

## 메인 컨트롤밸브의 해석모델 개발 및 검증 Development and Verification of Analytical Model of a Main Control Valve

김동명<sup>1</sup> · 이정민<sup>2</sup> · 정원지<sup>3</sup> · 장주섭<sup>4\*</sup>

D. M. Kim, J. M. Lee, W. J. Jung and J. S. Jang

Received: 11 May. 2015, Revised: 02 Jun. 2015, Accepted: 03 Jun. 2015

**Key Words** : Main Control Valve(메인컨트롤밸브), Excavator(굴삭기), Notch(노치), Analysis Model(해석 모델), SimulationX(시뮬레이션엑스)

**Abstract**: In order to control the actuators of hydraulic machinery such as excavators, various control valves are typically assembled in a single block. Such a control block is called a main control valve(MCV). In this paper, we analyzed the working principle and the particular purpose of the design of all valves included in the MCV system. To Examine the reliability of the analysis model, the pressure drop of the MCV at each port was measured. The authors developed an analytical model of the control valve(main spool, load poppet, pressure relief, make up, and regeneration). The authors considered the notch shape of the spool while developing the analytical models of the main spool valve. Most importantly, at the stage before the analysis model was applied in the design tuning, the reliability was ensured by comparing the analysis results with the test results. This paper showed a process of developing an analysis model that can be utilized in the design and tuning stages.

### 1. 서 론

굴삭기는 1800년대 철도 건설에 사용하기 위해 증기기관을 이용하여 개발되었으며, 다양한 기능이 추가되면서 성능향상을 통해 현재의 굴삭기까지 개발되었다. 굴삭기는 3가지 종류의 실린더를 이용한 다관절 로봇의 시초라 할 수 있으며, 주행 방식에 따라 크롤러 타입과 휠 타입으로 크게 구분되지만 작

업 안정성이 요구되는 현장에서는 대부분 크롤러 타입의 굴삭기를 사용하고 있다. 특히 굴삭기 시스템에서 효율 향상에 대한 연구가 많이 수행되어 다양한 제어 방식과 부하 감지 방식도 개발되었으며 현재에도 효율 향상을 위해 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>1,2,3)</sup>

굴삭기는 굴삭 작업 및 토사 운반을 위한 버킷, 지반을 파쇄하기 위한 브레이커, 건물 해체 및 암석 파쇄를 위한 크라샤 등 단순하게 작업기만 교체하더라도 다양한 작업을 수행하기에 적합하기 때문에 활용도가 높고 건설기계 중에서도 가장 보편적으로 사용되고 있다.<sup>4)</sup>

굴삭기 시스템은 엔진, 유압 펌프 및 모터, 제어 밸브 그리고 실린더로 구성되어있으며, 굴삭기가 회전하더라도 상단부와 하단부에 원활한 유량을 공급하기 위한 센터 조인트 밸브가 시스템에 장착되어 있다.

메인 컨트롤밸브(MCV)는 각종 제어밸브(Holding, main spool, makeup, overload relief)를 하나의 블록으로 구성한 것으로 주된 기능은 펌프에서 발생하는

\* Corresponding author: jjs1@gachon.ac.kr

1 Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Gachon University, Gyeonggi 461-701, Korea

2 Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Changwon University, Gyeongsangnam 20, Korea

3 Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Gachon University, Gyeongsangnam 20, Korea

4 J. S. Jang : Department of Mechanical Engineering, Gachon University, Gyeonggi 461-701, Korea

Copyright © 2015, 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.

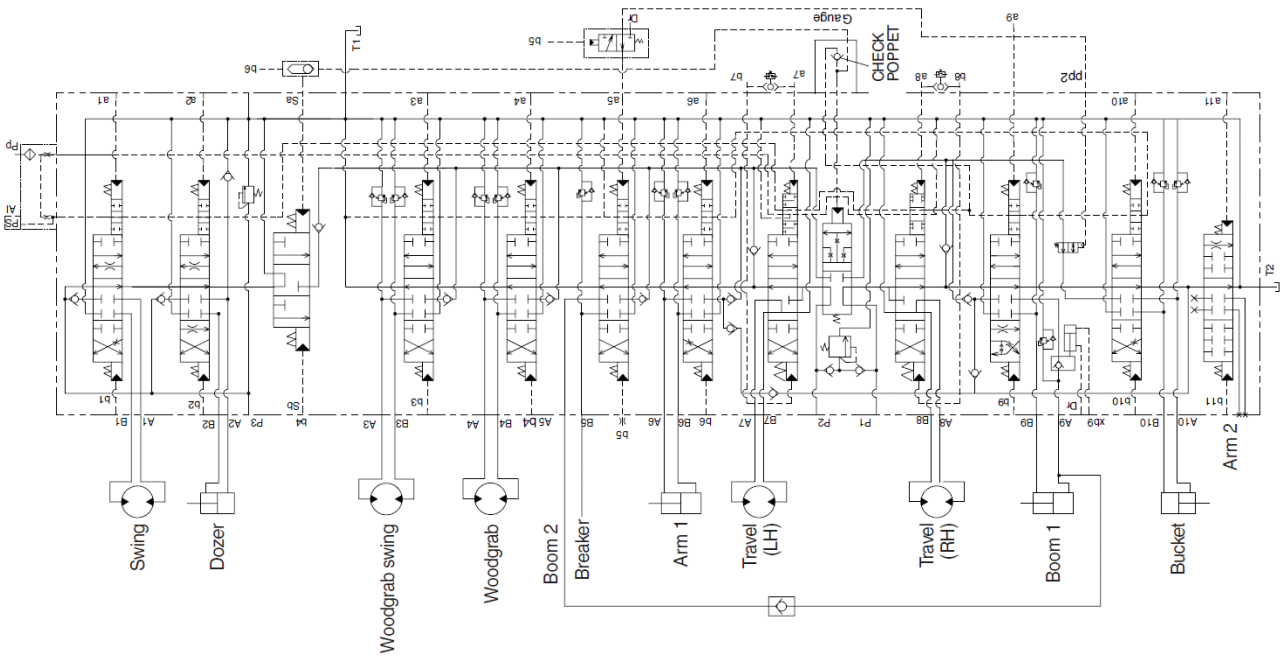


Fig. 1 Hydraulic circuit of main control valve

유량을 작업자가 원하는 액추에이터로 보내줌으로써 유량의 흐름 방향을 바꿔주는 역할을 기본적으로 수행하고 있다. 굴삭기의 모든 움직임일 제어하는 MCV는 굴삭기의 핵심 부품이라 할 수 있지만 대부분 유압 펌프 및 모터, 그리고 일부 작업기에 대한 연구가 대부분을 차지하고 있다.<sup>5, 8)</sup>

본 연구에서는 MCV의 구조와 작동원리를 면밀히 분석하고 각각의 제어 밸브와 주 스톱의 해석모델을 개발하였다. 주 스톱 모델 개발 시 액추에이터의 동적 특성을 분석할 수 있도록 노치 형상을 고려했으며, 해석 모델을 튜닝에 활용할 수 있도록 시험 결과와 해석결과를 비교하여 해석 모델의 신뢰성을 확보하고자 한다.

## 2. 메인 컨트롤 밸브의 구조 및 작동원리

### 2.1 메인컨트롤 밸브의 회로 분석

모바일 유압인 굴삭기 시스템은 설치 공간의 한정으로 밸브가 하나의 블록으로 구성되어 있으며 제어 방식에 따라 네거티브 컨트롤(negative control), 포지티브 컨트롤(positive control), 부하 감지 컨트롤(load sensing control) 등으로 구분된다. 시스템 분석을 수행하기 전 단계에서 회로를 분석하고 구성 부품의 역할과 작동원리 파악하여 정확한 회로의 설계 의미를 이해하는 것은 매우 중요하다.<sup>7)</sup>

Fig. 1은 6ton 급에 적용된 메인 컨트롤 밸브의 유

압회로를 나타낸 것으로 총 12개의 층으로 구분되어 있다. 펌프는 총 3개를 사용하고 있으며 기본적으로는 공급하는 액추에이터가 구분되어 있으며 필요에 따라 같이 사용하거나 구분되어 사용할 수 있다. 선형 액추에이터는 붐(Boom), 암(Arm), 버킷(Bucket) 그리고 도저(Dozer)로 구성되어 있으며 회전 액추에이터는 주행 모터(Travel) 그리고 회전(Swing) 모터로 구성되어 있다. 메인 컨트롤 밸브의 제어밸브는 방향제어밸브(주 스톱), 메이크업 밸브(Make up valve), 압력 제어 밸브(Pressure relief valve), 체크 밸브(load poppet) 그리고 홀딩(Holding) 밸브로 구성되어 있다.

각각의 펌프 역할과 회로 작동 원리를 분석하면 다음과 같다. P1, P2 펌프의 경우 주 펌프 역할을 수행하며 복합 작동 시 주행 모터(Travel L or R)에 우선적으로 에너지를 공급하고 나머지를 액추에이터(Boom, Arm, Bucket)에 공급하기 위해 설계되어 있다. 주행 모터만 나머지 액추에이터와 다르게 직렬 회로로 구성되어 있다. P3 펌프는 스윙모터와 도저 실린더에 부하의 크기와 주 스톱의 개도면적에 따라 액추에이터들로 유량을 배분하고 붐, 암 그리고 버킷 실린더에 보조 유량을 공급하는 역할도 수행한다. 하지만, 보조 공급보다 도저와 스윙작업이 우선시 되어 있기 때문에 두 개의 액추에이터가 작동하지 않는 조건에서만 보조 공급기능을 사용할 수 있다. P3의 공급 조건은 외부 파일럿 압력 신호에 의해 작동된다.

### 2.2 메인컨트롤 밸브의 구조

Fig. 2에 MCV의 전체 섹션의 절단도면을 나타냈으며 3개의 주 공급 유로를 표시하였다. Fig. 3은 암 (arm) 부분의 상세구조를 명시한 것으로 주 공급 라인의 로드 포핏, 오버로드 릴리프 밸브 그리고 메인 스푼으로 구성되어 있다. 해석모델 개발과 분석 그리고 검증은 전체 밸브에 대해 수행하였지만 압력제어 밸브와 노치의 개도면적 외에는 대부분이 동일하기 때문에 본 연구에서는 암 섹션을 기준으로 설명하였다.

### 2.3 메인컨트롤 밸브의 작동원리

본 시스템은 고압의 유체 에너지를 이용하여 주 스푼의 위치를 조작함으로써 유량의 흐름 방향을 제어한다. 스푼을 조작하는 압력을 파일럿 압력이라 하며 작업자의 조이스틱 조작량에 비례한다. 그러므로 조작자의 작업 의지에 따라 실린더의 방향과 속도를 제어할 수 있다. 또한, 암과 봄 스푼 내부에는 재생 밸브가 내장되어 있는데 이는 실린더 하강 시 중력 에너지를 재사용하기 위한 것이다.

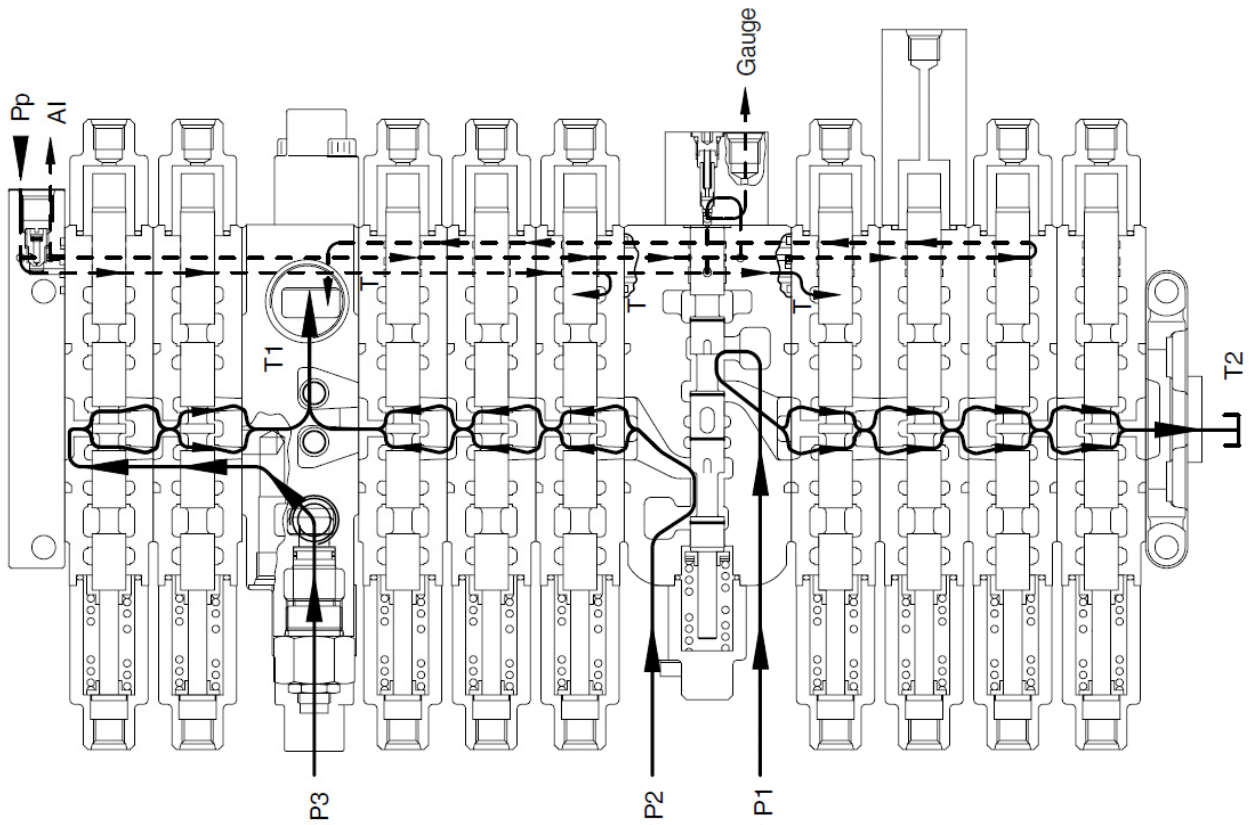


Fig. 2 Schematic diagram of main control valve

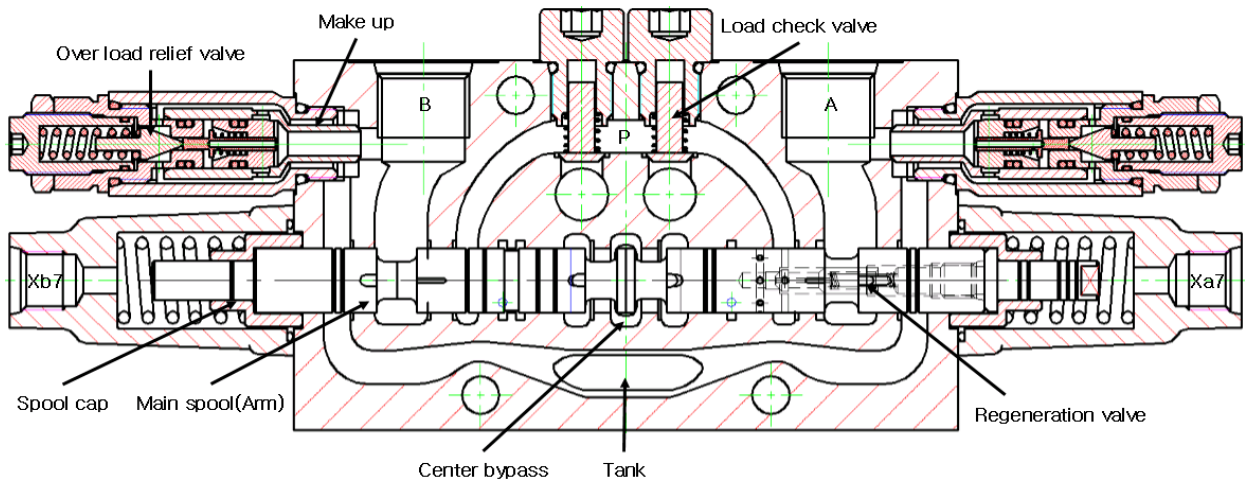


Fig. 3 Schematic diagram of the ARM1 section

### 3. 메인컨트롤 밸브 시험

MCV의 시험은 압력 손실에 관한 시험과 제어 밸브의 성능 시험으로 나뉜다. 압력 손실은 크게 두 가지 영역에 대해 시험을 해야 하는데 첫 번째는 모든 밸브가 중립 모드일 때 펌프에서 탱크로 귀환되는데 발생하는 압력 손실, 두 번째는 각각의 섹션에서의 미터인과 미터 아웃에 대한 것이다. 제어 밸브의 성능시험은 붐의 홀딩 밸브, 메인 릴리프 밸브, 오버로드 릴리프 밸브 등이 있으며 각각의 단품 시험을 측정했다.

시험 장비를 Fig. 4에 나타냈으며 시험에 사용한 장비를 Table 1에 나타냈다.

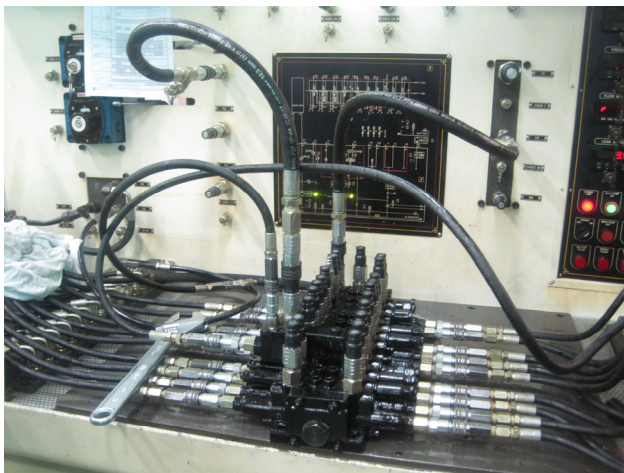
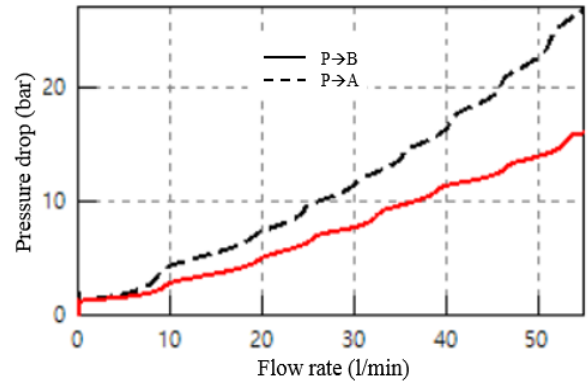


Fig. 4 Photograph of the test device

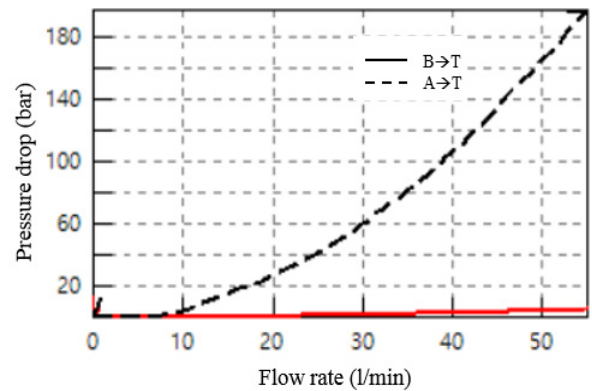
Table 1 Device of the test

Item	Spec
Main pump	175 kW, 180 cc/rev, PARKER
Pilot pump	50 ml/rev, PGP511, PARKER
Pressure sensor	PI6061-400(50), AML
Flow meter	RE4-300, HYDROTECH
Electronic Motor	75 kW, H6YUNDAI

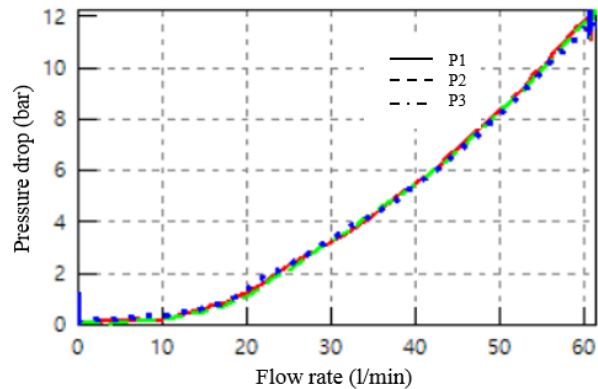
Fig. 5는 성능 시험한 결과들 중 일부를 나타낸 것으로 (a)는 미터인 압력 손실에 대한 시험 결과, (b)는 미터 아웃 압력 손실 결과, (c)는 P의 바이패스 압력 손실, (d)는 메인 릴리프 밸브, (e)는 오버로드 릴리프 밸브, (f)는 메인 스톱의 변위에 대한 시험결과이다.



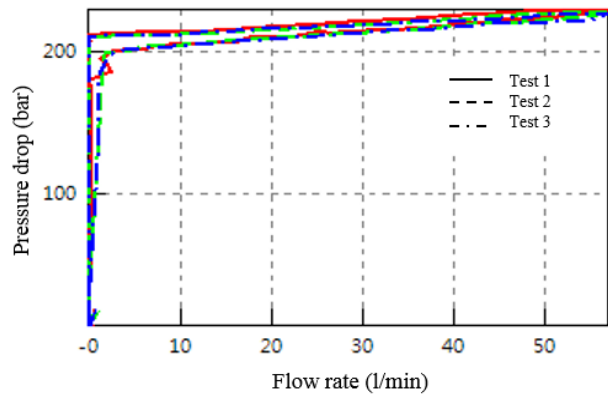
(a) Pressure drop during the meter-in actuation



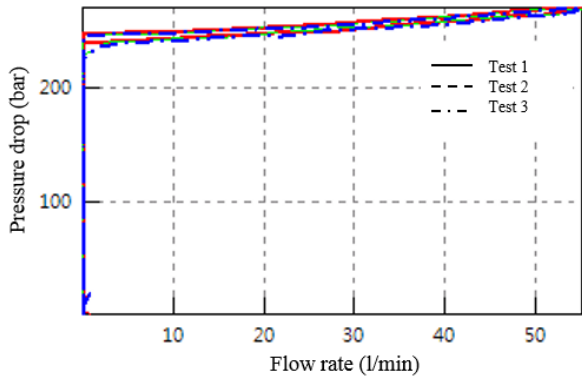
(b) Pressure drop during the meter-out actuation



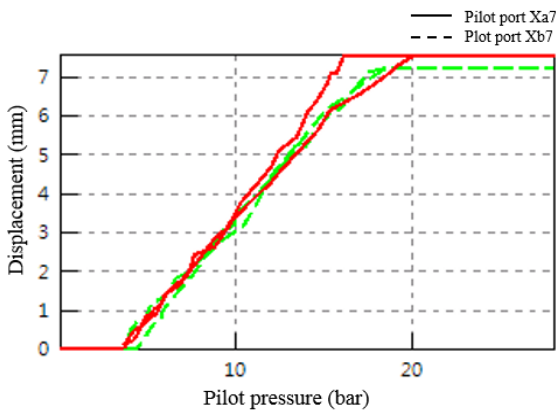
(c) Pressure drop in the return circuit



(d) Pressure drop in the main relief valve



(e) Pressure drop in the overload relief valve



(f) Displacement of the main spool

Fig. 5 Results of the test

시험 결과를 보면 A와 B의 압력 손실에 차이가 있는데 이러한 이유는 스푼 밸브의 로드 부의 직경이 차이이기 때문이다. 미터 아웃은 A 또는 B에서 탱크로 빠질 때 발생하는 압력손실 즉 배압을 말한다. 각각의 포트에서 탱크로 유량이 흐르는 경우 두 개의 배압 차이가 매우 큰 것을 볼 수 있는데 이는 재생밸브를 이용하여 에너지를 재활용하기 위해서는 고압의 에너지가 필요하고 이를 A에서 T방향으로 유로의 개도면적을 조절함으로써 가능하다.(암 또는 붉이 위에서 아래로 내려오는 방향) 본 시스템에서는 재생에 필요한 압력을 형성하기 위해 스푼이 최대한 움직인 상태에서도 유량이 노치로만 흐를 수 있도록 설계되어 있다.

중립 위치에서 탱크로 귀환되는 라인의 압력손실은 P1, P2, 그리고 P3가 거의 동일하다는 것을 알 수 있으며 압력이 거의 작용하지 않는다는 것을 알 수 있다. 본 시스템은 중립 조건에서 탱크로 직결되는데 이는 릴리프 밸브를 이용한 초기의 시스템에 비해 에너지 효율이 높지만 다양한 제어 방식이 도입된 현재의 시스템에 비해서는 효율차이가 상당히 발생할 것이다.

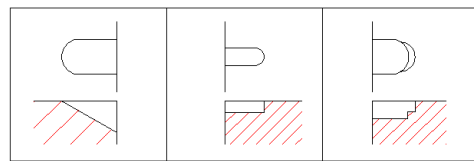
2개의 압력제어 밸브(메인 릴리프 밸브, 오버로드 릴리프 밸브)는 연속적으로 3회에 걸쳐 시험을 수행하였으며 메인 릴리프 밸브의 히스테리시스가 비교적 크게 발생했다는 것을 알 수 있다. 이는 시험 방식이 자동화 방식이 아니고 인력으로 수행하기 때문에 발생할 수 있으며 밸브의 구조에 의해서도 발생할 수 있다. 파일럿 압력에 의한 밸브의 변위를 시험한 결과 양단의 최대 변위에 미미한 차이가 발생했다. 하지만, 파일럿 Xa7(f의 실선)히스테리시스가 크게 발생하는 이유는 스푼 캡의 댐핑과 외력조건이 복귀하는 방향과 작동하는 방향이 서로 다르기 때문이다.

#### 4. 해석 모델 개발 및 신뢰성 검토

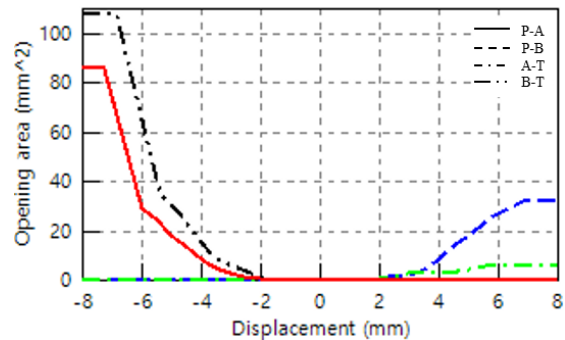
##### 4.1 메인 스푼

메인 스푼은 각각의 유로에 서로 다른 노치 형상으로 설계되어 있으며, 액추에이터의 단순 또는 복합 동작 시 동적특성에 중요한 설계 요소로 해석모델 개발 시 정확한 개도면적을 적용하는 것이 중요하다. 암의 스푼과 노치 형상은 반원 형상의 노치가 설계되어 있으며 대표적인 노치 형상을 Fig. 6에 나타냈다. 노치의 치수 선정은 시스템의 부하의 크기와 작동 방식에 따라 결정되는데 반원 노치는 다른 노치 형상에 비해 미세 작동에 더 적합하다.

메인 스푼은 파일럿 압력에 의해 작동되며 스푼의 위치에 따라 P에서 A, B로 공급된다. Fig. 6의 (b)는 암 스푼의 변위에 대한 개도면적을 나타낸다.



(a) Schematic diagram of notch shape

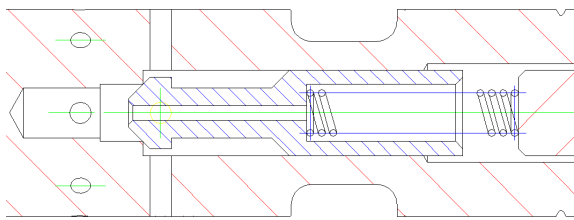


(b) Opening area of the main spool

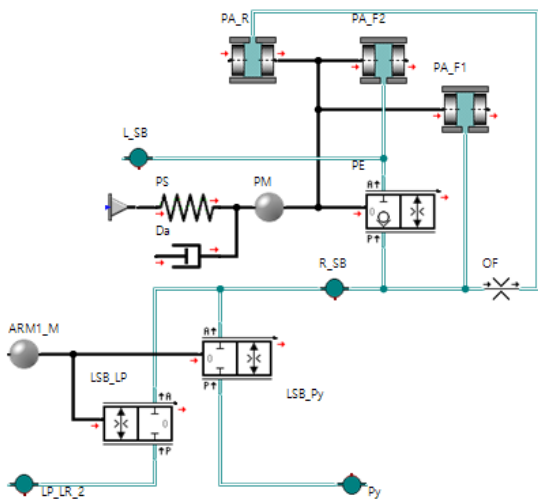
Fig. 6 Main spool Opening area

### 4.2 재생 밸브

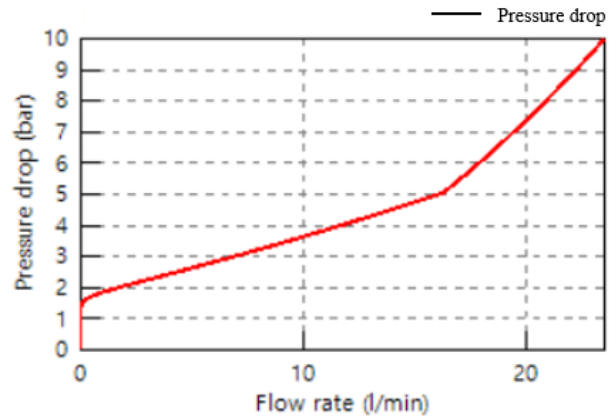
재생밸브는 압 스톨 내부에 장착되어 있으며 오리 피스를 통해 탱크로 귀환되는 유압유를 다시 실린더로 공급하는 밸브이다. 중력 에너지를 사용하여 굴삭기 시스템의 효율을 향상 시키는 기능으로써 P에서 B로 공급할 때 A에서 T로 흐르는 유량의 일부를 B로 공급함으로써 에너지 회생이 가능하다. 압 스톨 내부에 있는 재생밸브의 구조와 해석모델을 Fig. 7에 나타냈으며 밸브 변위에 대한 개도면적과 압력 손실에 대한 해석 결과를 Fig. 8에 나타내었다.



(a) Schematic diagram of the regeneration valve



(b) Analysis model of the regeneration valve  
Fig. 7 Regeneration valve



(b) Pressure drop characteristic

Fig. 8 Results of the analysis model

### 4.3 오버로드 릴리프 밸브

굴삭기 시스템에 사용되는 릴리프 밸브는 크게 2가지로 구분되어 있는데 메인 유로의 시스템의 압력을 제한하기 위한 메인 릴리프 밸브와, 각각의 포트에 장착되어있는 오버로드 릴리프 밸브로 구분되어 있다. 메인 릴리프 밸브와 오버로드 릴리프 밸브는 대 유량에 적합하도록 파일럿 압력제어 방식으로 설계되어 있으며 오버로드 릴리프 밸브에 진공 현상을 억제하기 위한 기능이 추가된 것만 서로 다르다.

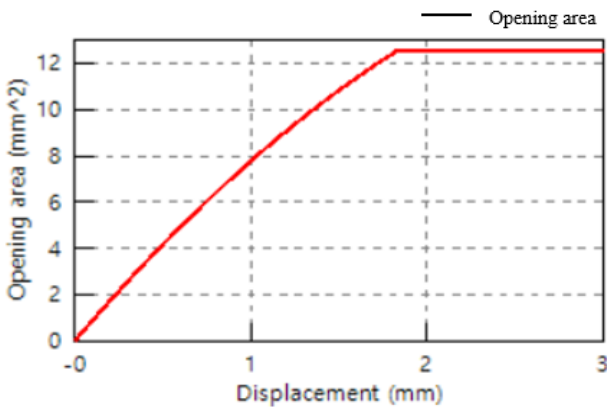
오버로드 릴리프 밸브의 기본적인 기능으로는 서지 압력으로부터 회로를 보호하는 것이며 메이크업 기능을 추가하여 시스템에서 진공이 발생하는 것도 방지한다. 주로 메이크업 기능은 폐구간에서 액추에이터가 급정지할 경우 진동할 때 캐비테이션에 의한 회로 손상을 방지하기 위해 시스템의 압력이 진공압력 이하로 떨어질 경우 유량을 보충해주는 것이다.<sup>6)</sup>

릴리프 밸브의 구조는 Fig. 3의 조립도면에 타냈으며 Fig. 9은 해석모델이다. Fig. 10는 해석모델의 신뢰성을 검토한 결과이며, 해석결과가 시험결과와 매우 유사하다는 것을 알 수 있다.

### 4.4 로드 체크 밸브

로드 체크 밸브는 포핏 유형으로 공급 라인에 각각 설치되어 있다. 펌프에서 A 또는 B로 자유롭게 급을 허용 하지만 역방향 흐름을 억제한다. 설계의 목적은 회로의 최대 공급 압력보다 부하 압력이 큰 경우에도 액추에이터가 자유낙하 하는 것을 방지하기 위한 것이며, 고정된 위치를 유지하기 위한 이유로 설치되어 있다.

Fig. 3에 로드 체크 밸브를 나타냈으며, Fig. 11에 해석 모델과 해석결과를 각각 나타내었다.



(a) Opening area according to the spool stroke

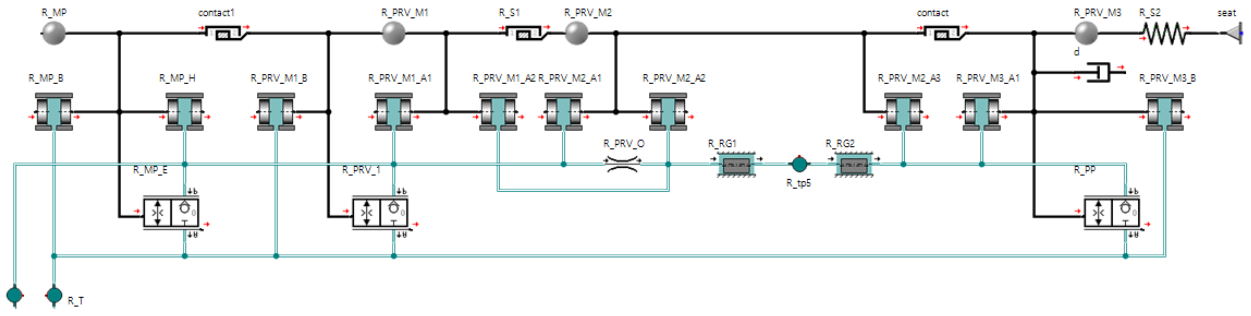


Fig. 9 Analysis model of the overload relief valve

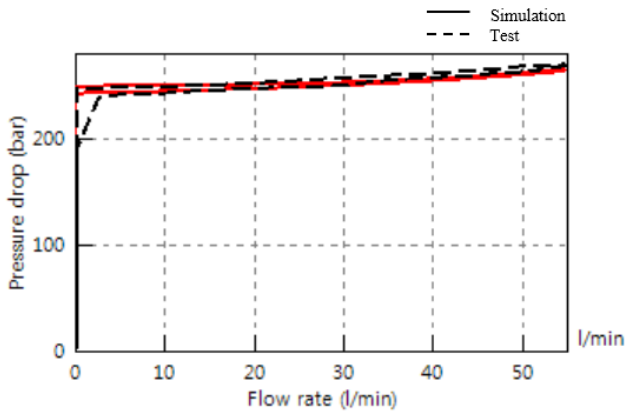
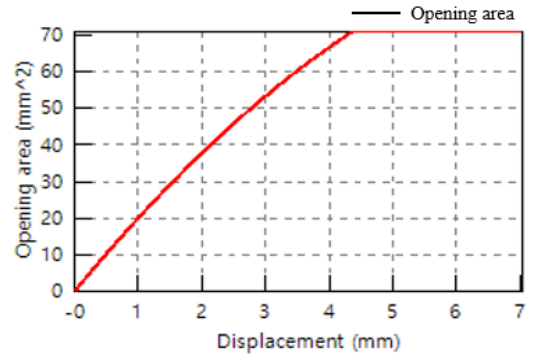
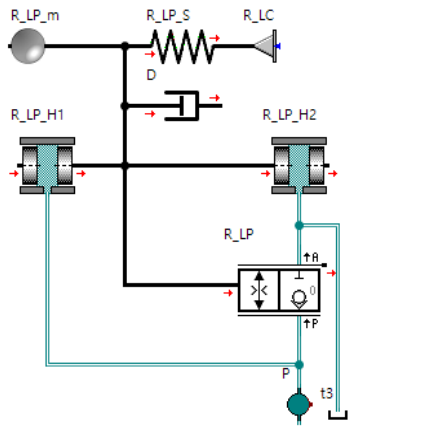


Fig. 10 Comparison of analysis result and test

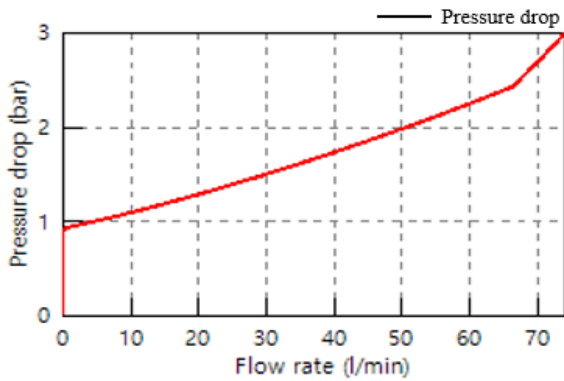


(c) Opening area according to the poppet stroke

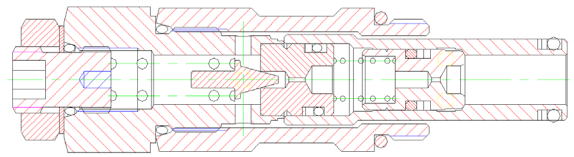
Fig. 11 Load check valve



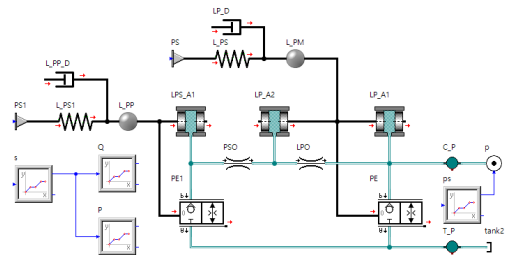
(a) Analysis model



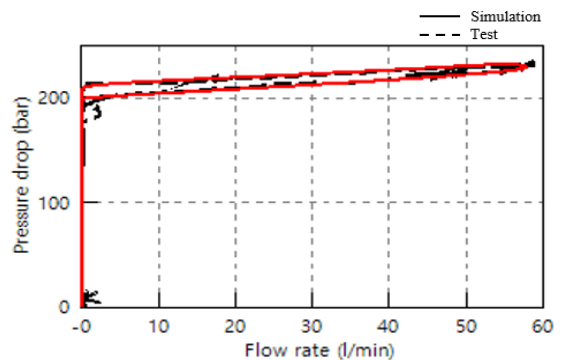
(b) Pressure drop characteristic



(a) Schematic diagram of the main relief valve



(b) Analysis model of the main relief valve



(c) Comparison of analysis result and test

Fig. 12 Main relief valve

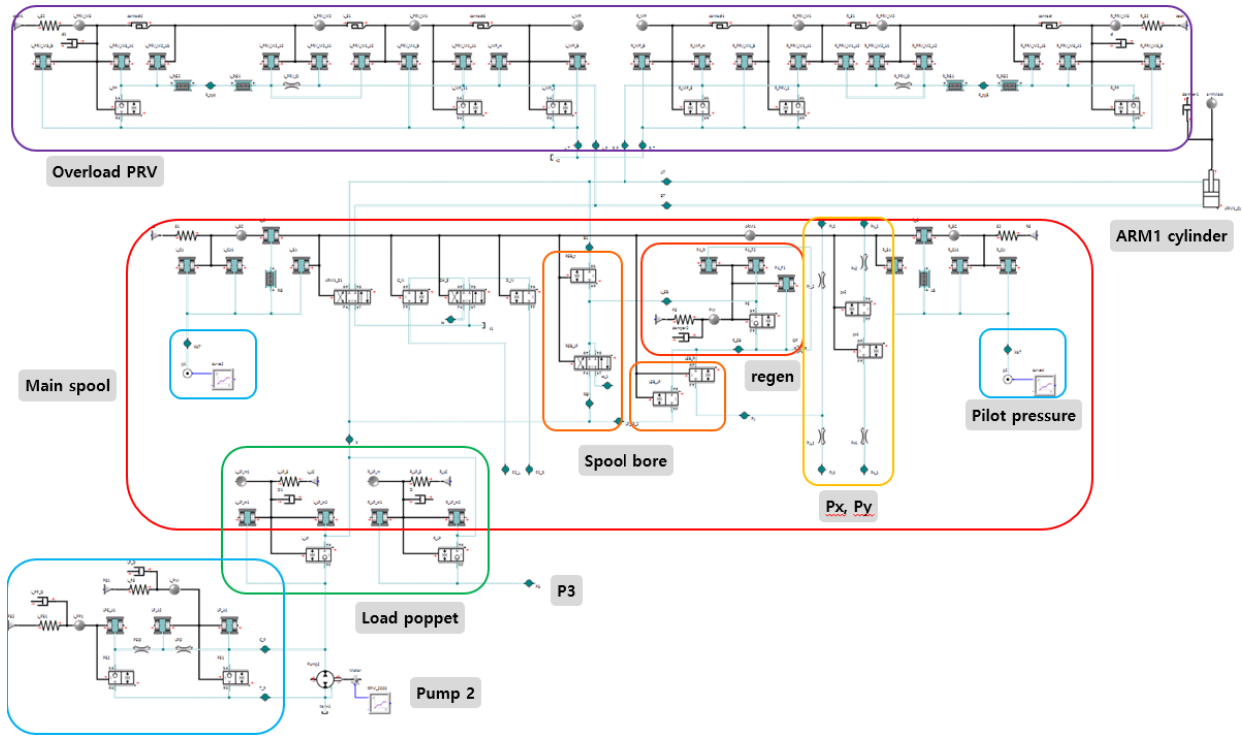


Fig. 13 Full model of the ARM section

#### 4.5 메인 릴리프 밸브

메인 릴리프 밸브는 각각의 공급 회로에 장착 되어 시스템의 최대 압력을 제한하는 기능을 수행한다. 메인 릴리프 밸브는 시스템의 최대 공급 유량이 탱크로 리턴 될 수 있을 정도로 충분한 용량으로 선정해야만 과도한 회로의 압력을 제한하여 시스템을 안전하게 보호할 수 있다. 즉, 펌프의 최대 유량을 릴리프 밸브로 흘려보내더라도 컨트롤 범위 내에서 작동 되어야 한다.

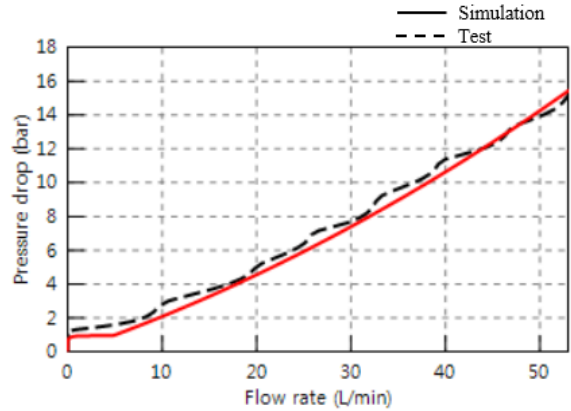
Fig. 12는 메인 릴리프 밸브에 대한 것으로 (a)는 구조, (b)는 해석 모델 그리고 (c)는 해석 결과와 시험결과를 비교한 것이다.

#### 4.6 ARM의 부분의 전체 시스템

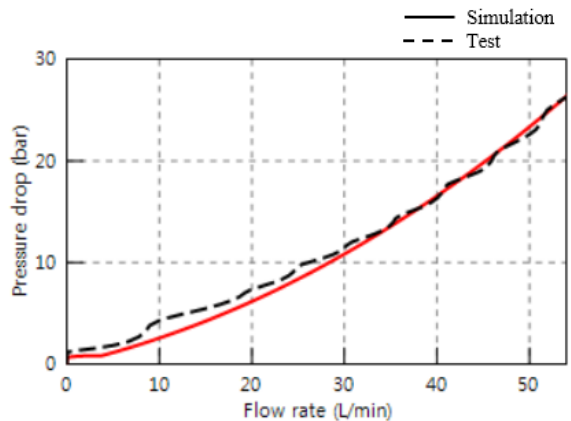
각각의 제어 밸브들을 조합하여 ARM의 섹션에 대해 전체 모델링을 개발한 것이 Fig. 13이다. Fig. 14는 전체 해석모델의 신뢰성을 검토한 결과로 유량에 대한 압력 손실과 파일럿 압력에 대한 밸브 변위를 시험결과와 비교한 것이다.

해석 모델 검증 결과 대부분이 시험 결과와 유사하지만 펌프에서 A 또는 B포트로 유량이 흐를 때 발생하는 손실(a, b)과 중립 조건에서 펌프에서 탱크로 유량이 흐를 때 발생하는 손실(e)에 다소 차이가 발생하는데 이는 밸브 시험 시 손으로 조작하여 밸

브의 동적 특성이 포함되었기 때문이다.

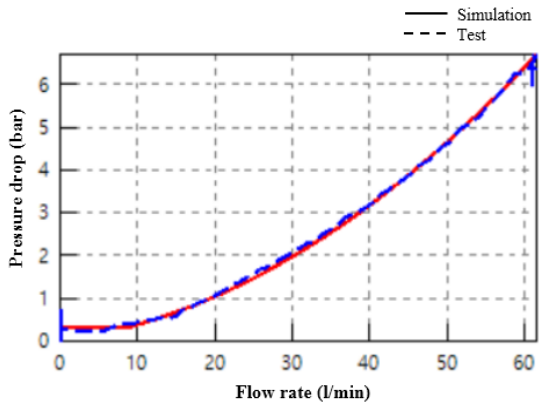


(a) A direction from the port P

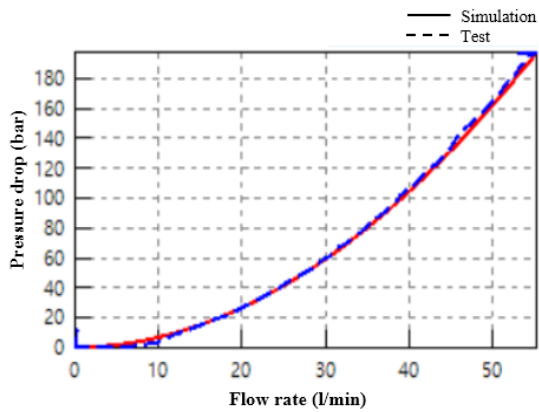


(b) B direction from the port P

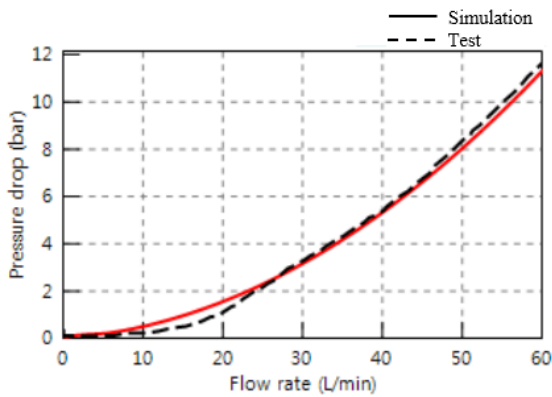




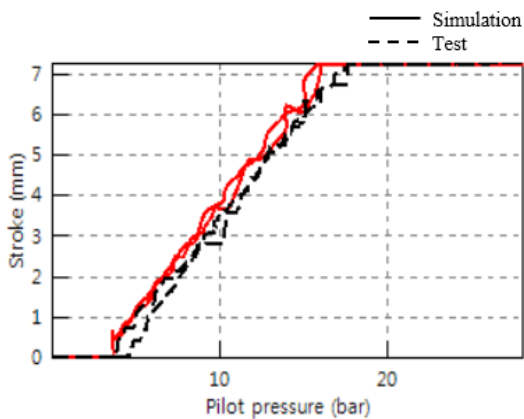
(c) T direction from the port B



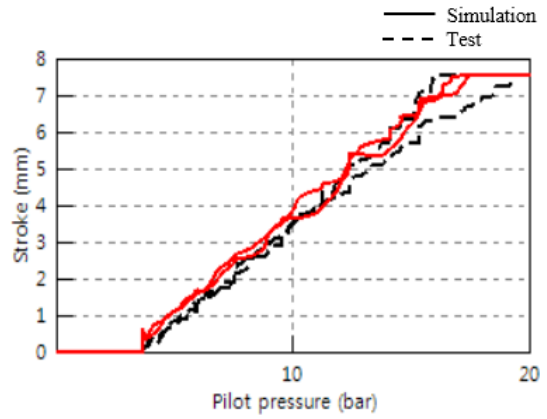
(d) T direction from the port A



(e) T direction from the port P



(f) Spool displacement to the right of the pilot pressure



(g) Spool displacement to the left of the pilot pressure

Fig. 14 Verification of the reliability of the analysis model

## 5. 결 론

본 논문에서는 MCV의 구조와 작동원리를 면밀히 분석하고 해석모델을 개발하였으며, 향후 밸브 튜닝에 사용할 수 있도록 시험데이터와 해석 결과를 비교함으로써 해석모델의 신뢰성을 확보하였다. 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 제어밸브의 해석모델을 개발하고 검증함으로써 성능 향상 및 튜닝에 사용할 수 있는 해석 환경을 구축하였다.

2) 메인 스펴의 해석모델 개발 시 각각의 노치 형상을 고려하여 액추에이터의 동적 특성을 예측할 수 있는 해석기술을 확보하였다.

3) 검증된 해석모델을 확장하여 제어 기능을 추가함으로써 시스템 효율을 검토할 수 있는 해석모델을 개발하였다.

추후 다음과 같은 연구가 추가적으로 필요하다고 판단된다.

1) 재생 밸브는 양단의 압력 차이에 따라 채터링 현상이 발생할 수 있기 때문에 밸브의 민감도 분석이 필요하다.

2) 재생 밸브를 이용하여 에너지 회생을 수행할 경우 효율 향상에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

3) MCV회로에 로드 센싱 기능을 추가함으로써 시스템의 효율 향상에 대한 연구가 필요하다.

4) 복합 동작에 대한 개도 면적의 민감도 분석이 필요하다.

## References

- 1) S. H. Cho and J. H. Ahn, "Trajectory Tracking Control of a Boom • Arm System of Hydraulic Excavator Using Disturbance Observer," Journal of KSFC., Vol. 1, No. 1, pp. 23-30, 2004.
- 2) S. H. Cho, "Path Control with Energy-Saving Load-Sensing for a Cylinder-Load System using Speed-Controlled Fixed Displacement Pump," Journal of KSFC., Vol. 6, No. 3, pp. 16-22, 2009.
- 3) Y. B. Lee, "A New Approach to the High Efficiency of Hydraulic Excavator," Journal of KSFC., Vol. 11, No. 4, pp. 39-45, 2014.
- 4) S. S. Yang, S. M. Jin, J. J. Choi, C. D. Lee and Y. S. Kim, "A Study on Tracking Control of Remote Operated Excavator for Field Robot," Journal of KSFC., Vol. 6, No. 4, pp. 9-15, 2009.
- 5) J. H. Cho, J. S. Lee, and J. H. Yoo, "Characteristic Evaluation for Hydraulic System considering Notch Shape of Main Control Valve," KSFC Conference spring. pp. 19-22, 2012.
- 6) B. S. Yoo, S. W. Koo, and J. S. Joh, "A Study on Suppression of Vibration Caused by Quick-stop Operation of Hydraulic Excavator Boom," Journal of KSFE., Vol. 27, No. 12, pp. 33-40, 2010.
- 7) K. Y. Kim., D. S. Jang and H. S. Ahn, "A Study on the Bucket Tip's Position Control for the Intelligent Excavation System," Journal of KSFC., Vol. 5, No. 4, pp. 31-36, 2008.
- 8) T. K. Lee., T. K. Kim and B. S. Kim, "The Modeling of Main Control Valve for a Hydraulic Equipment using the Parameteric Technique," Journal of KSMT., Vol. 16, No. 4, pp. 1743-1749, 2014.