

유압 굴착기 실험을 통한 작업량 추정법 확인에 관한 연구

A Study of a Hydraulic Excavator's Test to Verify of Payload Estimation by Bucket's Motion Equation

정황훈^{1*} · 이민수¹ · 신영일¹

Hwang Hun Jeong, Min Su Lee and Young Il Shin

Received: 31 Dec. 2021, Revised: 18 Feb. 2022, Accepted: 13 Mar. 2022

Key Words : Payload Estimation(부하 예측), Motion Equation(운동 방정식), Identification(식별), Weighing System(부하 측정 시스템)

Abstract: It is important to measure the excavator's work productivity that estimates the bucket's payloads on a process. If the bucket isn't filled at every working cycle, the excavator's operator has to drive the machine more to achieve his work quota. If bucket is filled over with the load, the other way around, the transferred object has to spread out on the workplace. That causes additional work to clean the site.

This paper proposes a method that can estimate the bucket's payload to improve the excavator's work productivity. This method assumes that the excavator is a lumped mass system. And it uses a 3 points angle (boom link, arm link, swing) and 2 points pressure (boom cylinder's input port and output port) of measurable data. Depending on assumptions, the bucket's payload can be calculated by the payload's motion equation. And this suggested method can be verified by simple experiments.

1. 서 론

현재 상용화된 굴착기 자동화 기술은 수동조작에서 자동조작의 중간단계인 MG(Machine Guidance) 시스템을 활용하고 있다. MG 시스템은 굴착기 조작 시 운전자를 보조하기 위한 정보를 공급하여 작업의 능률을 향상시키는 시스템으로 운전석 근처의 출력장치를 통해 장비나 작업의 상태를 출력하고, 굴착기의 동작을 보조 또는 제한하는 장치이다.

부하 측정 시스템은 굴착 또는 이송 작업을 수행하는 버킷 내 부하의 양을 추정하는 시스템을 의미한다. 버킷의 부하량 추정은 비전 시스템을 활용한 버킷 내 부하 체적을 계측하는 방법, 굴착기 작업 전

후 작업 지역의 토사 잔여량 비교하는 방법, 붐 실린더의 차압과 붐 링크 및 암 링크, 스윙모터의 각변위를 통해 계산하는 방법 등이 있다. 첫 번째 방법의 경우 버킷 내 토사가 높이 쌓여있을 경우 토사 뒷면의 상태를 확인할 수 없기 때문에 오차가 크게 발생하는 단점을 가지고 있으며, 두 번째 방법의 경우 작업 전후의 외부 측량에 의해 변화량을 계산하기 때문에 실시간 부하 측정이 필요한 현장에 적용하기 힘들다. 붐 실린더의 차압을 이용해 부하를 계산하는 방법은 로더와 같은 건설장비에 이미 활용되고 있는 방법으로 버킷 내 부하를 빠르게 측정할 수 있는 방법이다.

본 연구에서는 최소한의 센서를 활용한 부하 측정 시스템의 부하 측정 알고리즘에 대하여 정리하였다. 버킷의 부하량과 붐 실린더 추력 사이의 관계를 동역학식으로 유도하고, 각 파라미터를 식별하기 위한 방법에 대해서도 정의하였다. 특히, 센서를 줄임으로써 발생하는 암 링크 및 버킷의 파라미터는 집중 질량계로 가정하여 부하 변동에 대해서만 고려할 수

* Corresponding author: hwanghun@koceti.re.kr

1 Smart Engineering Lab, Korea Construction Equipment Technology Institute, Gusan, 54004, Korea

Copyright © 2022, 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.

있도록 하였다. 제안된 부하 추정 알고리즘은 실험을 통해 그 타당성을 확인하였다.

2. 굴착기의 동역학식

수정된 부하 추정법(Modified Ballaire's method)를 적용하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다.^{1,3)}

- 해석 대상 굴착기는 다음의 그림과 같이 간략화 한다.
- 버킷의 조인트는 고정되어 있다고 가정하여 4자유도 시스템을 3자유도 시스템(xy평면에서 z축을 기준 회전하는 1자유도, 조인트D(xz평면)에서 y축 기준으로 회전하는 1자유도와 조인트 C(xz평면)에서 y축 기준으로 회전하는 1자유도의 합)으로 간략화 한다.
- 모든 조인트의 마찰과 감쇠에 의한 영향은 회전 속도에 영향을 미치는 집중 파라미터로 가정한다.
- 액추에이터에 의해 발생하는 힘은 모두 조인트 토크로 전달된다고 가정한다.
- 버킷은 항상 공기 중에 있다고 가정하므로, 굴토 과정(Digging)에서 토사가 버킷에 가해지는 외력은 무시한다.
- 부하의 무게 중심은 항상 버킷의 무게 중심에 있다고 가정한다.

- 조인트와 조인트를 직선으로 잇는 가상의 링크를 가정하고, 각 링크의 무게중심은 링크 중앙에 존재한다고 가정한다.

Fig. 1은 굴착기의 부하 측정을 위한 자유물체도(free body diagram)를 나타낸 것이다. Fig. 1에서 Joint D에서의 토크 평형방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 & M_D - M_{Damp,D} - M_C + M_{Damp,C} \\
 & - m_B g r_B - (J_B^S + m_B (0.5l_B)^2) \ddot{\phi}_B \\
 & - F_{LCx} z_C - F_{LCz} r_C - m_B \omega_z^2 r_B z_B = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서, M_D 는 boom 실린더에 의해 발생하는 토크이며, M_C 는 arm과 bucket으로 이루어진 lumped system에 의해 발생하는 토크이다. $M_{Damp,D}$ 와 $M_{Damp,C}$ 는 각 조인트에서 감쇠와 마찰에 의해 발생하는 토크이다.

$0.5l_B$ 는 joint D에서부터 boom의 무게 중심(CG)까지의 거리이며, boom의 관성 모멘트는 평행축 정리에 의해 joint D에서 y축을 기준으로 ϕ_A 만큼 회전할 때, $(J_B^2 + m_B (0.5l_B)^2) \ddot{\phi}_A$ 와 같다. 굴착기가 z축을 기준으로 ω_z 만큼 회전할 때, boom의 원심력은 $m_B \omega_z^2 r_B$ 이며, 원심력에 의해 발생하는 토크는 $m_B \omega_z^2 r_B z_B$ 와 같다. 버킷에 의해 조인트 C에 전달되

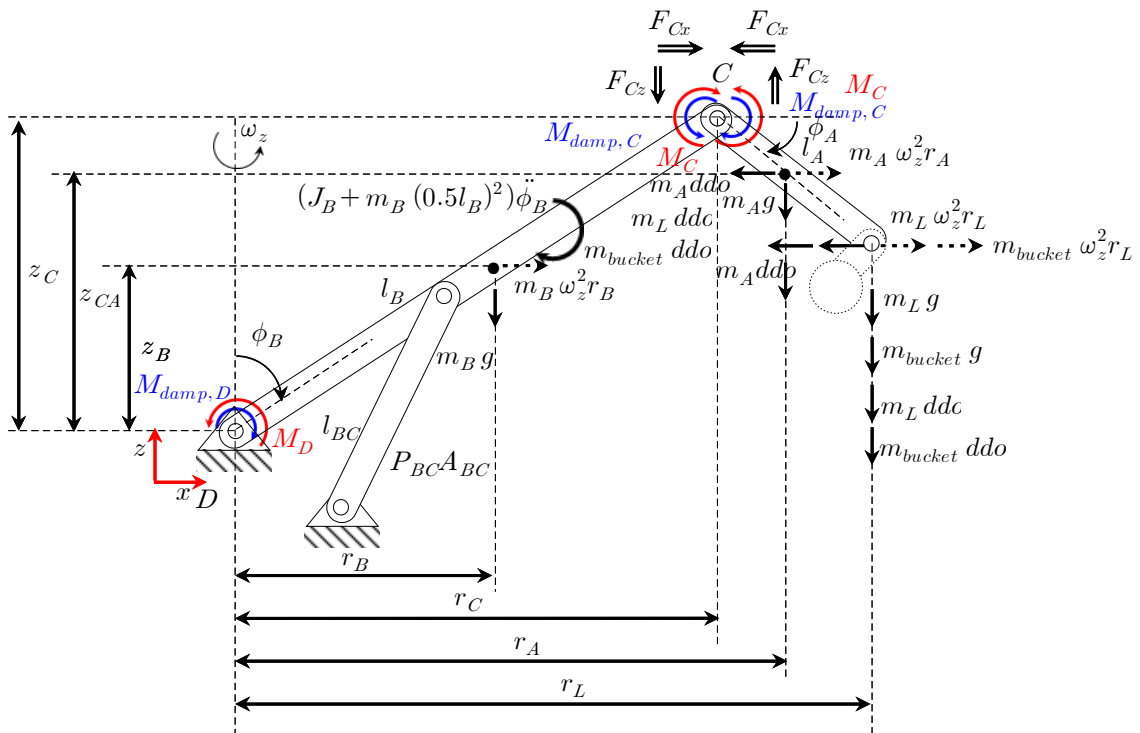


Fig. 1 Excavator working attachment: Free body diagram

는 힘은 각각 F_{LCx} , F_{LCz} 이며, 이 힘에 의해 발생하는 토크는 $F_{LCx}r_C$, $F_{LCz}z_C$ 와 같다.

마찬가지 방법으로 Joint C에서의 토크 평형방정식은 다음과 같다. 단, bucket은 Arm에 고정되어 있다고 가정하고, 조인트 C에 암과 버킷의 무게 중심이 집중되어 있다고 가정한다.

$$F_{LCx}z_C + F_{LCz}r_C - m_L(gr_C + z_{Lr_C} - \ddot{x}_{Lz_C} + \omega_{Lz_C}^2 z_C) - m_A(gr_C + z_{Ar_C} - \ddot{x}_{Az_C} + \omega_{Az_C}^2 z_C) - m_{bucket}(gr_C + z_{Lr_C} - \ddot{x}_{Lz_C} + \omega_{Lz_C}^2 z_C) = 0 \quad (2)$$

식(2)를 식(1)에 대입하고, payload에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$m_L = \frac{M_D - M_{Damp,D} - M_C + M_{Damp,C} - m_{B}gr_B - m_Agr_C - m_{bucket}gr_C}{gr_C + z_{Lr_C} - \ddot{x}_{Lz_C} + \omega_{Lz_C}^2 z_C} - \frac{m_A(z_{Ar_C} - \ddot{x}_{Az_C}) + m_{bucket}(z_{Lr_C} - \ddot{x}_{Lz_C}) + (J_B^S + m_B(0.5l_B)^2)\ddot{\phi}_B}{gr_C + z_{Lr_C} - \ddot{x}_{Lz_C} + \omega_{Lz_C}^2 z_C} - \frac{m_B\omega_{Lz_C}^2 z_B + m_A\omega_{Az_C}^2 z_C + m_{bucket}\omega_{Lz_C}^2 z_C}{gr_C + z_{Lr_C} - \ddot{x}_{Lz_C}} \quad (3)$$

3. 시스템 파라미터 식별

식(3)과 같이 정리된 부하 값을 계산하기 위해서는 굴착 부하를 제외한 굴착기 시스템의 파라미터를 식별할 필요가 있다.⁴⁾ 암 링크와 붐 링크의 각변위, 스윙 모터의 각변위, 붐 실린더의 차압 만을 알 수 있다는 가정 하에 각 파라미터는 다음과 같이 구한다.⁵⁻⁷⁾

· 가상의 질량 m_{im}

다음 그림과 같은 굴착기의 자유 물체도에 대하여 arm의 회전각 ϕ_A 가 ϕ_{A1} 과 ϕ_{A2} 일 때, Joint D에서의

모멘트 관계식은 다음과 같다. 단, m_{im} 은 payload가 0일 때, $m_A + m_{bucket} \doteq m_{im}$ 를 만족하는 가상의 질량이다.

$$m_{im} = \frac{2(F_S \cos \phi_{BC} l_{B1} \sin \phi_B - F_S \sin \phi_{BC} l_{B1} \cos \phi_B)_{\phi_A = \phi_{A1}}}{(l_A \cos \phi_{A1} - l_A \cos \phi_{A2})g} - \frac{2(F_S \cos \phi_{BC} l_{B1} \sin \phi_B - F_S \sin \phi_{BC} l_{B1} \cos \phi_B)_{\phi_A = \phi_{A2}}}{(l_A \cos \phi_{A1} - l_A \cos \phi_{A2})g} \quad (4)$$

· 조인트 C에서의 감쇄항 $d_A \dot{\phi}_{A12}$, $M_{Damp,C}$

arm 회전각 ϕ_A 가 ϕ_{A1} 일 때 측정된 boom 실린더의 추력과 arm 회전각 ϕ_A 가 ϕ_{A1} 에서 ϕ_{A2} 으로 등속도로 움직일 때 중간 지점인 ϕ_{A12} 지점에서 측정된 boom 실린더의 추력 사이의 차이로부터 감쇄에 의한 토크항을 계산하면 다음과 같다.

$$M_{Damp,C} = \frac{1}{2} l_A m_{im} g (\cos \phi_{A1} - \cos \phi_{A12}) + (F_D \cos \phi_{BC} l_{B1} \sin \phi_B - F_D \sin \phi_{BC} l_{B1} \cos \phi_B)_{\phi_A = \phi_{A2}} - (F_D \cos \phi_{BC} l_{B1} \sin \phi_B - F_D \sin \phi_{BC} l_{B1} \cos \phi_B)_{\phi_A = \phi_{A1}} \quad (5)$$

$$d_A = \frac{1}{\dot{\phi}_{A12}} \left(\frac{1}{2} l_A m_{im} g (\cos \phi_{A1} - \cos \phi_{A12}) + (F_D \cos \phi_{BC} l_{B1} \sin \phi_B - F_D \sin \phi_{BC} l_{B1} \cos \phi_B)_{\phi_A = \phi_{A2}} - (F_D \cos \phi_{BC} l_{B1} \sin \phi_B - F_D \sin \phi_{BC} l_{B1} \cos \phi_B)_{\phi_A = \phi_{A1}} \right) \quad (6)$$

· 가상 질량의 관성모멘트 $m_{im}(z_{Ar_C} - \ddot{x}_{Az_C})$

링크 질량을 튜닝하는 과정에서 구한 m_{im} 을 통해 구할 수 있으나, 실험을 통해 관성모멘트 값을 취득한다. 이는 취득된 데이터와 계산으로부터 구한 데이터 사이의 오차의 확인 및 결과값 보정에 활용한다.

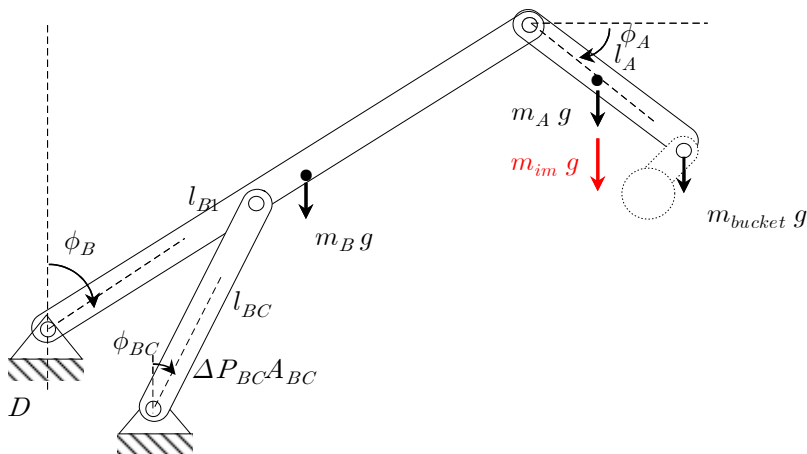


Fig. 2 Excavator working attachment: Free body diagram for identification

· boom 링크의 질량 m_B

arm 회전각 ϕ_A 가 ϕ_{A1} 일 때 측정된 boom 실린더 추력에 의해 발생한 토크에서 m_{im} 에 의해 발생한 토크를 제한 값으로부터 boom 링크의 질량 m_B 를 계산한다.

$$m_B = \frac{2}{l_B \sin \phi_B g} (P_{BC} A_{BC} \cos \phi_{BC} l_{B1} \sin \phi_B - P_{BC} A_{BC} \sin \phi_{BC} l_{B1} \cos \phi_B - \left(\frac{1}{2} l_A \cos \phi_A + l_B \sin \phi_B \right) m_{im} g) \quad (7)$$

· 조인트 D에서의 감쇄항 $d_B \dot{\phi}_{B12}$, $M_{Damp,D}$

arm 회전각 ϕ_A 가 고정이고, boom 회전각 ϕ_B 가 ϕ_{B1} 에서 ϕ_{B2} 으로 등속도로 움직일 때 중간 지점인 ϕ_{B12} 지점에서 측정된 boom 실린더의 토크로부터 감쇄에 의한 토크항을 계산하면 다음과 같다.

$$M_{Damp,D} = P_{BC1} A_{BC} \cos \phi_{BC1} l_{B1} \sin \phi_{B12} - P_{BC1} A_{BC} \sin \phi_{BC1} l_{B1} \cos \phi_{B12} - \left(\frac{1}{2} l_A \cos \phi_A + l_B \sin \phi_{B12} \right) m_{im} g - \frac{1}{2} l_B \sin \phi_{B12} m_B g \quad (8)$$

$$d_B = \frac{P_{BC1} A_{BC} l_{B1}}{\dot{\phi}_{B12}} (\cos \phi_{BC1} \sin \phi_{B12} - \sin \phi_{BC1} \cos \phi_{B12}) - \left(\frac{1}{2} l_A \cos \phi_A + l_B \sin \phi_{B12} \right) \frac{m_{im} g}{\dot{\phi}_{B12}} - \frac{l_B \sin \phi_{B12} m_B g}{2 \dot{\phi}_{B12}} \quad (9)$$

· boom 링크 관성모멘트 $I_z \ddot{\phi}_{B13}$

arm 회전각 ϕ_A 가 고정이고, boom 회전각 ϕ_B 가 ϕ_{B1} 에서 ϕ_{B2} 으로 등가속도로 움직일 때 중간 지점인 ϕ_{B13} 지점에서 측정된 boom 실린더의 토크로부터 관성모멘트에 의한 토크항을 계산하면 다음과 같다.

$$I_z = \frac{P_{BC3} A_{BC} l_{B1}}{\ddot{\phi}_{B13}} (\cos \phi_{BC3} \sin \phi_{B13} - \sin \phi_{BC3} \cos \phi_{B13}) - \left(\frac{1}{2} l_A \cos \phi_A + l_B \sin \phi_{B13} \right) \frac{m_{im} g}{\ddot{\phi}_{B13}} - \frac{l_B \sin \phi_{B13} m_B g}{2 \ddot{\phi}_{B13}} - \frac{d_B \dot{\phi}_{B13}}{\ddot{\phi}_{B13}} \quad (10)$$

4. 시뮬레이션 및 실험

Fig. 3은 버킷(1.07m³)의 굴착 토사량 측정을 위한 실험 대상(U25, 현대두산인프라코어)을 나타낸 사진이다. 부하 측정 작업을 하기 전 식별을 위한 모션을 수행하였으며, 이를 통해 내부 파라미터를 식별하였다. 굴착기의 작업은 트랜치를 가정하였으며, 버킷을

통해 굴착된 토사는 스윙 동작 및 하적 동작을 수행한다. 하적 동작을 통해 굴착된 토사는 작업량 측정 박스(2010mm×1624mm×950mm, 333kg)에 싣게 되며, 추정된 payload 값과의 비교를 위해 산업용 저울(CAS CASTON-II, 5THB)을 통해 그 무게를 측정한다. Table 1은 굴착 토사량의 무게를 측정하기 위한 절차를 나타낸 것이다.



Fig. 3 Weighing test with Hydraulic Excavator

Table 1 Payload estimation process in weighing system

Process		Related Parameter
Identification	Uniform motion(Arm)	m_{im}, d_A
	Uniformly accelerated motion(Arm)	$m_{im} (\ddot{z}_A r_C - \ddot{x}_A z_C)$
	Uniform motion(Boom)	M_B, d_B
	Uniformly accelerated motion(Boom)	I_z
Excavation	Digging, swing and dumping	-
	Measurement(payload)	M_L (true value)
Estimation	Calculation(payload)	M_L
	Comparison(payload)	error

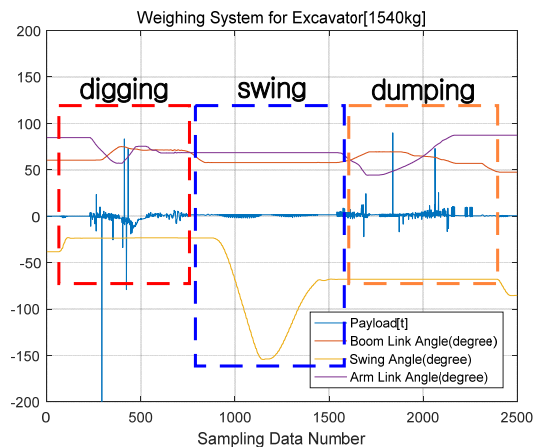


Fig. 4 Payload estimation

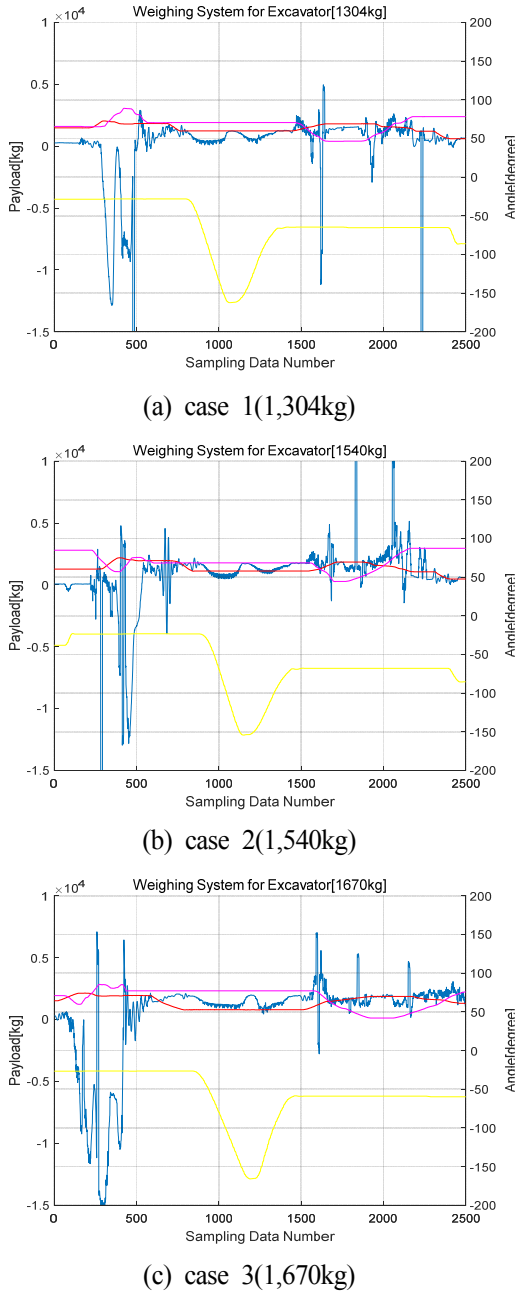


Fig. 5 Payload estimation result(graph)

Table 2 System parameters for payload estimation

Parameter	Value
Boom cylinder cross sectional area (head, cm ²)	132.73
Boom cylinder cross sectional area (rod, cm ²)	63.62
Arm link length(mm)	3,011
Link length from joint D to boom cylinder joint(mm)	2,621
Boom link length(mm)	5,900
Link length from joint C to arm's center of gravity(mm)	1,505.5
Link length from joint C to boom's center of gravity(mm)	2,950

Table 3 Payload estimation results(value)

		Measurement		
		1	2	3
Measured value[ton]		1.304	1.540	1.670
Estimated value[ton]	dig,dump	1.207	1.608	1.767
	swing	0.986	1.254	1.389
error[%]	dig,dump	-7.4	4.4	5.6
	swing	-24.4	-18.6	-16.8

Fig. 4는 1,540kg의 토사를 굴착, 이송 및 하적 작업 시 붐, 암 링크의 각변위와 스윙 모터 각변위, 계산된 payload를 나타낸 그래프이다. 굴착 시 지표와 버킷 사이의 접촉이 일어나며, 이 경우 버킷은 항상 공기 중에 있다는 부하 추정법의 가정을 만족하지 않기 때문에 payload가 음(-)의 값을 가진다.

Fig. 5는 Table 2와 같이 주어진 굴착기의 링크, 실린더 파라미터들로부터 각각 1,304kg, 1,540kg, 1,670kg의 토사를 굴착, 이송 및 하적 작업 시 붐, 암 링크의 각변위와 스윙 모터 각변위, 계산된 payload를 나타낸 그래프이다.

Fig. 5에서 굴착 시에는 가정을 만족하지 않기 때문에 제대로 된 payload를 예측할 수 없으나, 굴착이 종료되고 이송을 위한 선회 동작을 수행하거나 하적을 하는 동안 payload가 지속적으로 추정되고 있으며, 그 값은 Table 3과 같이 dig 및 dump 동작 시 10% 이내의 오차를 가지며, swing 시 -25% 오차를 가진다. swing 동작에서 큰 오차를 가지는 이유는 변위센서의 오차가 관성항을 계산하면서 크게 반영되어 데이터 평균 시 payload의 계산값을 감소시키기 때문이다. Table 3에서 Measured value는 전자 저울에 의해 측정된 굴착 토사량의 무게이며, Estimated value는 제안하는 방법에 의해 계산된 값이다. 오차가 발생하는 이유는 집중 하중 시스템으로 가정한 암 링크와 버킷 링크에서의 시스템 식별 오차에 의한 영향으로 판단되며, 링크 각도에 따른 오차 보정이 필요한 것으로 판단된다.

5. 결론

굴착기의 payload를 실시간으로 측정하는 것은 작업자의 생산성을 실시간으로 측정할 수 있는 장점이외에도 자동화 건설기계 간의 협업 시 굴착 작업 종료 시점을 계산하는데 필수적으로 사용되는 기술이다. 본 연구의 목적은 최소한의 센서를 사용함에

따라 복잡하게 표현되는 부하 측정 알고리즘의 타당성을 실험을 통해 확인하는 것이며, 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

상용화를 위해 최소한의 센서(각변위(선회 동작, 붐 조인트, 암 조인트), 압력(붐 실린더))를 적용한 부하 측정 시스템의 관계식을 유도하였다.

1,304kg, 1,540kg, 1,670kg의 토사에 대하여 전자저울의 계측값과 제안하는 방법에 의해 예측된 Payload 값을 비교하였으며, dig 및 dump 동작 시 10% 이내의 오차, swing 동작 시 25%의 오차를 가지고 있다.

실험을 통해 제안하는 방법이 최소한의 센서를 사용한 굴착기에서 굴착 작업 시 버킷 내 토사량을 예측할 수 있음을 확인하였다.

예측한 Payload값과 실측값 사이의 오차가 발생한 이유는 파라미터 식별 시 arm link와 bucket link를 집중질량계로 가정함에 따라 생긴 관성에 의한 오차와 원심력에 의한 오차이다.

향후 부하 측정 시 발생하는 오차를 보상할 수 있는 방법을 제안하고, 실험을 통해 제안하는 방법의 타당성을 확인할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 "기계산업핵심기술개발사업"의 지원을 받아 수행된 연구결과임. (20010776)

이해관계(CONFLICT OF INTEREST)

저자는 이 논문과 관련하여 이해관계 충돌의 여지가 없음을 명시합니다.

References

- 1) A. Walawalkar et al., "A Method for Payload Estimation in Excavator", Proc. of the 4th Commercial Vehicle Symposium, 2016.
- 2) A. Gawlik and P. Kucybala, "Dynamic Weighing System used in Excavator", Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol.24, No.4, pp.31-38, 2017.
- 3) A. R. Rasuli, "Dynamic Modeling, Parameter Identification, Payload Estimation, and Non-contact Arm Geometry Sensing of Cable Shovels", Ph.D Thesis, The University of British Columbia, Canada, pp.13-32, 2012.
- 4) W. Khalil et al., "Identification of the Payload Inertial Parameters of Industrial Manipulators", 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.4943-4948, 2007.
- 5) W. Khalil and E. Bennis, Comments on "Direct Calculation of Minimum Set of Inertial Parameters of Serial Robots", IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.10, No.1, pp.78-79, 1994.
- 6) H. H. Jeong et al., "A Method of Hydraulic Excavator's Payload Estimation by Bucket's Motion Equation", 2021 Autumn Conference on Drive and Control, pp.77-81, 2021.
- 7) J. T. Kim et al., "Control Strategy and Verification of Dual-Arm Manipulator for Disaster-Responding Special Purpose Machinery", Journal of Drive and Control, Vol.17, No.4, pp.31-37, 2020.