

# 압전 바이모프를 이용한 새로운 구조의 관내 이동메커니즘 개발

김준형\*(한국과학기술원 기계공학과), 박한길(한국과학기술원 기계공학과),  
 김수현(한국과학기술원 기계공학과), 곽윤근(한국과학기술원 기계공학과)

## Development of A New In-pipe Locomotive Mechanism Using Piezoelectric Bimorph

J. H. Kim(Mech. Eng. Dept. KAIST), H. K. Park(Mech. Eng. Dept. KAIST),  
 S. H. Kim(Mech. Eng. Dept. KAIST), Y. K. Kwak(Mech. Eng. Dept. KAIST)

### ABSTRACT

A new in-pipe locomotive mechanism is developed using piezoelectric bimorphs. Two bimorphs are linked serially and produce an ellipsoidal motion at the end of bimorph. The device moves by the friction force between the rubber attached at the bimorph end and the inner surface of the pipe. The developed mechanism is very simple and need relatively small power compared to a conventional multi-layer piezoelectric motor.

**Key Words :** piezoelectric bimorph(압전 바이모프), actuator(구동기), in-pipe locomotive mechanism(관내 이동 메커니즘), ellipsoidal motion(타원운동)

### 1. 서론

마이크로 메카트로닉스(Micro Mechatronics)분야의 발전과 함께 압전재료(Piezoelectric Material)를 이용한 구동기가 많이 연구되고 있다.[1] 압전재료는 변위응답속도가 빠르며(수십  $\mu$ s), 소형임에도 불구하고 크기에 비해 상대적으로 발생력이 크고, 복잡한 전달기구 없이 직접변위가 발생하는 등의 장점이 있어서 종래의 전자식 혹은 공압식 구동기의 소형화 문제를 해결하는데 적합하다. 소형 구동기에 사용되는 압전재료는 자체의 변형량이 매우 작아서 보통 큰 힘을 낼 수 있는 적층형 압전소자나 구동력은 작지만 수백  $\mu$ m 까지 구동할 수 있는 바이모프형 압전소자로 만들어 많이 사용한다.

압전재료를 이용한 구동기는 여러분야에 사용되는데 정밀기기분야, 인체의 내시경의 이송기구 또는 관내의 결함, 내부저류의 변화 등을 관찰하는 관내 이송로봇(In-pipe robot)분야 등에서 많은 연구가 진행되고 있다. 압전 바이모프(Piezoelectric Bimorph)를 이용한 선형 이동기구에 관한 연구를 살펴보면, F. De Ambroggi 등은 일반 평면에서 이동하는 기구를 개발하였다.[2] 이 기구는 바이모프 두

개를 직교하도록 연결하여 걷는 구조로 되어있으며 매우 빠른 이동속도를 얻을 수 있지만 관내와 같은 좁은 공간에서는 적용하기 어려운 구조이며, 중력이 작용하지 않는 경우 사용이 불가능한 단점이 있다. Okabe 와 Kanno 는 바이모프 끝단에 질량을 부착하여 공진모드의 차이에 의한 이동 메커니즘을 개발하였다.[3] 이 기구는 구조가 간단한데 비하여 바이모프의 공진을 이용하므로 중력과 부하, 주파수등에 따라 매우 제한적인 구동만 가능하여 제어가 어려운 구조이다. Kawakita 등은 기존의 충격 구동형(Impact drive) 이동기구에서 적층형 압전소자를 여러 개의 바이모프로 대체하여 사용전력을 크게 줄이는 연구를 수행하였다.[4] Kawakita 의 이송기구는 소형이고 작은 전력을 소모하는 장점이 있지만 바이모프의 길이가 관의 반지름의 길이가 되므로 속도가 느린 단점이 있다.

본 연구에서는 압전 바이모프를 이용해 대장 내시경이나 지름 3-4 cm 정도의 관에서 사용될 수 있는 새로운 선형 이동기구를 개발하고 그 성능을 실험적으로 측정하였다.

## 2. 압전 바이모프

압전 바이모프는 두 장의 얇은 압전판 (Piezoelectric Sheet)을 붙인후 각각 서로 반대되는 극성의 전압을 걸어주어 압전판의 수축과 인장에 의하여 굽힘을 일으켜서 변위를 증폭하는 구동기이다. 압전 바이모프에 전압을 걸어주었을 때 발생하는 변위는 바이모프 끝단에 외부에서 등가 굽힘모멘트를 걸어주었을 때로 가정하여 구할 수 있다.[5]

그림 1 은 압전 바이모프에 전압을 걸어주었을 때의 모델을 나타낸 것이다.

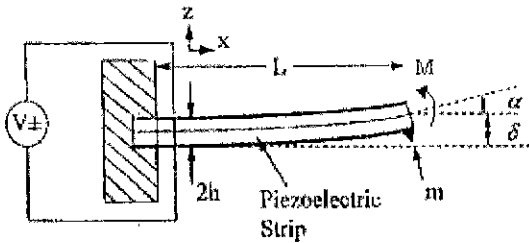


Fig 1 Model of Piezoelectric Bimorph

Fig. 1 에서 전압 V 를 걸어주었을 때 발생하는 바이모프 끝단의 변위  $\delta$  와 각도  $\alpha$  는 한쪽이 고정된 얇은 빔으로 가정하면 다음과 같다.[5]

$$\omega = \beta^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{3d_{31}V \sin \beta L \sinh \beta L}{4h^2 \beta^2 (1 + \cos \beta L \cosh \beta L)} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{3d_{31}V (\cos \beta L \sin \beta L + \cos \beta L \sinh \beta L)}{4h^2 \beta (1 + \cos \beta L \cosh \beta L)} \quad (3)$$

이때  $d_{31}$  은 압전재료의 압전변형상수 (Piezoelectric Strain Coefficient)이고 V 는 각각의 압전재료 판에 걸리는 전압,  $\omega$  는 가진 주파수,  $\rho$  는 밀도, A 는 단면적, E 는 탄성계수, I 는 y 축에 대한 관성모멘트이다.

본 연구에서 사용한 바이모프는 Piezo Systems 사의 L220-A4-303Y 이며 그 특성은 Table 1 과 같다.

	Piezoelectric Sheet	Center Brass
크기	12.7×31.8×0.19 mm <sup>3</sup>	12.7×31.8×0.13 mm <sup>3</sup>
D <sub>31</sub>	190E-12 m/V	•
$\rho$	7.8E3 kg/m <sup>3</sup>	8.4E3 kg/m <sup>3</sup>
E	6.6E10 N/m <sup>2</sup>	10.4E10 N/m <sup>2</sup>

Table 1 Parameters of the piezoelectric bimorph

## 3. 이동 메커니즘

### 3.1 이동원리

본 연구에서 제안한 메커니즘은 두개의 바이모프 소자를 Fig. 2 와 같이 직렬로 연결하여 끝단에 장착한 고무가 관의 내벽을 짚어가며 마찰력을 이용하여 전진하는 구조이다.

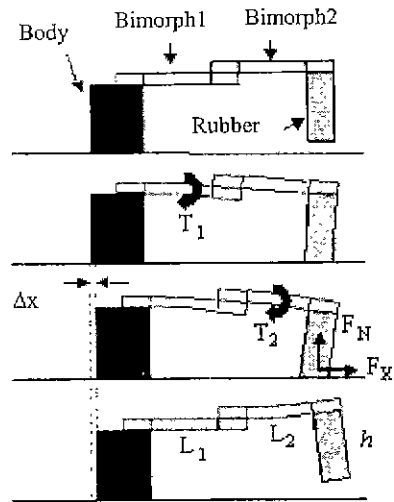


Fig. 2 Moving Principle

Fig. 2 를 보면 먼저 바이모프 1 이 아래로 구부러지면 끝단의 고무가 지면과 접하고 이때 바이모프 2 가 구부러져서 앞으로 끌리당긴다. 바이모프 2 가 구부러진 상태에서 바이모프 1 을 위로 구부리면 고무는 지면에서 떨어지며, 이때 바이모프 2 를 펴면 초기 상태로 돌아오게 된다. 이 과정은 초음파 모터의 원리와 유사한데, 실제 구동에서는 위상차를 가진 조화함수를 사용하여 고무의 끝단을 타원형의 궤도로 움직여서 전체 물체를 이동하게 된다. 고무와 지면의 마찰력을 구하기 위해 물체가 고정된 상태라고 가정하면 바이모프에 의한 최대수직방향의 힘  $F_N$  과 구동력  $F_X$  는 다음과 같이 구해진다.

$$T_1 + T_2 = F_N(L_1 + L_2) + hF_X \quad (4)$$

$$F_{X,max} = \mu F_N \quad (5)$$

이때  $T_1, T_2$  는 각각 외부전압을 걸어주었을 때 바이모프 1 과 2 에서 발생하는 토크,  $L_1, L_2$  는 각각 바이모프 1 과 2 의 길이, h 는 고무부분의 길이,  $\mu$  는 고무와 표면사이의 마찰계수이다.

본 연구에서 사용된 바이모프의 경우  $\pm 90$  V 의 전압을 걸어주었을 때 토크가 약  $\pm 4.2E-3$  Nm 정도 이므로  $F_N$  은 약 0.11 N 정도이며  $\mu$  의 값에 따라 최

대 구동력은 수십 mN을 얻을 수 있다.

실제 관내에 적용하는 경우 Fig. 3 과 같이 아래 위 대칭으로 배치하면 수직방향이나 비스듬히 기울어진 관내에서도 동작이 가능하며 작은 반지름에서 사용이 용이한 장점이 있다.



Fig. 3 Application in a pipe

### 3.2 구동방법

앞에서 설명한 바와 같이 바이모프를 구동하여 이동하기 위해서 Fig. 4 와 같이 바이모프 1 에는 사인 입력을, 바이모프 2 에는 바이모프 1 의 입력보다 위상이 1/4 주기 빠른 입력을 넣어주면 고무 끝단의 운동은 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 해석하면 Fig. 5 와 같이 타원궤도를 그리게 된다. 이 경우 고무 끝단은 Fig. 5 의 화살표 방향으로 이동하게 되며 점선이 외벽이라고 가정하면 외벽을 짚어서 전진하게 되고, 만약 바이모프 2 의 위상이 더 느리게 바뀌어 주면 Fig. 5 에서 화살표의 반대방향으로 움직여서 후진하게 된다.

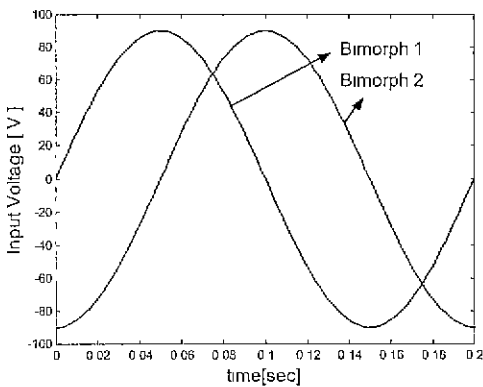


Fig. 4 Input Voltage of Bimorph

Fig. 5 에서 고무의 길이  $h$  가 2 cm 일 때 한 주기당 이동거리는 선분 AB 의 길이가 되므로 약 400  $\mu\text{m}$  정도가 되고 고무가 미끄러짐이 없다고 가정하면 100 Hz 로 구동할 때 이론적으로 약 4 cm/s 의 속도를 얻을 수 있다.

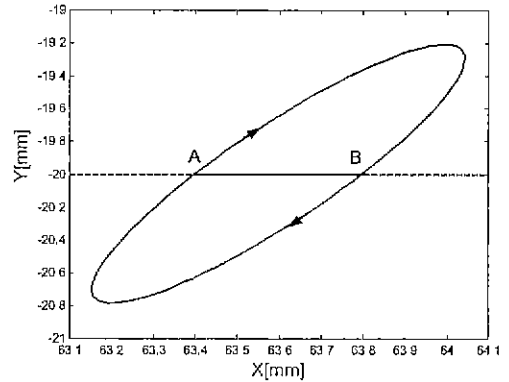


Fig. 5 Trajectory of Rubber End

### 4. 실험결과

실제 구동기의 경우 식 (2)-(4)는 한쪽이 고정된 빔으로 가정한 결과이므로 Fig. 3 과 같이 아래 위 방향으로 대칭인 경우는 거의 일치하지만 Fig. 2 와 같이 일반 평면에서 사용할 경우에는 이동 몸체가 가벼운 경우 자체의 진동으로 인하여 오차가 발생하게 된다. 또 바이모프 끝단의 고무부분의 변형에 따라 성능에 차이가 있으므로 본 연구에서는 이상적인 상태의 예상속도와 실험을 통한 결과를 비교하였다.

Fig. 6 은 이동실험을 위한 실험장치 구성도이다. 실제 실험기구에서는 끝단의 변형을 줄이기 위하여 Fig. 2 의 고무부분을 알루미늄 관으로 제작하고 저면과 닿는 부분만을 고무와 같은 연성제질을 가지는 물질로 처리하였다. 위상차를 가지는 전압입력을 위해서 National Instrument 사의 PCI-MIO-16E-4 보드를 사용하여 컴퓨터를 이용하여 파형을 만들어 주었으며 Fig. 7 은 실제 제작된 바이모프 이동기구의 사진이다. 실험은 간격 3.6 cm 의 평행한 두 관 사이를 이동하도록 하였으며 가진 주파수에 따른 운동속도를 측정하기 위하여 일정거리를 구동하여 걸린 시간을 측정하였다.

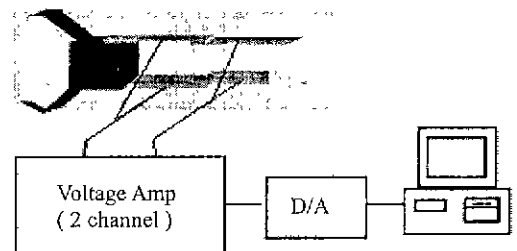


Fig. 6 Schematic of the Experimental Setup

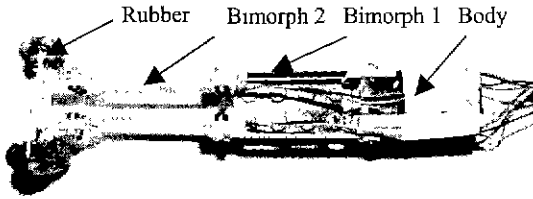


Fig. 7 Locomotion Mechanism driven by Piezoelectric Bimorph

실제 실험을 통해 얻어진 결과는 Fig. 8 과 같다. 10 Hz 이하의 저주파에서는 고무의 타원궤도를 관찰할 수 있으며 이 동작을 통해 얻어진 이동속도는 Fig. 8 과 같이 전체적으로 주파수에 비례하는 속도를 보이고 있다. 그러나 20 Hz 이상의 주파수로 가진하는 경우 고무 끝단이 벽과 충돌할 때 발생하는 충격력이 이동운동에 영향을 크게 미치게 되어 주파수 별로 불규칙한 속도 특성을 나타내고 있다. 특히 주파수가 20~30 Hz 사이에서 전진속도가 후진속도에 대칭적으로 변화하는데, 이것은 바이모프 끝단에 장착한 고무지지부가 미세하게 90 도에서 벗어나 있어서 후진방향으로 충격력에 의한 힘이 작용하기 때문이라고 보여진다. 실제로 27 Hz 근방에서는 전진속도는 느려지지만 후진속도는 증가하고 있다. 이론적으로는 10 Hz 에 약 4 mm/s 의 속도가 예상되지만 실제 실험결과는 2 mm/s 정도로 느린데 이것은 해석시 고무의 변형과 외벽과 고무사이의 미끄러짐과 충돌 등을 고려하지 않았기 때문이다. 50 Hz 이상의 주파수로 구동하면 진동에 의해 거의 이동을 하지 못하게 된다.

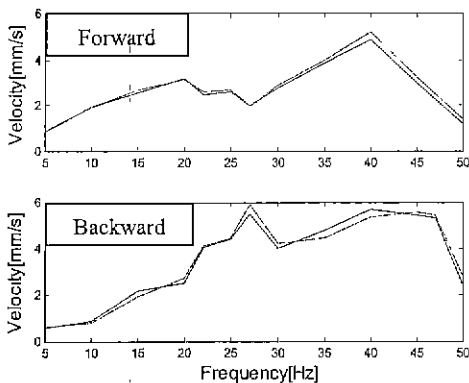


Fig. 8 Translation velocity

#### 4. 결론

본 연구에서는 압전 바이모프 소자를 사용하여 판내에서 전/후진이 가능한 새로운 구조의 이동기

구를 개발하였다. 개발된 이동기구는 두개의 바이모프 소자를 직렬로 연결하여 끝단에서 타원형태의 궤적을 생성하여 초음파 모터와 비슷한 원리로 판의 내벽을 짚고 나아가는 원리로 이동한다. 또한 구동주파수에 따라 수 mm/s 의 속도로 이동이 가능하며 구조적으로 매우 간단하여 비용이 적게 들고 소형화에 매우 유리한 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 개발된 이동기구는 바이모프 끝단의 재료와 접촉상태에 따라 큰 영향을 받으므로 이에 대한 연구가 더 필요할 것이다. 또한 가진 주파수가 증가하면 바이모프 끝단과 외벽 사이의 충격력이 강해져서 운동에 지체적인 영향을 주므로 이를 고려한 진동학적 해석이 더 필요할 것이다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구의 특정기초연구 지원사업의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. Hidenori Ishihara, Fumihito Arai, and Toshio Fukuda, "Micro Mechatronics and Micro Actuators," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 1, No. 1, pp. 68-79, March 1996.
2. F. De Ambroggi, L. Fortuna, and G. Muscato, "PLIF: Piezo Light Intelligent Flea New Micro-Robots Controlled By Self-Learning Techniques," Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA, Part 2, pp. 1767-1772, 1997.
3. Hiroshi Okabe and Mune kazu Kanno, "Linear Motor Using Hysteresis and Resonance of Piezoelectric Element," Proceedings of the 1998 11th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, pp. 365-367, 1998.
4. Shinichiro Kawakita et al., "Multi-Layered Piezoelectric Bimorph Actuator," International Symposium on Micromechatronics and Automation, pp. 73-77, 1997.
5. Jan G. Smiths, and Arthur Ballato, "Dynamic Admittance Matrix of Piezoelectric Cantilever Bimorphs," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 105-112, 1994