

# 유압 굴삭기 시뮬레이터 개발

## Development of Simulator for Hydraulic Excavator

임태형 · 이홍선 · 양순용  
T. H. Lim, H. S. Lee and S. Y. Yang

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

**Abstract:** Hydraulic excavators have been popular devices in construction field because of its multi-workings and economic efficiency. The mathematical models of excavators have many nonlinearities because of nonlinear opening characteristics and dead zone of main control valve, oil temperature variation, etc. The objective of this paper is to develop a simulator for hydraulic excavator using AMESim. Components and whole circuit are expressed graphically. Parameters and nonlinear characteristics are inputted in text style. The simulator can be used to forecast excavator behavior when new components, new mechanical attachments, hydraulic circuit changes, and new control algorithm are applied. The simulator could be a kind of development platform for various new excavators.

### 1. 서 론

유압 굴삭기는 다양한 종류의 작업에 대한 높은 적용성과 경제성으로 인해 건설현장 뿐만 아니라 제조업, 농업, 해저영역 등 활동영역은 점점 확대될 것으로 예상되는 복합 기기이다. 한편 굴삭기를 이용하여 수행하는 평탄 작업, 덩핑 작업, 토사 작업 등의 작업들은 작업자가 많은 작업장치들을 동시에 조작하여야 하므로 고도의 숙련이 필요하므로 굴삭 작업의 정도나 작업효율은 작업자의 능력에 좌우된다고 할 수 있고, 비록 숙련자라 할지라도 장시간 조작할 때 상당한 피로를 느끼게 된다. 작업환경의 개선 및 작업효율 향상, 작업 편의성 및 안전 등의 요구조건들을 만족시킬 수 있는 방법 중 하나가 굴삭기의 자동화이고 이에 대한 많은 연구들이 이루어져 왔다. 캐나다의 브리러쉬 콜롬비아 대학이나 미국의 카네기 멜론 대학, 호주의 시드니 대학 등에서 관련 연구가 수행되었으며, 건설기계 업체들은 해외나 국내의 회사들 대부분이 자동굴삭기의 시제품 및 부분적인 제품화가 이루어져 있다.

자동굴삭에 대한 경향을 살펴보기 위해 구축한 연구모형을 분석한 결과 전체 논문의 약 56%가 굴삭기의 주행, 선회를 제외한 작업장치(붐, 암, 버킷)의 운동방정식 구축 및 제어기 개발에 집중되어 있고 유압회로는 복잡한 개구선도를 가지는 MCV(Main Control Valve)를 단순 오리피스로 모델링하며 홀딩 밸브(Holding valve)나 로직 밸브(Logic valve) 등 복잡한 밸브에 대해서는 모델링이 이루어지지 않는 실정이나 작업장치에 대해서는 Lagrange-Euler 방정식에 기초한 운동방정식이 쓰이고 있다. 복잡한 개구선도 및 불감대(Dead Zone)에 대한 밸브, 편로드 실린더, 중부하인 작업장치 등에서 비롯한 비선형성은 제어기로 극복하고 있는 실정이다.

새로운 제어 알고리즘의 개발이나 부품 개발의 실험은 반드시 실차실험을 동반하여야 하는 실정이나 일정 및 비용, 장소 등의 한계가 있다.

본 연구에서는 유압회로 내부의 모든 변수들을 측정하는 데는 한계가 있으므로 작업장치 및 유압 회로 각 요소를 상용 S/W인 AMESim으로 정확히 모델링하고 전체 회로를 구성하였다.

### 2. 작업장치 모델

유압 굴삭기는 크게 세 가지 부분으로 나뉘는데 상부체(Upper Frame), 하부체(Lower Frame)와 작업장치(Attachment)이다. 운전실과 동력원인 엔진,

접수일 : 2005년 1월 12일  
임태형(책임저자) : 울산대학교 기계자동차공학부  
E-mail: bulbaram@mail.ulsan.ac.kr  
Tel: 052-259-2731  
이홍선 : 현대중공업 건설기계사업본부  
양순용 : 울산대학교 기계자동차공학부

유압원인 펌프, 실린더 및 모터의 메인압력을 보내 주는 MCV는 상부체에 위치하고 붐, 암, 버킷으로 이루어지는 작업장치는 상부체 끝단에 장착된다. 주행을 위한 모터와 무한궤도 또는 바퀴가 장착된 하부체는 굴삭기의 이동을 담당한다. 또한 스윙 모터에 의해 상부체가 회전하게 된다.

본 연구에서는 주행과 회전을 제외한 작업장치의 평면 운동만을 모델링하였으며 대상은 H사의 5톤급 유압 굴삭기이다(Fig.1).

작업장치의 좌표계는 Fig. 2와 같이 설정하였으며 동역학 모델을 Lagrange 방법을 이용하여 나타내면 다음과 같다.

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

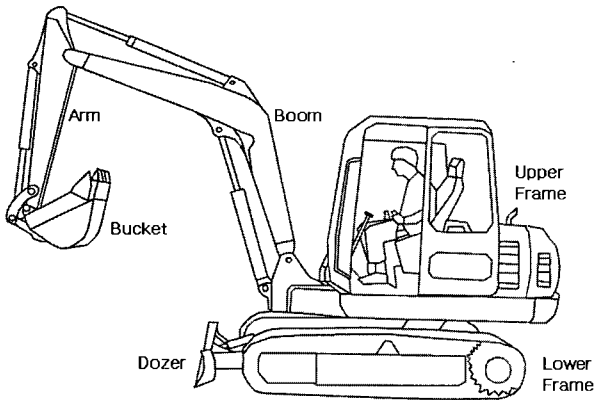


Fig. 1 A hydraulic excavator

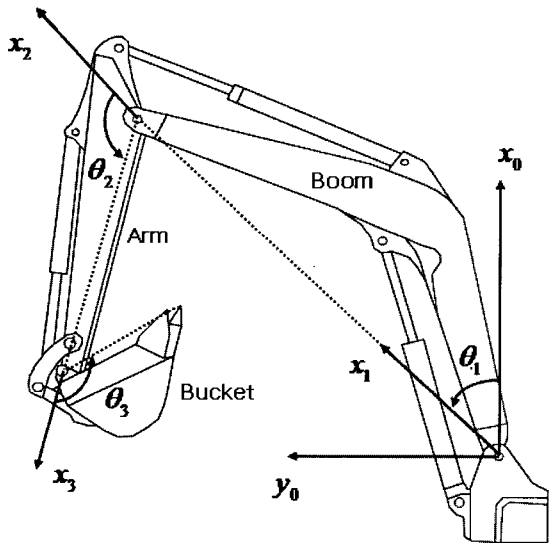


Fig. 2 Coordinates system

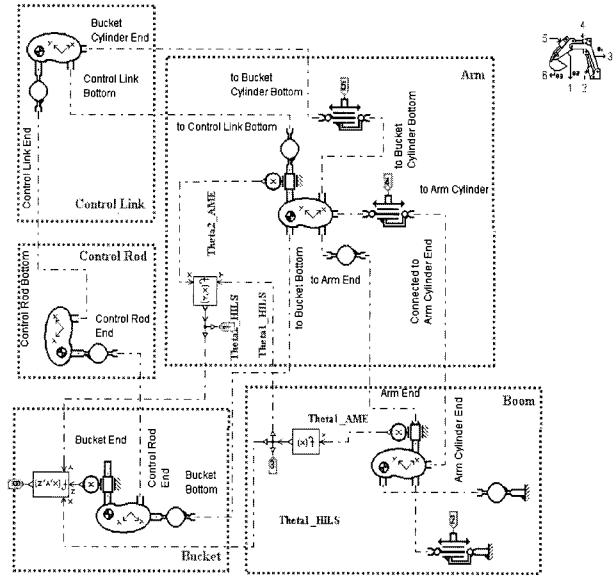


Fig. 3 AMESim model of attachment

식(1)에서  $H_{ij} \ddot{q}_j$   $j \ i$  는 작업장치 관성 텐서의 비대각 요소(off-diagonal element)에 의하여 발생하는 상호 작용 관성 토크이고  $h_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k$  는 Coriolis & 원심 토크이며  $G_i = \sum_{j=1}^n m_j g^T J_{Li}^{(j)}$  는 중력 토크이다.<sup>1,2)</sup>

(1) 식의 AMESim 모델을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 우측 상단 작업장치 이미지 내에 나머지 모델들이 포함되어 있고 붐, 암, 버킷 실린더와 작업장치 모델의 2, 4, 5번 포트가 연결된다. 또한 Fig. 2에서의 좌표계로 변환되어 붐, 암, 버킷 각변위가 검출된다.

### 3. 유압회로 모델

동력원인 엔진이 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. 작업을 붐, 암, 버킷의 2차원으로 한정하면 유압회로도 는 Fig. 4와 같다.

유량이 많이 요구되는 붐 상승(boom up)시와 암 덤프(arm dump)시에 대해 붐 1 밸브와 붐 2 밸브, 암 1 밸브와 암 2 밸브의 합류가 일어남을 알 수 있다. 이후 절부터는 유압식 조이스틱, 펌프, MCV 각 밸브, 실린더 등 유압 각 요소에 대한 모델을 소개한다.

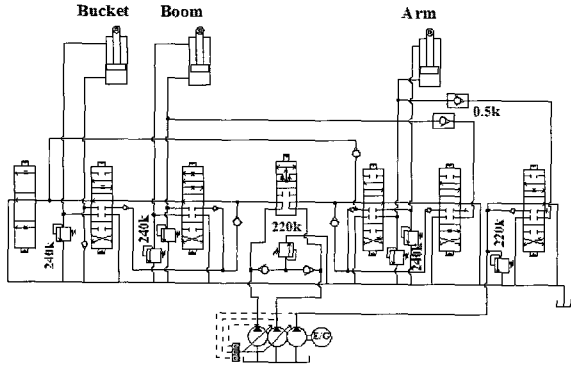


Fig. 4 Hydraulic circuit of excavator

### 3.1 조이스틱

조이스틱은 작업자가 조작하는 레버 각도에 따른 파일럿 압을 MCV 스펴로 보내는 역할을 한다. Fig. 5에 조이스틱의 AMESim 모델을 나타내었다. 점선 사각형 내부의 회로가 그림 내부의 조이스틱 모양으로 대표된다. 조이스틱의 변위를 -1에서 1사이의 신호로 입력하게 되면 A 포트 혹은 B 포트에 파일럿 압이 인가되거나 탱크로 압이 빠져나간다.

Fig. 6(a)는 조이스틱에 인가되는 입력신호, (b)는 A,B 포트에서의 파일럿압력을 나타낸다. Fig. 6의 응답선도로터 지연시간 없이 입력신호에 대해 파일럿 압이 완벽히 부가되고 있음을 알 수 있다.

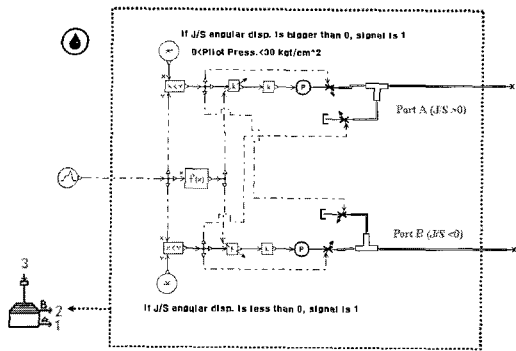
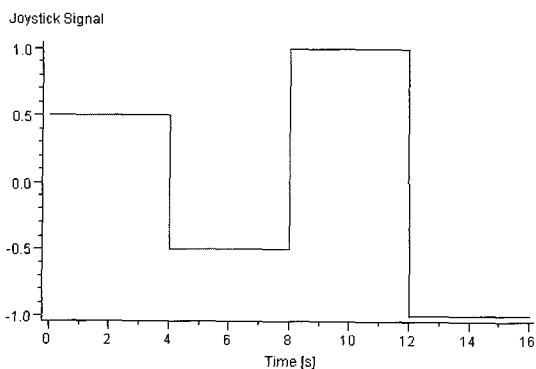
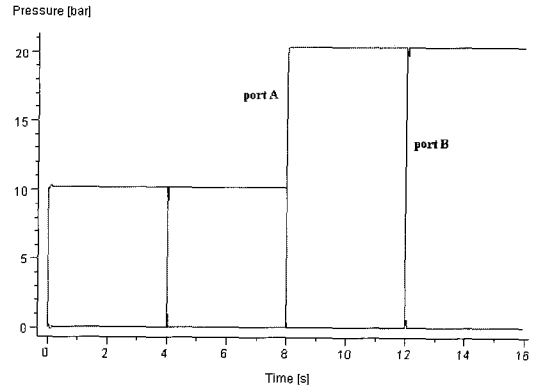


Fig. 5 AMESim model of joystick



(a) Input signal



(b) Pilot pressure at A, B port

Fig. 6 Result of joystick model

### 3.2 펌프

굴삭기의 펌프는 주 동력원 압력을 형성하기 위한 2개의 가변펌프와 파일럿 압력을 형성하기 위한 1개의 고정펌프로 구성되며 가변펌프의 경우 에너지 절감을 위한 정마력 제어를 행하게 되고 이를 P~Q 선도로 나타낸다. Fig. 7은 AMESim으로 모델링한 가변펌프 모델이다. 모델 내에 P~Q 선도를 텍스트 파일 형식으로 삽입하는 방법으로 모델링하였으므로 향후 다양한 P~Q 선도에 대한 펌프 모델에 대해 시뮬레이션이 가능하다. Fig. 8에 AMESim 모델의 결과로 P~Q 선도의 추종성능을 나타내었다. 실선이 삽입한 데이터이고 AMESim 모델의 결과는 점선으로 표현하였다.

### 3.3 붐1 밸브

붐 실린더의 방향과 속도를 결정하는 붐1 밸브는 바이패스 회로를 포함한 6 포트 3 위치 밸브이다. 스펴 변위에 대한 개구면적 선도인 개구선도는 불감대, 포화를 포함한 비선형적인 요소를 가지게 된다. 기존의 연구논문에서는 개구면적을 선형으로 모델링하거나 불감대 만을 포함한 경우만 있었지만 본 연구에서는 비선형적인 개구선도를 텍스트 형식으로 삽입하였다.

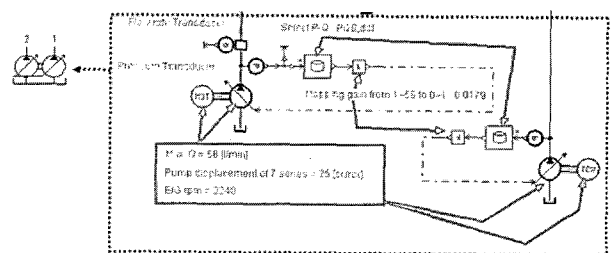


Fig. 7 AMESim model of pump

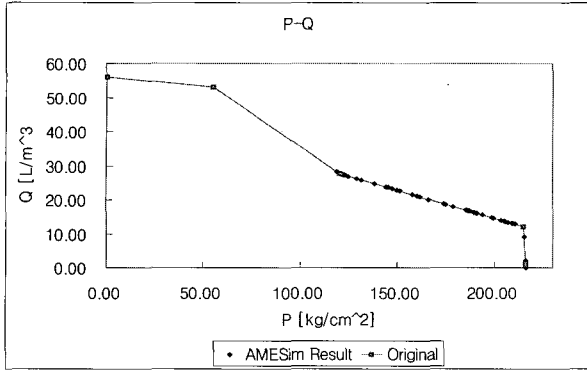


Fig. 8 Result of pump model

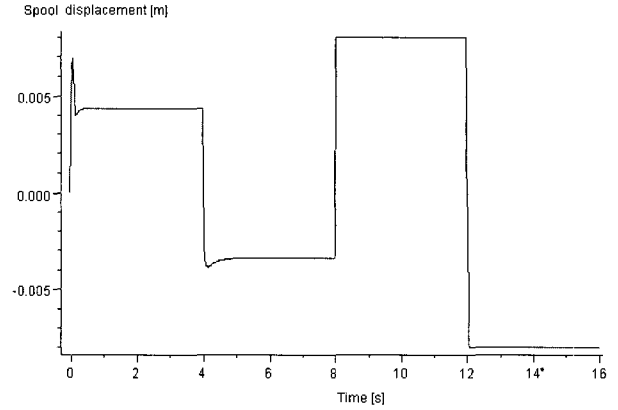


Fig. 11 Spool displacement at stiffness 17000 [N/m<sup>2</sup>]

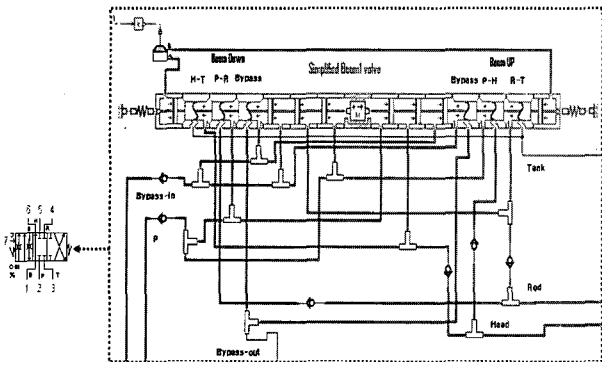


Fig. 9 AMESim model of Boom 1 valve

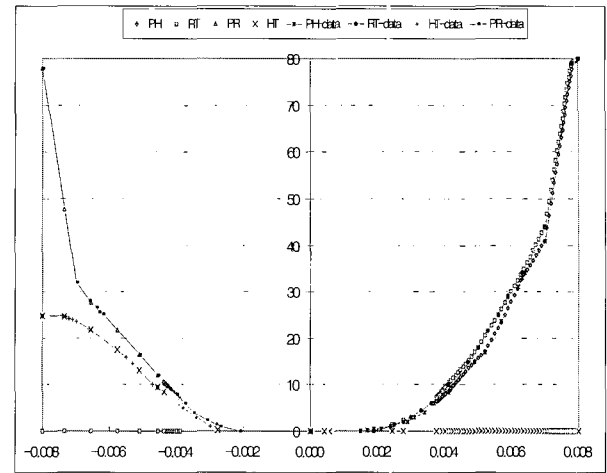


Fig. 12 Open area diagram of boom 1 valve

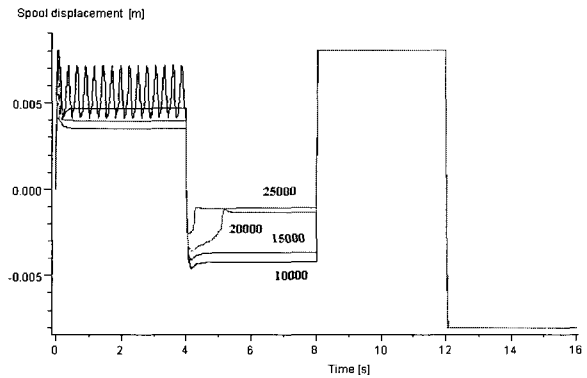


Fig. 10 Spool displacement in variable stiffness

Fig. 9는 AMESim으로 모델링한 붐1 밸브이고 점선 내의 회로가 좌측의 밸브 모양 내에 삽입되었다. 스톱의 변위가 파일럿 압력에 선형으로 비례하는 것이 요구되지만 개구선도가 좌우 비대칭이므로 붐 상승시와 하강시의 힘의 불균형이 예상된다. 좌우 스프링 상수를 조정하면서 스톱 변위를 살펴보았는데 결과는 Fig. 10과 같다.

밸브를 최대한 열 때는 스프링 상수 변화가 큰 영향을 미치지 못했으나 밸브를 반 정도만 열 경우에는 스프링 상수 변화에 민감한 반응을 보였다. 스프링

상수가 너무 낮을 경우 진동하는 경우도 있었고 붐 상승시와 하강시의 오차가 심하게 차이가 나는 것을 알 수 있었다. 가장 오차가 작을 때의 스프링 상수는 17000 [N/m<sup>2</sup>]이었고 이 때의 붐 1 밸브의 스톱 변위는 Fig. 11과 같다. 붐 상승시에는 0.316 [mm], 하강시에는 0.61 [mm]의 위치 오차를 보였다. 개구선도는 Fig. 12와 같다.

### 3.4 붐2 밸브

붐2 밸브는 붐 상승시에 부족한 유량을 보충하기 위한 역할만을 수행하므로 붐 하강시의 역할은 없다. 구축된 붐1 밸브와 구조적으로는 동일하며 개구선도만 다르게 표현되고 붐1 밸브와는 별개로 스프링 상수의 튜닝을 수행하였다. Fig. 13은 스프링 상수를 변화시켰을 때의 붐2 밸브의 스톱 변위이고 Fig. 14는 최종 선택된 20000 [N/m<sup>2</sup>]의 스프링 상수에서의 스톱 변위이다. 붐 상승 시 1.03 [mm]의 위치오차를 보였다.

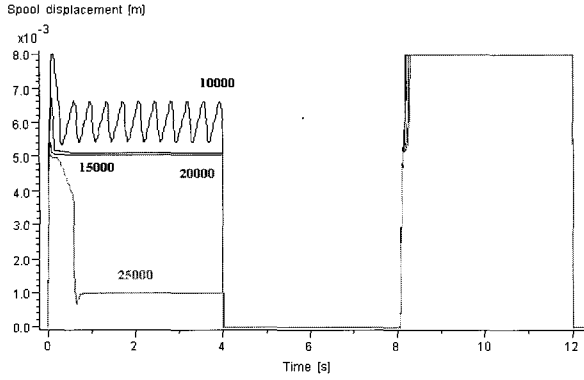


Fig. 13 Spool displacement in variable stiffness

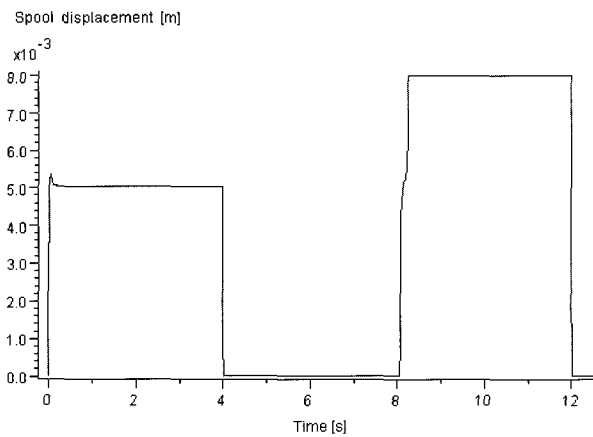


Fig. 14 Spool displacement at stiffness 20000 [N/m<sup>2</sup>]

### 3.5 암1 밸브

암1 밸브는 암의 운동을 담당하며 붐1 밸브와 구조적으로 동일하며 스프링 상수 튜닝을 행한 결과 스프링 상수를 20000 [N/m<sup>2</sup>]로 결정하였다. 암 덤프(arm dump)시 0.0534 [mm], 암 크라우드(arm crowd) 시 0.284 [mm]의 위치오차를 보였다.

### 3.6 버킷 밸브

버킷 밸브의 스프링 상수 튜닝을 행한 결과 스프링 상수를 26000 [N/m<sup>2</sup>]로 결정하였다. 버킷 덤프시 0.042 [mm], 버킷 크라우드 시에는 3.17 [mm]의 위치오차를 보였다. 버킷 밸브의 좌우 비선형성이 상당히 강해 버킷 크라우드 시는 원하는 입력과는 전혀 다른 결과가 나타났다.

### 3.7 MCV

앞 절에서 소개한 각 요소들을 결합한 전체 MCV를 Fig. 15에 나타내었다. 바이패스 회로를 통과한 유량은 탱크로 환원되며 Fig. 4의 원 유압회로도도 비교하여 크게 다르지 않은 모습이다. 붐, 암, 버킷

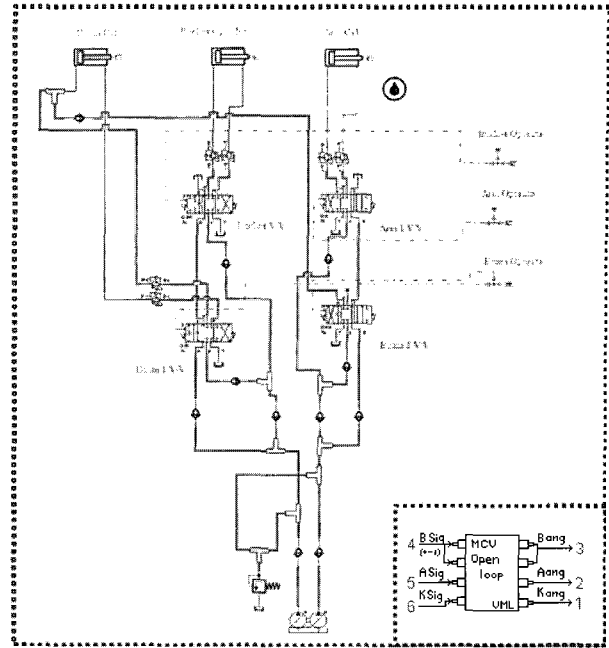


Fig. 15 AMESim model of MCV

의 조이스틱 각도를 -1과 1사이의 값으로 입력하면 작업장치 각 실린더에서 작업장치로 전달되는 힘이 출력된다. 또한 각 밸브 출력단에는 실린더 릴리프 회로를 구성하였다.

## 4. 전체모델 및 시뮬레이션 결과

2, 3장에서의 작업장치 동역학 모델과 유압회로 모델을 결합하여 최종적인 유압 굴삭기 모델을 Fig. 16과 같이 구성하였다.

각 단품에서의 스프링 상수 튜닝을 거쳤다고 하더라도 복합 동작시 단독 동작과는 상이한 결과를 볼 수 있었는데 이를 Fig. 17~19에 나타내었다.

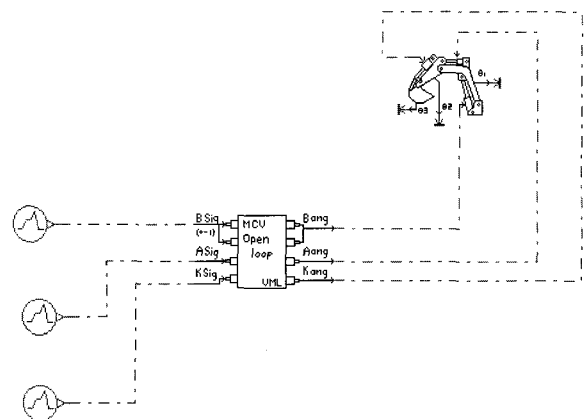


Fig. 16 AMESim model of excavator

붐, 암, 버킷을 동시에 50 [%] +방향으로 4초간, -방향으로 4초간, 100 [%] +방향으로 4초, -방향으로 4초간 작동했을 때의 결과이다. Fig. 17은 위의 조건으로 MCV를 작동했을 때 붐1, 붐2 밸브의 스톱 변위이다. 단독 동작에 비해 오차가 커진 것을 알 수 있고 이는 작업장치의 속도 변환에 따른 실린더 압력 변화가 MCV에 영향을 미친 것으로 생각된다. Fig. 18은 작업장치의 각변위를 나타내었고 Fig. 19는 붐 실린더 양 단의 압력이다.

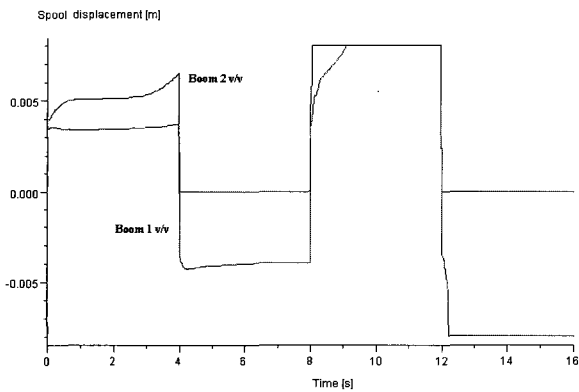


Fig. 17 Spool displacement of boom valves at complex work

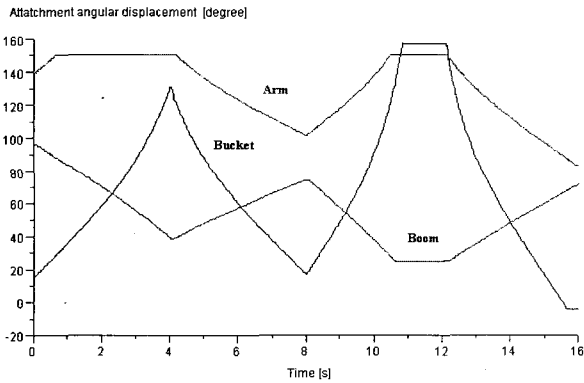


Fig. 18 Angular displacement of attachments

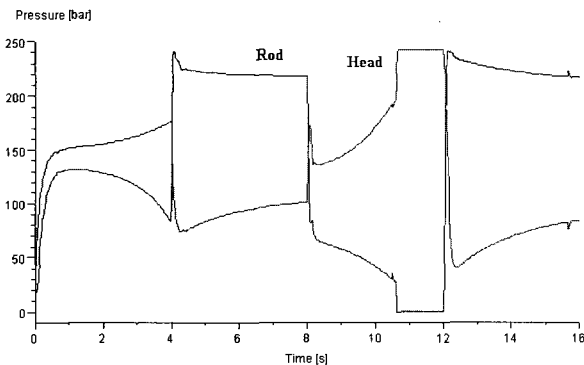


Fig. 19 Pressures in boom cylinder

## 5. 결 론

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

MCV 내의 각 밸브에 대한 스프링 상수 튜닝을 통한 최적 스프링 상수를 도출한 결과 붐1 밸브의 경우 0.61 [mm], 붐2 밸브는 1.03 [mm], 암1 밸브 0.284 [mm], 버킷 밸브의 경우 3.17 [mm]의 위치오차를 보였다. 이는  $\pm 8$  [mm]의 스톱 변위로서는 큰 오차이다. 따라서 스톱 변위량을 센싱하여 파일럿 압력과 선형으로 비례하는 페루프를 구성할 필요가 있다.

본 연구에서 구축된 굴삭기용 시뮬레이터는 다양한 조건에 대한 실차실험이 어려운 현실적인 한계를 극복할 수 있는 대안으로의 활용이 기대된다. 또한 새로운 제어 알고리즘이나 신규 개발 부품의 성능 예측에도 활용 가능하다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부-한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성 평가 연구 센터, (주)현대중공업의 지원에 의한 것입니다.

## 참 고 문 헌

- 1) T. R. Kane, "Dynamics : Theory and Applications", McGraw-Hill, 1985.
- 2) R. P. Paul, "Robot manipulators : Mathematics, Programming, and Control", The MIT Press, 1981.
- 3) J. Watton, "Fluid Power Systems, Prentice Hall, 1989.
- 4) "AMESim User's Manual", IMAGINE, 2000.
- 5) S. Y. Yang etc., "A Study on Trajectory Tracking Control of Field Robot", ICASE, Vol. 8, No. 9, 2002.
- 6) T. Morita and Y. Sakawa, "Modeling and Control of a Power Shovel", 計測自動制御學會文集, Vol. 22, No. 1, pp. 69~75, 1986.
- 7) "굴삭기 가상 기능품에 의한 실시간 모의 시험 시스템 개발", 서울대학교 연구보고서, 1999.