

적층형 압전소자를 이용한 이중증폭 메커니즘

김준형* · 김수현** · 곽윤근**

Double Amplification Mechanism Using Multilayer Piezoelectric Actuator

Jun Hyung Kim, Soo Hyun Kim, and Yoon Keun Kwak

Key Words : Piezoelectric actuator(압전 구동기), Cymbal actuator(심벌 구동기), Double amplified(이중 증폭), Multilayer(적층형)

Abstract

A new kind of piezoelectric actuation structure named double amplified multilayer actuator is proposed. Double amplified multilayer actuator combines both dimensional and flextensional amplification concepts. As a result the displacement of the actuator can be more than one hundred times larger than the displacement of multilayer actuator and can be used in in-pipe locomotion robot such as an endoscope actuator. This paper studied the dependence of displacement on actuator parameters theoretically and experimentally.

1. 서론

압전(piezoelectric) 변환기(transducer) 또는 압전 구동기(actuator)의 개발에 있어 변위증폭은 항상 중요한 요소가 되고 있다. 대부분의 압전재료는 최대 수천분의 일 정도의 변형율(strain)을 가지기 때문에 많은 장치의 설계에 있어 이 변위를 증폭시키는 부분이 필수적이다.[1]

Fig. 1은 기존의 압전소자의 변위증폭방식을 보여주는 그림이다. 적층형(multilayer) 압전 구동기의 경우 여러장의 압전판을 병렬로 쌓아서 직접 변위를 증폭하는 구조이지만 이를 제외하면 두가지의 변위증폭 방식이 많이 사용되고 있다. 하나는 바이모프(bimorph) 방식인데 두장의 압전재료를 붙여서 굽힘을 일으켜 증폭하는 방식이다. 또 하나는 무니(moonie) 또는 심벌(cymbal)형 구동기라고 불리는데, 둥근 원판모양의 압전재료에 유연한 얇은 금속판 재료를 붙여서 증폭하는 방식이다.[2]

본 연구에서는 심벌형 구동기의 원리를 적층형 압전소자에 사용하고 적층형 압전소자의 큰 구동력을 이용하여 이중증폭 구조의 압전 구동기를 개발하였다. 개발된 구동기는 적층형 압전소자의 큰

구동력에 제안된 이중증폭 구조를 통하여 기존의 바이모프형과 심벌형에 비하여 큰 변위와 구동력을 가지며 광학분야나 대장 내시경과 같은 관내 이동로봇의 구동기로 사용될 수 있다.

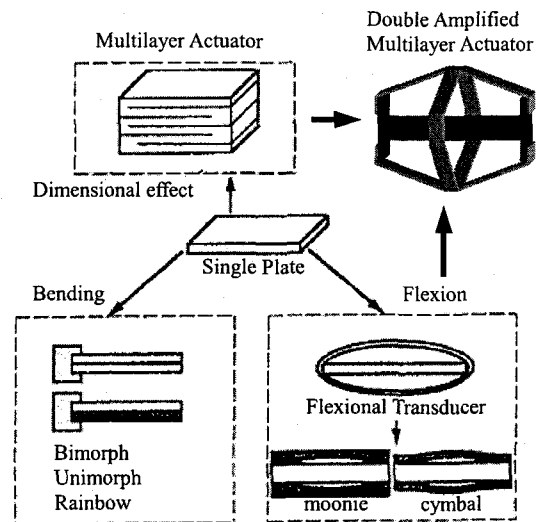


Fig. 1 Amplification of the displacement of piezoelectric actuator

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

** 한국과학기술원 기계공학과

2. 이중 증폭의 원리

기존의 심벌형 구동기는 Fig. 2 와 같이 둥근 압전판(PZT-5A)에 아래위로 금속판을 접착하여 심벌즈 두개를 맞붙인 모양으로 만들어졌다. 그러므로 소형이면서 40 μm 내외의 변위를 얻을 수 있지만 그 구동력은 15 N 정도로 적층형 압전소자와 바이모프형 압전소자의 중간정도의 성능을 나타내고 있다.[3]

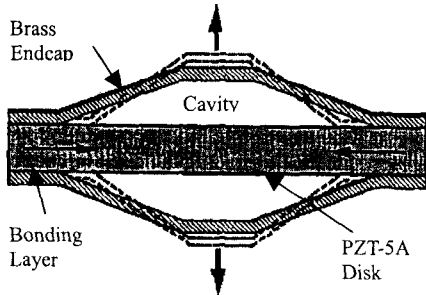


Fig. 2 Cymbal actuator

이에 비하여 본 연구에서 개발한 이중증폭 압전 구동기는 압전판대신 적층형 압전소자를 구동원으로 하여 Fig. 3 과 같이 2 층으로 금속 증폭판을 설치하여 변위를 증폭하는 구조를 가지고 있다.

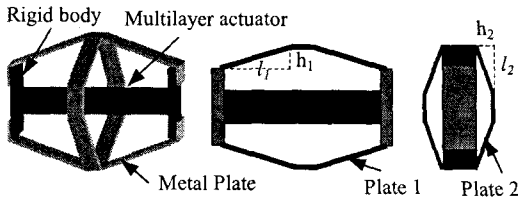


Fig. 3 Double amplified multilayer actuator

개발된 심벌구동기의 압전소자의 힘이 무한하고 증폭판이 힌지부분에서만 굽힘을 일으키는 이상적인 상태에서의 변위 확대비 K 는 다음과 같다.

$$K = \frac{l_1}{h_1} \times \frac{l_2}{h_2} \quad (1)$$

위 식에서 h_1, h_2 의 크기를 줄여주므로써 증폭비를 100 배 이상 크게 할 수는 있지만 구동력은 증폭비에 반비례하고, 변위 증폭판의 변형에 의해 실제로는 식 (1)보다 낮은 증폭비를 얻게 된다.

3. 이중증폭 적층형 구동기

3.1 증폭판의 모델링

이중증폭 구동기의 경우 증폭에 사용되는 금속판의 특성에 따라 전체 구동기의 성능이 크게 영향을 받는다. 그러므로 압전소자에 걸어준 전압 V 와 최종 증폭판의 변위와의 관계는 다음과 같이 금속판을 특성을 고려하여 구할 수 있다.

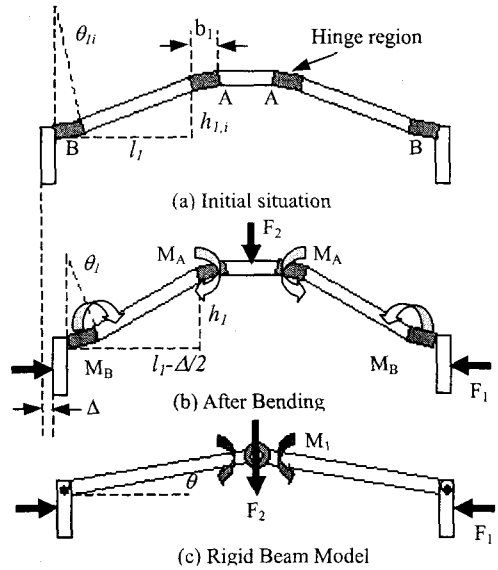


Fig. 4 Model of plate 1

Fig. 4 는 증폭판 1의 모델을 나타낸 것이다. A, B, C 부분은 길이가 b_1 인 힌지부분(hinge region)이며 적층형 압전소자가 변형하면 이 부분이 굽힘운동을 일으키게 된다. 일반적으로 증폭판의 변형은 이 힌지부분에 집중되므로 이 부분에서 모멘트가 발생하게 된다. 그러므로 증폭판의 운동은 두개의 강체빔이 비틀림 스프링에 의해 연결된 것으로 모델링 할 수 있다.[4]

적층형 압전소자의 끝단 변위가 Δ 라 하면 증폭판 1 과 2 의 변위 ξ_1, ξ_2 는 기구학적으로 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$h_1^2 + (l_1 - \frac{1}{2}\Delta)^2 = h_{1,i}^2 + l_1^2 \quad (2)$$

$$\xi_1 = h_1 - h_{1,i} \approx \sqrt{h_{1,i}^2 + l_1\Delta} - h_{1,i} \quad (3)$$

$$h_2^2 + (l_2 - \xi_1)^2 = h_{2,i}^2 + l_2^2 \quad (4)$$

$$\xi_2 = h_2 - h_{2,i} \approx \sqrt{h_{2,i}^2 + 2l_2\xi_1} - h_{2,i} \quad (5)$$

이때 $h_{1,i}$ 와 $h_{2,i}$ 는 각각 증폭판 1 과 2 의 초기 높이이며 b_1 와 b_2 는 변형후의 높이를 나타낸다. 증폭판의 모멘트 평형식은 다음과 같다.

$$M_1 = 2F_1(h_{1,i} + \xi_1) - F_2(l_1 - \Delta/2) \quad (6)^*$$

$$M_2 = 2F_2(h_{2,i} + \xi_2) - F_L(l_2 - \xi_1) \quad (7)$$

이때 F_1 은 압전소자가 증폭판 1 에 가하는 힘, F_2 는 증폭판 1 이 증폭판 2 에 가하는 힘, F_L 은 증폭판 2 에 가해지는 외부 힘이다.

Fig. 4 에서 힌지 A, B 가 동일한 경우 힌지부분의 모멘트에 의해 발생하는 증폭판의 모멘트 M_1 , M_2 를 다음과 같이 구할 수 있다.[5]

$$M_1 = 2M_A + 2M_B = 4M_A = 4E_1I_1(1/R_1 - 1/R_{1,i}) = 4E_1I_1(\tan\theta_1 - \tan\theta_{1,i})/b \quad (8)$$

$$\approx \frac{4E_1I_1}{b_1}(\theta_1 - \theta_{1,i}) \approx \frac{4E_1I_1}{b_1}\xi_1$$

$$M_2 \approx \frac{4E_2I_2}{b_2}(\theta_2 - \theta_{2,i}) \approx \frac{4E_2I_2}{b_2L_2}\xi_2 \quad (9)$$

이때 아래첨자 1, 2 는 증폭판 1, 2 를 나타내며 M_A , M_B 는 각각 힌지부분 A, B 에서 유도된 모멘트, E 는 증폭판의 탄성계수, I 는 힌지부분의 단면의 관성모멘트(area moment of inertia of cross section)이고 R 은 힌지부분의 곡률반경이다.

식 (6), (7)과 식 (8), (9)를 연립하면 다음과 같다.

$$M_1 = \frac{4E_1I_1}{b_1}\xi_1 = 2F_1(h_{1,i} + \xi_1) - F_2(l_1 - \Delta/2) \quad (10)$$

$$M_2 = \frac{4E_2I_2}{b_2L_2}\xi_2 = 2F_2(h_{2,i} + \xi_2) - F_L(l_2 - \xi_1) \quad (11)$$

적층형 압전소자에 전압 V 가 걸릴 때 구동력과 변위와의 관계는 압전재료의 히스테리시스 특성에 의하여 비선형적이지만 그 차이는 크지 않으므로 선형적으로 가정하면 다음과 같다.

$$F_1 = C_p(\Delta_0 - \Delta) \quad (12)$$

$$\Delta_0 = -C_V V \quad (13)$$

이때 Δ_0 는 자유상태에서 압전소자의 변위이고 C_p , C_V 는 적층형 압전소자의 소자상수이다.

외력 F_L 이 없는 경우 식 (10), (11)에서 F_2 를 소거하고 식 (3), (5)와 식 (12)를 대입하면 다음과 같이 자유상태에서 압전소자에 걸여준 전압 V 와 증폭판 1 의 변위 ξ_1 사이의 관계식을 얻을 수 있다.

$$V = \frac{-1}{2C_p C_V (\xi_1 + h_{1,i})} \left[\frac{4E_1I_1}{b_1l_1} \xi_1 + \frac{4E_2I_2}{b_2l_2} \left(1 - \frac{h_{2,i}}{\sqrt{h_{2,i}^2 + 2l_2\xi_1}} \right) (l_1 - \frac{\xi_1^2 + 2\xi_1h_{1,i}}{2l_1}) \right] - \frac{\xi_1^2 + 2\xi_1h_{1,i}}{C_V l_1} \quad (14)$$

실제 구동기의 성능에 큰 영향을 미치는 증폭판의 설계인자는 힌지부분의 두께와 초기 힌지의 높이 $h_{1,i}$ 와 $h_{2,i}$ 이다.

Fig. 5 는 식 (14)를 이용하여 $h_{1,i}$ 와 $h_{2,i}$ 가 모두 1 mm 인 경우 힌지의 두께에 따른 증폭판 2 의 변위를 나타낸 그림이다. 여기서 증폭판의 두께는 판이 견딜 수 있는 힘의 세제곱에 비례하므로 증폭판 1 과 2 의 두께비는 2:1 로 하여 증폭판 1 의 변위를 8 배까지 증폭해도 충분히 지지하도록 고려했다. Fig. 5 에서 전체적으로 힌지의 두께와 증폭비는 반비례하지만 두께가 0.1 mm 이하로 작아지면 증폭비가 일정한 값으로 수렴한다는 것을 알 수 있다.

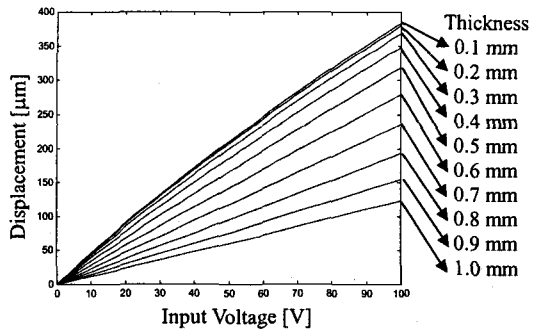


Fig. 5 Relation between displacement of plate 2 and plate thickness ($h_{1,i} = h_{2,i} = 1$ mm)

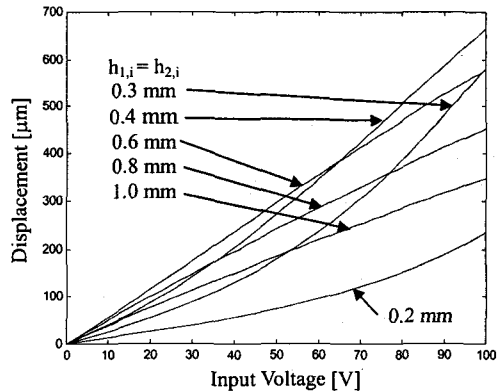


Fig. 6 Relation between displacement of plate 2 and initial plate height ($h_{1,i} = h_{2,i}$)

Fig. 6 은 증폭판 1 의 힌지두께를 0.4 mm, 증폭판 2 는 0.2 mm 로 두고 초기 높이 $h_{1,i}$ 와 $h_{2,i}$ 를 변화시켜서 얻은 결과이다. 결과를 보면 이상적인 경우와는 달리 초기 높이와 증폭비는 선형적인 관계가 아니고 특정 높이에서 증폭비가 최대가 되는 것을 알 수 있다.

4. 실험 및 토의

본 연구에서 사용된 적층형 압전소자는 Tokin 사의 AE505D16 이며 그 크기는 $5 \times 16 \text{ mm}^3$ 이다. AE505D16 의 상수 C_p , C_v 는 Tokin 의 소자 특성자료로부터 각각 $48.85 \text{ N}/\mu\text{m}$, $0.116 \mu\text{m}/\text{V}$ 로 산정하였다.

Fig. 7 은 제작된 이중증폭 적층형 구동기의 사진이다. 크기는 $24 \times 24 \times 8 \text{ mm}^3$ 정도이며 증폭판을 장착하기 위한 보조부품은 알루미늄으로 가공하여 사용하였다. 증폭판은 가공성이 뛰어난 황동(Brass)을 사용하였으며 크기는 넓이 6mm, 두께 0.4mm 두께(증폭판 1), 0.1mm(증폭판 2)로 설계하였다. 힌지 부분에서 굽힘을 용이하게 하기 위하여 두께 1mm 의 홈을 양쪽으로 깊이 2mm 씩 내어서 Fig. 7 과 같이 힌지 부분의 넓이가 2 mm 가 되도록 설계하였다.

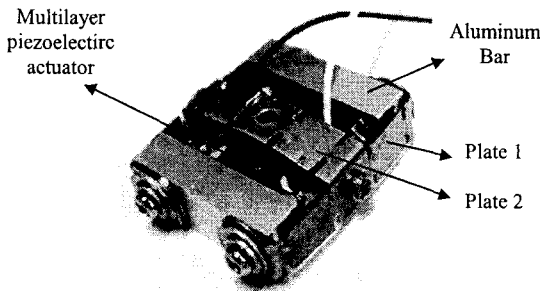


Fig. 7 Double amplified multilayer actuator

증폭판 2 의 최종 변위는 $0.01 \mu\text{m}$ 의 정밀도를 갖는 Keyence 사의 레이저 변위측정기(Laser Displace Meter) LC-2400A 를 사용하여 측정하였다.

Fig. 8 은 $h_{1,i}$ 가 1.05mm, $h_{2,i}$ 가 1.5mm 일때 실제 측정된 결과와 이론적으로 해석한 결과를 비교한 것이다.

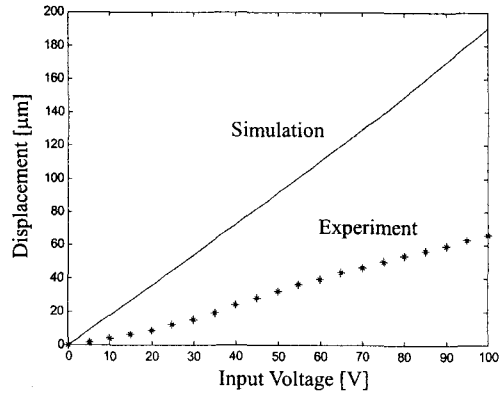


Fig. 8 Simulation and Experimental Result

Fig. 8 에서 실제 측정결과와는 시뮬레이션으로 예상되는 증폭비의 약 1/3 정도로 작음을 알 수 있다. 이는 실제 구동기에서는 금속 증폭판이 힌지부분에서만 굽힘이 일어나는 것이 아니라 전체에서 어느정도 일어나고 있기 때문이라고 생각된다. 그러므로 좀더 큰 변위 확대를 얻기 위해서는 증폭판의 두께를 좀더 크게하여 굽힘을 줄이고 힌지부분의 두께를 정밀한 가공을 통하여 조절하면 좀더 큰 증폭성능을 얻을 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 적층형 압전소자에 변위증폭을 위한 금속판을 이중으로 설치하여 압전소자 자체의 변위를 10 배이상 증폭할 수 있는 구동기를 개발하였다. 개발된 이중증폭 적층형 구동기의 성능은 변위 증폭을 위한 금속판의 힌지부분의 설계, 초기 금속판의 높이에 따라 큰 차이를 보이고 특정한 초기 높이에서 최대의 변위 확대비가 나타나므로 실제 설계시에는 이것을 고려하여 최적화가 필요하다. 본 연구에서 제안한 이중증폭방식의 구동기는 구동력이 크고 변위는 작은 적층형 압전소자와 구동력은 작고 변위는 큰 바이모프형 압전소자의 중간적인 성격을 가지고 있다. 또한 기존의 구동기에 비하여 상대적으로 크기가 작고 증폭판의 설계에 따라 구동기의 특성을 쉽게 조절할 수 있으므로 내시경이나 관내 이송 로봇등의 다양한 분야에서 구동기로 사용될 수 있다.

후기

본 연구는 21C 프론티어 개발사업, 지능형 마이크로 시스템 개발사업의 일환으로 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) G. H. Haertling, "Rainbow ceramics – a new type of ultra-high displacement actuator," *Amer. Ceram. Soc. Bull.*, Vol. 73, pp. 93-96, Jan. 1994.
- (2) Aydin Dogan, Jose F. Fernandez, Kenji Uchino, and Robert E. Newnham, "The 'cymbal' electromechanical actuator," *Proceedings of the Tenth IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics*, Vol. 1, pp. 213-216, 1996.
- (3) Aydin Dogan, Kenji Uchino, and Rober E. Newnhan, "Composite Piezoelectric Transducer with Truncated Conical Endcaps 'Cymbal'," *IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol. 44, No. 3, pp. 597-605, 1997.
- (4) Baomin Xu, Q. M. Zhang, V. D. Kugel, Qingming Wang, and L. E. Cross, "Optimization of Bimorph Based Double Amplifier Actuator under Quasistatic Situation," *Proceedings of the Tenth IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics*, Vol. 1, pp. 217-220, 1996
- (5) L. D. Landau and E. M. Lifshitz, *Theory of Elasticity*, 3rd ed., Oxford: Pergamon Press, 1986, Chapter 2.