

양방향 압전-유압 하이브리드 구동장치의 성능 시험

김소룡¹⁾ · 하낙산¹⁾ · 구남서^{*1)} · 배병운²⁾ · 김태훈²⁾ · 고한서³⁾ · 이창섭⁴⁾

¹⁾ 건국대학교 융합인재학부/신기술융합학과

²⁾ (주)퍼스텍 기술센터

³⁾ 성균관대학교 기계공학부

⁴⁾ 국방과학연구소 제1기술연구본부

Performance Evaluation of a Bidirectional Piezoelectric Hybrid Actuator

Xiaolong Jin¹⁾ · Ngocsan Ha¹⁾ · Namseo Goo^{*1)} · Byungwoon Bae²⁾ · Taeheun Kim²⁾ · Hanseo Ko³⁾ · Changseop Lee⁴⁾

¹⁾ Department of Advanced Technology Fusion, Division of Interdisciplinary Studies, Konkuk University, Korea

²⁾ The 1st Research R&D Center, FIRSTEC CO., Korea

³⁾ Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea

⁴⁾ The 1st Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 24 November 2014 / Revised 20 May 2015 / Accepted 22 May 2015)

ABSTRACT

Piezoelectric-based hydraulic actuator is a hybrid device consisting of a hydraulic pump driven by piezoelectric stacks that is coupled to a conventional hydraulic cylinder via a set of fast-acting valves. Nowadays, such hybrid actuators are being researched and developed actively in many developed countries by requirement of high performance and compact flight system. In this research, a piezoelectric hybrid actuator has been designed and tested. To achieve bi-directional capabilities in the actuator, solenoid valves were used to control the direction of output fluid. The experimental testing of the actuator in uni-directional and bi-directional modes was performed to examine performance issues related to the solenoid valves. The results showed that the bi-directional performance was slightly lower than uni-directional performance due to air bubble developed in the valve system. A new design to solve the vacuum problem has been proposed to improve the performance of the hybrid actuator.

Key Words : Hybrid Actuator(하이브리드 구동장치), Piezo-Stack(압전 스택), Blocking Force(구동력), Solenoid Valve(솔레노이드 밸브), Bidirectional Mode(양방향 모드)

* Corresponding author, E-mail: nsgoo@konkuk.ac.kr

Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

1. 서론

항공기, 유도무기, 그리고 자동차 등에 사용되고 있는 구동장치는 20세기 초의 기계식으로부터 시작하여 점차 중앙집중식 유압식, 전기식, 모터를 이용한 전기-유압 하이브리드 방식으로 발전하였다. 1970년대 말 유도 무기 개발이 시작되면서 부터 중앙집중식 유압식 구동장치의 개발이 시작되었으며, 상용화가 완료되었다. 전기 모터식 구동장치는 소형 유도무기의 편 제어에 적용되고 있으며, 공기식 구동장치도 자세 제어용으로 개발되어 실제 적용되고 있다. 최근 고성능 유도 무기와 UAV와 같은 소형 비행 시스템의 필요성이 대두됨에 따라 소형 구동 시스템의 개발이 필요로 하게 되었고, 스마트 재료의 연구가 진행됨에 따라 이를 이용하여 크기를 더 작게 하고 더 큰 성능을 낼 수 있으면서 기존의 유/공압 및 전기식 모터를 대체할 수 있는 고에너지 밀도를 가지는 집적형 하이브리드 구동장치를 개발하려는 시도가 활발히 진행되고 있다.

집적형 하이브리드 구동장치는 적층형 압전재료(압전 스택)를 이용한 마이크로 펌프에서 토출되는 유체로 피스톤을 구동시키는데, 크기는 작으면서도 큰 구동력과 높은 속도를 동시에 출력할 수 있는 새로운 개념의 통합 구동장치이다. 집적형 하이브리드 구동장치는 일반적으로 압전 스택, 축압기, 실린더, 유체, 유관, 전원과 제어장치로 구성되어 있다. 그 중 압전 스택은 집적형 하이브리드 구동장치의 주동력이며 압전 스택의 성능이 전체 시스템의 성능을 결정한다. 또한 집적형 하이브리드 구동장치의 최대 이송속도 또는 최대 구동력은 압전 스택을 구동하는 주파수, 전압에 따라 약간의 차이가 있으며 같은 시스템도 부하 조건에 따라 차이가 발생한다.

현재까지 지능재료를 기반으로 한 다양한 디자인과 다양한 성능을 지닌 하이브리드 구동장치들의 연구가 진행되어 왔다. 2000년부터 2007년까지 Mauck, Sirahi, Lindler, Cadou, Tan 등^[1-5] 이 제작한 대부분의 구동장치는 모두 압전 스택(lead zirconate titanate)을 사용하였고 그 외에도 단결정 PMN-PT 스택과 MR 유체인 Terfenol-D를 사용한 연구가 있었다. PMN-PT 스택을 사용한 구동장치의 경우 최대 이송속도가 330 mm/s^[6]로 PZT 스택을 사용한 연구의 최대 출력인 228.6 mm/s보다 44 % 증가하였다. 하지만 사용된 PMN-PT 스택의 탄성계수는 15-20 GPa 정도로 압전 스택보다 낮아서 구동력을 크게 하는 데는 적합하지 않으며 PMN-PT

스택의 특성상 높은 온도에서 성능이 저하되는 단점이 있다.

압전 스택은 큰 힘을 생성할 수 있는 반면 작은 변형률을 가지고 있다. 보편적인 압전 스택은 1-2 MVm⁻¹ 영역에서 25-50 MPa의 힘을 생성할 수 있으나 변형률이 0.1-0.15 %로 제한되어 있다. 반면 단결정 재료(PMN-PT)는 같은 영역에서 변형률을 1 %까지 생성할 수 있으나 10-20 MPa의 보다 작은 힘을 가지고 있다^[5].

본 연구실에서는 하이브리드 구동장치의 큰 구동력을 기대하면서 압전 스택을 구동 재료로 사용하였고 구동원리의 이해 및 압전 스택의 선택 방법에 대해 이해하고자 단방향 압전-유압 하이브리드 구동장치를 아래 그림 Fig. 1과 같이 제작하였다^[7-8]. 단방향 구동장치의 성능 시험 결과 개발된 집적형 하이브리드 구동장치의 최대 구동 속도는 53.3 mm/s, 최대구동력은 346 N으로 측정되었다. 하지만 단방향 구동이라는 설계 상의 제한이 때문에 실린더 피스톤의 구동방향을 제어하지 못한다는 단점이 있었다.

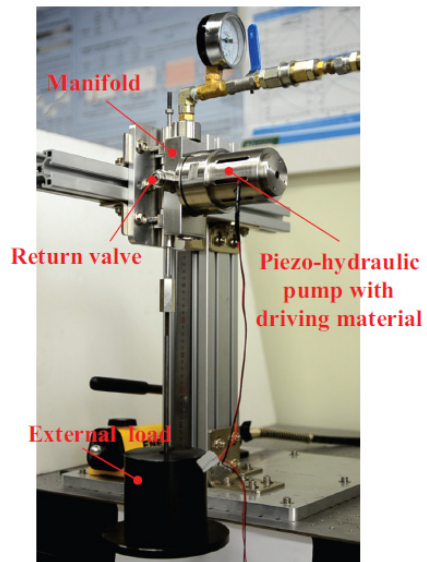


Fig. 1. Benchmarking product of piezoelectric hybrid actuator

본 연구에서는 이전의 단방향 구동장치의 성능을 개선하여 큰 최대구동력을 가지는 양방향 압전-유압 하이브리드 구동장치를 연구하였다. 기본적인 설계 기법을 사용하여 압전 펌프와 실린더의 크기를 결정하는 등의 설계 작업을 거쳐 양방향 압전-유압 하이브리드

구동장치를 제작하였다. 또한 구동 성능을 계측하여 구동 장치를 분석하고 성능 개선 방안을 도출하였다.

2. 구동장치 설계

Fig. 2에 양방향 압전-유압 하이브리드 구동장치의 개념도를 나타내었다. 양방향 압전-유압 하이브리드 구동장치는 압전 펌프, 솔레노이드 밸브, 유압실린더 3개 부분으로 구성되어 있다. 압전 펌프에는 리드 밸브를 사용하여 유동이 한 방향으로 흐르도록 되어 있고 압전 펌프와 유압 실린더 사이에 솔레노이드 밸브를 설치하여 유체의 방향을 제어하여 실린더 축이 양방향으로 움직이도록 제어한다.

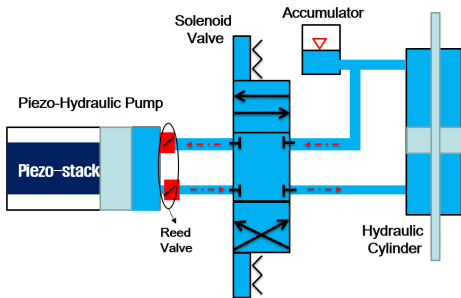


Fig. 2. Design of bidirectional hybrid actuator system

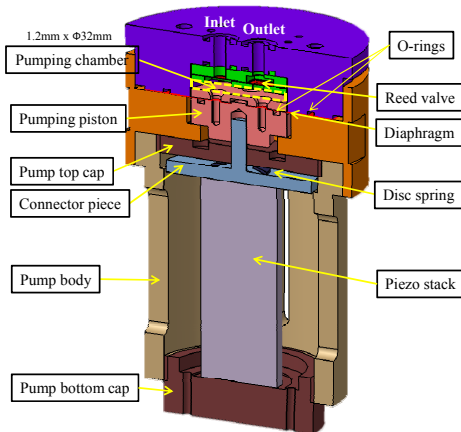


Fig. 3. Cross-section view of the piezo hydraulic pump

Fig. 3에 나타낸 압전 펌프 (L120×Ø80) mm는 유압을 생성하는 중요한 부분으로써 시스템 전체 성능에

영향을 줄 수 있는 많은 부품들, 예를 들어 압전 스택, 펌핑 챔버, 리드 밸브 등으로 구성되어 있다. 압전 스택은 전체 시스템을 구동시키는 주동력으로써 압전 스택의 수축과 팽창이 유압을 생성하여 실린더를 움직인다. Fig. 3에서와 같이 압전 스택에 펌프 아래쪽 캡 (pump bottom cap)과 디스크 스프링(disc spring)에 의해 초기 하중(preload)을 가하였다.

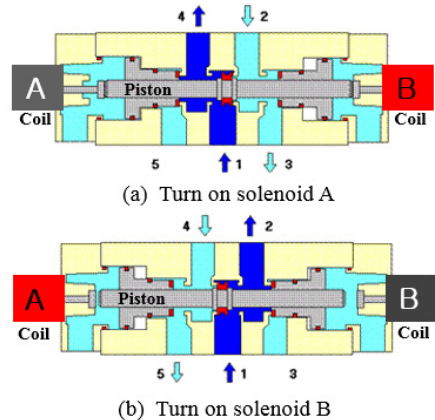


Fig. 4. Solenoid valve operating principle

Fig. 4에는 솔레노이드 밸브의 작동원리 개념도를 나타내었다. A, B는 솔레노이드 코일이 장착된 위치이고 중간 회색부분은 피스톤이며 오일 통로는 1~5 숫자로 표시된다. 2번과 4번 통로는 각각 실린더 양쪽의 포트와 연결되어 있고 1번은 펌프 입구(inlet)과 연결되어 있으며 3번과 5번은 서로 연결되어 있으며 펌프 출구(outlet)와 연결되어 있다. B코일이 작동할 때에는 피스톤이 B쪽으로 움직이고 액체가 4번으로 토출된다. 반면 A코일이 작동하면 피스톤이 A쪽으로 이동하고 액체가 2번으로 토출된다. 본 연구에서는 YUKEN DSG-01시리즈 솔레노이드 밸브를 사용하였고 LabVIEW 프로그램을 사용하여 코일을 제어하여 실린더의 구동 방향을 제어하였다.

3. 구동원리 및 수학적 모델링

3.1 구동원리

압전 펌프의 한 주기의 작동 과정은 압축(compression), 분출(exhaustion), 팽창(expansion) 및 흡입(intake)의 네 개의 단계로 Fig. 5에서와 같이 구분된다.

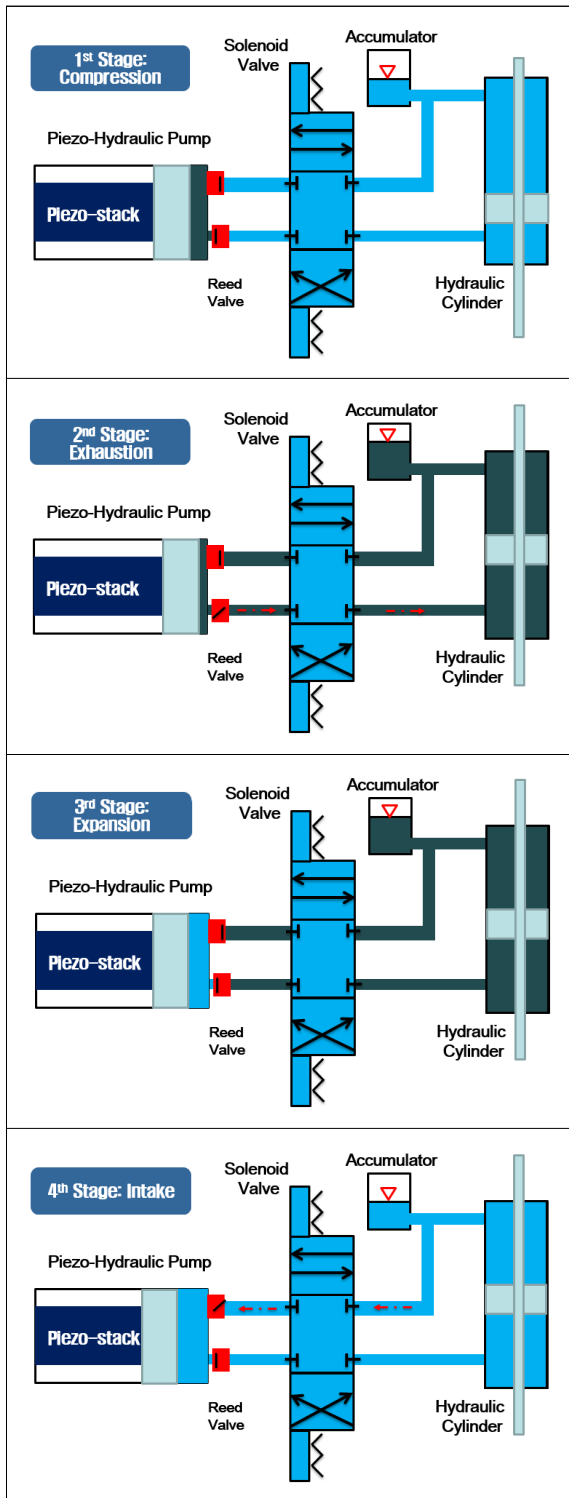


Fig. 5. Principle of hybrid actuator operation

(제 1 단계: 압축)

압축 단계에서는 입/출구 리드밸브가 닫힌 상태에서 압전 스택에 전압이 가해지면 수축/팽창을 반복하면서 펌핑 챔버 내의 압력이 높아진다.

(제 2 단계: 분출)

압력이 축압기 압력보다 높아지면 압력차에 의해서 출구 리드 밸브가 열리면서 유체가 실린더로 흘러들어 피스톤을 동작시킨다.

(제 3 단계: 팽창)

팽창 단계에서는 피스톤 동작 후 압력차이가 없으면 입/출구 리드밸브가 닫히며, 압전 스택에 전압이 가해지지 않으면 수축되면서 펌핑 챔버의 내부압력이 낮아진다.

(제 4 단계: 흡입)

압력이 축압기 압력보다 낮아지면 입구 리드 밸브가 열리면서 유체를 흡입하게 된다.

압전 스택의 구동에 따라 이러한 네 단계를 반복함으로써 유체의 흐름 및 압력을 생성하고 실린더를 움직이게 하여 기계적 에너지를 생성한다. 이와 더불어 실린더 축의 상하 방향으로의 구동은 솔레노이드 밸브에서 유동 방향을 변경하여 제어한다.

3.2 수학적 모델링

본 연구의 수학적 모델링은 주로 압전 펌프와 유압 실린더에서 도출된 공식들을 사용하였다. 유체의 체적 탄성률은 압전 펌프의 성능에 많은 영향을 미친다. 유체의 유효한 체적탄성률의 계산공식은 식 (1)과 같다.

$$\beta_{eff} = - \frac{V\Delta P}{\Delta V} = \frac{V\Delta P}{(\Delta V_{fluid} + \Delta V_{air} + \Delta V_{tube})} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{\left(\frac{1-x}{\beta_{fluid}} + \frac{x}{\beta_{air}} + \frac{D}{tE}\right)}$$

여기에서, β_{eff} 는 유효 체적탄성률, β_{fluid} , β_{air} 는 유체와 공기의 체적탄성률, ΔP 는 압력변화량, ΔV 는 체적 변화량, x 는 공기함유량 백분율, t 는 유관의 두께, D 는 유관의 직경, E 는 유관의 탄성률을 나타낸다.

높은 유체 탄성률은 유체 강성과 공진 주파수를 증가시키고 압력손실을 감소시킨다. 시스템의 체적탄성률이 줄어드는 주요 원인은 유체 내부에 공기가 존재하기 때문이다. 그러므로 체적탄성률을 증가시키기 위

하여 유체 내부의 공기를 완전히 제거하고 예압도 함께 사용해야 한다. 하지만 지나치게 높은 예압은 시스템의 성능을 감소시키기에 적당한 예압이 필요하다. 본 연구에서는 주로 2 MPa 예압을 사용하였다.

압전 스택의 구동은 전체 시스템에 에너지를 공급하는데 펌프로부터 유동을 생성하고 이를 실린더에 공급하여 피스톤을 작동시킨다. 본 연구에서 사용하는 압전 스택은 PI사가 만든 P-025.40 압전 스택 (L60×∅25) mm이고 최대변위 60 μm, 용량 1300 nF, 최대구동력은 13000 N이다.

펌프 챔버 안의 유체의 압력은 $P_{chamber}$ 로 나타내고 아래 식 (2)과 같다.

$$P_{chamber} = \frac{F_0}{A_{chamber}} \quad (2)$$

여기에서 $A_{chamber}$ 는 펌프 챔버의 면적이고 F_0 는 압전 스택에 의해 도출된 구동력으로 이는 식 (3)으로부터 구할 수 있다.

$$F_0 = F_b - \delta_0 K_{stack} \quad (3)$$

여기에서 F_b 는 압전 스택의 최대 구동력, δ_0 는 압전 스택의 실제 변위, $K_{chamber}$ 는 펌프 챔버의 강성을 나타낸다. 펌프 챔버의 강성을 구하는 공식은 아래 식 (4)와 같다.

$$K_{chamber} = \frac{\beta A_{chamber}}{L_{chamber}} \quad (4)$$

여기에서 $L_{chamber}$ 는 챔버의 길이를 나타낸다.

실린더의 운동은 전체 시스템의 성능을 결정하기 때문에 실린더 직경은 시스템의 구동력과 구동 속도에 많은 영향을 미친다. 실린더 직경의 증가에 따라 최대 구동력이 증가한다. 식 (5)로 구동력과 구동 속도를 구할 수 있다.

$$P_{ext} = P_{chamber} = \frac{F_{ext}}{A_{ext}} \Rightarrow F_{ext} = P_{chamber} A_{ext} \quad (5)$$

여기에서 A_{ext} 는 실린더의 횡단면 면적과 중앙축 면적의 차이, F_{ext} 실린더에 가해지는 모든 외부의 하중

을 나타낸다.

본 연구의 목표는 보다 높은 성능을 가진 양방향 구동 장치를 개발하는 것이다. 따라서 단방향 구동장치 시제품을 연구하였던 경험과 위에서 제시한 수학적 모델링을 이용하여 최종적으로 본 연구의 챔버 직경을 30 mm로 정하고 유압실린더의 직경을 21 mm로 정하였다. 실제 제작된 구동 장치는 Fig. 6과 같다. 앞에서 설명한 것과 같이 시스템은 압전 펌프, 솔레노이드 밸브, 유압실린더 3개 부분으로 구성되었다.

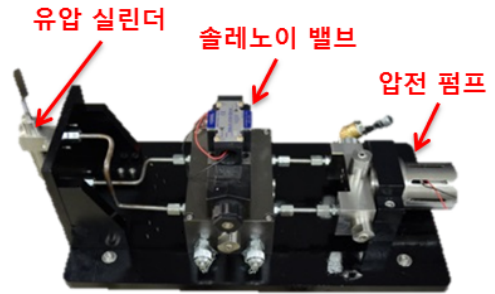


Fig. 6. Actual bidirectional hybrid actuator system

4. 시스템의 성능 평가

제작된 양방향 압전-유압 하이브리드 구동 장치를 이용하여 구동 속도를 측정하였다. 실험은 무하중 상태에서 진행되었고 전압 1000 V, 예압 2 MPa 조건에서 0 Hz부터 300 Hz까지의 주파수로 실린더 축을 상하 방향으로 구동시켰다. 이론적인 최대 구동 주파수는 식 (6)을 사용하여 계산하였다⁹⁾.

$$f_{max} = \frac{I_{max}}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot V_{max}} \quad (6)$$

여기에서 f_{max} 는 최대 구동 주파수, I_{max} 는 앰프의 최대 출력 전류, C 는 압전 스택의 전기용량, V_{max} 는 앰프의 최대 출력 전압을 나타낸다.

식 (6)의 계산결과 최대 주파수는 245 Hz로 계산되어 실제 사용된 주파수(300 Hz)보다 작는데, 이는 이론적 계산에서는 사인파 전압을 사용하지만 실험에서는 구형파 전압을 사용하기 때문이다¹⁸⁻⁹⁾.

Fig. 7에 실린더 축의 상향 및 하향 속도를 나타내었다. 구동 속도는 250 Hz에서 제일 높고 300 Hz부터는

감소하는 현상이 보였다. 그래프에서와 같이 최대 구동 속도는 50.9 mm/s이고 실린더 축의 상향 구동 속도는 된 하향 구동 속도와 거의 같은 수치로 측정되었다. 이로부터 실린더의 구동이 양쪽 방향으로 원활하게 잘 이루어지는 것으로 확인하였다.

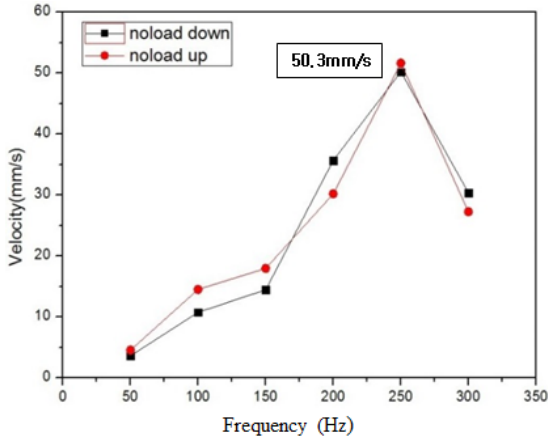


Fig. 7. Output velocity with different pumping frequency in no-load test

Fig. 8에는 부하상태에서는 외부 실린더 축에 다양한 무게를 가하면서 구동 속도를 측정한 결과를 나타내었다. 이 실험에서는 전압 1000 V, 구동 주파수가 200 Hz, 예압 2 MPa 등 조건을 사용하였다. 최대 구동력은 선형 피팅을 이용하여 추정하였으며 그 결과 약 142.5 N로 나타났다.

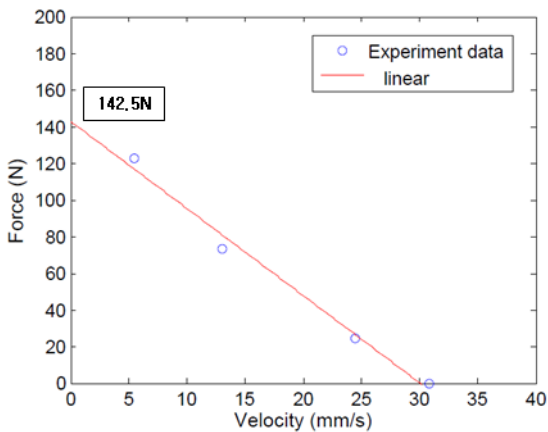


Fig. 8. Force-velocity diagram with 1000 V and 200 Hz pumping frequency

Table 1과 같이 양방향 압전-유압 하이브리드 구동기의 성능이 단방향 압전-유압 하이브리드 구동기의 성능보다 많이 떨어짐을 확인하였는데 이는 양방향 구동 시스템은 단방향 구동 시스템보다 복잡하여 단일 공기 배출구를 이용하여서는 공기의 완전 제거가 어려우므로 구동 장치의 성능을 제대로 발휘하지 못하기 때문이다. 따라서 더 좋은 성능을 얻기 위하여 구동 시스템을 개선을 도출하였다. 도출된 설계 안을 Fig. 9에 나타내었는데, 실린더 양단에 공기 배출구를 만들어 실험하기 전에 공기를 배출할 수 있도록 설계를 변경하였다.

Table 1. Performance of two unidirectional and bidirectional system

시스템 성능	단방향 구동장치	양방향 구동장치
Maximum velocity of output cylinder (mm/s)	53.3	50.9
Maximum blocked force of output cylinder (N)	346	142.5

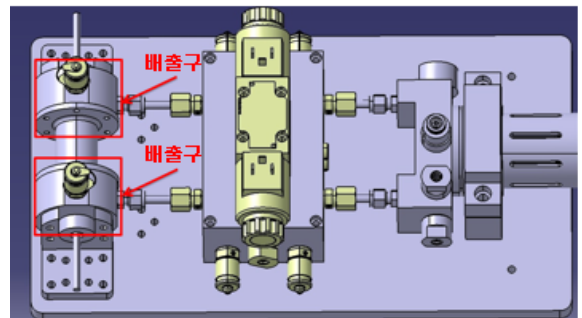


Fig. 9. New design to solve air vacuum problem

5. 결론

본 연구에서는 양방향 압전-유압 하이브리드 구동 장치의 설계로부터 시작하여 시제품의 설계 및 제작을 완성하였다. 제작된 시스템을 통해 구동장치의 무하중 상태에서와 부하 상태에서의 구동 속도와 구동력을 측정하였다. 실험 결과 구동속도는 50.9 mm/s이고 최대 구동력은 142.5 N인 것으로 나타났다. 이 시스템은 단방향 구동 장치보다 성능이 많이 감소되었으며 이는

양방향 시스템은 단방향 시스템보다 구조가 더 복잡하고 공기제거가 어려우므로 성능에 큰 영향을 미치기 때문이다. 따라서 향후 공기제거 문제를 해결하기 위하여 실린더 양단에 공기 배출구를 만들어 실험하기 전에 공기를 배출할 수 있도록 설계할 예정이고 설계 요구 조건을 만족시키는 최대 구동력을 갖는 압전 하이브리드 구동기를 연구, 개발하려고 한다.

References

- [1] J. Sirohi, and C. Chopra, "Design and Development of a High Pumping Frequency Piezoelectric-Hydraulic Hybrid Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 14(3):13-147, 2003.
- [2] C. Cadou, and B. Zhang, "Performance Modeling of a Piezo-Hydraulic Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 149-164, 2003.
- [3] L. D. Mauck, and C. S. Lynch, "Piezoelectric Hydraulic Pump Development," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 11(10):758-764, 2000.
- [4] J. E Lindler, E. H. Anderson, and M. E. Regelbrugge, "Design and Testing of Piezoelectric-Hydraulic Actuators," In *Proceedings of the SPIE*, Vol. 5054, pp. 96-107, 2003.
- [5] H. Tan, W. Hurst, and D. Leo, "Performance Modeling of a Piezohydraulic Actuation System with Active Valves," *Smart Materials and Structures*, 14(1):91-110, 2005.
- [6] A. Chaudhuri, and N. M. Wereley, "Experimental Validation of a Hybrid Electrostrictive Hydraulic Actuator Analysis," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 132, No. 2, Article No. 021006, 2010.
- [7] Z. F. Xuan, "Performance Testing of an Integrated Hybrid Actuator," Master's Thesis, University of Konkuk, Seoul, Korea, 2012.
- [8] Z. F. Xuan, T. L. Jin, N. S. Ha, N. S. Goo, T. H. Kim, B. W. Bae, H. S. Ko, and K. W. Yoon, "Performance of Piezo-Stacks for a Piezoelectric Hybrid Actuator by Experiments," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, in Press, 2014.
- [9] S. L. Herdic, "Development of Piezo-Hydraulic Actuation Systems Technology for Use on a Helicopter Tailing Edge Flap," Master's Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 2005.