설계 파라미터는 안정한계에 기초한 Ziegler-Nichols 방법에 근거하여 추종성능이 뛰어난 계인을 시행착오적으로 선정했다. Fig. 5 는 PID 제어기와 제안된 슬라이딩모드 제어기를 적용한 공압 굴삭기의 암에 대한 계단응답이다. Fig. 5 의 결과에서와 같이 PID 제어기를 이용한 계단응답은 10% 범위의 정상오차를 가졌으나 제안된 제어기를 이용한 계단응답은 2%이내의 정상오차를 보임을 알 수 있다. 또한, 제안된 제어기의 추종성능을 평가하기 위해서 1rad/s 의 정현파 기준신호에 대한 응답성능을 비교했다. Figs. 6 과 7 은 정현파 입력에 대한 추종결과와 그때의 오차이다. Fig. 7 의 오차 선도 결과에서 제안된 제어시스템은 15%이내의 오차 범위 내에서 작동하지만, PID 제어기의 경우는 25%범위의 오차응답을 보였다. Fig. 8 은 이때 추종된 AR 모델의 파라미터이다.

### 5. 결론

굴삭기 시스템은 산업현장에 널리 사용되는 필드 로봇으로 다양한 작업을 수행할 수 있다. 그러나 굴삭기 시스템의 다양한 작업환경은 제어시스템 설계를 위한 수학적 모델식에 많은 불확실성과 외란으로 작용하므로 이를 바탕으로한 제어시스템 설계에는 많은 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 굴삭기 시스템의 수학적 모델식에 근거한 제어시스템을 설계하지 않고 입출력 정보를 이용한 이

산 모델을 선정하여 이를 바탕으로 슬라이딩모드 제어시스템을 설계했다. 제안된 제어시스템의 성능을 평가 하기 위해 소형 공압 굴삭기 시스템을 제작하여 산업현장에서 널리 사용되는 PID 제어기와 비교하여 그 성능을 검증하였다.

### 후 기

이 논문은 Post BK21 사업의 지원에 의한 것입니다.

### 참고문헌

1. Griffin, M. J. and Paddan, G. S., "Transmission of roll and pitch seat vibration to the head," *Ergonomics*, Vol. 37, No. 9, pp. 1513-1531, 1994.
2. Lee, S. T., "Effect of Vibration for the human body," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering* Vol. 2, No. 4, pp. 253-258, 1992.
3. Cho, H. and Chang, H. W., "Active Pitch Motion Control of a Hydraulic Excavator," *The Korean Society of Automotive Engineers Symposium*, pp. 681-686, 2002.
4. Lim, O. K. and Cho, H., "Optimal Shape of Excavator Boom Using the Semi-Analytical Method," *The Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 19, No. 1, pp. 301-309, 1995.
5. Jeong, M. S., Kim, O. J., Kim, K. S. and Yoo, W. S., "Development of Real-time Dynamic Analysis Program for Wheel-type Excavator," *Proceeding of The Korean Society of Automotive Engineers fall Conference*, pp. 760-765, 1997.
6. Lee, J. Y., Lee, S. C. and Lee, K. I., "A study on Position Control of Excavator Attachment using Fuzzy Control Theory," *Proceeding of The Korean Society of Mechanical Engineers fall Conference*, pp. 497-500, 1992.
7. Zweiri, Y. H., Seneviratne, L. D. and Althoefer, K., "Model-Based Automation for Heavy Duty Mobile Excavator," *IEEE/RSJ International Conference of Intelligent Robots and Systems*, pp. 2967-2972, 2002.
8. Song, B. and Koivo, A. J., "Neural Adaptive Control of Excavators," *IEEE/RSJ International Conference*

- Intelligent Robots and Systems 95, pp. 162-167, 1995.
9. Ha, Q. P. and Rye, D. C., "Robotic Excavator Swing Control using Fuzzy Rotating Sliding Mode," IEEE International Fuzzy Systems Conference, pp. 332-335, 2001.
  10. Tian, M. Q. and Xion, S. B., "Previewing Control System of Automatic Height Adjustment for Drum-Type Coal Excavator Based on Memory Cutting with Identification of Object Model by Genetic Algorithm," International Conference on Machine Learning and Cybernetics, pp. 633-636, 2002.
  11. Choopar, T., Yahya, H. Z., Kaspar, A. and Lakmal, D. S., "On-line Soil Property Estimation for Autonomous Excavator Vehicles," IEEE International Conference Robotics & Automation, pp. 121-126, 2003.
  12. Tafazoli, S., Lawrence, P. D., Salcudean, S. E., Chan, D., Bachmann, S. and Silva, C. W., "Parameter Estimation and Actuator Friction Analysis for a Mini Excavator," IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 329-334, 1996.