

## 압전 바이모프의 타원운동을 이용한 정밀 이동기구 개발

박한길\*, 김준형\*, 김수현\*\*, 곽윤근#

### Development of Precision Moving Mechanism using Ellipsoidal Motion of Piezoelectric Bimorph

Han Gil Park\*, Jun Hyung Kim\*, Soo Hyun Kim\*\*, Yoon Keun Kwak#

#### ABSTRACT

A new type of precision actuator is developed using piezoelectric bimorphs. This type of actuator is applicable for the flat surface or in-pipe system and can make forward and backward motion. Two bimorphs are linked serially and two different phased voltages are applied to each bimorph. Therefore, The end of the bimorph makes ellipsoidal motion. The device moves by the friction force between the rubber attached at the bimorph end and the inner surface of the pipe. As the results, the driving range of the device is about 0~18Hz and the device guarantees very high linearity at low frequency, 0~1Hz. The maximum velocity of the device is about 6mm/s at 10Hz. The developed mechanism is very simple and use piezoelectric bimorph. So, it is possible to miniaturize and educe the power consumption.

**Key Words** : Piezoelectric Bimorph(압전 바이모프), Actuator(구동기), Ellipsoidal motion(타원운동)

#### 1. 서론

메카트로닉스(Micro Mechatronics) 분야의 발전과 함께, 마이크로 로봇의 수요가 증대되고 있고 그에 따른 연구도 활발히 진행되고 있다. 마이크로 로봇은 mm ~ cm 단위의 작은 형상으로  $\mu\text{m}$  단위의 변위 정밀도를 가지고 좁은 공간에서 여러 가지 작업을 수행할 수 있는 로봇으로, 마이크로 가공(Micromachining), 좁은 환경탐지(Inspection of small environments), 마이크로수술(Micro-surgery) 분야 등 산업계 전반에서 사용된다.<sup>1</sup>

마이크로 로봇이 고정밀도, 초소형화를 지향하

고 있기 때문에 마이크로 로봇의 재료로는 주로 압전재료(Piezoelectric), 자성재료(Magnetostrictive), 형상기억합금(Shape memory alloy) 등이 사용된다.

이 중 압전재료(Piezoelectric material)는 변위 응답속도가 빠르며(수십  $\mu\text{s}$ ), 소형임에도 불구하고 크기에 비해 상대적으로 발생력이 크고, 복잡한 전달기구 없이 직접변위가 발생하는 등의 장점이 있어 마이크로 로봇의 주 재료로 사용되고 있다. 소형 구동기에 사용되는 압전재료는 변형량이 매우 작아서 보통 큰 힘을 낼 수 있는 적층형 압전소자, 또는 구동력은 작지만 수백  $\mu\text{m}$  까지 구동할 수 있는 바이모프형 압전소자로 많이 사용한다.

1997 2002년 4월 11일 접수  
\* KAIST 대학원 기계공학과 MSD 실험실  
\*\* KAIST 대학원 기계공학과  
# 교신저자, KAIST 대학원 기계공학과  
Email kyk@cais.kaist.ac.kr Tel. (042) 869-3212

압전 바이모프를 이용한 선형 이동기구에 대한 기존 연구를 살펴보면, F. De Ambroggi 는 바이모프를 구동기의 다리로 사용하여 일반 평면에서 이동하는 기구를 개발하였다.<sup>2</sup> 이 기구는 바이모프와 바닥 사이에 작용하는 마찰력과 충격력을 이용해 걷는 구조로 되어있다. 이 구조는 매우 빠른 이동속도를 얻을 수 있지만 제어가 어렵고, 충격 의존도가 매우 크다는 단점이 있다.

Okabe 와 Kanno 는 바이모프 공진을 이용해 앞뒤 양방향으로 이동할 수 있는 구동기를 개발하였다.<sup>3</sup> 이 기구는 구조가 매우 간단한데 비하여 바이모프의 공진을 이용하므로 충격과 부하, 주파수 등에 따라 매우 제한적인 구동만 가능하고 제어가 어렵다는 단점이 있다.

Kawakita 는 다층 바이모프(Multi-layer bimorph)를 이용하여 기존의 충격 구동형(Impact drive) 방식으로 관내에서 이동 가능한 구동기를 개발하였다.<sup>4</sup> 이 기구는 소형이고 작은 전력을 소모하고 관내에 적용 가능하다는 장점이 있지만, 바이모프의 길이가 관의 반지름의 길이가 되므로 관 직경이 작아질수록 속도가 느려지고 형상이 복잡해져 제작이 힘들어진다는 단점이 있다.

본 연구에서는 압전 바이모프를 이용한 새로운 구동 방식의 정밀 이송기구를 개발하였다. 개발된 이송기구는  $\mu\text{m}$  단위의 변위 정밀도를 가지는 동시에 이동 속도를 향상시킬 수 있는 새로운 구조의 바이모프 메커니즘이다. 제작된 구동기는 원자력 발전기의 관내와 같이 좁고 분해가 불가능하거나, 더럽거나 위험해서 사람의 접근이 불가능한 곳을 탐사하는데 사용될 수 있다.

## 2. 압전 바이모프

압전 바이모프는 두 장의 얇은 압전판(Piezoelectric Sheet)을 붙인 후 각각에 서로 반대되는 극성의 전압을 걸어주어 압전판의 수축과 인장에 의하여 굽힘을 일으켜서 변위를 증폭하는 구동기이다. 압전 바이모프에 전압을 걸어주었을 때 발생하는 변위는 바이모프 끝단에 외부동가굽힘 모멘트를 걸어주었을 때로 가정하여 구한다.<sup>5</sup>

Fig. 1 은 압전 바이모프에 전압을 걸어 주었을 때의 모델을 나타낸 것이다.

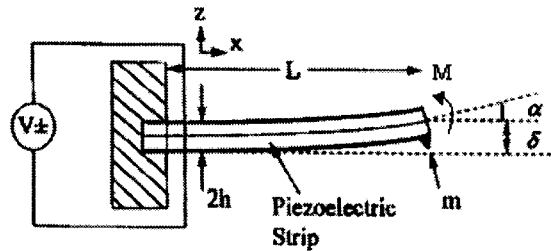


Fig. 1 Model of piezoelectric bimorph

Fig. 1 에서 전압  $V$  를 걸어주었을 때 발생하는 바이모프 끝 단의 변위  $\delta$ 와 각도  $\alpha$ 는 바이모프가 1 차 모드로 진동할 때, 한쪽이 고정된 얇은 빔으로 가정하면 다음과 같다.<sup>5</sup>

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

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

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

이 때  $d_{31}$  은 압전재료의 압전변형상수이고  $V$  는 각각의 압전재료 판에 걸리는 전압,  $\omega$ 는 가진 주파수,  $\rho$ 는 밀도,  $A$ 는 단면적,  $E$ 는 탄성계수,  $h$ 는 바이모프의 두께,  $\beta$ 는  $\omega$ 에 의해 정의되는 상수,  $I$ 는  $y$ 축에 대한 관성모멘트이다.

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

Table 1 Parameters of the piezoelectric bimorph

	Piezoelectric Sheet	Center Brass
size	12.7×31.8×0.19 mm <sup>3</sup>	12.7×31.8×0.13 mm <sup>3</sup>
$d_{31}$	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>

## 3. 이동 메커니즘

### 3.1 이동원리

본 연구에서 제안한 메커니즘은 두개의 바이

모프 소자를 Fig. 2 와 같이 직렬로 연결하여 끝단에 장착한 고무가 관의 내벽을 짚어가며 마찰력을 이용하여 전진하는 구조이다.

Fig. 2를 보면 먼저 바이모프 1 이 아래로 구부러지면 끝 단의 고무가 지면과 접하고 이때 바이모프 2 가 구부러져서 앞으로 끌어당긴다. 바이모프 2 가 구부러진 상태에서 바이모프 1 을 위로 구부리면 고무는 지면에서 떨어지며, 이때 바이모프 2 를 펴면, 이동 후 초기 상태로 돌아오게 된다. 이 과정은 초음파 모터의 원리와 유사한데, 실제 구동에서는 위상차를 가진 조화함수를 사용하여 고무의 끝 단을 타원형의 궤도로 움직여서 전체 몸체를 이동하게 된다.

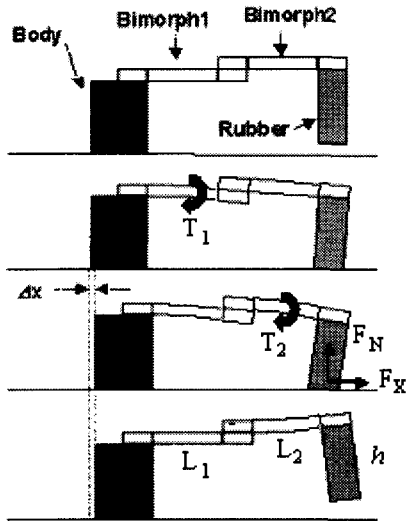


Fig. 2 Moving principle

실제 관내에 적용하는 경우 Fig. 3 과 같이 아래위 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 사인입력을, 바이모프 2 에는 바이모프 1 의 입력보다 위상이 1/4 주기 빠른 입력을 넣어주면 고무 끝 단의 운동은 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 해석하면 Fig. 5 와 같이 타원궤도를 그리게 된다. 이 경우 고무 끝 단은 Fig. 5 의 화살표 방향으로 이동하게 되며 접선이 외벽이라고 가정하면 외벽을 짚어서 전진하게 되고, 만약 바이모프 1 의 위상보다 바이모프 2 의 위상이 더 느리게 위상을 바꾸어 주면 Fig. 5 에서 화살표의 반대방향으로 움직여서 후진하게 된다.

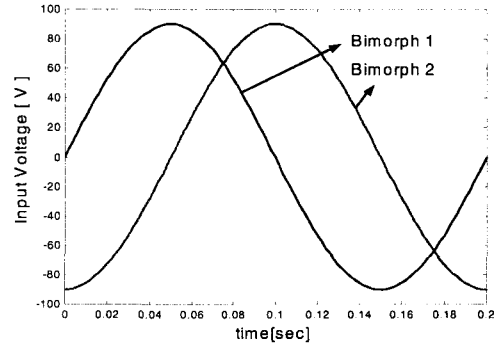


Fig. 4 Input voltage of bimorph

Fig. 5 에서 고무의 길이가 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.

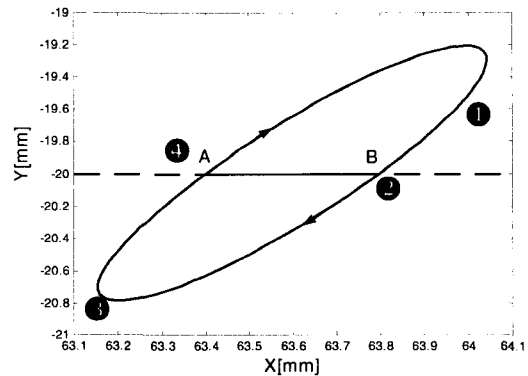


Fig. 5 Trajectory of rubber end

#### 4. 동역학적 모델링

##### 4.1 모델링

시스템의 성능을 예측하기 위해 다음과 같은 가정 하에서 모델링을 시행하였다. 수십 Hz 이상의 고속구동 시에는 충격력에 의한 영향이 매우 커지므로 이론적인 구동 특성 모델이 매우 힘들다. 그러므로 본 연구에서는 모델링의 목적을 저속에서의 이동 정밀도 향상에 초점을 두었다. 가진 주파수 1Hz 미만의 저속구동의 경우 2 절의 바이모프 끝단의 변위와 휨 각에 대한 정적 상태의 식을 그대로 사용할 수 있다. 또한 실제 고무 끝단의 길이가 매우 짧으므로 고무의 탄성에 의한 압축, 인장 효과는 고려하지 않았다.

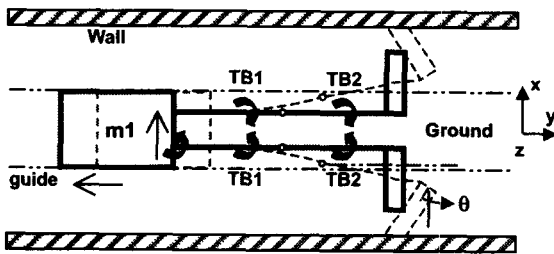


Fig. 6 Schematic diagram of the system

Fig. 6 은 모델링을 위한 시스템의 개략도 이다.  $F_{xy}$  를  $y$  가  $x$  에 주는 힘,  $T_{xy}$  를  $y$  가  $x$  에 주는 토크라고 정의하고 각각의 요소별로 운동 방정식을 세운 후 그것을 연립하여 전체 시스템에 대한 운동방정식을 구한 결과는 다음과 같다.<sup>6</sup>

$$F_{m1gx} + 2F_{m2wx} = m_1 \ddot{x}_{m1} + 2m_2 \ddot{x}_{m2} \quad (4)$$

$$-F_{m1B1y} + F_{m2wy} = m_2 \ddot{y}_{m2} \quad (5)$$

$$-T_{m1B1} + F_{m2wx}h + F_{m2wy}(L_{B1} + L_{B2}) = -I_{m2} \ddot{\theta} \quad (6)$$

이때  $m_1$  의 질량에 비해  $m_2$  의 질량이 매우 작고 고무 끝단과 벽면 사이에 미끄러짐이 거의 없으므로  $m_2 \ddot{x}_{m2} = m_2 \ddot{y}_{m2} \approx 0$  이 성립한다고 볼 수 있다. 또한  $I_{m2}$  의 값도 매우 작고, 앞서 가정했듯이  $\theta$  의 값 역시 매우 작기 때문에 식 (6)에서  $I_{m2} \ddot{\theta} \approx 0$  이 성립한다. 따라서 위 세식을 연립하면 다음과 같은 하나의 식으로 나타난다.

$$F_{m1gx} + \frac{2}{h}(-T_{m1B1} + F_{m1B1y}(L_{B1} + L_{B2})) = m_1 \ddot{x}_{m1} \quad (7)$$

이 때 생기는 미지수  $F_{m1gx}$ ,  $T_{m1B1}$ ,  $F_{m1B1y}$  는 바이모프 끝 단의 변위와 휨 각에 관한 식과 마찰 조건을 고려하여 구할 수 있다.<sup>6</sup>

##### 4.2 시뮬레이션

이렇게 구한 전체 시스템에 대한 운동방정식을 상태방정식 형태로 변환하고, Runge-Kutta 해석 방법을 이용하여 시뮬레이션 해보았다.

##### 4.2.1 시간-변위 시뮬레이션

Fig. 7 은 가진 주파수 1Hz 에서의 시간-변위 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

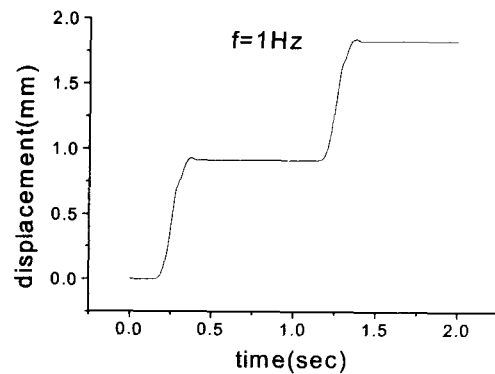


Fig. 7 Time-displacement curve at 1Hz

그림에서 볼 수 있듯이 가진 주파수가 1Hz 이기 때문에 2 초 동안 두 번의 사이클이 나타남을 알 수 있다. 시작 구간인 약 0.2 초까지 변위가 없는 구간은 Fig. 5 의 1-2 구간 즉, 바이모프에 전압이 가해져 바이모프 2 의 끝단이 간극 거리만큼 이동해 벽면에 닿기까지의 구간이다. 1-2 구간에서는 고무 끝단이 벽면에 닿지 않았으므로 벽면에서 아무런 마찰력이 전달되지 않고 따라서 변위가 없게 된다. 약 0.2~0.4 초 구간은 Fig. 5 의 2-3 구간으로, 고무 끝단이 벽에 닿은 상태로 바이모프가 굽어지며 몸체를 앞으로 끌기 때문에 변위가 지속적으로 증가한다. 약 0.4 초 구간에서 작은 피크가 발생하는데 이것은 Fig. 5 의 3-4 구간으로 바이모프가 다시 펴지며 몸체를 뒤로 밀어내기 때문에 몸체의 변위가 다소 감소하는 것이다. 0.5 초 이후

의 변위가 없는 구간은 Fig. 5 의 4-1 구간으로 고무 끝 단이 벽면에서 떨어져 허공에 있는 구간이다. 이 때는 고무 끝단이 벽면과 접촉하지 않기 때문에 몸체는 아무런 추진력을 받지 않는다.

#### 4.2.2 간극 거리 $r_0$ 에 따른 시간-변위 곡선

고무 끝단과 벽 사이의 간극 거리  $r_0$  의 값은 고무 끝단과 벽면이 접촉하는 시간을 결정하기 때문에 구동기의 성능에 큰 영향을 미친다. 즉,  $r_0$  의 값이 작아질수록 벽면과의 상대적인 거리가 가까워지게 되고 고무 끝단과 벽면이 접촉하는 시간도 길어지기 때문에 보다 오랜 시간동안 지면에서 몸체에 마찰력을 전달할 수 있다. 그러나 Fig. 5 의 3-4 구간, 즉 바이모프가 펼쳐지며 몸체를 밀어내 변위가 감소하는 구간은 상대적으로 더 길어진다. 반면  $r_0$  가 커질수록 벽면과의 거리가 상대적으로 멀어지고 고무 끝단과 벽면이 접촉하는 시간도 짧아져서 고무 끝단과 벽면 사이에 마찰력을 주고받는 시간이 짧아지지만 Fig. 5 의 3-4 의 변위 감소 구간은 오히려 짧아져 변위 상승 효과를 가져온다.

Fig. 8 에서 볼 수 있듯이  $r_0 = 4 \times 10^{-4} m$  일 때 가장 크고, 각각의  $r_0$  값에 따라 한 행정 당 이동 거리가 크게 차이 나는 것을 알 수 있다. 따라서 변위를 최대로 낼 수 있는 적절한 간극거리를 찾는 것이 필요하다.

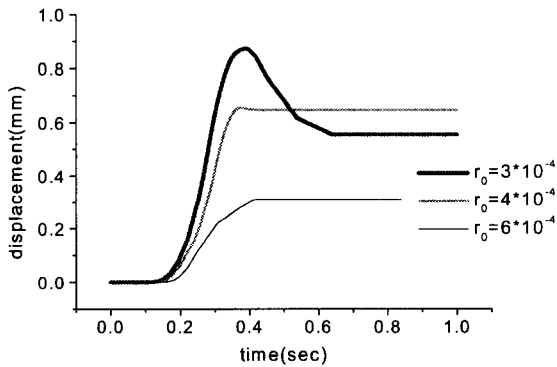


Fig. 8 Time-displacement curve at 1Hz according to  $r_0$

### 5. 실험결과 및 토의

#### 5.1 실험장치 구성

구동기의 성능을 시험하기 위해 이동 실험을

해보았다. 위상차를 가지는 전압입력을 위해서 National Instrument 사의 PCI-MIO-16E-4 보드를 사용하여 컴퓨터에서  $5 V_{p-p}$  의 사인파와  $5 V_{p-p}$  의 반파장 위상차가 앞선 사인파를 만들어낸 후 압전 구동 앰프를 사용하여 20~30 배 증폭하여 약 100~150  $V_{p-p}$  의 입력전압을 바이모프 1 과 바이모프 2 에 걸어주었다. 시간에 따른 변위 측정은 Polytec 사의 OFV 1102 Laser Vibrometer 를 사용하여 전압으로 환산된 변위를 Tektronix 사의 디지털 오실로스코프로 측정하였다.

Fig. 9 는 실제 제작된 바이모프 이동기구와 가이드의 사진이다. 바이모프는 Piezo Systems 사의 L220-A4-303Y 모델을 사용하였고, 고무 끝 단의 변형을 줄이기 위하여 바이모프 끝 단에 부착된 고무부분을 알루미늄 판으로 제작하고 지면과 닿는 부분만을 고무와 같은 연성재질을 가지는 물질로 처리하였다. 또한 바이모프 이동기구가 이동하게 하기 위해 제작된 가이드는 양쪽에 각 세 개씩 부착된 나사를 이용해 벽 사이의 간격을 조절할 수 있도록 제작되었다.

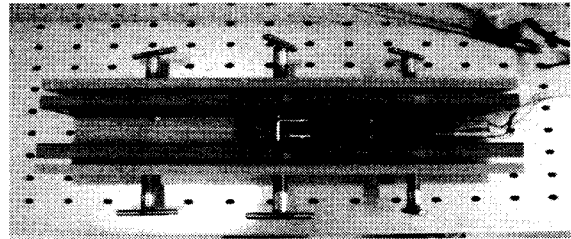


Fig. 9 Actuator and real system

#### 5.2 시간-변위 실험 및 토의

Fig. 10 은 가진 주파수 1Hz, 4Hz, 5Hz 일 때의 시간-변위 곡선을 각각 세 번씩 측정하고 그 평균 값을 도시한 것이다. 바이모프 끝 단이 구부러져 벽면을 짚고 몸체가 앞으로 끈 후 처음 위치로 돌아오는 한번의 완전한 과정을 이루는데 걸리는 시간을 1 주기로 정했을 때 2 주기 이상을 포함하는 구간을 추출했고, 각 Hz 별로 약 2 초간의 시간을 측정하였다.

주파수 별로 같은 시간에 따른 행정의 수가 비례하기 때문에 주파수가 커지면 같은 시간 동안의 변위 또한 커져야 한다. 실험 결과 주파수에 따른 변위 증가의 경향은 일치했으나 주파수에 변

위가 정확히 비례하지는 않았다. 그 이유는 주파수가 높아지면서 바이모프의 떨림이 커져 접촉점에서 미끄러짐이 생기고, 충격력에 의한 반발효과도 나타나기 때문이다.

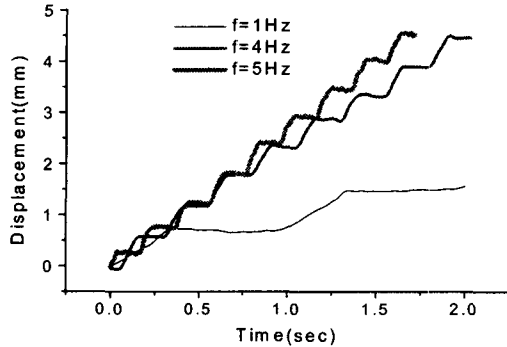


Fig. 10 Time-displacement curve during to frequency

Fig. 11 은 가진 주파수 1Hz 에서의 시간-변위 관계의 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교한 그림이다. 시뮬레이션 값과 실험값이 정확히 일치하지는 않았으나 경향은 일치했다. Fig. 11 에서 변위가 발생하는 구간의 기울기가 일치하지 않는 것은 바이모프의 변위를 구할 때 정적상태의 식을 사용했기 때문이다.

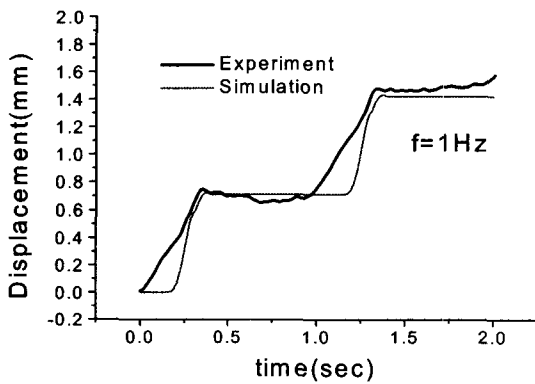


Fig. 11 Comparison simulation with experiment result

### 5.3 주파수-속도 실험 및 토의

각 주파수에 따른 바이모프 이동기구의 속도는 구동기의 직접적인 성능을 나타내는 척도이기 때문에 매우 중요하다. 각 주파수에 따른 속도를

측정하기 위해 바이모프 이동기구가 Fig. 9 의 제작한 가이드 내를 이동하도록 한 후 주파수별로 일정거리에 도달하는데 걸린 시간을 측정하여 평균 속도를 계산하였다.

실제 실험을 통해 얻어진 결과는 Fig. 12 와 같다. 약 5 Hz 이하의 저주파수에서는 고무의 타원궤도를 가지적으로 관찰할 수 있으며 바이모프의 진폭이 비교적 일정한 약 10Hz 까지는 주파수와 속도가 비례하는 규칙적인 결과를 보인다. 그러나 가진 주파수가 1 차 공진점인 약 20Hz 에 가까워짐에 따라 바이모프의 떨림이 심해지고 Fig. 12 에서 볼 수 있듯이 가진 주파수가 증가하는데도 불구하고 속도는 감소하는 이상 현상이 발생한다. 예상대로 가진 주파수가 약 20Hz 를 넘어서면 바이모프의 떨림이 너무 심해져 제대로 된 측정이 거의 불가능했다.

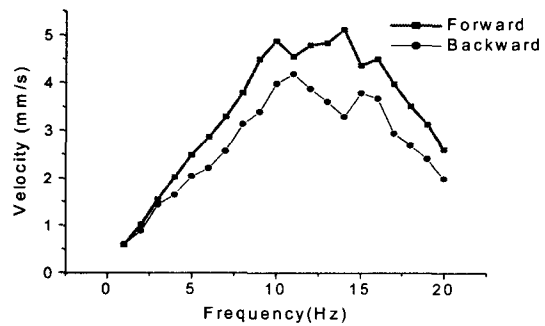


Fig. 12 Frequency-velocity curve above 1Hz

반면 Fig 13 에서 볼 수 있듯이 가진 주파수가 1Hz 이하로 매우 작을 때는 매우 높은 선형성을 얻을 수 있다. 이것은 시뮬레이션 결과에서 예측된 것처럼 낮은 주파수에서는 고무와 벽과의 접촉점에서 미끄러짐이 거의 없기 때문에 바이모프가 끄는 힘이 대부분 바이모프 이동기구의 몸체에 전달되기 때문이다.

따라서 가진 주파수를 조절함에 따라 이동 속도를 높이거나 변위 정밀도를 높이거나 둘 중 하나의 성능을 향상시킬 수 있다. 즉, 가진 주파수를 5~18Hz 정도로 크게 하면 2~6mm/s 의 비교적 빠른 속도를 얻을 수 있고, 가진 주파수를 1Hz 이하로 작게 하면 이동 속도는 느리지만 정밀한 제어가 가능하다.

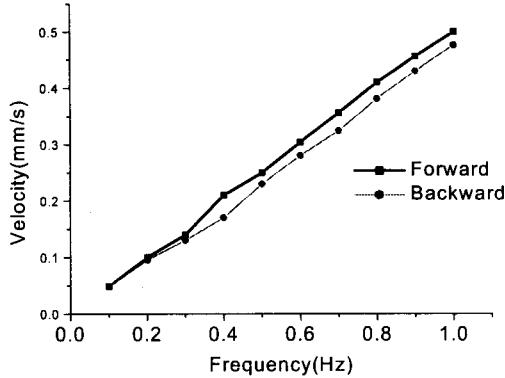


Fig. 13 Frequency-velocity curve below 1Hz

## 6. 결론

본 연구에서는 압전 바이모프 소자를 사용하여 평면 또는 관 내에서 전, 후진이 가능한 새로운 구조의 이동기구를 개발하였다. 개발된 이동기구는 두개의 바이모프 소자를 직렬로 연결하고 각각에 사인파와 반 파장 위상이 앞선 사인파를 걸어주어, 바이모프의 끝 단에서 타원형태의 궤적을 생성하여 초음파 모터와 비슷한 원리로 관의 내벽을 짚고 나아가는 원리이다.

실험 결과 개발한 이동 기구는 약 0~5Hz까지는 매우 높은 선형성을 유지하며 구동이 가능하며, 최대 18Hz까지 어느 정도 선형성을 유지하며 구동이 가능하다. 최대 이동 속도는 약 6mm/s이며, 바이모프 압전소자의 경우 적층형 압전소자[7]에 비하여 제작 비용이 적게 들고 여타 정밀이동기구에 비해 구조적으로 매우 간단하여 소형화에 매우 유리한 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 개발된 이동 기구는 구동 특성상 고무와 외벽 사이에 마찰계수가 큰 영향을 미치기 때문에, 접촉지점에서의 운동에 대해 보다 정밀한 분석이 필요하다. 따라서 보다 큰 마찰력을 낼 수 있는 재료의 선택과 고무 끝 단의 모양 설계를 고려해야 할 것이다. 또한 최대 마찰을 낼 수 있는 입력 파형에 대한 최적 설계와 고 주파수에서 바이모프의 공진으로 인해 고무가 벽에 부딪칠 때의 충격 효과에 대한 적절한 보상기법을 찾아야 할 것이다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구의 특정 기초연구 지원사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Ishihara, H., Arai, F. and Fukuda, T., "Micro Mechatronics and Micro Actuators," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 1, No. 1, pp. 68-79, March 1996.
2. Ambroggi, F., Fortuna, L. and Muscato, G., "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. Okabe, H. and Kanno, M., "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. Kawakita, S., Isogai, T., Ohya, N. and Kawahara, N., "Multi-Layered Piezoelectric Bimorph Actuator," International Symposium on Micromechatronics and Automation, pp. 73-77, 1997.
5. Smiths, J. G. and Ballato, A., "Dynamic Admittance Matrix of Piezoelectric Cantilever Bimorphs," Journal of Microelectromechanical Systems, Vol. 3, No. 3, pp. 105-112, 1994.
6. 박한길, "압전소자를 이용한 정밀 이동기구 개발," 한국과학기술원 기계공학과 석사 학위 논문, 2002.
7. 김병준, 김수현, 곽윤근, "압전소자를 이용한 다중빔 광디스크용 빔 회전 구동기," 한국정밀공학회지, Vol. 17, No. 5, pp. 154-160, 2000.