

<응용논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.1.087>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## SimulationX를 이용한 부하 감지형 메인 컨트롤밸브의 효율에 관한 연구

김동명\* · 이정민\*\*,\*\* · 정원지\*\*\* · 장주섭\*\*†

\* 가천대학교 기계공학부, \*\* 홀루테크, \*\*\* 창원대학교 기계공학부

### A Study on the Efficiency of a Load Sensing Main Control Valve Using SimulationX

Dong Myoung Kim\*, Jung Min Lee\*\*,\*\*, Won Jee Jung\*\*\* and Joo Sup Jang\*\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Gachon Univ.,

\*\* Dept. of Ltd. R&D Center, Flutek,

\*\*\* Dept. of Mechanical Engineering, Changwon Univ.

(Received June 16, 2015 ; Revised October 30, 2015 ; Accepted November 27, 2015)

**Key Words:** Load Sensing(부하 감지), Flow Sharing(유량 분배), Excavator(굴삭기), Main Control Valve(메인 컨트롤 밸브), SimulationX(시뮬레이션 엑스)

**초록:** 본 연구에서는 오픈센터 시스템과 부하 감지형 시스템의 해석모델을 개발하고 시스템의 특성과 효율을 분석하였다. 오픈 센터 방식의 메인 컨트롤 밸브의 압력과 유량 특성을 분석하기 위해 각각의 포트별로 시험을 수행하였다. 시스템의 특성 분석 전 단계에서 시험 결과와 해석 결과를 비교함으로써 해석모델의 신뢰성을 검토하였다. 신뢰성이 검증된 오픈 센터 방식의 메인컨트롤 밸브에 유량 분배 밸브를 추가하여 부하 감지형 메인 컨트롤 밸브의 해석모델을 개발하였다. 두 가지 시스템의 효율을 분석하기 위해 동일한 부하 조건에서 해석을 수행하였으며 각각의 부하 특성에 따른 효율을 검토하였다. 또한, 서로 다른 부하 조건에서 유량 분배 시스템의 특성을 분석함으로써 복합 동작에 대한 성능도 검토하였다.

**Abstract:** In this study, we develop a model of an open center and load-sensing system and for a main control valve to analyze system characteristics and efficiency using SimulationX. In order to analyze the operating characteristics of the pressure and flow of the main control valve of an open center system, a test was performed at each port. The reliability of the model was confirmed by comparing the similarity of the analysis results with the test results before analyzing the operating characteristics of the system. Development of the load sensing main control valve was performed by adding a flow sharing valve and a notched shape to the open center system based on it's the proven reliability. The authors performed the simulation under the same load conditions in order to compare the efficiency of the systems. Additionally, the combined operation performance was investigated by means of analyzing the characteristics of flow distribution under different load conditions.

- 기호설명 -

$Q_{th}$  : 유압 펌프 이론 토출 유량

$Q_o$  : 오리피스 통과 유량

$\Delta P$  : 오리피스의 입출구 사이의 압력 차

$P_i$  : 오리피스 입구 압력

$P_o$  : 오리피스 출구 압력

$p$  : 펌프 토출 압력

$A$  : 오리피스의 개도면적

$L_a$  : 사용 동력

† Corresponding Author, [jjs1@gachon.ac.kr](mailto:jjs1@gachon.ac.kr)

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

- $L_p$  : 유압 펌프 공급 동력
- $L_l$  : 전체 손실 동력
- $L_{lc}$  : 고정 용량형 시스템의 전체 손실 동력
- $L_{lw}$  : 가변 용량형 시스템의 전체 손실 동력
- $L_{l1}$  : 유량제어 밸브의 동력 손실
- $L_{l2}$  : 압력제어 밸브의 동력 손실
- $\rho$  : 작동 유체의 밀도
- $C_d$  : 유량 계수

## 1. 서 론

설치 공간이 한정적인 조건하에서 중장비나 건설기계의 액추에이터를 작업자의 의지에 따라 적합하게 제어하기 위해 각종 밸브들을 하나의 블록으로 구성한 것을 메인 컨트롤 밸브(MCV : main control valve)라 한다. 메인 컨트롤 밸브는 다양한 분야에 사용되고 있으며, 가장 대표적인 예로 건설기계 분야의 굴삭기 시스템을 들 수 있다. MCV는 시스템 제어 방식에 따라 전방 제어(positive control), 후방 제어(negative control), 부하감응(load sensing)형 제어로 구분되어있으며, 메인 유로의 밸브 구성에 따라 포핏 밸브를 이용한 전자제어 방식과 스펴 밸브를 이용한 파일럿 제어 방식으로도 구분된다.<sup>(1-3)</sup>

유압 시스템은 동력 밀도가 높고 큰 힘을 낼 수 있으며 제어성이 좋다는 장점 때문에 다양한 분야에 사용되고 있지만 상대적으로 효율이 낮기 때문에 시스템의 효율을 향상시키기 위해 많은 연구가 수행되어 왔다. 현시대에는 효율을 향상시키기 위해 엔진을 대신하여 전기모터 사용하는 전기 유압식 굴삭기에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 굴삭기 시스템의 효율에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 요소 중 하나인 MCV는 크게 두 가지 유형으로 개발되고 있으며, 첫 번째 유형은 전자 제어 방식으로 시스템 제어기 설계가 복잡하여 가격이 비싸지만 원하는 제어로직을 구현하기가 상대적으로 쉬우며, 두 번째 유형은 파일럿 스펴 밸브 제어 방식으로 별다른 제어로직이 필요하지 않기 때문에 상대적으로 가격은 저렴하지만 대부분의 제어로직이 스펴의 개도 면적에 의존하기 때문에 노치 설계와 튜닝에 많은 시간과 비용이 소비된다. 이와 같이 두 가지 유형은 서로 다른 장단점이 있기 때문에 메인 컨트롤 밸브를 개발할 때는 시스템에 적합한 유형을 선

택하는 것이 중요하다.<sup>(6)</sup>

부하 감지형 시스템을 구현하기 위해서는 유압 펌프와 메인컨트롤 밸브에 부하를 피드백 할 수 있는 파일럿 라인이 추가적으로 필요하며, 오픈센터 시스템과 달리 부하의 크기에 따라 공급 동력이 제어되기 때문에 상대적으로 높은 효율을 얻을 수 있다. 이러한 장점 때문에 공급 동력이 일정하게 제어되고 부하 감지 방식이 결합된 유압 시스템이 굴삭기, 농기계, 크레인 등에 활용되고 있다.<sup>(4)</sup>

본 논문에서는 상용소프트웨어인 SimulationX를 이용하여 오픈센터 굴삭기 시스템의 해석모델을 개발하고 시험결과와 비교하여 신뢰성을 검증하였으며, 부하 감지형 시스템으로 해석모델을 확장하여 시스템의 효율을 비교 분석하고 병렬 회로에서의 유량 분배 특성을 면밀히 검토하고자한다.

## 2. 유압 시스템의 특성

유압펌프는 기계적인 에너지를 이용하여 유압 시스템에 유체 에너지를 공급하는 장치로써 제어 방식에 따라 다양한 형태로 개발되어 있기 때문에 시스템 설계 시 적합한 펌프를 선정하는 것이 매우 중요하다. 현재 개발되어 있는 제어 방식으로는 압력, 유량, 일정 마력 그리고 부하 감지형 등이 있으며 이러한 기능이 가능하도록 펌프를 제어하는 밸브들을 레귤레이터(regulator)라 한다.<sup>(5)</sup>

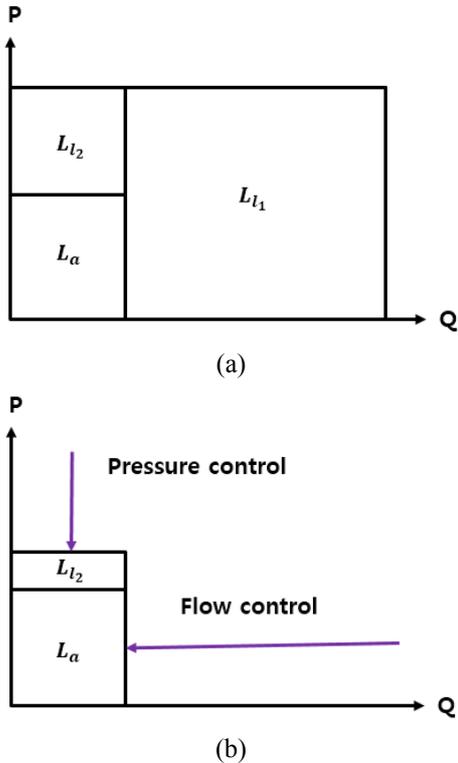
유압 펌프가 유체에 공급하는 동력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_p = \frac{p \times Q_{th}}{600} \quad (1)$$

여기서 압력은 bar 유량이 L/min 일 때의 공식이며 600은 동력의 단위가 kW일 때의 환산 계수이다.

Fig. 1에 대표적인 2가지 시스템에 대해 효율 특성을 직관적으로 확인 할 수 있도록 비교하여 나타내었다. (a)는 고정 용량형 펌프 시스템을 나타내며 (b)는 압력과 유량이 제어되는 시스템을 나타낸다.

각각의 유압 시스템에서 동력 손실은 다음과 같이 나타낼 수 있다.



**Fig. 1** Power of the hydraulic systems (a) constant pump system (b) variable pump system

$$L_{lc} = L_{l1} + L_{l2} \quad (2)$$

$$L_{lv} = L_{l2} \quad (3)$$

단, 유압 시스템의 조합에 따른 동력 특성을 분석하는 것이 목적이기 때문에 파이프 길이에 대한 마찰 손실과 그 외의 부차적 손실 및 펌프의 효율을 고려하지 않았다.

유압 시스템에 공급된 동력을 실제로 사용동력과 손실되는 동력으로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_p = L_a + L_l \quad (4)$$

식 (4)에서는  $L_l$ ( $L_{lv}$  또는  $L_{lc}$ )에 따라 시스템의 효율이 크게 변한다는 것을 알 수 있으며, 이는 Fig. 1의 그래프에서도 확인 할 수 있다.

시스템의 특성을 분석하면 고정 용량형 펌프의 경우 압력제어밸브의 높은 설정 압력으로 인해 큰 에너지 손실이 발생한다. 고압의 에너지 손실은 작동유체의 온도를 상승시키는 주된 원인이 되고, 작동 유체의 온도 상승은 동점도에 직접적

**Table 1** Device of the test

Item	Spec	Marker
Main pump	175 kW 180 cc/rev	PARKER
Pilot pump	PGP511 50 cc/rev	PARKER
Pressure sensor	PI6061-400(50)	AML
Flow meter	RE4-300	HYDROTECH
Electric motor	75 kW	HYUNDAI

인 영향을 미치기 때문에 시스템의 동적 특성을 악화시킬 뿐만 아니라 시스템의 효율도 떨어뜨린다. 고정 용량형 시스템은 효율적인 관점에서 봤을 때 사용 동력이 작을수록 손실이 커진다. 그러므로 작동 부하의 크기가 큰 범위에서 가변적으로 변화하는 시스템의 경우 부하 감지형 펌프와 부하 감지형 제어 밸브를 사용하는 것이 시스템에서 발생하는 큰 동력 손실을 피할 수 있다.

### 3. 성능 시험 및 해석 모델 개발

본 논문에서는 오픈 센터 방식의 메인 컨트롤 밸브를 기준으로 성능 시험을 수행하고 해석모델을 개발한 후 두 가지 결과를 비교함으로써 해석모델의 신뢰성을 검토하였다. 부하 감지형 시스템의 경우 유량 분배 밸브의 기하학적인 형상을 고려하여 해석모델을 개발하였으며, 오픈 센터형 메인 컨트롤 밸브를 확장하여 부하 감지형 시스템의 해석모델을 개발하였다.

#### 3.1 오픈 센터형 메인 컨트롤 밸브의 성능 시험

오픈 센터 방식의 메인 컨트롤 밸브의 성능 시험은 밸브가 최대 개도면적인 상태에서 유량에 대한 압력 손실을 측정하였으며, 각각의 유로별로 수행하였다.

Fig. 2는 메인컨트롤 밸브에서 발생하는 유량에 대한 압력 손실의 시험결과로 boom 실린더를 움직이는 부분에서의 결과이다. (a)는 성능 시험 장비, (b)는 펌프에서 A나 B 또는 T 방향으로 유량이 흐를 때의 압력 손실 그리고 (c)는 A와 B포트

에서 T 방향으로의 압력 손실을 나타낸다. 시험에서 사용한 장비는 Table 1에 나타내었다.

방향 제어 밸브를 흐르는 유량과 압력에 대한 특성은 다음의 식으로 나타낼 수 있으며 이를 오리피스 방정식이라 한다.

$$Q_o = C_d A \sqrt{\frac{2(P_i - P_o)}{\rho}} = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (5)$$

### 3.2 오픈 센터 시스템 모델링

#### 3.2.1 정마력 제어 유압 펌프

정마력 제어(constant horsepower control) 펌프는 압력 레귤레이터에 의해 제어된다. 시스템의 부하가 증가하여 유압 동력이 설정된 동력 보다 클 경우 유량을 감소시켜서 일정한 동력으로 유지하기 때문에 엔진의 출력을 효율적으로 사용할 수 있다. 본 시스템에서 설정된 정격 동력은 16 kW 이다.<sup>(5)</sup>

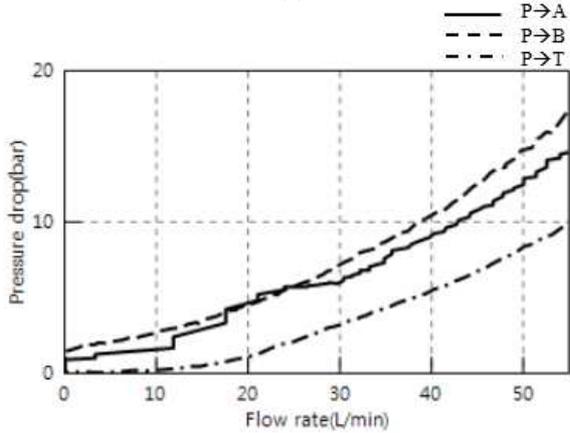
Fig. 3은 정마력 제어가 되는 유압 펌프의 개발 모델과 해석 결과를 나타낸다.

#### 3.2.2 메인 컨트롤 밸브

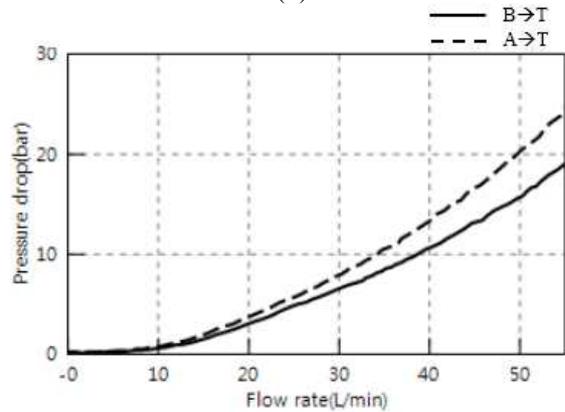
MCV는 작업자의 의지에 따라 실린더의 작동 방향과 속도가 원활하게 조작 되어야 할 뿐만 아니라, 액추에이터 조작 시 충격이 적어야 하고 에너지 효율이 높아야 한다. 또한, 우선 공급 시스템



(a)

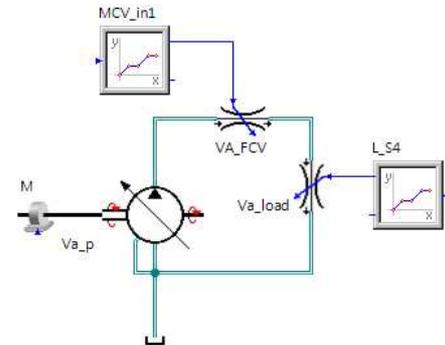


(b)

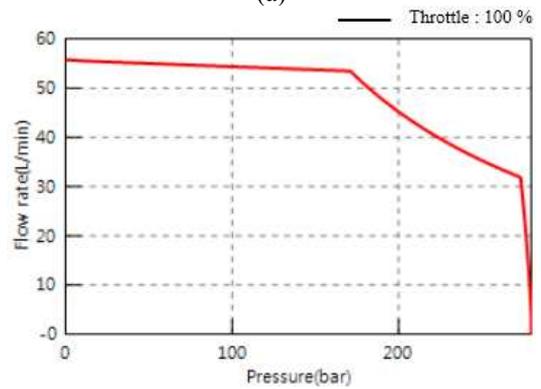


(c)

Fig. 2 Results of the test at the boom (a) photograph of the test device (b) pressure drop characteristic during the meter-in and bypass (c) pressure drop characteristic during the meter-out

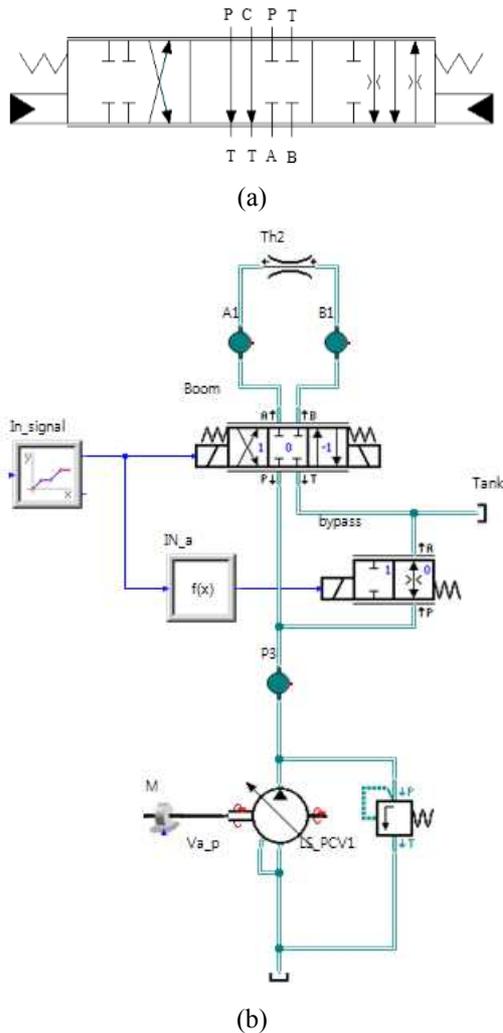


(a)



(b)

Fig. 3 Variable pump (a) analysis model (b) results of the simulation analysis model

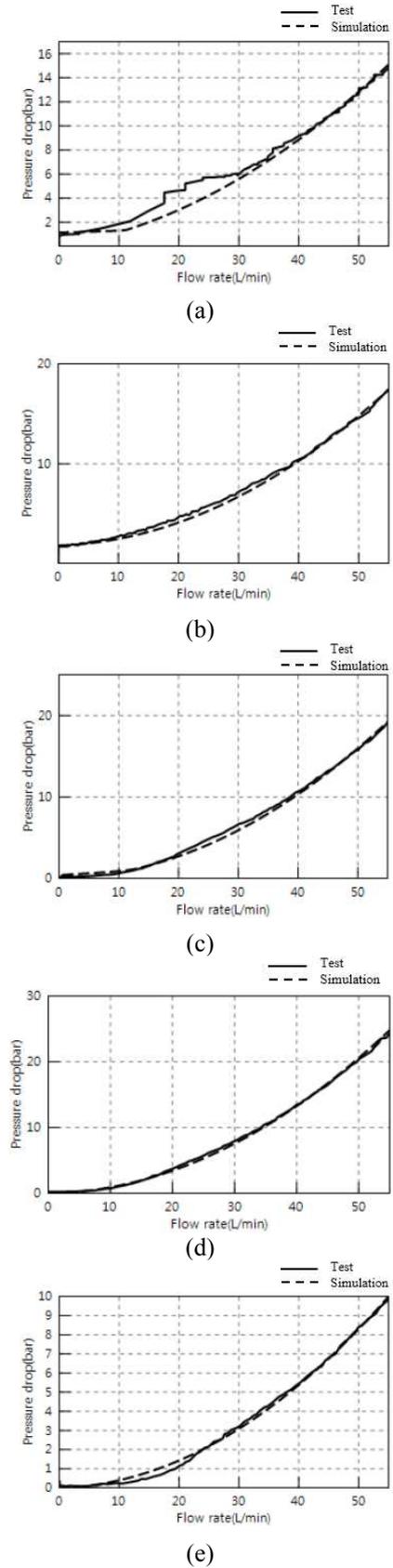


**Fig. 4** Open center system (a) Hydraulic symbol of the 6/3 valve (b) analysis model of the open center system

이 정상적으로 구동되어야 하며, 개도면적을 이용하여 재생 시스템을 구현함으로써 구동 조건에 따라 에너지가 재생되어야 한다. 특히, 병렬 회로에서 복합 작동을 할 경우 조이스틱에 비례하게 유량 분배가 되어야 한다.

Fig. 4(a)는 오픈센터 방식의 메인 컨트롤 밸브의 유압 기호를 나타내며, (b)는 해석모델을 나타낸다. 오픈센터 방식은 메인컨트롤 밸브는 정용량형 펌프와 같이 사용되는 것이 일반적이며 밸브 유형은 8포트 3위치 비례제어 밸브이다.

해석모델을 이용하여 시스템을 분석하고 평가하기 위해서는 반드시 해석모델의 신뢰성이 확보되어야 한다. Fig. 5는 해석결과와 시험결과의 유사성을 비교함으로써 해석모델의 신뢰성을 검토한 결과이다.



**Fig. 5** Reliability of the analysis model (a) P to A (b) P to B (c) A to T (d) B to T (e) P to T

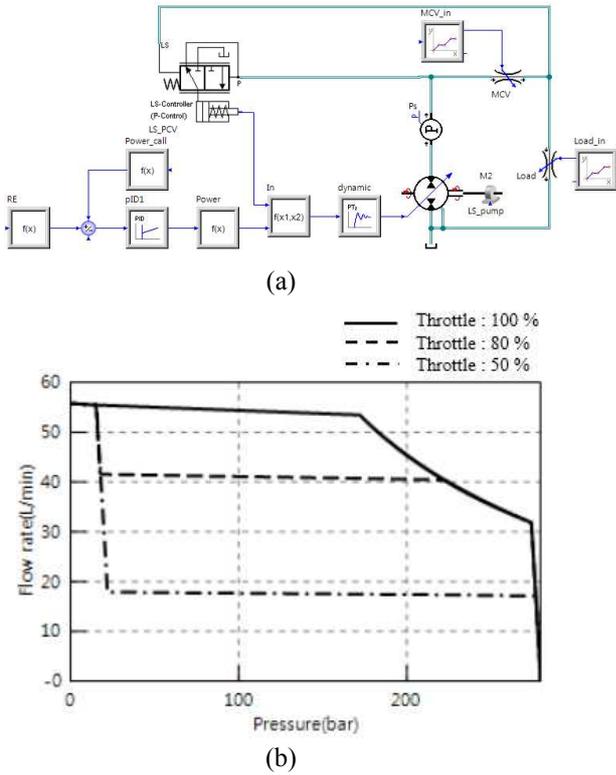


Fig. 6 Load sensing pump (a) Analysis model (b) results of the simulation analysis model

### 3.3 부하 감지형 시스템 모델링

#### 3.3.1 부하 감지형 유압 펌프

부하 감지형 유압 펌프는 액추에이터의 부하에 따라 유압 펌프의 토출 유량을 필요한 만큼만 공급하는 펌프이다. 본 시스템에 적용된 유압 펌프는 사판식 피스톤 펌프로써 조이스틱의 조작량에 따라 토출유량이 비례적으로 제어된다. Fig. 6는 부하 감지형 유압 펌프의 해석 모델과 결과를 나타낸 것으로 조이스틱의 조작량(throttle)에 따라 공급 유량이 변하는 것을 확인할 수 있다.

#### 3.3.2 유량 분배 밸브

굴삭기 작업은 복합동작이 필수적인데, MCV가 병렬 회로로 구성되어 있기 때문에 아무런 제어가 구성되어 있지 않을 경우 작업기의 부하에 의존하여 유량이 분배되어 공급된다. 즉, 작업자가 시스템을 제어하는데 많은 피로감이 발생되고 부하의 크기가 극단적으로 차이가 날 경우에는 부하가 작은 액추에이터부터 순차적으로 작동하는 현상이 발생하여 제어기능을 상실할 수도 있다. 그러므로 메인컨트롤 밸브에 작업 부하의 크

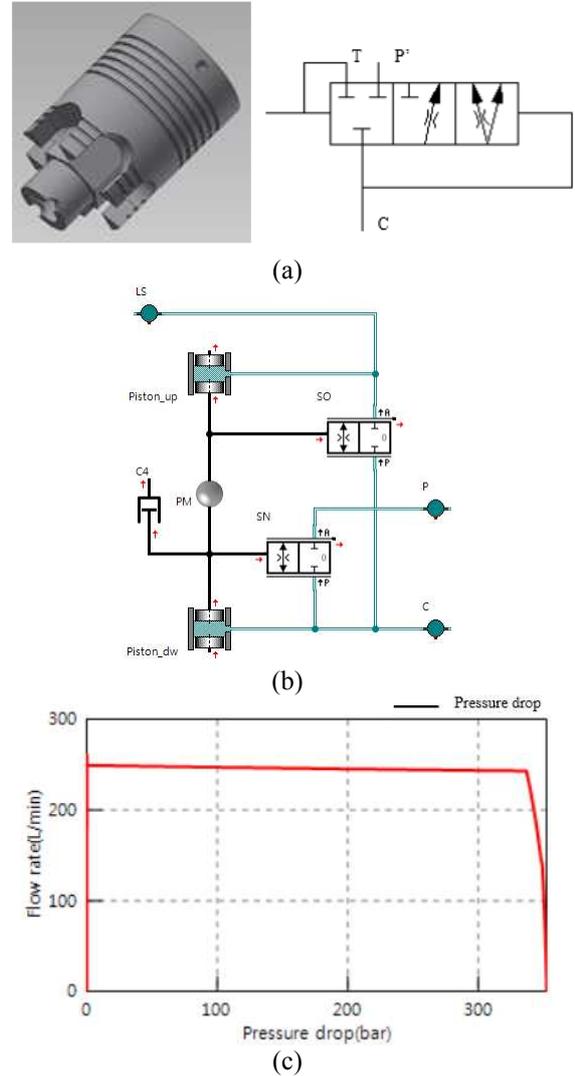


Fig. 7 Flow sharing valve (a) Hydraulic symbol and geometric shape (b) analysis model of the flow sharing valve (c) result of the simulation

기에 관계없이 조이스틱의 조작량에 따라 유량을 분배하는 기능이 필수적으로 필요하다. 이러한 기능을 수행하는 밸브를 유량 분배 밸브(flow sharing valve)라고 하며, 서로 다른 부하를 갖고 있는 액추에이터가 동시에 작동할 경우 부하의 크기에 관계없이 운전자의 의지에 따라 유량을 각각의 액추에이터로 분배한다. 이러한 기능 때문에 유량 분배 밸브를 보상밸브라 부르기도 한다. Fig. 7에 유량 분배 밸브의 기하학적인 형상, 유압 기호, 해석 모델 그리고 해석 결과를 각각 나타내었다.

Fig. 8은 시스템 효율과 특성을 분석을 위해 개발한 해석모델로 앞서 개발한 각각의 단품모델을

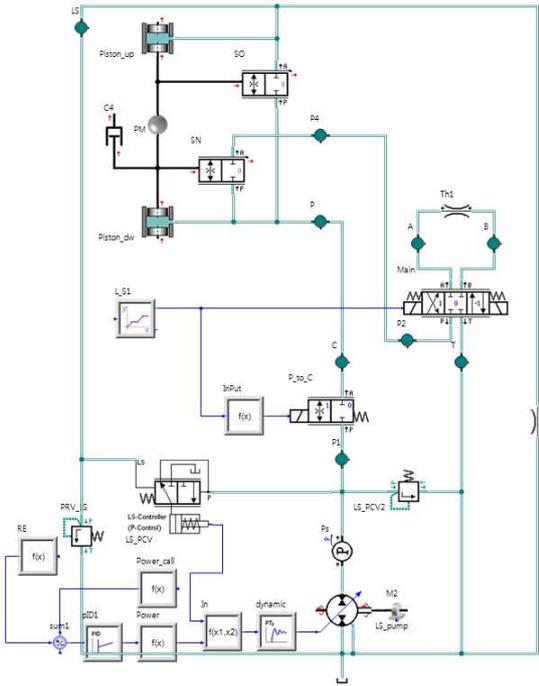


Fig. 8 Analysis model of the Load sensing system

이용하여 전체 시스템으로 확장한 것을 나타낸다.

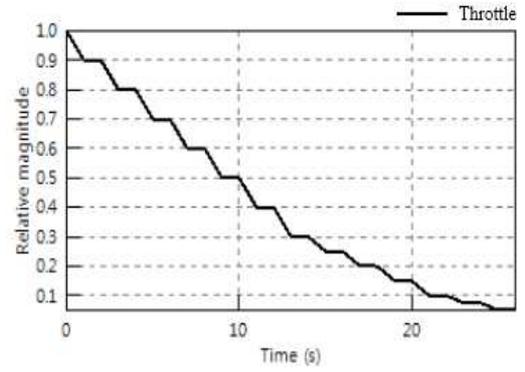
#### 4. 시스템 특성 분석 및 효율 검토

부하 감지형 유압 시스템을 제작하기 전 단계에서 해석모델을 이용하여 오픈루프 시스템과 부하 감지형 시스템의 효율특성을 분석 하고 시스템에 중요한 설계변수를 도출 하고자 한다. 또한, 병렬 회로에서 유량 분배 시스템의 특성도 면밀히 검토하고자 한다.

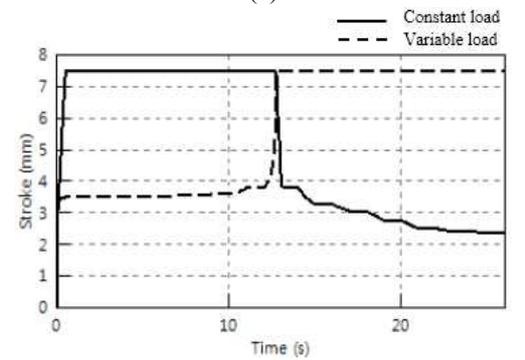
##### 4.1 유량 분배 시스템 특성

유압 굴삭기와 같이 다수의 액추에이터를 포함하고 있는 시스템은 복잡 동작에서도 작업자의 의지에 따라 조작성을 확보되어야만 한다. 본 시스템에 적용되어있는 유량 분배 밸브는 병렬 회로에서 복합 동작을 할 경우 액추에이터의 부하가 서로 다르더라도 조이스틱의 조작 량에 비례하는 유량을 각각의 액추에이터로 공급한다.

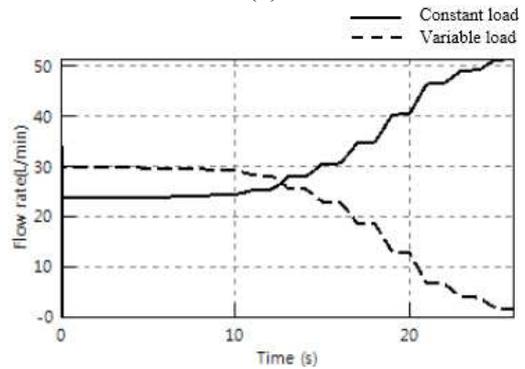
Fig. 9는 유량 분배 밸브가 적용된 시스템과 적용되지 않은 시스템의 해석 결과를 나타낸 것으로 2개의 서로 다른 부하 조건에서 해석한 결과이다.



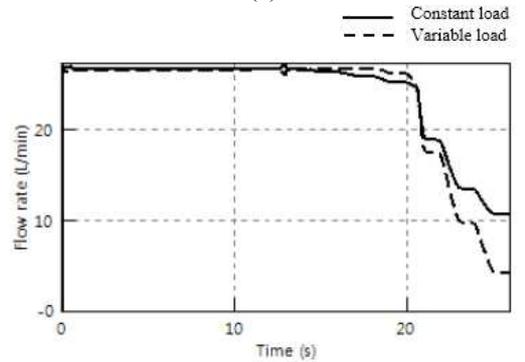
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9 Flow sharing characteristic (a) variable load signal (b) displacement of the compensators (c) results of the open center system (d) results of the load sensing system

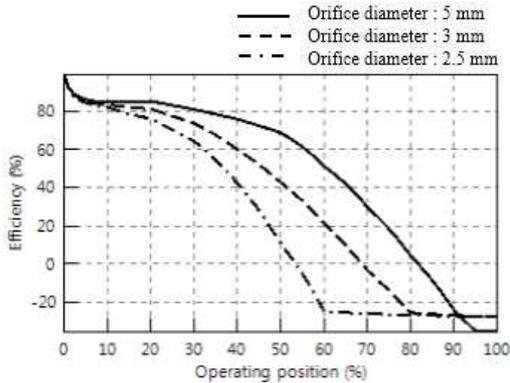


Fig. 10 Comparison results of the system efficiency of the open center and load sensing

유량 분배 특성을 분석하기 위해 복합 동작에서 하나의 액추에이터에 작용하는 부하 크기는 일정하게 고정하고 다른 한쪽의 액추에이터에 작용하는 부하 크기는 점점 증가시켰다. Fig. 9에서 (a)는 부하의 크기를 조절하기 위한 신호로 1은 밸브가 최대 개방 상태로 부하가 거의 없는 것을 의미하고 0으로 갈수록 밸브의 개도를 감소시켜 부하의 크기가 증가한다는 의미이다.

해석 결과를 보면, 유량 분배 밸브가 없는 시스템의 경우 조이스틱의 조작량에 관계없이 부하가 더 작은 쪽으로 더 많은 유량이 공급되지만 유량 분배 밸브가 포함되어 있는 시스템은 서로 다른 부하 조건에서도 압력 보상밸브에 의해 회로의 전체 부하가 조절됨으로써 거의 동일한 유량이 분배된다는 것을 알 수 있다. 또한, 극단적으로 부하의 크기가 차이 날 경우에는 전체 시스템의 공급 유량이 동시에 감소한다는 것도 알 수 있다. 이러한 기능이 가능한 이유는 병렬 회로에서 유량분배 밸브가 가변 저항 역할을 수행하기 때문이다.

4.2 오픈 센터 시스템과 부하 감지형 시스템의 효율

Fig. 10은 오픈 센터 시스템과 부하 감지형 시스템의 효율을 비교한 결과로 x축은 조이스틱의 조작량 y축은 오픈센터 시스템에 대한 효율 변화를 나타낸다.

해석 조건은 부하의 크기가 일정한 상태에서 조이스틱 조작량에 따른 효율의 특성을 분석하였으며, 부하의 크기에 따른 특성을 분석하기 위해 직경이 다른 오리피스를 사용하였다.

시뮬레이션 결과 부하가 클수록 부하 감지형 시스템의 효율이 높은 영역(+효율)이 감소하는데 이는 전체 시스템에 공급하는 동력이 제한된 상태에서 부하에서 사용된 동력이 전체 시스템에 지배적이기 때문이다. 또한, 부하 감지형 시스템의 효율이 더 낮은 영역(-효율)이 발생한다는 것을 알 수 있는데, 이는 유압 펌프를 제어하기 위한 가변 오리피스에서 발생하는 손실이 주된 원인으로 조이스틱의 조작량이 증가할수록 추가적인 동력 손실이 발생한다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 상용 소프트웨어인 SimulationX를 이용하여 오픈센터 시스템과 부하 감지형 시스템의 해석모델을 개발하였고 각각의 시스템 특성을 분하였다. 특히, 복합 동작에서의 시스템 제어 특성과 조이스틱의 조작량에 따른 시스템 효율을 비교분석하였으며, 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 오픈 센터 시스템의 해석모델을 개발함으로써 응용 시스템 설계 시 다양한 제어 방식과 환경 조건에서 효율 및 시스템 특성을 정량적으로 분석할 수 있는 해석 기술을 확보하였다.
  - (2) 제품 개발에 검증된 해석모델을 이용함으로써 시스템 개발 및 튜닝에 드는 시간 및 비용을 절감할 수 있다고 사료된다.
  - (3) 조이스틱 조작량이 약 50% 미만인 영역에서는 로드 센싱 시스템을 사용함으로써 오픈센터 시스템에서 발생하는 에너지 손실을 약 10~100% 줄일 수 있다는 것을 해석적으로 확인하였다.
  - (4) 조이스틱 조작량이 약 53% 이상에서는 로드 센싱 시스템이 오픈센터 시스템에서 발생하는 에너지 손실보다 0~40% 더 많은 에너지 손실이 발생한다는 것을 해석적으로 확인하였다.
  - (5) 유량 분배 밸브가 전체 부하를 조절해 줌으로써 병렬 회로에서 부하의 크기와 관계없이 조이스틱의 조작량에 따라 유량을 비례적으로 공급할 수 있다는 것을 검토하였다.
  - (6) 전체 시스템 중 최대 부하를 이용하여 유량 분배 밸브를 제어함으로써 하나의 액추에이터에 과부하가 걸릴 경우 전체 시스템의 유량이 동시에 감소한다는 것을 검토하였다.
- 로드 센싱 시스템과 오픈 센터 시스템을 비교

분석함으로써 다음과 같은 추가적인 연구가 필수적이라 판단된다.

1) 오픈 센터 방식의 메인 컨트롤 밸브는 후방 제어와 전방 제어가 있기 때문에 두 가지 시스템에 대하여 특성 및 효율을 비교 분석하는 것이 필요하다.

2) 펌프의 설정 압력을 제어하는 가변 오리피스 설계에 따라 펌프의 사관 제어가 되지 않는 구간과 시스템의 동력 손실이 달라지기 때문에 설계변수 민감도 분석을 통한 최적설계가 필요하다고 판단된다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Lee, T. K., Kim, T. K. and Kim, B. S., 2014, "The Modeling of Main Control Valve for a Hydraulic Equipment using the Parametric Technique," *Trans. of Korean Soc. of Mechanical Technology*, Vol. 16, No. 4, pp. 1743~1749.
- (2) Kim, K. Y., Jang, D. S. and Ahn, H. S., 2008, "A Study on the Bucket Tip's Position Control for the Intelligent Excavation System," *Trans. of Korean Soc. of Fluid Power Construction Equipment*, Vol. 5, No. 4, pp. 31~36.
- (3) Cho. J. H., Lee. J. S. and Yoo. J. H., 2012, "Characteristic Evaluation for Hydraulic System considering Notch Shape of Main Control Valve," Spring conference of KSFC, pp. 19~22.
- (4) Lee, Y. J., Lee, S. H. and Song, C. S., 2000, "A Study on the Characteristic Analysis of the Load-sensitive Hydraulic Pump Control System," *Trans. of Korean Soc. of Precision Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 148~154.
- (5) Lee, J. M., Park, S. H., Park, Y. H. and Lee, H. H., 2011, "Simulation on Characteristics of Constant Power Regulator Systems in Variable Displacement Acial Piston Pump," *Trans. of Korean Soc. of Power System Engineering*, Vol. 15, No. 2, pp. 5~12.
- (6) Cho, S. H., 2009, "Path Control with Energy-Saving Load-Sensing for a Cylinder-Load System Using Speed-Controlled Fixed Displacement Pump," *Trans. of Korean Soc. of Fluid Power Construction Equipment*, Vol. 16, No. 3, pp. 16~22.