

MCV의 기능밸브를 고려한 굴삭기의 실시간 시뮬레이션 Real-Time Simulation of an Excavator Considering the Functional Valves of the MCV

임용현¹ · 이상욱² · 조민기³ · 신대영⁴ · 황성호^{1*}

Yong-Hyeon Im¹, Sang-Wook Lee², Min-Gi Cho³, Dae-Young Shin⁴, and Sung-Ho Hwang^{1*}

Received: 19 Sept. 2019, Accepted: 17 Oct. 2019

Key Words : Excavator(굴삭기), Main Control Valve(주제어밸브; MCV), Functional Valve(기능밸브), Real-time Simulation(실시간 시뮬레이션), Hydraulic System(유압시스템)

Abstract: In this paper, a real-time simulation model of an excavator using Amesim was proposed, considered the operation of functional valves with the main control valve (MCV). The hydraulic system models including the pump and MCV have been developed. The kinematic and dynamic models of the manipulator have also been developed, to confirm the behavior of the excavator. The MCV model includes various functional valves such as the regenerative valves, holding valves, swing and boom priority valves, and regen-cut valves so that simulations similar to real excavators can be performed. Additionally, to obtain the real-time calculation performance, the parts with no major influence on the dynamic behavior were simplified, high frequency factors were removed, and parameters were optimized. The models were compared with each other through the numerical analysis with variable time-step and fixed time-step, and the results were verified by comparison with the results of the actual vehicle tests

1. 서 론

최근 굴삭기는 에너지 효율 및 작업 성능 향상, 작업자의 안전 및 편의성, 자동화 등 사용자의 다양한 요구에 직면하고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 부품 개발, 제어 로직 개발, 기존 시스템의 구조 개선, 새로운 시스템 개발 등 다양한 형태의 연구개발이 진행되고 있다. 이러한 개발 과정에서 실차를

이용한 시험 평가는 비용과 장소, 시간 등의 제약 조건이 생기는 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 실제 차량의 제원과 작동 방식을 반영한 시뮬레이션 모델을 이용하거나, 실제 차량과 유사한 환경을 제공하는 가상 시뮬레이터를 이용해 실차 시험 평가를 대체하고 있다.¹⁻²⁾

이러한 시뮬레이션 또는 가상 시뮬레이터를 이용하는 경우 실제 차량의 제원과 구조를 반영하여 실제 차량의 거동과 유사한 정확도를 보이는 모델을 사용해야 한다. 또한 해석 시간과 실제 차량의 동작 시간이 동일한 실시간성을 갖추고 있는 모델을 사용해야 한다.

따라서 본 연구에서는 MCV의 기능밸브를 포함한 굴삭기의 실시간 시뮬레이션 모델을 제안하고자 한다. 시뮬레이션 모델 구축을 위하여 MCV 및 펌프와 같은 유압 시스템과 작업장치의 모델링을 수행하였다. MCV 모델 구성 시, 액추에이터 제어에 사용되는 스플 밸브와 함께 홀딩 밸브, 봄/선회 우선작동밸브, 암 재생컷 밸브 등의 기능 밸브도 반영하였다. 또한

* Corresponding author: hsh0818@skku.edu

1 Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

2 Control Software Group, ControlWorks, Inc., Seoul 06222, Korea

3 Construction Equipment Technology R&BD Group, KITECH, Gyeongsan 712-901, Korea

4 Heat Treatment Technology R&BD Group, KITECH, Siheung 15014, Korea

Copyright © 2019, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

실제 굴삭기의 유압 회로를 반영하여 붐과 암의 재생 회로를 구성하였다. 그리고 시스템의 간소화와 고주파수 인자 제거, 각종 파라미터의 최적화 과정을 통해 모델의 실시간 연산 성능을 확보하였다. 제안된 실시간 시뮬레이션 모델은 Amesim을 통해 구성되었으며, 모델의 정확성 및 실시간성은 실차 시험 결과 데이터와의 비교를 통해 검증하였다.

2. 모델링

MCV는 바이패스 라인을 기준으로 모든 제어 밸브가 병렬 연결되어 여러 작업을 동시에 수행할 수 있다. Fig. 1은 굴삭기의 작동유 순환을 보여주는 개략적인 회로도도를 나타낸다. 펌프에서 토출된 유량은 MCV 내 제어 밸브의 변위에 따라 밸브와 연결된 액추에이터로 분배된다. 밸브가 중립일 때 작동유는 바이패스 라인을 통과해 탱크로 회수된다.³⁾

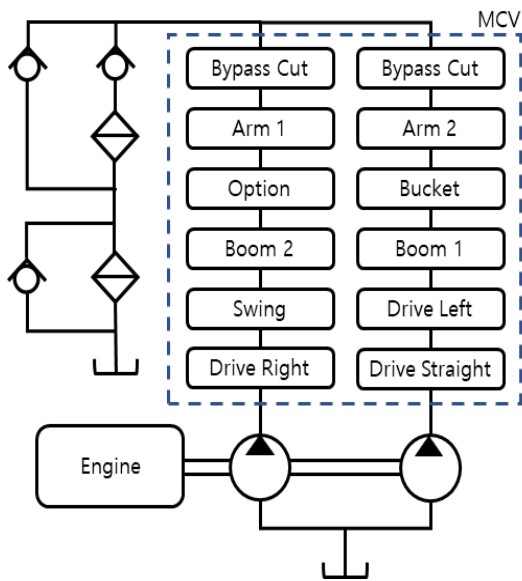


Fig. 1 Hydraulic circuit of excavator

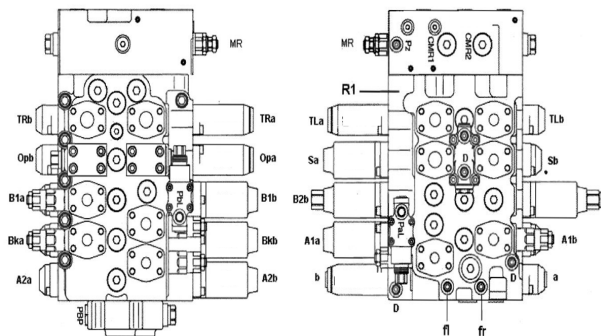


Fig. 2 Configuration example of MCV³⁾

Fig. 2는 MCV의 구조 예시를 나타낸 것이다. 본 논문의 모델링 대상은 20톤급 굴삭기로서, 대상 굴삭기의 MCV는 Fig.2에 나타난 것과 유사하게 붐과 암 실린더의 제어 밸브가 2개씩 부착되어 있으며, 버킷, 선회, 좌우 주행제어 밸브는 각각 1개씩 부착되어 있다.

3. 굴삭기 시스템 모델링

Fig. 3은 20톤급 굴삭기의 실시간 시뮬레이션 모델을 나타낸 것이다.

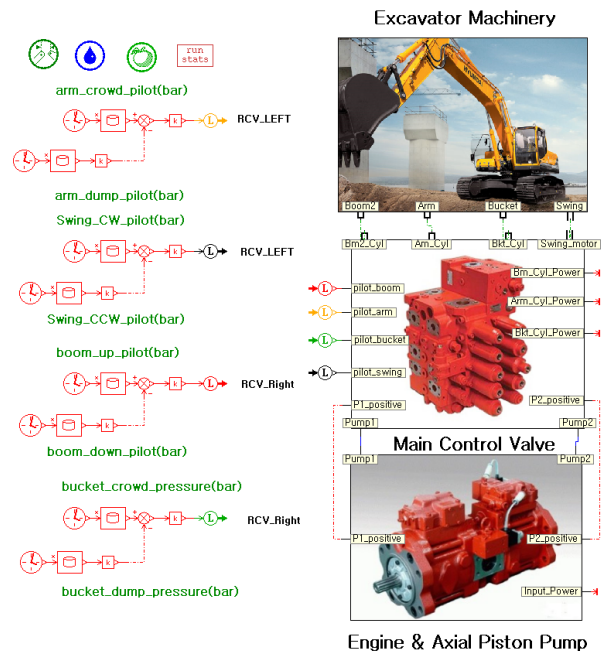


Fig. 3 Configuration of simulation model

모델은 크게 엔진 및 펌프, MCV, 작업장치로 이루어져 있다. 펌프는 엔진의 회전 속도와, 전마력제어와 포지티브 유량 제어를 통해 사관각 값을 입력받아 최종 토출 유량을 결정한다. MCV는 파일럿 압력 데이터를 입력받아 각 제어 밸브의 변위를 결정하며, 펌프로부터 공급된 유량을 밸브 변위에 비례하게 분배하여 제어 밸브와 연결된 각 액추에이터가 낼 수 있는 힘을 계산한다. 그리고 계산된 힘은 작업장치 모델에 입력되어 붐, 암, 버킷, 그리고 굴삭기 상부본체의 움직임을 결정하게 된다.

3.1 엔진/펌프 모델

Fig. 4는 엔진 및 펌프 모델의 구성을 나타낸 것이다. 그리고 Table 1은 엔진과 펌프의 사양을 정리한 것이다. 디젤 엔진 모델은 등가 관성 축에 PI 제어기를 통해 토크를 입력해 속도를 발생시키는 형태로 간

략하게 구성하였다.⁴⁾ 펌프 모델은 2개의 가변용량형 사판식 펌프로 구성되어 있고, 디젤 엔진에 의해 2개의 펌프가 동일한 속도로 구동된다.

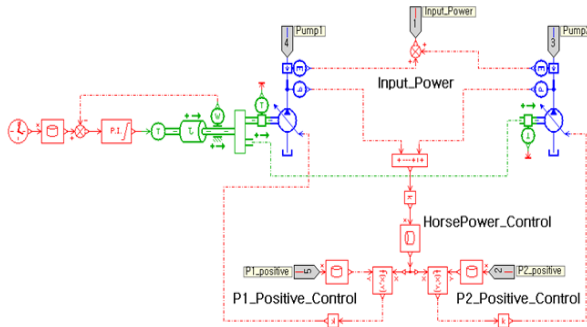


Fig. 4 Engine and pump model

Table 1 Parameter of engine and pump

Parameter		Value
Pump	Type	Variable displacement piston pump
	Displacement	2 × 117 cc/rev
	Max. pressure	350 kgf/cm ³
	Related flow rate	2 × 117 L/min
	Rated speed	1900 RPM
Engine	Max. torque	81.6 kgf·m (at 1500 RPM)
	Rated power	182.6 Hp (at 1950 RPM)

펌프는 전마력제어 및 포지티브 유량 제어를 통해 사판각을 조절하여 최종 토출 유량을 결정하도록 구성되었다. 전마력 제어는 Fig. 5의 (a)와 같이 두 펌프의 토출 압력의 평균값이 상승하면 유량을 감소시켜 엔진 부하를 감소시키도록 하였다. 포지티브 유량 제어는 Fig. 5의 (b)와 같이 파일럿 압력이 증가할 때, 다시 말해 액추에이터의 빠른 움직임이 필요한 상황에 더 많은 유량을 토출하도록 구성하였다.

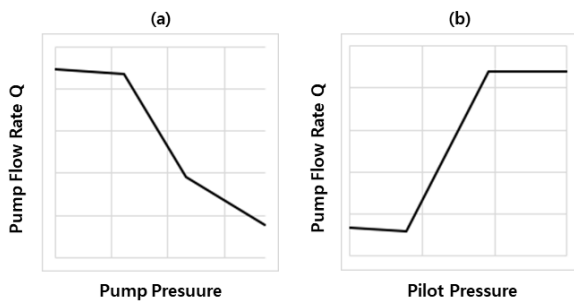


Fig. 5 (a) Horse power control map
(b) Positive flow rate control map

3.2 MCV 모델

Fig. 6은 실린더와 제어 밸브, 기능 밸브로 이루어진 MCV 모델의 구성을 나타낸 것이다. 본 논문에서 제안하는 모델은 주행 동작을 고려하지 않았기 때문에, 주행을 위한 제어 밸브 및 액추에이터는 모델에서 제외하였다.

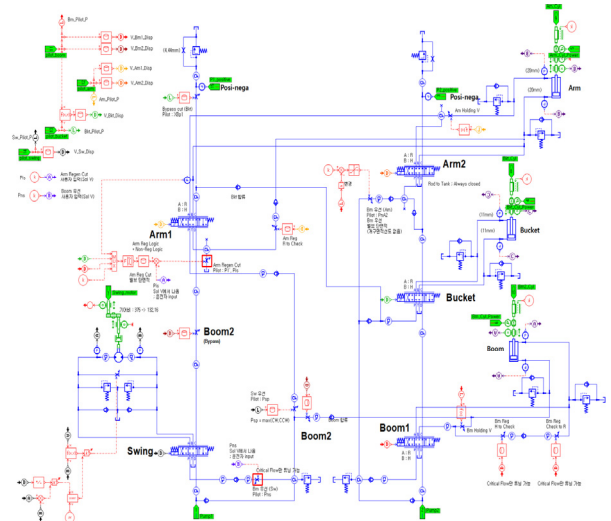


Fig. 6 Main control valve model

MCV 모델은 기본적으로 파일럿 압력 데이터를 입력받은 뒤, 이를 밸브 변위로 변환하여 각 제어 밸브에 입력하도록 구성하였다. 붐, 암, 버킷, 선회 제어 밸브는 Amesim의 3방향 6포트 스펴 밸브 블록을 이용해 바이패스 라인과 액추에이터 연결 라인을 동시에 고려하였다. 단, 붐2 밸브의 경우 붐 상승 동작 시 헤드 쪽으로의 합류 라인과 바이패스 라인만 사용하므로, 이를 가변 오리피스 2개로 구현하였다. 각 제어

Table 2 Parameter of engine and pump

Parameter		Value
Cylinder length	Boom	∅ 120×∅ 85×1290 mm
	Arm	∅ 140×∅ 100×1510 mm
	Bucket	∅ 120×∅ 85×1290 mm
Relief valve pressure	Cracking pressure [Cylinder]	350 kgf/cm ²
	Overload pressure [Cylinder]	400 kgf/cm ²
	Cracking pressure [Motor]	265 kgf/cm ²

밸브의 포트 별 면적은 실제 측정을 통해 얻은 파일럿 압력 대비 개구면적선도를 적용하였다.

또한 각 액추에이터와 펌프 연결 라인에는 릴리프 밸브를 두어 유압 시스템의 압력 상승으로 인한 과부하를 방지하도록 하였다. 모델에 적용한 각 실린더의 제원과 릴리프 밸브의 크래킹 압력은 모델링 대상인 굴삭기의 기본적인 제원을 바탕으로 Table 2와 같이 설정하였다.

3.3 기능밸브 모델

본 연구에서는 실제 MCV에 적용되는 기능밸브 모델들을 구성하여 MCV 모델에 적용하였다. 다양한 기능밸브 중에서 홀딩밸브, 재생 관련 밸브, 우선작동 밸브를 구현하여 적용하였다.

먼저 홀딩밸브는 제어 밸브의 스푼이 중립 상태에 있을 때, 누유로 인한 실린더의 불필요한 움직임을 방지하기 위해 사용되는 밸브이다. 주로 붐 실린더의 헤드 쪽과 암 실린더의 로드 쪽 회로에 적용된다. 실제 홀딩밸브는 3방향으로 연결 가능한 포핏 형태의 밸브와 스푼 밸브로 구성되어 있는데, 본 연구에서는 이를 가변 오리피스로 구현하였다. 홀딩밸브가 실린더가 움직여야 할 때 열리고 정지해 있어야 할 때 닫혀야 하기 때문에, 실린더와 연결된 제어 밸브의 변위가 발생할 때 밸브가 열리도록 작동 로직을 구성하였다. 최종적으로 구성된 홀딩밸브 모델은 Fig. 7과 Fig. 8과 같으며, 각각 붐과 암 실린더에 적용된 홀딩 밸브를 나타낸 것이다.

우선작동밸브는 두 가지 동작을 동시에 수행할 때 어느 한쪽으로 더 많은 유량이 공급되도록 만들어주는 밸브이다. 주로 붐, 암, 선회 동작 쪽의 유압 회로

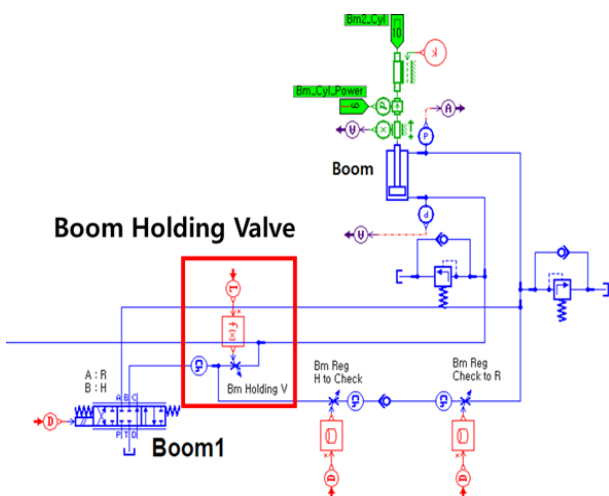


Fig. 7 Boom holding valve model

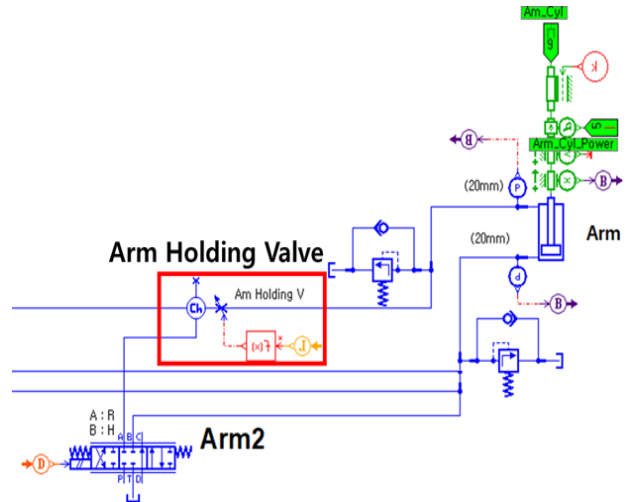


Fig. 8 Arm holding valve model

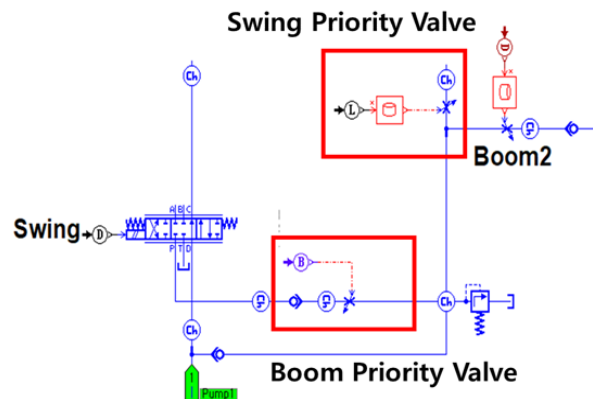


Fig. 9 Swing priority and boom priority valve model

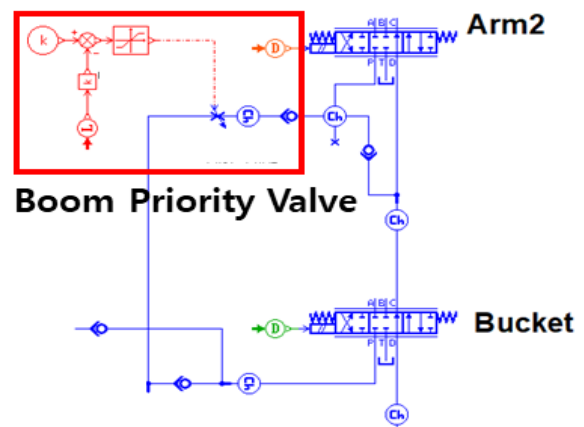


Fig. 10 Boom priority valve model

에 적용된다. 실제 우선작동밸브는 1방향 2포트 스푼 밸브의 형태이지만, 열리고 닫히는 동작만 수행하기 때문에 본 연구에서는 홀딩밸브와 마찬가지로 가변 오리피스로 구현하였다. 선회 대비 붐 우선작동밸브,

붐 대비 선회 우선작동밸브, 그리고 암 대비 붐 우선 작동밸브를 적용하였으며, 파일럿 압력 또는 운전자의 입력에 따라 밸브가 열리고 닫히도록 작동 로직을 구현하였다. 최종적으로 구성된 우선작동밸브 모델은 Fig. 9와 Fig. 10과 같으며, 각각 붐과 선회 동작의 우선작동밸브를 나타낸 것이다.

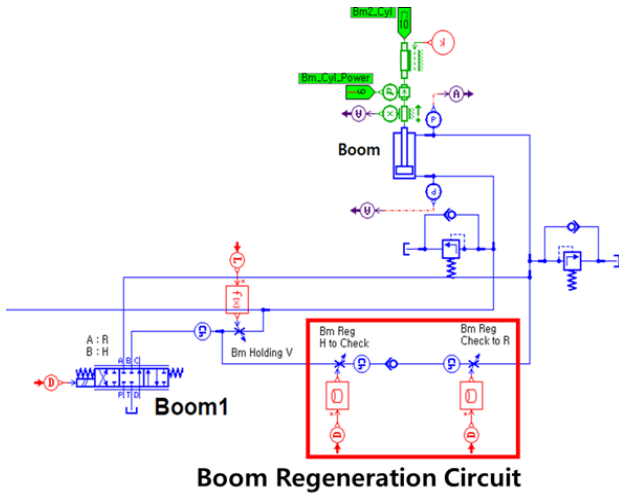


Fig. 11 Boom regeneration circuit model

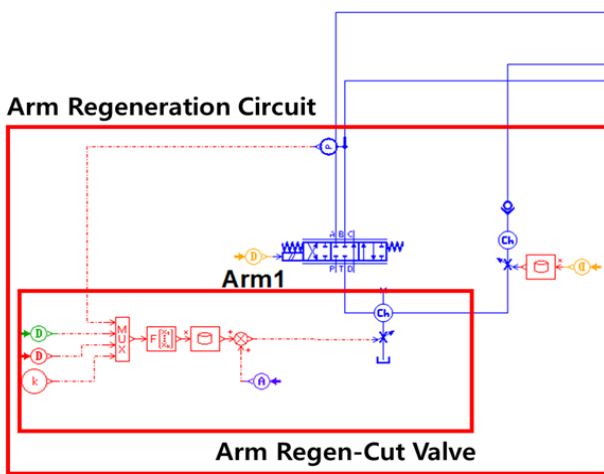


Fig. 12 Arm regeneration circuit and regen-cut valve model

재생 관련 밸브는 제어 밸브 내에 구성된 유량 재생 회로와 암 실린더의 유량 재생 회로에 적용되는 재생컷 밸브를 의미한다. 본 연구에서는 구현한 붐과 암 제어 밸브의 유량 재생 회로를 적용하였다. 붐의 경우 실린더 헤드 쪽에서 나온 유량을 로드 쪽으로 재생하도록, 그리고 암의 경우 실린더 로드 쪽에서 나온 유량을 헤드 쪽으로 재생하도록 구성하였다. 제어 밸브 내에 존재하는 유량 재생 회로를 Amesim의

제어 밸브 블록만으로 이를 구현하기 어렵기 때문에, 재생 회로를 제어 밸브 밖으로 꺼내서 가변 오리피스와 체크 밸브로 구현하였다. 재생 회로는 제어 밸브의 스톱 움직임에 따라 작동하기 때문에, 제어 밸브와 마찬가지로 파일럿 압력 대비 개구면적선도를 이용하여 작동하도록 하였다.

암 재생 회로에 적용되는 재생컷 밸브는 암 제어 밸브와 탱크 사이에 위치하여 재생되는 유량의 양을 조절하는 밸브이다. 재생컷 밸브의 면적이 감소할수록 암 실린더 로드 측의 압력이 증가하여 재생 회로의 체크밸브를 열고 재생되는 유량이 증가하게 된다. 실제 재생컷 밸브는 1방향 2포트 스톱 밸브의 형태이지만, 본 연구에서는 가변 오리피스로 구현하였다. 암 재생 회로는 암 실린더 헤드의 캐비테이션을 방지하는 역할도 같이 수행하기 때문에, 재생컷 밸브는 헤드 측의 압력이 낮아질수록 밸브가 닫히도록 기본 작동 로직을 구성하였다. 또한 복합동작 시 바이패스 라인 마지막에 위치한 암 제어 밸브로의 유량 공급이 줄어들어 캐비테이션이 발생할 수 있으므로, 붐과 버킷의 제어 밸브가 동작할 때 재생컷 밸브의 면적이 더 감소하도록 작동 로직을 보완하였다. 최종적으로 구성된 재생 관련 밸브 모델은 Fig. 11과 Fig. 12와 같으며, 각각 붐 재생 회로와 암 재생 회로 및 재생컷 밸브를 나타낸 것이다.

3.4 작업장치 모델

Fig. 13은 붐, 암, 버킷, 그리고 선회부가 결합된 굴삭기의 작업장치 모델의 구성을 나타낸 것이다.

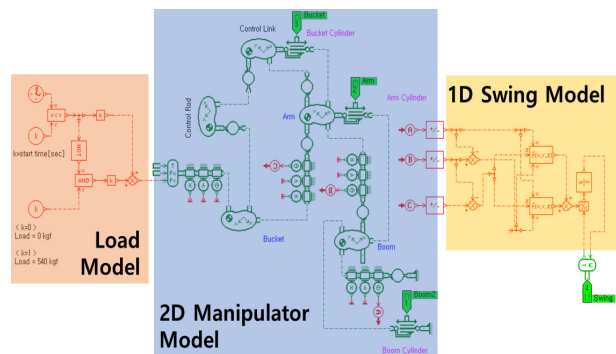


Fig. 13 Dynamic model of manipulator system of excavator

작업장치 모델은 붐, 암, 버킷 동작을 구현하는 2D 작동기와 선회 동작을 구현하는 1D 작동기의 라그랑지 운동방정식을 구한 후, 이를 상호 연결하여 구성

하였다. MCV 모델에서 계산된 액추에이터의 힘과 작업장치의 질량, 회전관성, 조인트의 스프링 및 감쇠 계수를 통해 작업장치의 무게중심에서의 변위, 속도 및 가속도를 계산하게 된다. 그리고 이를 바탕으로 작업장치의 기구학을 통해 작업장치 각 부분의 변위, 속도 및 가속도를 결정하여 최종적인 거동이 결정된다.

3.5 실시간 연산 성능 확보

시뮬레이션 모델의 해석에 소요된 시간(CPU time)이 전체 시뮬레이션 설정 시간보다 작고, 순간 해석 시간이 시뮬레이션의 샘플링 시간 간격(Sampling time step)보다 작을 때 실시간 연산 성능이 확보되었다고 할 수 있다.⁶⁾ 따라서 시스템의 간소화와 고주파수 요소 제거 및 파라미터 최적화 과정을 통해, 해석에 소요된 시간을 줄이고 순간 해석시간을 샘플링 시간 간격보다 낮추는 과정이 필요하다.

시뮬레이션 모델에서 실제 굴삭기와 같이 붐 실린더를 2개 사용하는 경우, 실린더의 헤드 및 로드 챔버와 함께 4개의 오리피스와 2개의 추가적인 챔버를 사용해야 하므로 계산 변수가 증가하여 시뮬레이션의 해석 속도가 느려진다.⁷⁾ 따라서 2개의 실린더를 헤드와 로드 면적이 기존의 2배인 1개의 등가 실린더로 바꾸어 계산 변수를 줄였다. 그리고 3방향 밸브와 2방향 밸브로 분리되어 있던 붐, 암, 버킷, 선회 제어 밸브들을 3방향 밸브 1개로 통합하여, 2개의 2차 시스템을 1개의 2차 시스템으로 간소화하였다. 또한 기능밸브들을 스푼 밸브에서 가변 오리피스로 변경하여 추가적으로 계산 변수를 감소시켰다.

모델의 간소화 작업을 진행한 후, Amesim에서 제공하는 Performance Analyzer Tool을 이용해 모델의 주파수 해석을 통해 유압 챔버, 작업기의 조인트, 실린더 챔버 등의 고주파수 발생 부분을 확인하였다. 확인된 고주파수 발생 부분들의 파라미터 변경 및 최적화를 통해 고주파수 발생을 줄여 실시간성을 확보하였다.

4. 시뮬레이션 및 결과

4.1 실차 시험 데이터

본 연구에서 구축한 시뮬레이션 모델은 실차 시험 데이터와의 비교를 통해 검증되었다. 검증에 사용한 시험 데이터는 버킷 부하 조건이 무부하 또는 540 kgf 부하 상태에 대한 단독 및 복합동작 결과이다. 시

험에 사용된 굴삭기의 동작은 붐 업/다운, 암 크라우드/덤프, 버킷 크라우드/덤프, 좌/우 선회의 8가지이다. 단독동작은 8가지 동작 중 1가지씩만 수행한 것이며, 복합동작은 붐, 암, 버킷, 선회의 각 동작 중 2가지 이상을 동시에 수행한 것이다. 시뮬레이션 검증에 사용한 동작 모드는 Table 3과 같다.

Table 3 Actual vehicle test conditions for model verification

Operating Condition	Load Condition	Specific Motion
Single Motion	No Load	Boom Up
		Arm Crowd
		Bucket Crowd
	Load (540 kgf)	Boom Up
		Arm Crowd
		Bucket Crowd
Complex Motion	No Load	Boom Up + Arm Crowd + Bucket Crowd
		Boom Up + Swing Left 180°

4.2 시뮬레이션 검증 방법

시뮬레이션 검증은 Table 3의 각 동작 모드마다 시험 데이터의 실린더 변위와 압력의 초기값을 초기 조건으로 설정한 뒤 수행하였고, 각 동작 모드 별 정확도와 실시간성을 검증하였다. 붐, 암, 버킷의 동작은 단독 및 복합 동작으로 검증을 진행했지만, 선회의 경우 단독 동작 시험 데이터의 문제로 인해 복합동작으로만 검증을 진행하였다.

시뮬레이션은 Intel i5-8400 CPU가 장착된 상용 PC에서 수행되었다. 각 동작 모드에 대해서 가변(Variable) 및 고정 시간 간격(Fixed time step ; Euler method, step size : 7e-5 sec)으로 시뮬레이션을 진행한 뒤, 시뮬레이션 결과를 실차 시험 데이터와 비교하여 정확도 및 연산지표를 계산하여 검증하였다. 그리고 붐, 암, 버킷 복합동작의 경우, 고정 시간 간격의 변화에 따른 시뮬레이션을 진행한 뒤, 이에 대한 오차 및 연산시간 변화를 추가적으로 확인하였다.

결과 비교는 각 액추에이터의 변위와 압력(실린더 헤드, 선회 모터 입구), 연산에 소요된 시간을 이용해 진행했다. 모델의 정확도는 준정상상태(quasi-static; 같은 속도가 5회 이상 지속)에서의 RMS 오차를 이용해

구했으며, RMS 오차는 식 (1)과 같이 구한다. 이 때, 식 (1)의 x_{exp} 는 비교하고자 하는 실차 시험 데이터, x_{act} 는 모델의 데이터, 그리고 n 은 검증에 사용된 전체 데이터 개수를 의미한다. 모델의 정확도는 식 (2)와 같으며, 100에서 식 (1)을 통해 구해진 RMS 오차를 빼서 구한다.

모델의 실시간성은 연산 지표를 통해 확인했다. 연산 지표는 식 (3)을 통해 구하며, 1보다 작은 경우 실시간성을 갖추었다고 볼 수 있다. 이 때, 식 (3)의 CPU time은 시뮬레이션 연산 중 CPU가 동작한 시간이며, Setting time은 시뮬레이션 설정 시간 또는 각 동작 모드별 실차 시험 데이터의 동작 시간 범위를 의미한다.

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

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

$$C.I = \frac{CPU\ time}{Setting\ time} \quad (3)$$

4.3 시뮬레이션 검증 결과

각 동작 모드별 시뮬레이션의 정확도는 Table 4와 5, 실시간성 연산 지표는 Table 6과 같다. 그리고 각 동작 모드에 대한 시뮬레이션 결과 그래프는 Fig. 14부터 Fig. 17과 같다.

Table 4 Accuracy of variable time step simulation

Operating and Load Condition		Disp. Accuracy (%)	Pressure Accuracy (%)
Single No Load	Boom	99.25	94.40
	Arm	96.80	91.65
	Bucket	98.25	81.37
Single Load	Boom	99.29	95.06
	Arm	95.89	91.31
	Bucket	97.32	88.72
Complex No Load	Boom, Arm, and Bucket	98.91 (Boom)	92.54 (Boom)
		97.41 (Arm)	91.44 (Arm)
		98.35 (Bucket)	76.02 (Bucket)
	Boom, and Swing	99.10 (Boom)	90.57 (Boom)
		96.31 (Swing)	67.87 (Swing)

Table 5 Accuracy of fixed time step simulation

Operating and Load Condition		Disp. Accuracy (%)	Pressure Accuracy (%)
Single No Load	Boom	99.00	94.11
	Arm	96.37	91.59
	Bucket	98.25	81.34
Single Load	Boom	99.28	94.73
	Arm	95.76	90.35
	Bucket	95.9	87.31
Complex No Load	Boom, Arm, and Bucket	98.84 (Boom)	92.22 (Boom)
		97.36 (Arm)	91.31 (Arm)
		98.34 (Bucket)	75.52 (Bucket)
	Boom, and Swing	98.92 (Boom)	90.45 (Boom)
		95.93 (Swing)	67.81 (Swing)

Table 6 Real-time performance of simulation

Operating and Load Condition		Real-time performance index	
		Variable	Fixed
Single No Load	Boom	0.8422	0.4266
	Arm	0.9714	0.4349
	Bucket	0.7875	0.4188
Single Load	Boom	0.9406	0.4859
	Arm	0.9978	0.5016
	Bucket	0.8922	0.4859
Complex No Load	Boom, Arm, and Bucket	0.8438	0.5313
	Boom, and Swing	1.7875	1.0875

붐과 암 실린더는 모든 동작 조건에서 변위 95% 이상, 압력 90% 이상의 높은 정확도를 보였다. 버킷 실린더는 변위는 95% 이상의 높은 정확도를 보였지만, 압력의 경우 동작 조건에 따라 80% 이하의 정확도를 보였다. 마찬가지로 선회 모터도 변위는 95%대의 정확도를 보였지만, 압력은 60%대의 정확도를 보였다. 그리고 실시간성 연산 지표는 선회가 포함된 복합동작을 제외하면 모두 1 이하의 값을 보이며, 실시간성을 갖추었음을 확인할 수 있었다.

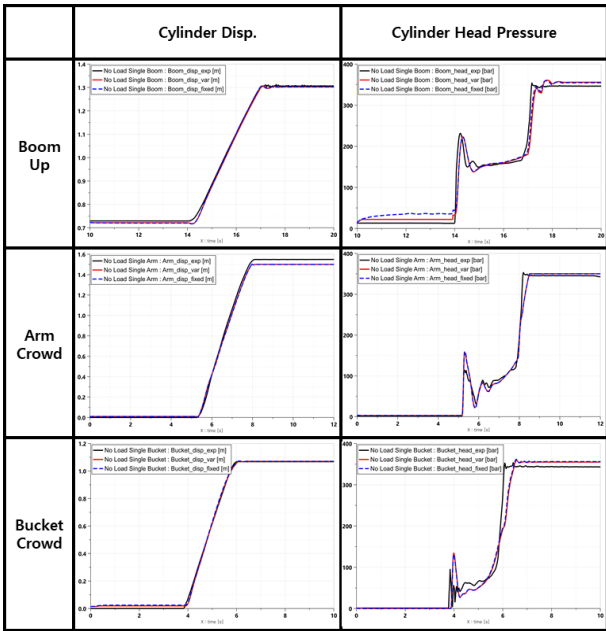


Fig. 14 Results of no load and single operation

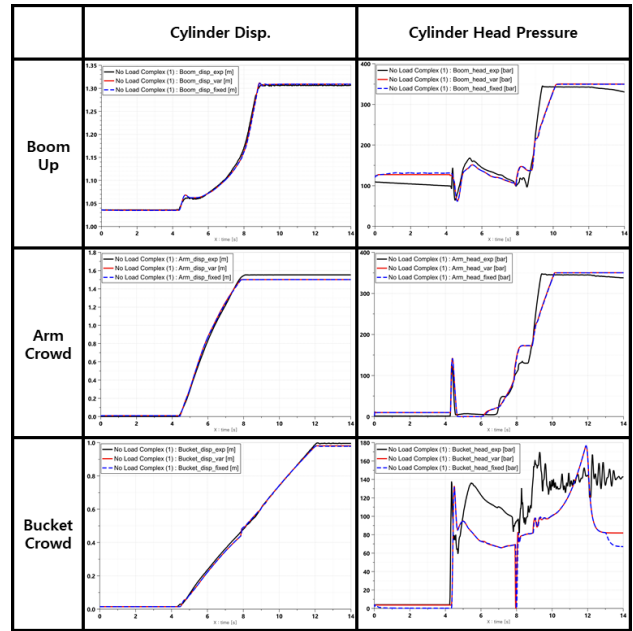


Fig. 16 Results of no load and complex operation : Boom, Arm, and Bucket motion

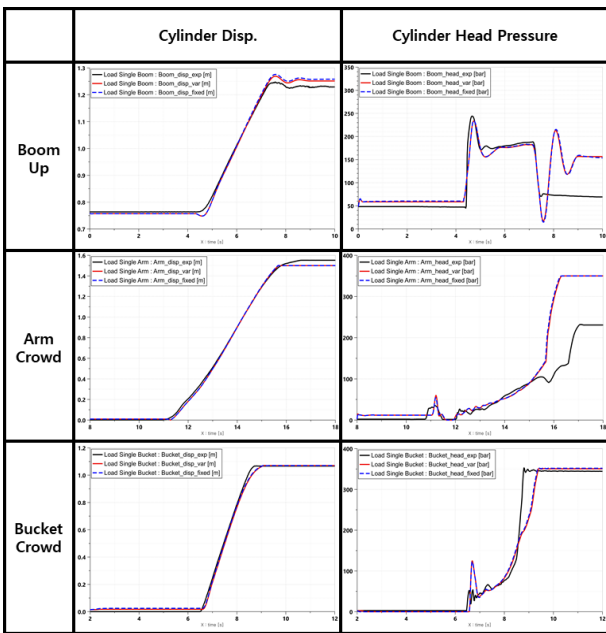


Fig. 15 Results of load and single operation

시뮬레이션 결과, 각 동작 모드에 대해 모든 액추에이터의 변위 정확도는 95% 이상을 보임을 확인하였다. 그러나 붐 및 암 실린더의 압력 정확도가 90% 이상을 보이는 것에 비해, 버킷 실린더와 선회 모터의 압력 정확도가 상대적으로 많이 낮다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 선회 동작이 포함된 복합동작의 경우, 실시간성을 보이지 못함을 확인할 수 있었다.

유압 액추에이터의 압력의 경우, 외부에서 작용하는 부하와 제어 밸브의 특성에 따라 바뀌게 된다. 외부에서 작용하는 부하는 액추에이터와 연결된 스프

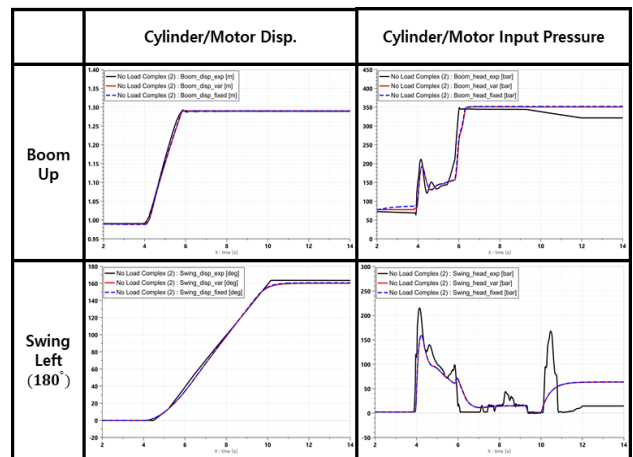


Fig. 17 Results of no load and complex operation : Boom and Swing motion

링 강성 및 감쇠 요소의 크기에 따라 달라지며, 제어 밸브의 특성은 압력 손실 및 최대 유량에 의해 결정된다. 이러한 파라미터들은 제공이 되지 않기 때문에 최적화를 통해 선정하였다. 하지만 선회 모터의 경우, 단독 동작 시험 데이터의 문제로 인해 앞서 말한 파라미터들의 최적화가 적절하게 이뤄지지 못했는데, 이 점이 반영되어 압력 오차가 발생한 것으로 예상된다. 버킷 실린더의 압력 오차도 선회 모터와 유사한 이유로 발생한 것으로 보이며, 그 중 작업장치의 감쇠 요소가 큰 영향을 준 것으로 보인다. 따라서 낮은 압력 정확도는 파라미터의 정밀한 선정을 통해서 해결이 가능할 것으로 판단된다. 실시간성의 경우 작업

장치 및 유압 시스템의 감쇠 요소에 큰 영향을 받기 때문에, 마찬가지로 파라미터의 정밀한 선정을 통해서 해결이 가능할 것으로 판단된다.

정확도를 검증하는 시뮬레이션 외에 추가적으로 고정 시간 간격(Fixed time step) 크기 변화에 따른 연산 시간 및 오차의 변화를 확인하기 위한 시뮬레이션도 수행하였다. 무부하 봄, 압, 버킷 복합동작으로 동작 모드를 대상으로 수행하였고, 오차의 비교는 각 실린더 변위와 헤드 압력의 RMS Error의 평균값으로 비교하였다.

고정 시간 간격에 따른 시뮬레이션 연산 시간 및 오차의 변화는 Fig. 18 및 Fig. 19에서 확인할 수 있다. 고정 시간 간격의 크기가 증가할수록, 시뮬레이션 연산 시간은 감소하고 오차는 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 시뮬레이션 연산 시간을 단축시키기 위해 고정 시간 간격을 증가시키면 오차의 증가로 정확도가 감소하게 된다는 것을 확인할 수 있었다.

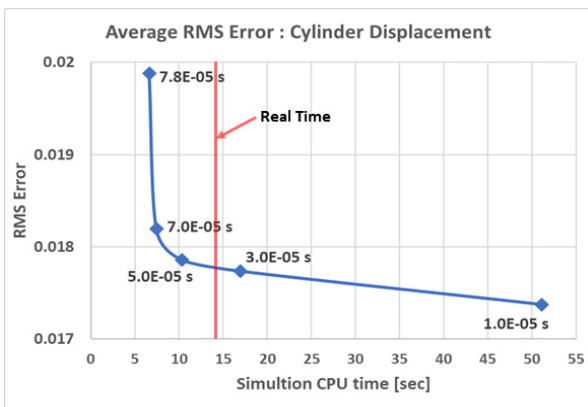


Fig. 18 RMS error and simulation CPU time according to fixed time step size change : Cylinder displacement

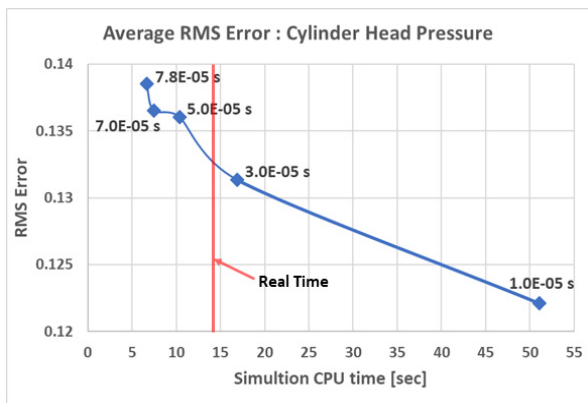


Fig. 19 RMS error and simulation CPU time according to fixed time step size change : Cylinder head pressure

5. 결 론

본 연구에서는 Amesim을 이용하여 엔진과 펌프, MCV, 그리고 작업장치로 구성된 굴삭기의 실시간 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 시스템의 간소화, 고주파수 인자 제거, 그리고 파라미터의 최적화를 통해 모델의 정확도와 함께 실시간 연산 성능을 확보하였다. 개발된 실시간 연산 모델의 정확도는 실차 시험 결과 데이터와의 비교를 통해 검증되었다. 비교 검증 결과, 각 액추에이터의 변위는 모든 동작 모드에서 90% 이상의 정확도를 보임을 확인하였다. 압력은 대부분 90% 이상의 정확도를 보였지만, 몇몇 동작 모드인 경우 80% 이하의 정확도를 보였다. 실시간성의 경우, 대부분의 동작 모드에서 연산 지표가 1 이하의 값을 보이며 실시간 시뮬레이션의 가능성을 확인할 수 있었다. 하지만 선회가 포함된 복합 동작은 연산 지표가 1 이상의 값을 보였다. 특정 동작 모드에서 발생한 낮은 압력 정확도 및 느린 연산 속도는 모두 제공되지 않은 파라미터를 선정하는 과정에서 발생한 것으로 판단되며, 파라미터 튜닝 작업을 통해 보완될 수 있을 것으로 보인다.

향후, 압력 정확도 및 실시간성 향상을 위해 버킷 실린더 및 선회 모터와 관련된 파라미터의 튜닝 작업을 수행할 예정이다. 또한 기능밸브 정교화 작업도 수행할 예정이다. 그리고 최종적으로 보완된 실시간 시뮬레이션 모델은 가상 시뮬레이터 또는 HIL(Hardware-In-the-Loop) 시뮬레이터에 적용될 예정이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 산업기술혁신사업(과제번호: 10063469)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

References

- 1) S. K. Kwon, "A Study on the Simulation for an Excavator using the AMESim", Master Thesis, University of Ulsan, 2008.
- 2) Q. Feng, Q. Wang, and W. Gong, "Research on Hardware-in-the-loop Simulation System of Hydraulic Excavators", Proceedings of the 8th JFPS International Symposium on Fluid Power, pp.318-323, 2011.

- 3) J. J. Kim, Excavators, Golden-Bell Corp., Seoul, 2010.
- 4) P. Casoli et al., "Hydraulic Excavator - Mathematical Model Validation and Energy Analysis", Energies, Vol.9, No.12, pp.1-19, 2016.
- 5) T. R. Jeon, "Analysis on the Kinematic and Dynamic Behavior of Hydraulic Excavator", Master Thesis, University of Konkuk, 1997.
- 6) M. G. Cho et al., "Real-time Simulation Model of Excavator Kinematic Mechanism for Hydraulic HILS", Proceedings of 2018 Autumn Conference on Drive and Control, pp.9-10, 2018.
- 7) S. M. Oh et al., "A Study on Real-time Simulation of Excavator MCV with Frequency Analysis", Proceedings of 2017 Spring Conference on Drive and Control, pp.169-174, 2017.
- 8) Y. H. Im et al., "Real-time Simulation of Excavator including Detail Model of MCV", Proceedings of 2019 Spring Conference on Drive and Control, pp.250-255, 2019.
- 9) M. K. Hyun and J. Y. Huh, "An Analysis of the Dynamic Characteristics of a Spool Type Pressure Control Valve", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.4, pp.61-66, 2018.
- 10) K. S. Oh, J. H. Seo and G. H. Lee, "Phase Portrait Analysis-Based Safety Control for Excavator Using Adaptive Sliding Mode Control Algorithm", Journal of Drive and Control, Vol.15, No.3, pp.8-13, 2018.