

# 굴삭기의 버킷 끝단 위치인식에 관한 연구

## A Study on Position Recognition of Bucket Tip for Excavator

김재훈<sup>1</sup> · 배종호<sup>1</sup> · 정우용<sup>1\*</sup>

Jae Hoon Kim, Jong Ho Bae and Woo Yong Jung

Received: 11 Jan. 2016, Accepted: 18 Feb. 2016

**Key Words** : Position Recognition(위치인식), Bucket Tip(버킷 끝단), IMU(관성 측정 장치), Accelerometer(가속도계), Excavator(굴삭기)

**Abstract:** The accurate calculation of bucket tip position has a large influence on showing the motion of an excavator on the display device of the excavator and controlling the excavator automatically. It is generally known that Inertial Measurement Unit (IMU) sensors are more accurate than accelerometer-based sensors while the boom, arm or bucket moves because additional forces beyond gravity add additional acceleration to the sensors. To prove the accuracy difference between the two types of sensors, a position recognition system using an accelerometer-based sensor and an IMU sensor is implemented on the excavator. The experimental results show that the system using the IMU sensor significantly reduces the position recognition error while bucket moves and additional force beyond gravity exists.

### 기호 설명

- $X$  : reach of bucket tip from boom pin, mm
- $Y$  : depth of bucket tip from boom pin, mm
- $\theta_{bm}$  : boom angle, °
- $\theta_{arm}$  : arm angle, °
- $\theta_{bkt}$  : bucket angle, °
- $Z_{bm}$  : boom length, mm
- $Z_{arm}$  : arm length, mm
- $Z_{bkt}$  : bucket length, mm
- $X_{bm}$  : reach of arm pin from boom pin, mm
- $X_{arm}$  : reach of bucket pin from arm pin, mm
- $X_{bkt}$  : reach of bucket tip from bucket pin, mm
- $Y_{bm}$  : height of arm pin from boom pin, mm

$Y_{arm}$  : depth of bucket pin from arm pin, mm

$Y_{bkt}$  : depth of bucket tip from bucket pin, mm

### 1. 서 론

최근 건설 산업에서는 측량에 소요되는 시간을 단축하면서 굴삭 또는 평탄화 작업을 정확하게 할 수 있는 방법에 대한 필요성이 대두되고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로, 굴삭기의 형상과 목표 지형 도면을 모니터 화면에 동시에 표시하여 운전자에게 버킷 위치를 알려주는 굴삭기 가이드스(Guidance) 시스템이 개발된 바 있다.<sup>1)</sup>

또한 기존의 굴삭기 가이드스 시스템에 부분적인 자동 제어 기능을 추가하여 비숙련 운전자도 숙련된 운전자만큼 작업을 정확하고 쉽게 할 수 있는 시스템도 개발된 바 있다. Komatsu社는 버킷이 목표 도면보다 아래로 내려가는 경우에 자동으로 움직임을 제한하는 자동 정지 제어(Automatic Stop Control) 기능이나, 목표 도면을 따라 평탄화 작업을 할 수 있도록 붐을 자동으로 제어하는 자동 평탄화 지원(Automatic Grading Assist) 기능이 적용된 부분 자동제어 시스템을 개발하였다.<sup>2)</sup>

\* Corresponding author: wooyong.jung@doosan.com  
 1 Electronic Control Software Development Team, Doosan Infracore, Incheon 22502, Korea  
 Copyright © 2016, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

이러한 굴삭기 가이드 시스템이나 부분 자동 제어 시스템은 센서를 이용하여 붐, 암, 버킷의 각도를 측정하고 순 기구학(Forward Kinematics) 수식<sup>3-5)</sup>을 이용하여 굴삭기 프론트 각 부의 위치 좌표를 산출한다. 따라서 버킷 끝단에 대한 위치인식 정확도는 각도 측정 센서의 정확도에 영향을 받는다.

붐, 암, 버킷의 각도를 측정하기 위한 대표적인 센서로는 실린더 변위 측정 센서<sup>6)</sup>, 붐, 암 버킷의 회전축에 장착되는 회전식 각도 측정 센서, 가속도계 센서, 가속도계와 각속도계(Gyroscope)가 결합된 IMU (Inertial Measurement Unit) 센서가 있다. 특히 가속도계 센서와 IMU 센서는 실린더 변위 측정 센서나 회전식 각도 측정 센서에 비해 굴삭기 프론트에 탈부착이 용이하여 굴삭기 가이드 시스템이나 부분 자동 제어 시스템에 많이 사용이 되고 있다.

일반적으로 IMU 센서는 굴삭기 프론트가 동작하여 중력 이외의 힘이 추가로 작용하는 상태에서 가속도계 센서에 비해 정확도가 높다. 이는 가속도계 센서가 중력 가속도만 측정하여 각도를 산출하지만, IMU 센서는 중력 가속도와 회전 각속도를 동시에 측정하여 각도를 산출하기 때문이다. 대신 IMU 센서는 가속도계 센서에 비해 가격이 비싼 단점이 있다. 따라서 정확도 성능과 가격을 모두 고려하여 굴삭기 가이드 시스템이나 부분 자동 제어 시스템의 개발에 적합한 센서를 선택하기 위해서는, 가속도계 센서와 IMU 센서를 각각 사용하는 경우에 굴삭기 버킷 끝단에 대한 위치인식 정확도의 차이를 확인해야 할 필요성이 있다.

본 논문에서는 실제 38톤 급 굴삭기에서 위치인식 시스템을 구성하고 순 기구학 수식을 도출하여 굴삭기 프론트 위치인식 소프트웨어를 설계하였다. 그리고 가속도계 센서와 IMU 센서에 대해 붐, 암, 버킷이 정지된 상태와 버킷만 동작하는 상태로 구분하여 버킷 끝단에 대한 위치인식 오차를 측정하는 시험을 진행하였다.

## 2. 굴삭기 프론트 위치인식 시스템 설계

38톤 급 굴삭기에서 개발된 굴삭기 프론트 위치인식 시스템은 크게 센서 부, 제어장치 부, 위치정보 표시 부로 구성되어 있으며 Fig. 1과 같다.

센서 부는 굴삭기의 붐, 암, 버킷 가이드 링크에 장착이 되는 가속도계 센서와 IMU 센서로 구성된다. 각각의 센서는 센서 자체의 좌표계를 기준으로 측정

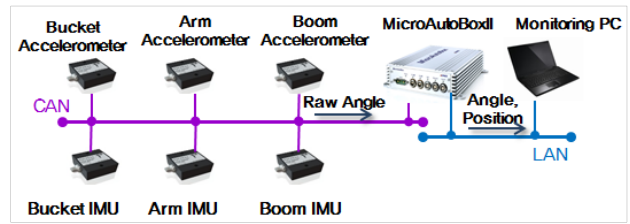


Fig. 1 Schematic diagram of position recognition system

된 각도를 제어장치 부로 송신한다. SignalQuest社의 가속도계 센서와 IMU 센서가 사용되었으며 각각의 센서는 100Hz의 샘플링 속도와 0.1°의 각도 오차를 가지고 있다.

제어장치 부에는 RCP(Rapid Control Prototyping) 장치로서 dSPACE社의 MicroAutoboxII가 사용되었으며 굴삭기 프론트에 대한 위치인식 소프트웨어가 탑재된다. 위치인식 소프트웨어는 센서 좌표계를 기준으로 측정된 각도를 중력 가속도를 기준으로 한 각도로 변환하며 굴삭기의 암 회전축의 위치 좌표, 버킷 회전축의 위치 좌표, 버킷 끝단의 위치 좌표를 각각 산출한다.

마지막으로 위치정보 표시 부는 제어장치 부에서 산출된 위치 좌표와 보정된 각도를 저장하고 개발자에게 표시하는 역할을 한다.

## 3. 굴삭기 프론트 위치인식 소프트웨어 설계

굴삭기 프론트 위치인식 소프트웨어는 센서가 장착되는 위치의 변화에 의해 각도 오차가 존재한다. 장착 위치 변화에 의한 오차를 줄이기 위하여 운전자가 붐, 암, 버킷을 중력 가속도에 수직 또는 수평한 방향으로 맞춘 후에 측정 기준 각도인 0°를 직접 설정할 수 있도록 설계하였다.

또한 붐, 암, 버킷의 각도를 입력으로 받아서 버킷 끝단의 위치를 산출하는 순 기구학 로직을 설계하였다.

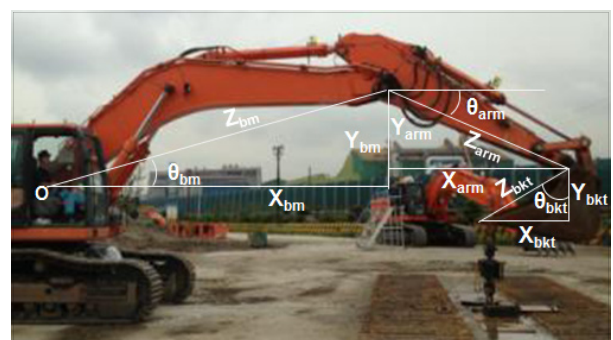


Fig. 2 Geometry analysis of excavator

Fig. 2는 굴삭기에 대해 기하학 분석을 한 결과이다.  $\theta_{bm}$  와  $\theta_{arm}$  은 중력 가속도에 수직한 평면을 기준으로 측정된 각도이며,  $\theta_{bkt}$  는 중력 가속도에 평행한 평면을 기준으로 측정된 각도이다.

붐 회전축인 O를 기준으로 버킷 끝단의 좌표 (X, Y)는 식 (1), (2)와 같이 표현이 된다.

$$X = X_{bm} + X_{arm} - X_{bkt} = Z_{bm} \cos \theta_{bm} + Z_{arm} \cos \theta_{arm} - Z_{bkt} \sin \theta_{bkt} \quad (1)$$

$$Y = Y_{bm} - Y_{arm} - Y_{bkt} = Z_{bm} \sin \theta_{bm} - Z_{arm} \sin \theta_{arm} - Z_{bkt} \cos \theta_{bkt} \quad (2)$$

#### 4. 버킷 끝단 위치인식 성능 시험 결과

##### 4.1 버킷 정지 상태에서의 정확도 시험 결과

개발된 굴삭기 버킷 끝단 위치인식 시스템에 대해 중력 이외의 힘이 작용하지 않는 상태에서의 위치인식 정확도 성능을 확인하기 위하여, 붐, 암, 버킷이 완전히 정지된 상태에서 버킷 끝단의 위치 오차를 확인한다. 버킷 끝단의 위치 오차는 버킷 끝단이 위치한 서로 다른 두 위치에 대해 위치인식 시스템에서 표시되는 거리와 실제 측정된 거리를 비교하여 산출하였다.

Fig. 3은 버킷 끝단의 위치 오차를 산출하기 위해서 굴삭기의 버킷이 동작 가능한 범위 내에서 실제 측정이 이루어진 두 점 사이의 거리를 나타낸다. 굴삭 작업이 주로 이루어지는 굴삭 영역에 대해 수평 거리 오차와 수직 거리 오차를 각각 구하기 위한 목

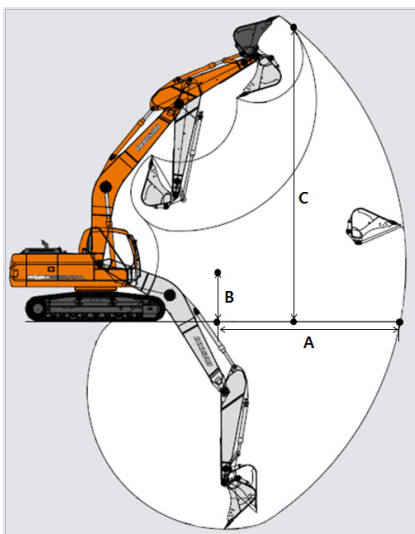


Fig. 3 Measured distance in working range

적으로 수평 거리 A와 높이 B를 선택하여 측정하였다. 또한 굴삭 영역은 아니지만 버킷 끝단이 동작 가능한 최대 한계 위치에서의 높이 오차를 구하기 위해 높이 C를 선택하여 측정하였다.

Table 1은 측정 거리 A, B, C 각각에 대하여 평균 위치인식 오차와 최대 위치인식 오차를 나타낸다. 굴삭 영역 내에서의 수평 거리 A에 대한 오차는 평균 7.3mm, 수직 높이 B에 대한 오차는 평균 1.7mm로 나타났다. 일반적으로 토목 공사에서 사용되는 굴삭기 가이던스 시스템이 굴삭 영역 내에서 평균 20mm 이하 수준의 정지 위치인식 오차를 보이는 것을 감안하면 개발된 버킷 끝단 위치인식 시스템이 굴삭에 적합한 위치인식 오차를 보이는 것으로 판단할 수 있다.

Table 1 Position error when boom, arm and bucket stopped

	Bucket Tip Position Error		
		Value(mm)	Ratio(%)
Distance A (6,133mm)	Avg.	7.3	0.1%
	Max.	10.0	0.2%
Height B (1,662mm)	Avg.	1.7	0.1%
	Max.	5.0	0.3%
Height C (10,047mm)	Avg.	110.0	1.1%
	Max.	120.0	1.2%

##### 4.2 버킷 동작 상태에서의 정확도 시험 결과

중력 이외의 힘이 추가로 작용하는 상태에서 가속도계 센서와 IMU 센서가 적용된 위치인식 시스템의 정확도 성능을 확인하기 위하여, 붐, 암이 정지하고 버킷만 동작하는 상태에서 버킷 끝단의 위치 오차를 확인한다.

버킷이 동작 중인 상태에서 버킷 끝단의 위치 오차는 위치인식 시스템에 표시되는 버킷 끝단의 위치와 버킷 회전 축 중심점의 위치 사이의 거리를 실제 측정된 버킷 길이인 1610mm와 비교하여 산출하였다.

Fig. 4는 굴삭기 엔진 회전수가 1300rpm인 상태에서 버킷 조이스틱을 최대로 조작하는 경우에 버킷 각도의 변화를 나타낸다. 구간 A에서는 버킷이 최대 덤프 자세에서 최대 굴삭 자세로 변화하며, 구간 B에서는 버킷이 최대 굴삭 자세에서 진동이 감소하여 정상 상태에 도달한다. 구간 C에서는 버킷이 최대 굴삭 자세에서 최대 덤프 자세로 복귀하며, 구간 D에서는 버킷이 최대 덤프 자세에서 진동이 감소하여

정상 상태에 도달한다. Fig. 5는 Fig. 4와 같이 버킷의 자세가 변화되는 경우에 버킷 끝단 위치의 궤적을 나타낸다. 점선은 버킷의 회전 축 중심점으로부터 버킷 끝단 사이까지의 길이를 반지름으로 하여 그린 궤적이며, IMU 센서가 가속도계 센서에 비해 점선 궤적을 더 잘 추종함을 알 수 있다.

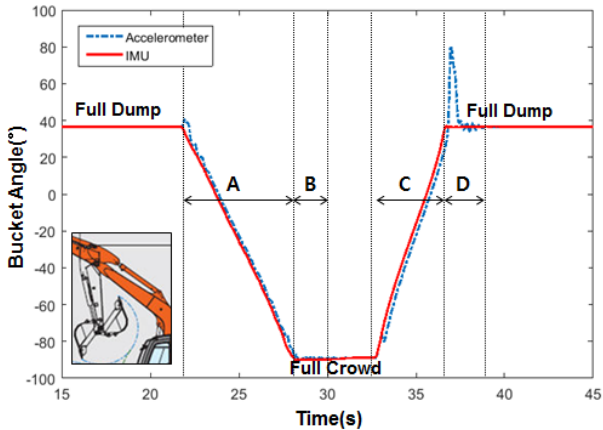


Fig. 4 Bucket angle when bucket rotated

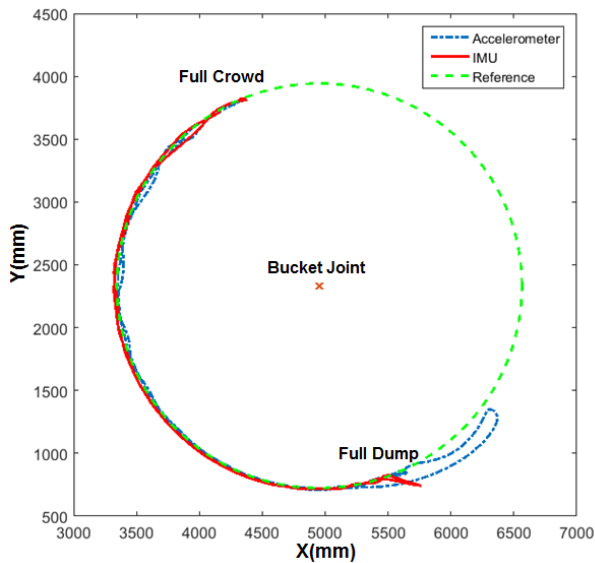


Fig. 5 Trajectory of bucket tip position

Table 2는 측정 구간 A, B, C, D 각각에 대하여 가속도계 센서를 이용하는 경우와 IMU 센서를 이용하는 경우의 위치인식 오차의 평균값을 나타낸다. 구간 A, C에서는 평균 오차가 20mm 이내로 정지 상태에서 측정된 결과와 유사한 수준의 정확도 성능을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 구간 B, D에서는 최대 굴삭 및 최대 덤프 자세에 도달하여 갑자기 정지하므로, 평균 오차가 구간 A, C에 비해서는 상대적으로 높게 나타난다. 가속도계 센서 대신 IMU 센서를 적

용하는 경우에 위치인식 평균 오차는 구간 B에서는 40.5%, 구간 D에서는 82.1% 감소되었으며, A, B, C, D 전체 구간에 대해서는 평균 71.7% 감소되었다.

Table 2 Average position error when bucket moved

	Bucket Tip Position Error(mm)		
	Accel.	IMU	Diff.(%)
Range A	6.4	15.2	-137.5%
Range B	98.2	58.4	40.5%
Range C	14.0	13.0	7.1%
Range D	512.2	91.9	82.1%
Average	157.7	44.6	71.7%

또한 Table 3은 측정 구간 A, B, C, D 각각에 대하여 가속도계 센서를 이용하는 경우와 IMU 센서를 이용하는 경우의 위치인식 오차의 최대값을 나타낸다. 가속도계 센서 대신 IMU센서를 적용하는 경우 A, B, C, D 전체 구간에 대하여 위치인식 최대 오차가 평균 69.3% 감소되었다

Table 3 Maximum position error when bucket moved

	Bucket Tip Position Error(mm)		
	Accel.	IMU	Diff.(%)
Range A	31.5	24.4	22.5%
Range B	490.2	145.8	70.3%
Range C	56.3	42.9	23.8%
Range D	943.2	254.6	73.0%
Average	380.3	116.9	69.3%

## 5. 결 론

본 논문에서는 굴삭기 버킷 끝단의 위치인식을 위한 하드웨어 시스템과 소프트웨어를 각각 설계하고 실제 굴삭기에 센서를 장착한 시험을 통해 버킷 끝단의 위치인식 정확도를 검증하였다. 특히 본 논문에서는 버킷이 동작하는 동적인 상태에서의 시험을 통하여 가속도계 센서와 IMU 센서를 각각 적용하는 경우에 대해 위치인식 정확도의 성능 차이를 분석하였다.

먼저 굴삭기의 붐, 암, 버킷 가이드 링크에 대해 각도 측정이 가능한 가속도계 센서와 IMU 센서를 장착하고, 붐, 암, 버킷의 각도를 입력으로 받아서 버

킷 끝단의 위치를 산출하는 버킷 위치인식 시스템을 개발하였다.

개발된 굴삭기 버킷 위치인식 시스템에서 굴삭기의 붐, 암, 버킷이 정지된 경우에 굴삭 영역 내에서의 수평 거리에 대한 위치인식 오차는 평균 7.3mm, 수직 높이에 대한 위치인식 오차는 평균 1.7mm로 나타났다. 또한 가속도계 센서와 IMU 센서를 각각 적용하고 굴삭기의 버킷이 동작되는 경우에 버킷 끝단에 대한 위치인식 평균 오차는 각각 157.7mm, 44.6mm로 나타났다. 이는 IMU센서가 적용된 위치인식 시스템이 가속계 센서가 적용된 위치인식 시스템에 비해 위치인식 오차가 평균 71.7%로 감소되어 더 우수한 위치인식 정확도 성능을 나타낸다.

### 후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(15SCIP-B079689-02)에 의해 수행되었습니다.

### References

- 1) A. Vladeanu and G. Vladeanu, "THE CONTROL OF THE BUCKET POSITION AT THE HYDRAULIC EXCAVATORS WITH BACKHOE ATTACHMENT", SISOM 2011 and Session of the Commission of Acoustics, Bucharest, 25-26 May, 2011.
- 2) Y. Shimano, Y. Kami and K. Shimokaze, "Development of PC210LCi-10/PC200i-10 Machine Control Hydraulic Excavator", Komatsu Technical Report, Vol.60, No.167, 2014.
- 3) A. J. Koivo, "Kinematics of Excavators (Backhoes) for Transferring Surface Material", Journal of Aerospace Engineering, Vol. 7, No. 1, pp.17-32, 1994.
- 4) B. P. Patel and J. M. Prajapati, "Kinematics of Mini Hydraulic Backhoe Excavator-Part: I", Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res. 2013, Vol. 2, No. 1, pp. 166-182, 2013.
- 5) C. F. Hofstra, A. J. M. van Hemmen, S. A. Miedema and J. van Hulsteyn, "Describing the position of backhoe dredge buckets", Texas A&M 32nd Annual Dredging Seminar, Warwick, Rhode Island, 25-28 June, 2000.
- 6) C. S. Lee et al., "A Study on Gravity- compensated Controller to Reduce Position Error of Intelligent Excavator", KSFC Fall Conference, pp. 90~94, 2009.