

유압 굴삭기용 페루프 타입 MCV(Main Control Valve)

임태형*(울산대 대학원 기계자동차공학과), 이홍선(현대중공업),
양순용(울산대 기계자동차공학부)

Closed loop type MCV(Main Control Valve) for Hydraulic Excavator

T. H. Lim(Mecha. & Automotive Eng. Dept. UOU), H. S. Lee(Construction Equipment Dept. HHI),
S. Y. Yang(Mecha. & Automotive Eng. UOU)

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. From the simulation results, fixed spring stiffness of MCV can satisfy accuracy of spool displacement under whole P-Q diagrams. Closed loop type MCV containing 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 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.

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

1. 서론

유압 굴삭기는 다양한 종류의 작업에 대한 높은 적용성과 경제성으로 인해 건설현장뿐 아니라 제조업, 농업, 해저영역 등 활동영역은 점점 확대될 것으로 예상되는 복합 기기이다. 한편 굴삭기를 이용하여 수행하는 평탄 작업, 덩땅 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.

작업 환경의 개선 및 작업 효율 향상, 작업 편의성 및 안전 등의 요구조건들을 만족시킬 수 있는 방법 중 하나가 굴삭기의 자동화이고 이에 대한 많은 연구들이 이루어져 왔다. 캐나다의 British Columbia 대학이나 미국의 Carnegie Mellon 대학, 호주의 Sydney 대학 등이 있고 건설기계 업체들은 해외나 국내의

회사들 대부분이 자동굴삭기의 시제품 및 부분적인 제품화가 이루어져 있다. 여기에 서론을 입력하십시오. 여기에 서론을 입력하십시오. 자동굴삭에 대한 연구를 살펴보면 전체 논문의 약 56%가 굴삭기의 주행, 선회를 제외한 작업장치(붐, 암, 버킷)의 운동방정식 구축 및 제어기 개발에 집중되어 있고 이 연구의 대부분의 공통점은 유압회로에 대해서는 MCV 개구선도, 복잡한 유압회로, 펀로드 실린더를 저차식으로 모델링하고 작업장치에 대해서는 Lagrange equation에 기초한 운동방정식을 도출한 것인데 이는 실시간 제어를 위한 것으로 보인다. 따라서 굴삭기의 제어 알고리즘 개발은 반드시 실차실험이 필요하지만 일정 및 비용, 장소 등 여러 한계가 있다.

본 연구에서는 유압굴삭기용 HILS 구축의 선행 연구로 상용 S/W인 AMESim을 이용하여 작업장치와 유압회로를 모델링하였다. 시뮬레이션을 행한 결과 기존의 MCV의 고정화된 스프링 상수로는 모든 PQ선

도에서의 스펙 변위 오차가 클뿐 아니라 방향성에 따른 오차의 정도도 심함을 확인하였다.

본 논문에서 페루프 타입의 MCV를 제안하고 기존 모델과의 차이를 제시하였다. 간단한 비례 게인만으로 구성된 페루프만으로도 기존 모델에 비해 밸브 스펙 변위를 줄일 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통해 구축된 AMESim 모델은 단품개발시 혹은 제어기법의 적용시 일종의 시뮬레이터로서의 역할이 기대되고 이에 따라 신모델 개발시 시간적, 비용적인 절감이 예상된다.

2. 작업장치 모델

유압 굴삭기는 크게 세 가지 부분으로 나뉘는데 상부채(Upper Frame), 하부채(Lower Frame)와 작업장치(Attachment)이다. 운전실과 동력원인 엔진, 유압원인 펌프, 실린더 및 모터로 메인압력을 보내 주는 MCV는 상부채에 위치하고 붐, 암, 버킷으로 이루어지는 작업장치는 상부채 끝단에 장착된다. 주행을 위한 모터와 무한궤도 또는 바퀴가 장착된 하부채는 굴삭기의 이동을 담당한다. 또한 스윙 모터에 의해 상부채가 회전하게 된다.

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

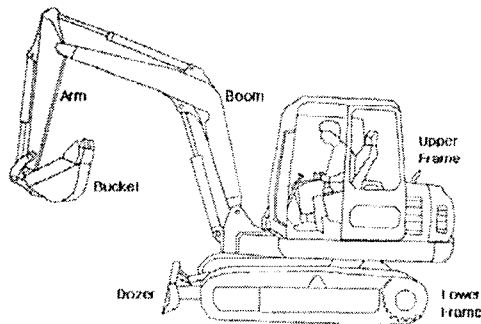


Fig. 1 A hydraulic excavator

2.1 작업장치 모델링

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

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

여기서 $H_{ij} \ddot{q}_j (j \neq i)$ 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 $G_i = \sum_{j=1}^n m_j g^T J_L^{(j)}$ 는 중력토크이다.

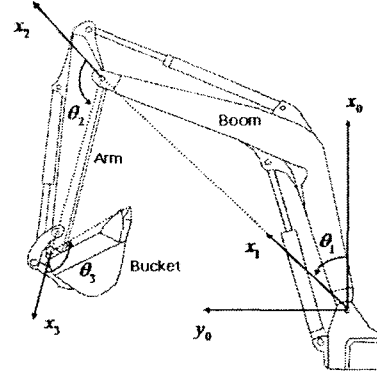


Fig. 2 Coordinates system

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.

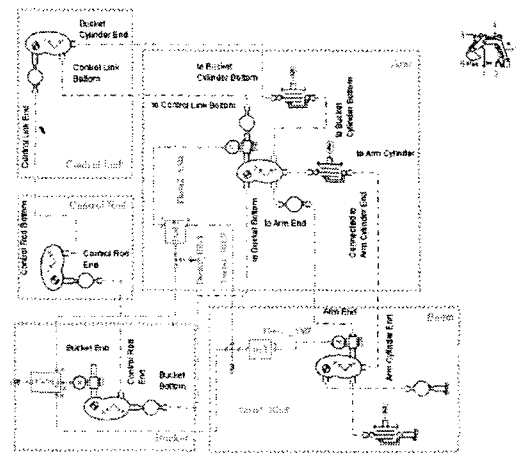


Fig. 3 AMESim model of attachment

3. 유압회로 모델

동력원인 엔진이 펌프를 구동하여 실린더를 작동시키기 위한 메인 압력과 MCV의 스펙 동작을 위한 파일럿 압력을 생성하게 된다. 운전자가 유압식 조이스틱 및 레버를 작동시키면 파일럿 압력이 MCV의 스펙을 작동시켜 실린더로의 메인 유량의 크기와 방향을 결정한다. 작업을 붐, 암, 버킷의 2차원으로 한정하면 유압회로도 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.

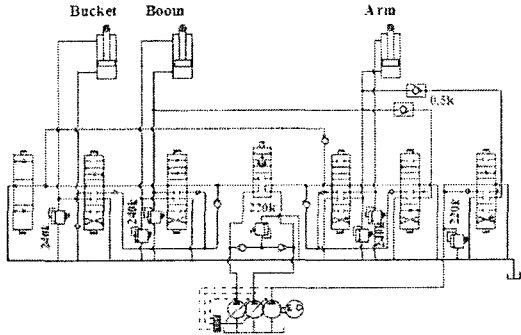


Fig. 4 Hydraulic circuit of excavator

3.1 조이스틱

조이스틱은 작업자가 조작하는 레버 각도에 따라 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 1 사이의 신호로 입력하게 되면 A 포트 혹은 B 포트에 파일럿 압이 인가되거나 탱크로 압이 빠져나간다.

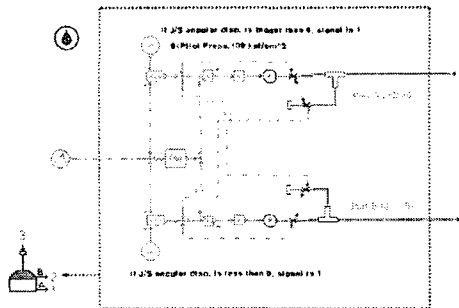
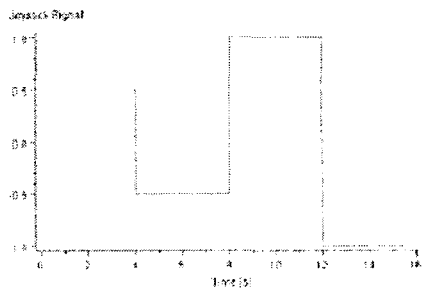
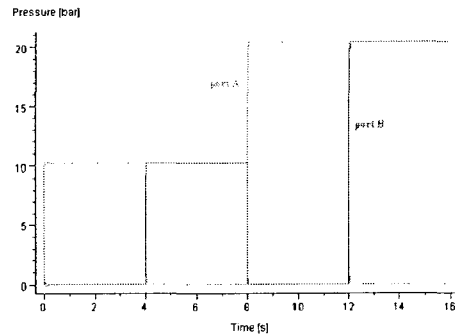


Fig. 5 AMESim model of joystick

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.



(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-Q선도로 나타낸다. Fig. 7은 AMESim으로 모델링한 가변 펌프 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.

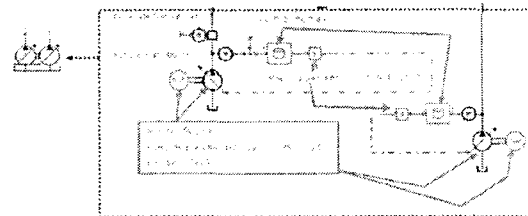


Fig. 7 AMESim model of pump

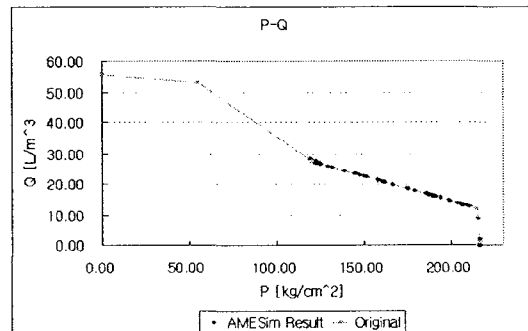


Fig. 8 Result of pump model

3.3 붐1 밸브

붐 실린더의 방향과 속도를 결정하는 붐1 밸브는 바이패스 회로를 포함한 6 포트 3 위치 밸브이다. 스

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

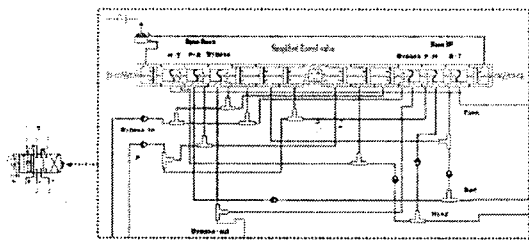


Fig. 9 AMESim model of Boom 1 valve

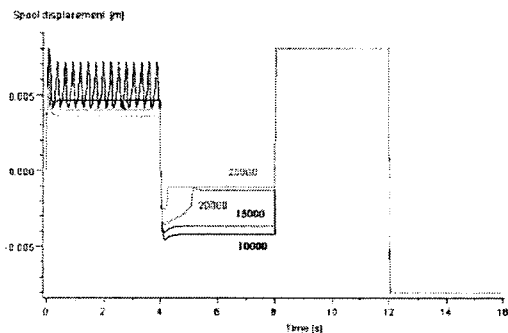


Fig. 10 Spool displacement in variable stiffness

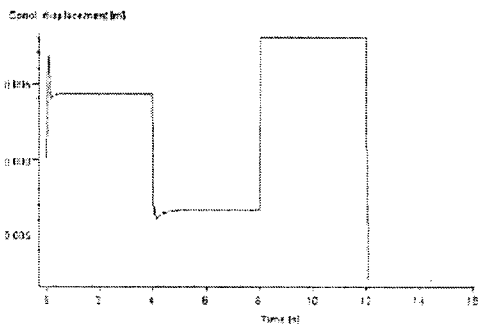


Fig. 11 Spool displacement at stiffness 17000 [N/m²]

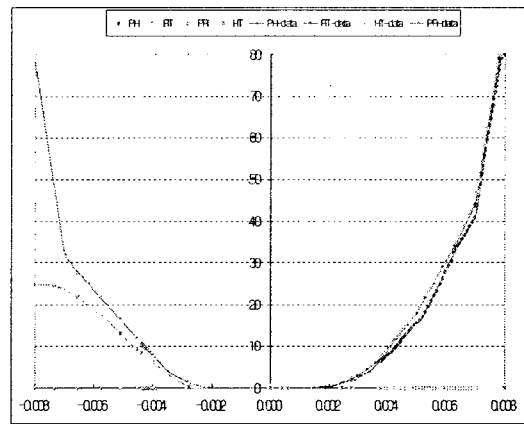


Fig. 12 Open area diagram of boom 1 valve

밸브를 최대한 열 때는 스프링 상수 변화가 큰 영향을 미치지 못했으나 밸브를 반 정도만 열 경우는 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/m²]이었고 이 때의 붐 1 밸브의 스프링 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 스프링 변위이고 Fig. 14는 최종 선택된 20000 [N/m²]의 스프링 상수에서의 스프링 변위이다. 붐 상승 시 1.03 [mm]의 위치오차를 보였다.

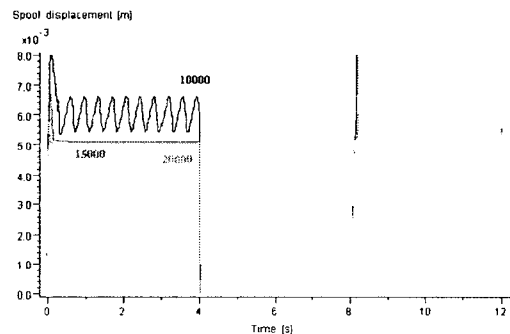


Fig. 13 Spool displacement in variable stiffness

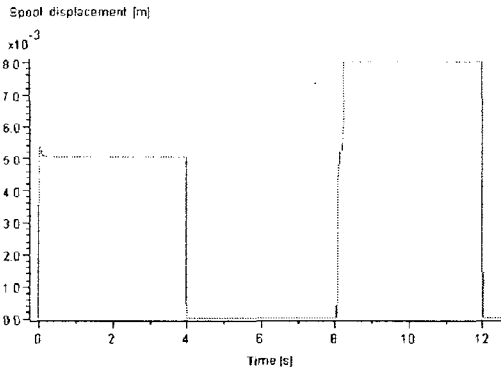


Fig. 14 Spool displacement at stiffness 20000 [N/m²]

3.5 암1 밸브

암1 밸브는 암의 운동을 담당하며 붐1 밸브와 구조적으로 동일하며 스프링 상수 튜닝을 행한 결과 스프링 상수를 20000 [N/m²]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/m²]로 결정하였다. 버킷 덤프시 0.042 [mm], 버킷 크라우드 시에는 3.17 [mm]의 위치오차를 보였다. 버킷 밸브의 좌우 비선형성이 상당히 강해 버킷 크라우드시는 원하는 입력과는 전혀 다른 결과가 나타났다.

3.7 MCV

3.7.1 MCV

앞 절에서 소개한 각 요소들을 결합한 전체 MCV를 Fig. 15에 나타내었다. 바이패스 회로를 통과한 유량은 탱크로 환원되며 Fig. 4의 원 유압회로도 와 비교하여 크게 다르지 않은 모습이다. 붐, 암, 버킷의 조이스틱 각도를 -1과 1사이의 값으로 입력하면 작업장치 각 실린더에서 작업장치로 전달되는 힘이 출력된다. 또한 각 밸브 출력단에는 실린더 릴리프 회로를 구성하였다.

3.7.2 Closed loop type MCV

3.7.1절의 MCV 모델의 경우 실차의 거동 및 변수의 변화를 살펴보는 시뮬레이터로서의 의미가 있다고 한다면 조이스틱에서의 파일럿 압력에 대한 밸브의 스톱 변위가 방향에 따라 완전 선형이지 않고 오차가 크므로 성능을 개선할 필요가 있다. 하지만 스프링 상수가 고정인 경우 최적값을 선택한다 하더라도 개구면적의 비대칭성으로 인해 완전 선형이 되지 못하므로 파일럿 압력과 밸브 스톱 변위의 선형화 및 오차를 줄이기 위해 파일럿 압력을 입력으로 하고 스톱 변위값을 Feed back 받는 간단한 폐루프 회로를 구성한 밸브와 결과값을 붐1 밸브를 대표로

기술한다. 폐루프를 포함한 Closed loop type 붐1 밸브를 Fig. 16에 나타내었다. 3.7.1절의 MCV와 다른 점은 밸브 스톱의 변위를 측정하는 변위 센서를 장착하여 Feed back하고 상수의 비례 게인값이 포함된 폐루프이다. 비례게인값을 10, 50, 100으로 변화시켰을 때의 스톱 변위를 Fig. 17에 나타내었다. Open loop type 붐1 밸브의 경우 붐 업시 0.316, 붐 다운시 0.61[mm]이던 변위 오차를 보였던 것과 비교하여 비례 게인값 100에서 최대오차가 0.037[mm]로 상당히 줄어들었고 붐 업, 다운에 관계없이 오차가 일정함을 알 수 있다.

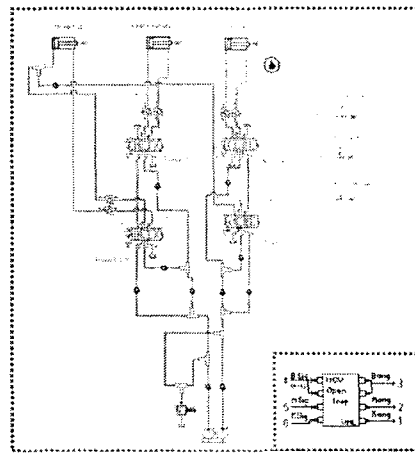


Fig. 15 AMESim model of MCV

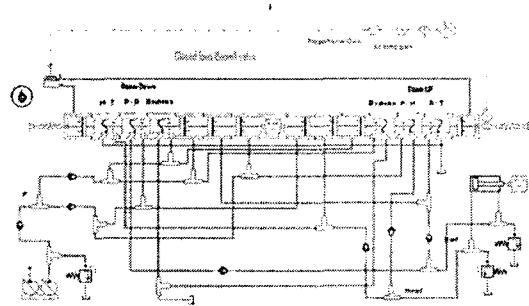


Fig. 16 Closed loop type Boom 1 valve circuit

4. 전체 모델 및 시뮬레이션 결과

본 장에서는 2,3장에서 구축된 작업장치 모델과 유압회로의 단품 모델을 결합하여 완성된 유압 굴삭기 모델을 소개하고 Open loop type MCV와 Closed loop type MCV의 시뮬레이션 결과를 비교, 분석한다. Open loop type MCV가 장착된 유압 굴삭기 모델의 전체 모습을 Fig. 18에 나타내었다. 시뮬레이션 결과를 Fig. 19-Fig. 22에 나타내었다. Fig. 19와 같은 조이스틱 입력을 가할 때 MCV 블록 내의 각 밸브

스풀 변위를 Fig. 20에, 각 실린더 내의 압력을 Fig. 21에, 작업장치의 각변위를 Fig. 22에 나타내었다.

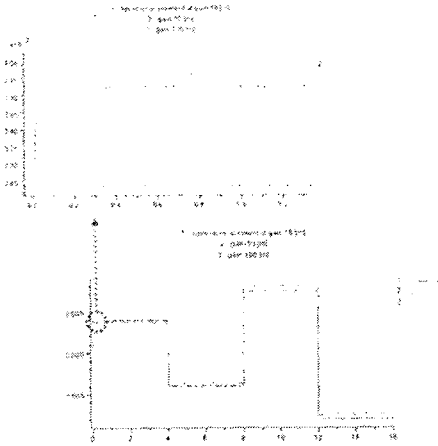


Fig. 17 Spool displacement in variable stiffness

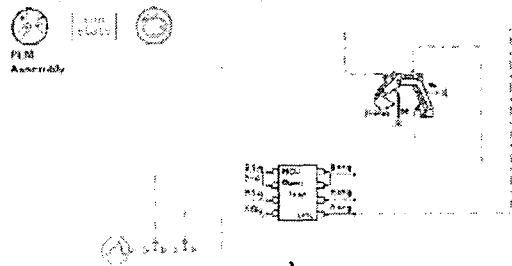


Fig. 18 Excavator model with Open loop type MCV

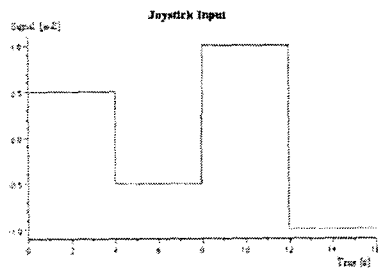
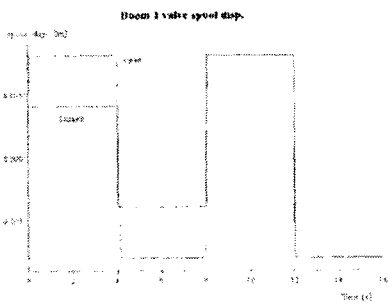
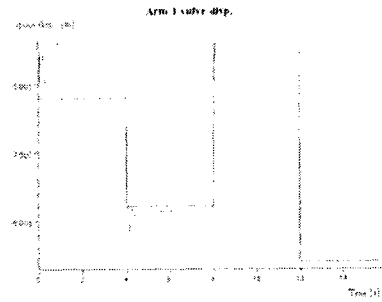


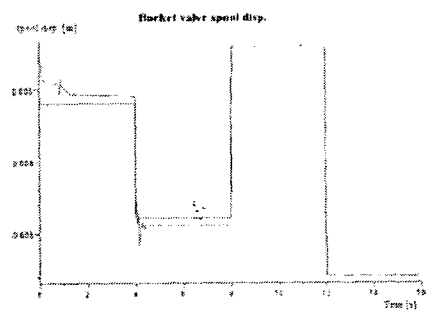
Fig. 19 Joystick input



(a) Boom1 valve

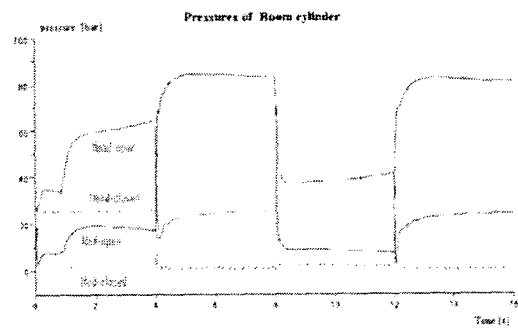


(b) Arm1 valve

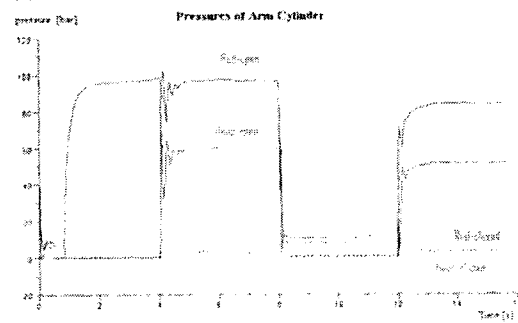


(c) Bucket valve

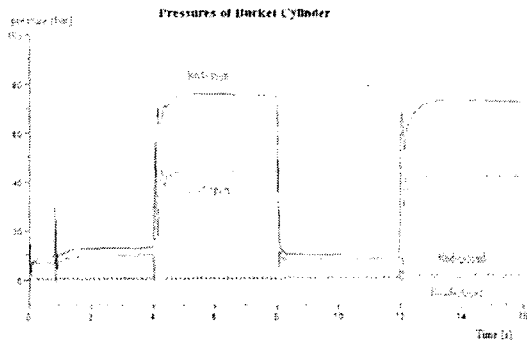
Fig. 20 Spool displacement of MCV



(a) Boom cylinder



(b) Arm cylinder



(c) Bucket cylinder
Fig. 21 Pressures of each cylinder

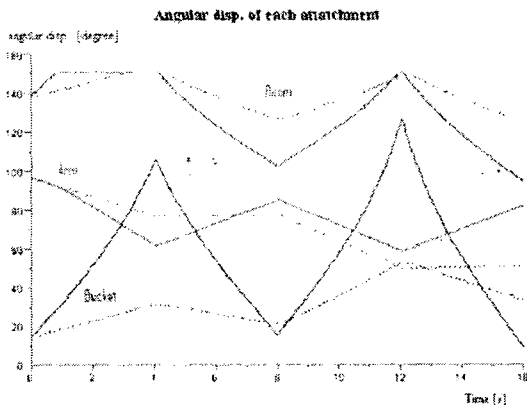


Fig. 22 Angular displacement of attachment

5. 결론

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 ± 8 [mm]의 스톱 변위로서는 큰 오차이다. 따라서 스톱 변위량을 센싱하여 파일럿 압력과 선형으로 비례하는 페루프를 구성한 결과 방향에 상관없이 최대오차를 0.037 [mm]까지 줄일 수 있었다. 하지만 작업자가 조이스틱을 통해 느끼는 Feeling 부분에 대해서는 기존의 MCV의 경우 개구 선도의 변화를 통해 최적화된 반면 Closed loop type MCV의 경우 실차에서 검증되지 않아 장담할 수 없는 상태이므로 향후 Feeling 측면에서의 튜닝이 필요하다. 또한 한 가지 경우의 P-Q 선도에 대해서만 시뮬레이션이 진행되었으므로 모든 경우의 P-Q 선도

에 대한 시뮬레이션을 통해 최적 스프링 상수값을 찾아낼 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.

후기

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

참고문헌

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, Vol8, No.9, 2002.
6. T. Morita and Y. Sakawa, "Modeling and Control of a Power Shovel", 計測自動制御學會論文集, Vol. 22, No.1, pp.69~75, 1986.
7. "굴삭기 가상 기능품에 의한 실시간 모의 시험 시스템 개발", 서울대학교 연구보고서, 1999.