

굴삭기 상부작업체에서 틈새에 의한 버킷의 거동 편차에 대한 연구 A Study on the Deviation of Bucket Behavior Considering the Effect of Clearance in the Excavator

신대영^{1*} · 강태곤²

Dae Young Shin^{1*} and Tae Gon Kang²

Received: 07 Oct. 2019, Accepted: 24 Oct. 2019

Key Words : Excavator(굴삭기), Rigid Dynamic Analysis(강체동역학해석), Revolute Joint(회전대우), Clearance(틈새), Bucket Motion(버킷의 거동)

Abstract: Bucket trajectory is crucial regarding precision work with an excavator. In general, the bucket trajectory deviation is determined by the machining deviation of the frame, driving deviation of the driving hydraulic cylinder, clearance in the joints, and deformation of the structure. This paper investigated the relationship between the respective clearance in joints and the trajectory deviation of the bucket at the finishing work of the ditching for a 20-ton excavator. As a result, the larger the clearance, the larger deviation is increased at trajectory. However, it was found that the deviation of the rotation angle and displacement of the bucket was limited and the size of clearance does not affect closely on the contact angle of the pin shaft.

기호 설명

- L_i : Length between Two holes at the i^{th} cylinder
- D_{Ri} : Rod diameter at the i^{th} cylinder
- D_{Ti} : Tube diameter at the i^{th} cylinder
- d_{1i}, d_{2i} : Hole diameter at the i^{th} cylinder
- α_i : Contact angle of Pin Shaft at the i^{th} cylinder
- C_i : Clearance at the i^{th} cylinder
- X_{BKT} : X-direction position of Bucket Tip
- Y_{BKT} : Y-direction position of Bucket Tip
- α_{BKT} : Angle of Bucket edge

1. 서론

굴삭기는 도랑(Ditch) 공사, 트렌치(Trench) 공사, 파이프(Pipe) 공사, 터파기 공사, 경사지(Slope cutting) 공사, 정지(Grading) 공사, 암반 파괴 등 다양한 작업이 가능한 건설기계이다. 건설 또는 건축시공 현장은 작업 생산성 향상과 정밀시공 그리고 비숙련자 또는 교통약자의 조작편의성을 요구하고 있다. 2010년에 이르러 ICT기술을 이용한 자동화 건설기계가 지속적으로 개발되고 있다.

Fig. 1과 같이 굴삭기는 하부주행체와 운전실과 상부작업체로 구성된다. 하부주행체는 주행하고 상부작업체는 다양한 굴삭작업을 수행하게 된다.

* Corresponding author: dyshin@kitech.re.kr
 1 Korea Institute of Industrial Technology, 113-58, Seohaean-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do 15014, Korea
 2 Haneol Solution Co., Ltd., 201, Songpa-daero, Songpa-gu, Seoul 05854, Korea
 Copyright © 2019, 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.

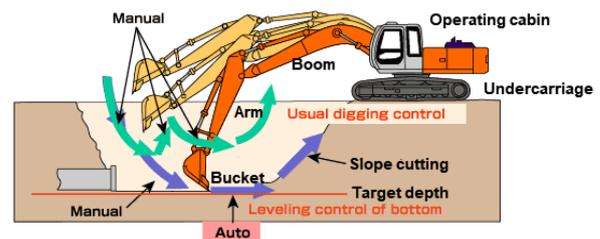


Fig. 1 Ditching of Excavator(Hitachi)

일반적으로 유압구동방식의 굴삭기에서 상부작업체는 구조물과 구조물을 구동하는 유압실린더로 나뉘며 이들 유압실린더와 구조물은 서로 핀으로 연결된다. 유압실린더와 구조물은 서로 상대 회전운동을 하게 되는데 원활한 상대 회전운동을 위하여 각각의 연결부에는 틈새(Clearance)를 적절하게 부여한다.

Fig. 1은 유압실린더에 의하여 버킷이 작업하는 과정을 나타내고 있다. 정밀 파이프공사에서 굴삭깊이(Target depth)과 경사작업각(Slope cutting angle)등이 중요한 항목이다. 실제 굴삭기가 이들 주요항목은 다양한 원인에 의하여 편차가 발생된다. 예를 들면 프레임의 가공편차와 구동 실린더의 구동편차와 조인트부의 틈새 그리고 구조물의 변형 등이 있다.

Dubowsky¹⁾는 Scotch-Yoke 메커니즘에서 구조물의 탄성변형과 틈새를 고려한 회전대우의 상호작용을 실험적으로 규명하였으며, Paulo Flores²⁾은 슬라이더 크랭크 메커니즘에서 회전대우에서 틈새의 영향을 다물체해석을 통하여 동적거동을 연구한 바 있으며, Selçuk Erkaya³⁾은 보행기에 사용되는 Jansen의 메커니즘에서 회전대우에서 틈새의 영향을 적응형 네트워크 기반 퍼지 추론시스템(Adaptive network-based fuzzy inference system)을 이용하여 궤적 최적화를 수행한 바 있으며, Z.F. Bai,⁴⁾는 4절기구의 회전대우 내에서 마모에 의한 틈새의 확대를 제시한 후에 마모에 따른 성능변화를 규명한 바 있다. 종래의 유사한 논문은 단순한 메커니즘을 해석적 또는 실험적으로 규명하였으나 굴삭기와 같은 산업기계에서 실제 발생하는, 예를들면 끼워맞춤에 의한 굴삭기 경로특성 변화와 같이 보다 실질적인 연구를 제시하지 못하였다.

Takashi YAMAGUCHI⁵⁾는 굴삭기를 대상으로 굴착 및 적재 작업을 위한 자율 제어 기술을 실험을 통하여 제시하였으며, 김현식⁶⁾은 굴삭기의 버킷 끝단 위치제어를 발표하며 있으며, Rashi Tiwari⁷⁾은 Arial Performance Analysis System (APAS)을 이용하여 굴삭기 궤적을 분석하고 작업별 분류를 하였다. 지금까지도 수치해석 또는 최적화 알고리즘을 이용하여 굴삭기의 이상적인 경로를 구현하기 위하여 다양한 논문들⁸⁾⁻¹³⁾이 발표되고 있다. 하지만 실제 굴삭기에서는 가공편차, 틈새, 탄성변형, 구동편차 등에 의하여 최종 굴삭기 경로의 편차가 필연적으로 발생된다. 본 논문은 20톤 굴삭기를 대상으로 도랑공사의 마무리 작업의 궤적에서 조인트부의 틈새가 버킷의 궤적 편차에 미치는 영향을 연구하였다.

틈새는 연결부(회전대우, Revolute joint)의 끼워맞춤(Fitting)을 H7g6로 정의한 후에 틈새를 최대, 중간,

최소인 경우 3가지로 구분하였다. 해석 방법에서 연결부는 접촉(Contact)모델링을 하였고 붐, 암, 버킷 그리고 링크류는 강체동역학 모델링을 하였다.

연구 결과 틈새의 크기가 클수록 버킷의 변위와 각도 그리고 Pin Shaft의 회전각이 증가하지만 버킷의 회전각과 버킷의 변위에 미치는 영향이 제한적이라는 사실이 확인되었다.

2. 굴삭기 상부작업체의 모델링

Fig. 2와 같이 굴삭기 상부작업체의 구조물로는 붐(Boom), 암(Arm), 버킷(Bucket), 컨트롤로드(Control rod), 컨트롤링크(Control link)로 구성되며 구조물을 구동하는 유압실린더로는 붐을 작동시키는 붐 실린더(Boom cylinder), 암을 작동시키는 암실린더(Arm cylinder), 버킷을 작동시키는 버킷실린더(Bucket cylinder)가 있다.

구조물과 유압실린더는 상대 회전운동을 하므로 연결부는 회전대우(Revolute joint)로 설정하였고 회전대우에 존재하는 틈새를 구현하기 위해 접촉모델을 생성하여 적용하였다.

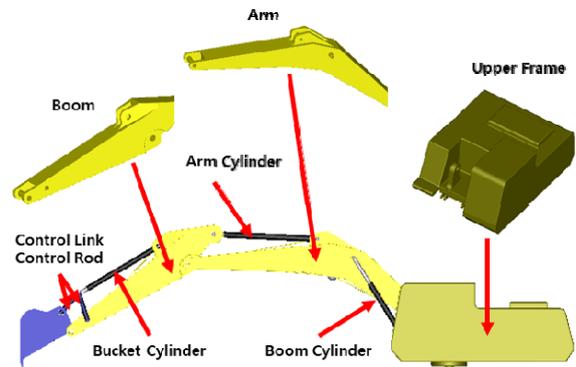


Fig. 2 Excavator System

굴삭기 작업조건은 도랑공사의 마무리 작업으로 설정하였으며 버킷 끝단의 경로 설계는 Fig. 3과 같이 도랑의 깊이는 1,000 mm, 도랑의 폭은 5,100 mm, 도랑의 경사각은 수직이고 버킷 끝단의 경사각(Ang_{Bkt})은 항상 지면과 밀착하도록 하였다.

예를 들면 정지작업(Leveling)은 Point 1-2 구간, Point 4-8 구간 그리고 Point 10-11 구간에서 이루어지면 경사작업은 Point 3-4 구간과 Point 8-9 구간에서 이루어진다. 버킷 끝단의 경사각(Ang_{Bkt})을 보면 정지작업에서는 0°, 하향 경사작업(Vertical downward slope cutting)에서는 90°, 상향 경사작업(Vertical upward slope cutting)에서는 -90°로 설정하였다.

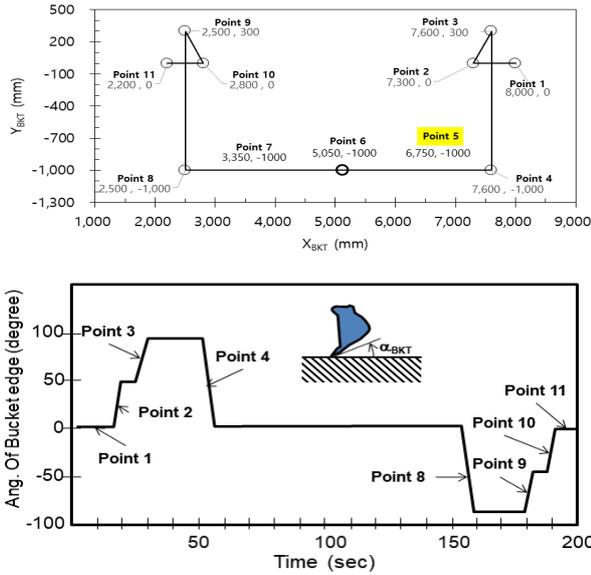


Fig. 3 Desired Trajectory

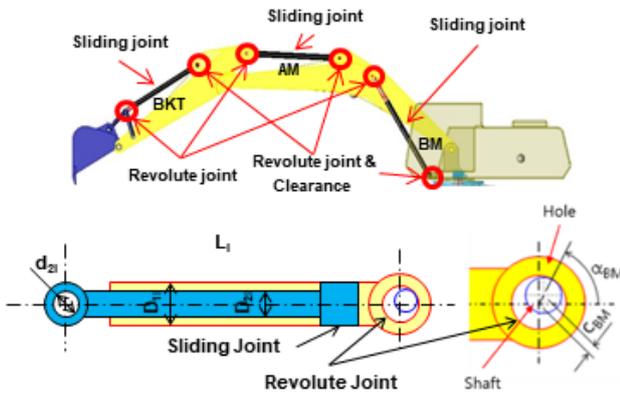


Fig. 4 Joints and Clearances in Excavator

구조물과 유압실린더 사이의 연결은 Fig. 4와 같이 모델링하였다.

유압실린더는 병진대우(Sliding joint)와 회전대우 (Revolute joint)로 연결되는데 튜브와 로드 상대운동은 병진대우로 연결하였고 Hole과 Pin Shaft 사이의 회전운동은 회전대우로 연결하였다. 또한 회전대우 내에 틈새(Clearance)를 고려하기 위해 Hole과 Pin Shaft 부분을 모델링하고 접촉 모델로 설정하였다. D_{1i} 은 Tube 직경, D_{2i} 는 Rod 직경을 의미하고 d_{1i} 또는 d_{2i} 는 Hole 직경을 C_i 은 틈새 α_i 은 Hole과 Pin Shaft가 이루는 각도를 의미한다. 여기에서 $i = \{BM, AM, BKT\}$ 이다.

붐, 암, 버킷 유압 실린더의 Hole과 Shaft 직경은 80mm 그리고 끼워맞춤(Fitting)인 H7g6로 설계하였을 때 틈새는 최대 59 μm 이다. Table 1 참조. 본 논문에서는 틈새의 영향을 세밀히 보기위하여 틈새가 최대, 중간, 최소인 경우 3가지에 대하여 모델링 하였다.

Table 1 Clearance of Joint

	Clearance Class	Hole	Shaft	Clearance
		H7 [μm]	g6 [μm]	H7g6 [μm]
BOOM (BM)	Min	0	-10	10
	Mid	15	-14.5	29.5
	Max	30	-29	59
ARM (AM)	Min	0	-10	10
	Mid	15	-14.5	29.5
	Max	30	-29	59
BUCKET (BKT)	Min	0	-10	10
	Mid	15	-14.5	29.5
	Max	30	-29	59

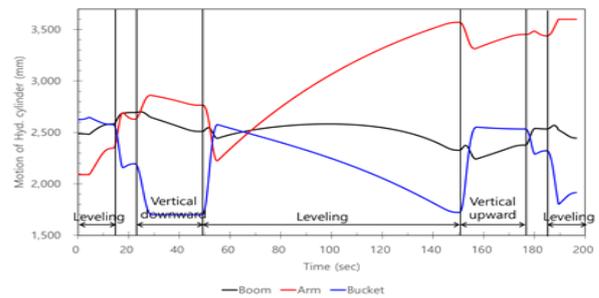


Fig. 5 Motion of Cylinders

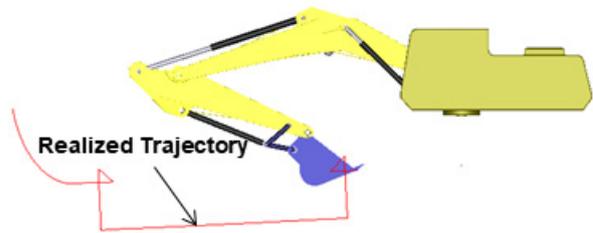


Fig. 6 Realized Bucket Motion

3. 해 석

3.1 상부작업체의 경로구현

도랑작업의 경로를 구현하기 위하여 역기구 (Inverse kinematic)설계를 이용하였다. Fig. 3에 나타난 버킷 끝단의 경로를 구현하기 위한 실린더의 거동을 해석하면 Fig. 5와 같다.

버킷 끝단의 경로를 세밀히 살펴보면 정지작업의 Point 1-2 구간에서는 붐 상향과 암 크라우드(Crowd)가 이루어지며, 하향 경사작업의 Point 3-4 구간에서는 붐 하향과 암 덤프(Dump)가 이루어지며, 정지작업의 Point 4-8 구간에서는 암 크라우드와 버킷 덤프가 이루어지며, 상향 경사작업의 Point 8-9 구간에서는 붐 상향과 암 크라우드가 이루어진다. 여기에서 붐 동작은 하향과 상향으로 구성되며 붐실린더의 길

이가 증가하면 붐 상향이고 길이가 감소하면 붐 하향이다. 암과 버켓의 동작은 크라우드와 덤프로 구성되면 해당 실린더의 길이가 증가하면 크라우드이고 길이가 감소하면 덤프이다.

Fig. 3의 계획 경로(Desired trajectory)가 충실히 구현되었는지 검증하기 위하여 상부작업체를 기구해석하였다. Fig. 6과 같이 실린더 구동에 따른 버켓의 움직임(X_{BKT} , Y_{BKT} , α_{BKT})을 살펴보면 구현 경로(Realized trajectory)는 계획 경로를 충실히 추종하고 있다.

3.2 틈새를 고려할 때에 핀의 움직임

틈새를 고려한 상부작업체에 Fig. 5의 유압실린더의 거동을 적용하여 동력학해석을 수행하였다. 단지 무부하 상태에서 자중만을 고려할 때에 회전대우 내에서 핀의 움직임 즉 Pin Shaft의 접촉각도(α_i)은 Fig. 7과 같다.

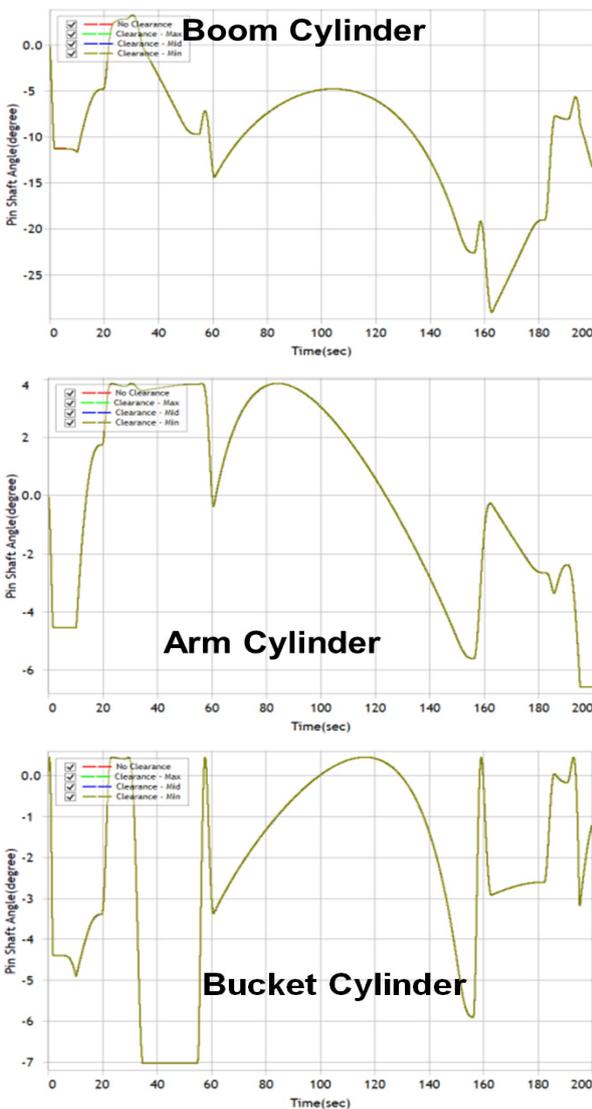


Fig. 7 Pin Shaft Angle in Boom, Arm and Bucket Cylinder

Table 2 Comparison of Pin Shaft Motion with Clearance

	Clearance Class	α_i , ($i=1,2,3$) (degree)	$\Delta\alpha_i$, ($i=1,2,3$) (degree)
BOOM Cyl. (α_1)	No	-4.884	0.000
	Min	-4.886	-0.002
	Mid	-4.888	-0.004
	Max	-4.892	-0.008
ARM Cyl. (α_2)	No	3.054	0.000
	Min	3.054	-0.000
	Mid	3.053	-0.001
	Max	3.053	-0.001
BUCKET Cyl. (α_3)	No	-1.606	0.000
	Min	-1.610	-0.004
	Mid	-1.617	-0.011
	Max	-1.627	-0.021

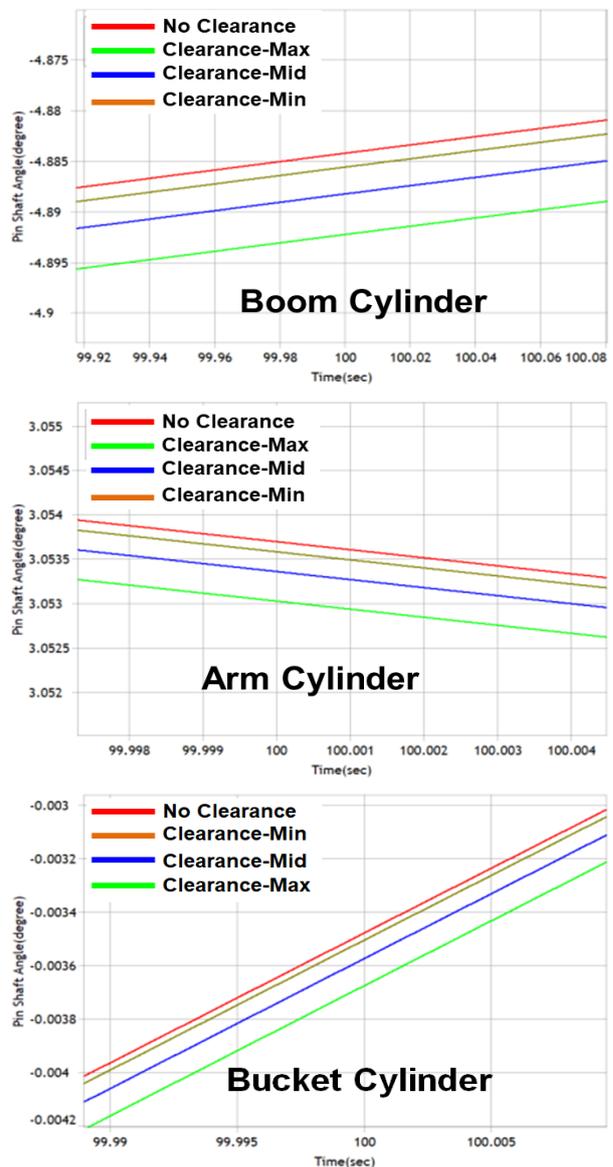


Fig. 8 Difference of Pin Shaft Angle

버킷이 정지작업→하향 경사작업→정지작업→상향 경사작업이 진행되는 동안에 상부작업체의 자세에 따라 지속적으로 변하고 있으나 틈새의 영향을 확인하기 어려웠다.

틈새의 영향을 면밀히 살펴보기 위하여 10초 부분의 틈새의 유무와 크기에 따라 Pin Shaft의 접촉각도의 변화를 확인하였다.

Fig. 8과 Table 2를 보면 틈새가 증가할수록 Pin Shaft의 각도(α_i)가 증가하는 경향이 나타났으나 차이는 무시할 정도로 미미하였다.

따라서 Fig. 3과 같은 궤적에서는 동력학 해석으로 임의 틈새에서 Pin Shaft의 접촉각도를 해석한 후에 다른 틈새에서는 Pin Shaft의 접촉각도를 그대로 이용하면 기구해석으로 손쉽게 상부작업체의 움직임을 해석할 수 있다.

3.3 틈새를 고려할 때에 버킷의 움직임

틈새를 고려할 때에 버킷 끝단의 움직임(X_{BKT} , Y_{BKT} , α_{BKT})을 살펴보았다.

Fig. 9를 보면 버킷 끝단 변위(X_{BKT} , Y_{BKT})는 틈새의 유무 또는 크기에 관계없이 매우 유사한 궤적을 그리고 있다. Fig. 11에서 틈새의 영향을 면밀히 살펴보기 위하여 x축 변위 -4.84mm 위치의 Y축 변위를 확인하였다.

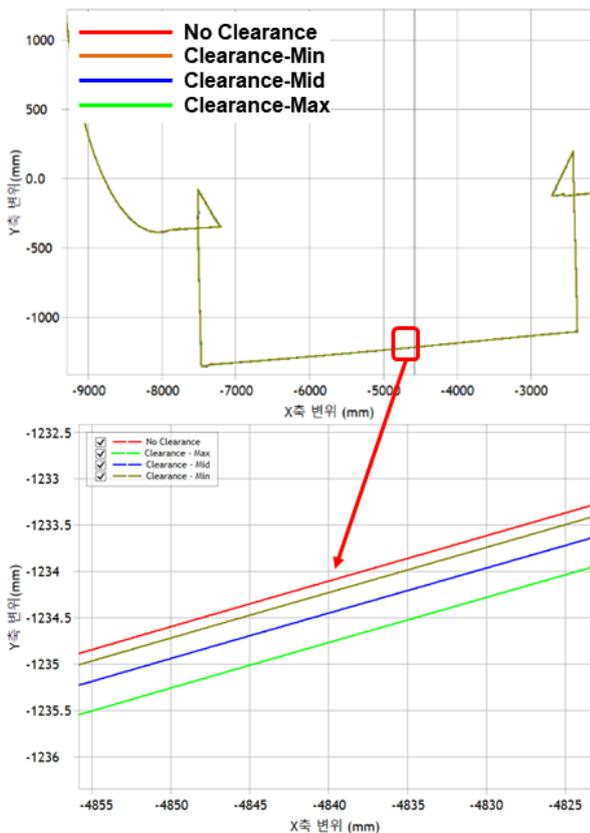


Fig. 9 Motion of Bucket Tip with Clearance

Fig. 9와 Table 3을 보면 틈새크기가 증가할수록 Y축 편차(ΔY_{BKT})가 - 방향으로 커지는 경향이 나타났으나 최대 편차가 0.63mm 정도로 틈새의 영향이 무시할 정도로 미미하였다.

Table 3 Comparison of Bucket Tip Motion with Clearance

Clearance Class	Y_{BKT} (mm)	ΔY_{BKT} (mm)
No	-1233.62	0
Min	-1233.75	-0.13
Mid	-1233.96	-0.34
Max	-1234.25	-0.63

Fig. 10를 보면 버킷 날(Bucket edge)의 회전각도(α_{BKT}) 또는 틈새의 유무 또는 크기에 관계없이 매우 유사한 궤적을 그리고 있다. 틈새의 영향을 면밀히 살펴보기 위하여 x변위 -7,000mm에서 -3,000mm 구



Fig. 10 Motion of Bucket edge with Clearance

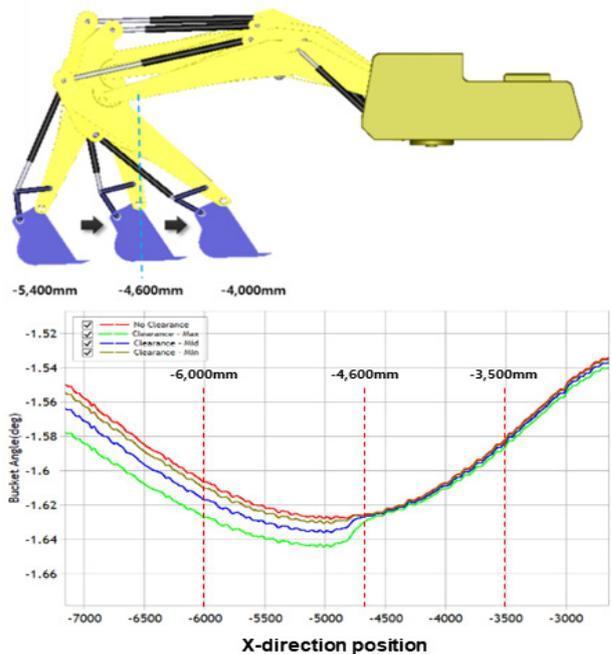


Fig. 11 Orientation of Bucket and Arm

Table 4 Angle of Bucket edge angle and Difference

Clearance Class	α_{BKT} (degree)		$\Delta\alpha_{BKT}$ (degree)	
	-6,000mm	-3,500mm	-6,000mm	-3,500mm
No	-1.606	-1.581	0	0
Min	-1.610	-1.582	-0.004	-0.001
Mid	-1.617	-1.583	-0.011	-0.002
Max	-1.627	-1.585	-0.021	-0.004

간을 비교 시 x변위 -4,600mm를 경계로 버켓, 암의 자세의 차이의 의해 버켓 날의 회전각 편차($\Delta\alpha_{BKT}$)가 감소함을 알 수 있다. Table 4와 같이 x축 변위 -6,000mm, -3,500mm에 대한 틈새크기에 따라 $\Delta\alpha_{BKT}$ 를 살펴보면 최대 편차가 0.02° 정도로 틈새의 영향이 무시할 정도로 미미하였다.

5. 결 론

굴삭기는 다양한 작업이 가능하며 특히 정지 공사, 경사지 공사, 파이프 공사, 터파기 공사, 도랑 공사 등이 대표적이다. 본 연구에서는 도랑 공사할 때에 붐, 암, 버켓 실린더의 연결부(회전대우, Revolute joint)에 있는 틈새가 버켓의 거동에 미치는 영향을 연구하였다.

연결부의 끼워맞춤(Fitting)을 H7g6로 정의한 후에 틈새 크기를 최대, 중간, 최소인 경우 3가지로 구분하였다.

도랑작업에서 연결부의 틈새영향을 보면 틈새크기에 관계없이 연결부에서 Pin Shaft의 접촉각도는 거의 동일하므로 틈새크기가 Pin Shaft의 접촉각도에 미치는 영향은 무시할 수 있다.

도랑작업 즉 버켓이 정지작업→하향 경사작업→정지작업→상향 경사작업이 진행되는 동안에 틈새크기가 클수록 버켓의 변위와 각도 그리고 Pin Shaft의 회전각이 증가하는 경향을 확인하였으며, Table 2를 보면 Pin Shaft 각도의 최대편차는 $0.02^\circ (= \max\{\Delta\alpha_i, i=1,2,3\})$ 정도이고, Table 3을 보면 버켓 변위의 최대편차는 $0.63\text{mm} (= \max\{\Delta Y_{BKT}\})$ 이고, Table 4를 보면 버켓 날의 회전각의 최대편차는 $0.02^\circ (= \max\{\Delta\alpha_{BKT}\})$ 으로 확인되었다. 이는 틈새가 버켓의 거동에 미치는 영향은 무시할 수 있다고 확인되었다.

일반적으로 접촉과 강체동력학을 이용하여 틈새를 해석하면 시간과 비용이 과도하게 소요될 수 있다. 본 연구에서 틈새크기가 Pin Shaft의 접촉각도에 미

치는 영향은 무시할 수 있다고 확인되었으므로 임의 작업경로에서 임의 틈새에서 Pin Shaft의 접촉각도를 해석하면, 다른 틈새에서는 Pin Shaft의 접촉각도를 그대로 이용하더라도 기구해석으로 손쉽게 정밀하게 상부작업체의 움직임을 해석할 수 있다.

후 기

본 논문은 기계산업핵심기술개발사업의 “에너지 15% 절감 굴삭기용 HILS 기반 전자유압 제어기술 개발(과제번호: 10063469)”로 수행되었음을 밝힙니다.

References

- 1) S. Erkaya, "Trajectory optimization of a walking mechanism having revolute joints with clearance using ANFIS approach", *Nonlinear Dynamics*, Vol.71, No.1-2, pp.75-91, 2013.
- 2) P. Flores et al., "Numerical and experimental investigation on multibody systems with revolute clearance joints", *Nonlinear Dynamics*, Vol.65, No.4, pp.383-398, 2011.
- 3) Z. F. Bai, H. B. Zhang and Y. Sun, "Wear prediction for dry revolute joint with clearance in multibody system by integrating dynamics model and wear model", *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol.11 No.14, pp.2624-2647, 2014.
- 4) S. Dubowsky and M. F. Moening, "An experimental and analytical study of impact forces in elastic mechanical systems with clearances", *Mechanism and Machine Theory*, Vol.13, No.4, pp.451-465, 1978.
- 5) T. Yamaguchi and H. Yamamoto, "Motion Analysis of Hydraulic Excavator in Excavating and Loading Work for Autonomous Control", *Proceedings of the 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp.602-607, 2006.
- 6) K. Y. Kim, D. S. Jang and H. S. Ahn, "A Study on the Bucket Tip's Position Control for the Intelligent Excavation System", *Journal of the Korea Fluid Power Systems Society*, Vol.5, No.4, pp.31-37, 2008.
- 7) R. Tiwari, J. Knowles and G. Danko, "Bucket trajectory classification of mining excavators", *Automation in Construction*, Vol.31, pp.128-139,

- 2013.
- 8) X. Sun, H. Ye and S. Fei, "A closed-loop detection and open-loop control strategy for booms of truck-mounted concrete pump", *Automation in Construction*, Vol.31, No.5, pp.265-273, 2013.
 - 9) S. M. Moon and D. H. Hong, "Control Algorithm for Path Generation of Intelligent Excavator System", *Journal of Drive and Control*, Vol.12, No.3, pp.66-71, 2015.
 - 10) L. Curduman, C. Debeleac and S. Nastac, "Analysis of Working Body Track Vibrations of a Single Bucket Excavating Equipment During the Bank-Sloping and Differential Excavation Processes", *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound & Vibration*, 2016.
 - 11) L. Curduman, S. Nastac and C. Debeleac, "On Active Control of Transitory Regimes within the Driving System of a Single Bucket Excavating Equipment for the Bank-Sloping and Differential Excavation Processes", *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound & Vibration*, 2016.
 - 12) A. Vlădeanu and G. Vlădeanu, "The Displacement of the Excavator Bucket on the Optimum Trajectory through the Control of the Hydraulic Cylinders Lengths", *Romanian Journal of Technical Sciences – Applied Mechanics*, Vol.62, No.2, pp.105-117, 2017.
 - 13) J. B. Jeong and K. S. Kim, "A Study on Driving Algorithm and Communication Characteristics for Remote Control of Mini Excavator", *Journal of Drive and Control*, Vol.15, No.4, pp.81-90, 2018.