

압전유압펌프가 적용된 브레이크 회로의 가감압 특성을 이용한 압력 제어

황용하¹ · 황재혁^{1†} · 배재성¹ · 권준용²¹한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과²국방과학연구소 제7기술연구본부

Pressure Control of Brake Circuit with Piezoelectric-hydraulic Pump Using Pressurization/Depressurization Characteristics

Yong-Ha Hwang¹, Jai-Hyuk Hwang^{1†}, Jae-Sung Bae¹, Jun-Yong Kwon²¹Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University²The 7th Research and Development Institute, Agency for Defense Development

Abstract

In this paper, an equivalent brake hydraulic circuit with a piezoelectric hydraulic pump was constructed, and load pressure control for better pressurization/depressurization characteristics was conducted. To understand pressurization/depressurization characteristics of the equivalent hydraulic circuit, the relation between the load pressure and the input voltage was revealed experimentally. Experiments were also conducted to observe effect of the solenoid valve on depressurization characteristics. In the pressurization experiment, it was validated that transient response time required to achieve desired load pressure may be reduced through voltage control to change pressurization gradient. By applying the valve on/off time control and voltage control, it was also possible to reduce response time in the depressurization process. Therefore, transient response time may be improved within 10ms for pressurization and within 30 ms for depressurization using the control technique suggested in this study. The load pressure control method proposed in this study is useful for controlling load pressure of a hydraulic brake system with the piezoelectric hydraulic pump.

초 록

본 논문에서는 압전유압펌프가 적용된 브레이크 등가 유압회로를 구성하고, 유압회로의 가감압 특성 실험 및 부하압 제어에 대한 연구를 수행하였다. 유압회로의 가감압 특성을 파악하기 위해 펌프 입력 전압에 따른 부하압 형성 실험을 수행하였고, 솔레노이드 밸브 특성이 감압에 미치는 효과를 파악하는 실험을 수행하였다. 가압 특성 실험을 통해 유압회로의 부하압 상승에 필요한 과도응답시간은 압력상승 구배를 조절하는 전압제어를 적용하여 개선할 수 있음을 확인하였고, 감압시는 솔레노이드 밸브 특성을 활용한 밸브 개폐시간 제어와 전압제어를 통해 과도응답시간 개선이 가능함을 확인하였다. 본 연구에서 개발된 제어기법을 적용하여 부하압 제어실험을 수행한 결과, 가압의 경우 10ms 이내로, 감압의 경우 30ms 이내로 과도응답시간을 개선할 수 있었다. 본 연구에서 제안된 부하압 제어기법은 압전유압펌프가 적용된 유압 브레이크 회로의 부하압을 제어하는데 매우 유용할 것으로 판단된다.

Key Words : Pressurization(가압), Depressurization(감압), Voltage control(전압제어), Valve on/off control(밸브 제어)

1. 서 론

항공기의 브레이크 시스템에는 복잡한 유압 구성품이 요구된다. 이러한 유압 구성품을 무인항공기에 그대로 적용하기에는 공간 제약, 중량 제약 및 시스템의 복잡성으로 인한 어려움이 따르므로 무인항공기에 적용할 수 있는 소형화된 유압 브레이크 시스템의 개발

이 필요하다[1-4]. 무인기 브레이크 시스템의 특성상 무게와 부피는 작으면서도 고효율의 에너지 변환이 가능한 구동기의 선택이 중요하다. 이러한 역할에 가장 잘 어울리는 구동기는 현재 활발하게 연구되고 있는 지능재료중의 하나인 압전세라믹(PZT)이다[4-7].

본 연구자들은 선행연구를 통해 중소형 무인기 브레이크 시스템에 적용 가능한 압전유압펌프를 설계/제작하여 펌프 특성을 실험 및 해석적으로 검증하였다[8-10]. 제작된 압전유압펌프를 무인기 유압 브레이크 시스템에 효율적으로 활용하기 위해서 펌프에 의해 형성되는 부하압력을 자유롭게 제어할 수 있어야 한다. 브레이크 시스템이 ABS 기능을 수행하기 위해서는 초당 약 10회 정도 적정압으로 가압/감압을 할 수 있어야 한다[13-15]. 압전유압펌프의 부하압은 펌프 내에서 형성된 챔버압력의 일부를 체크밸브를 통해 전달함으로써 형성된다. 따라서 부하압의 형성은 챔버압력의 형성과 체크밸브의 동작에 크게 의존한다.

일차적으로 압전유압펌프 챔버압의 형성은 작동기인 압전세라믹의 기계적인 변위로 인해 발생한 에너지가 유압 에너지로 전달되는 과정에서 이루어진다. 작동기의 변위 및 발생 에너지는 가진 주파수 및 입력전압에 영향을 받으므로, 펌프의 챔버압 형성에는 구동주파수와 입력전압이 변수로 작용한다. 본 연구에서는 가장 우수한 성능을 내는 구동주파수를 일정한 값으로 고정하고[8], 입력전압을 조절하여 챔버압을 결정하는데 활용하였다. 챔버압에 의해 형성된 부하압과 전압의 관계식은 가감압 실험시의 명령값으로 사용하였다. 또한 부하압 형성에서 중요한 부품은 유량을 단일 방향으로 토출해주며 압전세라믹의 고속 동작 조건에서도 작동이 가능한 체크밸브이다[9]. 본 연구에서는 판 스프링 타입의 체크밸브를 사용하였으며 자세한 형태 및 특성은 기 발표한 연구결과에 상세히 기술하였다[11-12].

압전유압펌프의 부하압 제어를 위해, 제작된 등가 브레이크 유압회로의 가압 및 감압과정에서 압력이 형성되는 특성을 실험을 통해 분석하였다. 실험을 통해 얻어진 유압회로의 가감압 특성을 활용하여 부하압 제어기법을 구현하였다. 가압제어의 경우 부하압이 명령값을 추종하도록 입력전압을 제어하면 가능하나, 감압제어의 경우는 전압변화로 부하에 형성된 압력을 낮출

수 없으므로 유로 솔레노이드 밸브를 개폐하는 밸브 제어기법을 추가로 적용하였다. 솔레노이드 밸브는 개폐를 결정하는 전기 신호가 작용하더라도 일정한 반응시간을 필요로 하므로, 솔레노이드 밸브의 반응시간을 적절히 활용하는 부하압 감압 제어기법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 브레이크 유압회로의 가감압 특성을 적절히 고려한 부하압 제어기법을 제안하였다.

2. 압전유압펌프의 부하압 제어 실험구성

2.1 압전유압펌프의 구성품 및 실험장치

선행연구에서 제작된 압전유압펌프의 구성품 및 등가 브레이크 유압회로 실험장치를 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다[9].

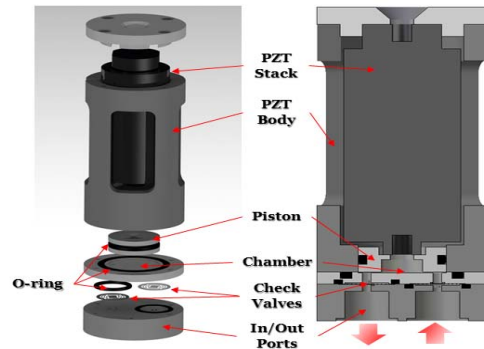


Fig. 1 Components of piezoelectric-hydraulic pump

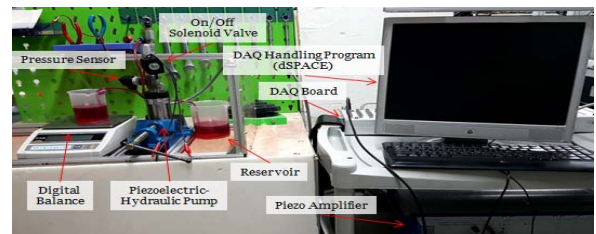


Fig. 2 Experimental setup for performance test of piezoelectric-hydraulic pump

Fig. 1의 펌프 구성품에서 일반 부품의 경우 정밀 기계가공을 활용해 제작하였으며, 체크밸브의 경우 복잡한 형상 및 작은 치수로 인해 와이어컷 방전가공을 활용하여 제작하였다. 압력형성에 중요한 역할을 하는 압전작동기의 경우, PI사의 PI-225.40을 사용하였다. 부품의 교체를 용이하게 하기 위해 모든 부품을 모듈화 시켜 제작하였다[9].

브레이크 유압회로의 가감압 특성실험을 위한 실험장치 구성은 압전유압펌프, DAQ를 위한 dSPACE, 솔레노이드 밸브, 고전압 앰프, 디지털 저울 및 압력 센서로 구성되어 있다. dSPACE의 경우 아날로그 및 디지털 신호의 수집, 생성과 DAQ board를 통한 신호의 변환이 가능하다. 솔레노이드 밸브는 전기적 신호를 받아 유압회로의 개폐를 담당하고 있다. 솔레노이드 밸브가 닫히면 유압회로가 폐루프가 되면서 유량이 부하로 밀고 들어가 부하에 압력을 형성시킨다. 형성된 부하압은 부하회로에 장착된 압력센서를 통해 측정하게 된다. 솔레노이드 밸브를 개방할 경우, 유압회로는 개루프가 되고 유량이 빠져 나가면서 압력이 떨어지게 된다. 고전압앰프는 압전유압펌프에 사용된 압전구동기에 공급되는 전기신호를 증폭시키는 역할을 한다. 본 실험에서 사용된 고전압앰프는 실험조건인 120Hz에서 고전압 출력이 나올 수 있는 PI회사의 'E-481' 모델을 사용하였다. 유압유는 항공기 브레이크 유압계통에 널리 쓰이는 MIL-H-83282를 사용하였다[8,9].

2.2 부하압 형성원리

압전유압펌프에 사용된 압전구동기는 고전압앰프에 의해 증폭된 전기신호를 입력받아 가진된다. 펌프 구성품인 피스톤은 압전구동기의 가진력에 의해 기계적인 변위를 발생시키며, 이로 인해 발생한 기계적 에너지는 챔버 내의 유압유로 전달된다. 따라서 챔버 내에 형성되는 압력은 압전구동기의 가진력 및 피스톤의 면적에 의해 결정된다. 챔버압에 의해 부하 방향의 유량이 발생하며, 솔레노이드 밸브가 닫혀 폐루프가 형성되면 유압유는 챔버의 압력에 의해 부하쪽에 압력을 형성하게 된다. 부하압의 형성에는 챔버압 및 챔버쪽 유로와 부하 사이에 장착된 체크밸브의 영향을 받는다. 실험에 사용된 체크밸브의 형상 및 단면의 모습을 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다.

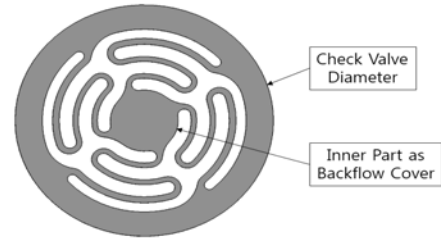


Fig. 3 Sheet-spring type check valve

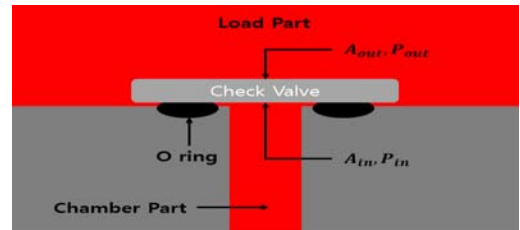


Fig. 4 Sectional view of outlet check valve

챔버와 부하 사이에 연결된 유로와 체크밸브의 단면 형상은 Fig. 4와 같다. 즉, 챔버압은 단면적 A_{in} 에 P_{in} 의 크기로 작용하며, 부하에 형성된 압력은 단면적 A_{out} 에 P_{out} 의 크기로 작용한다. A_{in} 은 챔버와 연결된 유로의 단면적과 같으며, A_{out} 은 체크밸브 역류방지용 덮개의 넓이와 같다. 부하압이 작용하는 체크밸브의 면적은 챔버압이 작용하는 면적의 약 2.89배로, 부하에서 형성되는 압력은 챔버압보다 2.89배 작아지게 된다. 이를 식 (1)에 나타내었다.

$$\frac{P_{in}}{P_{out}} = \frac{A_{out}}{A_{in}} = 2.89 \quad (1)$$

3. 실험을 통한 가/감압 특성 분석

3.1 솔레노이드 밸브 특성

부하압이 형성되기 위해서는 부하 유압회로의 솔레노이드 밸브를 닫아 유압회로의 폐루프를 형성한 후, 압전구동기의 가진에 의해 챔버에서 부하 방향으로 가압된 유동을 발생시켜야 한다. 부하쪽 유체의 압축공간에 해당되는 일정량의 유량공급이 이루어지면 체크밸브의 역류방지로 인해 가압 유압유는 부하에 압력을 형성하게 된다. 솔레노이드 밸브는 전압 입력이 없으

면 유로를 막아 페루프를 형성하고, 5V의 전압 입력 시 유로를 막는 밸브를 개방하여 페루프에서 형성된 압력을 떨어뜨린다. 따라서 부하의 감압은 밸브를 이용한 밸브제어 기법이 사용되었다. 밸브제어 시 밸브의 반응시간은 압력 응답시간에 영향을 미친다. 밸브 성능실험을 통해, 밸브 반응시간이 제작사 제원과 일치하는지 확인하였다. 또한, 밸브를 열고 닫는 신호를 연속적으로 주었을 때, 서로 다른 신호를 구분할 수 있는 최소 시간간격도 실험을 통해 확인 하였다.

Table 1 Specification of solenoid valve

Solenoid Valve	
Model	STH12C182T2S
Max. Pressure	1450 (psi)
Response	25ms (Open)
	20ms (Close)
Operation	Normally Closed

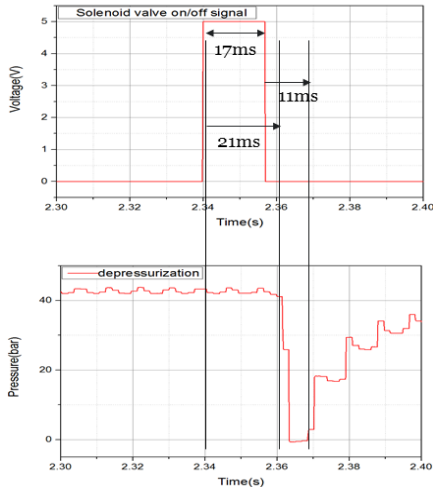


Fig. 5 Characteristics test of the solenoid valve

Table 1은 솔레노이드 밸브 제작사의 제원을 나타낸 것이며, Fig. 5는 솔레노이드 밸브에 개폐 신호를 연속적으로 주었을 때의 솔레노이드 밸브 성능 실험결과이다. 솔레노이드 밸브를 닫아 유압회로에 페루프를 형성한 후 압전구동기 가진에 의해 부하압이 형성되어 있을 때, 밸브를 열면 부하에 형성된 압력이 떨어지고 밸브가 닫히면 재가압이 된다. 따라서 밸브를 여는 신호를 주고 감압이 시작되기까지 걸리는 시간, 밸브를

닫는 신호를 주고 가압이 시작되기까지 걸리는 시간을 각각 개폐 반응시간으로 할 수 있다. 또한 개폐신호를 연속적으로 주고 감압과 가압이 제대로 이루어질 경우 개폐반응 최소 구분시간을 측정할 수 있다. 실험결과, 개폐 반응시간은 각각 21ms, 11ms로 제작사의 제원보다 빠른 반응시간을 보였고, 신호의 구분은 최소 17ms까지 가능하였으며 이를 Fig. 5에 나타내었다. 17ms이하의 시간간격으로 개폐신호를 연속 입력할 경우, 밸브는 신호를 구분하지 못하고 감압이 이루어지지 않는다. 개폐반응 최소 구분시간이 빠른 이유는 연속적인 개폐신호에 의한 솔레노이드 밸브 자체의 관성 때문으로 판단된다. 솔레노이드 밸브 성능실험 결과를 부하 압력제어에 적용하였다.

3.2 부하압-입력전압(P-V) 선도

솔레노이드 밸브를 닫아 부하 유압회로를 페루프로 만든 후, 압전구동기의 가진에 의해 챔버의 유량이 부하쪽으로 흐르면 부하압이 형성된다. 부하압은 부하 유압회로에 설치된 압력센서에 의하여 측정된다. 압전구동기 입력전압에 따른 부하압 형성 실험결과를 Fig. 6에 나타내었다.

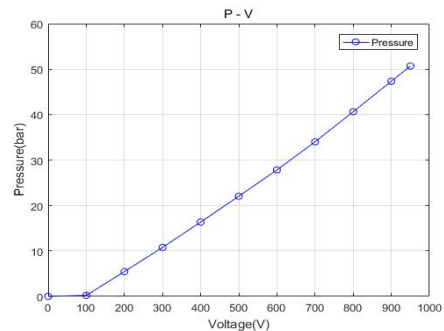


Fig. 6 Experiment results of the relation between the load pressure and the input voltage

실험을 통해 얻어진 입력전압과 부하압의 관계는 100V 이하의 저전압을 제외한 대부분이 선형적 관계를 보여주고 있다. 입력전압은 압전구동기의 가진력에 비례하고[8], 압전구동기의 가진력에 의해 형성된 챔버압은 부하 방향으로 유량을 발생시킨다. 100V이하의 저전압에서는 챔버에서 부하 방향의 유량공급이 충

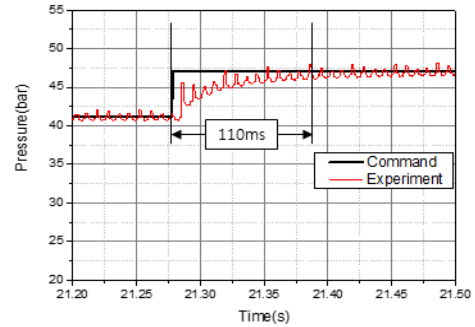
분하지 않아 압력이 거의 형성되지 않는다. 입력전압과 부하압의 관계식을 도출하기 위해 실험 데이터를 이용하여 식 (2)를 유도하였다. 커브피팅된 식은 가감압 실험 시 명령값으로 사용하였다. 실험 시 구동주파수는 압력형성에 가장 뛰어난 성능을 보였던 120Hz로 유지하였다[8].

$$P(V) = 0.06V - 6.86 \quad (2)$$

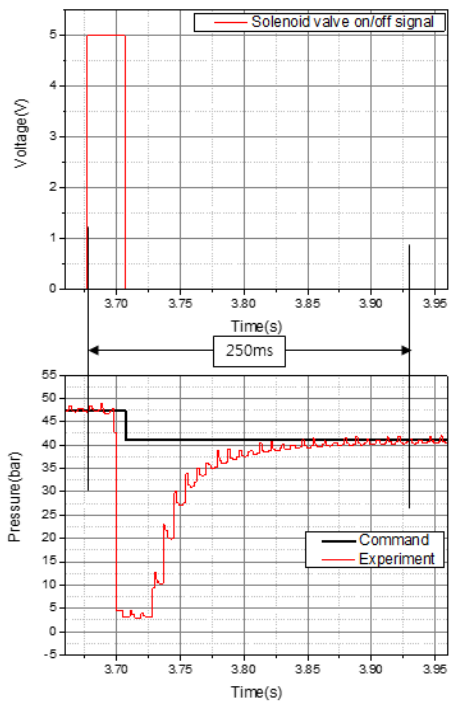
Fig. 6의 부하 압력은 전압을 압전구동기에 인가한 후, 압전구동기의 가진력에 의해 발생한 유량이 부하에 압력을 형성하여 정상상태에 도달하였을 때 측정된 압력이다. 따라서, 입력전압을 변화시켜 부하압을 조절할 때 어떤 형태의 제어기법을 적용할 것인가를 결정하기 위해 압전유압펌프를 포함한 유압회로의 가감압 특성을 실험적으로 확인한 후 이 특성을 활용하여 부하압 제어기법을 개발하였다.

3.3 가감압 특성 실험

가감압 특성 실험의 목적은 압전유압펌프 유압회로의 가감압 특성을 파악하여 부하압 제어기법에 적용하고자 함이다. 가감압 특성을 파악하기 위해 가압실험의 경우에는 전절에서 얻어진 입력전압-부하압 관계식을 이용하여 원하는 부하압을 얻기 위한 입력전압을 구한 후 그 입력전압을 압전구동기에 인가하면 가압이 되는 과정을 파악할 수 있다. 감압실험의 경우, 밸브개방을 통하여 압력을 떨어뜨린 후, 다시 밸브를 닫아 가압하는 과정으로 이루어진다. 감압 이후 재가압이라는 과정 및 밸브 반응시간의 추가로 인하여 감압시 과도 응답 시간은 가압실험시의 과도응답 시간보다 길어지게 된다. 가압 및 감압과정의 특성을 파악하기 위하여, 가압실험의 경우 입력전압을 800V(41.1기압)에서 900V(47.1 기압)으로 갑자기 변경하였고, 또 감압실험의 경우 900V(47.1 기압)에서 800V(41.1 기압)으로 갑자기 변경하여 실험을 수행하였다. 이러한 실험에서 얻어진 결과를 통해, 부하압이 명령값을 적절하게 추종하는지를 알아보았다. 가압 및 감압 특성실험결과를 각각 Fig. 7(a), (b)에 나타내었다.



(a) pressurization experiment



(b) depressurization experiment

Fig. 7 Pressurization/depressurization characteristics of brake hydraulic circuit

실험결과, 가압이 이루어지기까지 약 110ms의 과도 응답시간이 소요된다는 것을 확인할 수 있다. 감압과정의 경우, 과도응답시간이 약 250ms 소요된다. 밸브를 열었을 때, 압력이 명령값이 아닌 0bar까지 떨어지는 것을 확인할 수 있는데, Fig. 5에서 밸브가 열리고 0bar까지의 감압시간이 전기신호를 구분하여 개폐되는 시간간격보다 짧기 때문이다. 과도응답시간이 길어지면 1초에 최소 10 회 이상 가감압이 이루어져야 하는

ABS 기능 수행에 영향을 미치므로[13-15], 이러한 과도응답시간 지연을 정상적인 기능 수행이 가능한 수준으로 줄여야 한다.

4. 가감압 특성을 이용한 압력제어

가감압 제어를 위해 Matlab 시뮬링크 회로를 구성하였고, Fig. 8에 나타내었다.

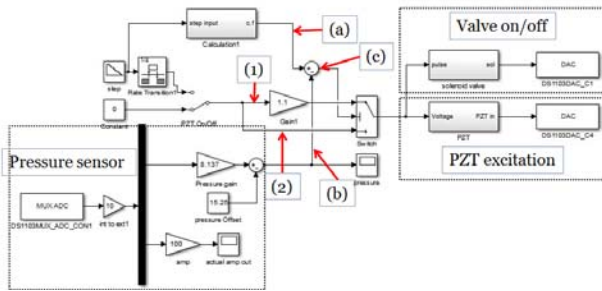
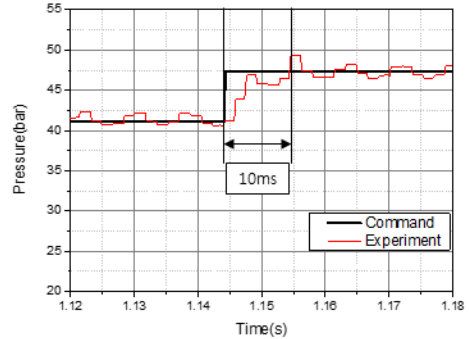
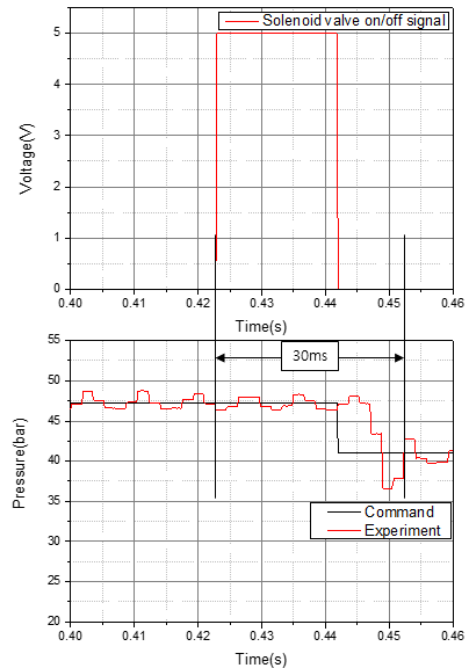


Fig. 8 Simulink logic for pressure control

시뮬링크 회로는 압력센서가 압력을 측정하는 부분, 밸브가 개폐신호를 받아 개폐 명령을 수행하는 부분, 입력전압에 의해 압전구동기를 가진시키는 부분으로 구성된다. Fig. 8에서 회로 (a)는 명령값을 나타내며, (b)는 압력센서에 의해 측정된 부하압을 나타낸다. 명령값과 부하압의 차를 합점 (c)에서 구한다. 차이 값이 일정 수치 이상일 경우, 즉 실험값이 명령값에 일정값 이내로 추종하지 않을 경우, 시뮬링크 논리의 흐름은 Fig. 8의 방향 (1)로 흐르게 되고, 전압에 이득값이 곱해져서 입력된다. 이득값에 의해 입력전압이 높아질 경우, 과도구간에서 부하 압력의 상승 구배가 높아진다. 이를 통해 과도응답시간을 줄일 수 있다. 실험값이 명령값에 일정수치 이내로 추종할 경우, 시뮬링크 논리는 방향 (2)로 흐르고, 이득값이 곱해지지 않은 전압이 입력된다. 즉 부하압이 명령값을 주어진 오차 범위 이내로 추종 하는지의 여부에 따라 이 절에서 기술한 조건에 의해 지속적으로 이득값을 변화시켜 줌으로써



(a) pressurization control



(b) depressurization control

Fig. 9 Pressurization/depressurization performance after adopting pressure control

압력의 상승구배를 올려 과도응답시간을 줄이고, 명령값의 일정범위 이내로 추종하게 만든다. 감압제어의 경우에도 밸브를 열어 압력을 급격히 떨어뜨린 후, 가압제어에 사용된 전압제어 기법을 이용하여 과도응답시간을 개선하였다. 밸브를 열어 감압을 하는 경우 밸브 동특성을 고려한 밸브제어기법을 적용하였다. 가압 및 감압제어 실험결과를 Fig. 9에 나타내었다. 가압제어의 경우, 과도응답시간이 약 110ms에서 10ms로 단

측되었다는 것을 확인할 수 있다. 정상상태에 도달하면, 일정값 이내에서 실험값이 명령값을 적절하게 추종한다는 것을 확인할 수 있다. 감압제어의 경우, 과도응답시간이 약 250ms에서 30ms로 단축되었다. 또한 전압 제어에 의해 일정범위 이내에서 명령값을 적절하게 추종함을 알 수 있다. 과도응답시간의 단축은 솔레노이드 밸브 성능 실험으로 얻어진 개폐 구분이 가능한 최소시간을 적용하였고, 가압제어에 사용된 전압제어를 적용함으로써 이루어졌다. 1초안에 10회의 가감압이 이루어짐을 실험을 통하여 확인하였고, Fig. 10에 나타내었다.

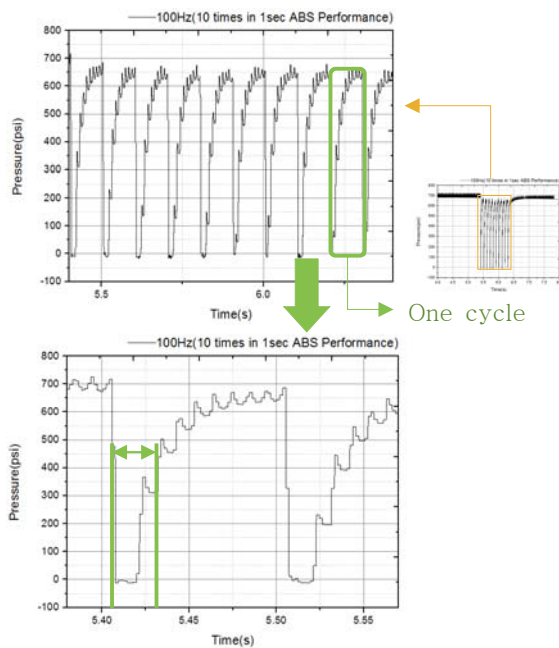


Fig. 10 ABS performance test

5. 결론

본 논문에서는 선형연구에서 제작된 압전유압펌프를 등가 브레이크 유압회로에 적용한 후, 펌프의 가감압 특성실험 및 부하 압력제어를 위한 연구를 수행하였다. 압력형성에 중요한 역할을 하는 구동주파수는 압력형성에 가장 뛰어난 성능을 보였던 120Hz로 유지하고, 전압의 변화에 따른 부하압 형성 실험을 수행하였다. 실험값을 이용하여 전압과 부하압의 1차 관계식을 구하였고, 이 관계식에서 얻어진 전압을 부하압에 대

한 명령값으로 선정하였다. 가감압 특성실험 결과, 가압시 부하압 형성에 시간지연이 발생하였고, 특히 감압시 밸브개폐에 따른 시간지연은 가압때 보다 심하여 과도응답 시간을 줄이는 제어기법을 제안하였다. 따라서 가압시 조건에 따라 입력전압을 변화시키는 전압제어를 수행하였다. 전압제어기법에서는 가압초기 압력 상승구배가 증가되도록 조절하였고 가압완료시 압력 상승구배를 완만하게 하여 과도응답시간을 최소화하였다. 감압제어에는 부하 유압회로의 페루프에 형성된 압력을 떨어뜨리기 위해 밸브제어를 먼저 수행하고 이어서 전압제어를 통해 감압과정이 완료되도록 설계하였다. 밸브제어에는 솔레노이드 밸브 성능실험을 통해 개폐 전기신호를 구분할 수 있는 최소 시간간격을 알아내어 제어실험에 적용하였다.

본 연구에서 개발된 제어기법을 적용하여 부하압 제어실험을 수행한 결과, 가압의 경우 약 110ms에서 10ms로, 감압의 경우 약 250ms에서 30ms로 과도응답 시간을 개선할 수 있었다. 브레이크 시스템의 ABS 기능이 1초에 최소 10회 이상이라는 것을 감안할 때, 제어결과가 해당 펌프를 이용하여 ABS 기능을 적용하는데 적절할 것이라고 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구 연구비 지원(ADD-IBR-227)에 의해 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

- [1] Hsiao-Kan Ma, Bo-Ren Hou, Haiyuan Wu, Chin-Yuan Lin, Jing-Jhe Gao, Ming-Chien Kou, "Development and application of a diaphragm micro-pump with piezoelectric devices," *Journal of Microsystem Technologies*, Vol. 14, No. 7, 2008, pp. 1001~1007.
- [2] Junwu Kan, Zhigang Yang, Taijiang Peng, Guangming Cheng, Boda Wu, "Design and test of a high-performance piezoelectric micropump for

- drug delivery,” *Journal of Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 121, No. 1, 2005, pp.156~161.
- [3] John P Larson, Marcelo J Dapino, “Reliable, high-frequency miniature valves for smart material electrohydraulic actuators,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23, No. 7, 2012, pp.805~813.
- [4] Youngbog Ham, Sungjin. Oh, Woosuk Seo, Jungho Park, Sonam Yun, “A Piezoelectric Micropump for Microscale Pumping Systems,” *Journal of Drive and Control*, Vol. 36, No. 2, 2009, pp.17~25.
- [5] Daniel J. Laser, Juan G. Santiago, “A Review of Micropumps,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 14, No. 6, 2004, pp.35~64.
- [6] Brian D. Iverson, Suresh V. Garimella, “Recent Advances in Microscale Pumping Technologies: a Review and Evaluation,” *Journal of Microfluidics and Nanofluidics*, Vol. 5, No. 2, 2008, pp.145~174.
- [7] Anirban Chaudhuri, Norman Wereley, “Compact hybrid electrohydraulic actuators using smart materials : A review,” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23, No. 6, 2012, pp.597~634.
- [8] Yonghwi Joo, Jaihyuk Hwang, Jiyoun Yang, Jaesung Bae, Junyong Kwon, “On the performance test of the Piezoelectric-Hydraulic Pump,” *J. of The Korea Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 43, No.9, 2015, pp.706~711.
- [9] Minji Jeong, Jaihyuk Hwang, Jaesung Bae, Junyong Kwon, “On the Pressurization Characteristics of Small Piezoelectric Hydraulic Pump for Brake System,” *J. of The Korea Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 43, No.11, 2015, pp. 963~970.
- [10] Jonghoon Lee, Jaihyuk Hwang, Jiyoun Yang, Yonghwi Joo, Jaesung Bae, Junyong Kwon, “Design of the Compound Smart Material Pump for Brake System of Small-Medium Size UAV,” *Journal of The Society for Aerospace System Engineering*, Vol. 9, No. 3, 2015, pp.1~7.
- [11] Yonghwi Joo, Jaihyuk Hwang, Jaesung Bae, Jiyoun Yang, Junyong Kwon, “The Design on the spring Sheet type check valve of smart material hydraulic pump,” *The Society for Aerospace System Engineering, Fall Conference Paper #85*, 2014.
- [12] Jaihyuk Hwang, Jonghoon Lee, Jaeup Hwang, Jaesung Bae, Junyong Kwon, “Conceptual Design of Compound Smart Material Pump with Sequential Operation of Fluid Displacement-Force,” *The Society for Aerospace System Engineering, Spring Conference Paper #95*, 2014.
- [13] Tur, Okan, Ozgur Ustun, and R. Nejat Tuncay. "An introduction to regenerative braking of electric vehicles as anti-lock braking system." *Intelligent Vehicles Symposium, 2007 IEEE*. IEEE, 2007. pp. 944-948.
- [14] Jansen, Sven TH, Peter WA Zegelaar, and Hans B. Pacejka. "The influence of in-plane tyre dynamics on ABS braking of a quarter vehicle model." *Vehicle System Dynamics* Vol. 32, No. 2, 1999, pp.249-261.
- [15] Ehsani Mehrdad, "Modern Electric Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals Theory and Design," CRC Press, December 2004, ISBN 0849331544, pp. 102-108.