

# 유압 굴삭기용 시뮬레이터 개발 및 응용

임태형\*, 양순용#

## Development and Application of Simulator for Hydraulic Excavator

Tae Hyeong Lim\* and Soon Yong Yang#

### ABSTRACT

Hydraulic excavators have been popular devices in construction fields because of their multi-workings and economic efficiency. The mathematical models of excavators have many nonlinearities because of opening characteristics and dead zone of main control valve(MCV), oil temperature variation, etc. The objective of this paper is to develop a simulator for hydraulic excavator using AMESim. Components and their circuits are expressed graphically. Also, parameters and nonlinear characteristics are considered in a text style. From the simulation results, fixed spring stiffness of MCV can not obtain the satisfactory accuracy of spool displacement under whole P-Q diagrams. Closed loop type MCV containing a proportional gain, is proposed in this paper that can reduce displacement error. The ability of closed loop MCV is verified through comparing with normal type MCV using AMESim simulator. The excavator simulator can be used to forecast the attachment behaviors when components, mechanical attachments and hydraulic circuits change, or other control algorithms are applied. The simulator could be a kind of development platform for new excavators.

**Key Words** : Excavator (유압 굴삭기), Simulator (시뮬레이터), AMESim (아메심), MCV (주제어밸브)

### 기호설명

$H_{ij}$  = Inertia torque including interaction torque

$h_{ijk}$  = Coriolis & centrifugal effect

$G_i$  = Gravity torque

$q_i$  = Generalized force

### 1. 서론

유압 굴삭기는 다양한 작업에 대한 높은 적용성과 경제성 때문에 주로 건설현장 뿐만 아니라 제조업, 농업, 해저영역 등 활동영역이 점차 확대되고 있으며, 동시에 지능형 필드 로봇으로 발전되고 있다. 한편 굴삭기를 이용하여 수행하는 평탄, 덩핑, 토사 등의 작업들은 운전자가 작업 장치의 여러 관절을 동시에 조작해야 하는 고도의 숙련이 필요하므로 굴삭 작업의 정도나 효율은 운전자의 능력에 좌우되고, 비록 숙련자라 할지라도 장시간 운전시 상당한 피로를 느끼게 된다.

접수일: 2006년 2월 6일; 게재승인일: 2006년 8월 3일

\* 울산대학교 대학원 기계자동차공학과

# 교신저자: 울산대학교 기계자동차공학부

E-mail soonyy@mail.ulsan.ac.kr Tel. (052) 259-2820

작업 효율 및 편의성 그리고 안전 등의 문제를 해결하기 위해 최근 10여년 동안 굴삭기의 자동화 및 지능화에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 캐나다 브리티시 컬럼비아 대학, 미국 카네기 멜론 대학, 호주 시드니 대학 등에서 활발한 연구 성과를 볼 수 있으며 유수의 국내의 건설기계 업체들에서는 자동 굴삭기의 시제품 및 부분적인 제품화가 이루어지고 있다.<sup>1-4</sup>

자동굴삭 관련 대부분의 연구에서 수학적 모델링을 위해 작업장치(붐, 암, 버킷)에 라그랑지 운동방정식을 이용하고, 유압회로는 저차식으로 약식 모델링하였으며, 이에 기초하여 원격 조작 또는 원격 제어에 관한 연구가 이루어졌다. 작업장치와 유압회로에 대한 충실한 모델링보다는 각 요소가 가진 비선형성에 대한 보상을 Fuzzy, Neural network, Adaptive, Time delay, Impedance, PID 등의 제어기법을 이용하여 작업장치 말단의 기준 궤적에 대한 오차를 최소화 하는 데 중점을 두고 있다.<sup>5-8</sup>

본 연구에서는 작업장치와 유압회로를 상용 S/W인 AMESim을 이용하여 모델링 하였다. 각 요소는 텍스트 기반이 아닌 그래픽 모듈로 구성되어 서로 연결되는 구조이며, 각각의 특성곡선 및 특성값을 반영시킬 수 있는 구조이기 때문에 본 논문의 대상인 5톤급 굴삭기와 다른 굴삭기의 모델링에도 쉽게 적용할 수 있도록 하였다.

본 연구를 통해 구축된 AMESim 모델은 일종의 시뮬레이터로서 단품 개발시 혹은 전체 플랜트에 대한 제어기 적용시 시간적, 비용적 절감을 기대할 수 있다.

## 2. 작업장치 모델

본 연구에서는 주행과 회전을 배제한 작업장치의 평면 운동을 고려하였으며 대상은 H사의 5톤급 유압 굴삭기이다.

### 2.1 작업장치 모델링

작업장치의 좌표계는 Fig. 1과 같이 설정하였으며<sup>9</sup> 동역학에 대한 수학적 모델식을 얻기 위해 라그랑지 방법을 이용하면 다음과 같다.<sup>10</sup>

$$\sum_{j=1}^n H_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n h_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + G_i = Q_i, \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

여기서  $H_{ij} \ddot{q}_j (j \neq i)$ 는 작업장치 관성 항의 비대칭 요소(off-diagonal element)에 의하여 발생하는 상호 작용 관성 토크이고,  $h_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k$ 는 코리올리 및 원심 토크이며,  $G_i \left( = \sum_{j=1}^n m_j g^T J_{Li}^{(j)} \right)$ 는 중력 토크이다.

대표적으로 붐에 대한 AMESim 모델을 나타내면 Fig. 2와 같다. Fig. 1에서 절대 좌표계 원점인 회전 조인트는 Fig. 2에서 ①로 표현되며 붐 실린더와 연결되는 ②포트에서의 직선운동이 액추에이터 ③을 통해 붐 본체 ④에 전달된다. 붐 본체의 파라미터는 초기위치, 상대 좌표계와 절대 좌표계와의 거리, 상대 좌표계에서 각 조인트까지의 거리, 무게, 관성 모멘트, 붐 형상 등이다. 또한 각도센서 ⑤를 통한 상대 좌표계 각변위는 각도 변환 함수 ⑥을 통해 절대 좌표계 각변위로 변환되어 붐 모델 외부로 보내게 된다.

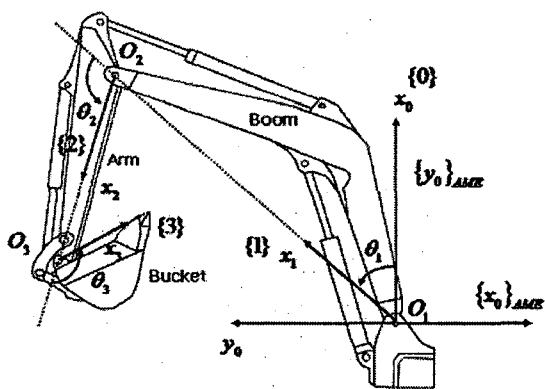


Fig. 1 Coordinate system of attachment

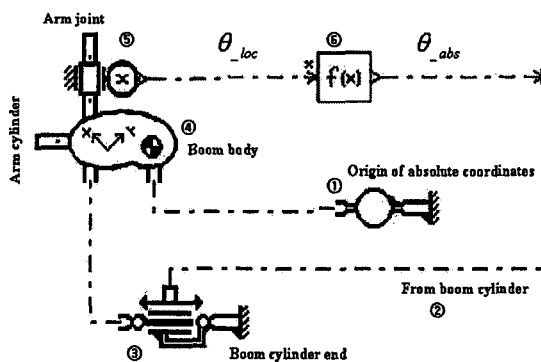


Fig. 2 AMESim model of boom

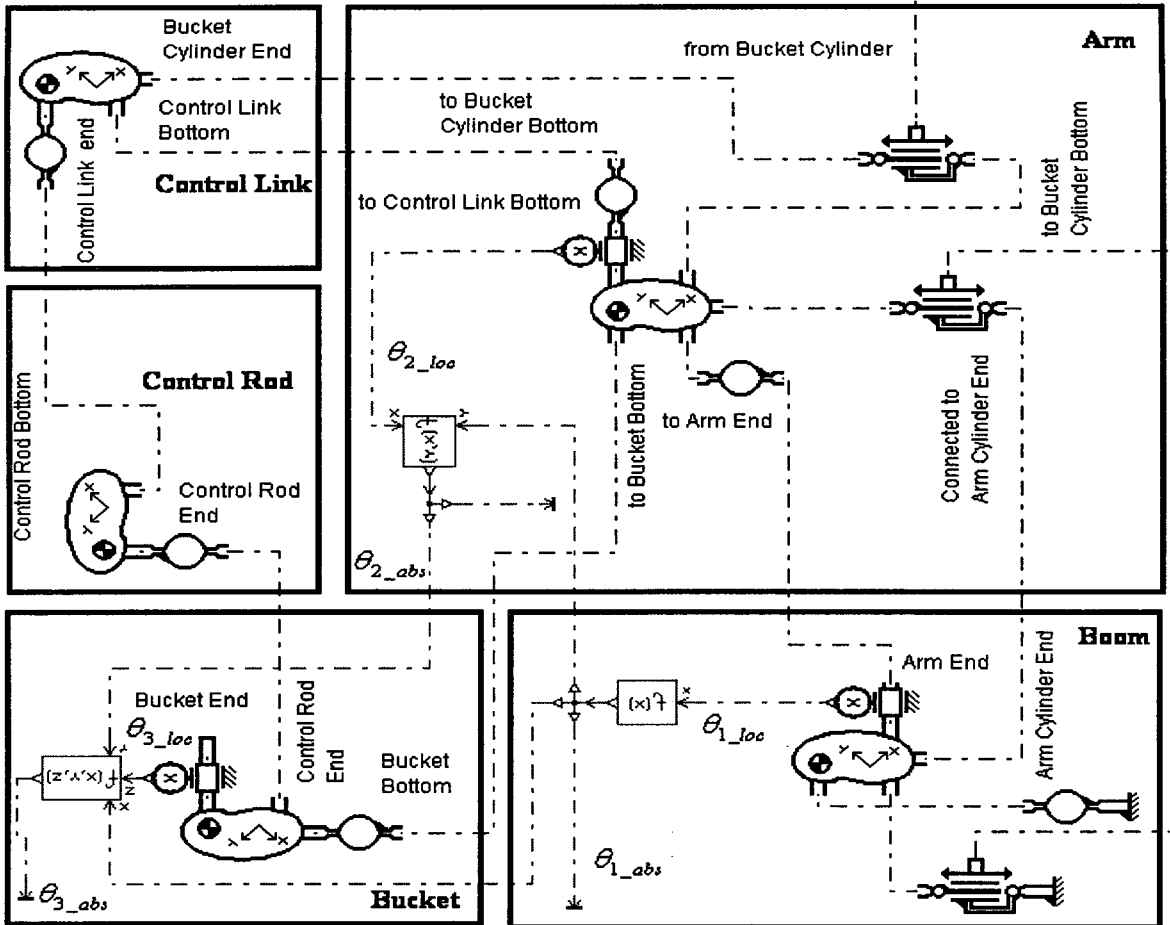


Fig. 3 AMESim model of attachment

작업 범위를 보다 넓게 하기 위해 장착되는 4절 링크 등 작업장치 전체에 대한 모델을 구축하여 나타내면 Fig. 3와 같다. 각 요소의 몸체에 해당하는 아이콘 안에는 앞서 언급한 파라미터들이 삽입되었다. 또한 상대 좌표계와 절대 좌표계와의 상호 관계식을 도출하기 위해 절대 좌표계에서의 붐, 암 회전각도로 변환이 필요하다.

### 3. 유압회로 모델

동력원인 엔진은 펌프를 구동하여 실린더를 작동시키기 위한 메인 압력과 MCV의 스톱 동작을 위한 파일럿 압력을 생성하게 된다. 운전자가 유압식 조이스틱 및 레버를 작동시키면 파일럿 압력이 MCV의 스톱을 작동시켜 실린더로의 메인 유량의

크기와 방향을 결정한다. 유량이 많이 요구되는 붐 상승시 붐 1 밸브와 붐 2 밸브의 합류로 부족한 유량을 보충하게 되며 이들을 구체적으로 모델링하면 다음과 같다.

#### 3.1 펌프

펌프는 주 동력원 압력을 생성하기 위한 2개의 가변펌프와 파일럿 압력을 생성하기 위한 고정펌프로 구성되며, 가변펌프의 경우 에너지 절감을 위해 P-Q 선도를 따라 정마력 제어를 행하게 된다.

AMESim으로 모델링한 가변펌프를 Fig. 4에 나타내었다. P-Q 선도를 모델 내에 텍스트 파일 형식으로 활용하면 다양한 P-Q 선도에 대한 펌프 모델의 시뮬레이션이 용이하다.

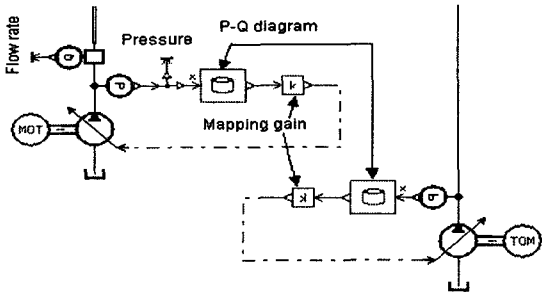


Fig. 4 AMESim model of pump

### 3.2 MCV

작업장치 구동을 위한 MCV 모두에 대한 AMESim 모델을 모두 표현하기 어려우므로 대표적인 봄 1 밸브만을 나타내면 Fig. 5와 같다.

봄 실린더의 방향과 속도를 결정하는 봄 1 밸브는 바이패스 회로를 포함한 6포트 3위치 밸브이고 실린더 헤드와 로드측에 작동 부하 압력을 조절하기 위한 릴리프 밸브가 장착되어 있다. 밸브의 절

개도를 그림 상단에, AMESim 모델을 좌측 하단에, 개구선도를 우측 하단에 나타내었다.

스풀 중립시 바이패스 유로는 완전 개방되어 펌프와 실린더 그리고 탱크로의 유량은 폐쇄되고, 봄 상승시는 스푼 변위가 커짐에 따라 펌프에서 실린더 헤드측으로, 실린더 로드측에서 탱크로 연결되는 개구면적은 증가하게 된다. 기존의 논문에서는 개구면적을 선형적으로 모델링하거나 불감대만을 고려하는 경우가 일반적이었지만, 본 연구에서는 개구선도를 실제 특성으로 고려하였다. 좌측 하단의 AMESim 모델의 각 아이콘에는 개구면적, 랜드 부 직경, 로드 직경, 제트(jet) 각 등의 정보를 포함한다. 또한 좌측 상단의 조이스틱 모델은  $\pm 1$ 의 신호 입력에 비례해서 A, B 포트에 파일럿 압력을 토출한다. 조이스틱을 완전 개방할 시 스프링 상수가 스푼 변위에 큰 영향을 미치지 못하였으며, 스프링 상수가 작을수록 진동이 크게 발생하였다. 스푼의 변위 오차가 가장 작을 때의 스프링 상수는  $17 [kN/m^2]$ 이었다.

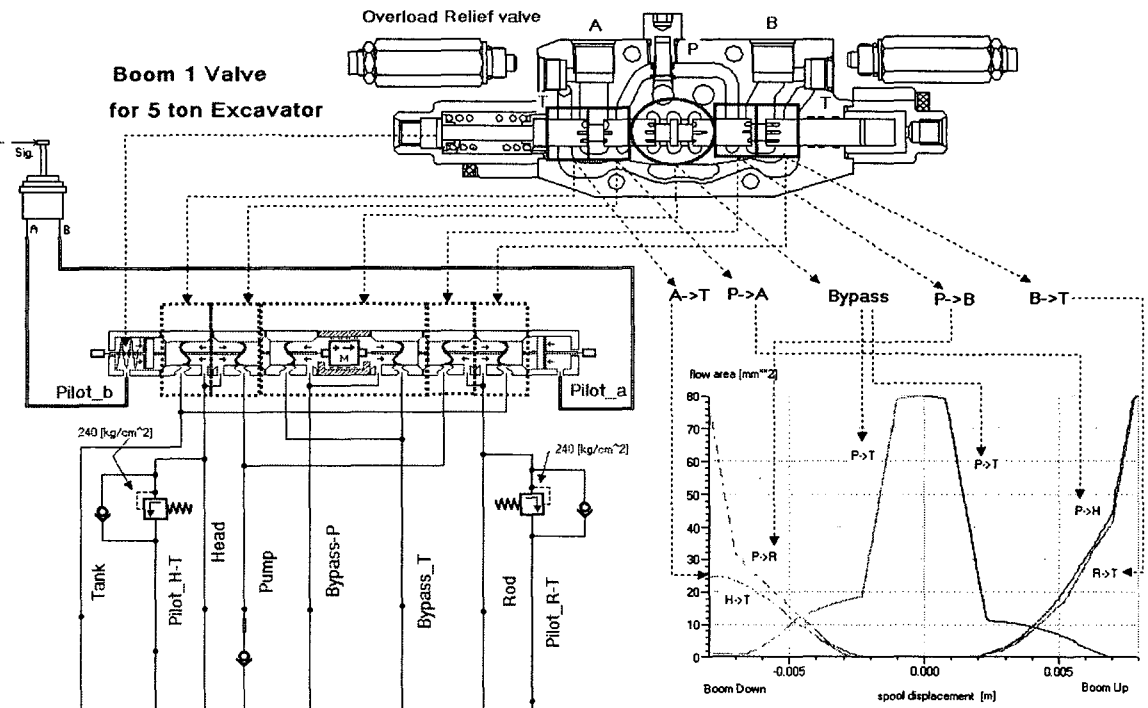


Fig. 5 AMESim model of boom 1 valve

### 3.3 MCV 스프링 상수 및 스톨 위치 오차

붐, 암, 버킷 회로에 대해 각각 실린더 및 펌프를 밸브와 연결하고 MCV 스프링 상수를 조정하여 스톨 위치 오차가 최소가 되도록 한 결과는 Table 1 과 같다. 붐 2 밸브의 경우 붐 상승시에만 작용하므로 붐 하강시 스톨 위치 오차는 없다.

Table 1 Spring stiffness and displacement error

	Boom 1	Boom 2	Arm	Bucket
Spring stiffness [kN/m]	17	20	20	26
Spool displacement error [mm]	up	0.316	1.03	0.053
	down	0.61	-	0.284

### 3.4 페루프 MCV

굴삭기의 자동제어 측면에서 스톨 변위에 따른 오차의 크기 차이를 줄이기 위해 파일럿 압력을 입력으로 하고 스톨 변위를 피드백하는 간단한 페루프 회로를 Fig. 6과 같이 구성하였다.<sup>12</sup> 비례 게인 100에서 붐 1 밸브의 스톨 변위 오차는 0.037 [mm]로 줄어들었고, 상승과 하강 모두에 대해 오차가 거의 동일함을 알 수 있었다.

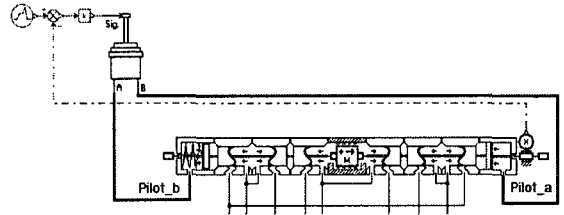


Fig. 6 Closed loop MCV for boom 1 valve

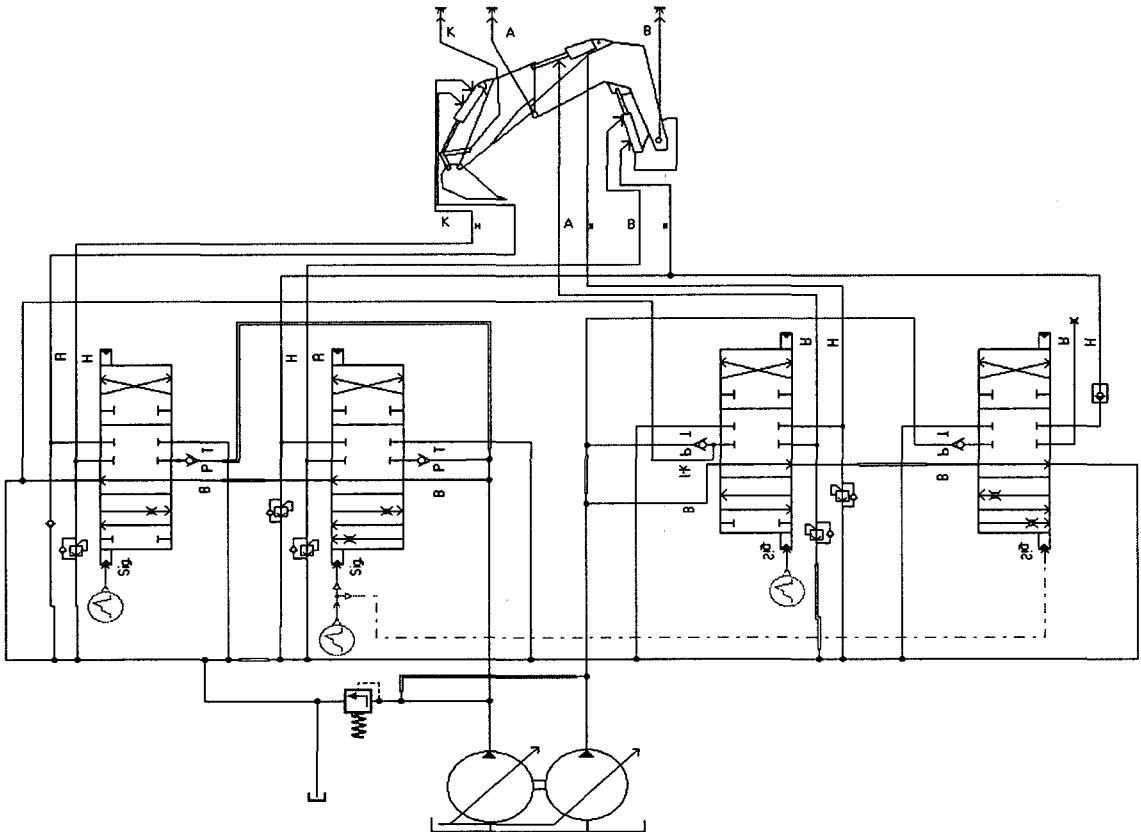


Fig. 7 AMESim model of excavator

#### 4. 전체 모델 및 시뮬레이션 결과

작업장치 모델과 유압 회로의 단품 모델을 결합한 유압 굴삭기 전체 모델을 Fig. 7에 나타내었다. 여기에 원래의 MCV와 페루프형 MCV를 각각 적용하여 붐, 암, 버킷을 동시에 작동시키는 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 각 관절의 각변위를 Fig. 8에 나타내었으며 원래의 MCV를 적용한 경우는 실선으로, 페루프형 MCV를 적용한 경우는 점선으로 표시하였다. 페루프형 MCV를 적용한 결과 파일럿 압력에 대한 스톱 변위 추종성이 개선되고, 또한 스톱 변위가 원래의 MCV에 비해 작아지므로 작업장치의 작동폭이 작아지는 것을 알 수 있다.

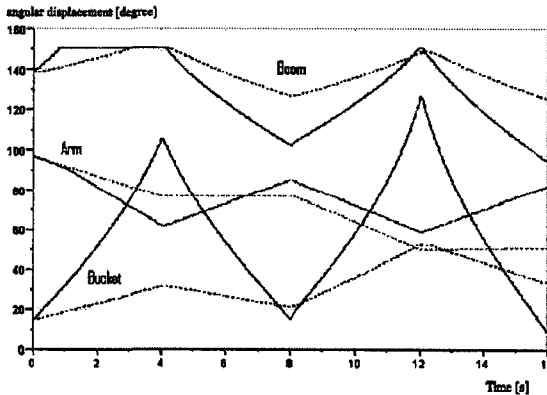


Fig. 8 Angular displacements of attachment

#### 5. 결론

본 논문에서는 유압 굴삭기의 작업장치 및 유압 회로에 대한 각 요소의 모델링을 상용 소프트웨어인 AMESim을 이용하여 각각 행하고 전체 회로를 구성하였다.

MCV 내의 각 밸브에 대한 최적 스프링 상수를 도출하고 이를 적용한 결과, 하강시 붐1 밸브의 경우 0.61 [mm], 암 밸브 0.284 [mm], 버킷 밸브의 경우 1.17 [mm]의 위치오차를 보였다. 이는 최대 8 [mm]의 스톱 변위로서는 작지 않은 오차이므로 본 연구에서는 스톱 변위를 센싱하여 피드백하는 회로를 구성하였다. 이 때 방향에 상관없이 최대오차를 0.037 [mm]까지 크게 줄일 수 있었다. 하지만 원래의 MCV의 경우 작업자가 조이스틱을 통해 느끼는

감도 면에서 개구선도를 통해 최적화된 반면, 개선된 MCV의 경우 향후 감도 측면에서의 조정이 필요할 수 있다.

본 연구에서 구축된 굴삭기용 시뮬레이터는 다양한 조건에 대한 실차 실험이 어려운 현실적인 한계를 극복할 수 있는 대안이 될 수 있다. 또한 새로운 제어 알고리즘이나 신규 개발 부품의 성능 분석에도 활용 가능할 것으로 사료된다.

#### 후기

본 연구는 울산대학교 교내 연구비 및 Post BK 21 지원에 의한 것입니다.

#### 참고문헌

1. Tafazoli, S., Salcudean, S. E., Hashtrudi-Zaad, K. and Lawrence, P. D., "Impedance Control of a Teleoperated Excavator," IEEE Transactions on control systems technology, Vol. 10, No. 3, pp. 355-367, 2002.
2. Krishna, M. and Bares, J., "Hydraulic System Modeling through Memory-based Learning," Proc. of the 1998 IEEE/RSJ Int. Conf. on intelligent Robots and Systems, pp. 1733-1738, 1998.
3. Nguyen, Q. H., Ha, Q. H., Rye, D. C. and Durrant-Whyte, H. F., "Force/Position Tracking for Electrohydraulic Systems of a Robotic Excavator," Proc. of the IEEE Conf. on Decision and Control, pp. 5224-5229, 2000.
4. Lee, S. U. and Chang, P. H., "Control of a heavy-duty robotic excavator using time delay control with integral sliding surface," Control Engineering Practice, Vol. 10, No. 7, 2002.
5. Shi, X., Lever, P. J. A. and Wang, F., "Experimental Robotic Excavation with Fuzzy Logic and Neural Networks," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 957-962, 1996.
6. Choi, J. H., Kim, S. S., Yang, S. Y. and Lee, J. G., "Robust Control of Trajectory Tracking for Hydraulic Excavator," ICASE, Vol. 10, No. 1, pp. 22-29, 2004.
7. Salcudean, S. E., Hashtrudi-Zaad, K., Tafazoli, S.,

- Dimaio, S. P. and Reboulet, C., "Bilateral Matched Impedance Teleoperation with Application to Excavator Control," Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation, pp. 133-139, 1998.
8. Normey-Rico, J. E., Alcalá, I., Gomez-Ortega, J. and Camacho, E. F., "Mobile robot path tracking using a robust PID controller," Control Engineering Practice, Vol. 9, No.11, pp. 1209-1214, 2001.
  9. Craig, J. J., "Introduction to Robotics Mechanics and Control second edition," Addison-Wesley, 1992.
  10. Kane, T. R., "Dynamics :Theory and Applications," McGraw-Hill, 1985.
  11. "AMESim User's Manual," IMAGINE, 2000.
  12. Lim, T. H. and Yang, S. Y., "Closed loop type MCV for Hydraulic Excavator," KSPE conference, pp. 864-870, 2005.