

피스톤 펌프 정/역 가변토출 제어밸브의 동적거동 해석

유진산*, 함영복, 윤소남(한국기계연구원 첨단산업기술연구부), 김성동(금오공대 기계공학부)

Dynamic Behavior Analysis of Variable Displacement Control Valve for Closed Circuit Piston Pump

J. S. Yoo, Y. B. Ham, S. N. Yun(Advanced Industrial Technology. Dept. KIMM), S. D. Kim(KNUT)

ABSTRACT

This study deals with a dynamic behavior analysis of pump control regulator varied the swash plate tilting angle with the positive and negative direction. To accomplish it's purpose, modeling and displacement response analysis about principal parts (spool, servo piston, feedback lever, sleeve) of pump control regulator was performed. We have been able to verifying the propriety of servo mechanism and design parameters of pump control regulator by research results. So, it respect to utilized with useful research data at variable displacement control valve development of variable displacement piston pump.

Key Words : Piston pump(피스톤 펌프), Regulator(레귤레이터), Spool(스풀), Sleeve (슬리브), Servo piston (서보피스톤), Feedback lever(피드백 레버)

1. 서론

일반적으로 유압 피스톤 펌프는 토출유량의 가변여부에 따라 고정용량형과 가변용량형으로 세분되며, 구조에 따라 사판식(swash plate type)과 사축식(bent axis type)으로 나뉜다. 펌프의 토출유량은 피스톤 행정(stroke)의 함수로 표현할 수 있는데, 피스톤 행정은 경사판 또는 경사축의 각도에 종속되어 표현된다. 따라서, 가변용량형 유압 펌프는 경사판 또는 경사축 각도의 제어를 통해 토출유량을 가변할 수 있으며, 이러한 목적으로 사용되는 제어밸브, 혹은 레귤레이터(regulator)는 가변입력 신호에 민감하게 반응해야 하며, 부하의 변동에 능동적으로 대처할 수 있게 설계해야 한다.

가변용량형 유압 펌프가 한 방향으로만 가변되는 경우, 펌프의 용량을 조절하면 토출유량은 제어할 수 있으나, 토출방향을 제어할 수는 없으므로 액츄에이터를 정.역으로 구동하기 위해서는 방향제어밸브가 부가적으로 필요하게 된다. 따라서, 정유압 동력변환장치(HST : hydrostatic transmission)와 같은 폐회로 시스템에서는 동력의 크기와 그 전달방향을 연속적으로 가변할 필요가 있으므로, 여기에 사용되는 펌프는 정.역의 가변토출제어가 필수적이

다.

가변용량형 펌프의 용량 제어 레귤레이터에 대한 기존 연구로는 사축식 피스톤 펌프에 사용되는 레귤레이터의 거동 및 스푼의 응답성을 계산하고, 그에 따른 압력과 유량의 변화를 수치해석한 연구가 있으며⁽¹⁾, 사판식 액셀피스톤 펌프와 사판제어밸브 모델에 대한 선형화해석을 통해 사판제어밸브의 입력에 대한 펌프의 유량제어 특성을 연구한 사례가 있었다.⁽²⁾

본 연구에서는 가변용량형 피스톤 펌프의 토출유량을 정.역방향으로 제어할 수 있는 밸브에 대하여, 제어밸브의 주요 부품인 파일럿 스푼(pilot spool), 서보 피스톤(servo piston), 피드백 레버(feedback lever), 슬리브(sleeve)를 모델링(modelling)하여, 이 모델들의 변위응답 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 본 논문의 연구결과는 제어밸브의 개발 과정 중 초기 설계(design)한 제어밸브의 설계치수에 대한 타당성을 미리 예측하여 제작(manufacture)상의 시행착오를 줄일 수 있으며, 현재 선박을 비롯한 각종 건설 중장비에서 큰 수요를 차지하고 있으나 전량 수입에 의존하고 있는 폐회로형 가변 펌프의 연구에 활용될 것으로 예상된다. 또한 시스템의 부하 변동에 대해 민감한 대응이 가

능한 펌프의 토출유량 제어밸브의 개발에 유용한 연구자료가 될 것으로 기대된다.

2. 정/역 가변토출 제어밸브의 모델링

2.1 작동원리

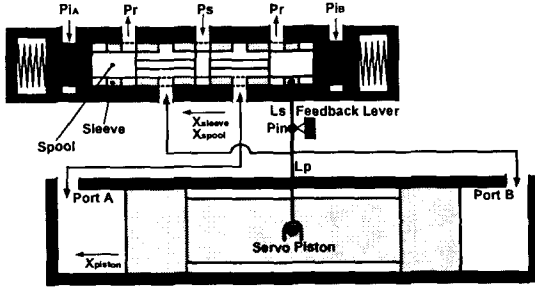


Fig. 1(a) Analysis model of regulator for positive/negative variable piston pump

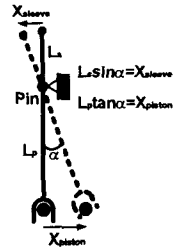


Fig. 1(b) Behavior model of feedback lever

Fig. 1(a)는 피스톤 펌프 정/역 가변토출 제어 밸브(이하 제어밸브라 한다)의 해석모델이며, Fig. 1(b)는 피드백 레버의 움직임을 나타내는 것이다.

작동순서를 살펴보면 다음과 같다. 파일럿 압력 (P_{iA} , P_{iB}) 포트에 유압력이 공급되지 않으면, 스톱의 양끝단에서 작용하고 있는 스프링력에 의해 스톱은 항상 중립상태를 유지하게 되며, P_{iA} 또는 P_{iB} 의 파일럿 압력이 인가되면 스톱이 움직이게 된다. 이때, Port A 또는 Port B에 압력 P_s 가 공급되어 서보 피스톤이 움직이고, 서보 피스톤의 움직임 X_{piston} 은 Fig. 1(b)처럼 피드백 레버를 거쳐 슬리브로 전해지는데 슬리브 움직임 X_{sleeve} 에 관한식은 식(1)과 같다.

$$X_{sleeve} = L_s \cdot \sin \left(\tan^{-1} \frac{X_{piston}}{L_p} \right) \quad (1)$$

여기서, L_p 는 핀(pin)과 서보 피스톤 사이의 거리, L_s 는 핀과 슬리브 사이의 거리를 의미한다. Fig. 1(b)에서 알 수 있듯이 핀을 중심으로 레버가 움직이게 되면, 서보 피스톤과 슬리브의 움직임은

서로 반대 방향으로 움직이게 된다. 이와 같이, 서보 피스톤의 움직임이 슬리브로 피드백 되면 슬리브는 스톱의 움직임을 항상 추종하게 되어, 서보 피스톤으로 공급되는 유압력(P_s)을 차단하게 된다. 결국, 피드백 레버를 통한 슬리브의 동작으로 인해서 서보 피스톤은 일정량 만큼 움직이고, 정지하게 된다.

2.2 서보 제어 레귤레이터의 모델링(modeling)

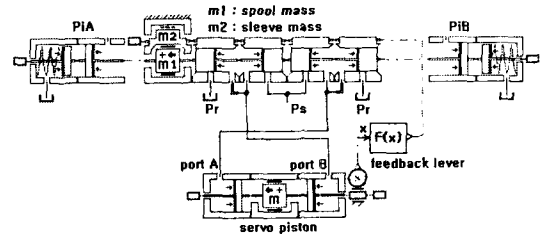

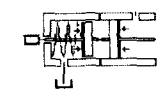
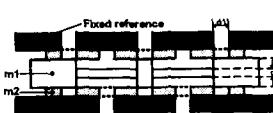
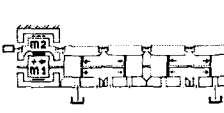
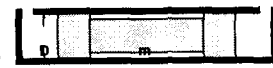
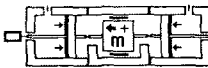
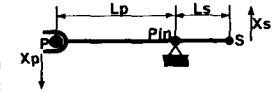



Fig. 2 AMESim[®] model of control valve for positive/negative variable piston pump

Fig. 2는 Fig. 1(a)-(b)의 제어 밸브 모델에 대한 변위응답 해석을 위해 상용 소프트웨어인 AMESim[®]을 이용하여 모델링 한 것이다.

Table 1은 모델링에 적용된 각 요소(component)의 주요 파라미터(parameters)이며, 각 모델에 대한 형상 치수들은 제어 밸브 설계시 정의된 운동방정식을 통해 계산되었다.

Table 1 Parameters of principle components

Analysis model	AMESim [®] model
 D:28[mm], d:20[mm], K=123[N/mm]	
 Fixed reference D:14[mm], d:12[mm], d1:8[mm] m1:100[g], m2:50[g]	
 D:57[mm], m:5000[g]	
 Lp:8[mm], Ls:51[mm] Xp: variable, Xs: variable	 feedback lever $X_s = L_s \cdot \sin \left(\tan^{-1} \left(\frac{X_p}{L_p} \right) \right)$

3. 해석결과 및 고찰

Fig. 3 은 파일럿 압력 입력 파형 P_{iB} 의 그래프 이고, Fig. 4 와 Fig. 5 는 Fig. 3 과 같은 파일럿 압력 입력 파형에 대한 변위 및 유량 응답 해석 결과이다. Fig. 4 의 변위곡선에서 정(+)은 왼쪽, 부(-)는 오른쪽 방향의 움직임을 의미하며, Fig. 5 의 유량곡선에서 정(+)은 해석모델을 향한 입력, 부(-)는 해석모델로부터의 출력을 의미한다.

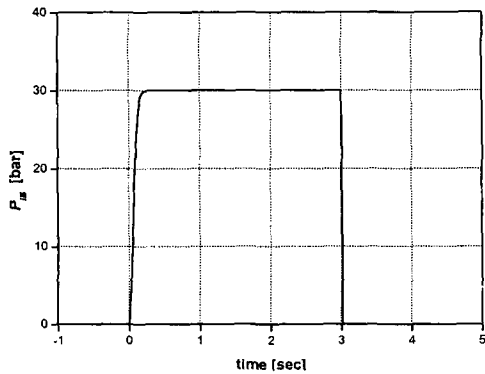


Fig. 3 Input pilot pressure signal (P_{iB})

Fig. 3 과 같은 파일럿 압력 특성곡선을 가진 유압력이 P_{iB} 로 작용하여 스프링을 압축하면, 압축량만큼 스톱은 오른쪽(-)으로 이동하게 되고, 공급압력 P_s 에서 서보 피스톤 측 Port B 를 향하는 유로(油路)가 개방되면서 서보 피스톤이 왼쪽(+)으로 이동하게 된다. 서보 피스톤의 움직임은 피드백 레버 모델에서 계산된 크기만큼의 변위량으로 슬리브를 오른쪽(+)으로 이동시켜, 개방되어 있던 P_s 와 Port B 의 유로를 닫는다. 서보 피스톤 측의 Port B 로 입력되던 공급압력 P_s 가 차단되면서 서보 피스톤의 이동은 Fig. 3 의 곡선에서 압력이 대략 30[bar] 정도로 일정한 구간인 약 3[sec]동안 정지하게 되고, 입력 압력이 0[bar]로 되면, 스프링을 압축하고 있던 유압력이 사라지고, 스톱은 왼쪽(+)으로 움직여 초기위치(또는 중립위치)로 귀환하게 된다. 스톱의 이동으로 공급압력 P_s 에서 Port A 를 향하는 유로가 개방되어, 정지되어 있던 서보 피스톤이 오른쪽(-)으로 이동하고, 이 움직임은 다시 피드백 레버 모델을 거쳐 슬리브로 전달되어 슬리브를 왼쪽(+)으로 움직여 P_s 와 Port A 의 유로를 닫는다. 이러한 동작의 결과로 스톱, 서보 피스톤, 슬리브는 모두 초기위치로 귀환하게 된다.

Fig. 4 에서 X_{spool} 곡선은 스프링이 압축되면서 발생된 스톱의 변위 응답곡선이다. 변위량이 3.68[mm]가 되는 지점부터 스톱이 일정하게 유지(또는 정

지)되고 있으며, 응답시간은 약 0.3[sec]인 결과를 보였다. X_{piston} 곡선은 스톱의 움직임에 따라 공급압력(P_s)포트에서 Port B 로 향하는 유로가 점차 개방되면서, 서보 피스톤이 움직인 결과이다.

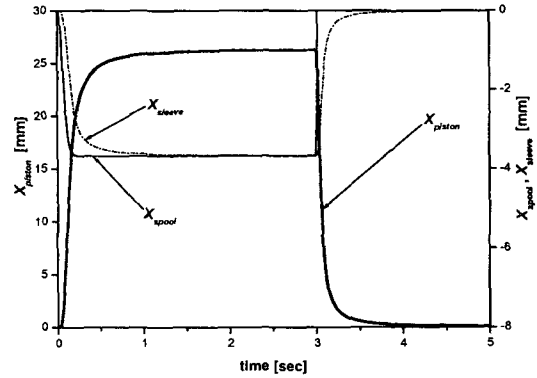


Fig. 4 Analysis result of displacement

서보 피스톤의 움직임은 피드백 레버를 거쳐 슬리브를 Fig. 4 의 X_{sleeve} 의 곡선과 같이 스톱의 이동방향과 같은 방향으로 이동시켜, 개방되었던 유로를 닫으며, 서보 피스톤을 정지시킨다. 스톱이 3.68[mm]로 유지되는 동안 서보 피스톤의 변위량이 대략 26[mm]로 유지되는 결과를 보였으며, 스톱과 슬리브의 변위응답 차가 "0"이 되는 시점부터 서보 피스톤은 정지하게 되는데, 대략 0.87[sec]가 되는 지점부터 서보 피스톤이 정지하고 있음을 알 수 있었다.

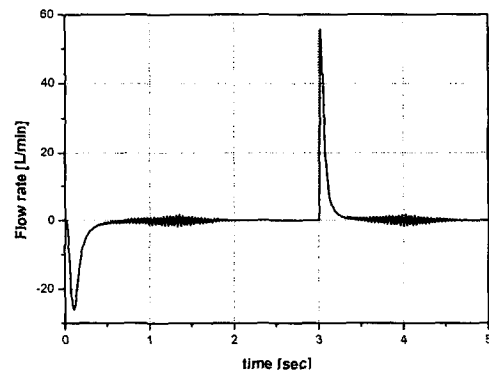


Fig. 5 Flow rate at port B

Fig. 5 는 스톱과 슬리브의 변위응답 차이로 인해 개방된 유로 면적(open area)에 의해 Port B로 유입되는 유량응답 해석결과를 나타낸 것이다. 0.5[sec]~2[sec]구간에서의 불안정한 응답은 본 연구에서 해석한 제어밸브 모델의 주요 습동 부분에 대

한 마찰 및 점성을 무시한 결과이다. 유량이 "0"이 되는 구간에서 피스톤은 정지한다.

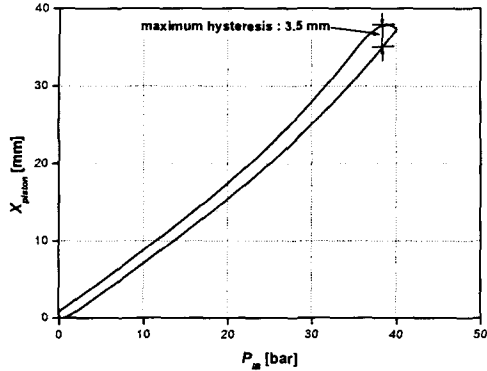


Fig. 6 Analysis result of servo piston displacement

Fig. 6은 파일럿 압력 P_{iB} 를 0에서 40[bar], 40에서 0[bar]로 증가 및 감소시켰을 때, 서보 피스톤 변위응답 결과를 나타낸 것이다. 히스테리시스의 최대치는 약 3.5[mm]였으며, P_{iB} 입력에 대한 출력 X_{piston} 의 응답이 비선형의 결과를 보였으나, Fig. 6의 결과를 통해 본 연구에서 개발하고자 하는 제어 밸브의 입력에 대한 출력특성을 알 수 있었다.

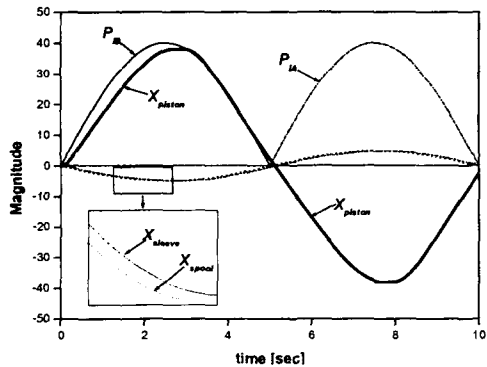


Fig. 7(a) Analysis results when P_i frequency is 0.1Hz

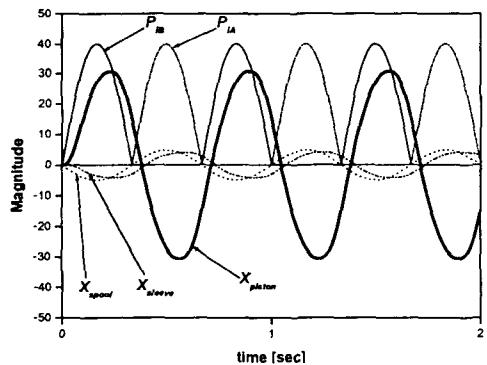


Fig. 7(b) Analysis results when P_i frequency is 1.5Hz

Fig. 7(a), (b)는 파일럿 압력의 반복 주파수를 각각 0.1[Hz], 1.5[Hz]로 입력했을 경우의 해석 결과들이다. 서보 피스톤의 최대 변위가 (a)는 38[mm], (b)는 약 30[mm]이고, 파일럿 최대 압력 40[bar]일 때 (a)와 (b)의 변위 응답량 차이는 약 11.07[mm] 정도의 결과를 보였다. 따라서, 본 연구에서 개발한 제어 밸브는 입력되는 파일럿 압력의 반복 주파수를 기준으로 하여 약 1[Hz]내에서 안정된 동작을 보이는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 피스톤 펌프 정/역 가변토출 제어 밸브의 개발과정 중 설계치수에 대한 검증과 제어 밸브의 동작 메커니즘(mechanism)을 확인하는 과정으로 제어 밸브를 모델링하여 변위응답 해석을 하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 설계식에 의해 결정된 피스톤 펌프 정/역 가변토출 제어 밸브의 스프링 상수(spring stiffness), 스톱과 서보 피스톤의 직경, 피드백 레버의 길이 비율 등 주요부품의 형상 치수(Table 1 참고)를 바탕으로 변위응답해석을 하였다.

2) 본 연구에서 설계한 피스톤 펌프 정/역 가변토출 제어 밸브의 서보 피스톤의 정상상태 응답시간은 약 0.87[sec]임을 알 수 있었고, 안정적인 사용 영역은 파일럿 압력의 반복 주파수를 기준으로 약 1[Hz]정도임이 확인되었다.

3) 본 연구에서 설계한 피스톤 펌프 정/역 가변토출 제어 밸브는 비교적 고속 응답이 요구되지 않는 선박 및 건설 중장비 구동용 정/역 가변 토출 펌프에 실제 적용이 가능할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. 정재연, 김신, 김종기, 여명규, "사축식 액셀 피스톤 펌프의 레귤레이터 동특성에 관한 연구", 한국 정밀공학회, 추계학술대회논문집; pp. 798-800, 1998.
2. 조승호, 김원수, "사판식 액셀피스톤 펌프-레귤레이터계의 선형화해석에 의한 유압제어특성 고찰", 대한기계학회논문집 A 권, 제 24 권, 제 10 호, pp. 1535-2542, 2000.