

대용량 비례 유량제어밸브 동특성 분석

Dynamic Characteristics of Proportional Flow Control Valve with Large Capacity

정 규 흥
G. H. Jung

Key Words : Proportional Flow Control Valve(비례유량제어밸브), Two Stage Valve(2단 밸브), Main Disc(메인 디스크), Dynamic Analysis(동특성 분석)

Abstract: Electromagnetic control valves have been used for almost 20 years. As the solenoid modulating technology advances, its applications are extending to various industrial fields such as nuclear and fossil fuel power plants, chemical plants and refineries. Proportional solenoid valve for large flow control is designed with two-stage configuration to meet the required actuating force on the main disc and its position is stabilized by the self-controlled system. In this research, main disc dynamics is analyzed with linearized system model which is derived from the mathematical equations describing its nonlinear behavior. Major design parameters of the valve control system that affect the response and stability are also studied with root locus method. The linear dynamic analysis results are verified with simulations in time-domain.

기호 설명

x_v, x_m : 파일럿 디스크, 메인 디스크 변위
 p_s, p_d : 제어밸브 입구, 출구 압력
 p_c : 제어체임버 압력
 M_m : 메인 디스크 질량
 C_m : 메인 디스크에 작용하는 등가 점성마찰계수
 $A_p, A_d, A_r (= A_d / A_p)$: 메인 디스크 상부, 하부 단면적 및 면적비
 a_1, a_2 : 제어체임버 입구와 출구 오리피스 단면적
 Q_1, Q_2, Q : 제어체임버 유입, 유출유량 및 메인 디스크 통과유량
 d_v : 메인 디스크 출구 오리피스 직경
 V_{co} : 메인 디스크 초기위치에서 제어체임버 체적
 β_e : 공정유체 유효체적탄성계수
 C_d : 유량계수(discharge coefficient)
 ρ : 공정유체 질량밀도(mass density)
 k_q : 유량이득(flow gain)

k_c : 유량압력계수(flow pressure coefficient)
 s : 라플라스 연산자(Laplace operator)
 $G(s) = x_m(s)/x_v(s)$: 전달함수

1. 서 론

비례제어밸브는 코일에 흐르는 전류에 비례하여 발생하는 전자기력(electromagnetic force)을 이용해서 밸브를 작동시키는 구조를 갖으며, 고압 대용량의 공정유체를 제어하는 경우에는 압력과 유체 흐름에 의하여 밸브에 작용하는 외력을 보상할 수 있는 큰 구동력의 증폭을 위하여 파일럿 밸브를 이용하는 2단 밸브 형태로 설계된다.

대용량 비례유량제어밸브는 솔레노이드가 밸브에 내장되므로 공압작동밸브(air-operated valve)나 모터 작동밸브(motor-operated valve)와 달리 파일럿 밸브를 작동시키기 위하여 외부와 연결되는 액추에이터가 없어 패키징이 필요 없는 밀봉된 설계와 구동부의 소형화가 가능하다는 구조적인 특징 외에 동적 작동 성능이 우수하고 사용시간에 따른 성능저하가 상대적으로 작으므로 유지보수비용이 절감되는 장점으로 인하여 화력 및 원자력발전소, 정유공장에서의 긴급급수밸브 등과 같이 위급한 상황에서 작동되어야 하는 분야에

접수일 : 2010년 1월 19일
 정규홍(책임저자) : 대전대학교 컴퓨터응용기계설계공학과
 E-mail : ghjung@daejin.ac.kr, Tel : 031-539-1974

점차 적용이 확대되고 있다. 특히 비례제어밸브 제어기(positioner)는 파일럿 밸브 변위를 선형변위계로 측정하여 피드백하는 폐루프 제어시스템을 통하여 밸브의 빠른 응답성과 히스테리시스(hysteresis)가 거의 없는 정밀한 위치제어가 가능할 뿐만 아니라 마이크로 컨트롤러를 이용한 디지털 방식의 전자제어를 활용해서 전원, 센서, 솔레노이드 코일 등의 단선과 단락 등을 검출하는 자기진단기능과 디지털 통신을 이용한 원격제어 및 모니터링 기능이 구현된 스마트밸브로 개발되고 있다^{1,2)}.

2단 비례유량제어밸브는 유체가 흐르는 유로단면적을 조절하는 기능의 메인 밸브와 메인 밸브변위를 조절하는 기능의 파일럿 밸브로 구성된다. 파일럿 밸브는 솔레노이드에서 발생하는 전자기력으로 변위가 제어되고 메인 밸브는 파일럿 밸브에 대한 상대변위에 따라 자체적으로 조절되는 제어체임버 압력에 의하여 파일럿 밸브를 추종하는 자력제어시스템(self-controlled system)의 구조를 갖는다. 따라서 메인 밸브의 응답성과 안정성은 자력제어시스템의 기계적 설계인자에 의하여 결정된다.

본 논문에서는 연구대상 대용량 비례유량제어밸브의 구조와 작동원리를 파악하였으며, 정상상태 작동 특성에 대하여 수행된 연구결과³⁾를 바탕으로 자력제어시스템의 동특성을 고찰하였다. 동적해석은 비선형 수학적모델을 선형화해서 유도된 전달함수를 이용하였고 설계인자 변화에 대한 극점(pole)의 변화로부터 응답성능과 안정성을 해석하였으며 선형해석 결과는 비선형 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2. 2단 비례유량제어밸브 작동원리

Fig. 1은 메인 디스크와 파일럿 디스크로 구성되는 상시폐쇄형(normally closed) 2단 유량제어밸브의 단면구조를 나타낸다. 솔레노이드 가동자와 연결된 파일럿 디스크는 코일전류에 의하여 발생하는 전자기력과 리턴 스프링 압축력이 평형을 이루는 상태에서 변위가 결정된다. 이에 비하여 독립적으로 운동 가능한 메인 디스크는 입구압력(p_s), 출구압력(p_d), 파일럿 디스크에 대한 메인 디스크의 상대변위에 따라 조절되는 제어체임버 압력(p_c)이 평형을 이루는 상태에서 변위가 결정된다. 여기서 메인 디스크 하부에 작용하는 입구와 출구압력은 메인 디스크를 상승시키는 방향으로 작용하고, 상부 전체면적에 작용하는 제어체

임버 압력은 메인 디스크를 하강시키는 방향으로 작용한다. Fig. 1의 비례유량제어밸브는 메인 디스크를 통과하는 유량(Q)을 제어하기 위하여 메인 디스크에 의해서 형성되는 유로 단면적을 파일럿 디스크 변위로 조절하는 방식으로 작동된다.

메인 디스크는 파일럿 디스크에 대한 메인 디스크 상대변위에 따라 조절되는 제어체임버 압력에 의하여 항상 파일럿 디스크 변위를 추종하도록 설계된 자력제어시스템으로 변위가 제어된다. 즉, 밸브 입구와 출구압력이 일정하면 메인 디스크를 상승시키는 힘은 일정하므로 제어체임버 압력 p_c 의 크기에 따라 메인 디스크는 상승 또는 하강하게 된다. 파일럿 디스크가 고정된 상태에서 메인 디스크가 평형위치에서 상승하면 제어체임버의 유출 오리피스 단면적이 작아져 제어체임버 압력이 상승하여 메인 디스크를 하강시키게 되고 반대로 메인 디스크가 평형위치에서 하강하면 제어체임버의 유출 오리피스 단면적이 증가하여 제어체임버 압력이 낮아지게 되므로 메인 디스크는 상승하여 평형위치로 복귀하게 된다. 이와 같이 메인 디스크는 항상 파일럿 디스크를 추종하므로 솔레노이드를 통하여 발생하는 상대적으로 작은 구동력으로 파일럿 디스크 변위를 조절하면 메인 디스크는 제어체임버 압력에 의해 발생하는 큰 구동력으로 파일럿 디스크와 일정한 변위 차가 유지되도록 제어되므로 메인 디스크를 통과하는 고압 대용량 유량에 의한 외력을 보상할 수 있게 된다.

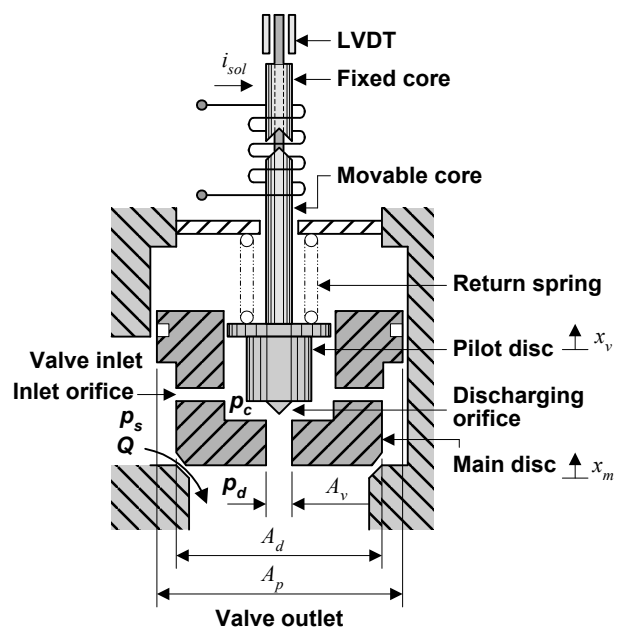


Fig. 1 Proportional flow control valve

3. 메인 디스크의 수학적 모델

Fig. 2는 전술된 2단 비례유량제어밸브에서 메인 디스크의 운동을 나타내는 도식적인 구조이고 설계자료는 Table 1에 나타난 바와 같다. 제어체임버 압력 p_c 는 메인 디스크 측면에 가공된 일정 유로단면적을 갖는 오리피스 a_1 과 파일럿에 대한 메인 디스크 상대 변위에 따라 변화되는 가변 오리피스 a_2 를 통과하는 유량에 의하여 결정되며 Fig. 2에는 이러한 작동원리에 부합하는 등가 오리피스 a_2 를 단순화하여 나타내었다.

Fig. 2에서 메인 디스크 변위가 영이 아닌 상태(즉, 메인 디스크를 통해서 유체가 흐르는 상태)에서 메인 디스크와 제어체임버에 대한 수학적 모델을 나타내면 다음과 같다⁴⁾. 여기서 유도된 2방향 밸브의 수학적 모델은 $x_m \neq 0, Q \neq 0$ 의 조건이 만족되어야 하며 만약 $x_m = 0$ 이면 Fig. 1의 내부구조로부터 $p_c = p_s$ 이고 $Q_1 = Q_2 = Q = 0$ 가 된다.

• 메인 디스크 운동방정식

$$M_m \ddot{x}_m + C_m \dot{x}_m = (A_p - A_d)p_s + A_d p_d - A_p p_c \quad (1)$$

• 제어체임버에 대한 연속방정식

$$Q_1 - Q_2 = -A_p \dot{x}_m + \frac{V_{co} - A_p x_m}{\beta_e} \frac{dp_c}{dt} \quad (2)$$

• 유량방정식

$$Q_1 = C_d a_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_s - p_c)} \quad (3)$$

$$Q_2 = C_d \pi d_v (x_v - x_m) \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_c - p_d)} \quad (4)$$

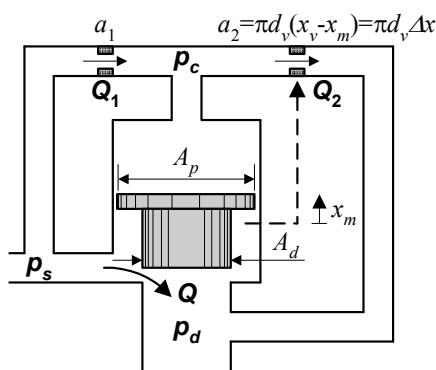


Fig. 2 Schematic main disc model

Table 1 Design parameters

Parameter	Unit	Value
M_m	kg	0.05
C_m	N sec/m	20
V_{co}	m^3	50×10^{-6}
d_1	m	1×10^{-3}
d_v	m	3×10^{-3}
d_p	m	46×10^{-3}
d_d	m	32×10^{-3}
C_d	-	0.61
β_e	N/m^2	8000×10^5
ρ	kg/m^3	1000

4. 동특성 해석을 위한 선형모델

메인 디스크의 동특성은 유량방정식이 제공근의 형태로 기술되는 비선형 모델이므로 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 미분방정식의 해를 구한다고 하여도 각 설계인자가 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하는 것이 매우 어려우므로 작동조건을 선정하고 이를 기준으로 선형화된 모델을 유도하여 안정성과 동특성 해석을 수행하였다.

4.1 선형화

연구대상 자력제어시스템은 파일럿 디스크에 대한 메인 디스크의 추종성능 분석이 목적이므로 입력과 출력은 각각 파일럿 디스크와 메인 디스크 변위이다. 선형화 모델에 적용되는 작동조건은 입구와 출구압력차가 최대인 상태로 선정하였으며 이 때 파일럿 유량이 최대로 발생하게 된다. 정특성 해석결과로부터 평형상태를 이루는 정상상태 작동점과 선형화 시스템의 입출력 변수 및 상태변수를 정리하면 다음과 같다.

• 작동조건

파일럿 디스크 변위 : $(x_v)_{op} = 1\text{mm}$

메인 디스크 변위 및 속도 :

$$(x_m)_{op} = 1\text{mm} - \frac{a_1}{\pi d_v} \sqrt{\frac{A_r}{1 - A_r}} = 0.919\text{mm}$$

$$(\dot{x}_m)_{op} = 0$$

입구압력 : $(p_s)_{op} = 100\text{bar}$

출구압력 : $(p_d)_{op} = 0\text{bar}$

제어체임버 압력 :

$$(p_c)_{op} = A_r (p_d)_{op} + (1 - A_r) (p_s)_{op} = 51.61\text{bar}$$

• 선형화 시스템 상태변수

메인 디스크 변위 : $\Delta x_m = x_m - (x_m)_{op}$

메인 디스크 속도 : $\dot{\Delta x}_m = \dot{x}_m - (\dot{x}_m)_{op}$

제어체임버 압력 : $\Delta p_c = p_c - (p_c)_{op}$

• 선형화 시스템 입력

파일럿 디스크 변위: $\Delta x_v = x_v - (x_v)_{op}$

• 선형화 시스템 출력

메인 디스크 변위: $\Delta x_m = x_m - (x_m)_{op}$

메인 디스크 동특성의 비선형성은 식 (3)과 (4)의 유량방정식에 기인하며, 정상상태 작동점에 대하여 선형화된 유량방정식은 다음과 같다.

$$Q_1 - (Q_1)_{op} = -k_{c1} \Delta p_c \quad (5)$$

$$Q_2 - (Q_2)_{op} = k_q \Delta x_v - k_q \Delta x_m + k_{c2} \Delta p_c \quad (6)$$

여기서, $k_q = \left. \frac{\partial Q_2}{\partial x_v} \right|_{op} = - \left. \frac{\partial Q_2}{\partial x_m} \right|_{op}$

$$k_{c1} = - \left. \frac{\partial Q_1}{\partial p_c} \right|_{op}$$

$$k_{c2} = \left. \frac{\partial Q_2}{\partial p_c} \right|_{op}$$

연속방정식 (2)에서 제어압 체임버 체적 V_c 는 메인 디스크 변위 x_m 에 따른 체적변화량이 작으므로 체적변화를 무시하면 $x_m = 0$ 에서 초기체적 V_{co} 의 일정한 값으로 나타낼 수 있으며, 선형화된 식 (5)와 (6)을 이용하여 메인 디스크 운동방정식과 연속방정식을 나타내면 식 (7), (8)과 같다.

$$M_m \ddot{\Delta x}_m + C_m \dot{\Delta x}_m = -A_p \Delta p_c \quad (7)$$

$$-k_{c1} \Delta p_c - (k_q \Delta x_v - k_q \Delta x_m + k_{c2} \Delta p_c) = -A_p \dot{\Delta x}_m + \frac{V_{co}}{\beta_e} \frac{d \Delta p_c}{dt} \quad (8)$$

4.2 전달함수

선형미분방정식으로 기술된 식 (7)과 (8)을 라플라스 변환하여 파일럿 디스크 변위에 대한 메인 디스크 변위의 전달함수를 구하면 식 (9)와 같으며 Fig. 3은 메인 디스크 자력제어시스템에 대한 블록선도를 나타낸다.

$$G(s) = \frac{x_m(s)}{x_v(s)} = \frac{1}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1} \quad (9)$$

여기서, $a_3 = \frac{M_m V_{co}}{k_q A_p \beta_e}$

$$a_2 = \frac{1}{A_p k_q} [(k_{c1} + k_{c2}) M_m + \frac{C_m V_{co}}{\beta_e}]$$

$$a_1 = \frac{A_p}{k_q} \left[\frac{(k_{c1} + k_{c2}) C_m}{A_p^2} + 1 \right]$$

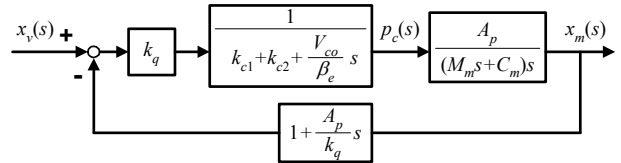


Fig. 3 Self-controlled system block diagram

메인 디스크 변위, 속도, 제어체임버 압력의 3개 상태변수를 갖는 자력제어시스템은 3차 전달함수로 기술되고 주요 특성은 다음과 같다.

(1) 전달함수의 정상상태 이득은 $s = 0$ 를 대입하였을 때 $x_m(s)/x_v(s) = 1$ 이 되므로 최종값 정리에 의하여 메인 디스크변위와 파일럿 디스크 변위 사이에 정상상태오차는 발생되지 않는다. 이러한 사실은 Fig. 3의 블록선도에서 개루프 전달함수가 분모에 s 를 1개 포함하는 1형(type 1)이고 피드백 전달함수의 정상상태 이득은 1이므로 1형 시스템에 대한 단위 피드백의 경우에는 계단입력에 대한 정상상태오차가 발생되지 않는 선형제어시스템 이론으로부터 확인할 수 있다⁵⁾.

(2) 자력제어시스템의 전달함수는 3차이므로 3개의 극점(pole)이 존재하며 복소평면 상에서의 극점위치에 따라 동적응답성능이 결정된다.

(3) 3차 시스템의 극점형태는 다음과 같이 3개 모두 실수이거나 1개의 실수와 2개의 복소수를 갖는 형태이고 어느 경우에서나 모든 극점의 실수부가 음수이어야만 제어시스템의 안정성이 보장된다.

$$G(s) = \frac{p_1 p_2 p_3}{(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3)} = \frac{p \omega_n^2}{(s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2)(s + p)} \quad (10)$$

(4) 전달함수 분모에서 s 의 계수를 살펴보면 공정유체가 액체인 경우에 β_e 는 매우 큰 값이고 유량압력 계수 k_{c1} , k_{c2} 와 V_{co} 는 작은 값이므로 s^3 과 s^2 에 대한

계수는 s 의 계수 a_1 에 비하여 매우 작으므로 메인 디스크 전달함수는 식 (11)과 같은 1차 시스템으로 근사될 수 있으며 근사된 전달함수의 실수 극점은 주요 극점(dominant pole)으로서 제어시스템의 응답을 지배한다.

$$G(s) = \frac{x_m(s)}{x_v(s)} = \frac{1}{\frac{A_p}{k_q}s + 1} \quad (11)$$

Table 1의 설계 자료를 이용해서 전달함수 분모항의 계수를 계산해보면 a_3 와 a_2 는 a_1 보다 10^{-6} 이하의 크기로 작으므로 1차 시스템으로 응답성능을 근사하는 것이 타당함을 알 수 있다. 이러한 결과는 실제 전달함수를 다음과 같은 부분분수로 나타내어 분석하면 더욱 명확하다.

$$G(s) = -\frac{351.4s - 5.339 \times 10^4}{s^2 + 199.5s + 8.838 \times 10^8} + \frac{351.4}{s + 351.4}$$

위 전달함수에서 2차 시스템은 고유진동수가 $2.973 \times 10^3 \text{ rad/s}$ 로 응답이 매우 빠르고 정상상태이득이 6.04×10^{-5} 이므로 크기가 매우 작아 전체 시스템의 응답에 미치는 영향이 거의 없으므로 2차 시스템 극점의 실수부가 음수로 안정된 상태이면 1차 시스템에 의하여 전체 시스템의 응답이 지배됨을 알 수 있다. Fig. 4는 메인 디스크 전달함수에 대한 계단응답을 3차 시스템과 근사된 1차 시스템에 대하여 나타낸 결과이며 전체 시스템의 계단응답은 1차 시스템의 응답과 일치함을 확인할 수 있다. 식 (11)로 근사된 1차 시스템에서 극점은 $p = -k_q/A_p$ 이므로 유량이득(또는, 출구 오리피스 직경 d_v)과 메인 디스크 피스톤 단면적이 동특성에 지배적인 영향을 미치게 되며 유량이득이 크고 피스톤 단면적이 작을수록 극점은 허수축으로부터 왼쪽으로 멀어지게 되어 동특성이 빠르게 된다.

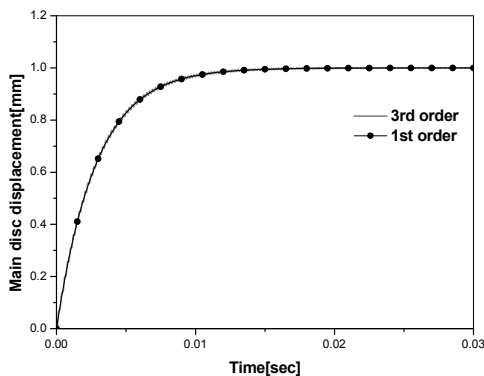


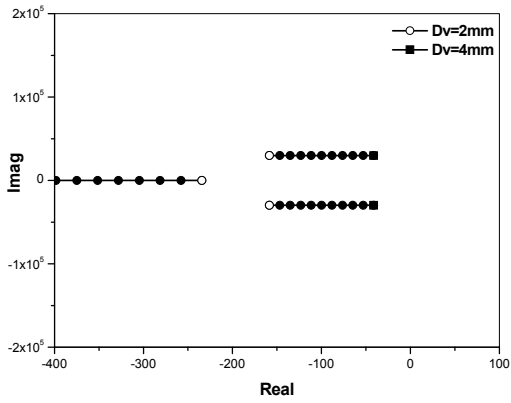
Fig. 4 Linear system step response

5. 자력제어시스템의 동적성능분석

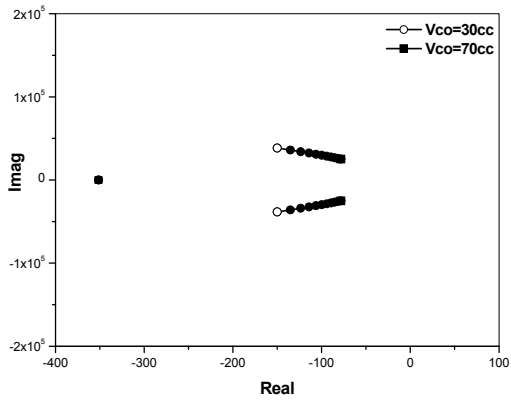
파일럿 디스크를 추종하도록 설계되는 자력제어시스템의 동적성능은 선형화 해석을 통해서 구해진 전달함수의 극점 위치로부터 파악할 수 있다. 본 연구에서는 주요 설계인자의 변화가 동특성에 미치는 영향을 전달함수 극점의 위치변화로 분석하였으며 Fig. 5는 설계사양 변화에 대하여 복소평면에 나타나는 극점 궤적을 나타낸다.

전달함수 특성분석에서 언급된 바와 같이 3차의 자력제어시스템이 안정하다면 동특성은 1차로 근사될 수 있다. 1차 시스템의 응답은 유량이득과 메인 디스크 피스톤 단면적으로 결정되는데 유량이득에 영향을 미치는 출구 오리피스 단면적 변화에 대한 극점 변화 결과는 Fig. 5(a)와 같다. 오리피스 직경이 클수록 실수부 극점은 복소평면 상에서 좌측으로 이동하므로 응답속도가 높아짐을 확인할 수 있는데 이는 출구 오리피스 직경이 클수록 파일럿 디스크와 메인 디스크 변위 차에 따라 조절되는 제어체임버 압력의 이득이 증가하기 때문이다. 이에 비하여 응답속도에는 거의 영향을 미치지 않는 2개 복소수 극점의 실수부는 출구 오리피스 단면적을 크게 설계함에 따라 우측으로 이동하게 되는데 실수부가 음의 값을 가지므로 여전히 안정된 조건을 만족하지만 출구 오리피스 직경이 더욱 큰 경우에는 불안정해 질 수 있다. 실제 설계에서 출구 오리피스 직경 d_v 는 동적성능뿐만 아니라 메인 디스크의 정상상태 변위 특성에도 영향을 미치는 설계인자이므로 정특성을 우선적으로 고려하여 결정한 후 동적성능을 검증해야 한다.

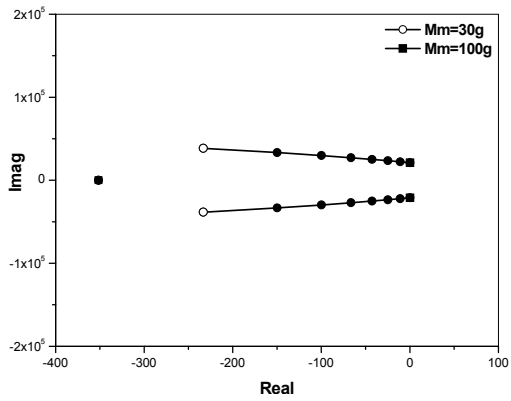
제어체임버 초기 체적 V_{co} , 메인 디스크 질량 M_m , 등가 점성마찰계수 C_m 은 모두 정특성에는 영향을 미치지 않는 설계인자이며 Fig. 5(b), (c), (d)는 Table 1의 설계 값보다 크거나 작은 경우에 대한 극점 궤적을 나타낸다. 분석대상 3개 설계인자는 모두 설계사양변화에 대하여 실수부 극점이 동일한 값을 나타내므로 응답성능에는 거의 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 그러나 메인 디스크 질량이 증가하거나 점성마찰계수가 감소하는 경우에는 복소수 극점이 우측 반평면에 위치하여 불안정해 질 수 있으므로 자력제어시스템의 안정성을 위해서는 적절한 감쇠를 갖도록 설계해야 한다.



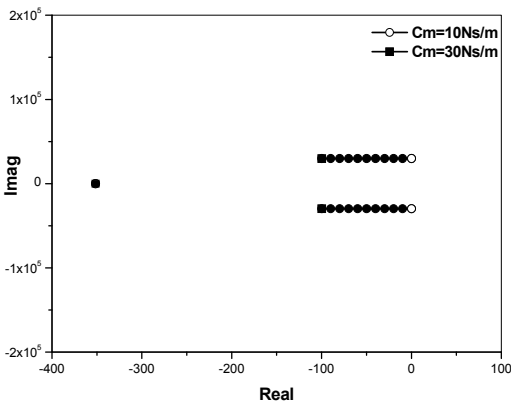
(a) discharging orifice diameter d_v



(b) control chamber volume V_{co}



(c) main disc mass M_m



(d) viscous friction coefficient C_m

Fig. 5 Effect on transfer function pole location

6. 비선형 시뮬레이션

비례유량제어밸브에서 조절되는 유량은 메인 디스크 변위에 의하여 형성되는 유로단면적에 비례하므로 제어유량의 동적성능은 메인 디스크를 제어하는 자력 제어시스템의 동특성으로 결정된다. 본 연구에서는 자력제어시스템의 주요 설계인자가 동특성에 미치는 영향을 복소평면 상에서 전달함수의 극점변화로 예측하였으며 선형화된 시스템에 대한 해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 비선형 모델에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 6은 MATLAB Simulink를 이용하여 작성된 메인 디스크 동특성 모델을 나타낸다. 메인 디스크 운동방정식과 유량방정식 서브블록의 연산결과는 연속방정식 서브블록에서 계산되는 제어체임버 압력을 결정하고 제어체임버 압력이 다시 운동방정식과 유량방정식으로 피드백되는 구조를 갖는다. 시간영역에서 메인 디스크의 동특성은 파일럿 디스크 변위가 1mm를 유지하는 상태에서 2mm로 순간적으로 변화되는 경우에 대한 응답성능으로 평가하였다.

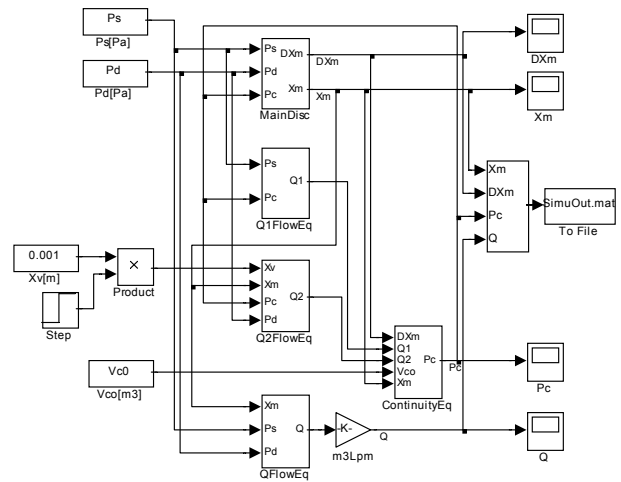
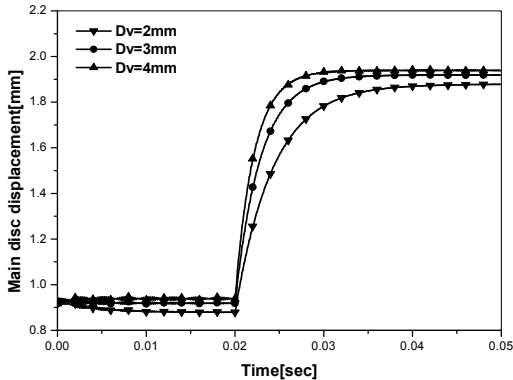


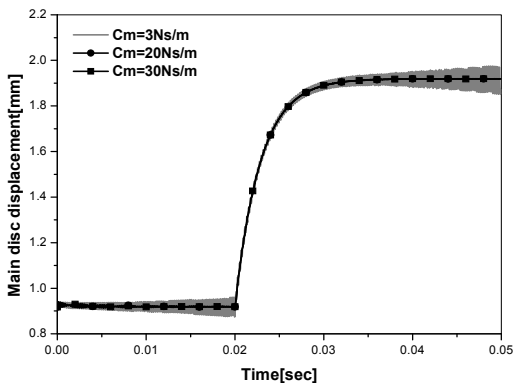
Fig. 6 S model for main disc dynamics

Fig. 7(a)는 출구 오리피스 직경이 서로 다른 설계 사양에 대한 시뮬레이션 결과이며 상태변수가 초기조건으로부터 정상상태에 도달할 때까지 20ms의 시간을 유지한 후 파일럿 디스크 변위를 2mm로 계단형태로 변화시키는 경우이다. 출구 오리피스 면적은 정상상태에서의 메인 디스크 변위에도 영향을 미치는 설계인자이므로 직경이 다르면 정상상태에서 메인 디스크 변위도 다르지만 파일럿 디스크가 1mm 변화되었을 때 메인 디스크 이동변위는 모두 1mm로 동일

함을 알 수 있다. 메인 디스크 응답특성은 1차 시스템에 근사되므로 모든 경우에 있어서 오버슈트는 발생하지 않았으며 출구 오리피스 직경이 클수록 계단 응답의 시정수가 작아져 빠르게 정상상태에 도달하였다. 이는 출구 오리피스 직경이 클수록 전달함수 주요 극점이 허수축으로부터 멀어져서 신속한 응답성을 가지며, 2개 복소수 극점이 복소평면의 좌측에 위치하여 제어성능이 안정되는 해석결과와 일치한다.



(a) discharging orifice



(b) viscous friction coefficient

Fig. 7 Simulation result for parameter variation

Fig. 7(b)는 메인 디스크에 작용하는 등가 점성마찰 계수 변화에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 점성 마찰계수는 정특성과 무관하므로 3가지 경우에 대하여 메인 디스크 변위가 동일하고, 주요 극점이 변화되지 않으므로 계단응답의 궤적이 유사하게 나타났다. 그러나 점성마찰계수가 매우 작은 경우에는 초기 조건으로부터 정상상태 변위로 수렴하지 않았으며 계단압력에 대하여 메인 디스크가 변위가 변화되는 경우에도 발산하는 불안정한 특성을 나타내었다. 이는 마찰계수가 작을수록 2개 복소수 극점이 허수축으로

이동하여 임계값보다 작은 경우에는 복소평면의 우측 반평면에 진입하기 때문이다. 이러한 결과로부터 자력제어시스템의 2개 복소수 극점은 메인 디스크의 안정성에만 영향을 미침을 확인하였으며 주요 설계변수에 대해서 분석된 복소수 극점의 변화를 고려하여 자력제어시스템이 안정되도록 설계사양을 결정한 후 출구 오리피스 단면적과 메인 디스크 피스톤 단면적을 통하여 만족스러운 동적성능을 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

Fig. 8은 초기조건으로부터 안정된 상태에서 메인 디스크 출구압력을 0bar에서 50bar로 계단형태로 변화시켰을 때의 응답성능을 나타낸다. 출구압력이 급격하게 변화되는 순간 제어체임버 압력과 메인 디스크 변위에는 다소 큰 진동이 발생하지만 빠르게 정상상태로 안정되는 결과를 나타내었다.

제어체임버 압력에 대한 정특성 분석결과를 살펴보면 출구압력이 0bar일 때에는 51.6bar이고, 출구압력이 증가할수록 선형적으로 증가하게 되는데 비선형 시뮬레이션에서의 정상상태 압력은 정특성 분석결과와 일치함을 확인하였다.

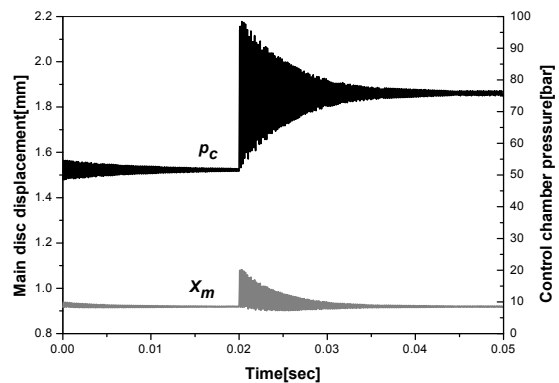


Fig. 8 Simulation result for disturbance of discharge pressure

7. 결 론

본 연구에서는 자력제어시스템의 구조를 갖는 2단 비례유량제어밸브의 작동원리를 파악한 후 주요 설계인자가 메인 디스크의 동적제어성능에 미치는 영향을 분석하였다.

동특성분석은 메인 디스크의 운동을 기술하는 비선형 수학적 모델을 정립한 후 선형화를 통하여 파일럿 디스크에 대한 메인 디스크 변위의 특성을 나타내는 전달함수를 유도하였으며 주요 설계인자가 극점변화

에 미치는 영향을 분석하였다. 3차 전달함수의 자력 제어시스템은 실근을 갖는 1개의 주요 극점과 2개의 복소수 극점을 가지며 주요 극점이 동적응답성능을, 복소수 극점이 안정성을 결정함을 확인하였으며 선형 해석 결과는 비선형 시뮬레이션을 이용한 시간영역 응답으로 검증하였다.

참고 문헌

- 1) Vito Liantonio, "High Pressure Modulating Solenoid Valve for Steam/Gas Service", InTech, pp.43-46, 1988.
- 2) Vito Liantonio, "Use of Electromagnetic Control Valves in Risk Significant Applications"
- 3) 정규흥, "대용량 비례유량제어밸브 정특성분석", 유공압시스템학회 2009년도 추계학술대회 논문집, pp.67-72, 2009.
- 4) H. E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, Inc. 1967.
- 5) Katsukiho Ogata, "Modern Control Engineering", Prentice Hall, 2002.