

## 소형 굴삭기의 모델링을 통한 위치 및 힘제어 구현

# Implementation of Position and Force Control by Modelling of a Miniatured Excavator

오 명 식, 서 자 호, 정 슬\*  
(Myeong Sik Oh<sup>1</sup>, Ja Ho Seo<sup>2</sup>, and Seul Jung<sup>1,\*</sup>)

<sup>1</sup>Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

<sup>2</sup>Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

**Abstract:** This paper presents the implementation and control of a small-scaled excavator system. The commercial miniature of an excavator system has been modified and its control hardware is embedded to access the feedback control. Encoder sensors are attached to the joint and a force sensor is mounted on the end-effector so that feedback position control is accessible as well as force control. The dynamic model of the excavator system is derived as a four linkage robot arm and its control performances are simulated. Experimental studies of contact force control tasks are conducted to test the control algorithm for the excavator system.

**Keywords:** excavator, feedback control, force control, hardware implementation

### I. 서론

굴삭기는 대표적인 건설장비로 땅을 파거나 토양을 옮길 때 사용한다. 기본적인 토목 작업이나 공사현장에서 굴삭기를 사용하는 것을 쉽게 볼 수 있다. 굴삭기는 앞부분의 장비를 바꿈으로써 굴삭, 철거 등 여러 작업에 대응하여 사용할 수 있는 다목적 건설시스템이다.

굴삭기는 유압으로 작동하며 유압을 움직이기 위한 기구들이 붙으면서 자체적으로 많은 진동을 가지고 있는 시스템이다. 지속적인 진동은 인체에 영향을 주어 작업자가 쉽게 피로를 느낄 수 있어 사고의 위험성을 증가 시키게 된다. 사고의 위험을 줄이기 위해 사용자가 굴삭기 밖으로 나와 원격으로 조작하는 원격시스템이나 굴삭작업의 자동화에 대해 연구가 진행되고 있다[1-3]. 사용자가 굴삭기 밖에서 작업함으로써 주위의 시야가 확보 될 수 있으며 피로도가 감소해 안정성을 높일 수 있다.

최근 연구 경향을 살펴보면 사용자가 시스템 외부로 나와 외부에서 굴삭기를 조종하여 굴삭작업을 진행하는 연구가 진행되고 있다. 햅틱, 조이스틱을 통해 조종석과 유사한 작업환경을 구축하고 조종석에는 운전을 위한 추가적인 로봇이 들어가 조종에 맞는 작업을 하거나 시스템 자체에

PC, 마이컴을 이용하여 밸브를 조절하게 된다[4,5].

사용자가 조종석에서 나옴에 따라 외부의 입력에 따른 굴삭기의 위치 추종능력이 더욱 중요하게 된다. 일반적인 제어에서는 주로 PID제어방식을 이용하여 위치 오차를 줄이는 반면 유압으로 작동하는 시스템에서는 슬라이딩모드 제어를 이용하여 위치 추종 오차를 줄이는 연구가 진행되고 있다[6].

굴삭기의 자동화 작업 시 설정 경로가 필요하게 되며 설정 경로의 효율성에 따라 자동화 작업의 효율이 결정된다. 사람의 작업과의 유사성을 위해 전문가의 작업을 토대로 굴삭기의 경로를 생성해 그 능률을 올리는 연구 또한 진행되고 있다[7,8].

이처럼 굴삭기에 대한 연구는 안정성을 고려하여 굴삭기를 자동화하는 것에 초점이 맞추어 있다. 굴삭기의 자동화는 우선 컴퓨터나 마이크로 프로세서로 유압장치를 제어할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 굴삭작업의 자동화 작업에 대한 연구의 일환으로 소형 굴삭기를 사용하여 유압장치를 제어할 수 있도록 구현하였다. 주요 조인트에 엔코더 센서를 부착하여 귀환제어를 통해 더 정밀한 위치제어를 할 수 있도록 구현하고 버킷과 붐 사이에는 힘센서를 부착하여 버킷에 가해지는 접촉 힘을 조절하도록 구현하였다. 또한 무선 통신으로 원격제어가 가능하도록 구현하였다.

위치기반 임피던스 힘제어 (어드미턴스)알고리즘을 사용하여 힘센서로 감지된 힘을 기반으로 기준 경로를 조절하여 간접적으로 접촉 힘을 제어하는 실험을 수행하였다. 힘제어 방식을 통해 버킷에 가해지는 힘을 적절하게 조절할 수 있게 하고 주어진 경로를 추종하는 실험을 수행하였다.

\* Corresponding Author

Manuscript received April 18, 2016 / revised June 8, 2016 / accepted November 18, 2016

오명식, 정슬: 충남대학교 메카트로닉스공학과

(msoh700@naver.com/jungs@cnu.ac.kr)

서자호: 충남대학교 바이오시스템 기계공학과(seojaho@cnu.ac.kr)

※ 이 논문은 2016년 제 31회 제어로봇시스템학회 학술대회에 초안이 발표되었음[11].

※ 본 논문은 기계연구원과 2015년 한국연구재단 기초연구(NRF-2014R1A2A1A11049503)의 일부지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

II. 소형 굴삭기 시스템

실험에서 사용된 소형굴삭기는 1:12 scale earth digger 4200XL이다. 4200XL은 유압으로 작동하는 소형 굴삭기로 그림 1과 같다. 그림 1의 소형 굴삭기는 실제 굴삭기처럼 유압 구동기를 사용하여 움직이며 컨트롤러에 의해 개회로 제어 방식으로 움직인다. 폐회로 제어를 하기 위해서는 그림 2에서처럼 각 링크의 각도 정보를 검출하기 위해 엔코더를 부착하였으며 3D 프린터를 이용하여 축과 지지대를 제작하였다. 외부로부터 발생하는 힘을 측정하기 위해 boom과 bucket사이에 힘 센서를 장착하였다. 힘 센서도 엔코더와 마찬가지로 3D 프린터를 이용하여 부착하였다.

4200XL의 제어를 위해서 TMS320F28335를 사용하였다.

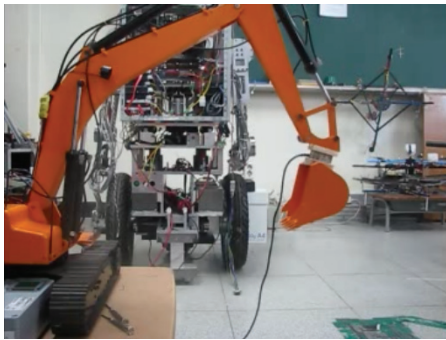


그림 1. 1:12 scale earth digger 4200XL.

Fig. 1. 1:12 scale earth digger 4200XL.

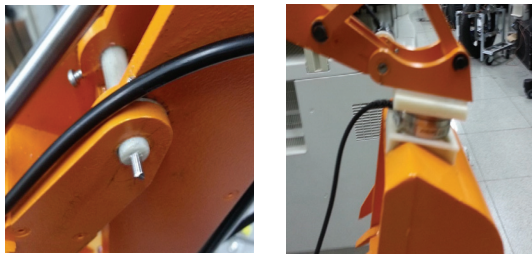


그림 2. 센서 장착.

Fig. 2. Sensors.

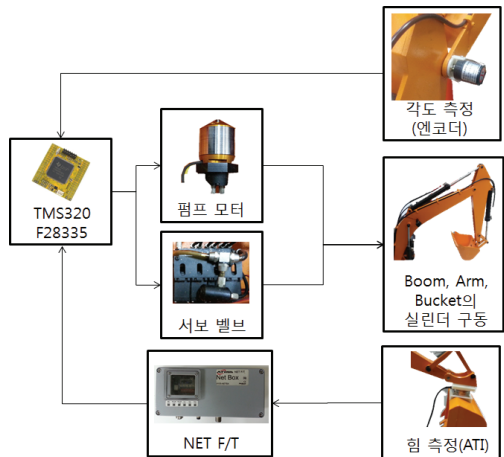


그림 3. 전체 하드웨어블록도.

Fig. 3. Overall hardware block diagram.

시스템의 전체적인 제어 방식은 그림 3의 블록도와 같다. 사용자는 조종기를 통해 굴삭기의 목표 위치를 입력하게 되고 TMS320F28335에서는 역기구학을 통해 각 링크의 목표 각도를 설정한다. 목표 각도는 PID 제어를 통해 실린더를 작동시켜 움직인다. 엔코더와 힘 센서를 통해 나온 각도와 힘 정보는 TMS320F28335로 입력되어 제어를 위한 정보로 사용된다.

III. 동역학 모델링

시뮬레이션을 수행하기 위해 시스템의 동역학을 모델링하였다. 그림 4에 보여진 것처럼 바퀴 부분을 제외한 팔부분에 대한 동역학을 유도하였다.

기준 좌표는 상부의 회전축으로 4자유도 로봇 팔로 정의하였다. 상부의 회전과 각 링크의 회전축을 기준으로 좌표를 설정하였으며 설정한 좌표축을 토대로 표 1의 D-H table을 생성하였다.  $\theta_i$ 는 각 링크의 회전 각도를 나타내며  $l_i$ 는 각 링크의 길이를 나타낸다.

굴삭기 모델은 Newton-Euler 방식을 이용하여 각 회전 조인트에 대한 동역학을 구하였다. Newton-Euler를 이용하여 모델을 구할 때 무게는 점질량으로 가정하였으며 각 링크의 끝단에 무게가 위치한다고 가정하였다.

$$D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) = \tau \tag{1}$$

여기서  $D(q)$ 는 4X4의 크기의 관성행렬이고,  $C(q, \dot{q})$ 는 4X1 크기의 코리올리스 힘과 원심력,  $G(q)$ 는 4X1 크기의 중력벡터 그리고  $\tau$ 는 4X1의 크기의 입력 토크 벡터이다. 각 행렬과 벡터의 원소는 아래와 같다.

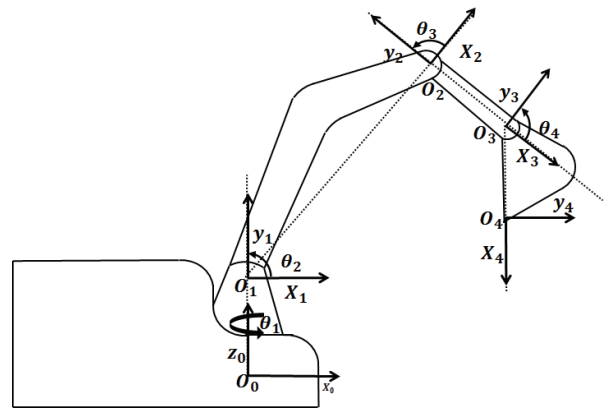


그림 4. 좌표 설정.

Fig. 4. Coordination.

표 1. D-H 변수.

Table 1. D-H parameters.

link	$\theta_i$	$\alpha_i$	$d_i$	$a_i$
1	$\theta_1$	90	$l_1 = 0.07$	0
2	$\theta_2$	0	0	$l_2 = 0.48$
3	$\theta_3$	0	0	$l_3 = 0.255$
4	$\theta_4$	0	0	$l_4 = 0.17$

$$D(q) = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} \end{bmatrix} C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \\ h_4 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 관성행렬의 각 요소는

$$d_{11} = m_4(l_2c_2 + l_3c_{23} + l_4c_{234})^2 + m_3(l_2c_2 + l_3c_{23})^2 + m_2l_2^2c_2^2$$

$$d_{12} = d_{13} = d_{14} = d_{21} = d_{31} = d_{41} = 0$$

$$d_{22} = m_4(2l_2l_3c_3 + 2l_2l_4c_{34} + 2l_3l_4c_4 + l_2^2 + l_3^2 + l_4^2) + m_3(2l_2l_3c_3 + l_2^2 + l_3^2) + m_2l_2^2$$

$$d_{23} = m_4(l_2l_3c_3 + l_2l_4c_{34} + 2l_3l_4c_4 + l_3^2 + l_4^2) + m_3(l_2l_3c_3 + l_3^2)$$

$$d_{24} = m_4(l_4^2 + l_3l_4c_4 + l_2l_4c_{34})$$

$$d_{32} = m_4(l_2l_3c_3 + l_2l_4c_{34} + 2l_3l_4c_4 + l_3^2 + l_4^2) + m_3(l_2l_3c_3 + l_3^2)$$

$$d_{33} = m_4(2l_3l_4c_3 + l_4^2 + l_3^2) + m_3l_3^2$$

$$d_{34} = m_4(l_3l_4c_4 + l_4^2)$$

$$d_{42} = m_4(l_4^2 + l_3l_4c_4 + l_2l_4c_{34})$$

$$d_{43} = m_4(l_3l_4c_4 + l_4^2)$$

$$d_{44} = m_4l_4^2$$

코리올리스와 원심력토크는 다음과 같다.

$$h_1 = -2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2l_2m_3s_2(l_3c_{23} + l_2c_2) - 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2l_2^2m_2s_2c_2 - 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2l_2m_4s_2(l_4c_{234} + l_3c_{23} + l_2c_2) - 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2l_3m_4s_{23}(l_4c_{234} + l_3c_{23} + l_2c_2) - 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2l_3m_3s_{23}(l_3c_{23} + l_2c_2) - 2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2l_4m_4s_{234}(l_4c_{234} + l_3c_{23} + l_2c_2)$$

$$h_2 = \dot{\theta}_1^2l_2m_4(l_4c_{234} + l_3c_{23} + l_2c_2)s_2 + \dot{\theta}_1^2l_2m_3(l_3c_{23} + l_2c_2)s_2 + \dot{\theta}_1^2l_2^2m_3c_2s_2 + \dot{\theta}_1^2l_3m_4(l_4c_{234} + l_3c_{23} + l_2c_2)s_{23} + \dot{\theta}_1^2l_3m_3(l_3c_{23} + l_2c_2)s_{23} + \dot{\theta}_1^2l_4m_4(l_4c_{234} + l_3c_{23} + l_2c_2)s_{234} - \dot{\theta}_3\dot{l}_4l_4m_4s_{34}(\dot{\theta}_3 - 2\dot{\theta}_2) - \dot{\theta}_3\dot{l}_2l_3(m_4 + m_3)s_3(\dot{\theta}_3 - 2\dot{\theta}_2) + \dot{\theta}_4\dot{l}_3l_4m_4(\dot{\theta}_4 - 2\dot{\theta}_2)$$

$$h_3 = \dot{\theta}_1^2l_3m_4(l_4c_{234} + l_3c_{23} + l_2c_2)s_{23} + \dot{\theta}_1^2l_3m_3(l_3c_{23} + l_2c_2) + \dot{\theta}_1^2l_4m_4(l_4c_{234} + l_3c_{23} + l_2c_2)s_{234} + \dot{\theta}_2^2l_2m_4(l_4s_{34} + l_3s_3) + \dot{\theta}_2^2l_2l_3m_3s_3 + \dot{\theta}_4\dot{l}_3l_4m_4(\dot{\theta}_4 - 2\dot{\theta}_2)$$

$$h_4 = \dot{\theta}_1^2l_4m_4(l_4c_{234} + l_3c_{23} + l_2c_2)s_{234} + \dot{\theta}_2\dot{l}_4m_4(\dot{\theta}_2l_3s_4 + \dot{\theta}_2l_2s_{34} + 2\dot{\theta}_3l_3s_4) + \dot{\theta}_3^2m_4l_3l_4s_4$$

중력토크는 다음과 같다.

$$g_1 = 0$$

$$g_2 = m_2gl_2c_2 + m_3g(l_3c_{23} + l_2c_2) + m_4g(l_4c_{234} + l_3c_{23} + l_2c_2)$$

$$g_3 = m_3gl_3c_{23} + m_4g(l_4c_{234} + l_3c_{23})$$

$$g_4 = m_4gl_4c_{234}$$

여기서  $g$ 는 중력가속도이고  $c_{ij} = \cos(\theta_i + \theta_j)$ ,  $s_{ij} = \sin(\theta_i + \theta_j)$ 를 의미하며  $m_i$ 는 각 link의 무게를 나타내고  $l_i$ 는 길이를 나타낸다.

## IV. 제어 방식

### 1. 위치제어

전체적인 위치추종에 대한 제어는 그림 5를 통해 볼 수 있다. 굴삭기의 제어는 PID제어를 통한 위치제어를 기반으로 Admittance control(어드미턴스 제어)을 이용하여 desired(기준) 힘에 따른 기준 위치를 변화시켜 주었다.

위치제어는 먼저 원하는 직교좌표공간에서 위치정보  $x_d$ 를 입력하면 역기구학을 통해 각 링크의 조인트 각도 정보  $\theta_d$ 를 출력한다.  $\theta_d$ 와 엔코더를 통해 얻은 현재의 각도정보  $\theta$ 와 비교하여 PID 제어기의 오차 값  $e$ 로 들어간다.

PID제어의 출력을 통해 밸브를 조절하며 조절된 밸브에 따라 유량이 바뀌게 된다. 변화된 유량을 통해 굴삭기에 부착된 실린더가 작동한다. PID제어의 수식은 식 (3)과 같다.

$$\tau = K_p e + K_D \dot{e} + K_I \int e dt \quad (3)$$

여기서  $e = \theta_d - \theta$ 이고  $K_P, K_D, K_I$ 는 제어기의 이득값이다.

### 2. 힘제어

굴삭기를 자동화하기 위해서는 버킷에 적절한 힘이 가해지도록 힘제어를 해야 한다. 본 논문에서는 주어진 힘을 추종 할 수 있도록 힘 제어의 실험을 진행하였다. 힘제어 알고리즘으로는 임피던스 제어의 역인 어드미턴스 제어방식을 사용하였다. 측정된 힘으로부터 어드미턴스 필터를 거쳐 보정 위치를 구한다. 보정 위치를 통해 위치 경로를 수정해 접촉 힘을 간접적으로 제어하는 방식이다[9,10]. 기존의 제어방식을 수정할 필요가 없이 구현이 간단하지만 필터링을 통해 발생하는 시간 지연 문제가 있는 것이 단점이다.

힘과 위치의 관계를 mass-spring-damper 의 모델, 즉 임피던스로 표현하였을 때 식 (4)와 같다.

$$F(t) = m\ddot{x}(t) + b\dot{x}(t) + kx(t) \quad (4)$$

여기서  $m, b, k$ 는 임피던스 변수들이다. 힘 제어를 위해서는 힘( $F$ )에 대한 위치( $x$ )의 전달함수가 필요하므로 식 (4)의 Laplace 변환은 다음과 같다. (5)는 힘을 필터링하는 2차 필터가 된다.

$$x(s) = \frac{1}{ms^2 + bs + k} F(s) \quad (5)$$

식 (5)를 실제 DSP에서 구현하기 위해서 이산 식으로 근사화하여 정리하면 식 (6)을 얻게 된다.

$$F(n) = m \left( \frac{x[n] - 2x[n-1] + x[n-2]}{T_s^2} \right) + b \left( \frac{x[n] - x[n-1]}{T_s} \right) + kx[n] \quad (6)$$

여기서  $T_s$ 는 샘플링시간이다. 식 (6)을 정리하면 다음과 같다.

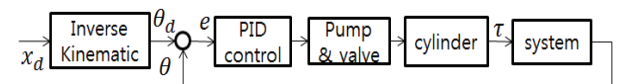


그림 5. 위치제어 블록도.

Fig. 5. Position control block diagram.

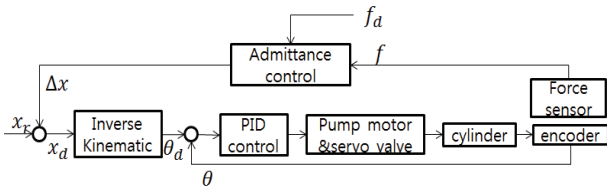


그림 6. 시스템 힘제어 블록도.  
Fig. 6. Force control block diagram.

$$x[n] = \frac{1}{k + \frac{b}{T_s} + \frac{m}{T_s^2}} F[n] + \frac{\frac{b}{T_s} + \frac{2m}{T_s^2}}{k + \frac{b}{T_s} + \frac{m}{T_s^2}} x[n-1] - \frac{\frac{m}{T_s^2}}{k + \frac{b}{T_s} + \frac{m}{T_s^2}} x[n-2] \quad (7)$$

여기서  $F[n]$ 은  $f - f_d$ 로 기준힘과 힘 센서에서 측정된 힘의 차이로 정의하고  $x[n]$ 은 기준 입력으로 넣어주는  $x_r$ 과 더해져 새로운 경로  $x_d$ 를 생성한다. 계수  $m$ ,  $k$  와  $b$ 는  $F[n]$ 이 1일 때 특정  $x[n]$ 이 나오도록 설정해 주었다.

그림 6은 힘제어 블록 다이어그램을 나타낸다. 그림 5의 위치제어 블록도에 어드미턴스 힘제어 루프가 추가되었다.

**V. 시뮬레이션 및 실험**

**1. 실험환경**

시스템에 부착된 엔코더는 상대 방식이므로 초기 각도를 설정하기 위해 boom에 부착된 실린더는 최대 확장한 상태로 하였고, arm과 bucket에 부착된 실린더는 최대 축소 상태를 초기 각도로 설정하였다. 그림 7은 초기 실험환경을 나타낸다. 이 때 링크의 각도는 각각 [1.0472 5.6723 3.7525] rad이다.

**2. 위치제어**

PID제어기를 통해 원하는 위치 경로의 추종을 확인하였다. 실험방법은 설정한 초기자세에서 시작하여  $X_0$  방향으로 0.5m,  $Z_0$  방향으로 10초 주기의 0.2의 크기를 나타내는 사각

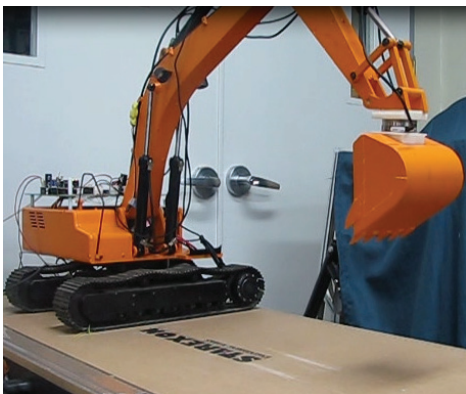


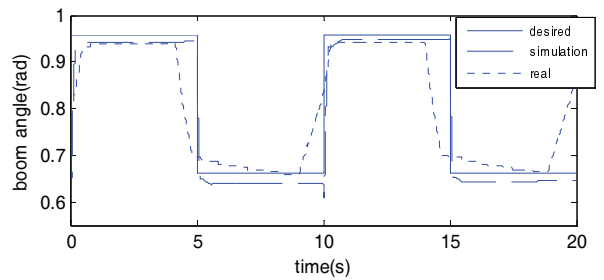
그림 7. 실험 환경.  
Fig. 7. Experimental setup.

파형의 경로를 추종하는 지를 확인하였다. 그림 8에서 보면 시뮬레이션과 실제 실험 모두에서 경로를 추종하는 것을 확인하였다.

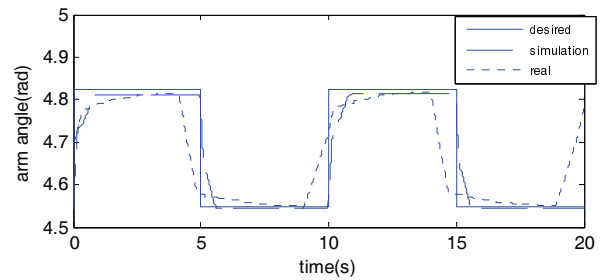
그림 8에서 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과가 유사하게 나온 것을 볼 수 있다. 실험결과에서 그림 8(d)의 위치의 0점은 boom link를 기준으로 하였을 때의 위치 값이다.

**3. 힘제어**

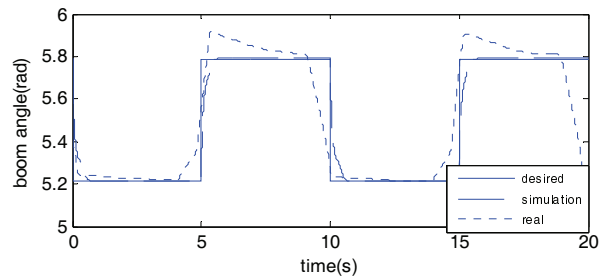
Admittance control에서는 초기자세에서 시작하여 식 (7)을 이용하여 진행하였다. 추종하고자하는 기준 힘을 입력하면  $F$ 가 변화하여 현재의 위치  $x$ 가 변화하게 된다. 기준 힘을 1N으로 설정하고 실험하였다. 출력되는 힘의 응답을 모니터링하며 어드미턴스 계수 값을 조절하였다.



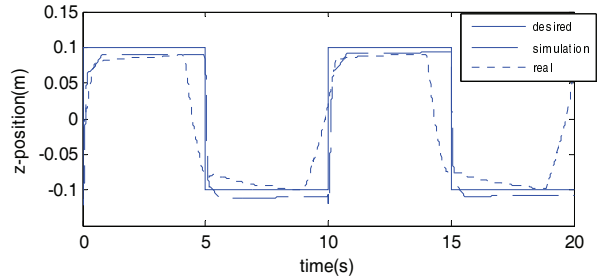
(a) Boom angle.



(b) Arm angle.



(c) Bucket angle.



(d) z axis position.

그림 8. 위치제어 추종결과.

Fig. 8. Position control results.

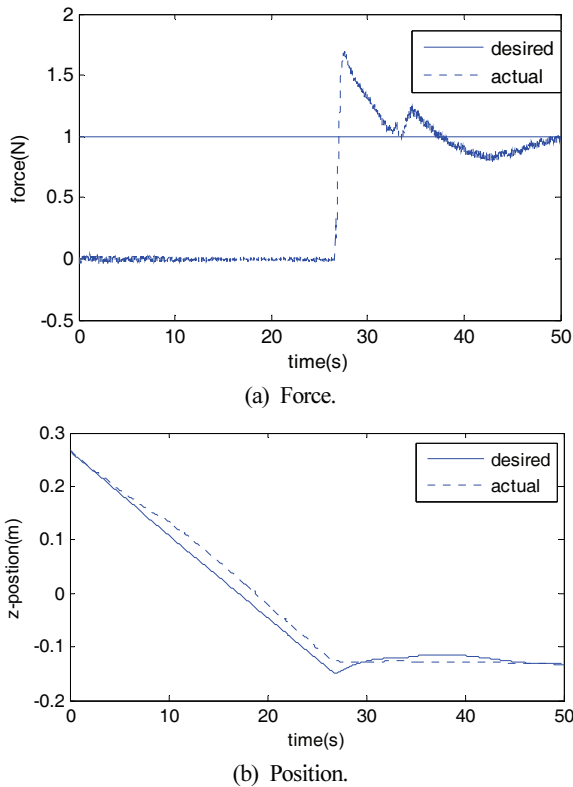


그림 9. Case 1의 추종 결과.  
Fig. 9. Case 1 : Tracking results.

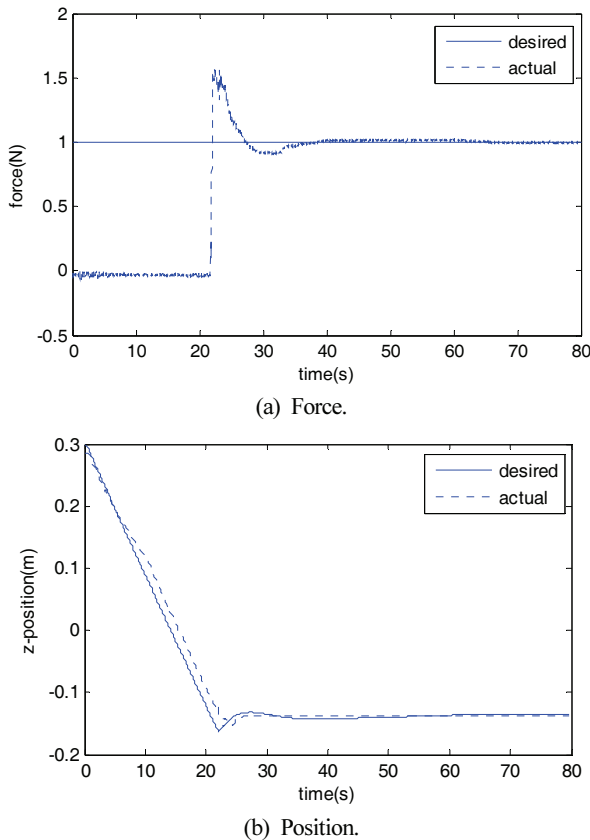


그림 10. Case 2의 추종 결과.  
Fig. 10. Case 2 : Tracking results.

3.1 Case 1 :  $m=3, b=60, k=150$ 일 경우

그림 9에서 보면 약 27초에서 접촉이 발생하고 접촉 힘의 오버슈트는 약 0.7N이다. 추종오차의 정착시간이 20초 이상으로 다소 오래 걸리는 것을 볼 수 있다.

3.2 Case 2 :  $m=3, b=500, k=5000$ 일 경우

이번에는 이득값을 크게 설정했다. 계수 값은 시행착오 과정을 통해 정했다. 그림 10에 힘추종 결과가 나타나 있다. 힘의 추종을 살펴보면 약 25초에서 접촉이 발생하여 약 0.6N의 오버슈트가 발생하지만 기준 힘인 1N을 잘 추종하는 것을 볼 수 있다. 상대적으로 정착시간이 10초 정도로 짧아진 것을 볼 수 있다.

3.3 Case 3 :  $m=3, b=500, k=20000$ 일 경우

그림 10(a)를 보면 힘 측정 결과 overshoot가 0.6N 정도 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 11의 Case 3에서는 Case 1과 2에서 발생하는 overshoot를 줄이기 위해 계수값을 바꾸어 실험을 진행하였다. 약 90초에서 접촉이 발생하여 접촉 힘의 오버슈트는 약간 줄어들었으나 추종오차의 정착시간이 10초 이상으로 더 걸리는 것을 볼 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 굴삭기를 자동화하기 위해 유압으로 구동하는 소형 굴삭기 모형을 변경하여 위치제어와 힘제어가 가능하도록 구현하였다. 굴삭기의 반복 작업을 위한 위치추종과 Admittance를 이용한 힘 제어를 진행하였다. PID 제어를 이용하여 굴삭기의 끝단과 각 링크의 각도가 원하는 위

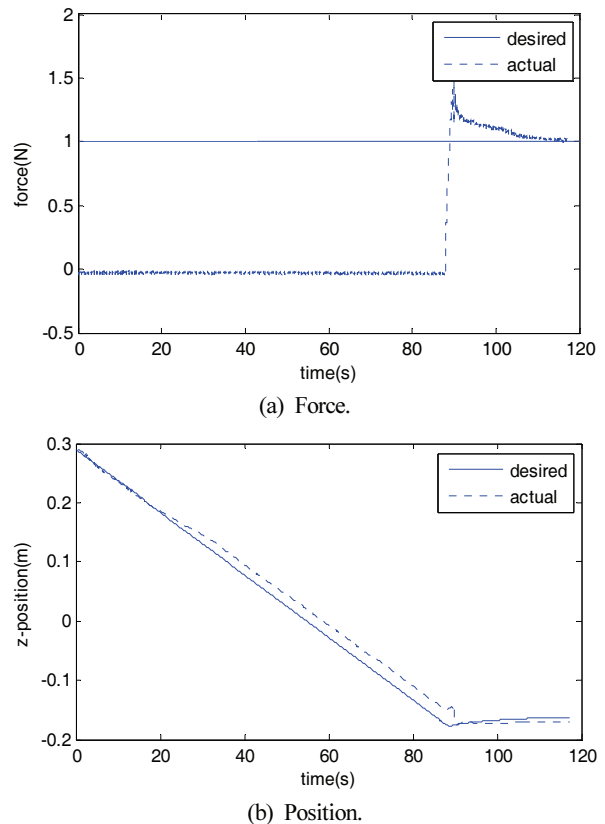


그림 11. Case 3 추종 결과.  
Fig. 11. Case 3 : Tracking results.

치로 이동하는 것을 실험을 통해 검증하였으며, 힘 제어를 통해 반복 작업의 경우에 발생하는 힘에 대응하여 위치를 조절할 수 있는 것을 확인하였다. Admittance control을 이용하여 원하는 힘을 추종 하는 것을 확인할 수 있었으며 계수 값의 변경에 따른 힘제어 응답을 얻을 수 있었다.

#### REFERENCES

- [1] H. Cho and H. W. Chang, "Active pitch motion control of a hydraulic excavator," *Proceeding of the KAMES 2002 Joint Symposium*, pp. 681-686, 2002.
- [2] S. J. Back, Y. K. Son, J. H. Kim, and J. C. Lee, "Reliability qualification test of a unmanned control robot system for an excavator," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, vol. 39, no. 4, pp. 397-403, 2015.
- [3] I. K. Jeon, J. K. Lee, S. P. Baek, and K. K. Ahn, "Study on the remote control excavator for high-risk operations," *Proc. of 2010 25th ICROS Annual Conference (in Korean)*, Chuncheon, pp. 479-483, May 2010.
- [4] Y. J. Nam and M. K. Park, "Virtual excavator simulator featuring HILS and haptic joy sticks," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 29, no. 1, pp. 397-407, 2015.
- [5] S. S. Yang, S. M. Jin, J. J. Choi, C. D. Lee, and Y. S. Kim, "A study on tracking control of remote operated excavator," *Journal of Drive and Control*, vol. 6, no. 4, pp. 68-74.
- [6] J. J. Choi, "Development of miniaturized automatic excavator with time-varying sliding mode controller," *Journal of the Korea Academia-Industrial*, vol. 12, no. 8, pp. 3391-3397, 2011.
- [7] S. M. Moon and D. H. Hong, "Control algorithm for path generation of intelligent excavator system," *Journal of Drive and Control*, vol. 12, no. 3, pp. 66-71, 2015.
- [8] S. K. Kim and B. S. Koo, "A path generation method considering the work behavior of operators for an intelligent excavator," *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, vol. 30, no. 4D, pp. 433-442, Jul. 2010.
- [9] S. Jung, T. C. Hsia, and R. G. Bonitz, "Force tracking impedance control of robot manipulators under unknown environment," *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 474-483, May 2004.
- [10] T. S. Jin, "Appling of force control of the robotic sweeping machine for grinding," *Journal of Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 276-281, Feb. 2014.
- [11] M. S. Oh, J. H. Seo, and S. Jung, "Study on Experiment and implementation of Force control for an excavator system," *Proc. of 31th ICROS Annual Conference (in Korean)*, Seoul, pp. 367-368, May 2016.



#### 오 명 식

2015년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2015년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사과정. 관심분야는 로봇 시스템제어 및 응용, 모델링.



#### 서 자 호

1999년 서울대학교 농공학과 졸업. 2006년 캐나다 퀘벡대(ETS) 기계공학과 석사. 2011년 캐나다 워털루대 기계공학과 박사. 2012년~2016년 한국기계연구원 시스템신뢰성연구실 선임연구원. 2016년~현재 충남대학교 바이오 시스템기계공학과 조교수. 관심분야는 건설 및 농업기계 지능제어 시스템.



#### 정 슬

1988년 미국 웨인 주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능 제어 시스템 및 지능 로봇 시스템, 다양한 밸런싱 메커니즘의 제어 및 응용, 유무인 수송체 시스템, 로봇교육.