

# 굴삭기 원격 조종 장치의 조작성 평가

## Evaluation of Remote Control Device for Excavator Operation

\*오경원<sup>1</sup>, 김남훈<sup>1</sup>, 김동남<sup>1</sup>, #홍대희<sup>1</sup>, 김윤기<sup>2</sup>, 홍석희<sup>2</sup>

\*K. W. Oh<sup>1</sup>, N. H. Kim<sup>1</sup>, D. Kim<sup>1</sup>, #D. Hong(dhhong@korea.ac.kr)<sup>1</sup>, Y.-K. Kim<sup>2</sup>, S.-H. Hong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>고려대학교 기계공학과, <sup>2</sup>(주)내경엔지니어링

Key words : Remote Control, Haptic Device, Excavator

### 1. 서론

최근 리모델링을 하거나 재건축을 하는 건설 현장을 쉽게 찾아 볼 수 있다. 이러한 경우 건물을 해체하는 작업이 우선 진행되어야 하는데, 이 경우에 굴삭기에 크리셔나 브레이커 장착을 통한 작업이 가장 많이 이루어진다. 건물의 해체 작업을 하는 경우에 운전자가 굴삭기에 직접 탑승하여 작업을 하기 때문에 운전자는 무너지는 건물 자재나 파편에 의한 위험에 노출되어 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 굴삭기 원격 조종을 위한 연구가 진행되어 왔다. 이 논문에서는 처음 조작하는 조종자도 쉽게 조종할 수 있고 보다 효율적인 작업을 위한 굴삭기 원격 조종 장치의 조작성 평가에 대해 다룬다.

### 2. 유압굴삭기 기구학 해석

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

$$\theta_{e2} = \tan^{-1} \left( \frac{r_{24}(y)}{r_{24}(x)} \right) + \cos^{-1} \left( \frac{a_2^2 + r_{24}^2 - a_3^2}{2a_2r_{24}} \right) \quad (1)$$

$$\theta_{e3} = \pi + \cos^{-1} \left( \frac{a_2^2 + a_3^2 - r_{24}^2}{2a_2a_3} \right) \quad (2)$$

$a_2$  : 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  $Z_{e4}$

$\theta_{ei}$  : Angle of each link ( $i = 1, 2, 3, 4$ )

### 3. 햅틱 장치 시스템

유압굴삭기의 원격 조종을 위해 새로 고안된 햅틱 장치는 조종자의 직관에 의해 쉽게 굴삭기 구동을 할 수 있도록 제작되었다. Fig. 2를 보면 알 수 있듯이 기존 원격 조종 장치와는 달리 새로 고안된 햅틱 장치는 굴삭기의 형상과

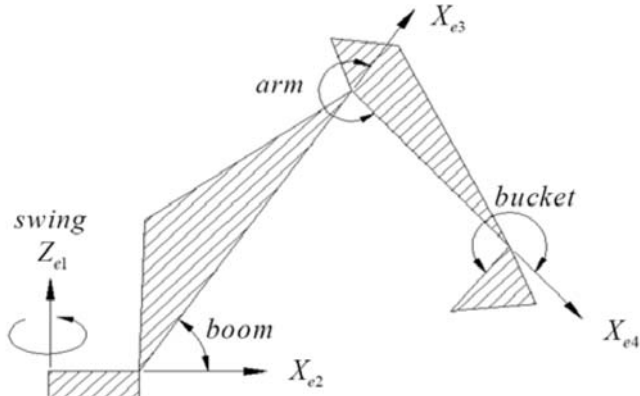


Fig. 1 Kinematics modeling of hydraulic excavator

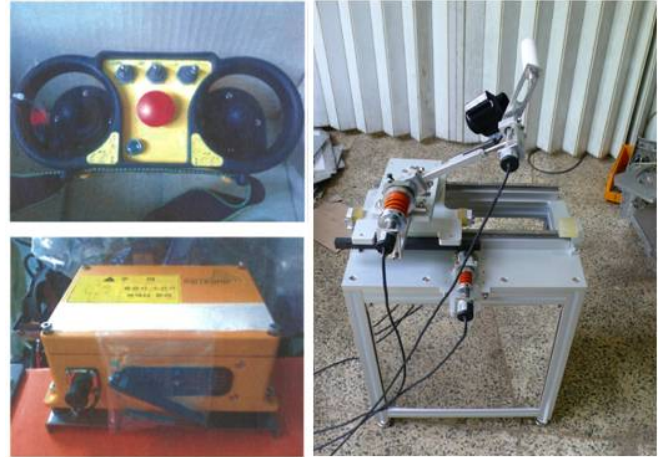


Fig. 2 Remote controller and haptic device

비슷한 모양으로 제작되었다. 햅틱 장치의 링크 구동은 사람의 팔과 손목을 굴삭기 형태로 구부려 팔의 각도와 움직임에 따라 붐과 암이 구동되고 팔의 회전으로 스윙이 구동된다. 그리고 손목의 움직임으로 버킷을 제어하여 처음 조종하는 사람도 오랜 연습 시간 없이 쉽게 구동할 수 있도록 매우 직관적으로 설계되었다.[2]

햅틱 장치는 굴삭기 4 자유도의 각 관절을 독립적으로 조종한다. 햅틱 장치 역시 굴삭기와 마찬가지로 4 자유도를 가지고 있으며, 햅틱 장치의 각각의 4 자유도가 굴삭기의 스윙, 붐, 암 그리고 버킷과 연결된다. Fig. 3은 굴삭기 원격 조종을 위해 새로 제작한 햅틱 장치의 설계도이며, 각 링크의 회전축을 표시하였다. 햅틱 장치의 각각의 링크는  $Z_{h1}, Z_{h3}, Z_{h4}$ 를 축으로 하는 회전 운동과  $X_{h2}$ 의 방향으로의 직선 운동을 하는 4 자유도를 가진다. 햅틱 장치의  $X_{h2}$  축 방향의 슬라이딩 모션과  $Z_{h3}, Z_{h4}$ 을 축으로 하는 회전 운동은 굴삭기의 붐 그리고 암, 버킷과 연결되며,  $Z_{h1}$ 는 굴삭기의 스윙 모션을 제어한다. 햅틱 장치의 각각의 조인트에는 로터리인코더가 장착되어 있어서 조종자의 조작에 따른 햅틱 장치 각 관절의 움직임에 대한 입력 값을 받고 이에 따라 굴삭기의 링크가 구동되도록 제작되었다.

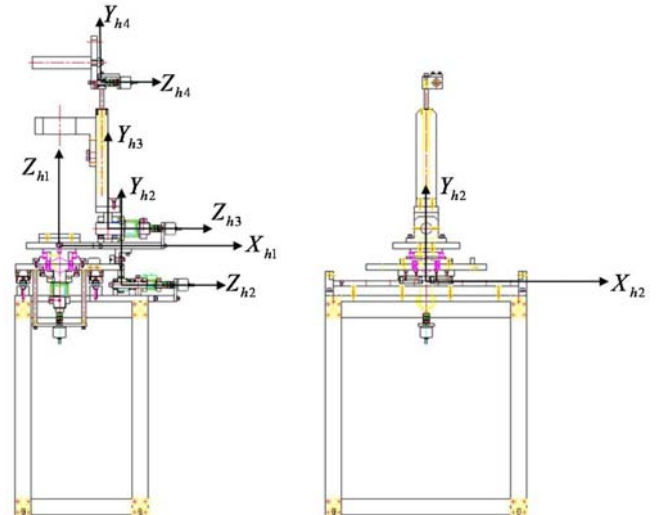


Fig. 3 Design drawing of the haptic device joint axis of each link

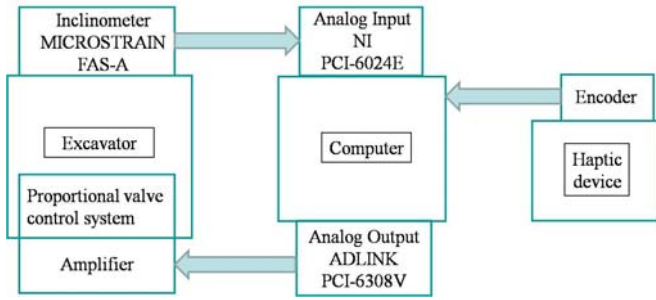


Fig. 4 Scheme of remote control system for excavator using haptic device



Fig. 7 Excavator operability test using haptic device



Fig. 5 Proportional valve control system and inclinometer

4. 굴삭기 원격 조종 시스템

햅틱 장치로부터 입력 받은 각 조인트의 위치 값은 ENC600 인코더카운터보드를 통해서 수집된다. 수집된 정보를 바탕으로 역기구학 해석을 통해 굴삭기 링크의 위치를 계산한다. 기구학 해석으로 굴삭기 링크의 위치가 결정되고, Analog Output 보드를 통해 아날로그 신호를 내보내 원하는 위치로 링크를 이동시킨다. DAQ 보드의 output volt 값은 Amplifier 를 거쳐서 비례 제어 밸브로 값을 보낸다. 기존의 유압굴삭기는 기계식 조이스틱을 통해 파일럿 밸브를 구동시키는 형태이기 때문에 원격조종에 적합한 비례제어밸브로 개조하여 시스템을 구축하였다. Fig. 5의 비례 제어 밸브와 경사계를 이용하여 굴삭기의 각 링크는 햅틱 장치를 통해 조종한 위치로 움직이고, 굴삭기 각 링크의 각도 정보를 피드백 받고 PI 제어를 통해 위치제어를 하였다.

5. 조작성 평가 실험 및 결과

새로 설계된 햅틱 장치의 조작성 평가를 위해 굴삭기 조종에 능숙하지 않은 비숙련자 5 명을 대상으로 하여 실제 굴삭기의 조이스틱, 기존 원격 조종 장치, 햅틱 장치를 이용하여 지정된 위치에 버킷을 이동시키는 동작으로 편의성에 대해 평가를 하였다. Fig. 6 과 같은 위치에 매겨진 번호의 순서대로 버킷을 이동 시키는 실험으로 다음 차례의 위치로 옮기는 경우에는 일정 높이 위로 버킷을 이동시키도록 하여 평가하였다. 실험에 대한 평가 항목은 크게 조작의 편의성과 작업 시간, 그리고 버킷을 이동시키는 동안에 발생한 오차 횟수에 대해 세 가지 항목에 대해 평가하였으며, 평가는 세가지 조작 방법 중에서 조작이 가장 편

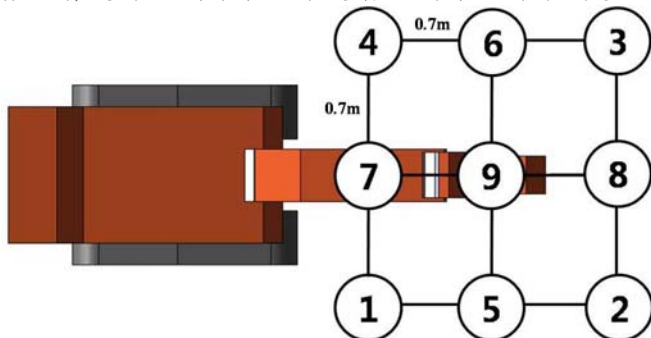


Fig. 6 Experimental diagram

한 방법부터 순서대로 1, 2, 3 의 순으로 표시하였다. Table 1 은 5 명의 작업자의 실험에 대한 평가 결과를 나타내고, Table 2 는 작업시간과 오차 횟수의 평균값 결과를 나타낸다. 실험을 통해 새로 고안된 햅틱 장치의 조작성 및 편의성이 기존 원격 조종 장치에 비해 우수하며 실제 굴삭기에 탑승하여 작업하는 것과 큰 차이가 없음을 확인 할 수 있었다.

Table 1 Comparison of operability

	Operability					
	A	B	C	D	E	total
On Board	1	2	3	1	1	1.6
Remote Controller	3	3	3	2	3	2.8
Haptic Device	2	1	1	3	2	1.8

Table 2 Result of experimental mean

	On Board	Remote Controller	Haptic Device
Operating Time (sec)	104	133	118
Error (per point)	2.4	3.4	3.2

6. 결론

본 논문에서는 해체 현장에서의 굴삭기 운전자의 안전 확보를 위한 굴삭기 원격 조종을 위해 새로 고안된 햅틱 장치의 조작성에 대한 평가를 진행하였다. 실험 결과 초보자도 쉽게 조작할 수 있도록 직관적으로 설계되어 있기 때문에 기존의 원격 조종 장치 보다 초보자도 쉽게 조작할 수 있고 실제 굴삭기에 탑승하여 조종하는 것과 비슷한 작업성을 가짐을 확인할 수 있었다.

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., Kim, Y. -K., Hong, S., “Motion Control of Excavator with Tele-operated System,” The International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2009), 2009.