

자동굴삭기 시스템을 위한 궤적 추종 제어기 개발 Development of Trajectory Tracking Controller for Automatic Excavator System

임용현 · 신대영 · 황성호

Yong-Hyeon Im, Dae-Young Shin, and Sung-Ho Hwang

1. 서 론

유압 굴삭기(hydraulic excavator)는 굴삭작업, 적재작업, 파쇄작업, 정지작업 등을 행하는 건설기계이다. 유압 굴삭기는 큰 힘을 낼 수 있는 유압 시스템을 기반으로 하여 안정적인 작업 수행 능력과 높은 작업 생산성을 가지고 있다. 또한 용도에 따라 작업 장치의 변화가 가능하기 때문에 다양한 작업 현장에서 폭넓게 사용이 가능하다.¹⁾

하지만 굴삭기를 이용한 작업들은 운전자가 많은 작업장치들을 동시에 조작해야 하므로 운전자의 높은 숙련도를 요구한다. 따라서 굴삭기를 이용한 작업 수행 능력과 작업 효율은 운전자의 능력에 의해 결정된다. 하지만 운전자가 높은 숙련도를 갖추고 있더라도 장시간의 반복적인 작업을 수행할 시 피로도가 상승하여 작업능률을 떨어뜨릴 수 있다. 따라서 운전자의 작업환경 개선과 동시에 작업효율을 향상시킬 수 있는 방안으로 운전자의 조작 없이 굴삭기 스스로 작업을 수행하게 하는 굴삭기의 자동화에 대한 관심이 증대되고 있다.

굴삭기의 자동화에 대한 연구는 주로 운동방정식을 이용하여 작업장치의 궤적을 생성하고, 이를 추종할 수 있는 제어기를 설계하는 방식으로 진행되고 있다.^{2,7)} 본 연구에서는 실차 시험 데이터를 바탕으로 구축된 20톤급 유압 굴삭기의 시뮬레이션 모델을 대상으로 하여, 생성된 기준 궤적 정보와 작업 장치의 각도 데이터를 이용한 궤적 추종을 수행하는 제어 모델에 대한 내용을 다루고자 한다.

2. 대상 굴삭기 모델링

본 연구에서 제시하는 궤적 추종 제어 모델은 20톤급 유압 굴삭기의 시뮬레이션 모델을 대상으로 하여 구성했다. 굴삭기는 크게 엔진 및 펌프, 메인 컨트롤 밸브(MCV; Main Control Valve), 작업장치로 이루어져 있으며, 본 연구에 이용한 굴삭기의 시뮬레이션 모델 또한 이에 맞춰 구축되었다.

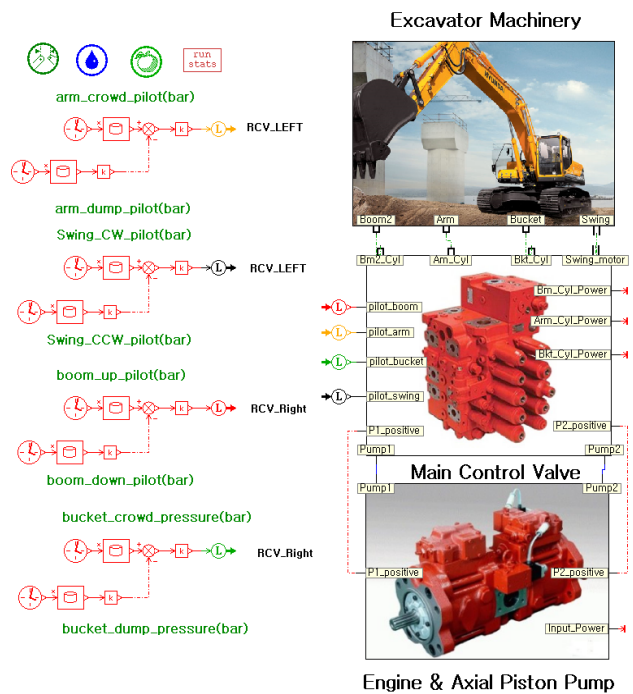


Fig. 1 Configuration of simulation model

Fig. 1은 20톤급 유압 굴삭기의 시뮬레이션 모델을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 모델의 구축은 상용 소프트웨어인 Amesim을 통해 구성되었다.

펌프는 엔진의 회전 속도와 전마력제어 및 포지티브 유량 제어를 통해 결정된 사판각 값을 입력받아 최종 토출 유량을 결정하도록 구성했다. MCV는 파일럿 압력 데이터를 입력받아 각 제어 밸브의 변위를 결정하며, 펌프로부터 공급된 유량을 밸브 변위에 비례하게 분배하여 각 액추에이터가 낼 수 있는 힘을 계산하도록 했다. 그리고 작업장치는 액추에이터가 내는 힘을 입력받아 붐, 암, 버킷, 그리고 굴삭기 상부체의 움직임을 결정하도록 구성했다.

모델의 정확도에 대한 검증은 대상 굴삭기의 시험 데이터를 이용하여 수행되었다. 8가지 동작 모드에 대해서 검증을 수행했으며, 액추에이터 변위는 전체 평균 96%, 압력은 전체 평균 83%의 정확도를 갖추었음을 확인했다.⁸⁾

3. 궤적 추종 제어 모델 개발

본 연구에서는 기준 궤적 데이터(작업장치 조인트 각도/각속도)가 주어진다 가정 하에서, 작업장치가 기준 궤적을 추종하도록 만드는 제어기를 설계했다. 설계된 제어기는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 기준 데이터 생성 단계와 굴삭기 모델 단계의 중간에 위치하게 된다. 제어기는 기준 데이터와 오차 데이터를 입력 받은 뒤, MCV 내의 제어 밸브에 입력되어야 할 적절한 파일럿 압력을 결정하게 된다.

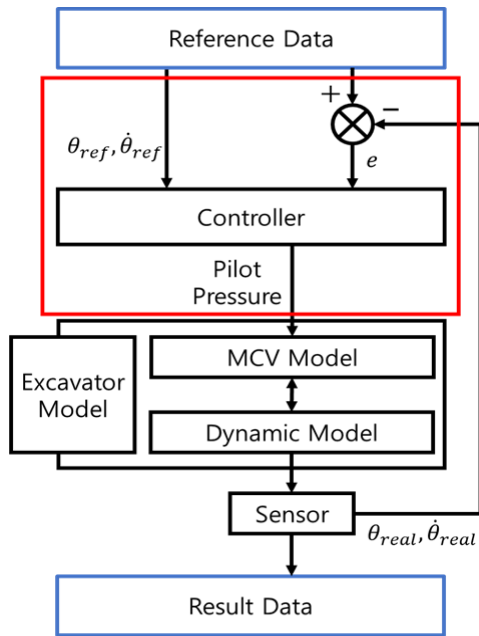


Fig. 2 Configuration of trajectory control system

3.1 제어기 설계

본 연구에서 설계한 제어기는 Fig. 3과 같은 상세 구조를 가진다. 기준 각속도를 이용하는 피드포워드 제어기와 각도/각속도 오차를 이용하는 피드백 제어기로 구성되어 있으며, 각 제어기의 출력을 합하여 최종 출력인 파일럿 압력을 결정하게 된다.

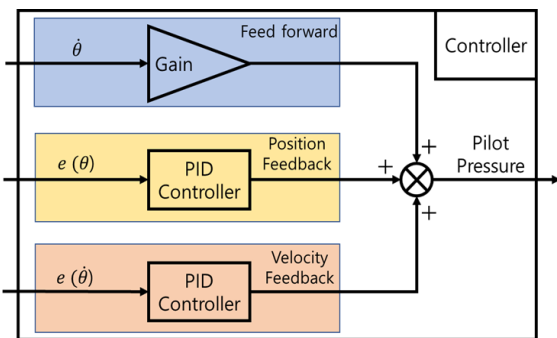


Fig. 3 Diagram of trajectory controller

일반적으로 운전자가 조작 레버를 이용하여 굴삭기를 움직일 때 작업장치의 현재 속도를 인지하고 조작 레버를 조정하여 파일럿 압력을 결정하게 된다. 따라서 각 제어 밸브에 입력되어야 할 파일럿 압력은 각 액추에이터의 요구 속도와 연관되어 있다고 볼 수 있다. 이러한 특징을 반영하여 입력받은 기준 데이터 중 각속도 데이터를 이용해서 피드포워드 제어기를 구성했다. 피드포워드 제어기는 각속도 데이터에 일정한 게인 값을 곱하는 형태이며, 제어 밸브에 존재하는 불감대 영역을 고려한 오프셋 항도 적용했다. 이렇게 구성된 피드포워드 제어기의 출력은 최종 파일럿 압력의 기본적인 틀을 결정하게 된다.

피드백 제어기는 각도와 각속도의 오차 데이터를 이용하여 파일럿 압력을 생성하도록 구성했다. 본 연구에서는 PID 제어 방식을 적용했으며, 작업장치의 각 부분별로 적절한 게인을 선정했다. 이러한 피드백 제어기의 출력은 피드포워드 제어기의 출력 값을 보정해주는 역할을 하며, 이를 위해 피드백 제어기 출력 값의 범위를 설정해주었다.

각각의 제어기를 통합하는 과정에서 피드백 제어기의 불필요한 동작을 방지하기 위해, 기준 속도 데이터가 0이 아닌 경우에만 제어기가 동작하도록 동작 제한 조건을 추가해주었다. 동작 제한 조건까지 적용된 통합 제어기 모델은 Fig. 4와 같다.

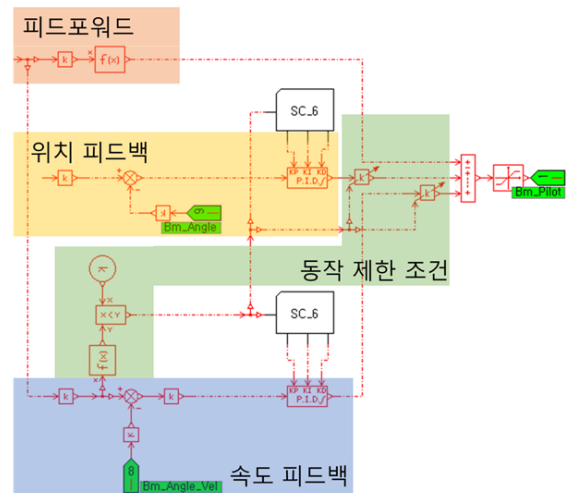


Fig. 4 Configuration of controller model

3.2 센서 및 데이터 변환 모델

기준 궤적 데이터는 일반적으로 기구학과 역기구학을 통해 결정되며 작업장치의 상대위치 데이터로 나타난다. 그렇기 때문에 데이터 계측을 위해 사용하는 센서가 절대위치 데이터를 제공하는 경우 상

대위치 데이터로 변환해야 한다.

본 연구에서 사용한 Amesim의 센서 모델은 절대위치 데이터를 제공하기 때문에 상대위치 데이터로 변환하는 부분이 필요하며, 이를 Fig. 5와 같이 구현하였다. 그리고 센서의 시간 지연 영향을 반영하기 위해서 1차 시간지연 요소(시간 상수 : 0.01)를 적용하였다.

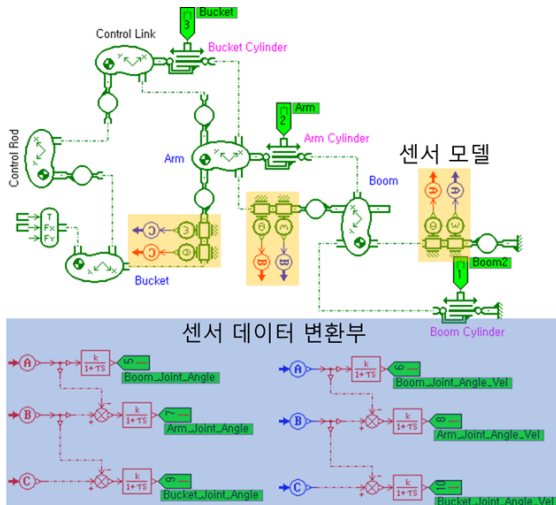


Fig. 5 Configuration of trajectory control model

3.3 궤적 추종 제어 모델

앞서 구성한 20톤급 굴삭기의 시뮬레이션 모델과 최종적으로 구성된 제어기 모델, 그리고 센서 및 데이터 변환 모델을 결합하여 최종적으로 궤적 추종 제어 모델을 완성하였다. 완성된 궤적 추종 제어 모델은 Fig. 6과 같다.

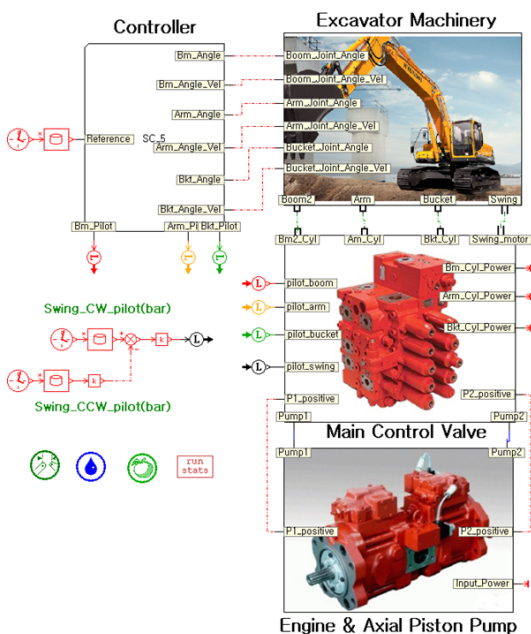


Fig. 6 Configuration of trajectory control model

4. 제어기 검증

4.1 검증 방법 및 경로 설계

본 연구에서는 JCMAS H020 기준⁹⁾을 바탕으로 설계된 기준 동작 데이터를 이용하여 제어기의 성능을 검증했다. JCMAS H020 기준은 Fig. 7에 나타난 것과 같이 붐과 암을 이용한 끌어당김, 버킷을 이용한 굴토, 붐과 선회를 이용한 이송, 암과 버킷을 이용한 배토, 그리고 붐, 암, 선회를 이용한 복귀의 5단계로 이뤄져 있다.

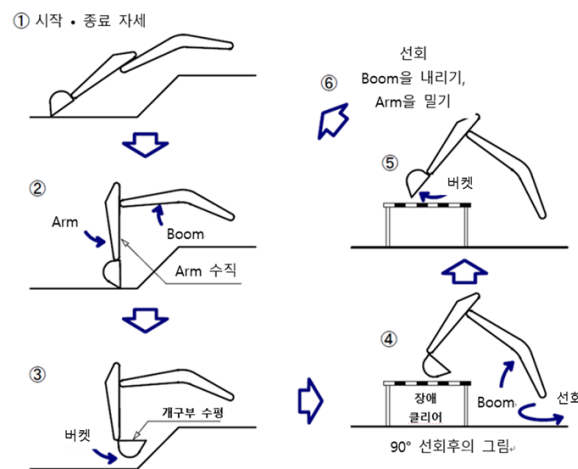


Fig. 7 Reference operation cycle : JCMAS H020

본 연구에서는 선회 동작에 대한 제어기 설계는 수행하지 않았기 때문에, JCMAS H020 기준에서 붐, 암, 버킷의 동작만을 이용하여 검증을 진행했다. 14.9초 동안 전체 동작을 수행하도록 경로를 설계했으며, 경로 설계 결과 Fig. 8과 같은 버킷 끝단의 기준 궤적을 얻었다. 버킷 끝단 궤적 및 동작 조건, 그리고 역기구학을 이용하여 붐, 암, 버킷의 각도와 각속도 데이터를 얻었으며, 이를 제어기에 기준 데이터로 입력하였다.

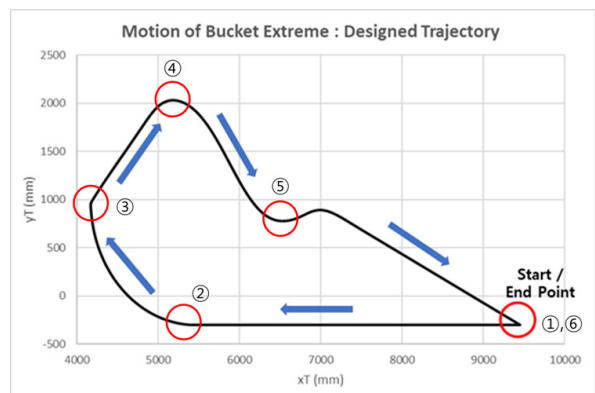


Fig. 8 Designed trajectory of bucket extreme

4.2 검증 결과 및 고찰

Fig. 9부터 Fig. 11까지는 시뮬레이션 진행 후, 기준 데이터와 결과 데이터들을 비교한 그래프이다. Fig. 9는 버켓 끝단의 궤적, Fig. 10은 버켓 끝단과 지면이 이루는 각도, 그리고 Fig. 11은 붐, 암, 버켓의 회전각(상대각도)을 비교하여 나타낸 그래프이다.

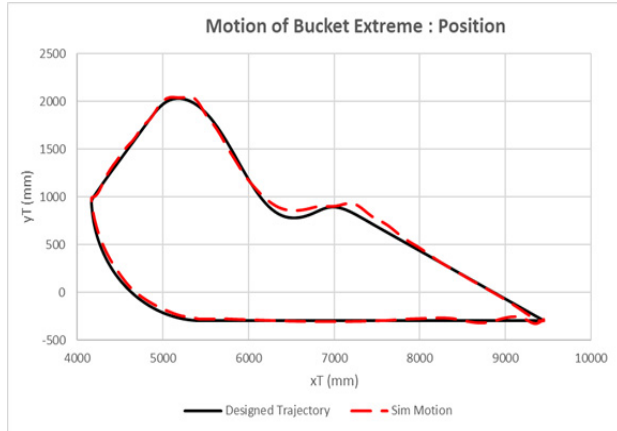


Fig. 9 Trajectory of bucket extreme

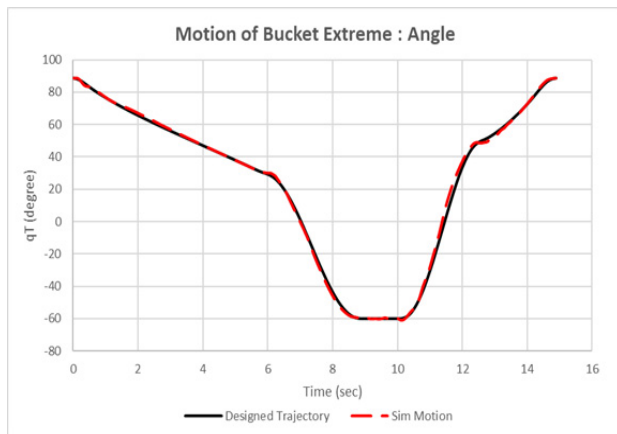


Fig. 10 Angle of bucket extreme

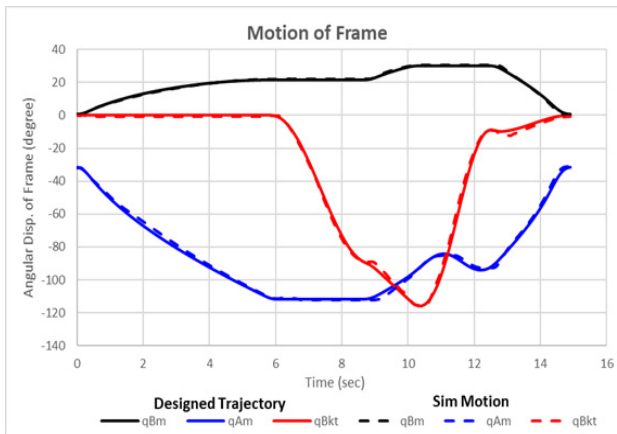


Fig. 11 Angle of manipulator of excavator

결과 그래프를 통해 몇몇 부분에서 발생하는 눈에 띄는 차이를 제외하면 전체적인 추종성은 확보되었음을 확인할 수 있다. 정확한 비교를 위해 버켓 끝단의 X, Y좌표 데이터 각각의 오차를 식 (1)을 통해 구하였고, 구해진 오차와 식 (2)를 이용해 제어기의 성능 정확도를 구하였다. 계산 결과, 버켓 끝단의 X 좌표는 98.7%, 그리고 Y 좌표는 87.6%의 정확도를 보임을 확인했다.

$$Error(\%) = \sqrt{\frac{\sum_n (\frac{x_{ref} - x_{act}}{x_{ref}})^2}{n}} \times 100 \quad (1)$$

- x_{ref} / x_{act} : 기준/실제 데이터
- n : 검증에 사용한 데이터 갯수

$$Accuracy(\%) = 100 - Error(\%) \quad (2)$$

오차의 주요 발생 부분은 그래프에서 확인할 수 있듯이 처음의 끌어당김 동작과 배토 동작에서 복귀 동작으로 넘어가는 지점이다. 끌어당김 동작을 시작할 때 발생한 끝단의 출렁이는 움직임은 제어기에서 초반에 발생한 오차를 제거하기 위해 파일럿 압력을 최대로 생성하면서, 유량 및 압력의 급격한 변화하여 발생한 것으로 판단된다.

배토 동작에서 복귀 동작으로 넘어가면서 발생한 궤적의 차이는 암과 버켓의 급격한 방향 변화로 인한 것으로 판단된다. 방향 전환 시 속도가 0인 지점을 통과하며 속도의 변화가 발생하는데, 이를 위해 밸브를 반대로 열어주도록 파일럿 압력을 생성하게 된다. 이 때, 밸브가 불감대 영역을 통과하면서 생긴 동작의 지연으로 인해 궤적의 차이가 발생한 것으로 보인다. 해당 문제들은 제어기의 게인 조정, 그리고 제어 방식의 변화 등의 방식으로 해결 가능할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 실차 시험 결과를 통해 검증한 20톤급 굴삭기 시뮬레이션 모델을 바탕으로, 작업장치의 기준 궤적을 추종하도록 하는 파일럿 압력을 생성하는 제어기를 개발하였다. 개발된 제어기는 JCMAS H020 기준 동작을 바탕으로 생성된 궤적 데이터를 이용하여 추종 성능을 검증하였다.

검증 결과, 버켓 끝단의 X 좌표는 98.7%의 정확

도, 그리고 Y 좌표는 87.6%의 정확도를 보이며 개발된 제어기가 추종 성능을 갖추고 있음을 확인할 수 있었다. 오차는 동작이 시작되는 지점과, 동작 진행 중에 밸브가 불감대 영역을 통과해야 하는 동작에서 크게 발생하였다. 이러한 문제들은 제어기의 게인 조정, 그리고 제어 방식의 변화 등의 방식으로 해결 가능할 것으로 판단된다.

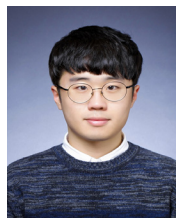
향후 본 연구를 통해 개발된 제어기의 제어 성능 및 실시간 연산 성능 확보를 위한 연구를 진행할 것이다. 개선된 제어기는 실제 굴삭기나 가상 환경 시뮬레이터, HIL(Hardware-In-the-Loop) 시뮬레이터 등에 적용하여 성능과 적용 가능성을 검증할 예정이다.

참고 문헌

- 1) T. H. Lim, and S. Y. Yang, "Development and Application of Simulator for Hydraulic Excavator", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 23, Issue 9, pp. 142~148, 2006
- 2) Q. P. Ha, Q. H. Nguyen, D. C. Rye, and H. F. Durrant-Whyte, "Fuzzy Sliding-Mode Controller with Applications", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 48, No. 1, pp. 38~46, 2001
- 3) B. Yao, and M. Tomizuka, "Adaptive Robust Control of SISO Non linear Systems in a Semi-Strict Feedback Forms", Automatica, Vol. 33, No. 5, pp. 893~900, 1997.
- 4) S. J. Lee, P. H. Chang, and Y. M. Kwon, "An Experimental Study on Cartesian Tracking Control of Automated Excavator System using TDC-based Robust Control Design", Proceedings of the American Control Conference, pp. 3180~3185, 1999
- 5) S. M. Jin, "Development of the Remote Control Excavator System using the Adaptive Sliding Mode Control", Master Thesis, University of Ulsan, Korea, 2009
- 6) J. H. Choi, "A Study on Adaptive-Robust Control for Automatic Operation of Hydraulic Excavator", Master

- Thesis, Pusan National University, Korea, 2005
- 7) S. M. Oh, "Development of Automatic Excavator System using Sliding Mode Control", Master Thesis, Sungkyunkwan University, Korea, 2018
- 8) Y. H. Im, S. W. Lee, M. G. Cho, D. Y. Shin, and S. H. Hwang, "Real-time Simulation of Excavator including Detail Model of MCV", Proceedings of 2019 Spring Conference on Drive and Control, pp. 250~255, 2019.
- 9) Japan Construction Mechanization Association, "JCMAS H020 : Earth-Moving Machinery Test methods for Energy Consumption - Hydraulic Excavators", 2010

[저자 소개]



임용현
 E-mail : ryze827@naver.com
 Tel : 031-290-7912
 2018년 성균관대학교 기계공학부 학사.
 2018년-현재 성균관대학교 기계공학과 석사과정.



신대영
 E-mail : dyshin@kitech.re.kr
 Tel : 031-8084-8635
 1989년/91년/00년 한양대 정밀기계공학과 학사/석사/박사. 1991년-현재 한국생산기술연구원 유압제어 시스템, 건설기계 설계 등 연구.



황성호
 E-mail : hsh0818@skku.edu
 Tel : 031-290-7464
 1988년/92년/97년 서울대 기계설계학과 학사/석사/박사. 1992년-2002년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2002년-현재 성균관대학교 기계공학부 교수. 유압제어 시스템, 건설기계 자동화, 자율주행자동차 제어, 친환경자동차 제어전략 개발 등 연구. KSFC, KSME, KSAE, ICROS, IEEE 회원