

## AMESim 을 이용한 유압 굴삭기용 Main Control Valve 의 동특성 해석에 관한 연구

임태형\*(울산대 대학원 기계·자동차공학과), 양순용(울산대 기계·자동차공학부),  
이병룡(울산대 기계·자동차공학부), 안경관(울산대 기계·자동차공학부)

### A Study on Analysis of Dynamic Characteristics of Main Control Valve for Hydraulic Excavator using AMESim

T. H. Lim(Department of Mechanical & Automotive Eng. UOU),  
S. Y. Yang, B.R, Lee, K, K, Ahn (School of Mechanical & Automotive Eng. , UOU)

#### ABSTRACT

The hydraulic excavator has been a popular research object for automation because of its multi-workings and economic efficiency. The objective of this paper is to design each components and to construct boom, arm, bucket circuit. These models modeled with AMESim show us change of variables and behavior of excavator. Simulation model will be used for simulator of excavator.

**Key Words** : Hydraulic Excavator (유압 굴삭기), AMESim (아메심), Main Control Valve(메인 컨트롤 밸브), Attachment (작업장치), Hydraulic Circuit (유압회로)

#### 1. 서론

유압 굴삭기(hydraulic excavator)는 인간의 팔을 닮은 기구학적 유연성과 유압 액츄에이터의 고출력으로 인해 기존의 건설현장뿐만 아니라 제조업, 농업, 해저작업 등 여러 분야로의 적용가능성이 가장 높은 기계이다. 굴삭기는 전체 건설기계 생산량의 60%를 상회하고 있는만큼 사용영역은 점차 확대되고 있다.

유압 굴삭기는 중부하 시스템인데다가 편로드 실린더의 비대칭성과 Valve 의 saturation, dead zone 등에 의한 비선형성이 강한 시스템이기 때문에 수학적 모델을 구축하는 것이 어렵다.

복잡한 유압 시스템의 모델링에 있어 각 component 의 모델링보다는 실험의 입출력 결과에 근거한 system identification 을 이용하여 모델링하기도 하지만 내부 파라미터의 변동을 관측하지 못하는 단점이 있다. 본 연구에서는 유압 해석용 S/W 인 AMESim 을 이용하여 유압 펌프, MCV 내의 각 밸브와 실린더, 작업 장치에 의하여 실린더에 부가되는 외력등에 대하여 각각을 모델링하고

전체 유압 회로에 대하여 시뮬레이션을 행한 결과와 실험 결과를 비교하여 AMESim 모델의 적합성을 확인하고 각 component 내부의 파라메타 변동을 관측함과 동시에 전체 시스템의 거동을 예측한다.

#### 2. 유압회로의 모델링

유압 굴삭기의 유압회로는 크게 펌프, MCV 블록, 실린더로 구성된다. 엔진에 의해 구동된 펌프는 메인 압력과 파일럿 압력을 형성하고 작업자가 레버를 조작하게 되면 파일럿 압력이 MCV 스톱을 움직임에 따라 메인압력이 실린더에 인가되어 각 작업장치를 구동한다.

본 논문에서 유압회로를 구성함에 있어 다음과 같은 가정을 하였다.

- (1) Bulk modulus 는 일정하다.
- (2) 온도에 따른 작동유의 밀도나 점도의 변화는 없다.
- (3) 유량이 전달되는 파이프 및 호스에서의 손실은 무시한다.
- (4) 작업범위는 붐, 암, 버킷의 2 차원 평면으로

한정하고 낙하방지를 위한 holding V/V 등 부가 회로를 제외한다.

위의 가정을 바탕으로 유압회로를 재구성하면 Fig.1 과 같다.

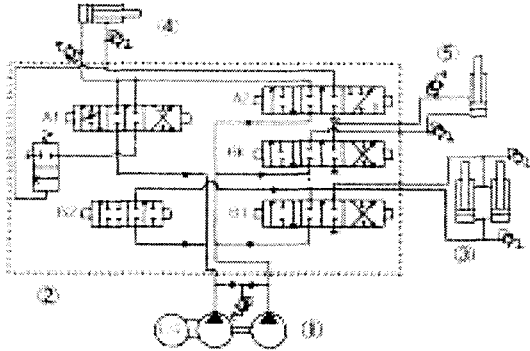


Fig.1 Simplified hydraulic circuit of hydraulic excavator

• 이 펌프, 붉은 사각형으로 나타난 • 카 MCV 블록, • • • 카 볼,압,버킷 실린더이다.

많은 유량을 필요로 하는 볼과 압 실린더의 경우 실린더의 움직임을 주로 제어하는 B1, A1 밸브 외에 B2, A2 밸브의 보조 밸브가 장착된다. 버킷 실린더는 큰 유량을 필요로 하지 않으므로 BK 밸브 하나로서 제어한다. 또한 압의 급격한 낙하를 방지하면서 부족한 유량을 공급하는 재생회로는 포함되었다.<sup>6)</sup>

이후 유압 회로 내의 각 component 들에 대해 유압 해석 상용 툴인 AMESim 을 이용하여 모델링을 행하고 모델을 조합하여 유압회로를 구성한다.

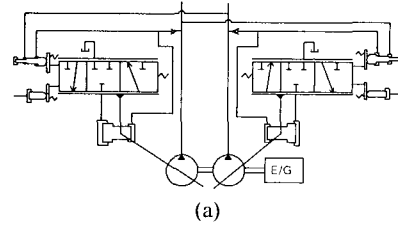
### 2.1 펌프

두 개의 가변펌프로부터 토출되는 유량은 전마력 곡선과 유량제어 곡선에 의해 제어된다.

Fig.2 (a)는 펌프의 사판각 제어에 있어 양 쪽 펌프의 토출구에서의 압력으로의 전마력 제어와 bypass 회로의 드레인 압력으로의 유량제어를 나타낸다. AMESim 을 이용하여 모델링한 펌프,레귤레이터 모델을 Fig.2 (b)에 나타내었다. 우측 상단의 기호는 전체 회로를 하나로 묶은 AMESim 내 super-component 이고 Figure 내의 숫자로 나타난 포트는 MCV 회로쪽으로서의 입력포트이다.<sup>7)</sup>

### 2.2 비례제어 밸브

자동굴삭 시스템을 위해서는 MCV 로의 파일릿 압력의 크기와 방향을 제어하는 기존의 유압식 조이스틱을 전기식 조이스틱과 비례제어 밸브로 대체하여야 한다.



(a)



(b)

Fig.2 Pump and Regulator

(a) Hydraulic symbol

(b) AMESim model and super-component

본 연구에서는 전기식 조이스틱의 각변위는 전류로써 직접 입력하고 비례제어 밸브는 전류를 입력으로 하여 파일릿 압력의 크기와 방향을 결정하는 4 port 3 position 밸브로 모델링하였고 AMESim 모델을 Fig.3 에 나타내었다.

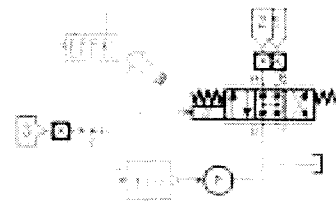


Fig.3 AMESim model of Electronic Proportional Valve

### 2.3 Main Control Valve

각 실린더를 주로 제어하는 B1, A1, BK 밸브와 부족한 유량을 보충해 주는 보조 밸브인 B2, A2 밸브의 스톱 변위에 대한 개구면적을 나타내는 개구선도로서 특성을 표현한다. 개구선도는 Fig.4 에 나타난 바와 같이 운전자의 feeling 과 작동성을 고려하여 넓은 영역의 dead zone 과 saturation 을 갖고 있고 dead zone 과 saturation 영역 이외의 개구면적 또한 강한 비선형성을 갖는데 이는 랜드와의 접촉 seat 면에 가공하는 notch 로 인해 발생한다.

### 2.3.1 Boom1 valve

각 밸브에 따라 개구선도는 모두 다르고 Fig.4 는 B1 밸브의 개구선도이다.

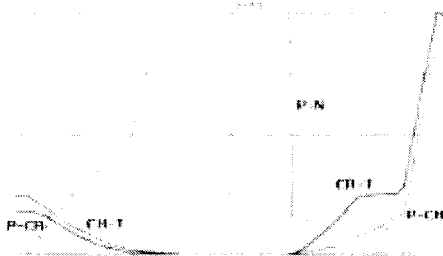


Fig.4 Open area vs stroke characteristic diagram of Boom1 valve

B1 밸브는 Fig.5 상단에 나타난 AMESim super-component 와 같이 5 개의 랜드를 가진 6 port 3 position 밸브로 모델링하였고 각 포트에 Fig.4 에 나타난 개구선도와 밸브 양 단의 spring 계수를 파일 형태로 삽입하였는데 이는 시뮬레이터로의 활용도를 높이기 위함이다.



Fig.5 AMESim model of Boom1 valve

### 2.3.2 Boom2 valve

B2 밸브는 붐 실린더의 부족한 유량을 보조해주는 역할을 하며 붐 상승시만 관여하고 하강시 역할은 없다. AMESim 모델을 Fig.6 에 나타내었다.

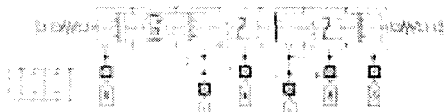


Fig.6 AMESim model of Boom2 valve

### 2.3.3 Arm1 valve

Fig.7 은 A1 밸브의 AMESim 모델이고 암의 급격한 낙하를 방지하고 Arm in 시 부족한 유량을 보충하기 위한 재생회로가 있다.

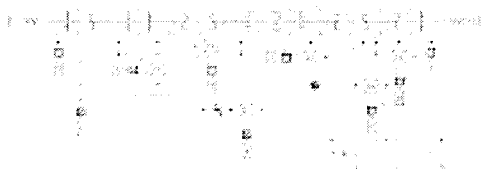


Fig.7 AMESim model of Arm1 valve

### 2.3.4 Arm2 valve

재생회로의 유량보충을 보조하는 역할을 하며 AMESim 모델은 Fig.8 이다.

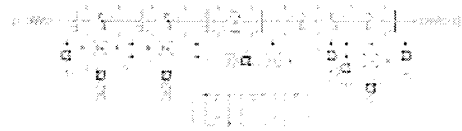


Fig.8 AMESim model of Arm2 valve

### 2.3.5 Bucket valve

버킷 밸브는 구조적으로 붐 1 밸브와 동일하며 개구선도만 다르다.

### 2.4 실린더

붐은 두 개의 편로드 실린더, 암과 버킷은 하나의 편로드 실린더로 모델링 되었고 컬럼 마찰력과 leakage 는 무시되었다.

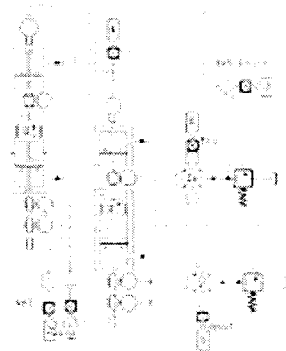


Fig.9 AMESim model of Boom cylinder

### 2.5 전체 유압회로

앞에서의 각 component 들을 이용하여 Fig.1 의 유압회로를 AMESim 모델로 재구성하면 Fig.10 과 같다.

## 3. 실린더 외력

실린더가 움직임에 따라 작업장치는 각 링크를 중심으로 회전운동을 하게 되고 회전운동에 의한 각변위에 의한 작업장치의 무게가 실린더에 외력으로 작용하게 된다.

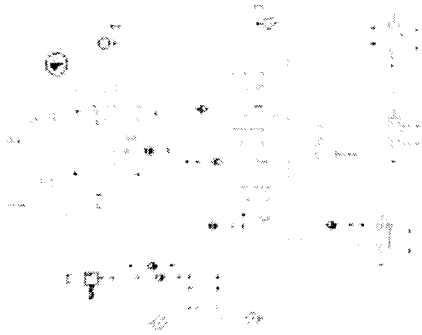


Fig.10 AMESim model of hydraulic circuit of hydraulic excavator

### 3.2 Cylinder Force

각 작업장치의 위치에 따라 각각의 무게에 의해 각 실린더로 전달되는 외력을 실린더에 인가하는데 붐 실린더로의 외력은 붐 무게로 인한 힘, 암 무게로 인한 힘, 버킷 무게로 인한 힘의 합이고 이를 Fig.11 에 나타내었다.

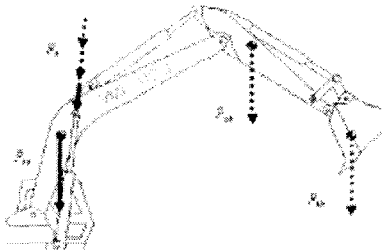


Fig. 11 Cylinder force of boom cylinder

$$F_b = F_{bb} + F_{ab} + F_{kb}$$

여기서  $F_{bb} = m_b g \cos \eta_{bb}$  는 붐 무게로 인해 붐 실린더로 가해지는 힘이고  $\eta_{bb}$  는 지면과 수직으로 작용하는 무게로 인한 힘방향과 붐 실린더 방향과의 각도이다.

### 4. 컴퓨터 시뮬레이션 결과

AMESim 을 이용하여 모델링된 유압회로를 검증하기 위해 실제 실험결과와의 비교를 행하였고 작업조건은 다음과 같다.

1. 붐 단독작업
  - 암과 버킷 고정하고 4 초간 붐 상승 후 4 초간 붐 하강.
2. 암 단독작업
  - 붐과 암을 고정하고 4 초간 Arm -in 후 4 초간 Arm-out.
3. 버킷 단독작업

- 붐과 암을 고정하고 4 초간 Bucket-in 후 4 초간 Bucket-out.  
위 세 가지 조건에 대해 실차실험과 시뮬레이션의 결과를 Fig.12~Fig.13 에 나타내었다.

Fig.12 는 붐 단독작업 결과로서 (a)는 붐 관절에서의 각변위이다. B1 밸브의 개구선도가 Fig.4 와 같이 상승시와 하강시가 다르고 편로드 실린더의 특성상 같은 시간동안 구동하였다 해도 실린더가 원위치로 오지 않음을 알 수 있다. AMESim 모델 결과에는 나타나지 않는 실험결과와 4 초 부근에서의 진동은 암관절과 버킷관절에서의 큰 유격으로 인한 것이다. (b)는 B1, B2 밸브의 스톱 변위이다. B1 밸브는 파일릿 압력과 스톱 끝단의 스프링력으로 인해 변위가 끝까지 가지 않지만 B2 밸브는 B1 밸브와는 다른 스프링력으로 인해 변위가 끝단까지 이동하고 있고 B2 밸브는 상승시만 작동하므로 하강시는 변위가 0 이다.

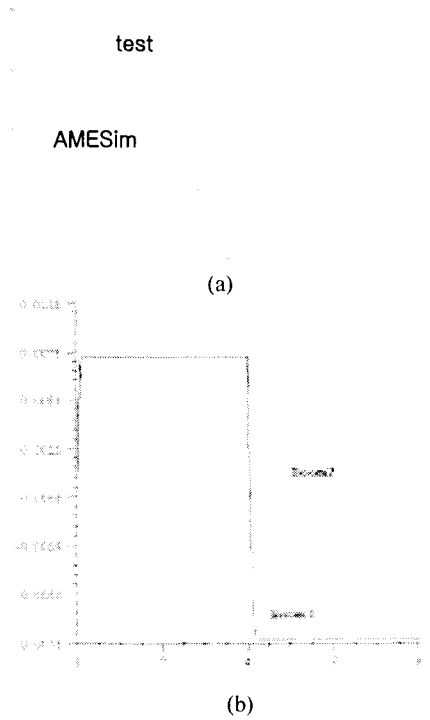


Fig.12 Simulation Results of Boom (a) angle at boom joint (b) spool displacements

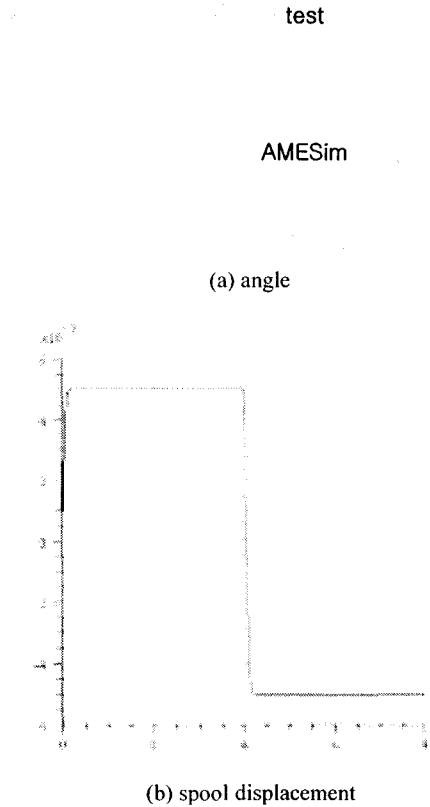


Fig.13 Simulation Results of Bucket  
 (a) angle at bucket joint (b) spool displacement

Fig. 13 은 버킷 단독동작에 대한 결과로 (a)는 버킷 관절변위에 대해 실험결과와 AMESim 모델을 비교하였다. 버킷 동작은 붐과 압의 영향을 받지 않는 단독동작이므로 붐 동작에서 나타난 진동 등은 나타나지 않는다. (b)는 버킷 밸브 스펴변위이다.

### 5. 결론 및 고찰

자동 및 지능굴삭 시스템의 제작의 선행연구로서 굴삭기의 유압 component 들을 각각 유압 해석 툴인 AMESim 을 이용하여 모델링하고 회로를 구성하여 시뮬레이션을 행한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 유압 굴삭기의 작업장치를 움직이기 위한 유량을 토출하는 가변펌프, 붐, 압, 버킷으로의 유량을 제어하는 MCV 블록 내의 각 밸브, 붐, 압, 버킷 실린더, MCV 를 제어하기 위한 EPPR 밸브에 대한 AMESim 용 모델을 얻었다.

2. 붐, 압, 버킷의 회로를 각각 구성하여 시뮬레이션을 행한 결과 실제와 유사한 거동을 얻을 수 있

었고 그 때의 밸브의 거동, 실린더 양 단의 압력 등 유압회로 내부에서의 파라미터들의 거동을 관측할 수 있었다.

3. 펌프의 유량제어 선도, 개구선도 등을 파일의 형태로 입력함으로써 향후 이들의 변화에 의한 내부의 변화나 전체 시스템의 변화를 예측할 수 있는 시뮬레이터로의 활용이 예상된다.

### 후기

본 연구는 과학기술부-한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성 평가 연구 센터 지원에 의한 것입니다.

### 참고문헌

1. T. Morita, Y. Sakawa, "Modeling and Control of a Power Shovel", 計測自動制御學會論文集, Vol.22, No.1, 1986.
2. J.Y,Heo," 가변구조 제어를 이용한 유압굴삭기의 자동화에 관한 연구", 부산대 박사논문, 1989.
3. S.Y.Yang etc. "A Study on Trajectory Tracking Control of Field Robot", ICASE, Vol8, No.9, 2002.
4. S.Y.Yang etc. "A Study on Trajectory Tracking Control of Field Robot using Model Reference Adaptive Control", Fifth JFPS International Symposium on Fluid Power Nara 2002
5. 최중환, 김승수, 양순용, 이병룡, 안경관, "필드로봇의 궤적 추종에 대한 강인제어", 한국정밀공학회, 2002.
6. "Service manual for 21 [ton] excavator", H社.
7. "AMESim user Manual", IMAGINE, 2000.
8. 하석홍, 광동훈, 이진걸, "굴삭기의 엔진/펌프 시스템의 모델링 및 제어", 자동제어학회논문집, 1991.
9. 안성일, "비례 방향제어 밸브로 구동되는 편로드 유압 실린더의 적응제어", 홍익대 석사논문, 1996.
10. Herbert E. Merritt, "Hydraulic control system", John Wiley & Sons, 1967.
11. Phillip John McKerrow, "Introduction to Robotics", ADDISON WESLEY, 1994.
12. John Watton, "Fluid Power System", Prentice Hall, 1989