

볼-박판 스프링 형 체크밸브가 적용된 압전유압펌프의 가압 특성

황용하¹ · 황재혁^{2,†} · 배재성²¹한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Pressurization Characteristics of Piezoelectric-Hydraulic Pump Adopting a Ball-Thin Plate Spring Type Check Valve

Yong-Ha Hwang¹, Jai-Hyuk Hwang² and Jae-Sung Bae²¹Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Graduate School at KAU²Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract

In this study, a new check valve was studied to improve the load pressure of a brake system with a small piezoelectric-hydraulic pump. During the pressurization process, the steady-state pressure at the load is affected by the ratio of the cross-sectional area of the check valve the chamber pressure and load pressure. Since the flow path cover of the check valve is made wider than the cross-sectional area of the output flow to prevent backflow, a method of reducing the area ratio is proposed for a higher load pressure by mounting an additional mass to a thin plate spring type check valve. To identify the effect of mounting an additional mass to the existing check valve on the load pressure, a simple brake system with a small piezoelectric-hydraulic pump was modeled using a commercial code AMESim. The AMESim modeling was verified by comparing the simulation results with the experimental results of the pump the existing check valve. The additional mass was added to the verified AMESim modeling and higher load pressure was able to be obtained through simulation. The 35% performance improvement in load pressure identified by carrying out pressurization test of the brake system after adopting the new check valve the small piezoelectric-hydraulic pump.

초 록

본 연구에서는 소형 압전유압펌프가 적용된 브레이크 시스템의 부하압 개선을 위해 체크밸브에 대한 연구를 수행하였다. 가압 과정에서 부하의 정상상태 압력은 챔버압과 부하압이 체크밸브에 작용하는 단면적 비에 영향을 받는다. 체크밸브 유로 덮개는 역류 방지를 위해 유로의 단면적보다 넓게 제작되었기 때문에 단면적 비 조절을 위해 박판 스프링 형 체크밸브에 부가질량을 부착하는 방식을 제안하였다. 부가질량 부착에 의한 부하압 개선 효과를 확인하기 위해 상용코드를 이용하여 소형 압전유압펌프가 적용된 단순 브레이크 시스템의 모델링을 수행하였다. 모델링의 검증을 위해 부가질량이 부착되지 않은 박판 스프링 형 체크밸브를 적용한 펌프의 가압 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. 검증된 아메심 모델링에 부가질량을 추가하였고 시뮬레이션을 통해 단면적 비 조절에 의한 고 부하압 형성 효과를 확인하였다. 부가질량 추가에 따른 소형 압전유압펌프 구성품을 새롭게 설계/제작한 후 브레이크 시스템의 가압 성능 실험을 수행하여 부하압 35%의 성능 개선을 확인하였다.

Key Words : Ball-Thin Plate Spring Type Check Valve(볼-박판 스프링 형 체크밸브), Additional Mass(부가질량), Brake System(브레이크 시스템), Piezoelectric-Hydraulic Pump(압전유압펌프)

1. 서 론

중소형 무인항공기는 무게와 공간상의 제약으로 인해 기존의 대형 항공기에 사용되었던 유압 브레이크 시스템을 그대로 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 중소형 무인기에 적용 가능한 소형 유압 브레이크 시

시스템의 개발이 필요하다[1-4]. 브레이크 시스템의 다양한 구성품 중 펌프는 브레이크 시스템의 무게와 부피에 결정적인 영향을 미친다. 지난 수십년 간 압전세라믹(PZT), 이온폴리머 등의 스마트재료와 그의 활용에 대한 많은 연구개발이 이루어져 왔다[1-2,4-5]. 이러한 스마트재료 작동기(smart material actuator)에 대한 연구는 기존의 작동기에 비해 소형화가 가능하여 초소형 압력센서, 가속도 센서와 같은 초소형 기계부품에 매우 유용하며 마이크로 펌프에도 적용되고 있다. 이 중 중소형 무인항공기의 유압 브레이크 시스템에 적용하기 위해서는 작은 변위로 큰 배압을 만들어 낼 수 있는 압전세라믹이 가장 적절하다[4-7]. 이에 압전작동기가 적용된 소형 압전유압펌프를 설계/제작하였다[8]. 압전작동기에 의해 가압된 유압유를 부하로 토출시켜 부하쪽 폐회로에서 브레이크 동작을 위한 배압을 만들어내기 위해서는 역류 방지를 위한 체크밸브를 적용해야 한다. 본 연구팀은 압전작동기의 고속 동작을 고려하여 펌프가 발생시키는 적은 유량을 단일 방향으로 효과적으로 토출할 수 있는 박판 스프링 형 체크밸브(thin-plate spring type)를 설계/제작하였고, 이를 압전유압펌프에 적용하였다[8-10].

브레이크 작동압력은 정적압력과 동적압력으로 구분하여 두 개의 압력 중 큰 값을 요구 브레이크 압력으로 설정하였다[11,12]. 이 때, 이륙포기 제동시의 운동에너지를 고려하여 목표 브레이크 압력을 정하였다. 본 논문에서는 제작된 소형 압전유압펌프를 이용하여 정상상태 부하압력의 개선을 위해 체크밸브에 대한 연구를 수행하였다. 솔레노이드 밸브를 닫아 부하에 폐회로가 형성되면 체크밸브는 압전작동기에 의해 가압된 유압유를 부하로 전달하며, 부하압 유지를 위해 역류에 의한 누수를 방지하는 역할을 한다. 챔버압과 부하압이 체크밸브에 작용하는 단면적 비가 부하압 형성의 중요한 인자임을 고려할 때, 기존의 박판 스프링 형 체크밸브의 부하쪽 면적은 챔버 유로의 넓이보다 넓게 제작되어 있어 챔버압을 부하로 전달하는데 비효과적이다[13,14]. 따라서 챔버압이 부하압으로 전달되는 비율 개선을 위해 체크밸브에 부가질량을 부착하여 각 압력이 작용하는 단면적 비가 개선된 새로운 체크밸브를 고안하였다.

새로운 체크밸브에 의한 정상상태 부하압 개선 효과

확인을 위해, 소형 압전유압펌프가 적용된 단순 브레이크 시스템의 모델링을 수행하였다. 먼저 부가질량이 부착되지 않은 박판 스프링 형 체크밸브를 적용하여 가압 실험결과와 시뮬레이션 결과를 얻고 모델링을 검증하였다. 검증된 브레이크 시스템의 모델링에 부가질량을 갖는 새로운 체크밸브를 추가적으로 모델링하였고 가압 시뮬레이션을 통해 새로운 체크밸브에 의한 부하압 개선 여부를 확인하였다. 부가질량 추가로 인해 압전유압펌프의 메탈링, 조립형 시트 등의 추가적인 펌프 구성품을 설계/제작하였다. 제작된 추가 부품 및 볼-박판 스프링 형 체크밸브를 소형 압전유압펌프에 적용하여 브레이크 시스템의 가압 실험을 진행하였다.

2. 볼 타입 부가질량이 부착된 체크밸브

기존의 압전유압펌프에 사용된 체크밸브는 외경과 브릿지 및 유로를 덮는 덮개로 구성되어 있으며, 유로의 덮개는 역류방지를 위해 직경이 유로를 덮을 수 있을 만큼 충분히 커야 했다[13,14]. 또한, 체크밸브와 펌프 사이의 누수 방지를 위해 유압유 실링으로 오링을 사용했고, 이로 인해 체크밸브 유로 덮개의 직경은 더욱 커지게 된다[8]. 기존의 박판 스프링 형 체크밸브는 챔버압과 부하압의 작용 면적비가 약 1:3이었다. 고 부하압을 얻기 위해서는 가능한 한 아웃 체크밸브에서 부하압이 작용하는 면적을 줄여서 3배 이상의 부하압을 건널 수 있는 설계가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 부하압이 작용하는 단면적을 조절하여 고 부하압을 얻기 위해 기존의 체크밸브에 볼 타입의 부가질량이 부착된 새로운 체크밸브를 제안하였다.

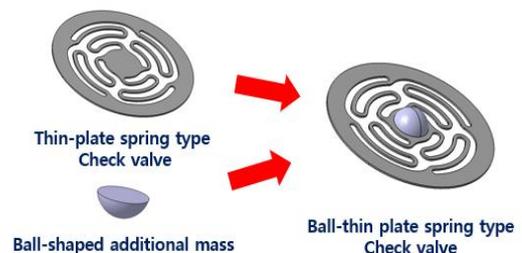


Fig. 1 Check valve with an additional mass

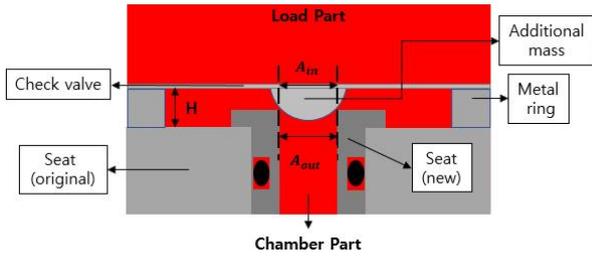


Fig. 2 Sectional view of pump with new check valve and pump parts

Fig. 1은 박판 스프링 형 체크밸브에 볼 타입 부가질량을 부착한 모습이며, Fig. 2는 볼-박판 스프링 형 체크밸브가 장착된 펌프의 단면 형상을 나타낸 것이다. 기존의 박판 스프링 형 체크밸브 적용 시 유압유 실링으로 사용된 오링의 경우, 부가질량에 의해 변화된 구조에선 사용할 수 없다. 따라서 유압유 실링을 위한 다른 방법을 고안해야 한다. 이에 추가 구조물인 메탈 링을 제작하였고, Fig. 2에 표시한 메탈 링의 높이인 H 를 체크밸브의 평형위치보다 낮게 가공하여 스프링에 초기변위를 줌으로써 밸브가 더 잘 닫히게 하는 방안을 고안하였다. 또한 새로이 추가된 시트부에 열처리를 하여 재료의 강도를 높임으로써 반복실험 시 발생할 수 있는 재료의 마모를 방지하였고, 치수공차를 $\pm 0.4\mu m$ 수준으로 낮출 수 있는 마무리공정인 래핑작업을 통해 새로운 시트 안착 시에 체크밸브와의 편심이 발생하지 않도록 하였다. 부가질량의 경우 부가질량과 체크밸브의 부착을 위한 지그를 새로이 제작하여 센터링을 맞춘 후 용접을 진행하였다. 마지막으로 새로이 추가된 시트의 경우, 펌프와 일체형인 기존의 시트보다 펌프 동작 시 체크밸브와의 센터링이 맞도록 자리를 잡아가면서 유압유 실링에 유리하다고 판단했기에 사용하였다.

본 절에서 설명한 구조로 가공된 볼-박판 스프링 형 체크밸브 적용 시 펌프 챔버압과 부하쪽 부하압이 작용하는 단면적 비율이 거의 1:1이 되어 대부분의 챔버압이 부하압으로 전달되는 효과를 가져올 수 있다. 평형 상태에서 부하압과 챔버압이 체크밸브에 작용하는 단면적은 Fig. 2에 각각 A_{in}, A_{out} 으로 나타내었다.

추가질량 부착에 의한 체크밸브 구조 변화를 고려하여 ANSYS를 이용한 체크밸브의 구조해석, 진동해석, 유체-구조 연성해석을 수행하였으며, 압전유압펌프의

작동요구도 내에서 구조파괴 및 공진이 발생하지 않도록 설계하였다[15].

3. 브레이크 시스템의 모델링

3.1 박판 스프링 형 체크밸브 적용

볼-박판 스프링 형 체크밸브를 제작하기에 앞서 추가되는 부가질량이 정상상태 부하압의 개선에 효과적이라는 사실을 확인하기 위해 상용코드인 LMS AMESim을 이용하여 소형 압전유압펌프가 적용된 단순 브레이크 시스템의 모델링을 수행하였다. 본 연구팀에 의해 설계된 소형 압전유압펌프의 경우, 솔레노이드 밸브를 이용한 유압 폐회로를 형성시키고 가압성능 실험 및 유량실험을 수행하였다[8]. 따라서 단순 브레이크 시스템의 부하 파트는 파이프 라인과 가압시 폐회로 구성을 위한 솔레노이드 밸브로 구성되며, AMESim 모델링 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

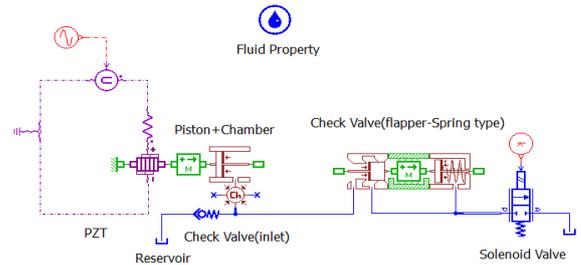


Fig. 3 Modeling of simplified brake system (thin-plate spring type check valve)

박판 스프링 형 체크밸브의 경우, 체크밸브와 시트는 유로에 관이 없혀진 형태로 플레퍼-스프링 밸브로 모델링할 수 있다. 제작된 소형 압전유압펌프는 피스톤 펌핑 방식으로 챔버에서 가압 유압유를 부하방향으로 토출하므로 이는 벽면이 고정된 피스톤 및 챔버 컴포넌트를 이용하여 모델링하였다. 흡입구 체크밸브의 경우, 펌프 작동 시 대기압 조건에서 충분히 개방되도록 크래킹 압력을 0.5기압으로 설정하였고, 압전작동기의 동작에 맞추어 유량을 흡입해주는 역할을 해야 하므로 스프링 형식의 체크밸브로 적용하였다. 또한 부하 압력이 형성되는 관로의 영향도 중요하므로, 부하부 유압 관로 모델링의 정교함을 높이기 위하여 관로 저항, 커패시턴스 및 관로의 관성이 포함된 고차

집중 모델링을 적용하였다. 집중 매개변수 모델링을 사용한 압력-유량 전달함수는 Eq. 1과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ICs^2 + RCs + 1 & Is + R \\ Cs & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_L(s) \\ Q_L(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 P_0, Q_0 는 각각 부하와 체크밸브가 맞닿는 부하 시작단에서의 압력 및 유량이며, P_L, Q_L 은 부하와 솔레노이드 밸브가 맞닿는 끝단의 압력 및 유량이다. P_0, Q_0 와 P_L, Q_L 의 관계를 표현하는 전달 행렬은 n 개의 집중 매개변수 모델링을 사용할 경우 n 개의 유체 집중 덩어리를 가정함으로써 유도될 수 있다. 즉, 관로 저항, 커패시턴스 및 관로 관성으로 구성된 전달 행렬을 n 회 곱하면 n 차 집중 매개변수 모델링의 전달행렬을 구할 수 있다. 유체는 항공기의 유압유로 널리 사용되는 MIL-H-83282의 제원을 사용하였다[10].

압전작동기는 PI사의 P-225.40 모델의 제원에 해당하는 성능을 가지도록 모델링하였으며, 압전작동기의 제원은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specification of PZT actuator

Parameters	Value
Size	$\varnothing 39.8 \text{ mm}, L94 \text{ mm}$
Max. Displacement	$60 \mu\text{m}$
Blocked Force	12500 N
Operating Voltage	$0 \text{ to } 1000 \text{ V}$

Table 1에서 압전작동기는 0~1000 V 사이의 전압을 인가할 수 있다. 입력전압과 압전작동기가 발생시키는 힘은 서로 비례하므로[9], 압전작동기에 1000 V를 인가할 경우 최대 12500 N의 블로킹 힘을 발생시킬 수 있으며, 자유단에서 최대 $60 \mu\text{m}$ 의 변위를 발생시킬 수 있다. 압전작동기는 피스톤이 1자유도의 상하운동을 통한 펌핑을 할 수 있도록 구성되어 있으며, 이상적인 비압축성 유체의 경우 압전작동기가 발생시키는 힘을 설계된 피스톤의 단면적으로 나누어 주면 챔버에서 생성되는 압력을 구할 수 있다. 하지만, 실제 유압유는 압축성 때문에 작동기에서 유체로 전달되는 힘이 전부 챔버압으로 변환되지 않으므로 유체의 압축성을 고려한 모델링이 수행되어야 한다. 작동유로 선정된

MIL-H-83282의 경우 이물질이 들어가지 않은 상태에서 약 1%의 압축성을 가지며, 공기 중에 노출될 경우 최대 3%의 압축성을 가지게 된다. 또한, 실제 체크밸브는 변형체이므로 챔버압이 작용하는 단면적을 유로의 단면적이 아닌 체크밸브 변형 시 챔버압이 체크밸브에 작용하는 실제 단면적을 적용한 모델링이 수행되어야 한다. 이 두 가지를 고려하여 가압 특성 파악을 위한 모델링을 수행하였다. 모델링의 검증에 위해 박판 스프링 형 체크밸브가 적용된 펌프를 이용한 가압 실험 결과와 모델링을 이용한 시뮬레이션 결과를 비교하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

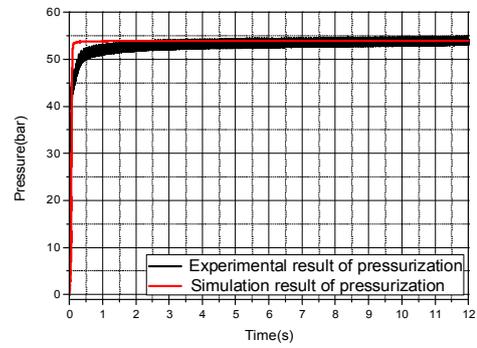


Fig. 4 Comparison of pressurization characteristics between experiment and simulation

Fig. 4는 압전작동기에 900 V, 140 Hz의 전압을 인가하였을 때 형성된 부하압의 실험결과 및 시뮬레이션 결과를 비교한 그래프이다[8]. 실험 결과 약 54 bar 부근에서 정상상태에 도달하여 압력이 오르내리고 있으며, 시뮬레이션 결과 또한 설정된 면적비에 의해 약 54 bar에서 압력이 포화되는 것을 확인할 수 있다. 본 절의 AMESim 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 거의 일치하고 있어, 소형 압전유압펌프가 적용된 단순 브레이크 시스템의 AMESim 모델링이 적절하게 수행되었다고 판단된다.

3.2 볼-스프링 체크밸브 적용

3.1절에서 검증된 단순 브레이크 시스템 모델링을 이용하여 토출부 체크밸브로 모델링된 플레퍼 밸브를 볼 밸브로 바꾸어주면 부가질량의 모델링을 구현할 수 있다. 이는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 부가질량과 시트

의 접촉이 구와 직각 모서리의 접촉으로 볼 밸브로 부가질량의 모델링을 구현할 수 있는 근거가 된다.

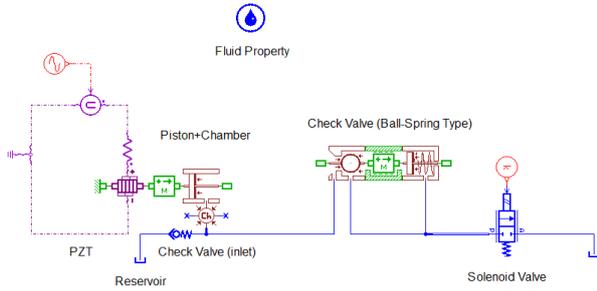


Fig. 5 Modeling of simple brake system (Ball-thin plate spring type check valve)

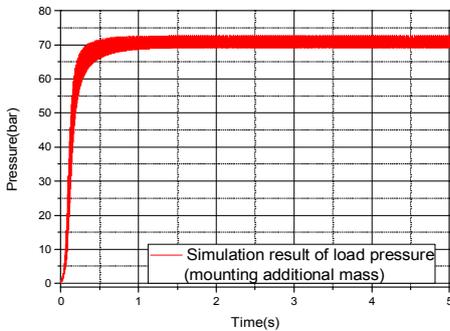


Fig. 6 Simulation result of load pressure (ball-thin plate spring type check valve)

Fig. 5는 Fig. 3의 단순 브레이크 시스템 모델링의 플래퍼 밸브를 볼 밸브로 바꾸어 준 형태이다. 볼 밸브 적용 시 부하압이 정상상태에 도달하였을 때 챔버압과 부하압이 작용하는 단면적 비를 1:1로 만들 수 있다. 압전작동기에 900 V, 140 Hz 전압 인가시 시뮬레이션 결과, 부하압은 73 bar 부근에서 정상상태에 도달한다. 이는 압축성이 존재하지 않는 유압유를 가정했을 경우보다 낮은 수치로, 유압유의 압축성에 의해 챔버에서 형성되는 압력이 낮아져 부하로 전달 가능한 압력 또한 낮아졌기 때문이다. 모델링의 타당성을 검증하기 위해 볼-박판 스프링 형 체크밸브를 적용한 펌프를 설계/제작하여 가압 성능 실험을 진행하였다.

4. 볼-박판 스프링 형 체크밸브를 적용한 가압 성능 실험

소형 압전유압펌프가 적용된 단순 브레이크 시스템의 AMESim 모델링을 이용한 시뮬레이션 결과를 통해, 부가질량에 의한 면적비 개선이 고 부하압 생성에 중요한 인자 중 하나임을 확인하였다. 단순 브레이크 시스템의 AMESim 모델링을 이용하여 가압 특성에 미치는 인자를 파악할 수 있으며, 본 논문에서는 부가질량의 영향에 초점을 맞추어 연구를 진행하였다. 이에 박판 스프링 형 체크밸브에 부가질량을 부착하고, 부가질량의 추가에 따른 구조의 변화로 요구되는 추가 구성품을 새로이 설계 및 제작하였다. 새로이 제작된 구성품을 포함한 소형 압전유압펌프의 부품을 Fig. 7에 나타내었다.



Fig. 7 Components of the pump including newly designed parts

펌프 부품의 추가로 인해 조립 시 부품 간 센터링이 틀어질 가능성을 배제하기 위해, 챔버부와 유로부의 센터링 조절을 위한 고정 핀 또한 필요하다고 판단하여 제작하였다. 이에 제작된 펌프를 이용하여 가압 실험을 진행하였다. 실험장치 및 방법은 기 발표된 논문에 상세히 기술하였다[8]. 입력전압의 크기는 900 V로 유지하되 주파수를 바꾸어가며 가장 뛰어난 성능을 가지는 작동주파수로 선정하였다. 소형 압전유압펌프의 작동요구도인 0~150 Hz 범위 내에서 10 Hz 간격으로 바꾸어가며 실험을 진행하였다.

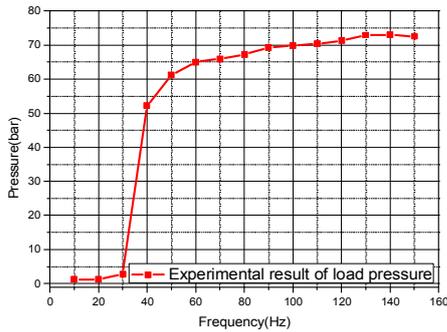


Fig. 8 Experimental results of load pressure formulation by operating frequency

Fig. 8은 주파수 변화에 따른 최대 부하압을 실험을 통해 측정된 결과를 나타낸 것이다. 30Hz 이하의 저주파수에서는 압력이 거의 형성되지 않았고, 140Hz 에서 73bar 로 가장 높은 성능을 보임을 확인하였다. 같은 크기의 전압을 인가함에도 저주파수에서 부하 압력을 형성하지 못하는 이유는 챔버에서 부하 방향으로 충분한 유량이 토출되지 않기 때문으로 판단된다. 볼-박판 스프링 형 체크밸브를 적용한 후 성능개선이 얼마나 이루어졌는지 비교하기 위해 기존의 박판 스프링 형 체크밸브 및 유압유 실링을 오링으로 사용하였을 때의 실험 결과를 비교하였다. 본 연구에서 가장 우수한 성능을 보였던 900V , 140Hz 의 실험 결과를 비교하여 Fig. 9에 나타내었다.

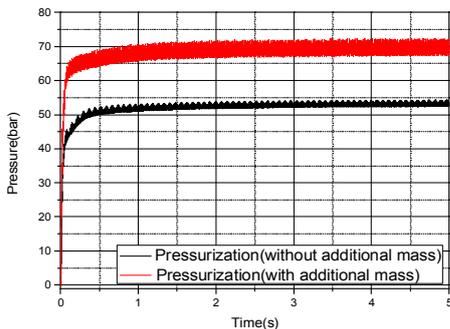


Fig. 9 Comparison of experimental results before and after mounting additional mass

기존의 박판 스프링 형 체크밸브를 적용한 가압 실험 결과, 900V , 140Hz 에서 54bar 의 압력을 형성하였

고, 볼-박판 스프링 형 체크밸브를 적용함으로써 동일 조건에서 약 35%의 부하압 개선을 이루어 내었다. 또한, 볼-박판 스프링 형 체크밸브를 적용한 실험결과와 Fig. 6의 시뮬레이션 결과의 비교를 통해, 정상상태 부하압이 서로 일치한다는 것을 확인하였다. 따라서, 볼-박판 스프링 형 체크밸브를 적용한 압전유압펌프가 사용된 단순 브레이크 시스템의 AMESim 모델링이 적절하게 수행되었다고 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 선행연구에서 설계/제작된 압전유압펌프의 성능 개선을 위해 체크밸브에 대한 연구를 진행하였다. 체크밸브 연구를 통해, 정상상태 부하압 개선을 위해서는 체크밸브에 챔버압과 부하압이 작용하는 단면적 비의 조절이 중요한 인자임을 확인하였다. 따라서 단면적 비를 줄여 챔버에 형성된 압력이 부하에 효과적으로 전달되게 하기 위해 기존의 박판 스프링 형 체크밸브에 볼 타입의 부가질량을 부착하는 방안을 제시하였다. 새로운 체크밸브를 제작하기 전 부가질량의 추가가 부하압 개선으로 이어지는지 확인하기 위해 상용코드 LMS AMESim을 이용한 단순 브레이크 시스템의 모델링을 수행하였다. 모델링의 검증에 위해 부가질량을 부착하지 않은 체크밸브 모델링을 적용하여 기존에 수행된 실험결과와 비교하였다. 900V , 140Hz 의 전압을 인가하였을 때 약 54bar 에서 부하 압력이 포화된다는 것을 확인하였다. 검증된 모델링에 부가질량을 추가적으로 모델링하여 볼-박판 스프링 형 체크밸브의 적용이 부하압 개선에 효과가 있는지 확인하였다. 시뮬레이션 결과, 유압유의 압축성을 고려하여 약 73bar 에서 압력이 포화됨을 확인하였다. 유압 평형 상태에 도달하였을 때, 부가질량의 형상은 부하압과 챔버압이 체크밸브에 미치는 단면적의 비에 영향을 끼치지 않는다. 따라서, 형상 변화에 따른 부하압의 변화는 없을 것으로 판단된다.

부가질량이 장착된 체크밸브 및 변경된 구조로 인해 추가적인 부품들을 제작하였고, 지능재료펌프의 가압 실험을 진행하였다. 실험결과, 900V 의 전압입력 시 140Hz 의 작동주파수에서 73bar 를 형성하여 가장 우수한 성능을 확인하였고, 기존의 부가질량이 추가되지

않은 체크밸브를 이용한 가압 실험 결과와의 비교를 통해 정상상태 부하 압력이 약 35% 개선되었다는 것을 확인하였다.

실험 결과를 통해 볼-박관 스프링 형 체크밸브 적용 시에 부하압 개선 효과를 확인하였고, 상용 코드를 이용한 모델링 또한 적절하게 수행되었다는 것을 확인하였다. 향후 볼-박관 스프링 형 체크밸브가 적용된 소형 압전유압펌프를 실제 브레이크 시스템인 캘리퍼, 디스크 및 패드와 연결하여 요구 성능 확인을 위한 실험을 진행할 예정이며, AMESim을 이용한 브레이크 시스템의 모델링을 이용하여 가압 특성에 영향을 미치는 인자에 대한 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 기초연구 연구비 지원(ADD-13-01-08-24)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] FAA-H-8083-1A, "Aircraft Weight and Balance Handbook," U.S.Department of Transportation, *Federal Aviation Administration*, Flight Standards Service, 2007.
- [12] FAA-H-8083-30 "Aviation Maintenance Technical Handbook," U.S. Department of Transportation, *Federal Aviation Administration*, Flight Standards Service, 2008.
- [13] 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.

- [14]Jaihyuk Hwang, Jonghoon Lee, Jaeup Hwang, Jaesung Bae, Junyong Kwon, “Conceptual Design of Compound Smart Material Pump with Sequential Operatioon of Fluid Displacement-Force,” *The Society for Aerospace System Engineering, Spring Conference*, Paper #95, 2014.
- [15]Nguyen Anh Phuc, Jai-Hyuk Hwang, Yong-Ha Hwang, Jun-Yong Kwon, “FSI Analysis of Spring Sheet Check Valve Used in Smart Material Pump,” *Proceedings of Asia Symposium on Engineering and Information*, pp. 24-25, 2017.