

# 밸브 운동부 구조 변화에 따른 압력특성에 관한 연구 A Study on Pressure Characteristic in Various Inner Structure of Valves

허정규 · 오인호 · 양경욱

J. G. Hur, I. H. Oh and K. U. Yang

(접수일 : 2010년 5월 20일, 수정일 : 2010년 5월 27일, 채택확정 : 2010년 5월 31일)

**Key Words** : Structure Change(구조 변화), Spool Valve(스풀 밸브), Poppet Valve(포핏 밸브), Bond Graph(본드 선도), Hydraulic System(유압 장치)

**Abstract** : In general, the control valves are essential components in hydraulic systems. Structural changes within the valves remain a challenge because many parameters of valve tend to interact in terms of static and dynamic performance. Therefore, the valve characteristics is applied directly to the stability of hydraulic system. Inner structure of the valve which is used mainly in the industries is made up poppet type and spool type. This paper made a description of the method for numerical analysis and modeling of the valve with a built-in moving part of four-type. Based on the physical parameters of the valves, a numerical model of objected valve is developed using the bond graph method. It is to verified the results that the moving part of four-type has an effect on pressure and flow characteristics. Also, It is analyzed the results which has an effect on response characteristic by angular of poppet valve face and inertia variation of the valve with a built-in moving part. In the results, it is confirmed that the rising and settling time vary with the shape of moving part in valve.

## 1. 서 론

밸브는 산업 전반에 널리 사용되는 주요 부품 중의 하나로 유체의 압력과 방향을 제어하는 기기이다. 어떤 유압 장치를 제어하고자 할 때 그 장치의 특성에 적합한 응답 특성을 얻기 위해서 밸브의 선정 기준은 중요하다. 하지만 밸브의 영향이 크게 작용하지 않고 기대하는 응답 특성에는 미치지 못하지만 그 결과가 장치를 유지하는데 충분하다고 판단되면, 경제적인 측면이나 편의를 고려하여 비교적 수리·교체가 용이한 밸브를 선정하게 된다. 하지만 장치가 요구하는 응답특성에서 일부 개소의 압력과 유량을 일정하게 유지하고자 한다거나 반복적인 빠른 응답성을 요구하는 곳에서는 밸브의 재선정이 불가피하게 된다. 또한 밸브의 종류에 따라 마모,

누유의 문제도 상존하기 때문에 재설치를 위한 추가 비용을 초래하게 된다.

유압 장치에 사용되는 밸브의 압력과 유량 특성은 원하는 그 장치의 응답 시간에 따라 결정되는 것이 일반적이거나, 유압 장치의 성능만을 강조하여 원하는 응답과 응답 시간보다도 빠른 유압 부품들을 사용하는 경우가 있다. 이런 경우에는 안정된 응답 특성을 얻을 수 있으나, 설계 안정도를 너무 높였기 때문에 장치의 가격이 높아져 현실에 적용하기엔 곤란한 점을 가지고 있다. 따라서 밸브 선정에 있어 밸브의 주요 부품 중의 하나인 밸브 운동부의 형태와 형상 변화에 따른 압력 특성들을 상호 검토한 후 유압 장치에 설치되는 밸브를 선정하는 것은 매우 중요하다.

기존의 연구<sup>1-4)</sup>에서는 각각 다른 구조를 가진 밸브들을 상호 비교한 분석적인 연구보다는, 밸브 자체의 동특성을 분석하거나 최적 설계를 기반으로 하는 연구가 대부분이었다. 저자들이 연구<sup>5)</sup>한 결과에서도 전자석, 유량 계수, 마찰, 누유, 스프링력 등

양경욱(교신저자) : 전남대학교 해양기술학부  
E-mail : yangku@jnu.ac.kr, Tel : 061-659-3134  
허정규 : 전남대학교 기관시스템공학전공  
오인호 : 한국해양대학교 기관시스템공학부

과 같은 밸브의 주요 변수들이 밸브의 동특성에 어떠한 영향을 주는가에 대해 이미 언급한바 있다.

이 연구에서는 유압 제어에 사용되는 밸브의 운동부의 형태 중 주로 많이 사용되는 스톱 형태와 포핏 형태 및 두 가지의 복합 형태의 운동부가 장착된 밸브의 압력 특성을 비교·분석하고 유압 장치에 적용되는 밸브 선택에 있어 적합한 밸브를 선정할 수 있도록 일반적인 선정 기준을 제시하고자 한다.

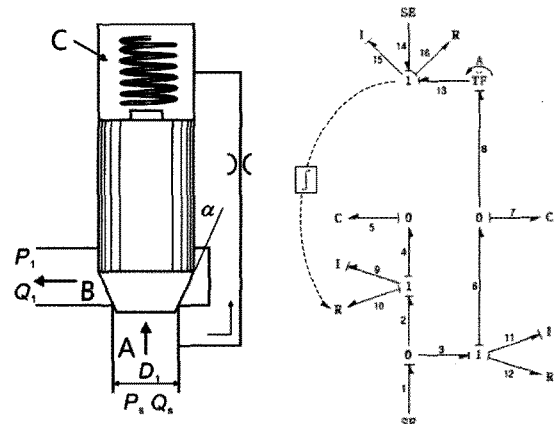
## 2. 모델링 및 수치 해석

이 연구에서는 시스템에서 고려되는 변수들을 알기 쉽게 표현하고 무엇보다도 1차 형태의 상태 방정식으로 시스템을 나타낼 수 있는 본드선도 기법<sup>6)</sup>을 사용하여 모델링 하였다. 여기에 이용되어지는 유량 및 압력, 운동부의 방정식은 기존의 식을 이용하였다<sup>4,5,7)</sup>.

모델링의 대상은 4가지 형태의 운동부를 장착한 밸브를 선정하였다. 모두 동일한 조건하에서 구동되고 밸브의 리턴축 스프링 부분은 일정한 값으로 대체하였다. 나머지 변수 설정은 균일하게 적용하여 운동부의 형상 변화에 따른 압력특성을 비교·분석하였다.

모델링의 대상 중 포핏 밸브는 주로 사용되는 원추 형태에 대해서 고려하였고 포핏의 선접촉이 이뤄지는 밸브면의 각도( $\alpha$ )는 모두 일정하게 하였다. 스톱 밸브의 경우는 포핏 밸브 형태와 비교하기 위하여 2포트 밸브를 고려하였다. 각각의 밸브에 대하여 밸브의 단면도와 본드 선도 그리고 본드 선도로부터 구한 상태 방정식을 Fig. 1~4에 나타내었다.

Fig. 1은 포핏 형태의 운동부를 지닌 밸브를 모델링 한 것이다. 각각의 변수의 설정에서 SE1은 공급 압력을 나타낸다. I11, R12는 스프링이 있는 챔버(chamber)측으로 피드백 되는 관내의 유체 속도와 유체 저항을 나타내고, C7은 관내의 체적 탄성 계수를 나타낸다. I10은 포핏 밸브의 관성, R11은 유체 저항, C5는 B구역의 유체의 체적 탄성 계수를 나타낸다. I15는 스프링의 관성, R16은 점성 마찰 계수이며, SE14는 스프링의 압축력이다. TF가 있는 부분인 A는 피드백 되는 유체의 특성이 스프링의 기계적 특성으로 변환되는 상관 관계를 나타내는 변환 계수이다. 적분기호 표시는 C부분에 피드백 되는 유체의 힘과 스프링의 기계적 특성인 B부분의 유체 압축력에 영향을 미치는 관계를 나타낸 것이다.



$$\begin{bmatrix} e_{i5} \\ e_{i1} \\ e_9 \\ f_7 \\ f_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R16}{I15} & 0 & 0 & \frac{1}{A}C7 & 0 \\ 0 & -\frac{R12}{I11} & 0 & -C7 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R10}{I9} & 0 & -C5 \\ -\frac{1}{A} & \frac{1}{I15} & \frac{1}{M11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I9} & 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SE1 \\ SE14 \end{bmatrix}$$

Fig. 1 Poppet valve (A type)

Fig. 2는 계단 형태의 운동부가 장착된 포핏 밸브를 모델링 한 것으로, 이것은 Fig. 1의 모델링 결과와 그 형태가 비슷하나 피드백 되는 유로에 의한 압축력이 포핏의 단(stage)의 유무에 따라 응답 특성의 차이가 발생하게 된다. 각각의 변수에서 SE1은 공급 압력을 나타내고 I12, R11, C9는 피드백 되는 관내의 유체 속도, 유체 저항, 관내의 체적 탄성 계수를 나타낸다. I10은 포핏의 관성, R11은 유체 저항이며, C6은 B구역의 유체의 체적 탄성 계수이다. I17, R18은 스프링의 관성, 점성 마찰 계수이고, SE16은 스프링의 압축력을 나타낸다. 변환 계수인 TF의 변수 중 A는 피드백 되는 유체의 특성이 스프링의 기계적 특성으로 변환되는 것을 나타내는 계수이고, a는 SE1에 의해 공급되는 유체의 공급 압력이 포핏의 스프링력과 피드백 되는 유체에 의해 상호 작용되는 관계를 나타낸 것으로 단(stage)의 단면적이 압력 특성에 미치는 관계를 표현한 변환 계수이다. 적분기호 표시는 C부분에 피드백 되는 유체의 힘과 스프링의 기계적 특성이 B부분의 유체의 압축력에 영향을 미치는 관계를 나타낸 것으로 이것 또한 단(stage)의 영향을 받게 된다.

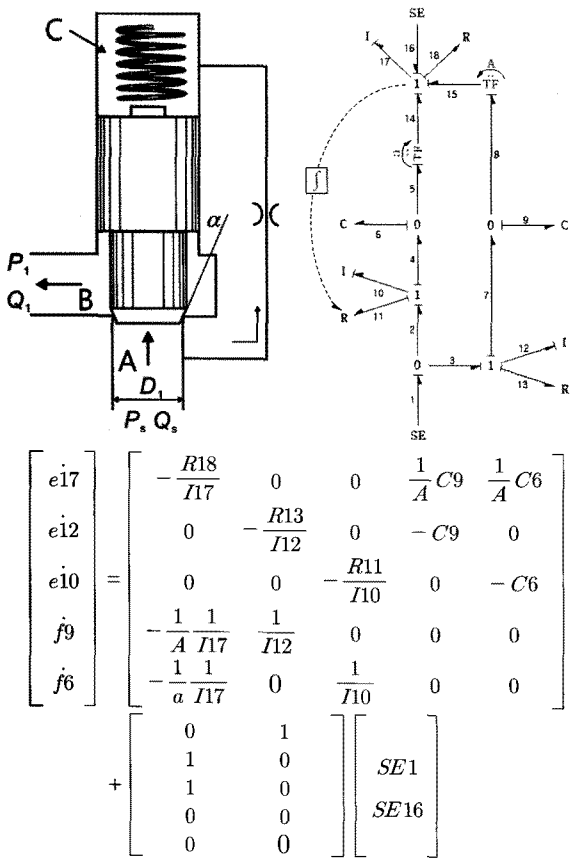


Fig. 2 Poppet valve with 1-stage (B type)

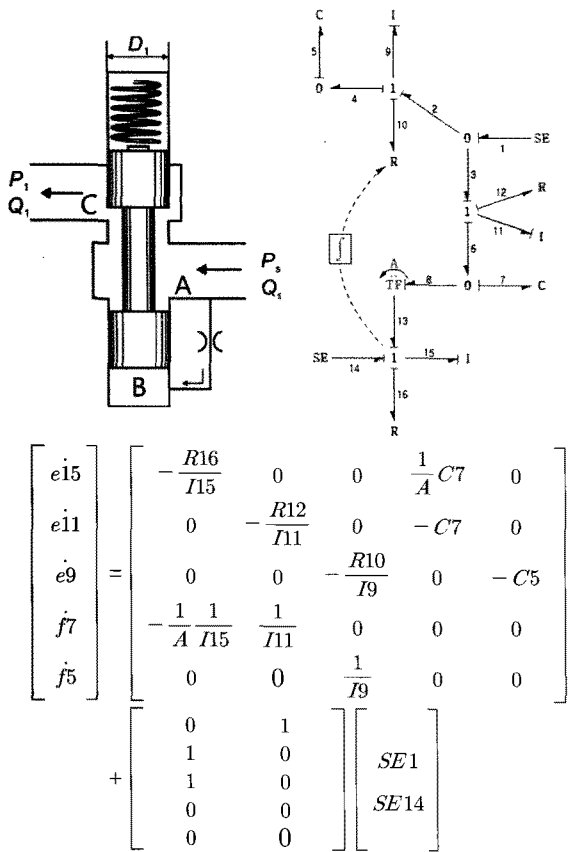


Fig. 3 Spool valve (C type)

Fig. 3은 스풀 밸브를 모델링 한 것이다. SE1은 유체의 공급 압력,  $I_{11}$ 과  $R_{12}$ 는 B부분의 챔바로 피드백 되는 관내의 유체 속도와 관로 저항을 나타낸다.  $I_9$ 는 스풀의 변위,  $R_{10}$ 은 유체 저항이며,  $C_5$ 는 C부분의 체적 탄성 계수를 나타내고  $C_7$ 은 B부분의 챔바 내 유체의 체적 탄성 계수를 표시한 것이다. SE14는 스프링의 압축력을 나타내는 공급 압력이며,  $I_{15}$ 는 스프링 상수,  $R_{16}$ 은 점성 마찰 계수이다. 적분 표시는 피드백 되는 유체의 압력에 의해 B부분 챔바 내 압축력이 스프링의 탄성력과 작용하여  $R_{10}$ 의 유체 저항에 영향을 미치는 관계를 표시한 것이다.

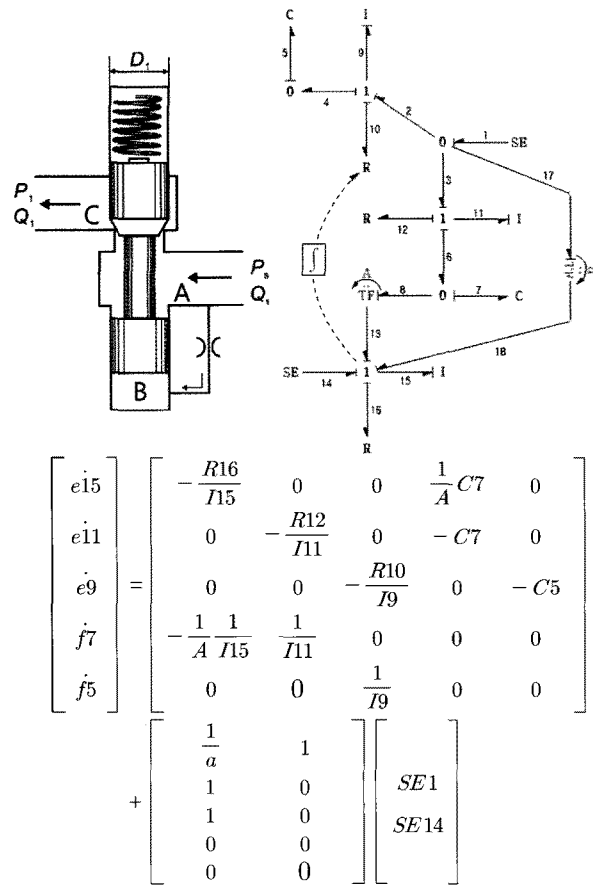


Fig. 4 Spool valve with poppet shape (D type)

Fig. 4는 밸브의 운동부가 포핏과 스풀의 복합적인 구조를 가진 밸브를 모델링 한 것이다. 각각의 변수 설정은 Fig. 3의 모델링 부분과 같다. 단, 변환 계수(TF)인 변수 a가 추가로 사용되었으며, 이것은 밸브 내 운동부 형태가 포핏형과 스풀형으로 내부 압력의 변화에 따라 운동부 움직임에 영향을 주는 관계를 나타낸 것이다. 이것은 Fig. 3의 결과와 비교할 때 포핏 형태의 밸브면 각도에 따라 응답 특성

의 상승 시간과 정착 시간에 영향을 미치게 된다. 즉 포핏의 밸브면 각도를 변화시킴으로써 스펴과 포핏의 각각의 장점을 만족시키는 결과를 얻을 수 있는 것으로 확인되었다.

### 3. 시뮬레이션 및 고찰

Fig. 5와 6은 위에서 모델링한 4가지 형태의 밸브의 압력과 유량 특성, Fig. 7은 A와 B타입의 포핏의 변위, Fig. 8은 C와 D타입의 스펴 구조를 장착한 밸브의 스펴 변위를 나타낸 것이다.

각각의 변수 설정은 Table 1과 같이 기존 연구<sup>5)</sup>의 변수 값을 동일하게 사용하였다.  $A$ 는 단면적,  $D$ 는 밸브 직경,  $f_s$ 는 정지마찰력,  $f_0$ 는 스프링의 초기 압축력,  $k$ 는 스프링 상수,  $K$ 는 체적 탄성 계수,  $m$ 은 스펴의 질량,  $P_s$ 는 공급 압력,  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $\mu$ 는 점성 마찰 계수,  $V_1, V_2$ 는 체적,  $\alpha$ 는 포핏 밸브면의 각도,  $C_d$ 는 유량 계수를 나타낸다. 응답 특성을 나타내는 그림에서 A타입은 포핏 밸브, B타입은 계단 형태의 포핏 밸브, C타입은 2포트 스펴 밸브, D타입은 스펴과 포핏 형태의 운동부가 복합적으로 사용된 밸브를 나타낸 것이다. 시뮬레이션 수행 시간은 0.02(s)로 설정하였다.

Fig. 5는 4가지 형태의 밸브 운동부에 대한 압력 특성을 나타낸 것이다. A와 B타입의 포핏형과 계단형 포핏 형태의 구조를 가진 밸브의 결과를 보면 응답 특성에 차이가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 B형태의 밸브 운동부를 가진 밸브가 단(stage)에 의해 유체 저항이 발생하고 이로 인해 압축력이 증가하여 B부분에 작용하는 체적 탄성력의 차이가 발생한 것이다. 이러한 결과는 Fig. 6과 7에서의 포핏의 유량 특성과 운동부의 변위 특성에서도 나타나듯이 단에 의한 유체 저항이 포핏의 닫히는 시간에 영향을 미침에 따라 유량이 증가하는 것으로 알 수 있다.

또한 Fig. 5의 C와 D형태에서는 미세하게나마 상승 시간과 정착 시간의 차이를 볼 수 있다. 이는 Fig. 8의 C와 D형태의 스펴 변위 특성을 나타낸 그림에서, C형태보다 포핏이 복합적으로 적용된 D형태의 밸브가 더 작은 변위 내에서 동작하는 것으로 확인할 수 있었으며, 상승 시간은 C형태가 빠르나, 정착 시간은 D형태가 미소나마 더 빠르게 도달하는 것을 Fig. 5를 통하여 확인하였다. 또한 Fig. 6의 유량 특성에서도 포핏형이 복합적으로 사용된 D형

태 밸브의 유량 변화 크기가 더 크게 나타나며, 유량이 멈추는 시간도 미소나마 짧다는 것을 확인할 수 있다.

따라서 스펴형 밸브에서 포핏 형태를 복합적으로 사용한다면 포핏 밸브면의 각도를 적절히 설계함으로써 스펴과 포핏의 장점인 일정한 응답 특성을 유지하거나 반복적인 빠른 응답 특성을 가진 밸브 설계가 가능하리라 사료된다.

한편, Fig. 8에서는 초기 설정한 시뮬레이션 시간 안에서 특성 비교가 어려워 시뮬레이션 수행 시간만을 0.2(s)로 재설정하였다. 이것은 스펴형 밸브의 내부 구조상 유체 저항을 받는 개소가 포핏에 비해 크고, Fig. 3과 4에서 보는 바와 같이 스펴 형태의 밸브에서는 공급측에서 피드백 되는 참마의 체적 탄성력과 상부의 스프링력의 불균형이 발생하여 초기 시뮬레이션 시간 내에서는 비교가 불가하여 임의로 재설정한 것이다. 이것으로부터 스펴 형태의 밸브는 과도 상태에서 상승 시간을 단축할 수 있는 장점은 가지고 있으나, 정상 상태에서는 밸브 내 운동부의 움직임이 계속 진행될 수 있는 여건을 가지고 있음을 확인할 수 있다. 실제로 비례 전자 밸브 설계시 사용될 전자석의 용량을 결정하는데 중요한 요건이 될 수 있음을 알 수 있다. 즉, 비례 전자 밸브 설계에서 밸브 개폐시 유체력, 리턴측 스프링력에 관계된 전자석의 구동 용량뿐만 아니라 정상 상태에서 발생될 수 있는 스펴의 채터링 현상을 상쇄시킬 수 있는 전자석 구동 용량도 필요함을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 C와 D타입의 밸브에서 포핏 밸브면의 각도를 초기 값에서 20%씩 증감하여 얻은 응답 특성이다. 점선 화살표는 각도 증가, 실선 화살표는 감소를 나타낸다. 여기에서는 D타입과 같은 구조를 가진 밸브가 일반적인 스펴 밸브와 비교시 포핏 끝의 밸브면 각도를 조절함으로써 원하는 상승 시간과 정착 시간을 얻을 수 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 위에서 언급한 바와 같이 운동부 자체가 스펴과 포핏의 복합적인 형태를 사용함으로써 각각의 장점인 압력이나 유량을 일정하게 유지하고 반복적인 빠른 응답 특성을 얻을 수 있는 형태임을 확인할 수 있다. 이 형태를 이용하면 시험기 등과 같은 반복적이고 빠른 응답이 요구되는 유압 장치에 적합한 개선된 밸브를 설계할 수 있으리라 사료된다.

더불어 Fig. 10과 Fig. 11은 운동부 질량을 초기 값에서 20%씩 변화하여 그에 따른 응답특성을 나

타낸 것이다. 각각의 결과에서 점선 화살표로 표시된 것은 질량을 증가시킨 것이고 실선 화살표는 감소시킨 것이다. 여기에서 알 수 있듯이 운동부의 질량 또한 상승 시간과 정착 시간에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

Table 1 Major specification of the valve

$A$	11.96 mm <sup>2</sup>	$P_s$	60 bar
$D$	9.0 mm	$\rho$	842.8 kg/m <sup>3</sup>
$f_s$	5.0 Ns/m	$\mu$	0.0101 Pa · s
$f_0$	25 N	$V_1$	1.2 cm <sup>3</sup>
$k$	1.0 N/mm	$V_2$	10.0 cm <sup>3</sup>
$K$	1400 MPa	$a$	50 °
$m$	0.03 kg	$C_d$	0.611

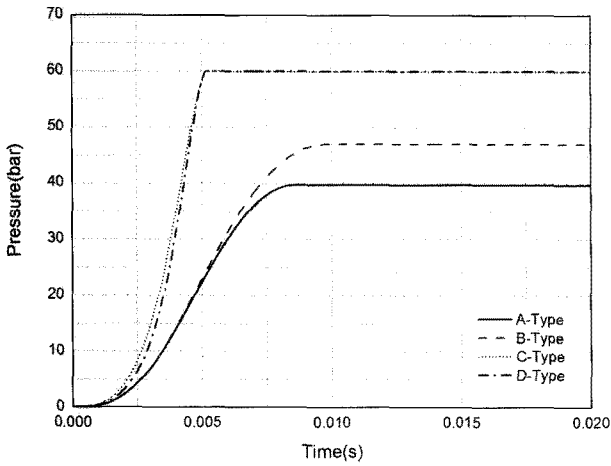


Fig. 5 Pressure characteristics of the valve with a built-in moving part of A~D type

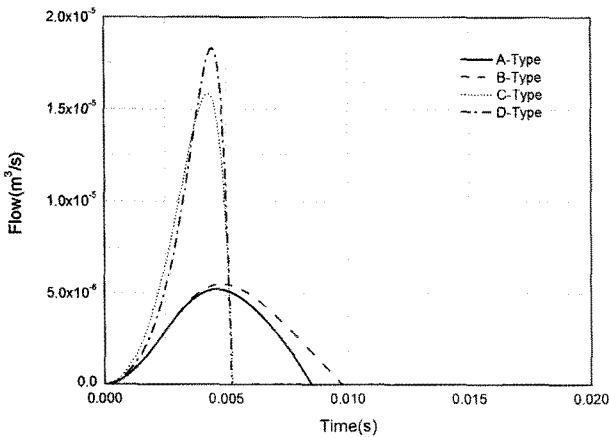


Fig. 6 Flow characteristics of the valve with a built-in moving part of A~D type

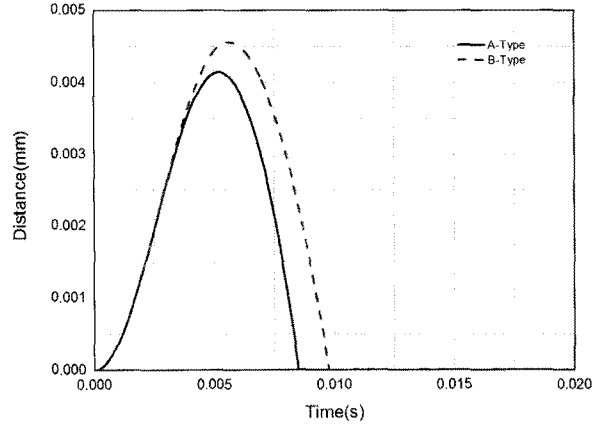


Fig. 7 Distance characteristics of the valve with a built-in moving part of A, B-type

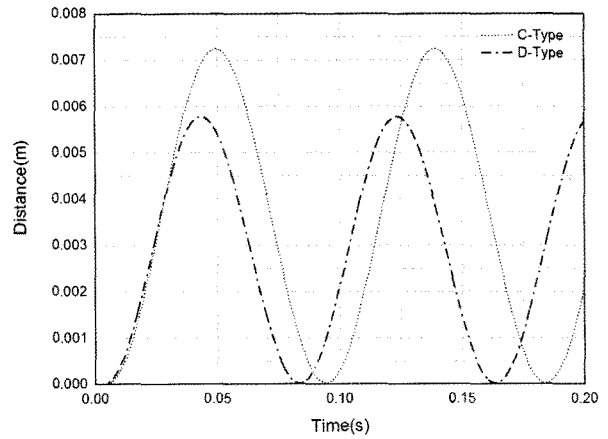


Fig. 8 Distance characteristics of the valve with a built-in moving part of C, D-type

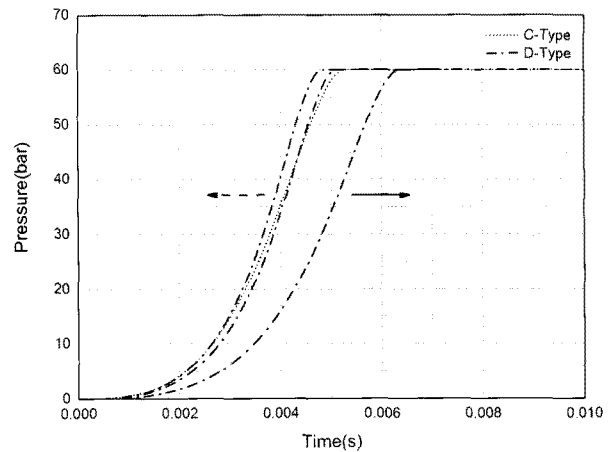


Fig. 9 Pressure characteristics by angular variation of the valve face of C, D-type

따라서 운동부의 형태를 복합적으로 사용하는 밸브의 포핏 밸브면의 각도와 운동부의 질량을 적절히 조합한다면 포핏이나 스톱 밸브의 특성을 서로

만족할 수 있는 개선된 밸브의 설계가 가능할 것으로 사료된다.

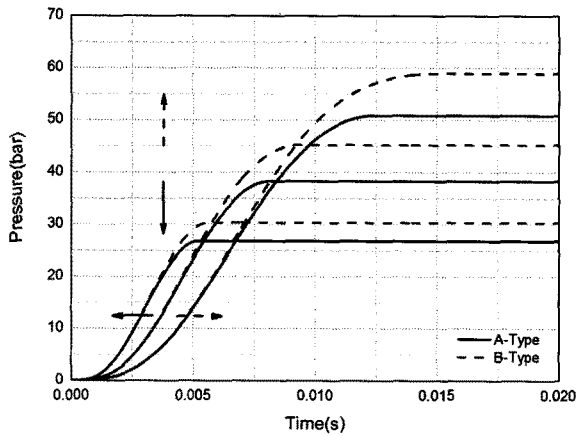


Fig. 10 Pressure characteristics by moving part inertia of A, B-type

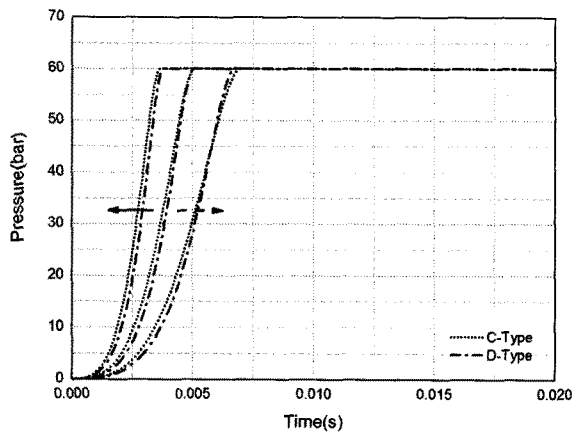


Fig. 11 Pressure characteristics by moving part inertia of C, D-type

#### 4. 결 론

이 연구에서는 주로 유압 밸브에 이용되는 포핏형과 스펴형의 4가지 형태 운동부를 장착한 밸브를 선정하고 이것을 본드 선도 기법으로 모델링하여 시뮬레이션 하였다. 그리고 각각의 밸브 특성을 비교·분석하여 그 결과에 따라 시스템에 적합한 밸브를 선정할 수 있도록 하기 위해 각각의 밸브에 대한 압력과 유량 특성 및 변위 변화를 분석하였다. 특히 포핏 밸브면의 각도와 운동부의 관성 변화가 압력 특성에 미치는 영향을 분석함으로써 밸브를 선정하는데 중요한 요소인 상승 시간과 정착 시간의 변화를 단지 운동부 형태의 변화로도 어느 정도 유추 가능함을 확인하였다.

나아가 비례 전자 밸브 설계시 전자석의 구동 용량도 과도 상태 뿐만 아니라 정상 상태에서 스펴의 움직임을 고정시킬 수 있도록 설계해야 한다는 것을 밝혔다. 또한, 스펴과 포핏 형태의 적절한 조합으로 밸브 응답 특성을 변화시키거나 개선시킬 수 있는 여지를 확인할 수 있었으며, 밸브 설계 및 시스템에 이용될 밸브 선정에 많은 도움을 줄 것으로 사료된다.

#### 후 기

이 논문은 2007년도 전남대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

#### 참고 문헌

1. K. Dasgupta, R. Karmakar, 2002, "Dynamic analysis of pilot operated pressure relief valve", Simulation Modelling Practice and Theory 10, pp. 35~49.
2. Hayashi S., Yamamoto H. and Iimura I. 1995, "Influence of drain orifice on poppet valve stability", J. Japan Hydraulics and Pneumatics Soc., 24(2), pp. 283~290.
3. T. Takaneka, 2000, "Performance of a hydraulic pressure control valve", JSME, Vol. 66, pp. 538~540.
4. K. U. Yang, I. Y. Lee, 2002, "A Modeling of Proportional Pressure Control Valve and its Control", KSPSE, Vol. 6, No. 3, pp. 71~77.
5. J. G. Hur, K. U. Yang, 2008, "Numerical Analysis of Proportional Pressure Control Valve using Bond graph", KSPSE, Vol. 12, No. 2, pp. 62~70.
6. Dean C. Karnopp, Donald L. Margolis and Ronald C. Rosenberg, 2000, "System Dynamics", John Willy & Sons, pp. 12~59, 400~423.
7. Herbert E. Merritt, 1966, "HYDRAULIC CONTROL SYSTEMS", John Wiley & Sons, pp. 35~53.