기술논문

Journal of Drive and Control, Vol.12 No.3 pp.52-59 Sep. 2015
ISSN(print) 2234-8328 ISSN(online) 2287-6146
http://dx.doi.org/10.7839/ksfc.2015.12.3.052

21톤급 전기 굴삭기용 파일럿 작동식 유량제어 밸브의 해석모델 개발 및 검증

Development and Verification of Analytical Model of a Pilot Operated Flow Control Valve for 21-ton Electric Excavator

김동명[1] · 남용윤[2] · 서자호[2] · 장주섭[1]*
D. M. Kim, Y. Y. Nam, J. H. Seo and J. S. Jang

Received: 28 Jul. 2015, Revised: 24 Aug. 2015, Accepted: 25 Aug. 2015

Key Words : Electronic Excavator(전기 굴삭기), Pilot-Operated Flow Control Valve(파일럿 작동식 유량 제어 밸브), Electro Hydraulic Poppet Valve(전기 유압 포핏 밸브), Analysis Model(해석 모델)

Abstract: An electro hydraulic poppet valve (EHPV) and a variable orifice poppet are assembled in a single block, which is referred to as a RHINO but is also generally called a pilot-operated flow control valve. In this study, we analyzed the structure and the operating principle for a RHINO applied in a 21-ton electric excavator system. The RHINO was experimentally tested to measure the dynamic responses and the pressure energy loss. In this test, we investigated the variation in the conductance coefficient according to the increase in the supply pressure under a constant current and a variation in the flow rate according to the increase in the current. Then, the geometrical shapes and the spring stiffness of the RHINO were considered to develop an analysis model. The characteristics (current-force and hysteresis) for the solenoid based on the experimental data were reflected in the analysis model that was developed, and the reliability of the analysis model was also verified by comparing the experimental and analytical results. The developed model is thus considered to be reliable for use in a wide range of applications, including optimum design, sensitivity analysis, parameter tuning, etc.

기호 설명

P_N : pressure at nose port, N/m^2
P_S : pressure at side port, N/m^2
P_C : pressure inner EHPV, N/m^2
P_{CC} : pressure in control chamber, N/m^2
$\triangle P$: pressure drop, N/m^2
A_{PN} : area in nose of a main poppet, m^2
A_N : area in nose of a variable orifice poppet, m^2
A_{PS} : area in side of a main poppet, m^2
A_S : area in side of a variable orifice poppet, m^2
A_C : area in control chamber of a EHPV, m^2
A_{CC} : area in control chamber of a variable orifice poppet, m^2
F_{bias} : spring force at the bias spring, N
F_{Pbias} : spring force at the pilot bias spring , N
F_{flow} : flow force of a variable orifice poppet, N
F_{Pflow} : flow force of a pilot valve, N
F_{seat} : seat force of a variable orifice poppet, N
F_{Pseat} : seat force of a pilot valve , N
Q : flow rate, m^3/s
K_v : conductance coefficient, lpm/sqrt(bar)

* Corresponding author: jjs1@gachon.ac.kr
1 Department of Mechanical Engineering, Gachon University, Gyeonggi 13120, Korea
2 Korea Institute of Machinery and Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34103, 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.

1. 서 론

현재 시대에서는 화석연료를 사용하는 기계시스템이 지구의 환경오염과 온난화에 주된 원인으로 주목받고 있다. 또한, 화석연료가 유한한 자원이기 때문에 미래의 자원 고갈에 대한 대책도 반드시 필요한 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 많은 공학자들은 시스템의 효율을 향상시키기 위한 연구와 대체연료에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다.[1,2)]

건설기계 분야에서는 사용빈도가 높은 굴삭기에 대한 연구가 비교적 많이 진행되었으며, 중력을 이용한 에너지 회생과 유압 펌프 제어에 의한 시스템 효율 상승 등이 굴삭기 효율 향상에 대한 대표적인 연구 결과라 할 수 있다. 전기 모터가 발전함에 따라 굴삭기 시스템도 자동차 분야에서와 같이 하이브리드 기술이 도입되었데, 이는 1개의 굴삭기 시스템에 2개의 동력원(디젤엔진과 전기모터)을 사용함으로써 굴삭기를 효율적으로 운행할 수 있는 시스템이다. 더 나아가 미래에 대한 연구로써 현재에는 순수 전기 모터만을 이용한 전기 굴삭기에 관한 연구도 진행되고 있다.[3-6)]

본 논문에서는 전기 굴삭기를 제어하는 메인컨트롤 밸브의 주요 구성 부품인 파일럿 작동식 유량제어 밸브(이하 유량제어밸브)의 구조와 작동원리 특성을 면밀히 분석하고 상용 소프트웨어인 SimulationX를 이용하여 해석모델을 개발하고자 한다. 또한, 향후 해석모델을 밸브 설계와 시스템 튜닝에 활용할 수 있도록 정확도를 검증하고자한다.

2. 유량제어 밸브의 구조 및 작동원리

컴퓨터의 발전으로 해석 응용 프로그램도 많이 발전하였다. 이러한 시대에 맞춰 대부분의 공학자들은 부품과 시스템설계에 해석 프로그램을 사용하고 있다. 해석 프로그램을 이용하여 해석모델을 개발하기 전 단계에서 밸브의 설계 목적과 구조, 작동원리 그리고 밸브가 갖고 있는 특성을 면밀히 분석하는 과정이 반드시 필요하다.

2.1 유량제어 밸브의 구조 및 작동 특성

Fig. 1은 유량제어 밸브를 나타낸 것으로 전기-유압 포핏 밸브(EHPV)와 가변 오리피스 포핏이 하나의 블록으로 구성되어있다. EHPV는 파일럿 압력(P_{CC})을 제어하여 가변 오리피스 포핏에 작용하는 힘을 제어함으로써 메인 유로($P_S \leftrightarrow P_N$)를 통과하는 개도면적의 크기를 제어한다.

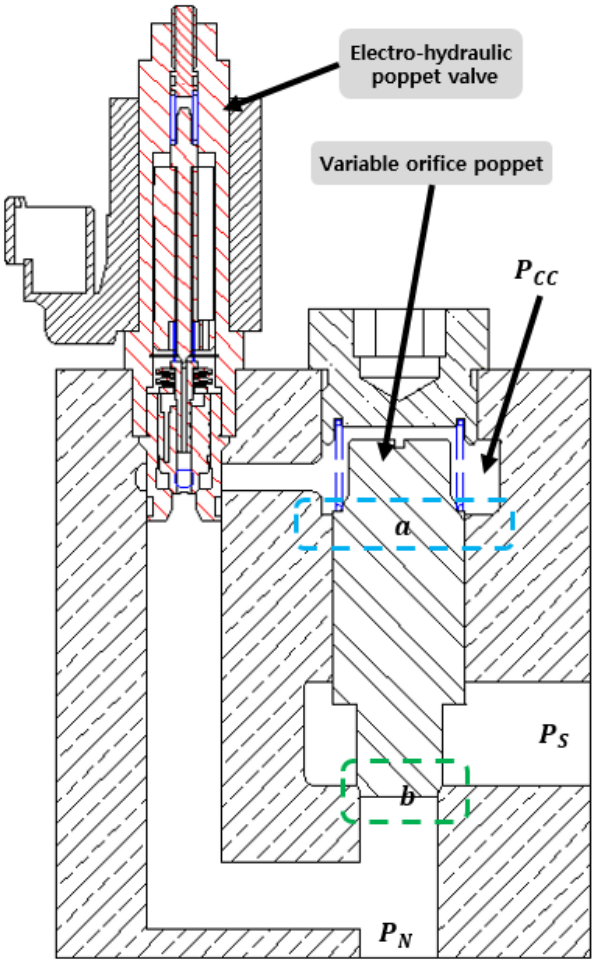


Fig. 1 Modeling structure of the flow control valve system

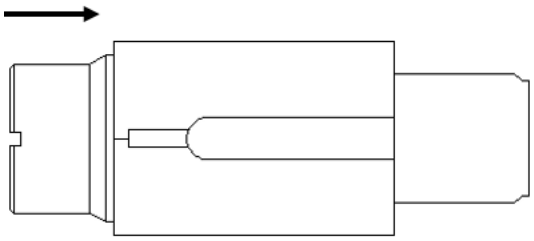
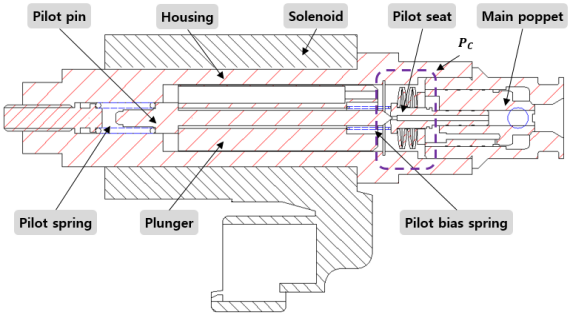


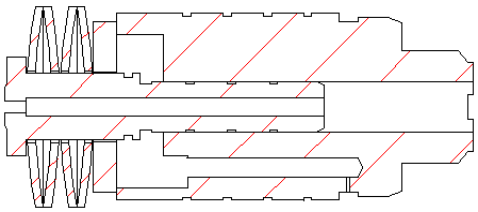
Fig. 2 Structure of the variable orifice poppet

2.2 가변 오리피스 포핏의 구조 및 작동원리

Fig.2는 가변 오리피스 포핏을 나타낸 것으로 파일럿 압력(P_{CC})에 의해 제어되는 구조로 설계되어있다. 초기 조립조건에서 P_S포트와 제어 체적(P_{CC})은 개도면적이 약간 개방되어있는데 이는 노치(notch)가 언더 랩(under lap)으로 설계되어있기 때문이다.



(a) Assembly of the EHPV



(b) Main poppet of the EHPV

Fig. 3 Structure of the electro-hydraulic poppet valve

전류가 공급되지 않는 경우 P_S 포트에 P_N 포트 방향으로 유량이 공급되지 않는데, 이는 언더랩 조건에 의해 양단의 수압면적에 동일한 압력이 작용하고 닫는 방향(Fig.1에서 아래 방향)의 수압면적의 크기가 밸브를 여는 방향으로 작용하는 수압면적의 크기보다 크기 때문이다. 제어 볼륨의 수압면적(A_{CC})을 기준으로 A_N는 2.85배 작게 그리고 A_S는 1.55배 더 작게 설계되어 있다.

P_S 포트에서 P_N 포트 방향으로 유량을 공급하기 위해서는 EHPV 밸브에 전류가 인가되어야 한다. 전류 인가에 따라 파일럿 핀(pilot pin)이 파일럿 시트(pilot seat)와 떨어져서 EHPV 내부의 제어 체적(P_C)이 저압 영역과 연결되어 압력이 떨어지고 메인 포핏을 닫고 있는 힘이 감소하여 메인 포핏이 개방된다. 메인 포핏의 개방으로 인해 가변 오리피스 포핏의 제어 체적의 압력이 낮아지고 A_S면적에 작용하는 힘에 의해 가변 오리피스 포핏이 개방된다.

가변 오리피스 포핏에 작용하는 힘의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{CC}A_{CC} + F_{bias} + F_{flow} = P_N A_N + P_S A_S + F_{seat} \quad (1)$$

단, 밸브가 개방되지 않은 경우 $F_{flow} = 0$, 밸브가 개방된 경우 $F_{seat} = 0$이다.

이와 반대로 흐르는 유량($P_N \rightarrow P_S$)은 제어 볼륨의 압력과 P_S 포트의 압력이 0일 경우 바이어스(bias) 스프링의 저항력보다만 크면 열리기 때문에 아주 낮은 압력(약 0.5bar)에서 밸브가 개방된다.

2.3 EHPV의 구조 및 작동원리

EHPV는 전기 신호에 의해 압력(P_{CC})을 제어하는 밸브이며 하우징, 파일럿 핀, 플런저 그리고 메인 포핏 등으로 구성되어 있다. EHPV 밸브의 구조를 Fig. 3(a)에 나타내었으며, (b)에는 EHPV의 메인 포핏의 구조를 자세하게 나타내었다.

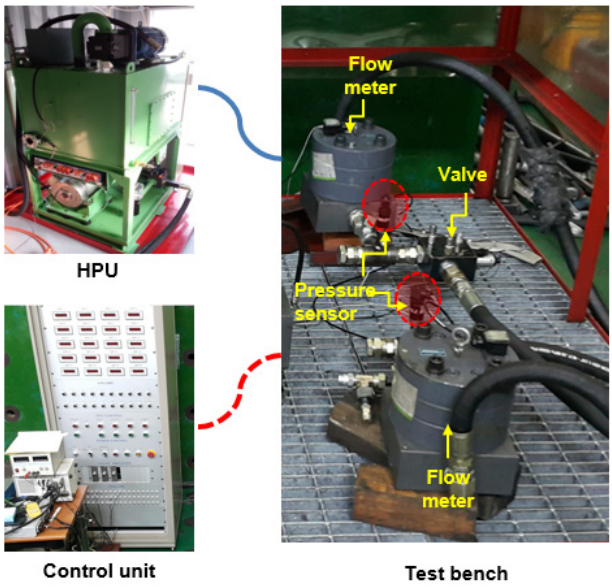


Fig. 4 Test bench setup

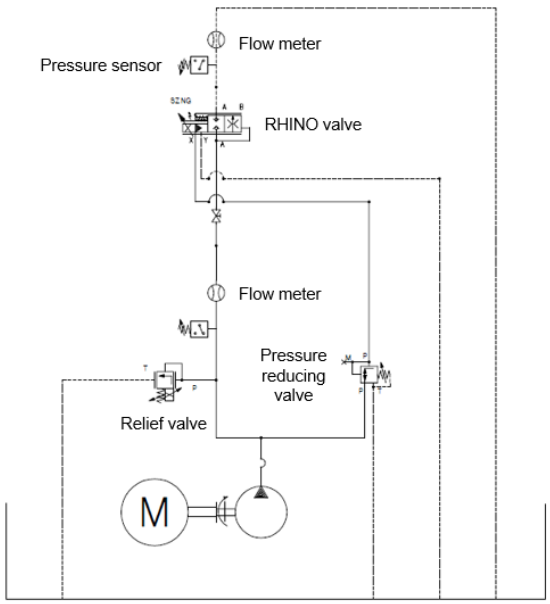


Fig. 5 Hydraulic circuit of test bench

메인 포핏에 작용하는 힘의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_C A_C + F_{Pbias} + F_{Pflow} = P_N A_{PN} + P_S A_{PS} + F_{Pseat} \quad (2)$$

단, 밸브가 개방되지 않은 경우 $F_{Pflow} = 0$, 밸브가 개방된 경우 $F_{Pseat} = 0$이다.

3. 유량제어 밸브의 성능 시험

밸브 성능을 시험하기 위해 시험 장비를 Fig.4와같이 구성하였으며, Fig. 5에 시험회로도를 나타내었다. 그림에서 보듯, HPU(Hydraulic Power Unit)에서 생성되는 유량은 제어반(Control unit)을 통해 밸브로 공급된다. 이때 제어반에서 조절된 전류량에 따라 밸브의 개도면적의 크기가 조절되며, 성능 시험 시 필요한 유량 및 압력 정보는 각각 유량계 및 압력계로 측정하였다. 시험 장비의 최대 유량은 400 lpm이고 최대 압력은 350 bar이다.

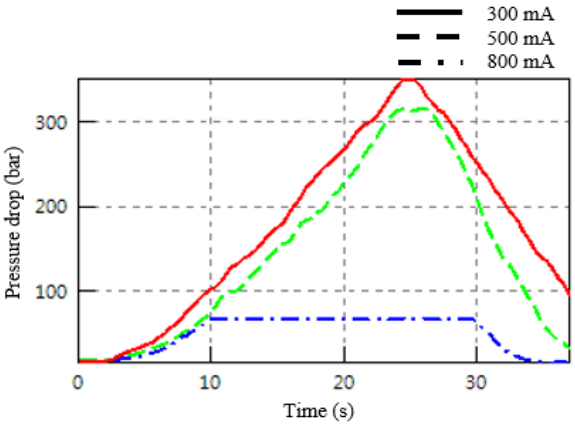
Fig. 6는 단품 밸브의 시험 결과를 나타낸 것으로 솔레노이드 밸브에 공급하는 전류가 일정한 상태에서 시간에 따른 압력 손실과 유량 특성을 계측한 결과이다. Fig. 6-(c)는 컨덕턴스 계수(conductance coefficient)로서 시험결과를 이용하여 아래의 수식으로 계산한 결과를 나타내며, 유체 흐름의 저항 정도를 나타낸다. 시험 결과 공급 전류가 증가함에 따라 밸브의 개도면적이 증가하고 흐름저항은 감소하여 컨덕턴스 계수가 점점 커진다는 것을 알 수 있다.

$$K_v = \frac{Q}{\sqrt{(\triangle P)}} \quad (3)$$

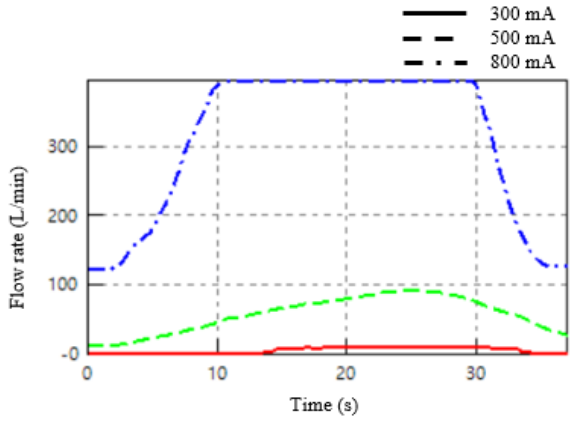
4. 유량제어 밸브의 해석모델 개발 및 검증

해석 모델 개발은 크게 사용 목적에 따라 2가지로 구분된다. 첫 번째는 전체 시스템 관점에서 성능을 분석하고 밸브 적합성 등을 검토하기 위한 목적으로 개발한 해석모델이다. 이 해석모델은 유량에 대한 압력 손실 값을 정의하고 고유진동수와 감쇠 비를 정의함으로써 비교적 단순하게 모델링할 수 있다. 두 번째는 부품 설계 및 최적화에 활용하기 위한 목적으로 개발한 해석모델이다. 이 해석모델은 수압면적, 질량, 스프링 강성 등의 물리적인 값을 직접 해석 모델에 고려해야하기 때문에 전자에 비해 모델링은 복잡하지만 설계 변수 변화에 대한 성능 변화를 직관적으로 확인할 수 있다는 장점이 있다.

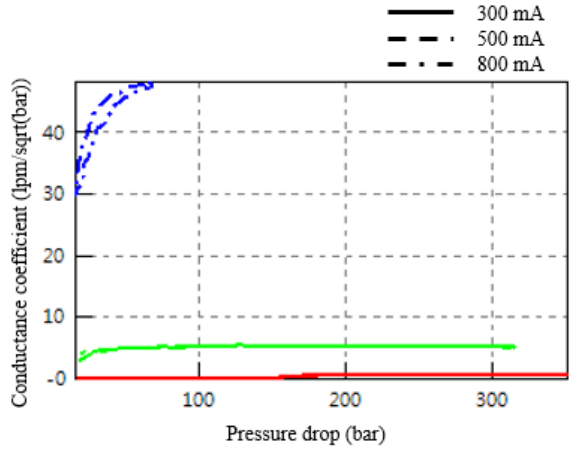
본 논문에서는 향후 해석모델을 설계변수 민감도 분석 및 최적설계에 활용 될 수 있도록 후자의 방법으로 해석모델을 개발하였다.



(a) Pressure drop



(b) Flow rate



(c) Conductance coefficient

Fig. 6 Test results of the pilot-operated flow control valve

4.1 가변 오리피스 포핏 해석모델 개발

가변 오리피스 포핏은 P_S포트에서 P_{CC}포트 방향으로 사각 형상의 노치가 설계되어 있으며, 초기 장착 조건에서 언더랩 조건으로 조립되어 있다. Fig. 7은 가변 오리피스 포핏의 해석모델이며, Fig. 8은 해석모델의 시뮬레이션 결과이다. 해석결과에서 P_S 포트에서 제어볼륨(P_{CC}) 방향(Fig.1에서 a)으로의 개도면적 변화를 (a)에 나타내었고 P_S포트에서 P_N 방향(Fig.1에서 b)으로의 개도면적 변화 (b)에 나타내었다. (c)의 해석 결과는 밸브 개도가 최대일 때 P_S에서 P_N방향으로의 유량에 대한 압력손실을 나타낸다.

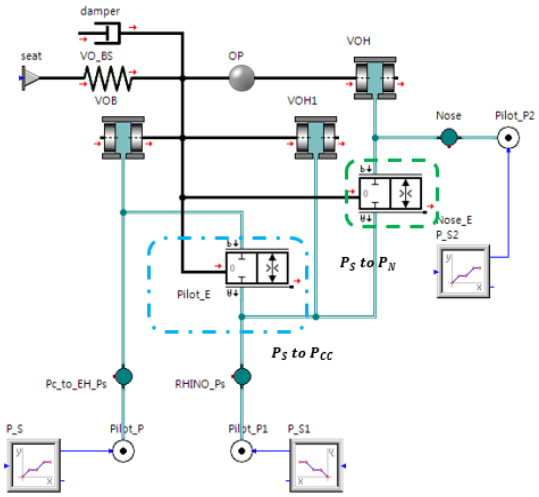
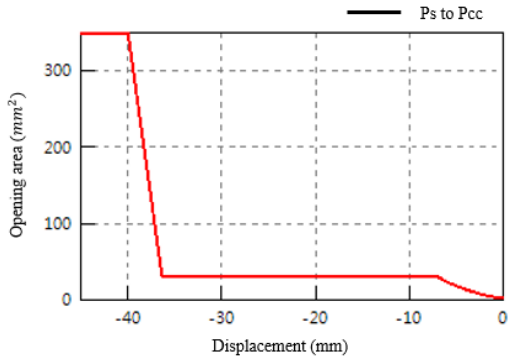


Fig. 7 Analysis model of the variable orifice poppet

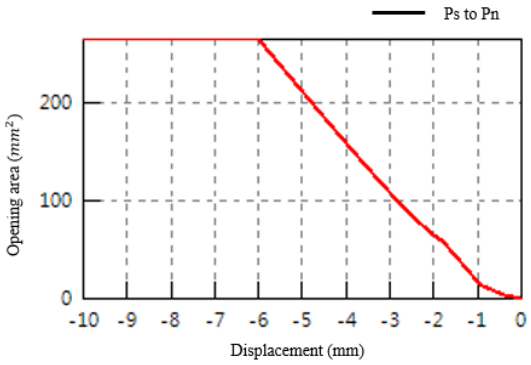
4.2 전기-유압 포핏 밸브 해석모델 개발

전기 유압 포핏 밸브는 메인 포핏 부, 제어 체적의 압력 제어 부 그리고 비례 솔레노이드 부로 구성되어 있다.

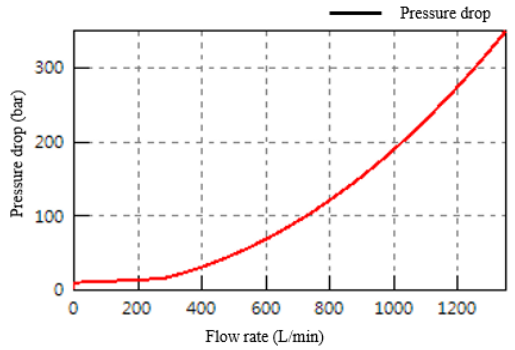
EHPV의 작동원리는 다음과 같다. 비례 솔레노이드에 전류를 공급하면 자기력 힘이 아마추어에 공급되고 파일럿 핀과 아마추어가 접촉하고 있기 때문에 파일럿 핀도 왼쪽방향으로 힘을 받는다. 파일럿 핀은 파일럿 스프링에 의해 지지되고 있으며 스프링 저항력보다 왼쪽으로 작용하는 자기력 힘이 더 클 경우 파일럿 핀이 왼쪽으로 움직여서 파일럿 시트에서 떨어진다. 이때 EHPV 내부의 체적(P_C)과 저압 포트(P_N)사이에 개도면적이 형성되고 내부 압력(P_C)이 낮아져서 메인 포핏을 닫는 방향(오른쪽)으로 작용하던 힘이 감소한다. 이에 따라 메인 포핏이 개방되고 제어 체적(P_{CC})의 압력도 떨어진다. Fig. 9에는 EHPV의 해석모델을 나타내었다.



(a) opening area at pilot port



(b) opening area at main port



(c) pressure drop

Fig. 8 Simulation results of the variable orifice poppet

Fig. 10 (a)는 솔레노이드의 전류에 대한 힘과 히스테리시스 특성을 나타낸 것으로써 시험데이터를 기반으로 해석모델에 적용하였다.

공급 전류 증가에 따른 밸브의 논리적인 타당성을 검토한 결과를 Fig. 10에 나타내었으며, Fig. 1과 3에 해석 결과 부분을 표기하였다. 공급 전류(b)의 증가에 따라 솔레노이드의 자기력 힘 (c)가 증가하는 것을 알 수 있으며, 자기력 증가에 따른 메인 포핏과 파일럿 핀의 변위를 (d)에 그리고 EHPV 내부의 제어 체적의 압력(P_C)과 공급 포트의 압력(P_S)을 (e)에 각각 나타내었다.

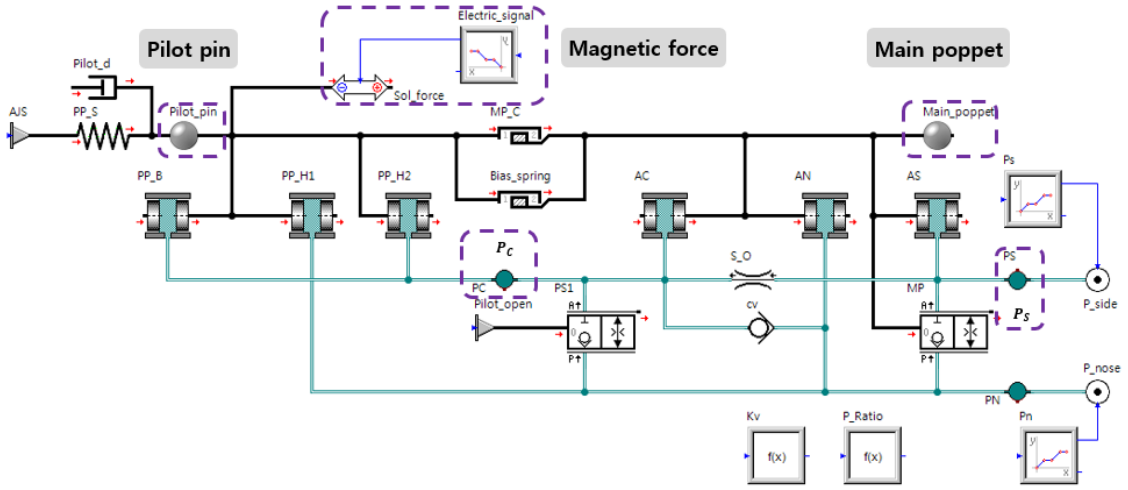
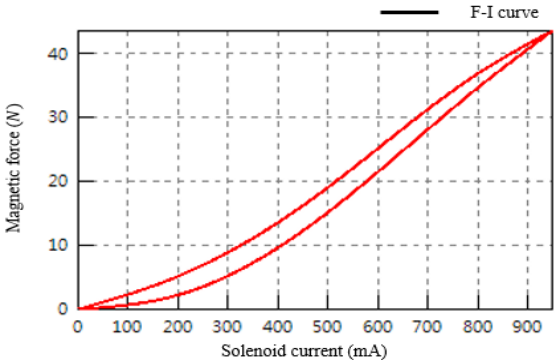
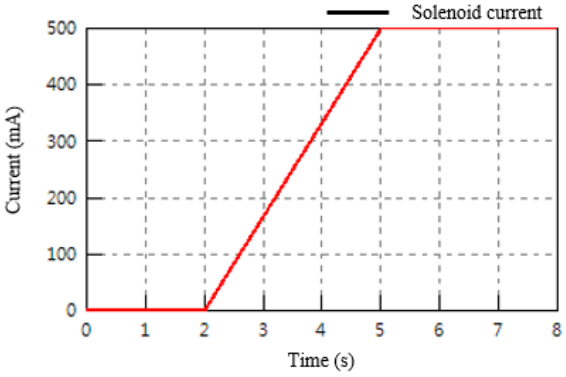


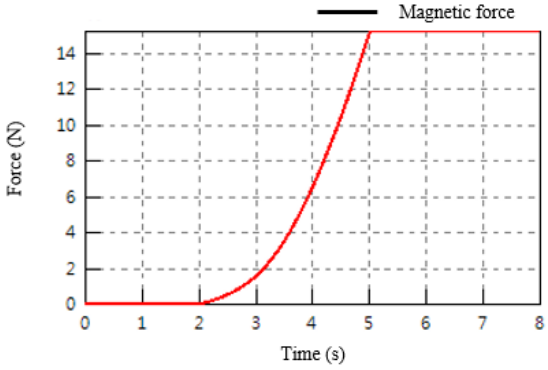
Fig. 9 Analysis model of the electro-hydraulic poppet valve



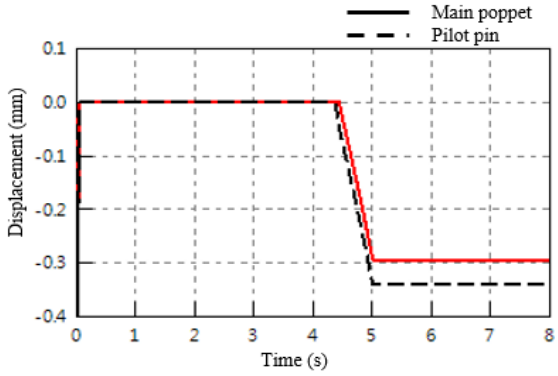
(a) Force-current characteristic of the solenoid



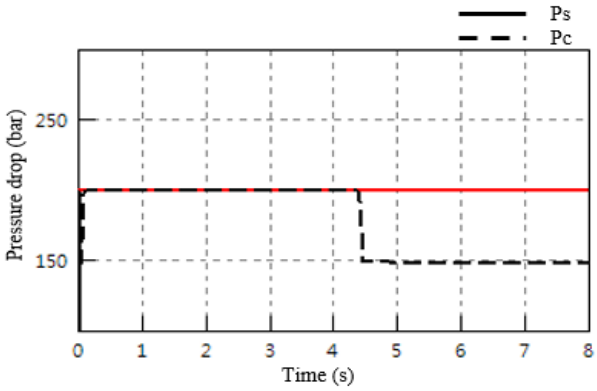
(b) supply current at the solenoid



(c) Magnetic force



(d) Displacement of the main poppet and pilot pin



(e) Pressure at control volume and side port

Fig. 10 Simulation results of the electro -hydraulic poppet valve

4.3 해석모델의 정확도 검증

위의 해석모델 개발 과정에서는 EHPV와 가변 오리피스 포핏의 해석 모델에 논리적인 타당성만 확인하였으며, 전체 시스템을 구성하여 해석모델의 정확도를 확인해야한다. 각각을 이용하여 개발한 파일럿 작동식 유량제어밸브의 해석모델을 Fig. 11에 나타내었다.

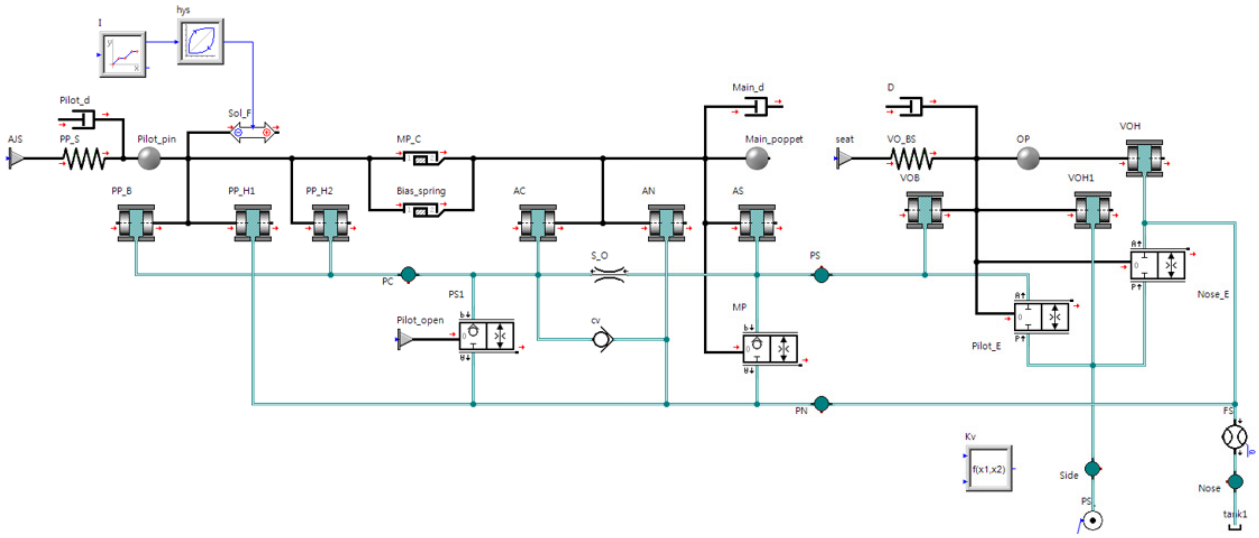
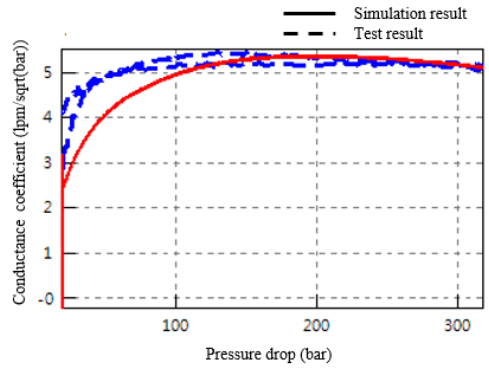
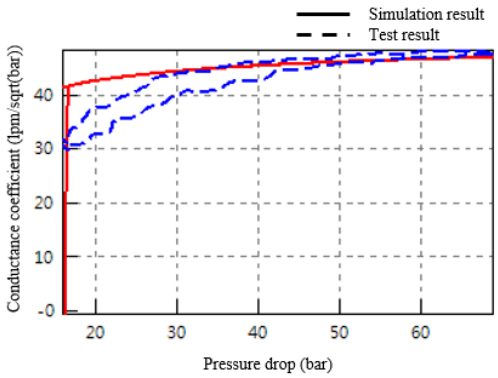


Fig. 11 Analysis model of the flow control valve

해석모델을 개발하면 향후 각종 연구에 활용하는데, 재생 회로 효율 분석, 메인 컨트롤 밸브 작동 로직, MBS(multi body system), 설계변수 민감도 분석 및 최적설계 등의 연구가 대표적인 활용 분야이다. 단, 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 연구를 수행할 때에는 연구를 수행하기 전 단계에서 반드시 해석모델의 정확도를 확보하는 것이 필수적이다.



(a) Solenoid supply current 500 mA



(b) Solenoid supply current 800 mA

Fig. 12 Reliability verification of an analytical model of the flow control valve

해석모델의 정확도를 검토한 것이 Fig. 12에 나타낸 그래프이며, x축은 밸브의 압력 손실을 나타내고 y축은 컨덕턴스 계수를 나타낸다. 시험결과와 해석결과를 비교해보면 히스테리시스에서는 다소 차이가 발생한다는 것을 알 수 있는데 이는 밸브 가공 시 내부의 직진도와 동심도 등에 관한 특성으로 판단되며, 해석모델에 편심과 마찰에 의한 특성이 고려되지 않았기 때문이라 여겨진다. 결론적으로 시험 결과와 해석결과의 유사성을 확인함으로써 해석모델의 정확도를 검증하였고 향후 응용연구에 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 전기 굴삭기용 메인컨트롤 밸브의 구성부품인 유량제어 밸브의 구조와 작동원리 특성을 면밀히 분석하였다. 분석결과를 기반으로 상용소프트웨어인 SimulationX를 이용하여 해석모델을 개발하였다. 또한, 해석모델을 향후 연구에 활용할 수 있도록 시험결과와 해석 결과의 유사성을 확인하여 해석모델의 정확도를 확인하였다. 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 상용 소프트웨어인 SimulationX를 이용하여 파일럿 작동식 유량제어밸브의 구조와 작동원리를 면밀히 분석하고 해석모델을 개발하였다.

2) 해석모델의 정확도를 검증함으로써 밸브 개발 전 단계에서 밸브의 동적 거동과 유동 특성을 정량적으로 평가하여 엔지니어에게 정량적인 설계 제안을 할 수 있다고 판단된다.

3) 향후 민감도 분석 및 시스템 최적설계에 해석모델을 활용함으로써 연구 개발 시간과 비용을 절감 할 수 있을 것으로 판단된다.

향후 다음과 같은 연구가 필요하다고 판단된다.

1) 솔레노이드의 정특성과 동특성에 대한 시험이 추가적으로 필요하며, 해석모델에 힘-거리특성을 보완할 필요가 있다고 판단된다.

후 기

이 연구는 2015년도 산업핵심기술개발사업의 연구비(과제번호: 10040173)의 일부지원에 의하여 수행되었음을 밝힙니다.

References

1) S. D. Park, “Global Warming and Climate Change : An Overview of Technological Solutions,” J. of Korea Society of Energy & Climate Change, Vol.1, No.1, pp.1-12, 2006.

2) H. J. Lim, S. G. Jung and D. H. Wan, “An Analysis of the Impact of Global Warming on Residential Energy Consumption : Focused on the Case of Electricity Consumption,” J. of Korea Energy Economics Institute, Vol.12, No.2, pp.33-58, 2013.

3) B. I. Kang and J. S. Lee, "Boom Energy Regeneration System of Hybrid Excavator Using Simulation Technique," J. of Korean Society for Fluid Power and Construction Equipments, Vol.7, No.2, pp.12-18, 2010

4) J. I. Yoon et al., "Development of Hybrid Excavator for Regeneration of Boom Potential Energy," J. of Korean Society for Fluid Power and Construction Equipments, Vol.6, No.4, pp.1-8, 2009

5) J. H. Lee, J. H. Lee, H. C. Lee, and C. E. Oh, "Integrated Control Algorithm of Hydraulic Pump with Electric Motor to Improve Energy Efficiency of Electric Excavator," J. of Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.39, No.2, pp.195-201, 2015

6) B. S. Yoo, C. M. Hwang and J. S. Joh, "A Study on the Energy Management Control of Hybrid Excavator," J. of Korean Society for Precision Engineering, Vol.29, No.12, pp.1304-1312, 2012