

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 41(1), 25-30(2013)

DOI:<http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2013.41.1.25>

집적형 하이브리드 구동장치의 성능시험

현철봉*, 김태렬*, 구남서*, 배병운**, 김태훈**, 고한서***, 윤기원****

Performance Testing of an Integrated Hybrid Actuator

Zhefeng Xuan*, Tailie Jin*, Nam Seo Goo*, Byung-Woon Bae**, Tae-Heun Kim** ,

Han Seo Ko*** and Ki-Won Yoon****

Konkuk University*, Firstec Co.**,

Sungkyunkwan University***, Agency for Defense Development****

ABSTRACT

The 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, operation principle and performance testing of the hybrid actuator were introduced. Output velocities have been measured in both loaded case and not loaded case and the blocking force also has been measured in external loaded case. The maximum velocity of the actuator is 53.3 mm/s, blocking force is 240.7 N and corresponding power output is 3.2 W.

초 록

집적형 하이브리드 구동장치는 적층형 압전재료(압전스택)를 이용한 마이크로 펌프에서 토출되는 유체로 피스톤을 구동시키는데 크기는 작으면서도 큰 구동력과 높은 속도를 동시에 출력할 수 있는 새로운 개념의 통합 구동장치로서 현재 소형화 및 고출력을 요구하는 항공 우주, 유도무기 등 다양한 분야에서 광범위하게 연구되고 있다. 본 연구에서는 이러한 하이브리드 구동장치의 구동원리 및 성능 시험에 대해 소개하였다. 우선 구동장치의 주 동력인 압전 스택의 성능 시험을 수행함으로써 압전 스택의 구동전력과 구동시간에 따른 성능 변화를 관찰하였고 다음 구동장치의 성능 시험을 통해 구동장치의 최대 이송속도와 최대 구동력을 측정하였다. 구동장치의 최대 이송속도는 53.3 mm/s로, 최대 구동력은 240.7 N으로, 최대 일률은 3.2 W로 측정되었다.

Key Words : Hybrid actuator(하이브리드 구동장치), Hydraulic Pump(유압 펌프), Piezoelectric stack(압전 스택)

1. 서 론

항공기, 유도무기, 그리고 자동차 등에 사용되고 있는 구동장치는 20세기 초의 기계식으로부터

시작하여 점차 중앙집중식 유압식, 전기식, 모터를 이용한 전기-유압 하이브리드 방식으로 발전되었다. 1970년대 말 유도 무기 개발이 시작되면서 부터 중앙집중식 유압식 구동장치의 개발이

† Received: October 16, 2012 Accepted: December 27, 2012

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

<http://journal.ksas.or.kr/>

pISSN 1225-1348 / eISSN 2287-6871

시작되었으며, 상용화가 완료되었다. 전기 모터식 구동장치는 소형 유도무기의 편 제어에 적용되고 있으며, 공기식 구동장치도 자세 제어용으로 개발되어 실제 적용되고 있다. 최근 고성능 유도무기와 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 주 동력이며 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, Sirohi, Lindler, Cadou, Tan 등⁽¹⁻⁵⁾이 제작한 대부분의 구동장치는 모두 PZT (lead zirconate titanate) 를 사용하였고 그외에도 단결정 PMN-PT와 Terfenol-D를 사용한 연구가 있었다. PMN-PT를 사용한 구동장치의 경우 최대 이송속도가 330 mm/s로 PZT를 사용한 연구⁽¹⁾의 최대 출력인 228.6 mm/s 보다 44% 증가하였다.⁽⁶⁾ 하지만 사용된 PMN-PT의 탄성계수는 15~20 GPa 정도로 PZT보다 낮아서 구동력을 크게 하는 데는 적합하지 않으며 PMN-PT는 특성상 높은 온도에서 성능이 저하된다. 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 10-20MPa의 보다 작은 힘을 가지고 있다.⁽⁵⁾ 본 연구에서는 하이브리드 구동장치의 큰 구동력을 기대함으로써 압전 스택을 구

동 재료로 사용하였고 구동원리 및 압전 스택의 선택에 대해 이해하고자 압전-유압식 하이브리드 구동장치를 제작하고 성능시험을 수행하였다.

II. 본 론

2.1 구동 원리 및 시스템의 수학적 모델링

2.1.1 구동 원리

구동장치의 작동 과정은 Fig. 1에서와 같이 압축(compression), 분출(exhaustion), 확장(expansion) 및 흡입(intake)의 네 개의 단계로 구분된다. 압축 단계에서는 밸브가 닫혀져 있는 상태에서 압전 스택에 전기적신호가 공급되면 압전 스택이 팽창하여 펌핑 챔버 내의 압력이 올라가고, 압력이 일정한 정도까지 올라가면 분출 단계에서는 압력 차에 의해 출구 리드밸브가 열리면서 유체가 실린더로 흘러들어 피스톤을 동작시킨다. 확장 단계에서는 밸브가 닫혀진 상태에서 압전 스택의 수축으로 인해 펌핑 챔버 내의 압력이 내려가게 되고 최종적으로 입구 리드밸브가 열리면서 유체를 흡입하게 된다. 압전 스택의 구동에 따라 이러한 네 단계를 반복함으로써 유체의 흐름을 생성하고 실린더를 움직이게 하여 기계적 에너지를 생성한다. 이와 같이 집적형 하이브리드 구동장치는 마이크로 펌프, 밸브, 실린더 등의 동작을 서로 연동시켜 최적화된 상태에서 작동하게끔 하는 시스템이다.

2.1.2 시스템의 수학적 모델링

압전 스택의 구동이 전체 시스템에 에너지를 공급하므로 압전 스택 펌핑 피스톤(pumping piston)의 펌핑 동작에 대한 모델링부터 고려한다. 펌핑 챔버안의 유체의 압력은 P_{ch} 로 나타내고 펌핑 피스톤의 움직임에 대해 Fig. 2와 같이 1자유도 시스템으로 간주하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} (m_p + \frac{m_A}{3})\ddot{x}_p + c_p\dot{x}_p + (k_A + k_d + k_s)x_p \\ = k_A d_{33} B L_A - P_{ch} A_{ch} \end{aligned} \quad (1)$$

$$k_A = \frac{E_A A_A}{L_A} \quad (2)$$

여기에서, m_p 는 펌핑 피스톤의 질량, m_A 는 압전 스택의 질량, x_p 는 압전 스택 및 펌핑 피스톤이 이동한 거리, k_A , k_d , k_s 는 각각 압전 스택, 유체

와 피스톤을 분리시켜주는 다이어프램 (diaphragm), 압전 스택에 초기 응력(pre-stress)을 가하는데 사용하는 접시스프링의 강성도이다. 그리고 d_{33} 와 B 는 각각 압전 스택의 압전 상수와 전계강도이고 P_{ch} 와 A_{ch} 는 펌핑 챔버의 압력과 단면적이다.

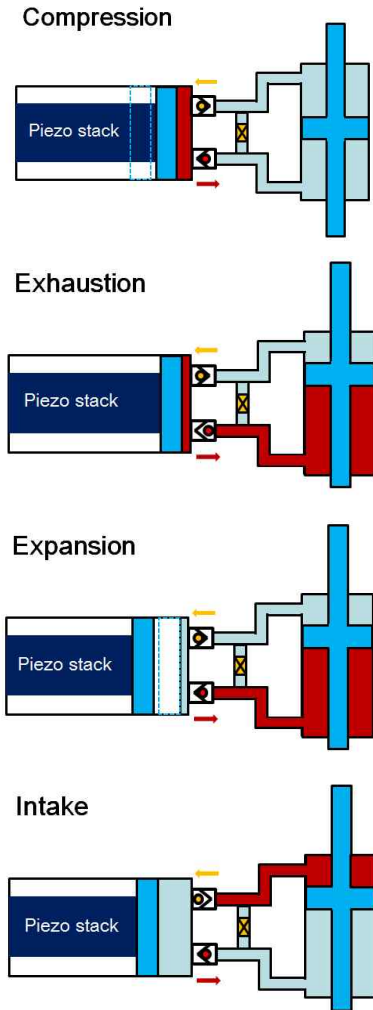


Fig. 1. Actuation principle

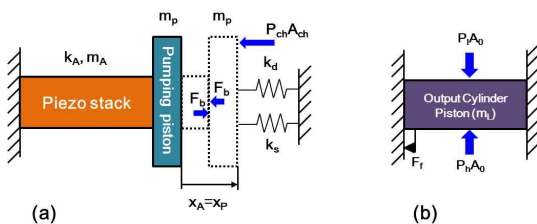


Fig. 2. Free body diagrams. (a) Pumping piston (b) Output cylinder

실린더 피스톤의 움직임에 대해 가장 큰 영향을 미치는 것은 바로 피스톤에 생기는 마찰력이다. 실린더에 가해지는 모든 외부의 하중을 F_{ext} 로 나타낸다. 예를 들면 실린더 축에 m_L 의 질량을 실었을 때 $F_{ext} = m_L g$ 이다. 마찰력 F_f 는 대칭 카르노프 모델(symmetric Karnopp model)을 기반으로 피스톤에 가해지는 총 힘 F 와 속도 v 에 연관되어 있다.

$$F_f = \begin{cases} \text{sgn}(v)F_d, & |v| > v_{\min} \\ \text{sgn}(F)\max(F, F_s), & |v| \leq v_{\min} \end{cases} \quad (3)$$

여기에서, $F = (P_h - P_l)A_o - F_{ext}$ 로써 실린더 피스톤에 가해지는 총 힘이고, F_s 와 F_d 는 각각 정지 마찰력과 운동 마찰력이다. 이 마찰력은 주요하게 실린더 조립과정에서의 오링과 같은 부품을 사용한 밀봉에서 유발되는데 피스톤 축과 유압 실린더의 내벽과의 접촉에서 발생한다. 본 연구에서의 준정적 해석에서는 F_s 와 F_d 를 사용된 오링의 특성으로부터 계산되어 각각 13.4 N과 4.5 N을 사용하였다.

실린더 피스톤의 양쪽 유압 차에 의해 실린더 축을 밀어주는 힘이 생기고 이러한 축의 움직임에 연관된 방정식은 아래와 같은 힘의 평형에서부터 구할 수 있다.

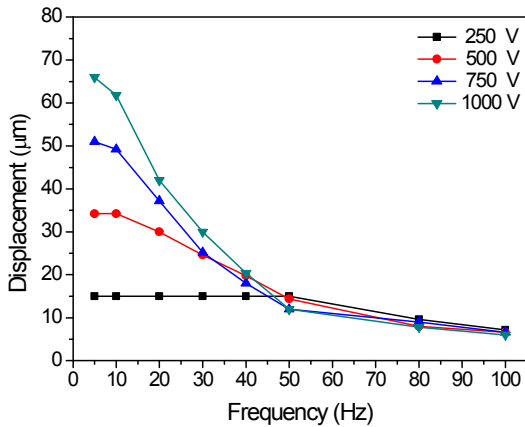
$$m_L \ddot{x}_L + c_L \dot{x}_L = (P_h - P_l)A_o - F_f - F_{ext} \quad (4)$$

본 연구에서는 식 (1)-(4)를 해석할 수 있는 1차원 준정적 해석 코드를 MATLAB을 사용하여 작성하였다.

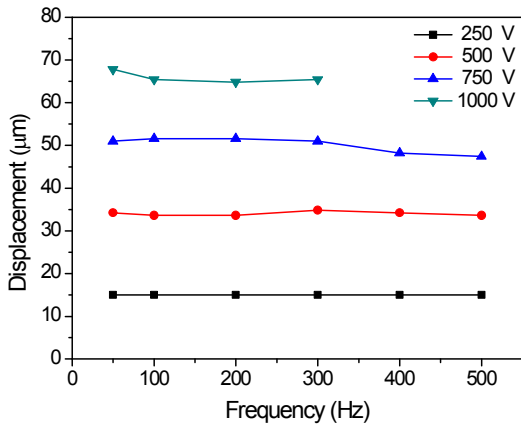
2.2 구동장치의 성능 시험

2.2.1 압전 스택의 성능 시험

압전재료는 전기가 가해졌을 때 변형이 발생하는 현상을 가진 재료로 굽힘현상을 이용하는 d_{31} 형 작동기와 축방향 변형을 이용하는 d_{33} 형 작동기가 있는데 압전 스택은 여러 층의 압전재료를 이용하는 대표적인 d_{33} 형 작동기이다. 압전 스택은 집적형 하이브리드 구동장치의 주 동력이며 압전 스택의 성능이 전체 시스템의 성능을 결정한다. 본 연구에서 사용한 압전 스택은 PI사의 P-025.40P 타입으로 길이는 60mm이고 직경은 25mm 이다. 압전 스택을 높은 주파수에서 구동시키려면 파워 앰프의 선택이 아주 중요한 역할을 한다. 아래 Fig. 3에 파워가 낮은 파워 앰프 (Matsusada AMT-1-5B40, 120W)와 파워가 높은



(a) Maximum power=120 W



(b) Maximum power=2000 W

Fig. 3. Displacement comparison with two different power amplifier

파워 앰프(PI. E-481., 2000W)로 구동시켰을 때 압전 스택의 변형을 나타내었다.

성능이 낮은 앰프를 사용하였을 경우 낮은 주파수임에도 불구하고 주파수가 증가함에 따라 변위가 대폭 감소하였다. 이는 앰프에서 출력되는 40 mA의 작은 전류 때문이다. 반면 파워가 큰 앰프를 사용하였을 때 일정한 주파수이내에서는 변위의 감소량이 없이 구동되었다. 1000 V의 전압을 가했을 때 구동주파수가 400 Hz 부터는 앰프 자체의 보호기능 때문에 압전 스택의 전기적 신호가 차단되어 구동이 불가능 하다.(Fig. 3(b)).

또한 압전 스택의 특성상 높은 전압과 높은 주파수에서 일정한 시간동안 구동시켰을 때 자체 온도가 올라가고 따라서 성능도 감소된다. Fig. 4 에서는 성능이 높은 파워 앰프를 사용했을 때 압전 스택의 시간에 따른 온도상승을 나타내었다. Fig. 4에 나타나 있듯이 시간이 지남에 따라 온

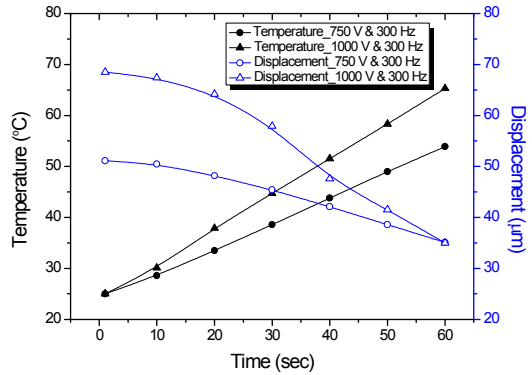


Fig. 4. Temperature and Displacement vs. Time at 750 V & 1000 V input voltage and 300Hz pumping frequency

도가 선형적으로 증가하였고 따라서 압전 스택의 변위도 현저히 감소되었고 높은 구동전압에서 그 현상이 더욱 뚜렷하였다.

2.2.2 하이브리드 구동장치의 성능 시험

구동장치의 성능 시험은 무부하 상태 및 정량 하중 상태에서 진행하였다. 무부하 상태에서 최대 이송속도를 측정하였고 실린더 축에 일정한 하중을 추가했을 때의 이송속도를 측정하여 최대 구동력을 추측하였다. 구동장치의 실험 세팅을 Fig. 5에 나타내었다. 에너지 전달은 압전 스택→

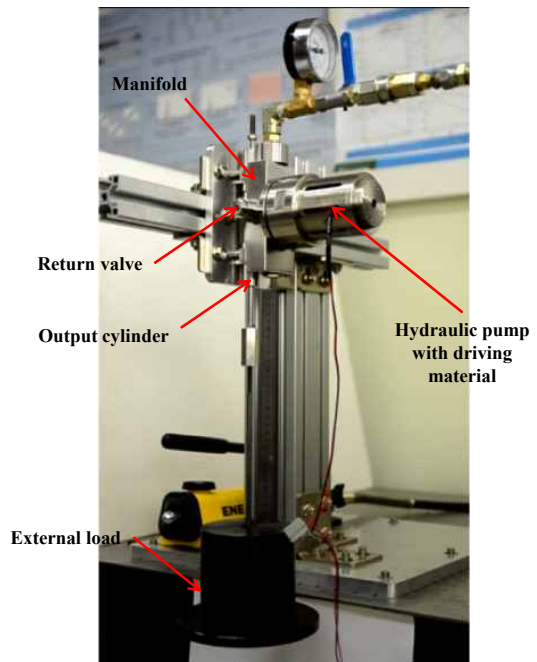


Fig. 5. Device set-up for performance testing

펌프 챔버→매니폴드→실린더의 순서로 이루어진다. 본 연구에서 사용된 압전 스택의 최대 변형이 $60\mu\text{m}$ 이고 펌프 챔버는 높이가 1.5mm, 직경이 32mm 이며 실린더의 내경과 축의 직경은 각각 14.3mm 와 6.4mm 이다.

Figure 6에서는 무하중 상태에서의 이송속도를 나타내었는데 구동주파수가 증가함에 따라 이송속도가 증가하였고 일정한 주파수를 초과하면 이송속도가 더 이상 증가하지 않고 점차 감소하는 추세를 나타냈다. 이는 구동주파수가 증가함에 따라 구동장치 내부 유체의 불규칙적인 유동으로 인하여 유체의 관성이 증가하였고 이로 하여 유동과정에서의 압력 손실이 증가하기 때문이다.

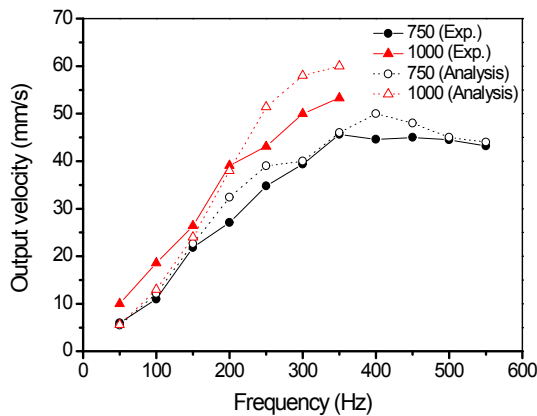


Fig. 6. Output velocity with different pumping frequency and input voltage in no-load test

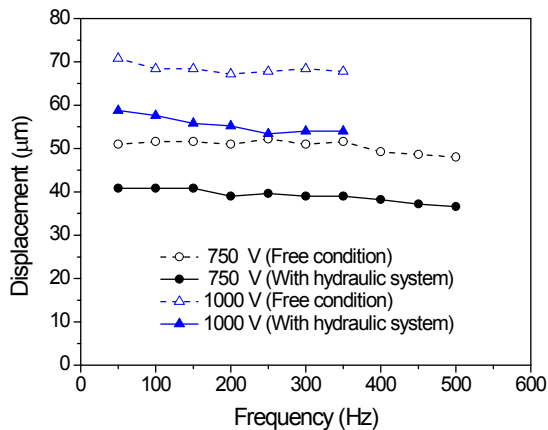


Fig. 7. Comparison of displacement of the PZT stack on free condition and with hydraulic system condition in no load test

Fig. 6에는 1차원 준정적 해석의 결과도 나타내었는데 실험 결과와 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다.

Figure 7에서는 구동장치를 구동시켰을 때 펌프내의 압전 스택의 변위를 측정된 결과를 나타내었는데 자유 상태에 비하여 두 가지 다른 구동전압에서 약 13%~20%의 변위 감소량이 있었다. 이는 펌핑 챔버내의 압력의 증가가 압전 스택에 대한 반력으로 작용하기 때문이다.

부하상태에서는 외부 실린더 축에 다양한 무게를 가하면서 이송속도를 측정하여 Fig. 8과 같이 구동력과 이송속도와의 관계를 나타내었고 선형 보간을 이용하여 최대 구동력을 추측하였으며 식 (5)를 이용하여 출력되는 최대 기계적 동력을 계산하였다.

$$P_{out} = \frac{1}{4} \times F_{block} \times v_{no-load} \quad (5)$$

여기에서 F_{block} 은 최대 구동력이고 $v_{no-load}$ 는 무하중 상태에서의 최대 구동속도이다. 그림에서 나타내다시피 최대 구동력은 240.7 N이고 최대 이송속도는 53.3 mm/s이며 그에 대응하는 최대 일률은 약 3.2 W이다.

Table 1에는 본 연구에서 사용된 구동장치와 비슷한 크기를 가지는 현재까지 개발된 압전 스택 이용 지능재료-하이브리드 구동장치의 성능을 비교하여 정리하였다. 본 연구에서 개발된 구동장치는 기존 연구에서 개발된 구동장치와 유사한 성능을 가지고 있음을 확인할 수 있다.

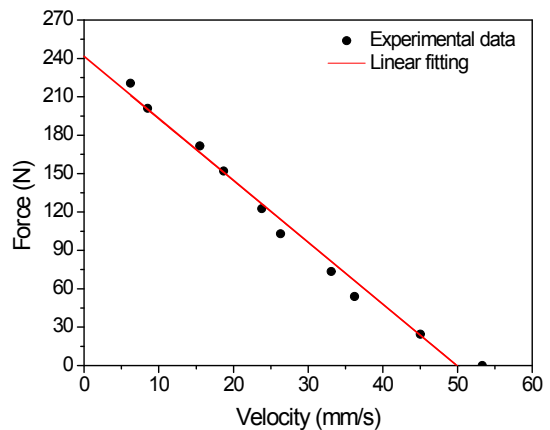


Fig. 8. Output velocity vs. force diagram with 1000V applied voltage & 350Hz pumping frequency in external loaded test

Table 1. Performance of PZT stack driven smart material-hydraulic actuators

개발자	최대 속도 (mm/s)	최대 구동력 (N)	최대 일률 (W)
Mauck ⁽¹⁾ , 2000	72.5	271	4.91
Sirohi ⁽²⁾ , 2003	30.5	155.7	1.19
Cadou ⁽⁴⁾ , 2003	15.7	49.9	0.2
Ellison ⁽⁷⁾ , 2004	228.6	62.23	3.56
Tan ⁽⁵⁾ , 2005	39	225	2.19
Sirohi ⁽⁸⁾ , 2005	139.7	71.1	2.48
Goo, 2012	53.3	240.7	3.2

III. 결 론

본 연구에서는 집적형 하이브리드 구동장치의 주 동력인 압전 스택의 성능시험으로부터 시작하여 구동장치의 무하중 상태에서와 부하 상태에서의 이송속도와 구동력을 측정하여 구동장치가 출력할 수 있는 최대 기계적 동력을 계산하였다.

압전 스택의 성능 시험으로부터 압전 스택에 전력을 공급하는 전력증폭기와 구동과정에서 생기는 자체의 온도 상승에 의해 구동 성능이 저하됨을 알 수 있었다. 따라서 앞으로 구동시간이 긴 시험에서는 외부적으로 압전 스택을 냉각시켜 주는 별도의 시스템이 필요로 하게 됨을 알 수 있다. 그리고 구동장치의 성능 시험으로부터 현재 개발된 집적형 하이브리드 구동장치의 최대 이송속도는 53.3 mm/s, 최대구동력은 240.7 N, 그리고 최대 일률은 3.2 W으로 측정되었다.

References

- 1) Mauck L. D. and Lynch C. S., "Piezoelectric hydraulic pump development," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2000, 11(10):758-764.
- 2) Sirohi J., and Chopra I., "Design and development of a high pumping frequency piezoelectric-hydraulic hybrid actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2003, 14(3):13-147.
- 3) Lindler J. E., Anderson E. H., and Regelbrugge M. E., "Design and testing of piezoelectric-hydraulic actuators," *In Proceedings of the SPIE*, 2003, vol.5054, p.96-107.
- 4) Cadou C. and Zhang B., "Performance Modeling of a Piezo-Hydraulic Actuator," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2003, 149-164.
- 5) Tan H., Hurst W., and Leo D., "Performance modeling of a piezohydraulic actuation system with active valves," *Smart Materials and Structures*, 2005, 14(1):91-110.
- 6) Chaudhuri A and Wereley N. M., "Experimental validation of a hybrid electrostrictive hydraulic actuator analysis," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, 2010, vol. 132, no. 2, article no. 021006.
- 7) Ellison J., "Investigation of active materials as driving elements in a hydraulic-hybrid actuator", *Master's thesis*, University of Maryland, College Park, 2004.
- 8) Sirohi J., Cadou C. and Chopra I., "Investigation of the dynamic characteristics of a piezohydraulic actuator", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2005.