

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(9), 822-829(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.9.822

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

압전유압펌프 성능실험에 대한 연구

주용휘*, 황재혁**, 양지연*, 배재성**, 이종훈***, 권준용***

On the Performance Test of the Piezoelectric-Hydraulic Pump

Yong-Hwi Joo*, Jai-Hyuk Hwang**, Ji-Youn Yang*, Jae-Sung Bae**, Jong-Hoon Lee***
and Jun-Yong Kwon***Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Graduate School at KAU*,
Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University**
The 7th Research and Development Institute, Agency for Defense Development***

ABSTRACT

In this paper, the piezoelectric-hydraulic pump with a piezostack actuator as a driving source has been designed, fabricated, and evaluated for its application to UAV's brake system. The performance requirements of the piezoelectric-hydraulic pump were decided based on the requirements analysis of the target aircraft brake system. The geometric design of the piezoelectric-hydraulic pump to meet the performance requirements of the pump was conducted, and all components of the pump including the spring sheet type check valves were machined with close tolerance. By constructing a test apparatus for the performance check of the piezoelectric-hydraulic pump, the performance characteristics of the pump, such as the outlet flow rate for load-free condition and the outlet oil pressure for closed loop condition, have been evaluated. It has been found by the performance test result that the developed piezoelectric-hydraulic pump satisfies the design requirements effectively.

초 록

본 논문에서는 압전재료를 이용하여 중소형 무인기 브레이크 시스템에 적용 가능한 압전유압펌프를 설계 및 제작하고, 제작된 압전유압펌프의 성능검증 실험을 수행하였다. 중소형 무인기급 목표 항공기를 선정하여 브레이크 시스템의 요구조건을 분석하였으며, 이를 바탕으로 압전유압펌프의 성능 요구조건을 선정하였다. 요구조건을 만족하는 압전유압펌프의 형상설계를 수행하였으며, 고속 동작 조건에서도 유체의 역류를 효과적으로 차단시킬 수 있는 체크밸브를 비롯한 모든 구성품을 제작하였다. 제작된 압전유압펌프의 성능검증을 위해 실험장치를 구성하여 무부하 토출특성, 부하 시 압력형성 특성실험을 수행하였다. 실험결과, 무부하 최대 토출유량은 80 Hz에서 120.04 cc/min이고, 부하 시 최대 토출압력은 140 Hz에서 783.17 psi이고, 압력형성 반응속도는 약 30 ms 이내임을 확인하였다. 이는 설계 제작된 압전유압펌프가 펌프성능 요구조건을 충족하고 있다고 판단된다.

Key Words : Piezoelectric-Hydraulic Pump(압전유압펌프), Piezoelectric Actuator(압전 작동기), Check Valve(체크밸브), UAV Brake System(무인기 브레이크 시스템)

† Received : August 6, 2015 Revised : August 17, 2015 Accepted : August 18, 2015

** Corresponding author, E-mail : jhhwang@kau.ac.kr

I. 서 론

항공기는 이착륙 시 지상에서의 제동운동과 정지 상태를 유지하기 위해 브레이크 시스템이 반드시 필요하다. 브레이크를 구동하는 동력으로는 대부분 유압을 사용하고 있다. 그러나 브레이크 유압시스템은 일반적인 유압시스템과 달리 적은 유량과 높은 압력이 필요하다는 특성을 가지고 있다. 현재 사용되고 있는 대부분의 항공기의 브레이크 시스템은 동력펌프, 저유기, 압력조절기, 서보밸브, 체크밸브 및 전자제어장치 등 복잡한 부품으로 구성되어 있어 많은 공간을 필요로 하며 중량도 큰 편이다. 하지만 중소형 무인항공기의 경우 브레이크 시스템을 제외하고는 유압을 사용하지 않으므로, 공간적 제약과 중량의 제한이 큰 기존 항공기 유압계통을 브레이크 시스템에 그대로 적용하는 것은 비효율적이다. 따라서 중소형 무인항공기에 적용할 수 있는 보다 소형화된 효율적인 유압 브레이크 시스템 기술개발이 절실히 요구된다. 이러한 문제 해결을 위해, 착륙장치 스트럿 주변에 소규모 유압회로를 구성하고 브레이크 시스템에만 유압을 공급할 수 있는 소형 압전유압펌프의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 공간적 제약 및 중량의 제한이 있는 중소형 무인기 브레이크 시스템에 적용할 수 있는 소형 압전유압펌프를 개발하고 제작하여 그 성능을 실험을 통해 검증하고자 한다. 최근 유압펌프의 크기 및 무게를 줄이기 위해 지능재료 작동기를 동력원으로 적용하는 연구가 많이 수행되었다[1-4]. 지능재료펌프에 사용되고 있는 지능재료로는 형상기억합금(SMA), 이온폴리머(Ionic Polymer), 압전세라믹(PZT) 등이 있다. 브레이크 시스템의 특성상 요구되는 빠른 응답속도, 높은 배압, 적정 토출유량 등을 고려하면 실제로 적용할 수 있는 지능재료 구동기는 압전세라믹 작동기이다. 압전세라믹 작동기는 다른 지능재료 작동기에 비해 큰 힘을 발생시킬 수 있고, 고속 동작이 가능하다는 장점이 있지만 기계적 변위가 매우 작다는 단점도 가지고 있다[5-12]. 작동기의 변위가 작은 단점은 브레이크 시스템에서는 큰 문제가 되지 않고 극복 가능한 단점이다. 이는 브레이크 시스템이 개방 유압회로가 아니라 폐루프 유압회로이므로 큰 유량을 필요로 하지 않기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 기계변위식 지능재료 중 하나인 압전 작동기를 유압펌프의 동력원으로 사용하였다. 압전 작동기를 적용한 유압펌프는 압축행정에 따른 토출유량이 작지만, 반응 속도가 매우 빠르기 때문에 구동속도를 높여 적절한 유량을 얻을 수 있다

[3-4]. 압전유압펌프는 고속으로 구동해야 하는 특성상 관성이 큰 볼-스프링 체크 밸브의 적용은 어렵다. 그러므로 소형이면서 압전 작동기의 고속 동작 조건에서 유체의 역류를 효과적으로 차단시킬 수 있는 판 스프링형 체크 밸브의 적용이 필요하다[13-14].

본 논문에서는 중소형 무인항공기의 브레이크 시스템에 적용 가능한 소형 압전유압펌프를 설계 제작하였다. 해당 중소형 무인기급 항공기 브레이크 시스템의 요구조건을 분석하고 이를 만족하는 압전유압펌프의 성능 요구조건을 도출하였다. 아울러 압전유압펌프의 형상설계와 함께 고속으로 동작하는 수동형 판 스프링형 체크밸브를 설계하였다. 설계된 압전유압펌프를 제작하고 성능 실험을 수행하여 압전유압펌프 요구조건을 만족하는지 확인하였다.

II. 압전유압펌프 설계

항공기 브레이크는 착륙 시 운동에너지를 디스크 브레이크에서 마찰과 활주로와 타이어 사이의 마찰에 의한 열에너지로 변환시켜 항공기의 운동을 정지시키는 장치이다[15]. 본 연구에서 고려한 대상 항공기는 중소형 무인기급 항공기와 비슷한 중량 및 성능을 가지는 경량 단발 항공기를 FAA 핸드북을 참고하여 선정하였다. 항공기 브레이크 시스템의 주요 설계 변수로는 항공기의 중량, 제동속도, 주륜 휠의 개수, 요구되는 제동거리 및 감가속도 등이 있다. 따라서 선정된 항공기의 제원을 이용하여 브레이크 시스템의 요구조건을 분석하였으며 선정된 항공기의 형상은 Fig. 1에 나타내었으며, 상세한 제원은 Table 1에 표기하였다[16-17].

브레이크의 압력은 정적압력과 동적압력으로 구분된다. 정적압력은 항공기가 정지해 있거나 엔진이 작동 중에 있을 때 정지상태를 유지하기 위한 압력이다. 동적압력은 항공기가 착륙 시 정지하기 위한 압력이다. 두개의 압력 중 큰 값은

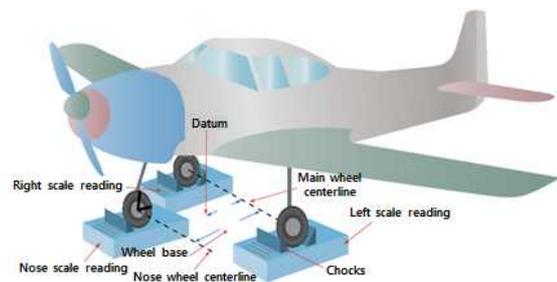


Fig. 1. Target airplane figuration

Table 1. Specification of target airplane

Parameters		Value
Max. Take-off Weight [MTOW]		5,862 <i>lb</i>
Design Landing Weight [DLW]		4,000 <i>lb</i>
Stall Speed	MTOW	70 <i>knots</i>
	DLW	65 <i>knots</i>
Deceleration Rate	Nomal	6 <i>ft/sec</i> ²
	RTO	10 <i>ft/sec</i> ²
Radius of Tire		7.88 <i>inch</i>
Number of Main Tire		2 <i>EA</i>

Table 2. Design requirements of piezoelectric-hydraulic pump

Parameters	Value
Normal Operating Pressure	450~500 <i>psi</i>
Outlet Flow Rate	≥0.04 <i>cc/stroke</i>
Response Time	≤30 <i>msec</i>
Operation Speed	0~150 <i>Hz</i>

동적압력이며, 이 값을 기준으로 펌프의 정상 작동 압력을 산출하였다.

제동에너지는 설계 대상 항공기의 제원을 기준으로 설계착륙중량(DLW) 조건에서 항공기의 실속속도 65 *knots*를 항공기 착륙속도로 가정하여 산출하였다. 펌프의 정상 작동압력은 설계착륙중량과 제동에너지를 고려하여 동적 압력을 약 450 *psi*로 선정하였다[18]. 유량 요구조건은 브레이크 패드와 디스크 사이의 거리에 따라 달라지는 값이다. 본 연구에서 설계하고자 하는 압전유압펌프의 토출유량은 브레이크 패드가 디스크에 접촉한 상태에서 배관의 팽창을 고려하여 일회 설계 유량의 크기를 0.04 *cc*로 선정하였다. 압전유압펌프가 유압을 형성시키는 응답시간은 브레이크 시스템의 ABS 기능을 고려하여 30 *ms*으로 선정하였다[18-19]. 마지막으로 압전 작동기는 고속으로 동작이 가능하기 때문에 작동주파수를 0~150 *Hz*로 선정하였다. 본 연구에서 개발하는 압전유압펌프의 설계 요구도는 Table 2과 같다.

본 연구의 압전유압펌프는 피스톤방식 펌핑 메커니즘을 사용하였으며, 압전 작동기에 인가하는 전압에 따라 압축(Compression), 토출(Exhaustion), 팽창(Expansion) 및 흡입(Intake)의 4단계 과정을 통하여 챔버 내 압력을 형성하게 된다. Fig. 2는 이러한 피스톤 방식의 펌핑 메커니즘을 보여주는 개략도이다[7][10].

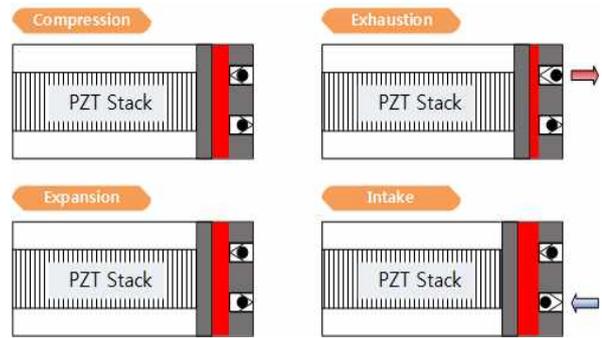


Fig. 2. Sequences of piston-type pumping mechanism

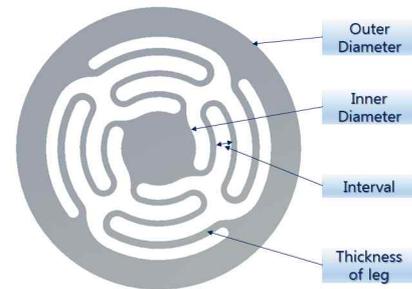


Fig. 3. Shape of spring sheet type check valve

압전유압펌프에 채택된 체크밸브는 압전 작동기의 고속 동작에 따라 움직일 수 있는 수동형 판 스프링 체크밸브이며 그 형상은 Fig. 3에서 나타낸 바와 같다[14]. 체크밸브는 유압펌프의 필수부품이며 압전 작동기의 고속 동작 조건에서 유체의 역류를 효과적으로 차단시킬 수 있도록 설계하였다. 설계된 체크밸브는 고정되는 외경, 작동유의 흐름을 제한하는 내경으로 구성되어 있으며, 다리의 치수형상 및 재료 물성치에 따라 스프링 강성이 변하게 된다. 체크밸브의 고유진동수는 압전유압펌프의 운전속도 150 *Hz*에 영향을 주지 않도록 구조-유체연성 고유진동수가 200 *Hz* 이상이 되도록 설계하였다.

압전유압펌프의 토출특성에 영향을 주는 펌핑 챔버의 직경은 수학적 모델링을 통하여 이론적으로 산출하였으며 이를 형상 설계에 적용하였다[10-11]. 압전유압펌프의 토출압력 P 는 펌핑되는 챔버 내부에서 생성되는 압력을 나타내며 식(1)과 같다.

$$P = \frac{F_{Total}}{A_{Ch}} = \frac{F_b - x_p K_{Ch}}{A_{Ch}} \quad (1)$$

여기서, F_b 은 적층형 압전 작동기의 최대 구동력이고 x_p 는 피스톤이 실제 움직인 거리, A_{Ch} 는 챔버의 면적 그리고 K_{Ch} 는 챔버 내의 유체 강성이

Table 3. Specification of piezostack(PZT) actuator

Parameters	Value
Size	Ø39.8 mm, L94 mm
Max. Displacement	60 μm
Blocked Force	12500 N
Capacitance	1300 nF
Stiffness	200 N/μm
Operating Voltage	0 to 1000 V

다. 피스톤이 실제 움직인 거리 x_p 와 챔버 내의 유체 강성 K_{ch} 은 다음 식(2)와 (3)을 통하여 계산할 수 있다.

$$x_p = \frac{K_{stack}}{K_{stack} + K_{Ch}} x_{free} \quad (2)$$

$$K_{ch} = \frac{\beta A_{Ch}}{L_{ch}} \quad (3)$$

여기서, K_{stack} 은 압전 작동기의 강성, x_{free} 는 압전 작동기의 최대 변위, β 는 작동유체의 체적 탄성률 그리고 L_{ch} 는 챔버의 높이이다. 또한, 펌프의 실제 토출유량 Q 는 챔버의 면적 A_{ch} , 적층형 압전 작동기에 의한 피스톤 변위 x_p 그리고 작동주파수 f 로 구할 수 있다.

$$Q = 60A_{Ch} \cdot x_p \cdot f \quad (4)$$

계산결과를 바탕으로 얻어진 Table 6의 요구 조건을 충족시키기 위해, 압전유압펌프에 적용할 압전 작동기는 PI 회사의 'P-225.40'로 선정하였다. 선정된 압전 작동기는 최대 인가 전압 1000 V에서 최대 12500 N의 힘과 60 μm의 변위를 가지며 상세사양은 Table 3과 같다.

Figure 4는 압전유압펌프의 작동원리를 나타낸 것이다. 압축 과정에서는 양쪽 체크밸브가 닫혀져 있는 상태에서 적층형 압전 작동기의 기계적 변위에 의해 챔버 내의 압력이 상승하게 된다. 토출과정에서는 챔버 내의 압력이 토출구 쪽 체크밸브의 크래킹 압력보다 크게 되면 토출구 체크밸브가 열리게 되어 유량이 토출구로 나가게 된다. 팽창 단계에서는 양쪽 체크밸브가 닫혀져 있는 상태에서 적층형 압전 작동기의 수축으로 챔버 내의 압력이 감소하게 된다. 흡입과정에서는 챔버 내의 압력이 흡입구 쪽 체크밸브의 크래킹 압력보다 작아지면 흡입구 체크밸브가 열리면서 챔버 안쪽으로 유체를 흡입한다. 이러한 4단계의 펌핑과정을 통해 흡입구 쪽의 유체를 토출구 쪽으로 펌핑할 수 있다.

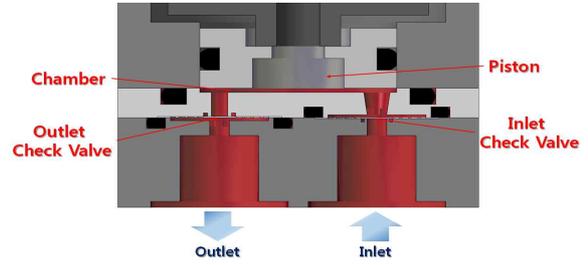


Fig. 4. Operating principle of the piezoelectric-hydraulic pump

Table 4. Dimension of the piezoelectric-hydraulic pump

Parameters	Dimension
Total Size	55 X 55 X L 127.9 mm
Chamber	Ø 30 mm t 0.5 mm
Piston	Ø 30 mm t 11.9 mm
Check Valve	Ø 19 mm t 0.2 mm

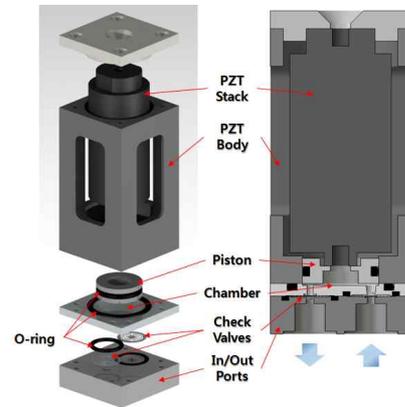


Fig. 5. Configuration of the piezoelectric-hydraulic pump

본 연구에서 다루는 압전유압펌프의 상세 설계내용은 다른 논문에서 발표될 예정이며 본 논문에서는 설계 요약결과를 기술하였다. 본 연구에서 설계된 압전유압펌프의 자세한 형상은 Fig. 5에 나타내었고, 치수는 Table 4에 정리하여 나타내었다. 압전유압펌프의 구조는 Fig. 5에 표시된 바와 같이 적층형 압전 작동기, 피스톤, 체크밸브 및 하우징 등으로 구성되어 있다. 체크밸브 및 피스톤과 같이 유체와 닿는 부분에는 O링을 설치하여 유압이 손실되지 않도록 하였다.

III. 압전유압펌프 성능실험

3.1 압전유압펌프 제작 및 실험장치

전절에서 설계된 압전유압펌프의 성능을 검증



Fig. 6. Components of piezoelectric-hydraulic pump

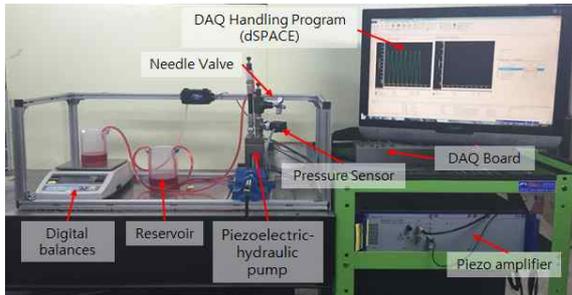
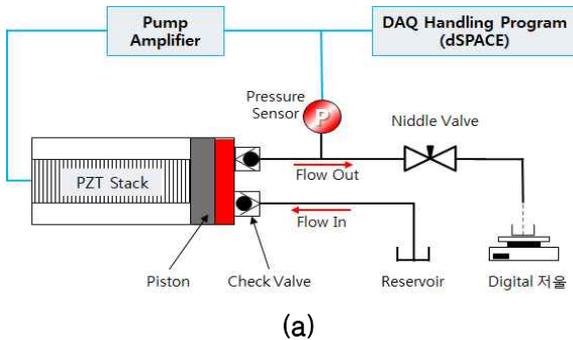


Fig. 7. (a) Schematic diagram of experiment setup; (b) Experimental setup for performance test of piezoelectric-hydraulic pump

하기 위해, 설계결과를 바탕으로 압전유압펌프를 제작하였다. 설계된 압전유압펌프의 구성품은 전부 모듈화 시켜 구성품 교체를 용이하게 하였다. 구성품들은 정밀 기계가공 작업을 거쳐 제작하였고, 체크밸브의 경우 얇고 형상이 복잡하기 때문에 와이어컷 방전가공을 이용하여 제작하였다. 제작된 압전유압펌프의 부품은 Fig. 6에 나타난 바와 같다.

제작된 압전유압펌프의 성능측정을 위하여 Fig. 7과 같이 DAQ 프로그램, 고전압증폭기, 압력센서, 니들밸브 및 전자저울 등 실험 장치를 구성하였다. DAQ 프로그램은 'dSPACE'를 사용하였으며 디지털 신호와 아날로그 신호를 변환하

여 신호 수집 및 생성이 가능하다. 고전압증폭기는 생성된 신호를 증폭시켜 압전 작동기에 높은 구동전압으로 인가하는 역할을 하며 요구되는 구동주파수에서 출력이 나올 수 있는 PI회사의 'E-481'모델을 사용하였다. 압전유압펌프의 토출구에 연결된 니들밸브는 압전유압펌프의 토출성능실험에서 중요한 역할을 한다. 니들밸브를 개방할 경우 무부하 상태에서의 유량을 전자저울로 측정할 수 있다. 니들밸브를 막을 경우 브레이크 시스템과 같은 폐루프 유압회로가 형성되며 압력센서를 이용하여 토출구의 압력을 측정할 수 있다. 또한 작동유로는 실제 항공기 브레이크 유압계통에 사용하는 'Mil-PRF-83282'를 사용하였다.

3.2 실험 결과 및 토의

압전유압펌프의 유량특성을 알아보기 위해서 다음과 같은 과정을 통해 무부하 유량실험을 수행하였다. 먼저 토출구에 연결된 니들밸브를 개방하고, 니들밸브를 통과 후 나오는 유량이 전자저울에 연결된 비이커에 들어가게 된다. 전자저울의 영점을 맞춘 상태에서, 적층형 압전 작동기에 각각의 구동주파수를 갖는 정현파를 1분 동안 인가해 무부하 상태의 토출유량을 구한다. 이 때, 구동전압은 900 V로 일정하게 유지하였다. 실험 측정의 정확성을 위해서 여러 회 반복실험을 수행하여 얻은 결과의 평균값을 사용하였다.

Figure 8은 무부하 상태에서 주파수에 따른 펌프의 토출유량을 측정한 그래프이다. 실험결과 60 Hz까지는 유량이 선형적으로 증가하다가 약 80 Hz에서 최댓값에 도달한 후 일정한 값으로 수렴되는 결과를 보였다. 토출유량이 수렴되는 이유로는 유체의 관성, 피스톤의 관성, 체크밸브 동작 등의 원인으로 판단된다. 최대유량은 80 Hz에서 120.04 cc/min이다.

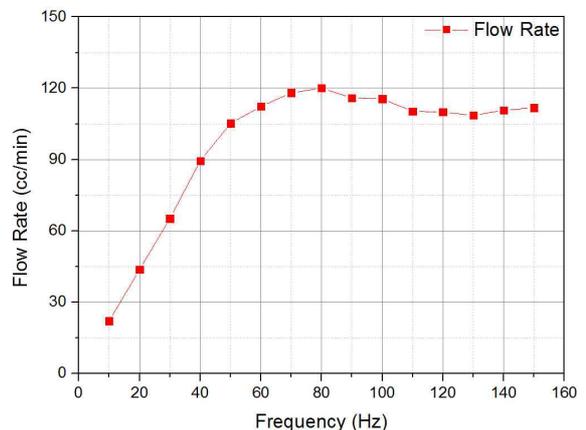


Fig. 8. Experimental result of pump outlet flow rate (no load condition)

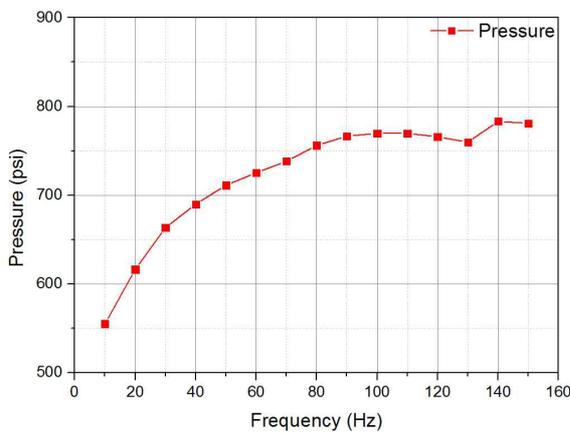


Fig. 9. Experimental result of pump outlet pressure(with closed loop)

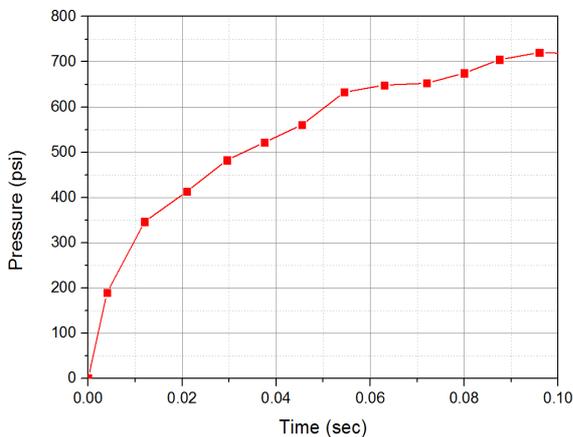


Fig. 10. Test result of pump outlet pressure development

다음으로 압전유압펌프의 토출 압력특성을 확인하기 위하여 역시 작동주파수를 변화시키면서 부하에서의 토출압력을 측정하였다. 압력 측정을 위해 니들밸브를 잠그면 유압부하 회로는 압전유압펌프 토출부의 체크밸브부터 끝단 니들밸브까지 폐루프를 형성하게 된다. 작동주파수를 10~150 Hz까지 변화시키면서 압전유압펌프 토출구의 부하유압회로의 작용압력을 압력센서를 이용하여 측정하였다. 유량측정 실험경우와 같이 적층형 압전 작동기에 정현파를 1분 동안 인가한다. 작동주파수는 10 Hz부터 150 Hz까지 10 Hz 단위로 변화시키면서 구동하였으며, 구동전압은 900 V로 일정하게 유지하였다.

Figure 9는 작동주파수에 따른 압전유압펌프 부하압력을 측정한 그래프이다. 작동주파수가 증가할수록 토출구 부하압력이 증가하는 결과를 얻었으며, 최대 압력은 140 Hz에서 발생하였으며 크기는 783.17 psi이다. 이 결과를 통해 작동주파

수가 증가할수록 압전유압펌프의 구성품인 압전 작동기와 토출구 체크밸브의 가압 동특성이 효율적으로 동작하고 있다고 판단된다. 압전 작동기가 140 Hz에서 동작할 때는 압전유압펌프의 압전 작동기의 가압특성이 가장 우수한 것으로 측정되었다. Fig. 10은 작동주파수 120 Hz으로 구동시킬 때 펌프 토출부의 부하유압회로 압력이 형성되는 과정을 측정한 그래프이다. 브레이크 작동을 위해 필요한 정상작동압력 450 psi에 도달되는 시간은 약 30 ms 이내이며, 펌프 요구도를 만족하는 결과임을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 압전재료를 이용하여 중소형 무인기 브레이크 시스템에 적용 가능한 압전유압펌프를 설계 및 제작하고, 제작된 압전유압펌프의 성능검증 실험을 수행하였다. 압전유압펌프 설계 제작을 위해 중소형 무인기급에 해당하는 항공기를 목표 항공기로 선정하고, 해당 항공기 브레이크 시스템의 요구도를 만족하는 소형 압전유압펌프 성능변수를 분석하였다. 압전유압펌프의 구동방식은 피스톤 방식 펌핑 메카니즘을 채택하였고, 펌프 구동기로는 압전스택형 작동기를 적용하였다. 압전유압펌프에 채택된 체크밸브는 압전 작동기의 고속 동작에 따라 움직일 수 있는 수동형 판 스프링 체크밸브로 설계하였다. 설계된 압전유압펌프의 구성품은 전부 모듈화 시켜 구성품 교체를 용이하도록 하였다.

본 연구에서 제작된 압전유압펌프의 성능실험을 위하여 별도의 유압회로 실험장치를 구성하였으며, 펌프의 무부하 토출유량 실험, 토출부 부하 압력 측정실험 및 압력형성 반응속도 실험을 수행하였다. 실험을 통해 무부하 최대 토출유량은 80 Hz에서 120.04 cc/min이고, 압전유압펌프의 최대 토출압력은 140 Hz에서 783.17 psi이고, 정상 압력 형성 반응속도는 약 30 ms 이내임을 확인하였다. 이러한 실험 결과를 통해 본 연구에서 설계 제작된 압전유압펌프가 펌프성능 요구조건을 충족하고 있음을 알 수 있다.

본 연구에서 제작한 소형 압전유압펌프를 항공기 브레이크 시스템의 유압동력원으로 적용한다면 기존의 유압 브레이크 시스템보다 매우 간단하게 브레이크 유압회로를 구성할 수 있다. 따라서 공간상 제약이나 중량의 제한이 많은 중소형급 무인기 브레이크 시스템에 이 펌프를 적용한다면 많은 장점이 있을 것으로 판단된다.

후 기

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

Reference

- 1) H. K. Ma, B. R. Hou, H. Y. Wu, C. Y. Lin, J. J. Gao, M. C. Kou, "Development and application of a diaphragm micro-pump with piezoelectric device," *Journal of Microsystem Technologies*, Vol. 14, No. 7, 2008, pp.1001~1007.
- 2) Kan Junwu, Yang Zhigang, Peng Taijiang, Cheng Guangming, Wu Boda, "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) Young Bog Ham, Sung Jin. Oh, Woo Suk Seo, Jung Ho Park, So Nam Yun, "A Piezoelectric Micropump for Microscale Pumping Systems," *Journal of Drive and Control*, Vol. 36, No. 2, 2009, pp.17~25.
- 4) 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.
- 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) Taeh Lee, Inderjit Chopra, "Design of Piezostack- driven Trailing-edge Flap Actuator for Helicopter Rotors," *Journal of Smart Materials and Structures*, Vol. 10, No. 1, 2001,
- 9) Jason E. Lindler, Eric H. Anderson, "Design and Testing of Piezoelectric-hydraulic Actuators," *SPIE Smart Structures and Materials Symposium, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technology*, 2003, pp.96~107.
- 10) Zhefeng Xuan, Tailie Jin, Ngoc San Ha, Nam Seo Goo, Tae Heun Kim, Byung Woon Bae, Han Seo Ko, KiWon Yoon, "Performance of piezo-stacks for a piezoelectric hybrid actuator by experiments," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 25, No. 18, 2014, pp.2212~2220.
- 11) Jayant Sirohi, Inderjit Chopra, "Design and Development of a High Pumping Frequency Piezoelectric-Hydraulic Hybrid Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 14, No. 3, 2003, pp.135~147.
- 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," *SASE Spring Conference*, 2014.
- 13) Yonghwi Joo, Jaihyuk Hwang, Jaesung Bae, Jonghoonlee, Jaeup Hwang Junyong Kwon, "The Design on the Check Valve of Smart Material Hydraulic Pump," *SASE Spring Conference*, 2014.
- 14) Yongwhi Joo, Jaihyuk Hwang, Jaesung Bae, Jiyoun Yang, Junyong Kwon, "The Design on the Spring Sheet Type Check Valve of Smart Material Hydraulic Pump," *SASE Fall Conference*, 2014.
- 15) Jang-Hyun Lee, Hyun-Ho Yum, Min-Sung Hong, "A Study on the Antiabrasion of the Aircraft Carbon Disk Brake," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 21, No.6, 2012, pp.968~975.
- 16) FAA-H-8083-1A, *Aircraft Weight and Balance Handbook*, U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Flight Standards Service, 2007.

17) FAA-H-8083-30, Aviation Maintenance Technical Handbook, U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Flight Standards Service, 2008.

18) Ladislao Pazmany, "Landing Gear Design for Light Aircraft Vol. I."

19) Rudolf Lipert, "Brake Design and Safty," SAE, 1982.