

# 바이모프의 생성 운동량을 이용한 압전 모터의 개발

최현도<sup>†</sup> · 김준형<sup>\*</sup> · 김수현<sup>\*\*</sup> · 곽윤근<sup>\*\*</sup>

## Development of Piezoelectric Motor Using Momentum Generated by bimorph

Hyun Do Choi, Jun Hyung Kim, Soohyun Kim and Yun Kun Kwak

**Key Words :** Bimorph(바이모프), Piezoelectric motor(압전모터), Momentum(운동량)

### Abstract

In many applications, piezoelectric motor has been used in the areas where excellent controllability, fine position resolution are required or magnetic field noise should be eliminated. However the piezoelectric motor has two major demerits. One is difficulty in maintaining vibration amplitude constantly with temperature rise and wear, and the other is heat generation induced by dielectric and mechanical loss. In this thesis, piezoelectric motor to overcome these problems is proposed. And proposed piezoelectric motor is operated using momentum exchange between bimorph and rotor. To maximize steady state velocity and static torque of proposed motor, the guideline is established using two bimorph models. Then the guideline is partially proved by comparison between simulation and experiment. There was no heat generation in the few hours of experiments.

### 기호설명

$f_v$  : 가공 바이모프 끝 단 속도의 회전자의 법선 방향 성분의 크기

$f_m$  : 바이모프의 운동량 회전자의 법선 방향 성분의 크기

#### 1.1 연구 배경

의학 분야와 비세가공, 전자산업 등에는 큰 힘과 큰 토크를 전달하거나 아주 작은 물체를 옮길 수 있는 소형화된 회전 모터가 필요하다. 응용분야에 따라 요구되는 회전모터의 사양이 다르지만 대부분의 경우, 소형화 되었을 때의 모터의 효율과 기어박스의 설계는 아주 중요한 변수가 된다. 기존에 널리 이용되어온 전자기 모터가 이러한 응용분야에 쓰이기도 한다.

그러나 전자기 모터의 원리와 구조로 인해 초전도체와 강자성을 띄는 새로운 물질의 발견이 없다면 극적인

발전을 기대 하기가 어렵다. 또한 기존의 전자기 모터는 충분한 에너지 효율을 가지고  $1cm^3$  이하로 소형화 하기가 굉장히 어렵고 기계적인 효율이 상당히 낮아지게 되므로, 소형화에 매우 불리한 조건을 가지고 있다고 볼 수 있다.

이에 대한 대안으로 압전 모터를 들 수 있다. 기존에 사용되고 있는 압전 모터, 즉 초음파 모터는 직접 구동의 가능, 빠른 응답 속도, 높은 위치 분해 능, 단순한 구조 등 여러 가지 장점을 가지고 있음에도 불구하고 마찰에 의한 마모와 발열의 문제로 인해 모터의 안정적인 성능을 얻을 수 없다는 점 때문에 개발 당시에는 실질적인 사용이 불가능 하였다. 여기에 본 연구의 필요성이 있다고 볼 수 있다.

#### 1.2 연구 목표 및 내용

본 논문에서는 기존의 초음파 모터가 가지고 있는 마찰에 의한 마모와 발열 문제를 피할 수 있는 바이모프 압전 소자의 충격을 이용한 회전 모터를 제안하고 향후 소형화 산업 여러 분야에 쓰일 수 있다는 가능성을 제시한다.

제 2 장에서는 개발된 압전 모터의 개략 도를 설명하고 모터의 속도와 토크를 최대화 하기 위한 함수들을 정의하고 설계변수에 따라 그 함수들이 최대화될 수 있도록 하는 설계원칙을 정하였다. 이를 수학적으로 모델

<sup>†</sup> 한국과학기술원

E-mail : chlguseh@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3252 FAX : (042)869-5201

<sup>\*</sup> 삼성전자

<sup>\*\*</sup> 한국과학기술원

링 하기 위해 바이모프의 연속모델(continuous model)을 수립한 후 감쇠효과를 고려하기 위해 1 자유도 모델(lumped model)로 단순화 시켰다. 1 자유도 모델을 이용하여 압전 모터의 설계상의 지침을 얻을 수 있었다.

제 3 장에서는 제안된 압전 모터를 실제로 제작하였다. 속도와 토크를 측정 실험을 하였고 2 장에서 도출된 설계상의 지침이 신뢰 가능하지를 실험적으로 보이기 위해 모터의 설계변수를 달리 하여 제작하고 실험을 수행 하였다.

## 2. 압전 모터의 설계

### 2.1 제안된 압전 모터

제안된 압전 모터는 스택(stack)형 압전 소자에 비해 큰 변위를 얻어낼 수 있는 바이모프를 이용하여 큰 운동량을 발생 시키고 바이모프 끝 단을 충돌시켜 회전운동을 얻어 내는 방식으로 구동된다. 즉, 바이모프 끝 단에서의 진동을 이용해 회전자(rotor)에 충격을 가하고, 이 충격에 의해 모터가 구동되도록 한다. 이러한 원리를 이용할 경우, 충격에 의한 마모와 발열량이 마찰에 의한 그것보다 작기 때문에 기존의 초음파 모터가 가지고 있던 문제점을 상당 부분 극복 할 것으로 보인다. 제안된 모터는 또한 바이모프의 두께를 일정하게 유지할 경우, 바이모프의 길이가 줄 때 항장력(blocked force)이 커질 수 있다는 장점을 가지게 된다. 이러한 특징은 모터의 크기가 mm 수준으로 줄어들 경우 토크가 급격히 줄어드는 현상이 극복될 수 있을 것으로 예상된다.

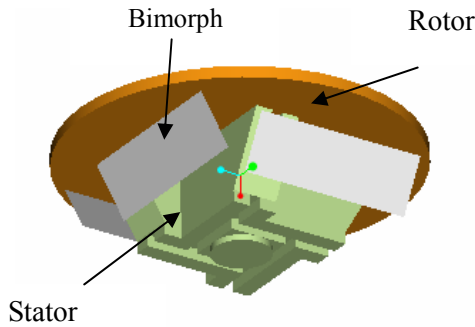


Fig. 1 Overview of the proposed piezoelectric motor

### 2.2 압전 모터의 설계변수

Fig.2 는 회전자(rotor)가 바이모프에 의해 충격을 받는 부분에서 가지는 속도의 단위 벡터와 바이모프가 가지는 속도벡터를 나타내고 있다. 제안된 압전 모터는 바이모프의 대각선 방향의 충격에 의해 구동된다고 생각할 때, 일반적으로 모터의 성능 평가 지수가 될 수 있는 정적인 토크(torque)와 최고 각속도가 어떠한 설계 요소에 영향을 주요하게 받게 될지 예상해 보았다.

우선 모터의 최고 각속도는 바이모프 끝의 속도의 회전자(rotor) 끝 단의 접선 방향 속도 성분에 비례한다고 가정 하였다. 이러한 가정은 충격이 준 평형 상태로 일어남을 가정한 것이다. 모터의 최대 토크(torque)는

바이모프가 가지는 운동량(momentum)에 비례 한다고 가정 하였다.

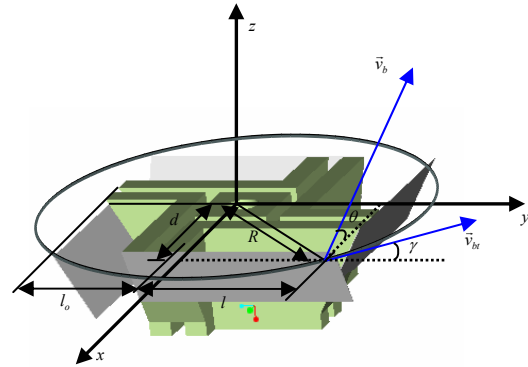


Fig. 2 Velocity of bimorph's end

Fig.2 를 참조하면 제안된 압전 모터의 형상에 의해 다음과 같은 관계를 가지게 된다.

$$l = d + \sqrt{R^2 - d^2} - l_0 \quad (2.1)$$

여기서  $l$  은 바이모프의 길이,  $R$  은 회전자의 반지름,  $d$  는 회전자의 중심에서 바이모프가 바깥으로 치우친 길이를 나타낸다.

제안된 압전 모터의 성능 함수로 선정한 바이모프 끝 단의 선속도와 모멘텀(momentum)은 다음과 같다.

$$f_v = \left| \vec{v}_{bt} \right|_{\max} = \left| \vec{v}_b \cdot \vec{r}_t \right|_{\max} \quad (2.2)$$

$$f_m = m_{eff} \left| \vec{v}_{bt} \right|_{\max} \quad (2.3)$$

여기서,  $\vec{v}_b$  는 바이모프 끝 단의 속도,  $\vec{r}_t$  는 회전자가 가장 자리의 접선 방향 속도성분을 나타낸다.

$$\vec{v}_b = \frac{dw(L,t)}{dt} (-\cos\theta \vec{i} + \sin\theta \vec{k}), \quad \vec{r}_t = -\sin\gamma \vec{i} + \cos\gamma \vec{j} \quad (2.4)$$

여기서,  $w(L,t) = \delta \sin(\omega t - \psi)$  로 쓸 수 있고  $\frac{dw(L,t)}{dt} = \delta \omega \cos(\omega t - \psi)$  로 표현된다. 위의 Eq.2.2 와 Eq.2.3 을 다시 정리하면,

$$f_v = \left| \vec{v}_{bt} \right|_{\max} = \delta \omega \sin\gamma \cos\theta \quad (2.5)$$

$$f_m = m_{eff} \left| \vec{v}_{bt} \right|_{\max} = m_{eff} \delta \omega \sin\gamma \cos\theta \quad (2.6)$$

의 관계를 가짐을 알 수 있다. Eq.2.5 와 Eq.2.6 과 Fig.2 에서 바이모프 끝 단의 속도와 모멘텀은  $\theta$  가 작을수록 커지고  $\delta, \omega, \gamma, m_{eff}$  는  $\theta$  와 독립적임을 알 수 있다. 또한 Fig.2 에서

$$\sin\gamma = \frac{\sqrt{R^2 - d^2}}{R} \quad (2.7)$$

의 관계를 가짐을 알 수 있고 그 외 다른 변수  $\delta, \omega, m_{eff}$  에 의한 영향을 알기 위해선 바이모프의 모델링이 필요하게 된다.

2.3 바이모프의 모델링

2.3.1 연속 모델

앞 장에서 논의한 것처럼 제안된 압전 모터의 성능과 설계변수 사이의 관계에 대한 함수를 알기 위해서 바이모프에 대한 모델링이 필요하다. 바이모프가 AC 전압에 의해 구동 된다고 할 때, 중심으로 폴링(poling)된 바이모프의 한 면은 줄어들고 다른 한 면은 늘어나게 현상이 주기적으로 반복되게 된다. 여기서 우리는 중요한 질문을 던질 수 있다. ‘바이모프를 휘어지게 만드는 내부적인 힘을 어떻게 고려할 것인가?’ 우리는 전압에 대한 변형률이  $\pm d_{31}E_3$  이라는 사실에서 답을 찾을 수 있다. 변형률은 전기장에 의해 형성되며, 각 요소(바이모프의 윗면과 아랫면)에 균일하게 된다. 이는 만약 바이모프가 외부에서 가해진 모멘트를 받고 있다면, 두 요소가 받게 되는 응력은 균일하고  $\pm d_{31}E_3/s_{11}^E$  와 같아진다. 여기서 우리는 균일하고 내부적으로 발생된 모멘트를 외부에서 가해진 모멘트로 고려할 수 있는데, 이는 두 가지의 경우 모두 같은 효과를 가지기 때문이다. 여기서 계산된 모멘트는 아래와 같다.<sup>[8]</sup>

$$M = 2 \int_0^{\frac{h}{2}} z \frac{d_{31}E_3}{s_{11}^E} w dz = \frac{d_{31}Vwh}{4s_{11}^E} \quad (2.8)$$

외부에서 가해진 모멘트에 대한 운동방정식과 경계조건을 동시에 찾기 위해 확장된 해밀턴 방정식(Extended Hamilton's Equation)을 이용한다.<sup>[9]</sup>

■ 운동방정식

$$m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left( EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (2.9)$$

■ 경계 조건

$$\begin{aligned} EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - M \sin \Omega t &= 0 & x=l \\ -m_{add} \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left( EI \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) &= 0 & x=l \\ \frac{\partial w}{\partial x} &= 0 & x=0 \\ w &= 0 & x=0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

변수 분리를 이용하여, 경계조건을 만족하는 해를 찾으면 유일하게 한 개의 조합 만을 가진다.

$$w(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} W_n(w) q_n(t) = W(x) q(t) \quad (2.11)$$

$$w(x, t) = (C_1 (\cos \beta x - \cosh \beta x) + C_2 (\sin \beta x - \sinh \beta x)) \sin(\Omega t) \quad (2.12)$$

와 같고 여기서  $C_1, C_2$  는 Eq.2.13 와 같다.

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{M\beta^3 (-\cos \beta l - \cosh \beta l) + \frac{Mm_{add}\Omega^2}{EI} (\sin \beta l - \sinh \beta l)}{2EI\beta^5 (1 + \cos \beta l \cosh \beta l) + 2m_{add}\Omega^2 \beta^2 (\cos \beta l \sinh \beta l - \sin \beta l \cosh \beta l)} \\ C_2 &= \frac{-M\beta^3 (\sin \beta l - \sinh \beta l) - \frac{Mm_{add}\Omega^2}{EI} (\cos \beta l - \cosh \beta l)}{2EI\beta^5 (1 + \cos \beta l \cosh \beta l) + 2m_{add}\Omega^2 \beta^2 (\cos \beta l \sinh \beta l - \sin \beta l \cosh \beta l)} \end{aligned} \quad (2.13)$$

2.3.2 1 자유도 모델

실제 바이모프의 진폭은 모든 주파수 영역에서 유한한 값을 가진다. 제안된 압전 모터의 성능 지수를 나타내는 함수, 바이모프 끝에서의 속도와 바이모프의 모멘텀(momentum)을 정확하게 예측하는 것은 압전 모터의 성능을 예측하는 것과 밀접한 관계가 있다. 그러나 앞에서 유도한 연속모델(continuous model)을 이용할 경우, 바이모프 내부에서 소산되는 에너지를 고려하지 않기 때문에, 공진 주파수에서 진폭이 무한대로 예측이 된다. 따라서 실제로 이러한 현상은 일어 날 수 없고 내부적인 에너지의 소산에 대한 고려가 필요하다.

바이모프의 내부적인 에너지 소산을 고려하기 위해 연속 모델(continuous model)을 기준으로 하여 1 자유도 모델(1 DOF lumped model)을 수립하였고, 여기에 바이모프에서 소산되는 에너지를 댐퍼(damper)를 이용하여 고려하였다. 또한 증가된 감쇠 상수는 실험적으로 구하였다.

1 DOF lumped model 을 구하기 위해 아래와 같은 가정을 하였다.

- 첫 번째 공진만을 고려
- 진동하는 동안의 처짐 형태는 정적 처짐과 동일

우선 유효 강성을 구하기 위해, 바이모프 끝 단에 모멘트(moment)  $M$  이 걸렸을 때, 정적인 처짐 곡선은

$$\delta(x) = \frac{M}{2EI} x^2 \quad (2.14)$$

이다. 그러므로 그때의 바이모프에 저장되는 위치 에너지를 1 자유도 모델에 저장되는 에너지와 등가 시킬 수 있다.

$$V(t)_{max} = \frac{1}{2} \int_0^l (EI (\frac{\partial^2 w}{\partial x^2})_{max}^2) dx = \frac{1}{2} (\frac{4EI}{l^3}) \delta(l)^2 \quad (2.15)$$

그러므로 유효 강성은  $K_{eff} = \frac{4EI}{l^3}$  이다. 바이모프가 가지는 전체 운동에너지를 같은 방법으로 등가시키면

$$T(t)_{max} = \frac{1}{2} \int_0^l (\frac{\partial w}{\partial t})_{max}^2 \rho A dx = \frac{1}{2} (\frac{\rho A l}{5}) \delta(l)^2 \omega^2 \quad (2.16)$$

이고 유효 질량은  $m_{eff} = \frac{\rho A l}{5}$  이다. 마지막으로 바이모프 끝에 작용한 모멘트로부터 등가적인 힘을 구하면

$$\delta(l) = \frac{l^2 M}{2EI} = \frac{1}{k_{eff}} \left( \frac{2M}{l} \right) \quad (2.17)$$

등가 힘은  $F_{eff} = \frac{2M}{l}$  로 표현 된다. 여기에 감쇠 상수를 고려하면, 바이모프 끝 단의 변위는 다음과 같다

$$\delta(l) = \frac{F_{eff}}{\sqrt{(k_{eff} - m_{eff}\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} \quad (2.18)$$

Fig. 3 은 바이모프의 연속 모델과 1 자유도 모델이 잘 일치하도록 유효질량을 조정한 주파수 응답을 나타낸다.

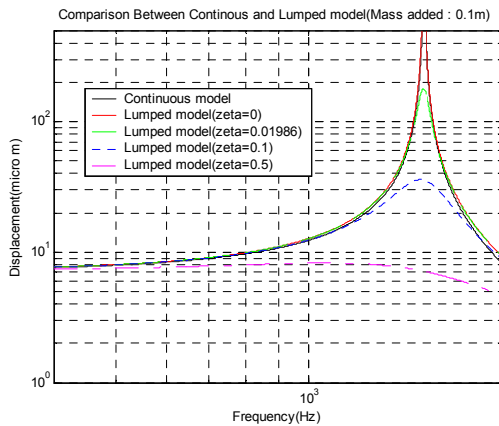


Fig. 3 Comparison between continuous model and lumped model ( $m_{eff} = 0.355\rho Al$ )

2.4 압전 모터의 설계지침

1 자유도 모델을 이용하여  $\delta(l)$  을 구하면, Eq.2.2 와 Eq.2.3 은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$f_v = \left| \dot{v}_{lv} \right|_{max} = \frac{F_{eff}}{\sqrt{(k_{eff} - m_{eff}\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} \omega \frac{\sqrt{R^2 - d^2}}{R} \cos \theta \quad (2.19)$$

$$f_m = m_{eff} \left| \dot{v}_{lv} \right|_{max} = m_{eff} \frac{F_{eff}}{\sqrt{(k_{eff} - m_{eff}\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} \omega \frac{\sqrt{R^2 - d^2}}{R} \cos \theta \quad (2.20)$$

$\theta = 20^\circ$ ,  $R = 15mm$  로 일정하고 구동 전압은 50V 이고 공진주파수에서 구동된다고 했을 때, 바이모프 끝에 부과된 질량과 offset 길이에 따른 비용함수의 변화를 시뮬레이션 하였다. Fig.4 과 Fig.5 은 각각 바이모프가 가지는 회전자의 접선 방향 속도 성분과 모멘텀을 나타낸다. 부과된 질량의 영향을 우선 알아보면, 부과 질량이 클수록 속도는 느려지고 모멘텀은 커지게 된다.  $d$  의 영향을 보면 약  $d = 4mm$  일 때  $f_v$  가 최대가 되고  $d = 7mm$  일 때  $f_m$  은 최대가 되었다.

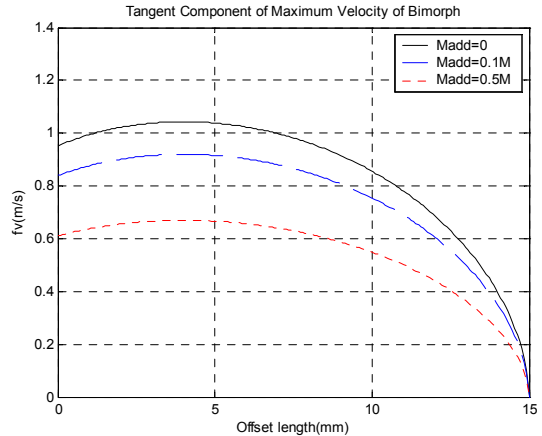


Fig. 4 Tangent component of maximum velocity of bimorph

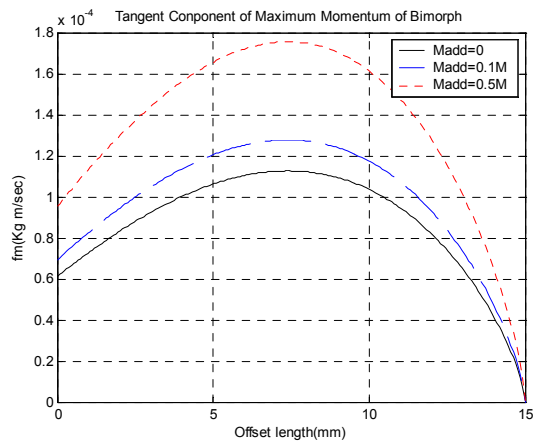


Fig. 5 Tangent component of maximum momentum of bimorph

여기서 우리는 모터의 성능을 향상 시키기 위한 지침을 얻을 수 있다. 제안된 압전 모터의 속도를 극대화 하기 위해서는  $d = 4mm$  이고 부과된 질량을 최소화 한다. 토크를 극대화 하기 위해서는  $d = 7mm$  이어야 하고 부과된 질량을 최대화 한다. 또한 부과된 질량이 크면 모멘텀은 커지지만 속도가 작아지는 현상이 발생하므로 부과질량의 크기에는 속도와 모멘텀 사이의 절충이 필요할 것으로 보인다.

제안된 모터의 속도와 토크를 정확히 예측하기 위해서는 바이모프와 회전자 사이의 충격과 마찰을 정확히 예측하여야 한다. 그러기 위해서는 바이모프 끝 단의 부과된 질량체의 강성과 표면의 마찰계수를 알아야 하는 문제가 발생하게 되고 이러한 변수를 온도와 습도 기타 여러 가지 제어할 수 없는 변수에 영향을 많이 받게 된다. 본 논문에서는 간접적으로 속도와 토크의 거동을 예측하기 위한 지표로  $f_v, f_m$  을 사용하였다. 이 두 함수의 신뢰성에 대한 논의는 다음 장에서 계속하도록 한다.

### 3. 압전 모터의 제작

Fig.6 은 제작된 압전 모터의 기본적인 구조를 나타내고 있다. 고정자(Stator)의 재료는 공학용 플라스틱(engineering plastic)을 사용 하였고 바이모프는 Piezo System, Inc.의 T220-A4-203X 를 사용하였다. 바이모프 끝 단에는 우레탄고무를 붙여 회전자(rotor)에 충격을 전달할 수 있도록 하였다. 우레탄 고무의 질량은 0.034g 이다. 고정자(Stator)의 중심에 회전자(rotor)를 고정 시키기 위한 베어링(bearing)을 설치하여 안정적인 회전을 할 수 있도록 하였다.

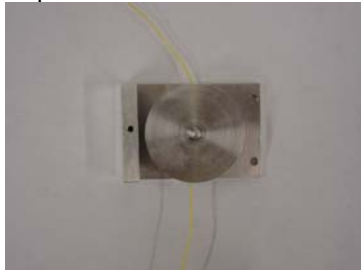
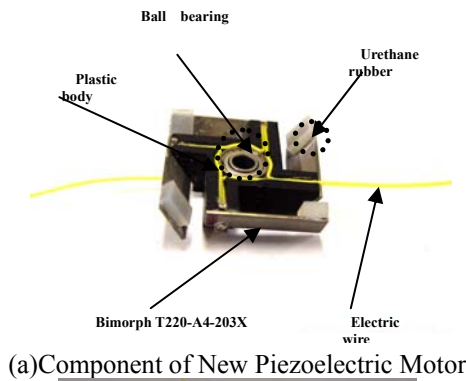


Fig. 6 Overview of fabricated new piezoelectric motor

### 4. 압전 모터의 속도 측정 실험

#### 4.1 설계지침의 실험적 증명

2 장에서 도출된 설계지표에서는 바이모프의 편심 길이와 부과된 질량이 모터의 속도와 토크에 미치는 영향을 보여주고 있다. 본 연구에서는 이 지표가 신뢰가능한지를 증명하기 위해 실제로 여러 개의 모터를 제작하였고, 바이모프의 편심 길이에 대한 부분적인 증명을 하였다. Table 1 은 제작된 3 개의 모터의 설계변수를 나타낸다.

Table 1 Parameters of fabricated piezoelectric motor

	Type1	Type2	Type3
Radius of rotor	30mm	30mm	30mm
Offset Length of Bimorph	10mm	9mm	6mm
Inclined Angle of Bimorph	30°	20°	20°

바이모프의 편심길이가 다른 Type2 와 Type3 를 비교해 볼 때,  $d = 6mm$ 인 Type3 에서 더 높은 속도를 내고 있음을 볼 수 있다. Fig.7 는 바이모프의 회전자의 접선 방향 속도 성분과 실제 제작된 압전 모터의 속도가 같은 경향성을 띤다는 것을 부분적으로 보여주고 있다. 여기서 제안된 설계 지표  $f_v$  가 신뢰가능 하다는 것을 실험적으로 알 수 있었다.

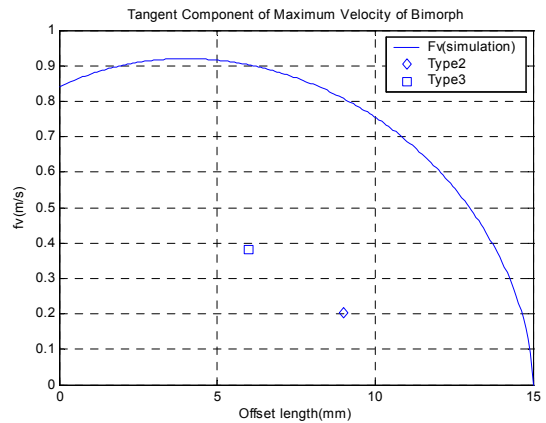


Fig. 7 Comparison between experiments and simulation

#### 4.2 속도 특성 실험

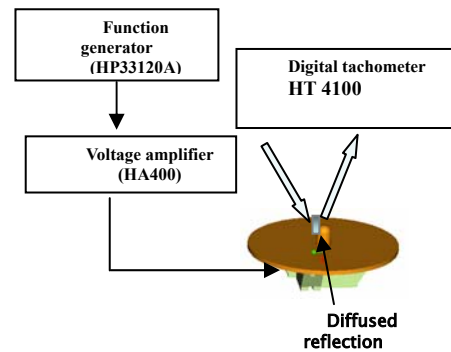


Fig. 8 Experimental setup for angular velocity measurement

속도 측정 실험을 하기 위해 Fig.8. 와 같은 실험 환경을 만들었다. 함수 발생기(Hp 33120A)에 1~10V 의 AC 전압을 발생시키고 고전압 증폭기(HA400)를 이용하여 전압을 10 배 증폭하였다. 0V~100V 의 AC 전압을 제안된 압전 모터의 공진주파수(약 1400Hz)로 가진 하였다. 각속도의 측정은 디지털 타코미터(HT 4100)을 이용하여 비 접촉식으로 측정 하였다.

Fig.9 은 제작된 3 개의 압전모터의 속도를 나타낸다. 0V~ 30V 까지는 바이모프의 변위가 너무 작아 회전자를 회전 시키지 못하였다. 30V 이후 100V 까지 각속도가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 여기서 우리는 제안된 압전 모터가 쉽게 제어가 가능하리란 것을 예측 할

수 있다. 또한 약 1 시간 동안의 구동에도 발열에 의한 문제는 심각하게 발생하지 않았다.

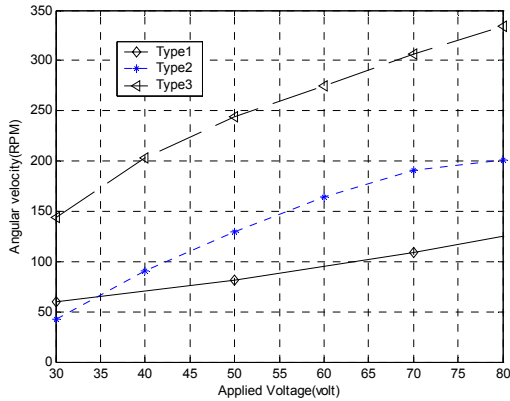


Fig. 9 Angular velocity of piezoelectric motors

### 5. 결론

본 연구에서는 기존의 초음파 모터가 가지는 단점을 극복할 수 있는 새로운 구조의 압전 모터를 개발 하는데 중점을 두고 수행 되었다. 기존의 압전 모터가 가지고 있는 문제점으로 크게 두 가지를 들 수 있다. 첫 번째로 마모와 마찰에 의해 안정적인 성능을 내기가 힘들다는 것이고 두 번째로 발열 문제이다. 이에 대한 대안으로 본 연구에서는 새로운 구조의 압전 모터를 제안 하였다. 상대적으로 공진 주파수가 낮은 바이모프와 회전체 사이의 운동량 교환에 의해 회전 운동을 가능하게 시스템을 구성 하였다.

개발된 압전 모터의 정상 상태 속도와 정적인 토크를 극대화 하기 위해, 바이모프의 속도와 운동량이 모터의 속도와 토크에 각각 비례한다는 가정을 하고, 바이모프의 모델링을 수행 하였다. 바이모프의 모델링은 우선 연속모델을 이용하여 주파수 응답을 예측하였다. 개발된 모터는 바이모프의 공진 주파수 근처에서 구동되었기 때문에, 공진 주파수에서 유한한 변위를 고려할 필요가 있었다. 에너지 소산항을 고려하기 위해 1 자유도 모델을 이용하여 바이모프를 이용하였다. 1 자유도 바이모프 모델은 연속 모델과 같은 응답을 가질 수 있도록 조정 되었고 여기서 고정자의 변수의 변화에 대한 바이모프의 속도와 운동량의 거동을 알 수 있었다.

모터의 제작은 설계지침을 바탕으로 제작 되었고 부분적으로 설계 지침에 대한 실험적 증명을 하였다. 마지막으로 제안된 모터의 속도 실험을 하는 동안 발열에 의해 나타나는 여러 문제점들은 발생 하지 않았다.

### 참고문헌

(1) K.Uchino, 1997, 'PIEZOELECTRIC ACTUATOR AND ULTRASONIC MOTOR' Kluwer Academic

Publisher, pp.265  
 (2) H.V. Barth, 1997, Technical Disclosure Bull.16,2263  
 (3) T. Sashida, 1983, Mech. Automation of Jpn.,15(2),31  
 (4) T. Kasuga, T.Satoh, N.Tsukada, T. Yamazaki, F. Ogawa, M. Suzuki, I. Horikoshi and T. Itoh, 1991, J. Soc. Precision Eng., 57, 63  
 (5) K. Tani, 1998, 'Development of new type piezoelectric micro motor' IEEE  
 (6) Marc A. Dubois, 1998, 'PZT Thin Film Actuated Elastic Fin Micromotor', IEEE  
 (7) Akihiro Iino, 2000, 'Development of a self-oscillating ultrasonic micro-motor and its application to a watch', Ultrasonics 38, 2000  
 (8) Jan G. Smits, 1994, 'Dynamic Admittance Matrix of Piezoelectric Cantilever Bimorph', J. Micr.sys.  
 (9) Leonard Meirovitch, 1997, 'Principles and techniques of vibrations', Prentice Hall