

## 적층식 압전소자를 이용한 고속 서보밸브 시스템의 개발

방영봉(서울대), 이교일(서울대), 임원규\*(서울대), 주춘식(서울대), 허재웅(서울대)

### Development of a High-Speed Electrohydraulic Servovalve System Using Stack-Type Piezoelectric Elements

Y. B. Bang(SNU), K. I. Lee(SNU), W. K. Lim(SNU), C. S. Joo(SNU), J. W. Huh(SNU)

#### ABSTRACT

This paper presents two systems of two-stage electrohydraulic servovalve with a nozzle-flapper pilot stage, which is controlled by stack-type piezoelectric elements. Two flapper moving mechanisms proposed in this research can compensate for the hysteresis problem and thermal expansion of the piezoelectric elements. The experimental results show that the first flapper moving mechanism has the frequency response of over 500 Hz and the second one has the response of over 600 Hz. And the first simplified servovalve system using the first flapper moving mechanism has the frequency response of about 150 Hz, and the second system has the response of about 300 Hz at the supply pressure of 210 bar

**Key Words** : servovalve (서보밸브), piezo (피에조), flapper (플래퍼), displacement-magnifying mechanism (변위 확대 기구), thermal expansion (열팽창)

#### 1. 서론

서보밸브(servovalve)는 유압 디바이스와 전기적 디바이스를 이어주는 중간 역할을 하는 요소로서 낮은 파워의 전기적 신호로 밸브의 스푼(spool)을 움직여 유량이나 압력을 컨트롤한다. 다양한 산업용 중장비, 로봇, 항공 우주 산업, 무기 시스템 등에 탑재되어 쓰이고 있으며 밸브의 성능이 이를 포함하는 전체 시스템의 정적, 동적 특성을 좌우하기 때문에, 서보밸브 자체의 성능 향상에 관계된 연구는 시스템의 전체적인 퍼포먼스를 향상시키는 면에서 중요한 위치를 차지한다.

서보밸브의 성능 향상을 위한 연구는 크게 성능에 관계된 파라미터를 분석하여 최적화된 값을 결정하는 것<sup>1-4</sup> 과, 현재 상용화되어 있는 2 단 플래퍼-노즐 타입을 벗어나 새로운 메커니즘의 밸브를 개발하는 것<sup>5-7</sup> 이 있다. 후자의 경우 각종 지능형 소자를 응용한 사례를 찾아볼 수 있으나 스푼의 변위가 충분하지 못하고 소자의 구동조건이 까다로운 등 현실성이 떨어지는 경우가 많다.

본 논문에서는 지능형 소자 중 적층식 압전소자를 선택하여 이를 이용한 플래퍼 구동기구를 개발

하고, 이 구동기구를 토크모터와 대체하여 밸브의 성능을 향상시키고자 하였으며 동시에 현실적인 적용을 충분히 고려하였다.

#### 2. 압전소자를 사용한 서보밸브 시스템의 설계

##### 2.1 플래퍼 구동기구의 설계

압전소자는 응답성이 빠르고 큰 추력을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 정밀한 변위 제어가 가능하다는 장점이 있다. 그러나 발생 변위가 매우 작고 히스테리시스 현상이 있으며 인장력에 약하기 때문에, 이를 보상하기 위한 특별한 기구가 요구된다. 우선 노치 구조를 사용하여 각각 1 단식, 2 단식 변위 확대 기구를 고안하였으며 히스테리시스 현상을 줄이기 위해서 압전소자를 구조물에 좌우 대칭으로 고정하고 동시에 구동하기로 하였다. 코일 스프링을 사용하여 압전소자에 예압을 걸어주고 열팽창에 의한 영향을 없애기 위해서 구조물 상단부에도 노치 구조를 만들었다. 이 노치 구조는 열팽창에 의한 압전소자의 변형에 대해 상하로 변형하면서 플래퍼의 치우침이 없도록 하여 노즐 간 압력차를 생성시키지 않는다.

구조물의 소재는 SUS304 를 사용하였고 ANSYS 시뮬레이션을 통해 확인한 최대 응력값은 각각  $0.107 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $0.201 \times 10^9 \text{ N/m}^2$  이었다. 이는 SUS304 의 항복응력 값인  $0.883 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 보다 각각 8.2 배, 4.4 배가량 작은 값으로 안전율이 8 과 4 이상으로 매우 안전한 구조물이라고 할 수 있겠다.

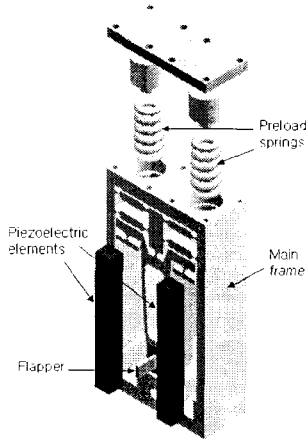


Fig. 1 Flapper moving mechanism with one-stage displacement magnification(FMM-A)

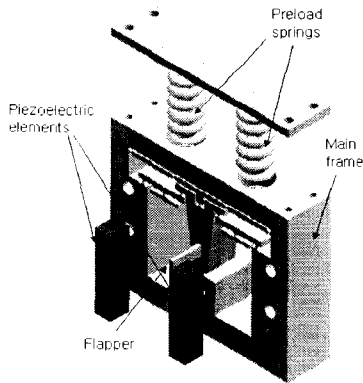


Fig. 2 Flapper moving mechanism with two-stage displacement magnification(FMM-B)

## 2.2 단순화한 서보밸브 본체의 설계

제작한 플래퍼 구동기구의 성능을 확인하기 위해 단순화한 서보밸브를 제작하였다. 실제 서보밸브의 메인 밸브측은 부하유량을 제어하며 흘릴 수 있는 복잡하고 정밀한 구조로 되어 있으며 가공의 정밀도 또한 매우 높다. 본 연구에서는 새로운 메커니즘의 플래퍼 구동기구의 개발을 목표로 하므로 메인 밸브측을 최대한 단순화하여 가공 정밀도에 의한 밸브 성능에의 영향을 줄이고자 하였다. 따라서 부하유량은 흐르지 않으나 성능 테스트는 가능한 밸브 구조를 고안하였으며, 이 경우 부하유량에

의해 스펴에 가해지는 유동력(flow force)은 스펴 외부 측에 코일 스프링을 연결 함으로서 보상하였다. 이 코일 스프링의 강성은 스펴에 가해지는 유동력을 Merritt<sup>8</sup>에 의한 이론식 (1)로 계산하여 그에 준하는 강성을 가지는 것으로 사용하였다.

$$K_f = 0.43wP_s \quad (1)$$

아래에 실험 시스템에 대한 개념도를 나타내었다.

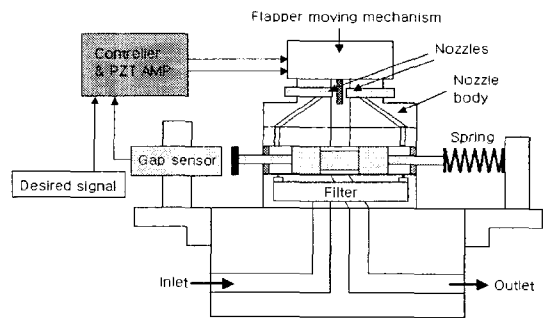


Fig. 3 Simplified servovalve system

## 3. 서보밸브 시스템의 제작 및 실험

### 3.1 플래퍼 구동 기구

Fig. 1 과 Fig. 2 에 보인 플래퍼 구동기구의 메인 프레임은 스테인리스 스틸을 사용하였고 노치-힌지 구조는 WEDM(Wire Electro Discharge Machining)으로 가공하였다. 사용된 적층식 압전소자는 각각 스미토모사의 PSA-20B-5AW 와 PSA-15C-5AT 이고 코일 스프링을 통해 가한 예압의 크기는 발생 추력의 1/3 정도로 하였다.

Table 1 Specification of piezoelectric elements

Model	PSA-20B-5AW	PSA-15C-5AT
Dimension	41 mm × 4.5 mm × 5.2 mm	21 mm × 4.5 mm × 5.2 mm
Displacement	42 ± 3 μm	20 ± 2 μm
Maximum driving voltage	250 V	150 V
Capacitance	800 nF ± 20%	900 nF ± 20%
Maximum output force	1200 N	700 N

### 3.2 서보밸브 시스템

각각의 플래퍼 구동기구를 실험하기 위해 두 가

지 타입의 단순화한 서보밸브 본체를 제작하였다.

Table 2 Specification of simplified servovalve

Model	Servovalve A	Servovalve B
Spool diameter	11 mm	5 mm
Spool stroke	± 0.5 mm	± 0.35 mm
Rated flow	98 lpm at 210 bar	31 lpm at 210 bar

Fig. 4 와 Fig. 5 에 각각의 단순화한 서보밸브와 플래퍼 구동 기구를 결합한 모습을 나타내었다.

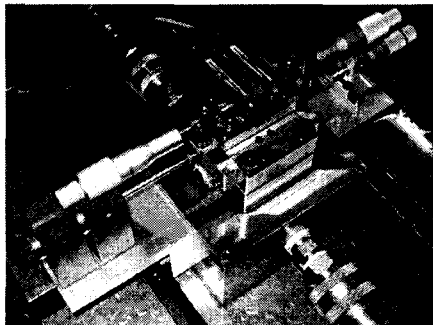


Fig. 4 Servovalve A with FMM-A(valve system A)

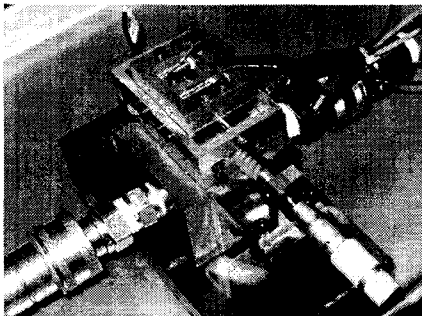


Fig. 5 Servovalve B with FMM-B(valve system B)

### 3.3 제어 시스템

밸브 스톱의 변위는 각각 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)와 와전류식 캡센서로 측정하여 아날로그 PD 컨트롤러로 피드백 시키고, 지령 신호와의 차이를 계산하여 제어신호를 만들어낸다. 압전소자 2 개는 180°의 위상차를 가지고 작동하게 되므로, 각각의 압전소자용 앰프에는 제어신호와 반전된 제어신호를 입력시킨다. 압전소자용 앰프는 옅섯 전압을 기준으로 푸쉬풀 구동 하였다.

$$E_1 = E_0 + e, \quad E_2 = E_0 - e \quad (2)$$

$E_0$ : bias voltage,  $e$ : differential driving voltage

압전소자용 앰프는 Piezomechanik GmbH 사에서

제작한 RCV:350BIP/10 을 사용하였으며 최대 출력 전류는 10A 이다.

## 4. 실험결과

### 4.1 플래퍼 구동 기구의 정적 특성

열팽창에 대한 간접적인 측정으로서 두 개의 압전소자에 같은 전압을 인가할 수 있도록 연결한 뒤 입력전압 값을 바꿔가면서 와전류식 캡센서로 플래퍼의 변위를 측정하였다. 플래퍼의 치우침은 - 0.5 μm ~ 1.25 μm 였으며, 이 크기는 피드백 컨트롤하는 시스템에서 미세한 영향을 미칠 뿐이므로 무시할 수 있다.

Fig. 6 과 Fig. 7 에는 푸쉬풀 구동에서의 플래퍼 변위 그래프를 나타내었으며 이를 통해 구동전압의 차이에 대해서 플래퍼 변위가 선형적으로 변함을 알 수 있다.

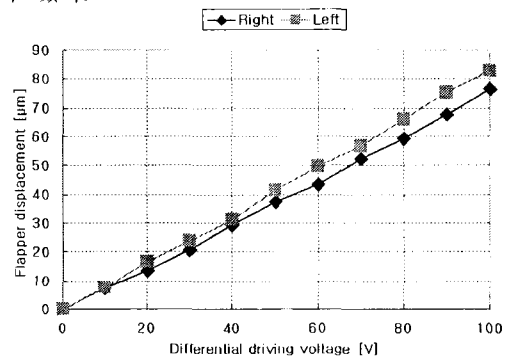


Fig. 6 Flapper displacements by push-pull driving (FMM-A)

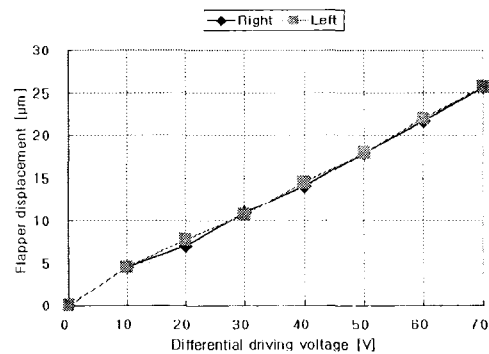


Fig. 7 Flapper displacements by push-pull driving (FMM-B)

### 4.2 플래퍼 구동 기구의 동적 특성

플래퍼 구동 기구의 동적 특성을 실험하기 위해 180°의 위상차를 가진 사인파를 입력하였다. 첫 번째 구동기구의 경우 입력 주파수가 0 Hz 에서 500 Hz 로 변하는 동안 진폭 감소와 위상 뒤집이 각각 1 dB 과 11° 이하 였으며 측정을 위해 플래퍼에 연결한 플레이트가 500 Hz 근처에서 심한 노이즈 현

상을 일으킨 이유로 그 이상의 주파수에서는 실험을 행하지 못하였다. 두 번째 구동기구의 경우 입력 주파수가 0 Hz에서 600 Hz로 변하는 동안 진폭 감소와 위상 뒤짐이 각각 1.2 dB 과 23° 이하였으며 구조물이 600 Hz 근처에서 이상 진동하여 실험을 중단하였다.

### 4.3 단순화한 서보밸브의 실험

서보밸브의 동적 대역폭은 정격의 25%를 인가했을 때 90° 위상 뒤짐 혹은 3 dB 진폭감소가 나타나는 주파수로 결정된다. 최대 스트로크의 1/4 크기에 해당하는 스톱 지령 신호를 1 Hz 부터 단계적으로 증가시키며 실험하였으며 Fig. 8 에 서보밸브 B 의 Bode plot 를 보였다. 서보밸브 A 의 경우 공급압력 210 bar 하에서 3 dB 진폭감소는 150 Hz, 90° 위상 뒤짐은 200 Hz 에서 일어나고 서보밸브 B 의 경우 3 dB 진폭감소와 90° 위상 뒤짐이 300 Hz 에서 동시에 일어났다.

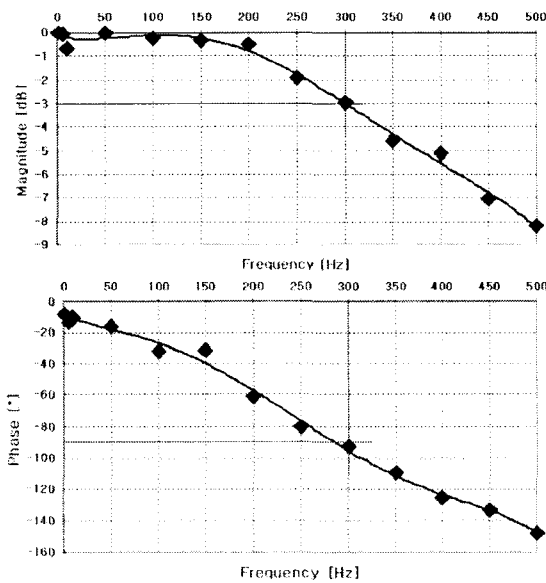


Fig. 17 Frequency-response characteristics of simplified servovalve system B

### 5. 결론

기존의 2 단 노즐-플래퍼 타입의 서보밸브의 성능을 향상시키기 위한 방법으로서, 본 연구에서는 압전소자를 이용한 플래퍼 구동기구를 개발하였다. 이 플래퍼 구동기구는 압전소자에 예압을 가하여 구동특성을 향상시켰고 동시에 히스테리시스와 열팽창에 대한 보상을 가능하게 하며, 노치 구조를 사용하여 각각 1 단식, 2 단식으로 변위를 확대하도록 개발하였으며 개발된 플래퍼 구동기구는 각각

500 Hz 와 600 Hz 까지 좋은 동특성을 보여주었다. 단순화한 서보밸브 본체를 제작하여 각각의 플래퍼 구동 기구와 결합, 실험한 결과 서보밸브 A 의 경우 210 bar 의 공급압력 하에서 3 dB 진폭 감소는 150 Hz, 90° 위상 뒤짐은 200 Hz 에서 나타났으며, 서보밸브 B 의 경우엔 210 bar 공급압력 하에서 3 dB 진폭 감소와 90° 위상 뒤짐이 300 Hz 에서 동시에 일어났다. 일반적으로 시판되는 산업용 서보밸브들이 대역폭 100 Hz 전후라는 점을 생각하면, 본 연구를 통하여 압전소자를 사용한 플래퍼 구동기구에 의한 빠른 응답성을 가지는 서보밸브 시스템 개발의 가능성을 충분히 검증했다고 볼 수 있다.

### 후 기

본 연구는 국방과학연구소 및 서울대 자동제어특화연구센터의 연구비 지원에 의한 연구결과입니다.

### 참고문헌

1. Lin, S. J., Akers, A., "A Dynamic Model of the Flapper-Nozzle Component of an Electrohydraulic Servovalve," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 111, 1989.
2. Martin, D. J., Burrows, C. R., "The Dynamic Characteristics of an Electro Hydraulic Servovalve," *Journal of Dynamic systems, Measurement, and Control*, 1976.
3. Ham, Y. B., Yun, S. N., Lee, G. H., Kim, S. D., "A Study on Null Characteristics of 4-way Spool Valve," *J. of KSPE*, Vol. 12, No. 8, pp. 165-171, 2000.
4. Lee, J. C., "An Analytical Investigation of the Characteristics of Four-Nozzle Flapper Valve," *KSPE Spring Annual Meeting*, pp. 161-166, 2001.
5. Urai, T., Sugiyama, T., "Development of a direct drive servo valve using a giant magnetostrictive material," *Fluid Power*, 1993.
6. Ohuchi, H., Nakano, K., Uchino, K., Endou, H., Fukumoto, H., *Proc. Fluid Control & Measurement*, pp. 415, 1985.
7. Yokota, S., Hiramoto, K., Akutsu, K., "An ultra fast-acting electro-hydraulic digital valve and high-speed electro-hydraulic servo valves using multilayered PZT elements," *Fluid Power*, 1993.
8. Merritt, H. E., "HYDRAULIC CONTROL SYSTEMS," New York: John Wiley & Sons, Inc., pp. 6-53, 94, 203, 1967. 13