

유압굴삭기의 원격 조종을 통한 버킷 위치 제어 시스템 설계 Planning of Bucket Position Control of a Hydraulic Excavator Using Tele-operated System

*오경원¹, 김동남¹, #홍대희¹, 김윤기², 홍석희²

*K. W. Oh¹, D. Kim¹, #D. Hong(dhhong@korea.ac.kr)¹, Y. Kim², S. Hong²
¹고려대학교 기계공학부, ²내경엔지니어링

Key words : Hydraulic Excavator, Bucket Position, Tele-operated System

1. 서론

건설현장이나 해체현장에서 유압굴삭기는 인간이 하기 힘들거나 위험한 일을 대신하는 역할을 한다. 유압굴삭기를 조종하기 위해서는 숙련자가 필요하지만, 위험하고 열악한 환경으로 인해 작업자가 많이 부족한 상황이다. 특히 건물의 해체현장에서는 유압굴삭기에 직접 탑승하여 작업을 하는 만큼 운전자가 위험에 노출되어 있어 최근에 이에 대응하기 위해 유압굴삭기의 로봇화 및 자동화에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 굴삭기 기구학 해석을 바탕으로 비례제어밸브와 각도센서를 이용하여 유압굴삭기의 버킷 위치를 제어하기 위한 시스템에 대해 다룬다.

2. 유압굴삭기 기구학 해석

유압굴삭기의 버킷 위치를 파악하기 위해서는 순기구학, 역기구학 해석이 필수적이다. 기구학 분석을 통해 각각의 링크 각도에 따른 버킷 조인트의 위치를 제어할 수 있기 때문이다. Fig. 1은 유압굴삭기를 간단한 모델링 한 그림이며 다음은 기구학 해석을 통한 붐과 암의 위치에 따른 버킷 위치에 관한 식이다. 대부분의 굴착 작업은 붐과 암, 버킷에 의한 2 차원 동작이기 때문에 스윙 모션은 여기에서 고려하지 않는다. [1], [2]

$$\theta_{e2} = \tan^{-1} \left(\frac{r_{24}(y)}{r_{24}(x)} \right) + \cos^{-1} \left(\frac{a_2^2 + r_{24}^2 - a_3^2}{2a_2 r_{24}} \right) \quad (1)$$

$$\theta_{e3} = \pi + \cos^{-1} \left(\frac{a_2^2 + a_3^2 - r_{24}^2}{2a_2 a_3} \right) \quad (2)$$

- a_2 : Boom length (distance from Z_{e2} to Z_{e3})
- a_3 : Arm length (distance from Z_{e3} to Z_{e4})
- r_{24} : Distance from Z_{e2} to Z_{e4}
- θ_{ei} : Angle of each link ($i = 1, 2, 3, 4$)

3. 원격 조종 실험 시스템

실험에 사용된 유압굴삭기는 스윙, 붐, 암 그리고 버킷의 4 가지 기본 동작을 가진 SOLAR015의 1.5 톤 급 모델이며, 이를 바탕으로 유압굴삭기를 원격 제어 하기 위한 시스템을 구축하였다.

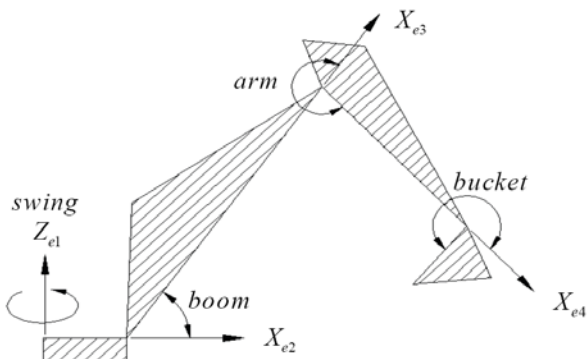


Fig. 1 Kinematics modeling of hydraulic excavator



Fig. 2 Proportional valve control system



Fig. 3 Hydraulic excavator (SOLAR015) equipped with PVC and mounted inclinometer sensors

기본적인 유압굴삭기는 기계식 조이스틱을 통해 파일럿 밸브를 구동시키는 형태를 지니고 있다. 이러한 유압굴삭기는 로봇 형태의 원격 조종을 필요로 하는 시스템에는 부적합하기 때문에 유압굴삭기의 개조가 요구된다. 이를 위해 Fig. 2와 같은 비례제어밸브를 장착하여 기계식 조이스틱 대신에 아날로그 입력 신호에 따라 각 링크에 연결된 실린더가 구동될 수 있도록 제작하였으며, NI DAQ 6024E 보드를 이용하여 PC를 통해 비례제어밸브에 들어가는 입력 전압의 변화에 따라 붐과 암의 원격 조종을 가능하게 하였다. [3] 그리고 비례제어밸브를 이용한 원격 제어 기능을 향상시키기 위하여 경사센서를 사용하였으며, 붐과 암의 위치 제어를 위해 PI 제어를 사용하였다.

Fig. 3은 실험에 사용된 소형 유압굴삭기 SOLAR015의 모습이다. 앞에서 설명한 바와 같이 보다 정확한 유압굴삭기 링크의 각도 제어를 위해 붐과 암에 경사센서를 부착하여 아날로그 입력 전압에 따른 붐과 암의 각도 변화를 측

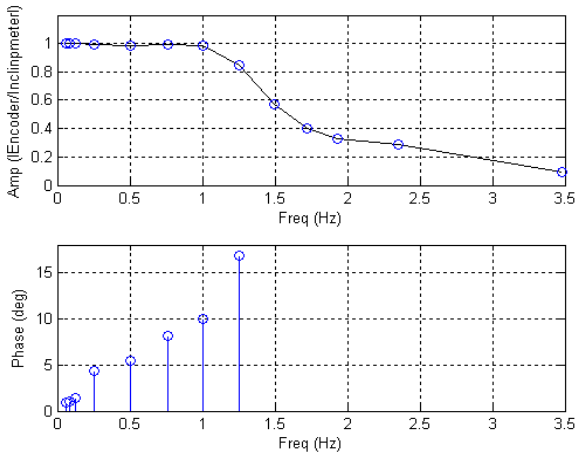


Fig. 4 Reliability test about the frequency response and phase of inclinometer sensors

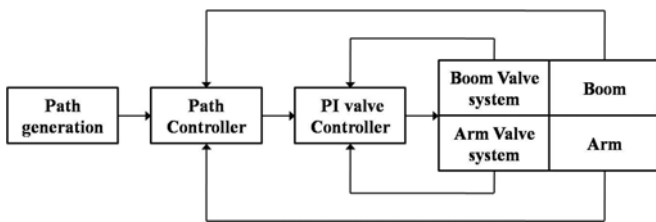


Fig. 5 Block diagram of control system

정할 수 있도록 실험 장치를 구성 하였다. 실험에 사용된 경사센서는 Microstrain 사의 FAS-A 제품을 사용하였으며, 경사센서의 신뢰도 평가를 위해 DC 모터에 경사센서를 부착하여 모터에서 나오는 엔코더 신호 값과 경사센서 신호의 진폭과 위상차를 비교하였다. Fig. 4 는 경사센서의 신뢰도 평가 결과 그래프이다. 실험 결과를 살펴보면 경사센서는 0~1 Hz사이의 대역폭을 가졌고, 이 범위 내에서 10° 이내의 위상차를 보였다.

4. 유압굴삭기 원격 조종 테스트 실험 결과

유압굴삭기를 원격 조종하는데 있어서 가장 중요한 것은 버킷의 위치를 제어하는 일이다. 버킷 위치를 제어하기 위한 과정으로 붐과 암에 대한 제어가 우선적으로 이루어져야 하기 때문에 어떤 특정 각도로의 입력을 통해 붐과 암이 각각의 위치로 이동할 수 있는지 실험을 통해 살펴보았다. DAQ 보드를 통해 입력되는 아날로그 신호는 각각의 링크를 제어하며 붐과 암은 이 신호에 따라 각도가 변하며 움직이게 된다. 경사센서를 통해 측정되는 각도와 실제 제어 목표 값에 따른 위치 오차를 비교하여 각각의 링크에 대해 PI 제어를 통해 붐과 암을 원격 조종한다. Fig. 5 는 유압굴삭기의 버킷 위치 제어를 위한 전체 제어 시스템의 블록 다이어그램이다.

Fig. 6 과 Fig. 7 은 비례제어밸브를 통해 붐과 암에 대해서 각각 원격 조종한 실험 결과이다. 그래프는 PI 제어를 통해 일정한 입력각에 대한 붐과 암의 각도 변화를 경사센서를 통해 얻은 결과이다. 붐의 경우 25° 와 70° 로 제어 목표를 설정하였을 때, 4° 이내의 오차가 발생하였으며, 같은 실험으로 200° 와 270° 에 대해 암에 적용하였을 때, 3° 이내로 원하는 각도에 대한 제어가 이루어졌다.

5. 결론

본 논문에서는 유압굴삭기의 버킷 위치를 원격 제어하기 위한 시스템에 관하여 다루었다. 이를 위해 우선 유압 굴삭기의 기구학 해석을 기초로 하여 붐과 암의 각도 변화에 따른 버킷 조인트의 위치를 분석하였다. 그리고 원격 조종에는 부적합한 형태인 유압굴삭기의 기계식 조종 방식을 벗어나기 위해 비례제어밸브를 사용하였으며, 경사센서

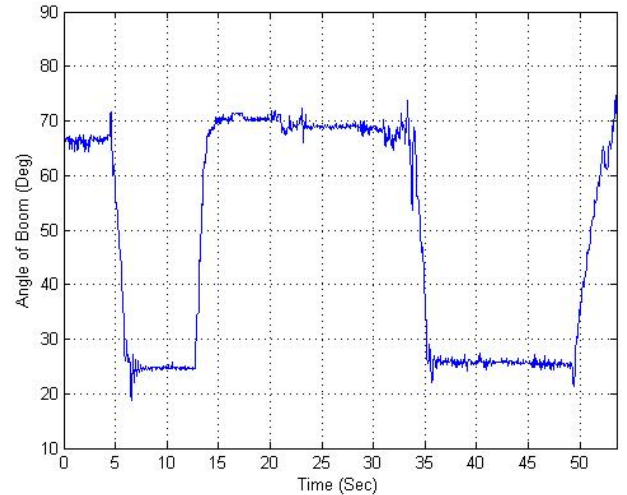


Fig. 6 Control of boom angle using PI controller

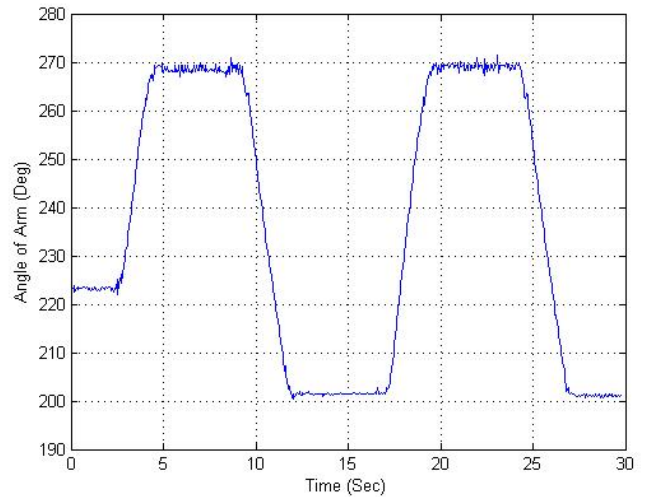


Fig. 7 Control of arm angle using PI controller

를 사용하여 비례제어밸브를 통해 제어되는 붐과 암의 각도를 피드백 받아 버킷 위치를 제어하기 위한 시스템을 구축하였다.

더 나아가 이번 연구 내용을 기초로 하여 버킷 위치 제어를 통해 수평, 수직 방향의 움직임에 대한 연구가 진행될 것이며, 최종적으로 원격 조종을 통해 버킷 이동 경로에 대한 제어가 이루어질 것이다.

후기

본 연구는 국토해양부 건설핵심기술연구개발사업의 연구비 지원(과제번호 "06 건설핵심 B04")과 BK21 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Frankel, J. G., "Development of a Haptic Backhoe Testbed," A Thesis of Master of Science, School of Mechanical Engineering Georgia Institute of Technology, 2004.
2. Kim, D., Oh, K. W., Hong, D., Park, J. -H., Hong, S., "Design and Simulation of A Haptic Device for Excavator with Phantom 1.5," Asian Symposium for Precision Engineering and Nanotechnology, 133-138, 2007.
3. Chiang, M. -H., Huang, C. -C., "Experimental Implementation of Complex Path Tracking Control for Large Robotic Hydraulic Excavators," Int. Adv. Manuf. Technol., 23, 126-132, 2004.