본드 그래프 모델링을 이용한 전자 유압식 PTO 밸브의 동적 거동 해석

Dynamic Analysis of EH PTO Valve using Bondgraph Modeling

*박정훈[1], #이인환[2], 이승표[1], 박성제[3], 하종규[3]

*J. H. Park[1], #I. H. Lee(anxanx@chungbuk.ac.kr)[2] , S. P. Lee[2], S. J. Park[3], J. K. Ha[3]

[1] 충북대학교 정밀기계공학과, [2] 충북대학교 기계공학부, [3] 국제종합기계(주)

Key words : Bondgraph, EH PTO valve, Pressure Modulation

1. 서론

전자 유압식 PTO(Electro Hydraulic Power Take Off) 밸브는 농업용 트랙터의 PTO 축 동력을 개폐시키는 역할을 한다. 즉, 이 밸브가 열린 위치에 있을 때 PTO 축의 급격한 회전을 방지하고 부드럽게 동력이 전달될 수 있도록 압력을 조절하는 기능을 수행한다. 이러한 PTO 밸브의 효율적인 설계를 위해서는 PTO 밸브의 동적 시스템에 대한 해석이 필요하고 따라서 시스템을 수학적으로 모델링하는 작업이 필수적이다. 이에 본 연구에서는 동적 시스템에 대한 모델링 방법으로서, 전달 에너지 형태가 다양하게 변하는 시스템에 대한 모델링을 쉽게 할 수 있고 기계적 시스템 뿐 아니라 전기 유체 및 열역학에 이르기까지 그 응용범위가 다양한 본드 그래프 모델링 기법을 이용하였다. 즉, 이를 이용하여 농업용 트랙터에서 이용되고 있는 유압클러치 피스톤의 접속 지연을 목적으로 한 전자 유압식 PTO 밸브에 대한 동적 거동에 대한 해석을 수행하였다. Fig. 1 은 PTO 밸브를 보여준다.

Fig. 1 EH PTO Valve.

2. PTO 밸브의 압력 모듈레이션

Fig. 2 는 전자 유압식 PTO 밸브의 개략도이다. 전자 유압식 PTO 밸브는 모듈레이션 밸브(a)와 어큐뮬레이터 밸브(b), 그리고 두 밸브 사이의 핀(c)과 두 개의 스프링(d)으로 구성되어 있다. 정상 운전에서 모듈레이션 밸브는 완전히 열린 위치가 되며, 오일은 클러치로 흐르게 된다. PTO 밸브 스위치가 열린 위치에 있게 되면, PTO 커버에 위치해 있는 솔레노이드 밸브를 통해서 가압된 오일은 인렛 패시지(e) 안으로 흘러 들어가게 된다.

이 오일은 계속해서 PTO 클러치 패시지(f)를 통해 흘러 들어가 PTO를 채우게 된다. PTO가 채워지면서 오일은 모듈레이션 밸브에 존재하는 패시지를 통해서 파일럿 패시지(g)로 흘러들어가게 된다. 이 파일럿 패시지 안의 오일은 모듈레이션 밸브에 압력을 가하여 밸브를 밀어 주게 되고, 연결된 스프링에 의해 닫힌 위치와 중앙 위치를 계속해서 반복하며 소량의 오일만을 통과 시킨다.

파일럿 패시지 안의 가압된 오일이 모듈레이션 밸브에 힘을 가함에 따라 클러치 패시지가 닫히고 열리는 과정 동안, 오일은 오리피스(h)를 통해 어큐뮬레이터 패시지(i)를 채우기 시작한다. 어큐뮬레이터 패시지가 완전히 채워진 후, 어큐뮬레이터 밸브는 모듈레이션 밸브와 핀 쪽으로 움직이게 되고 어큐뮬레이터 패시지의 압력이 파일럿 패시지의 압력과 일치하게 되는 순간부터 핀과 모듈레이션 밸브를 밀어내어 모듈레이션 밸브는 열린 위치에서 멈추게 되며, 시스템 압력이 유압 클러치 피스톤으로 전달된다.

한편, 클러치로 접속이 이루어지는 초기에는 낮은 압력으로 클러치를 접속시키고, 적절한 시간동안 압력을 서서히 증가 시킨 후 접속이 완료된 후 시스템 압력으로 동력을 전달되도록 이러한 과정을 압력 모듈레이션이라 한다. Fig. 3 은 PTO 밸브의 유압회로도이다.

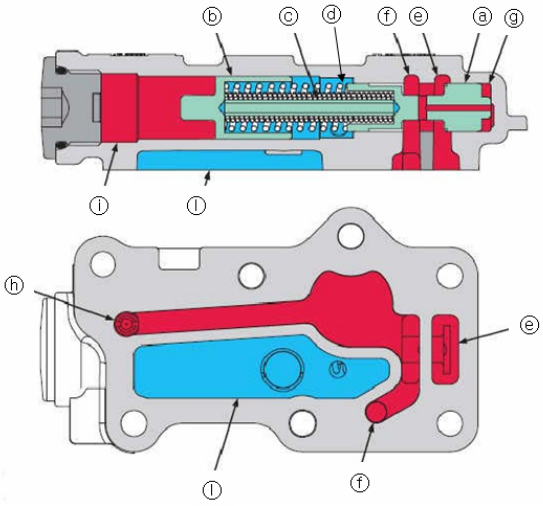

Fig. 2 Schematic of EH PTO vlave.

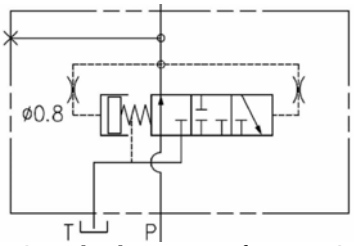

Fig. 3 Hydraulic circuit of EH PTO valve.

3. PTO 밸브의 본드 그래프 모델링

이상의 결과를 바탕으로 PTO 밸브에 대한 본드그래프 모델을 제작하였다. PTO 밸브는 에너지 발생요소(공급 압력), 전달요소(모듈레이션 밸브와 어큐뮬레이터 밸브의 단면적), 저장요소(각각 패시지의 체적, 스프링의 강성), 발산요소(오리피스, 모듈레이션 내의 패시지, 모듈레이션 밸브와 어큐뮬레이터 밸브의 마찰저항) 등으로 구성되어 있고, 입력 압력에 대한 모듈레이션 된 압력은 아웃렛 패시지에서 출력된다[1-3]. PTO 밸브에 대한 본드 그래프는 모델은 Fig. 4 와 같다.

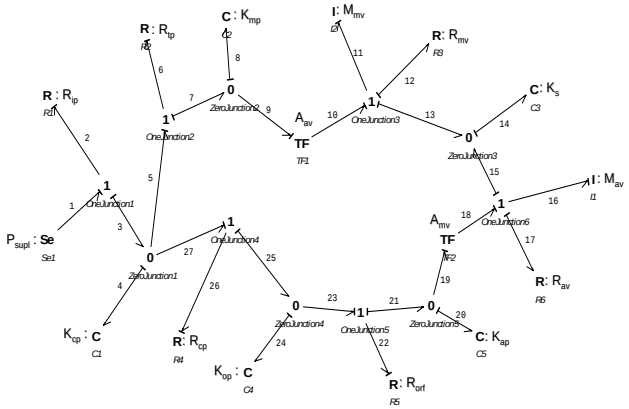

Fig. 4 Bondgraph of EH PTO valve.

본드그래프에서 인과관계(causality)를 부여하면 독립된 에너지 저장요소의 숫자가 결정되고 이것은 상태 방정식에서의 독립변수의 수와 같다[4]. Fig. 4 의 본드그래프 모델링을 이용하면 PTO 밸브에서는 총 7개의 독립변수가 결정된다(식 (1)~(7)). 시스템의 주요 변수와 기본 요소에 대한 기호와 설명은 Table. 1 에 나타내었다.

$$\dot{V}_{cp} = C_d A(\delta_{mv})\sqrt{\frac{2}{\rho}(P_{supl} - K_{cp}V_{cp})} - C_d A_{tp}\sqrt{\frac{2}{\rho}(K_{cp}V_{cp} - K_{pp}V_{pp})} - C_d A_{tp}\sqrt{\frac{2}{\rho}(K_{cp}V_{cp} - K_{op}V_{op})} \cdots\cdots(1)$$

$$\dot{V}_{pp} = C_d A_{tp}\sqrt{\frac{2}{\rho}(K_{cp}V_{cp} - K_{pp}V_{pp})} - \frac{A_{mv}}{M_{mv}}p_{mv} \cdots\cdots(2)$$

$$\dot{V}_{op} = C_d A_{tp}\sqrt{\frac{2}{\rho}(K_{cp}V_{cp} - K_{op}V_{op})} - C_d A_{orf}\sqrt{\frac{2}{\rho}(K_{op}V_{op} - K_{ap}V_{ap})} \cdots\cdots(3)$$

$$\dot{V}_{ap} = C_d A_{orf}\sqrt{\frac{2}{\rho}(K_{op}V_{op} - K_{ap}V_{ap})} - \frac{A_{av}}{M_{av}}p_{av} \cdots\cdots(4)$$

$$\dot{p}_{mv} = A_{mv}K_{pp}V_{pp} - \frac{R_{mv}}{M_{mv}}p_{mv} - K_s X_s \cdots\cdots(5)$$

$$\dot{X}_s = \frac{1}{M_{mv}}p_{mv} + \frac{1}{M_{av}}p_{av} \cdots\cdots(6)$$

$$\dot{p}_{av} = A_{av}K_{ap}V_{ap} - \frac{R_{av}}{M_{av}}p_{av} - K_s X_s \cdots\cdots(7)$$

Table. 1 Parameters

Symbols	Description
S_e	supply pressure
R_{ip}	resistance of inlet passage
K_{cp}	bulk stiffness of clutch passage
$\dot{V}_{cp}$	flow rate of clutch passage
R_{tp}	resistance of thin passage in modulation valve
K_{pp}	bulk stiffness of pilot passage
$\dot{V}_{pp}$	flow rate of pilot passage
TF	transformer
$\dot{p}_{mv}$	momentum of modulation valve
M_{mv}	mass of modulation valve
X_{mv}	displacement of modulation valve
K_s	stiffness of spring
X_s	displacement of spring
K_{op}	resistance of outlet passage
$\dot{V}_{op}$	flow rate of outlet passage
R_{orf}	resistance of orifice
K_{ap}	bulk stiffness of accumulator passage
$\dot{V}_{ap}$	flow rate of accumulator passage
p_{av}	momentum of accumulator valve
M_{av}	mass of accumulator valve
X_{av}	displacement of accumulator valve

4. 해석 결과 및 검토

식(1)~(7)의 7개의 독립변수에 대한 상태방정식을 바탕으로 상용화된 Matlab Simulink를 이용하여 PTO 밸브에 대한 해석을 수행하였다. 즉, 일정한 압력으로 밸브를 동작시킬 만큼 큰 압력이 PTO 밸브의 인렛 패시지에 가해질 때 아웃렛 패시지에서 출력된 압력을 측정하였고, 시뮬레이션 작동 시간에 대한 모듈레이션 밸브의 변위와 스프링의 변위를 확인하였다.

Fig. 5 는 시간에 따른 모듈레이션 밸브의 변위를 보여준다. 즉, Fig. 5에서 알 수 있듯이 PTO 밸브의 클러치 패시지에 압력이 가해지게 되면 모듈레이션 밸브가 이동하게 되어 인렛 패시지의 유체 입구 단면적이 줄어들게 된다. 따라서 순간적으로 높은 압력이 PTO 클러치에 가해지는 것을 방지하게 된다. 한편, PTO 밸브 내의 스프링과 두 개의 밸브(모듈레이션 밸브 및 어큐뮬레이터 밸브)의 움직임에 따라 지속적으로 개폐를 반복하고 일정 시간 후의 완전 개방에 의해 PTO 클러치로 전달되는 압력이 점차적으로 증가하게 된다(Fig. 6).

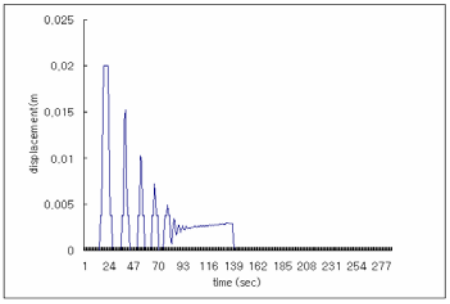

Fig. 5 The displacement of modulation valve.

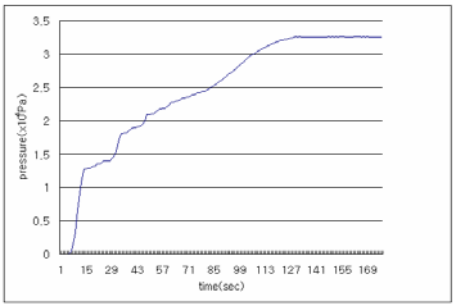

Fig. 6 The Pressure of outlet passage.

5. 결론

본 연구에서는 트랙터용 전자 유압식 PTO 밸브를 본드그래프를 이용하여 모델링하여 상태방정식을 구하고 상용화된 Matlab Simulink를 이용하여 PTO밸브에 대한 동적 거동 특성의 해석을 수행하였다. 밸브 설계에 있어서 중요한 상태변수의 변화에 따른 결과를 얻어낼 수 있는 중요한 기초자료가 된다고 생각된다. 현재, 다양한 상태변수들의 변화에 대한 밸브의 거동 해석이 연구되고 있다.

후기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. K. Dasgupta, R. Karmaker,"Dynamic analysis of pilot operated pressure relief valve", Simulation Modeling Practice and Theory, Vol. 10, pp35-49, 2002.
2. K. Dasgupta, R. Karmaker, "Modeling and dynamics of single-stage pressure relief valve with directional damping", Simulation Modeling Pratice and Tehory, Vol. 10, pp51-67, 2002
3. K. Dasgupta, R. Karmaker, "Dynamic analysis of proportional solenoid controlled piloted relief valve by bondgraph", Simulation Modeling Pratice and Tehory, Vol. 13, pp21-38, 2005
4. Dean C. Karnopp, Donald L. Margolis, Ronald C. Rosenberg, "System dynamics", JOHN WILEY & SONS, INC.