

소형 압전유압펌프 브레이크 시스템의 성능해석 및 실험

황용하¹ · 황재혁^{2,†} · 응위웬 안 폭¹ · 배재성²¹한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과 대학원²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Performance Analysis and Test of the Small Piezoelectric-Hydraulic Pump Brake System

Yong-Ha Hwang¹, Jai-Hyuk Hwang², Nguyen Anh Phuc¹ and Jae-Sung Bae²¹Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Graduate school at KAU²Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

Abstract

In this paper, the performance analysis and the experiment of the brake system using the small piezoelectric-hydraulic pump were performed. Initially, the 3-D modeling of the brake load components was performed for the construction of the brake system. Subsequently, modeling using the commercial program AMESim was performed. A floating caliper model was used as a load for modeling the brake system. Through the AMESim simulation, load pressure, check valve displacement and flow rate under no load state were calculated, and performance analysis and changes in dynamic characteristics were confirmed by adding brake load. A jig for use in fixing the brake load during performance test was manufactured. The flow rate was assessed under no load condition and load pressure formation experiments were performed and compared with simulation results. Experimental results revealed the maximum load pressure as about 73bar at 130Hz and the maximum flow rate as about 203cc/min at 145Hz, which satisfied the requirement of small- and medium-sized UAV braking system. In addition, simulation results revealed that the load pressure and discharge flow rate were within 6% and 5%, respectively. Apparently, the modeling is expected to be effective for brake performance analysis.

초 록

본 논문에서는 소형 압전유압펌프 브레이크 시스템의 성능해석 및 실험을 수행하였다. 먼저 브레이크 시스템의 구성을 위해 브레이크 부하 구성품의 3-D 모델링을 수행하였고, 상용 프로그램인 AMESim을 이용한 모델링을 진행하였다. 브레이크 시스템 모델링에는 플로팅 타입의 캘리퍼를 부하로 활용하였다. AMESim 시뮬레이션을 통해, 부하 압력과 체크밸브 변위 및 무부하 상태에서의 유량을 계산하였으며 브레이크 부하의 추가에 따른 성능해석 및 동특성 변화를 확인하였다. 브레이크 시스템의 성능 실험을 위해 부하를 고정시키는 치구를 제작하였고, 무부하 상태에서의 유량 및 부하 압력 형성 실험을 수행하고 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 실험 결과, 최대 부하압력은 130Hz에서 약 73bar, 최대 유량 발생은 145Hz에서 약 203cc/min로, 중소형 무인기 브레이크 시스템에 적용가능성을 확인하였다. 또한 시뮬레이션 결과와 실험결과의 오차는 부하 압력과 토출 유량에서 각각 6%, 5% 정도이며, 모델링이 브레이크 성능해석에 효과적으로 활용될 것으로 판단된다.

Key Words : Brake System(브레이크 시스템), Floating Type Caliper(플로팅 타입 캘리퍼), Flow Rate(유량), Load Pressure(부하압)

1. 서 론

일반적으로 항공기에 적용되는 유압 브레이크 시스템은 저유기(Reservoir), 유압펌프, 축압기, 서보밸브, 체크밸브 및 전자제어장치(ECU) 등의 복잡한 구성이 요

구된다. 이러한 유압 브레이크 시스템을 공간적 제약 및 무게 제한이 엄격한 중소형 무인항공기에 그대로 적용하는 것은 쉽지 않다. 따라서, 중소형 무인항공기에 적용 가능한 소형 브레이크 시스템의 개발이 필요하며, 또한 동력 전달을 감당하는 펌프의 소형화가 이루어져야한다. 최근 들어 PCR (Polymerase Chain Reaction)과 μ TAS (micro Total Analysis System) 과 같은 생체유체역학 분야의 펌핑 메커니즘 개발 필요성으로 인해 지능재료 마이크로 펌프에 대한 연구들이 많이 수행되었다[1-4]. 이러한 펌프에 적용된 지능재료 작동기로는 주로 압전세라믹, 형상기억합금, 이온폴리머 등이 있으며, 성능개선을 위해 이러한 지능재료 작동기에 대한 연구도 활발하게 이루어져 왔다. 지능재료 작동기는 기존의 펌프 작동기에 비해 소형화가 가능하여 초소형 기계부품 및 마이크로 펌프에 활발히 적용되고 있다[5-7]. 본 연구팀이 수행한 선행 연구에서는 작은 변위로 큰 힘을 발생시킬 수 있는 압전작동기를 이용한 소형 압전유압펌프를 개발하였고, 성능검증 실험을 수행하였다[8]. 다른 연구자들에 의해 제안된 지능재료 마이크로 펌프는 토출 유량이 약 3~450 cc/min 정도이며, 부하압 형성 능력은 0.2~7 bar 정도이다[1-4]. 본 연구팀에 의해 개발된 소형 압전유압펌프의 경우, 최대 토출 유량은 약 200 cc/min 정도로 다른 지능재료 마이크로 펌프 성능의 중간 정도이나, 토출 압력은 최대 73 bar 정도로 부하압 형성 능력이 더 뛰어나다는 것을 알 수 있다[8]. 항공기 브레이크 시스템에 적용하기 위해선 펌프의 토출 유량보다는 부하압 형성능력이 더 중요한 요소이다. 따라서 본 연구팀의 선행 연구에서 개발된 소형 압전유압펌프가 항공기 브레이크 시스템에 사용하기 매우 적합하다고 판단된다.

본 논문에서는 제작된 소형 압전유압펌프를 실제 브레이크 부하와 연결하여 소형 유압 브레이크 시스템을 구성한 후 성능해석 및 실험을 진행하였다. 먼저 소형 압전유압펌프 및 브레이크 유압회로를 다분야 해석 프로그램인 LMS AMESim으로 모델링하여 성능해석 시뮬레이션을 수행하였으며, 성능실험을 위해 브레이크 부하부를 설계하였다. 브레이크 부하는 디스크, 패드, 플로팅 타입(floating type)의 캘리퍼로 구성된다. 플로팅 타입의 캘리퍼가 적용된 브레이크는 유압 실린더

가 한쪽에만 있는 형식으로, 피스톤과 연결된 패드가 디스크에 닿은 뒤 반대쪽 패드가 피스톤의 반발력에 의해 디스크에 닿게 되고, 이후에 제동력이 발생한다. 시뮬레이션을 통해 부하 압력이 플로팅 타입 캘리퍼가 적용된 브레이크의 작동원리에 맞게 발생하는지 확인하였고, 부하 모델링에 의한 동특성의 변화를 확인하기 위해 체크밸브의 변위와 펌프 유량을 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션을 통한 소형 압전유압펌프 브레이크 시스템의 성능해석 결과 브레이크 작동요구도를 만족하고 있음을 확인하였고, 이를 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 모델링을 통해 부하 체적이 부하압 형성과정에 중요한 요인이라는 것을 알아내어 브레이크 부하와 압전유압펌프 사이의 유압라인을 최소화하여 연결하였고, 브레이크 부하의 고정을 위한 치구를 제작하였다. 브레이크 부하는 실제 차량에 사용된 구성품을 사용하였으며 브레이크 시스템의 성능검증을 위한 실험장치를 구성하여 정상상태 부하압 및 펌프 토출 유량을 확인하였다.

2. 소형 압전유압펌프 브레이크 시스템의 성능 해석 모델링

2.1 소형 압전유압펌프 브레이크 시스템 설계

본 절에서는 소형 압전유압펌프 브레이크 시스템의 성능해석을 위해 브레이크 부하부를 모델링하였다. 이를 위해 캘리퍼 브레이크 타입의 실제 브레이크 구조를 압전유압펌프와 연결하여 소형 브레이크 회로를 구성하였다.

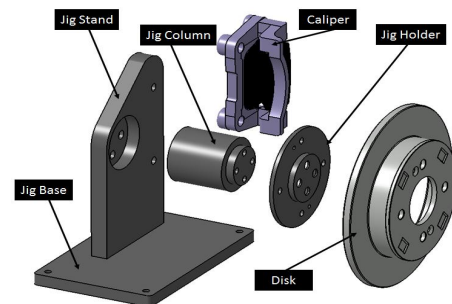
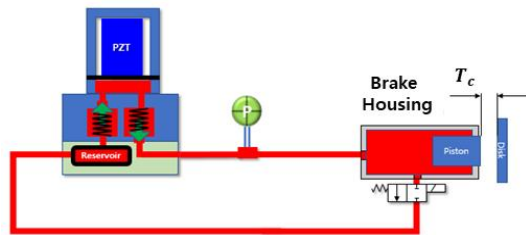


Fig. 1 Caliper type brake system used for the experimental setup

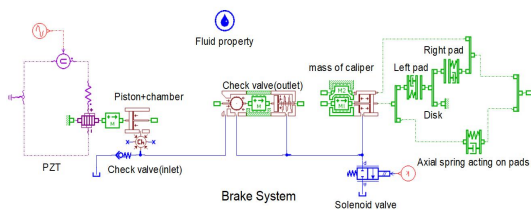
Fig. 1은 소형 브레이크 시스템의 부하 구성품과 치구를 3-D 모델로 나타낸 것으로 실제 소형 차량용 캘리퍼 브레이크 구조를 채택하였다. 치구는 부하의 고정을 위해 사용되며, 실험 테이블에 고정하기 위한 베이스(Base), 브레이크 부하의 높이를 고정해주는 칼럼(Column), 디스크를 고정시켜 주는 홀더(Holder) 및 스탠드(Stand)의 4가지로 구성된다. 부하 구성품 중 하나인 캘리퍼의 경우, 유압 브레이크 시스템에 널리 사용되는 플로팅 타입을 적용하였다. 플로팅 타입 캘리퍼의 작동원리를 고려한 상용 코드 AMESim의 모델링은 다음 절에서 자세히 기술하였다.

2.2 플로팅 타입 캘리퍼를 적용한 소형 브레이크 시스템의 AMESim 모델링

소형 압전유압펌프 브레이크 시스템의 기본 개념도 및 LMS AMESim을 이용한 모델링을 Fig. 2에 나타내었다.



(a) Schematic diagram of the brake system



(b) AMESim modeling of the brake system

Fig. 2 Brake system modeling

소형 유압 브레이크 시스템의 작동원리는 다음과 같다. 먼저, 압전작동기의 작동에 의해 저유기에서 흡입된 유압유가 챔버 내에서 가압되고, 아웃 체크밸브를 통해 부하로 흘러들어가는 유량이 발생한다. 유압유는 캘리퍼와 연결된 피스톤을 유격 T_c 만큼 밀어내어 패

드를 디스크에 부착시키고, 패드가 닿은 직후 제동력 발생을 위한 압력을 형성한다. 따라서 브레이크 제동력 발생을 위해서는 캘리퍼의 동적 거동이 중요한 영향을 미친다. 압력은 부하에 설치된 압력 트랜스미터에 의해 측정되며, 감압을 위해 솔레노이드 밸브가 설치된다. 밸브를 개방하면, 부하에 구성되어 있던 유압 폐회로는 개회로로 전환되며, 유압유는 유로를 통해 저유기로 되돌아간다.

이때, 압전작동기를 히스테리시스 현상이 발생하지 않는 선형 모델로 가정하면, 선형 방정식 구성을 통해 압전작동기가 발생시키는 힘과 압전작동기 파라미터 사이의 관계식을 유도할 수 있다. 주 변위인 z 축방향으로의 선형 방정식을 구한 후, 이를 행렬식으로 나타내면 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{Bmatrix} dZ \\ dQ \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{33}^E \frac{nw \times tn}{A} & nw \times d_{33} \\ nw \times d_{33} & \epsilon_{33}^T \frac{nw \times A}{tn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F \\ U \end{Bmatrix} \quad (1)$$

여기서 dZ , dQ 는 각각 전압 입력 시 압전작동기의 변위와 전하를 의미하며, 입력전압(= U)에 비례하는 블로킹 힘(= F)이 발생한다. 또한, s_{33}^E 는 압전재료의 탄성용량 계수, d = 압전 변형 계수, ϵ^T =유전 계수, A = 적층된 PZT의 넓이, tn = 적층된 PZT의 두께, nw = 적층된 PZT의 개수를 의미한다. 본 연구에는 PI사의 P-225.40 모델을 사용하였으며, 블로킹 힘을 구현하기 위해 해당 모델의 제원을 AMESim 모델링에 적용하였다.

브레이크 시스템의 작동원리를 고려하여, 소형 압전유압펌프와 브레이크 부하 구성품 및 유로를 AMESim을 이용하여 Fig. 2(b)와 같이 모델링하였다. 브레이크 작동에는 캘리퍼의 동적 거동이 중요한 영향을 미친다. 캘리퍼는 유압 브레이크에 널리 사용되는 플로팅 타입을 적용하였으며, 모델링이 플로팅 타입 캘리퍼의 작동원리에 부합하는지 확인하였다. 플로팅 타입 캘리퍼는 단일 유압 실린더에 연결된 피스톤이 유압유에 의해 한쪽의 패드를 디스크에 닿도록 밀어낸 뒤 반대쪽 패드가 반력에 의해 디스크에 닿게 되며, 그 이후에 제동력 발생을 위한 부하압이 형성되는 원리이다. 브레이크 작동 시 패드의 변위와 가압 과정을 시뮬레

이선 하였고, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

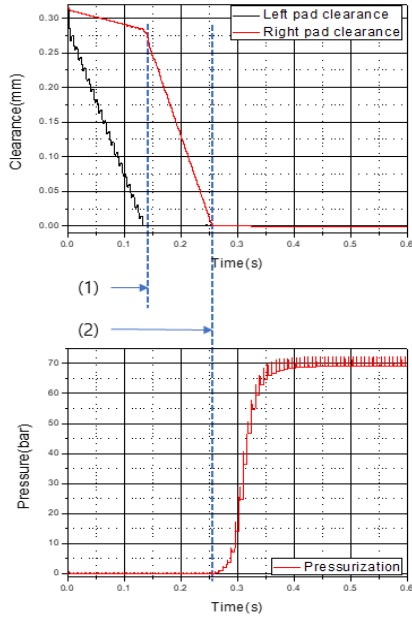


Fig. 3 Simulation results of pad clearance and pressurization at the load side

동특성 시뮬레이션에서 압전작동기에 900 V의 전압을 인가하였고, 압전유압펌프의 가압 성능실험에서 가장 뛰어난 성능을 보였던 140 Hz의 작동주파수를 적용하였다[9]. Fig. 3에 나타난 결과에서 보듯이 피스톤과 연결된 왼쪽의 패드가 디스크에 부착된 이후 오른쪽 패드가 반발력에 의해 움직이기 시작한다(Fig. 3의 (1) 참조). 양 패드는 약 0.25초가 경과하면 디스크와 완전히 부착된다. 패드가 디스크에 부착되기 전까지 부하 체적이 고정되지 않아 개회로 유압 상태와 마찬가지로 유압유의 압축이 원활하게 진행되지 않으며, 이로 인해 부하 압력은 상승하지 않는다. 양쪽 패드가 디스크에 부착된 직후 부하의 체적이 고정되고, 유압유의 압축에 의해 부하 압력이 상승하기 시작한다. 압력 상승 시점을 Fig. 3의 (2)로 나타내었다. 부하 압력은 71~73 bar에서 포화된 이후 2~3 bar 정도의 오르내림 현상을 보인다. 이는 부하 압력이 포화된 이후 체크밸브가 완벽하게 닫히지 않아 일부 유량이 부하에서 챔버로 역류하기 때문에 발생하는 현상이다. 소형 브레이크 유압회로의 동특성 시뮬레이션 결과를 통해 플로팅 타입 캘리퍼의 작동원리에 따른 가압 성능을

확인할 수 있다.

2.3 소형 브레이크 시스템의 동특성 시뮬레이션

선행연구에서는 압전유압펌프의 성능 검증을 위해 브레이크 부하를 솔레노이드 밸브로 구성된 단순 브레이크 시스템 형태로 구성하여 밸브의 개폐 작용을 통한 부하 압력 가/감압이 가능하도록 하였다[9]. 이와 같은 단순 브레이크 시스템 구조는 압전유압펌프 성능 검증에는 유용하나, 캘리퍼 모델이 반영되지 않아 실제 브레이크 시스템의 동특성을 알기 어렵다. 따라서 디스크, 패드, 플로팅 타입 캘리퍼 등을 추가적으로 모델링하여 전체 브레이크 시스템의 동특성에 미치는 영향을 확인하였다. 이를 위해 솔레노이드 밸브를 닫고 압전작동기에 전압을 인가하였을 때 아웃 체크밸브의 변위 및 발생 유량을 시뮬레이션 하였다. 유량의 경우, 캘리퍼 작동에 의해 부하 체적이 변화하여 유압 개회로가 유지되는 동안 유압 실린더 내의 유량 변화를 계산하였다. 이를 통해 가압에 필요한 만큼의 유압유량이 얼마나 빨리 발생하는 지 계산할 수 있다. 또한, 시뮬레이션 결과는 일정시간 동안 솔레노이드 밸브를 개방하여 저유기로 흘러가는 유압유의 질량을 측정하여 계산된 유량 실험값과 비교하여 검증하였다.

실험에 사용된 박판 스프링 형 체크밸브는 소성변형의 방지를 위해 체크밸브로부터 0.5 mm의 높이에 클로버 모양의 스톱퍼를 설계하였으며[12], 파라미터 스터디를 통해 체크밸브의 형상을 결정하고, 0.5 bar의 크래킹 압력을 가지도록 설계되었다[12]. 이 때 설계된 박판 스프링 형 체크밸브의 크래킹 압력은 다음 식 (2)와 같다.

$$P_r = \frac{k}{A_p} x_0 \quad (2)$$

여기서 P_r 은 크래킹 압력을 나타내며, 스프링의 탄성계수(= k) 및 스프링의 초기 압축길이(= x_0)에 비례하며, 수압면적(= A_p)과는 반비례한다. 이를 체크밸브 AMESim 모델링에 고려하였고, 브레이크 작동 시 체크밸브의 변위 시뮬레이션을 진행하였으며, 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

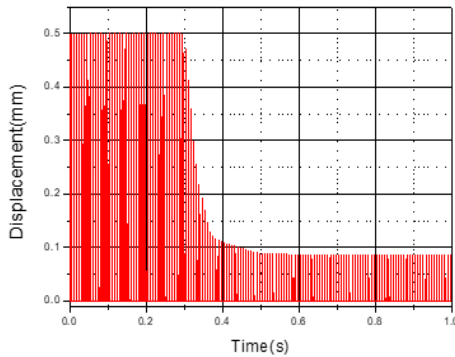


Fig. 4 Simulation results for opening size of the check valve

소형 브레이크 시스템 AMESim 모델의 가압 시뮬레이션에 사용된 압전작동기 입력전압으로 900 V, 140 Hz를 인가하였다. 체크밸브는 압전작동기의 작동주파수에 맞추어 고속으로 동작하며, 부하압이 상승하기 전까지 스톱퍼까지의 거리인 0.5mm 변위를 유지한다. 이후 부하압이 형성되기 시작하면 체크밸브에 부하압이 저항으로 작용하여 체크밸브의 변위가 낮아지다가 일정한 변위로 수렴하게 된다. 체크밸브의 변위가 0으로 수렴되지 않기 때문에 부하에서 챔버 방향으로의 역류가 발생하게 되며, Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 압력이 정상상태에 도달한 이후 압력의 오르내림 현상이 발생한다. 또한, 체크밸브 변위가 낮아지는 시점이 가압이 시작되는 시점보다 약간 늦어지게 되는데, 이는 초반에 형성된 부하 압력이 0.5mm의 체크밸브 변위를 막을 만큼 충분히 발생하지 않았기 때문이다.

다음으로 압전작동기에 동일한 입력 900 V, 140Hz의 전압을 인가하여 소형 브레이크 시스템의 유량의 변화를 해석하였다. 솔레노이드 밸브를 닫은 상태에서 캘리퍼의 패드가 디스크에 완전히 밀착되기까지 브레이크 회로는 개루프 유압회로가 되며, 그 이후 완전한 폐루프 유압회로가 된다. 이러한 과정에서 발생하는 유량을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

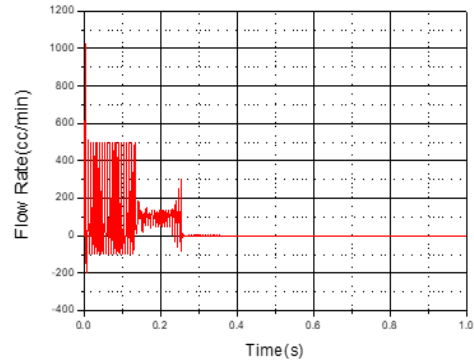


Fig. 5 Simulation results of flow rate throughout the check valve

Fig. 5에서 확인할 수 있는 바와 같이, 오른쪽 패드가 닿기 전까지 유량의 변화가 일정하며, 왼쪽 패드가 닿기 전까지 지속적으로 유량이 발생하다가 그 이후 유압 폐회로가 구성되어 유량은 0으로 수렴하게 된다. 시뮬레이션 결과를 이용하여 유압 개회로가 유지되는 동안 유량 변화의 평균 값을 계산하였고, 이를 실험 결과와 비교하여 모델링의 타당성을 확인하였다.

지금까지 소형 브레이크 시스템의 AMESim 모델을 이용하여 브레이크 작동 시 체크밸브의 변위 및 유압 개회로가 유지되는 동안의 유량의 변화를 계산하였다. 이를 통해 브레이크 부하부 연결에 따른 소형 압전유압펌프 브레이크 시스템의 동특성 변화를 확인하였다.

소형 압전유압펌프 브레이크 시스템의 모델링을 이용하여 배압 형성에 영향을 미치는 파라미터를 분석하였다. 부하 압력 형성을 위해서는 압전유압펌프와 브레이크 부하부 간의 연결이 최대한 짧아야 한다. 펌프와 부하의 연결에 사용되는 구성품은 부하의 체적을 늘리는 원인으로, 부하부의 압축이 원활하게 일어나지 않아 부하 압력이 제대로 형성되지 않을 수 있으며, 유로가 길어지면서 생기는 압력 손실 또한 무시할 수 없다. 따라서 압력 센서, 솔레노이드 밸브 등의 하드웨어를 모두 사용할 수 있으면서 부하 유로의 길이를 최소화하는 방안을 고안하여 브레이크 회로 시스템 구성에 반영하였다.

3. 소형 브레이크 시스템의 성능 실험

전절에서 얻어진 소형 압전유압펌프 브레이크 시스템의 성능 해석결과의 검증을 위해 부하압 형성 능력 및 토출 유량 측정 실험을 진행하였다. 소형 브레이크 시스템은 소형 압전유압펌프, 브레이크 부하 구성품 이외에 감압을 위한 솔레노이드 밸브, 압력 측정을 위한 압력 트랜스미터로 구성된다. 솔레노이드 밸브 모델은 최대 200bar의 압력을 지탱할 수 있으며 전기입력이 없을 때 닫혀있다가 5V 전압 인가 시 개방되어 무부하 조건을 만들어준다. 압력 트랜스미터의 경우, 내부에 휘트스톤 브릿지가 설치되어 있어서 저항의 변화를 측정하게 된다. 휘트스톤 브릿지에서 발생하는 출력은 작용 압력에 비례하며, 0~250bar의 압력 신호를 4~20mA의 전류 신호로 내보낸다. 본 실험의 경우, 부하 압력에 의해 하드웨어에 가해지는 압력이 70bar 내외로, 하드웨어에 무리가 가지 않을 것으로 판단된다. 소형 압전유압펌프와 브레이크 부하 사이의 연결을 위한 유압 파이프는 불필요하게 부하의 체적을 늘려 압력 손실 및 과도시간 등의 문제가 발생하지 않도록 하기 위해 가능한 최단 거리로 구성하였으며, 전반적인 실험장치 구성 모습은 Fig. 6에 나타내었다.

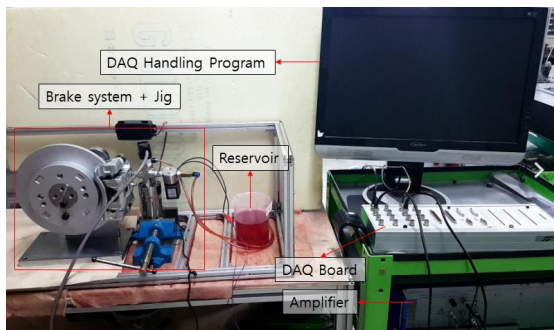


Fig. 6 Experimental setup for the pressurization and flow rate of the brake system

실험장치 구성 시 데이터 생성 및 수집을 위한 DAQ Board로는 ADC, DAC 포트가 각각 8개로 구성되어 있는 dSpace/ds1104 모델을 사용하였다. 이 보드를 이용하여 솔레노이드 개폐를 위한 신호 입력 및 압력 데이터의 수집이 가능하다. 또한, 고전압 증폭기를 통해 압전작동기에 증폭된 전압신호를 입력할 수 있다. 고전압 증폭기로는 고 주파수에서도 성능 저하가 발생하지 않는 PI사의 E-481 제품을 사용하였다[8].

성능 실험을 위해 먼저 솔레노이드 밸브를 닫아 부하에 폐회로를 구성하고, 압전작동기에 동일전압을 인가하여 포화 부하 압력을 측정하였다. 토출 유량이 작동 주파수에 영향을 받아 부하 압력 형성에 영향을 미치므로, 압전작동기의 작은 변위를 고려하여 유량이 부하 압력을 형성하기에 충분한 만큼 발생할 수 있도록 적정 주파수를 인가하였다. 이에 900V로 입력전압을 고정하고, 125~150Hz에서 5Hz 간격으로 작동주파수를 조절해가며 실험을 진행하였다. 측정된 실험 결과는 시뮬레이션 결과와 비교하여 Fig. 7에 나타내었다.

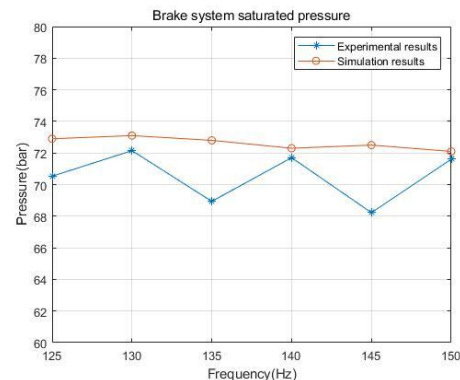


Fig. 7 Simulation and experimental results of the saturated load pressure

다음으로 솔레노이드 밸브를 통과하는 토출 유량을 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 측정 방법은 솔레노이드 밸브에 5V 전압을 인가하여 밸브를 개방함으로써 개루프 유압 회로를 구성하고, 솔레노이드 밸브를 통해 흐르는 유압유의 질량을 전자저울을 통해 측정하여 유량을 계산한다. 실험값은 수차례 반복실험을 통해 구한 평균값을 사용하였다.

제동에 필요한 브레이크의 최대 유압유 배출량은 Fig. 2(a)에서 나타낸 개략도와 같이 브레이크 패드가 100% 마모된 상태에서 브레이크 캘리퍼 피스톤이 이동하여 디스크를 접촉 시키는데 필요한 양을 기준으로 산출된다[8]. 즉, 유량은 유압 폐회로에서 부하 압력을 형성할 수 있을 만큼 발생해야 한다. 포화 압력 측정 실험과 마찬가지로, 압전작동기에 작용시키는 입력전압의 작동주파수를 125~150Hz 사이의 범위에서 5Hz의 간격으로 실험을 진행하였다.

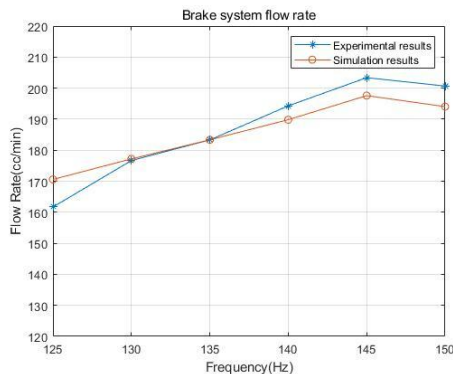


Fig. 8 Simulation and experimental results of the flow rate

부하 압력 시뮬레이션 결과와 실험 결과의 오차범위는 6% 내외로, 소형 브레이크 시스템 모델링이 적절히 수행되었음을 확인할 수 있다. 또한, 포화 부하 압력이 69~73bar로, 중소형 무인항공기의 브레이크 시스템에 적용하기에 충분한 크기로 판단된다[13,14]. 또한 유량 실험 결과, 각 작동주파수에서 중소형 무인항공기 브레이크 시스템의 요구조건을 충족하는 유량이 측정되었으며, 실험 데이터와 시뮬레이션 결과와 차이는 약 5% 내외로 소형 브레이크 시스템 모델링이 적절히 수행되었음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 소형 압전유압펌프가 적용된 브레이크 시스템의 성능해석 및 실험을 진행하였다. 먼저 브레이크 부하를 포함한 소형 압전유압펌프 브레이크 시스템을 AMESim 프로그램을 사용하여 모델링하였다. 압전작동기 모델은 AMESim 모델링을 통해 선형 방정식으로 구성하였다. 브레이크 부하에 적용된 캘리퍼는 플로팅 타입으로, 브레이크 시스템의 압전유압펌프 작동기에 900 V, 140Hz의 전압을 인가하였을 때 패드의 변위와 부하 압력 형성 과정을 시뮬레이션 하였다. 또한, 체크밸브 변위 및 무부하 상태에서의 유량 시뮬레이션을 진행하였다. 체크밸브 모델의 경우, 소성변형의 방지를 위해 설계된 펌프의 스톱퍼(stopper) 및 체크밸브의 크래킹(cracking) 압력을 모델링에 반영하였고, 유량은 가압이 진행되기 전까지 부하 체적의 변화

에 의해 유압 개회로가 유지되는 동안 유압 실린더 내에 발생하는 양을 계산하였다. 시뮬레이션을 통해, 브레이크 부하의 추가에 따른 소형 압전유압펌프 브레이크 시스템의 동특성 변화를 확인하였다.

성능 실험을 진행하기 위해 실제 소형 차량에 적용되는 브레이크 부품을 부하에 적용하여 브레이크 시스템을 구성하였다. 또한 부하체적에 의한 영향을 최소화하기 위하여 부하부의 유압 파이프는 최단 거리로 구성하였다. 압전작동기에 인가하는 전압은 시뮬레이션과 마찬가지로 900 V의 크기를 유지하였고, 압력 형성에 필요한 유량이 발생할 수 있도록 125~150Hz의 고 주파수를 인가하여 각 주파수에서의 최대 부하 압력, 토출 유량을 측정하였다. 실험 결과, 최대 부하압이 69~73bar에서 형성됨을 확인하였고, 토출 유량은 주파수에 따라 162~203 cc/min 값을 가지며 목표 항공기의 브레이크 시스템의 요구조건에 부합하는 것을 확인하였다. 실험결과는 시뮬레이션 결과와 비교하였고, 토출압력은 최대 6%, 토출 유량은 최대 5% 정도의 오차를 보여 모델링의 적합성을 검증하였다.

향후 압전유압펌프가 적용된 브레이크 시스템의 모델링을 이용하여 브레이크 성능에 영향을 미치는 파라미터 분석을 추가로 수행할 예정이며, 이를 브레이크 시스템을 이용한 성능 실험에 적용할 것이다.

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] Jai-Hyuk Hwang, Yeh-Sun Hong, Jae-Sung Bae, Jun-Yong Kwon, "A Study on Brake System Using Smart Material Pump," *Agency for Defense Development annual report*, No. ADDR-401-180011, 2017.
- [9] Yonghwi Joo, Jaihyuk Hwang, Jiyoung 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.
- [10] Yong-Ha Hwang, Jai-Hyuk Hwang, “Pressurization Characteristics Simulation of Smart Material Pump Using AMESim,” *The Society for Aerospace System Engineering, Spring Conference*, pp. 99-100, 2016.
- [11] Yong-Ha Hwang, Jai-Hyuk Hwang, “Pressurization Characteristics of a Brake System with Piezoelectric-Hydraulic pump,” *Asian Conference on Engineering and Natural Sciences*, pp. 240-241, 2018.
- [12] 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.
- [13] FAA-H-8083-1A, “Aircraft Weight and Balance Handbook,” U.S. Department of Transportation, *Federal Aviation Administration*, Flight Standards Service, 2007.
- [14] FAA-H-8083-30 “Aviation Maintenance Technical Handbook,” U.S. Department of Transportation, *Federal Aviation Administration*, Flight Standards Service, 2008.