

## 굴삭기의 힘제어 구현 및 실험 연구

# Study on Experiment and Implementation of Force control for an Excavator System

○오 명 식\*, 서 자 호\*\*, 정 슬\*

\*충남대학교 메카트로닉스공학과 지능시스템 및 감성공학실험실

\*\* 한국기계연구원 시스템신뢰성 연구실

**Abstract** This paper presents the implementation of force control of the miniature excavator. A force sensor is mounted to detect contact force from environment to system. A admittance control method is used to modify the reference position based on the measured force. Experimental studies confirm the force control capability of the excavator system.

**Keywords** excavator system, force control, admittance control

### 1. 서론

많은 공사 현장에서 쉽게 볼 수 있는 굴삭기는 자체적으로 진동이 심한 시스템으로 사용자가 장시간 탑승할 경우 자체의 진동으로 인해 쉽게 피로감을 느낄 수 있다. 피로감이 지속되면 작업 능률이 저하되며 사고가 일어날 확률이 높아지게 된다.

이러한 이유로 사람이 시스템 외부로 나오면서 원격으로 제어하거나, 작업의 자동화로 인해 반복적인 작업을 수행하는 연구가 진행 중이다 [1,2].

본 논문에서는 굴삭기의 자동화 작업 중 생기는 반력에 대한 힘제어에 대해 연구하였다. 먼저 그림 1에 보여진 기존의 조이스틱으로만 제어되던 굴삭기의 모형을 직접 제어할 수 있도록 구현하였다. 각 조인트에 엔코더 센서를 부착하고 버킷에 힘센서를 부착하여 힘제어가 가능하도록 하였다.

버킷에 일정한 힘이 적용되도록 힘 센서를 통해 외부의 힘을 측정하고 원하는 힘의 크기를 유지할 수 있도록 위치를 변경하는 어드미턴스 제어방식을 사용하였다. 실험을 통해 원하는 힘을 추종하고 있음을 확인하였다.

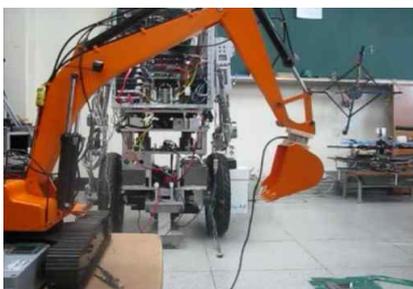


그림 1. 1/12 earth digger 4200XL 굴삭기

### 2. Excavator 시스템

그림 1은 1:12 scale earth digger 4200XL을 나타낸다. 각 링크의 각도를 검출하기 위해서 그림 2와 같이 축을 가공하여 encoder를 부착하였다. 힘 제어를 위해서는 그림 2와 같이 bucket과 arm의 사이에 서포터를 제작하여 힘센서를 장착하였다.



그림 2. 축 가공, 힘 센서 장착모습

하드웨어의 전체적인 제어 흐름은 그림 3과 같다. DSP에서는 역기구학과 어드미턴스 제어를 해석하여 서보 밸브와 BLDC로 구성된 유압 펌프를 작동하게 된다. 작동된 서보 밸브와 펌프를 통해 boom, arm, bucket에 부착된 실린더를 작동시킨다. 각 링크에 부착된 엔코더와 힘센서는 DSP로 제어를 위한 데이터를 보내게 된다.

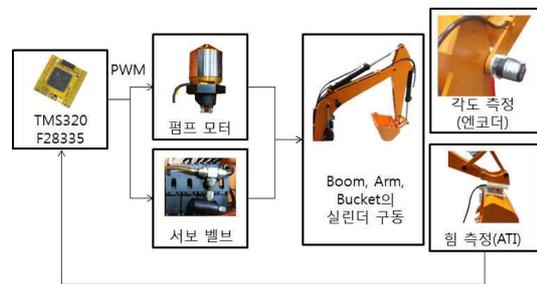


그림 3. 하드웨어 블록도

### 3. Admittance 힘제어

위치 제어를 위해서는 기준 경로가 설정되어 입력 된다. 입력된 경로는 역기구학을 통해 각 링크의 각도를 설정하며 PID제어를 통해 원하는 위치에 bucket의 끝단이 위치하도록 제어가 된다. 그림 4를 통해 전체적인 시스템 제어 흐름을 볼 수 있다.

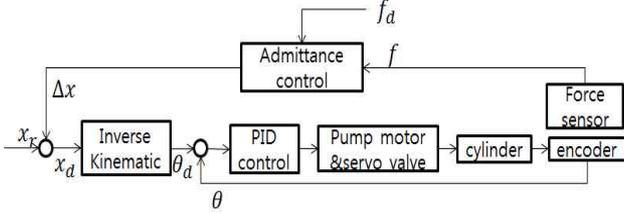


그림 4. 시스템 제어 블록도

단순히 PID제어만을 이용하여 반복작업을 진행시 환경으로부터 발생하는 힘에 의해 원하는 경로대로 움직이지 못할 수 있다. 따라서 Admittance control을 통해 외부의 힘이 발생했을 시 위치경로를 변경하여 원하는 위치에 도달할 수 있도록 한다. Admittance에서는 식 (1)과 같은 방식으로 힘변화에 대한 위치 변화를 발생시킨다 [3].

$$\Delta x(z) = \frac{T_s^2 z^2}{(T_s^2 k + T_s b + m)z^2 + (T_s b + 2m)z + m} \Delta F(z) \quad (1)$$

식 (1)의 각 상수는 시스템 모델을 mass spring damper 시스템으로 모델링하여 외부 힘에 대한 반응을 기준으로 설정하였다. 여기서  $T_s$ 는 sampling time 이고,  $m$ ,  $b$ 와  $k$ 는 대수적인 방법을 통해 구할 수 있고  $\Delta F = f - f_d$ 로 desired force와 힘센서를 통한 actual force의 차이이다.

실험 환경은 그림 5와 같다. 초기에 특정위치를 추종하고 있으며 원하는 힘이 입력되면 접촉이 일어날 때까지 아래 방향으로 내려가게 된다. 이 때 앞쪽으로의 위치는 일정하게 유지하며 아래방향으로의 위치만 변경하게 된다.



그림 5. 실험 환경

아래 방향으로 내려와 접촉이 일어나게 되면 힘 센서를 이용하여 현재 힘에 대한 정보를 바탕으로 원하는 힘이 유지되도록 경로를 설정하게 된다.

### 4. 실험결과

그림 6은 힘 센서를 통해 측정된 bucket 끝단의 힘을 나타낸다. 1N의 기준힘을 입력으로 주었을 때 힘을 1N에서 유지하고 있는 것을 볼 수 있다. 하지만 70%의 오버슈트가 발생하고 힘추종 오차도 20% 발생하고 있어 이에 대한 대처가 필요하다.

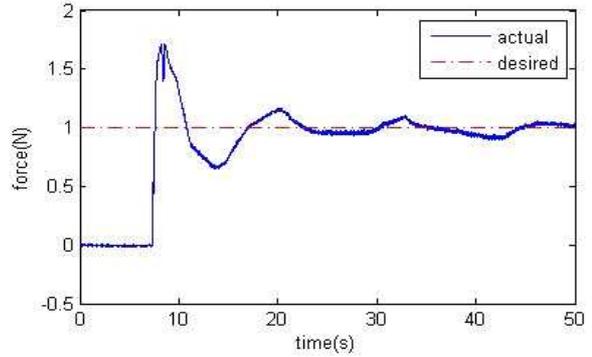


그림 6. 힘센서 측정값

### 5. 결론

본 논문에서는 굴삭기의 반복작업시 반력에 대응하기 위한 힘 제어를 구현하였다. 외부에서 힘이 발생했을 시 원하는 위치에서 원하는 힘을 유지할 수 있도록 제어를 설계하였다. 실험을 통해 원하는 힘을 추종하고 있음을 확인할 수 있었다. 추후에는 힘의 오버슈트를 줄이고 시간지연을 줄이도록 노력하고자 한다.

### 감사의 글

본 논문은 기계연구원과 2014년 한국연구재단 기초연구(NRF-2014R1A21A11049503)의 일부 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] 조희, 장효환 “ 유압 굴삭기의 능동 피치운동제어”, 기계의 날 선포 및 2002년도 기계관련 산학연 연합심포지엄(대한기계학회 편), pp. 681~686
- [2] 양순용, 진성민, 최정주, 이창돈, 김용석 “ 필드로봇용 원격 굴삭 시스템의 궤적제어에 관한 연구”, 유공압시스템학회논문집, 제6권, 제4호, pp. 9~15, 2009
- [3] S. Jung, T.C. Hsia, and R. G. Bonitz, “Force Tracking Impedance Control of Robot Manipulators Under Unknown Environment,” *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol.12, no.3 pp. 474-483, 2004.