

# 압전소자와 충격구동 메커니즘을 이용한 초정밀 회전장치

## A Precision Rotational Device using Piezoelectric Elements and Impact Drive Mechanism

텐 알렉시 데손<sup>1</sup>, 유봉곤<sup>1</sup>, 전종업<sup>2,✉</sup>  
Aleksey-Deson Ten<sup>1</sup>, Bong-Gon Ryu<sup>1</sup> and Jong Up Jeon<sup>2,✉</sup>

<sup>1</sup> 울산대학교 대학원 기계자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Graduate School, Univ. of Ulsan)

<sup>2</sup> 울산대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Univ. of Ulsan)

✉ Corresponding author: jujeon@ulsan.ac.kr, Tel: 052-259-2139

Manuscript received: 2009.7.13 / Revised: 2009.9.17 / Accepted: 2009.10.8

*This paper describes the design, construction, and fundamental testing of a precision rotational device that utilizes piezoelectric elements as a source of driving force and impact drive mechanism as a driving principle. A novel device structure is designed and the numerical simulations about the static displacement, stress distribution, and mode shape of the designed structure are performed. A fabricated rotational device has been rotated successfully by applying saw-shaped voltages to the piezoelectric elements. The one-step rotational angle was  $0.44 \times 10^{-3}$  rad at the applied voltages of 80V. The angular velocities of the device were revealed to be increased as the driving frequency and voltage were respectively increased and the preload was decreased. The device has a feature that it can be translated as well as rotated. An experimental result shows that the device was translated by  $\pm 4.56 \mu\text{m}$  maximum when the 120V sinusoidal voltages with a phase difference of  $180^\circ$  were respectively supplied to two piezoelectric elements.*

Key Words: Impact Drive Mechanism (충격 구동 메커니즘), Precision Rotational Device (초정밀 회전장치), Piezoelectric Element (압전소자), Friction (마찰)

### 1. 서론

현재까지 압전소자(piezoelectric element)를 이용한 고분해능, 대변위 구동장치는 크게 표면의 파동을 이용하는 방식(surface wave type), 마찰력을 이용하는 방식(friction drive type), 인치웜 방식(inchworm type), 관성력을 이용하는 방식(inertial type) 등 크게 네 가지 방식으로 그 연구가 진행되어 왔다.<sup>1,2</sup> 초음파 모터로 대변되는 표면의 파동을 이용하는 방식은 콤팩트한 디자인이 가능하고 높은 페이로드(payload)를 가지는 반면 구동시 열이 발생하고 위치 정밀도가 낮은 단점을 가진다. 마

찰력을 이용하는 방식은 마찰면의 마모가 심하므로 마찰면의 교환과 청결 유지를 필요로 하는 단점을 가지며 인치웜 방식은 구동장치의 가격이 비싸고 회전운동 메커니즘의 경우 직선운동 메커니즘보다 그 구조가 훨씬 더 복잡해지는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 관성력을 이용한 방식은 원리적으로 단 한 개의 압전소자만을 사용하여 고분해능과 대변위를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 그 구조가 비교적 간단하여 구동기의 구현이 매우 용이한 장점을 가지고 있다.<sup>2</sup> 이 방식은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 압전소자의 저속 신장 및 급속 수축, 또는 급속 신장 및 저속 수축 과정을 통해 슬라이

더(sl原因)가 마찰용 부재(friction part)에 대해 ‘스틱-슬립(stick-slip)’하는 과정을 반복하게 함으로써 이동량을 얻는 방식으로, 압전소자의 급속한 수축 및 신장에 의한 충격 관성력을 이용한다는 것으로부터 충격구동 메커니즘(IDM, Impact Drive Mechanism)이라고도 불리운다.<sup>2,3</sup> IDM 방식의 경우 저속 신장 또는 수축시 슬라이더는 마찰용 부재와 스틱 상태를 유지하는데 반해, Yoshida 등은 압전소자에 IDM의 경우보다 높은 주파수의 구동 전압을 인가함으로써 저속 신장 또는 수축시에도 슬라이더가 마찰용 부재와 슬립 상태를 유지하도록 하였다. 이 때 슬라이더는 방향에 따라 동마찰력이 걸리는 시간의 차이에 의해 이동하게 되는데, 이 슬라이더의 움직임이 IDM 보다 매끄럽다고 하여 Yoshida 등은 이를 평활 충격구동 메커니즘(SIDM, Smooth Impact Drive Mechanism)이라고 명명하고 이를 이용한 리니어 스테이지 및 소형의 직선 운동 기구를 개발하였다.<sup>4,5</sup>

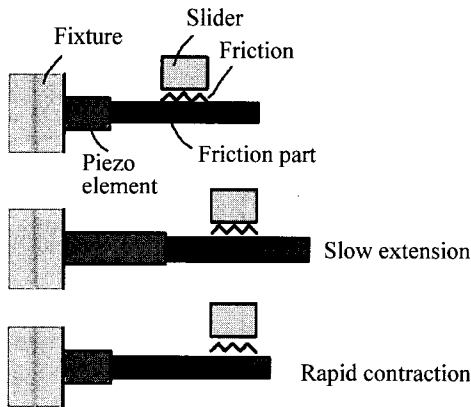


Fig. 1 Driving principle of IDM and SIDM<sup>2,4</sup>

한편, 최근 들어 Lee 등<sup>2</sup>은 이러한 (평활)충격구동 메커니즘을 이용한 초정밀 회전 구동장치를 제작하였으며 제작된 장치의 구동특성에 관한 기초적인 실험을 수행하였다. 그러나 이 장치의 경우, 회전디스크(Fig. 1의 슬라이더에 해당)와 마찰용 부재 간의 마찰부위에 예압(preload)을 인가하기 위한 장치의 구조가 복잡하고 그 크기 또한 크며, 접촉 미끄럼 요소인 회전 베어링을 사용하여 회전디스크를 지지하고 있기 때문에 이로 인해 장치의 정밀도가 저하될 수 있고, 회전디스크와 마찰용 부재 간의 접촉부위에 마모가 발생한다든지 압전소자 등과 같은 부품이 파손되었을 경우 장치 구

조가 복잡하기 때문에 부품 교환 등과 같은 장치의 유지보수가 용이하지 못한 단점 등을 가지고 있다. 또한 압전소자 자체에 예압이 가해져 있지 않기 때문에 장시간 사용시 압전소자가 파손될 수 있으며 장치가 평면적으로 구성되어 있어 장치 크기가 전체적으로 커지는 단점을 가지고 있다.

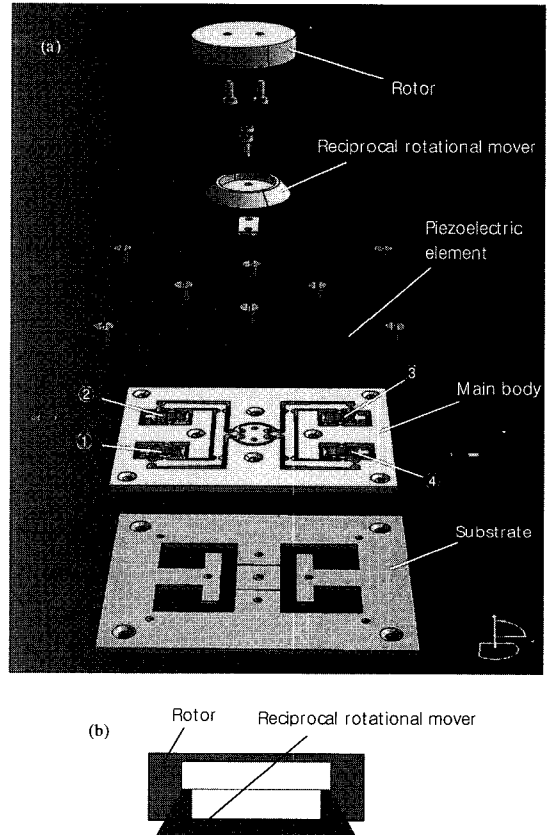


Fig. 2 (a) Overall structure of the precision rotational device and (b) section view showing the assembled state between a rotor and a reciprocal rotational mover

본 논문에서는 이러한 단점을 개선한 독자적인 구조의 충격구동 메커니즘을 이용한 초정밀 회전 장치를 고안하였으며 장치의 정적 및 동적 특성에 관한 수치해석 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 제작된 장치의 회전 구동 특성에 관한 기초적인 실험을 수행하였다. 본 장치는 압전소자에 인가되는 전압을 적절히 제어함으로써 회전운동뿐만 아니라 평면상의 1 축 병진운동도 가능한 특징을 가지고 있다.

## 2. 회전장치의 구조 및 구동원리

### 2.1 회전장치의 구조

Fig. 2(a)는 본 연구에서 고안한 초정밀 회전 장치의 구조를 나타낸 것이다. 회전장치는 압전소자 (piezoelectric element), 몸체판(main body), 기판 (substrate), 왕복회전운동플랫폼부(reciprocal rotational mover), 회전자(rotor) 등으로 구성된다. 압전소자는 Fig. 2(a)에 표시한 몸체판의 장소①~④ 중 대각선으로 서로 마주보고 있는 장소, 즉 장소①과 ③ 또는 장소②와 ④에 설치된다. 몸체판은 기판 위에 고정되고, 왕복회전운동자는 몸체판의 중앙에 고정된다. 회전자는 Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같이 왕복회전운동자 위에 모자처럼 씌워져 그 무게에 의해 회전자의 내주면과 왕복회전운동자의 외주면은 서로 접촉하게 된다. 이 때 회전자의 무게 또는 회전자 위에 얹어지는 무게추(weight)(도시하지 않았음)의 무게를 조절함으로써 회전자와 왕복회전운동자 간의 마찰력의 크기를 조절할 수 있다.

Fig. 3 은 압전소자가 장착된 몸체판을 나타낸 것이다. 그림의 ‘예압인가 겸 변위증폭#1 부(preload and displacement amplification #1)’라고 표시된 부분에서 압전소자에 예압이 인가됨과 동시에 압전소자의 변위는 증폭된다. 이 증폭된 변위는 힌지-레버 구조를 갖는 ‘변위증폭#2 부(displacement amplification #2)’에 의해 추가로 더욱 증폭된다.

본 연구의 회전장치에 있어서 기판, 몸체판, 회전자의 크기는 각각  $95 \times 120 \times 5\text{mm}^3$ ,  $69 \times 93 \times 5\text{mm}^3$ ,  $\phi 26 \times 8\text{mm}^2$  이고, 몸체판에 형성되어 있는 힌지 구조의 목부분의 폭은 1mm 이다.

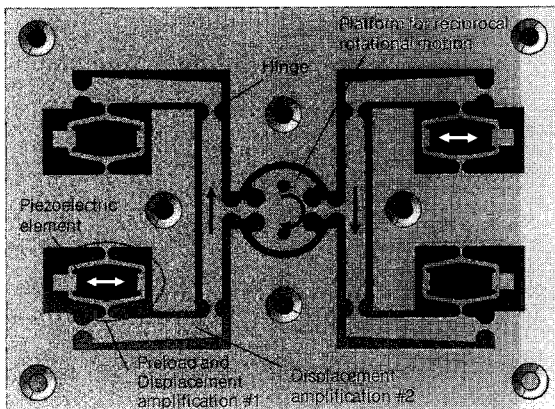


Fig. 3 Main body

### 2.2 회전장치의 구동원리

Fig. 2 와 3 을 이용하여 본 장치의 회전 구동원리를 설명하면 다음과 같다. Fig. 3 의 화살표와 같이 압전소자를 신장시키면(매우 느리게 신장시킴) 그 움직임은 두 개의 변위증폭부를 통해 증폭된 후 왕복회전운동플랫폼부(platform for reciprocal rotational motion)를 시계방향으로 돌리게 된다. 이 왕복회전운동플랫폼부 위에 왕복회전운동자가 고정되어 있으므로 왕복회전운동자도 왕복회전운동플랫폼부와 함께 시계방향으로 돌게 된다. 이 때의 움직임은 매우 느리기 때문에 왕복회전운동자 위에 씌워져 있는 회전자의 관성력이 회전자와 왕복회전운동자 간의 마찰력보다 작게 되고 따라서 회전자는 왕복회전운동자와 함께 회전하게 된다. 다음에, 압전소자를 수축시키면(이 때, 매우 빠르게 수축시킴), 이 때의 움직임은 매우 빠르기 때문에 회전자의 관성력이 회전자와 왕복회전운동자 간의 마찰력보다 커져 회전자는 회전하지 않고 제자리에 머물게 된다. 이상에서 설명한 바와 같이 압전소자의 저속신장-고속수축의 한 사이클 동안 회전자는 한 스텝각 만큼 회전하게 된다. 회전자의 연속적인 회전은 압전소자의 저속신장-고속수축 과정을 반복함으로써 얻어진다. 회전자를 반시계방향으로 회전시키기 위해서는 압전소자를 고속으로 신장하고 저속으로 수축시키면 된다.

상기한 바와 같이 본 장치에서는 두 개의 소자에 인가되는 전압을 동시에 증가/감소시킴으로써(두 개의 압전소자가 동시에 신장/수축됨) 회전운동을 얻고 있다. 한편 본 장치에서는 임의의 바이어스전압(bias voltage)을 중심으로 하나의 압전소자에 인가되는 전압은 증가/감소시키고 동시에 다른 하나의 압전소자에 인가되는 전압은 감소/증가시킴으로써 평면상의 1 축 병진운동(Fig. 3 에 있어서 왕복회전운동플랫폼부가 상하로 움직이는 운동으로, 이하 이 방향을 x 축 방향으로 함)을 얻을 수 있다. 이에 대한 수치해석 및 실험 결과는 각각 제 3 절과 5.3 절에 기술되어 있다.

본 장치의 특징 및 장점을 요약 기술하면 다음과 같다. 1) 초고정밀도를 갖는 압전소자를 구동원으로 이용하고 있으므로 초정밀도로 회전자를 위치 결정할 수 있다. 2) 회전자를 지지하기 위해 베어링과 같은 미끄럼 요소를 사용하고 있지 않기 때문에 미끄럼 요소에서 발생하는 백래쉬(backlash)나 스틱슬립 현상을 배제하여 장치의 위치 결정 정도를 높일 수 있다. 3) 회전자와 왕복회전운동자

간의 마찰부위에 작용하는 예압력의 크기는 회전자의 무게 또는 회전자 위에 별도로 얹어지는 무게추의 무게를 조절함으로써 간단히 조절할 수 있다. 단, 이는 회전장치의 구동특성, 성능 등을 예압력을 조절함으로써 손쉽게 변화시킬 수 있음을 의미하는 것으로, 구동 중 예압력이 변화됨에 따라 구동특성 및 성능의 일관성이 저하되어 본 회전장치가 초정밀 구동장치로 부적합해지는 것이 아님에 주의하기 바란다. 4) 분해조립이 용이하고 장치의 구성이 간단하며 선형 압전소자를 사용하고 있으므로 싼 비용으로 장치를 용이하게 제작할 수 있고 장치 고장 및 성능 저하시 적은 비용으로 장치를 용이하게 수리할 수 있다. 5) 장치의 장기간 사용으로 인해 회전자와 왕복회전운동자 간의 접촉 부위에 마모가 발생한다든지 압전소자 등과 같은 부품이 파손되었을 때 Fig. 2 에서 알 수 있듯이 부품을 매우 용이하게 교환할 수 있고 필요에 따라서 회전자 위에 별도의 회전테이블을 설치하여 사용할 수 있다. 6) 장치가 입체적으로 매우 간결하게 구성되어 있다.

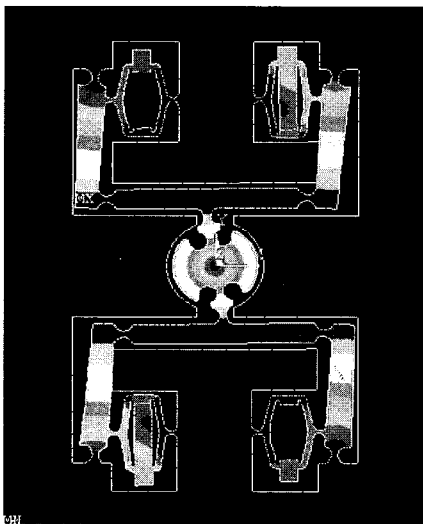


Fig. 4 Deformed shape (contour view, vector sum)

### 3. 수치해석 및 결과

회전장치의 정적 변위, 응력, 진동 모드 등과 같은 정적 및 동적 특성을 조사하기 위해 압전소자가 장착된 몸체판에 대하여 상용 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS 를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 몸체판은 2 자유도(x 축 및 y 축 운동)를

가지는 구조체(PLANE 82)로, 압전소자는 3 자유도(x 축 및 y 축 운동, 전압)를 가지는 구조체(PLANE 223)로 각각 모델링하였다. 몸체판의 재질로는 듀랄루민을 사용하였고 압전소자로는 NEC/TOKIN 사의 모델 AE0203D08 을 사용하였다.

Fig. 4 는 압전소자에 100V 의 전압을 인가하였을 때 구조물 각 부위의 변위를 해석한 결과이다. 인가전압 100V 에서 왕복회전운동플랫폼부의 회전각변위는  $1.4 \times 10^{-3}$  rad 이었다. 한편 압전소자가 신장/수축할 때 몸체판 구조물의 각 부위에 어느 정도의 응력이 발생하는지 알아 보았다. 최대 응력이 발생하는 부위는 ‘예압인가 검 변위증폭#1 부’로 최대응력값은 68.8MPa 이었다. 이 값은 듀랄루민의 항복응력값보다 작은 값으로 이로써 몸체판 구조물은 소성변형없이 탄성영역에서 작동하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5 는 최대응력이 발생하는 ‘예압인가 검 변위증폭#1 부’ 부위의 응력분포를 나타낸 것이다.

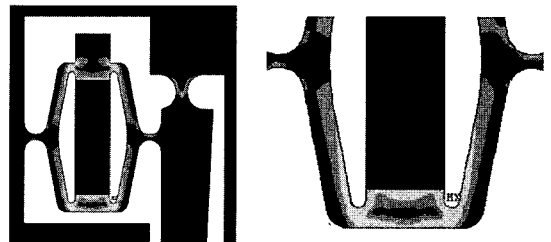


Fig. 5 Von Mises stress distribution

본 장치의 평면 병진운동을 조사하기 위해 바이어스전압 50V 를 두 압전소자에 각각 인가한 상태에서 하나의 압전소자 전압은 25V 씩 100V 까지 증가시키고 동시에 다른 하나의 압전소자 전압은 25V 씩 0V 까지 감소시키며 왕복회전운동플랫폼부 중앙점의 움직임(x 축 및 y 축 움직임)을 조사하였다. Fig. 6 은 그 결과이다. 이상적인 경우 중앙점은 x 축 방향으로만 움직이어야 하나 그림에서 알 수 있듯이 y 축 방향으로도 움직이고 있다. x 축 방향 변위는 약  $\pm 7.5 \mu\text{m}$  이고 y 축 방향 변위는  $\pm 0.25 \mu\text{m}$ (x 축 방향 변위의 약 1/30 배)이었다. 이러한 y 축 방향의 움직임이 발생하는 원인은 몸체판에 형성되어 있는 힌지 구조가 이상적인 구조가 아니고 압전소자의 변위와 ‘변위증폭#2 부’ 중앙부분 레버의 변위 사이의 관계가 비선형적이기 때문인 것으로 판단된다.

모드 해석(modal analysis)은 구동장치 해석과정

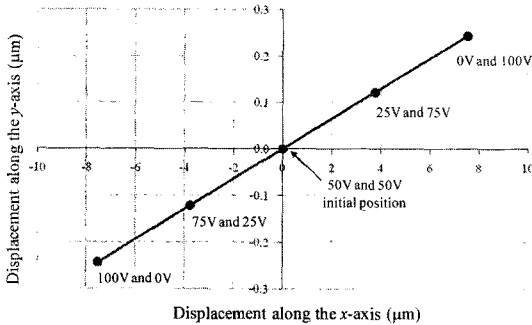


Fig. 6 Simulation result on the planar translational motion

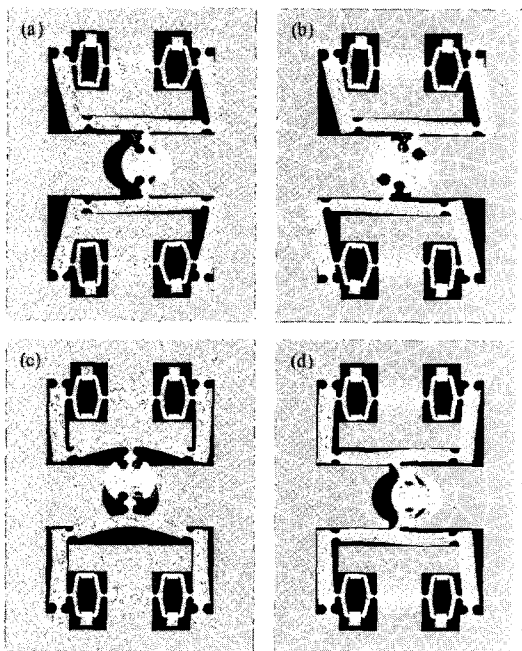


Fig. 7 Mode shape: (a) x-axis translation(1st mode), (b) z-axis rotation(2nd mode), (c) 3rd motion, (d) 4th mode

중에 일반적으로 시행하는 해석방법 중의 하나로서 이를 이용하여 장치의 운동모드 형태 및 진동수를 알아 낼 수 있다. Fig. 7 은 본 연구에서 설계한 몸체판의 동적 특성을 알아보기 위해 모드 해석을 수행한 결과이다. 1 차 및 2 차 진동모드는 각각  $x$  축 병진운동 및  $z$  축 회전운동으로 그 진동수의 크기는 각각 1,429Hz, 1,865Hz 이었고, 3 차 및 4 차 진동모드의 진동수의 크기는 각각 4,988Hz, 8,222Hz 로 나타났다. 몸체판의 운동에 있어서 요

구되는 조건은 능동적인 구동제어가 이루어지지 않는 3 차 이상의 진동모드는 1 차, 2 차 진동모드보다 높은 주파수에서 발생하여야 하고 그 값은 가급적 1, 2 차 진동수와 멀리 떨어져 있어야 한다. 본 몸체판의 경우 해석 결과에서 알 수 있듯이 3 차 및 4 차 모드의 고유진동수는 2 차 진동수의 2.7 배 이상으로 상당히 큰 값을 나타내고 있어 만족할 만한 구조임을 알 수 있다.

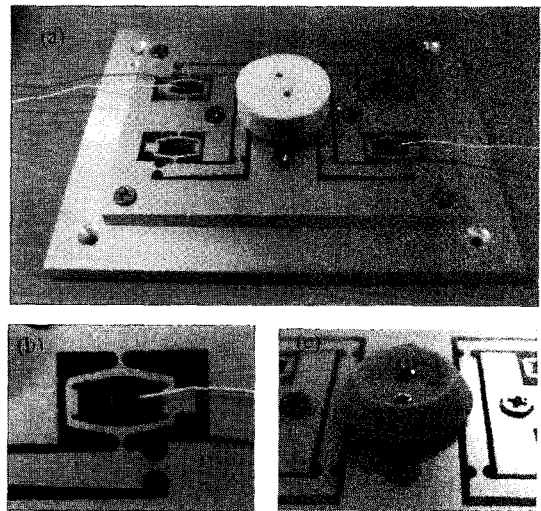


Fig. 8 Photographs showing (a) the fully assembled rotational device, (b) the installed piezoelectric actuator and (c) the central part where the rotor is not installed

#### 4. 실험장치

Fig. 8 은 본 연구에서 제작한 회전장치 기구부의 사진을 나타낸 것이고 Fig. 9 는 구동실험을 수행하기 위한 실험장치의 구성도이다. 압전소자로는 최대 인가 전압 150V 에서 최대 변위가  $9.1 \pm 1.5 \mu\text{m}$  인 NEC/TOKIN 사의 모델 AE0203D08 을 사용하였다. 일반적으로 압전소자를 최대 인가 전압에서 반복적으로 사용하면 압전소자 자체에 좋지 못한 영향을 주므로 본 연구에서는 100V 이하에서 압전소자를 구동하였다. 인가전압 100V 에서 압전소자의 변위는  $6.1 \pm 1.5 \mu\text{m}$  이다. 파형발생기 (waveform generator)를 사용하여 생성된 구동 전압은 고전압 증폭기(high-voltage amplifier)를 통해 증폭되어 압전소자에 인가된다.

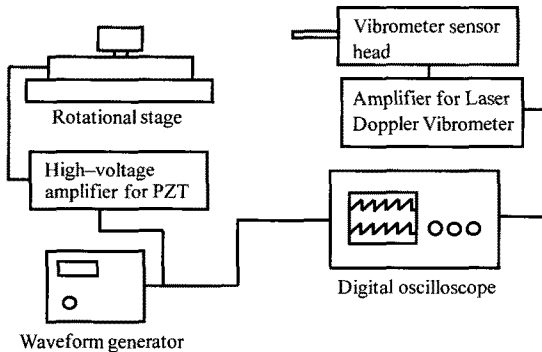


Fig. 9 Schematic diagram of the experimental setup

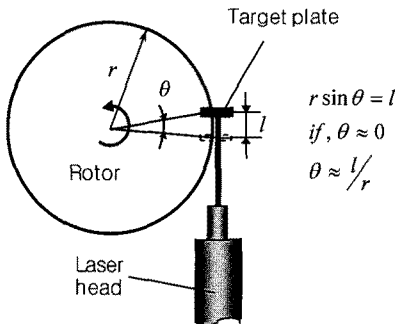


Fig. 10 Measurement of the angular displacements

왕복회전운동자의 외주면과 회전자의 내주면 사이에 작용하는 수직력, 즉 예압력(preload)의 크기에 따라 회전 장치의 운동특성이 다르게 나타날 것으로 예상되기 때문에 이에 관한 실험을 수행하기 위해 일정 무게를 갖는 무게추를 회전자 위에 얹어 놓음으로써 예압력의 크기를 조절하였다. 이때 회전자와 무게추 사이에 미끄러짐이 발생하지 않도록 하기 위해 무게추를 회전자와 볼트를 이용하여 체결하였다. 회전자의 각변위는 Polytec 사의 LDV(Laser Doppler Vibrometer)(제어기 OFV-5000, 변위디코더 DD-20, 센서헤드 OFV-534)를 사용하여 측정하였다. 이 센서의 분해능은 2nm 이고, 변위 응답 주파수의 범위는 0~250kHz 이다. 이 센서는 직선변위 측정용 센서이므로, 회전자의 각변위는 회전자의 외주부에 타겟판(target plate)을 설치하고 회전자의 회전에 따른 이 타겟판의 직선 변위를 측정한다. 다음 이 변위와 회전자의 반경으로부터 Fig. 10 에 나타난 간단한 수식을 이용하여 산출하였다. 회전각이 매우 작은 경우 이와 같이 직선변위 측정용 센서로 각변위를 측정하여도 그 오차는 무시할 정도로 작기 때문에 본 방법을 사용함으로

인해 발생하는 각변위 측정오차는 매우 작을 것으로 판단된다. 한편, 몸체판의 재질은 듀랄루민이고 와이어 커팅(wire cutting) 방전가공을 이용하여 가공하였으며 왕복회전운동자와 회전자의 재질로는 세라믹 계열의 알루미늄( $Al_2O_3$ ) A99 를 사용하였다.

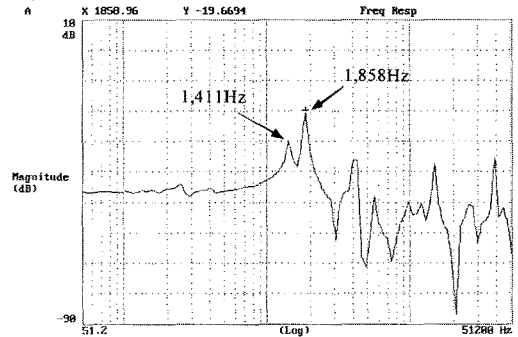


Fig. 11 Frequency response

회전장치 기구부(몸체판)가 설계한 대로 제작되었는지 확인하고 또한 실제 제작된 장치의 동적 특성을 알아보기 위해 압전소자가 장착된 몸체판에 대하여 주파수 응답 특성을 측정하였다. 입력 신호는 압전소자에 인가되는 전압이고 출력 신호는 왕복회전운동플랫폼부의 각변위이다. 각변위는 왕복회전운동플랫폼부의 상면에 x 축과 45°의 각도를 이루도록 타겟판을 설치하고 LDV 를 이용하여 측정하였다. Fig. 11 은 측정 결과이다. 그림으로부터 1,411Hz 와 1,858Hz 에서 피크점이 나타남을 알 수 있다. 이는 제 3 절의 시뮬레이션 결과에서 기술한 x 축 병진운동과 z 축 회전운동에 해당하는 것으로 판단된다. 이 두 운동모드가 나타나는 주파수는 시뮬레이션에 의한 주파수(각각 1,429Hz, 1,865Hz)와 거의 일치함을 알 수 있고 이로부터 회전장치의 몸체판은 큰 오차없이 설계한 대로 제작되었음을 확인할 수 있다.

### 5. 구동실험 및 결과

이상에서 기술한 실험장치를 이용하여 구동실험을 수행하였다. 먼저 낮은 주파수의 전압을 인가하여 기초적인 회전 구동 실험을 수행하였고, 그 후 구동전압의 크기와 주파수, 그리고 예압력의 크기에 따른 회전장치의 구동 특성(각속도)에 관한 실험을 수행하였다. 또한 회전장치의 병진운동에 관한 실험을 수행하였다.

### 5.1 회전 구동 실험

Fig. 12 는 압전소자에 크기 80V, 주파수 1Hz 인 톱니파형의 구동전압을 연속적으로 인가하였을 때 나타나는 회전자의 각변위를 측정 한 결과이다. 완만한 기울기로 증가하는 전압이 압전소자에 인가 되면 왕복회전운동자의 외주면과 회전자의 내주면은 스틱 상태를 유지하게 되어 왕복회전운동자는 회전자를 미끄러짐 없이 회전시키지만, 급격한 기울기로 전압이 감소되면 왕복회전운동자의 외주면과 회전자의 내주면 사이에 슬립이 발생하여 왕복회전운동자는 회전자를 완벽히 초기 위치로 복귀시키지는 못한다. 결과적으로 회전자의 회전운동을 얻게 된다. Fig. 12 에 있어서 한 스텝당 회전각은 약  $0.44 \times 10^{-3} \text{rad}$  이었다. 이는 1 회전의 약  $1/14,280$  에 해당하는 값이다. Fig. 12 의 실험 결과로부터 본 연구를 통해 개발한 회전장치는 초정밀도로 회전 가능함을 알 수 있다.

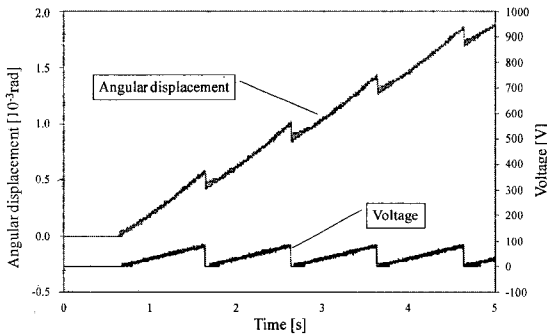
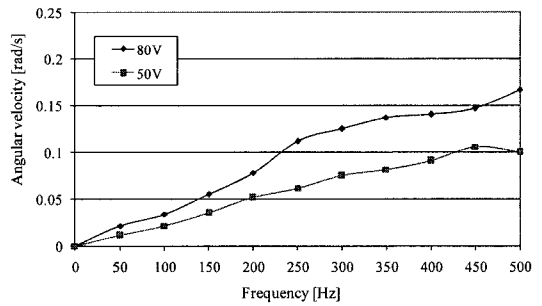


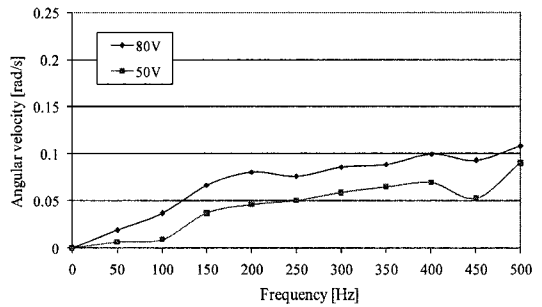
Fig. 12 Experimental result on angular displacement when the voltage of 80V, 1Hz is supplied

### 5.2 구동전압 및 예압력에 따른 각속도 실험

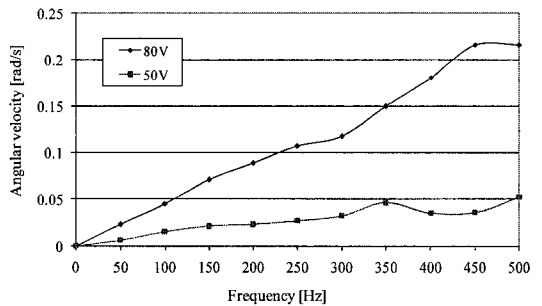
회전장치의 구동 특성에 압전소자의 직선 변위의 크기가 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 압전소자에 인가되는 전압의 크기를 바꾸어 가며 구동실험을 수행하였다. Fig. 13(a), (b), (c)는 각각 100g, 200g, 300g 의 예압력을 작용시켜 놓은 상태에서 압전소자에 인가되는 구동 전압과 주파수가 변화함에 따라 회전자의 각속도가 어떻게 변화하는지를 측정 한 결과이다. 예압력은 일정 무게를 갖는 무게추를 회전자 위에 얹어 놓음으로써 그 크기를 조절하였다. 실험 결과로부터 주파수가 증가함에 따라 각속도는 대략 선형적으로 증가함을 알 수 있고, 동일한 주파수에서 살펴 보면 구동전압이 증가할수록 각속도가 대체적으로 증가하는



(a) 100g preload



(b) 200g preload



(c) 300g preload

Fig. 13 Experimental results on angular velocity vs. driving voltage and frequency where 100g, 200g, 300g preloads are applied

것을 알 수 있다.

회전 장치의 마찰부에 작용하는 예압력의 크기가 회전 장치의 구동 특성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 마찰부에 작용하는 예압력의 크기를 바꾸어 가며 구동실험을 수행하였다. Fig. 14 는 50V 의 구동전압을 인가한 상태에서 마찰부에 작용하는 예압력과 압전소자에 인가되는 구동주파수가 변화함에 따라 각속도가 어떻게 변화하는지를 측정 한 결과이다. 동일한 주파수에서 살펴 보면 대체적으로 마찰부에 작용하는 예압력이 증가함에 따라 각속도가 느려지는 경향을 보임

을 알 수 있다. 이는 예압력이 증가함에 따라 왕복회전운동자와 회전자 간의 마찰력이 증가하게 되고 이로 인해 압전소자의 급속 수축시 회전자가 원래 위치로 복귀하는 각변위량이 커지기 때문인 것으로 생각된다. 한편 Fig. 13 의 구동전압이 80V 인 경우를 살펴보면 Fig. 14 의 50V 인 경우에서처럼 예압력이 증가함에 따라 각속도가 느려지는 경향을 보이는 것이 아니라 오히려 각속도가 빨라진 다든지 하는 경우가 나타나는 등 예압력과 각속도 간의 관계에 있어서 일관성 있는 경향이 보이지 않는다. 이는 구동전압이 커짐에 따라 압전소자의 움직임이 회전자의 회전운동으로 전달되는 과정에 예압과 관련된 어떤 동특성이 게재되고 있다는 것을 의미하는데 현재 그 실체가 무엇인지에 대하여 다각도로 연구, 분석 중에 있다.

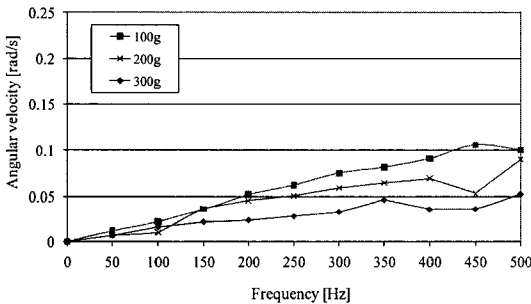


Fig. 14 Experimental results on angular velocity vs. preload where 50V driving voltages are applied

상기 제 5.1 절의 실험결과로부터 알 수 있듯이 본 회전장치는 초정밀 스텝구동이 가능한 장점을 가지고 있는 반면, 어떠한 원인에 의해 구동 중에 예압력, 마찰상태 등에 있어서 변동이 발생하게 되면 왕복회전운동자와 회전자 간의 마찰특성에 변동이 발생하게 되고 이로 인해 구동스텝의 크기가 일관성있게 유지되지 못하는 단점을 가지고 있다. 한 스텝당 회전각은 고정도의 각변위센서를 사용하여 회전자의 움직임을 측정하고 이를 피드백 제어(feedback control)함으로써 일정하게 유지할 수 있다. 그러나, 이 경우 회전장치에 장착이 용이한 초정밀 각변위센서의 구입 또는 개발, 피드백 제어장치의 추가 등으로 인해 회전장치의 가격은 매우 높아지게 된다. 한편 제 5.2 절의 각속도 실험으로부터 알 수 있듯이 본 회전장치의 최대 회전 속도는 수 rpm 정도이다. 따라서 본 장치는 저속의 초정밀 회전 기능이 필요한 경우, 위치 결정 속도

보다는 위치 결정 정도가 보다 중요한 경우에 활용될 수 있으며, 고속의 위치 결정 속도가 요구되는 경우에는 그 사용이 제한된다.

### 5.3 평면 병진운동 실험

제 3 절에서 기술한 바와 같이 본 연구의 회전장치는 임의의 바이어스전압(오프셋전압)을 중심으로 하나의 압전소자에 인가되는 전압은 증가/감소시키고 동시에 다른 하나의 압전소자에 인가되는 전압은 감소/증가시킴으로써 x 축 방향의 병진운동을 얻을 수 있다. 병진운동에 대한 실험을 수행하기 위해 오프셋전압 60V, 진폭 60V 인 정현파 구동신호를 하나의 압전소자에 인가하고 다른 하나의 압전소자에는 이와 180°의 위상차를 가지는 구동신호를 인가하였다. Fig. 15 와 16 은 각각 x 축 방향의 변위, y 축 방향의 오차변위를 측정된 결과이다. 이 x 축 및 y 축 방향의 변위는 왕복회전운동플랫폼부의 상면에 각각 x 축 및 y 축과 직각을 이루도록 타겟판을 설치하고 그 움직임을 LDV 를 이용하여 측정하였다. x 축 방향 최대 변위는  $\pm 4.56\mu\text{m}$  로 측정되었으며 y 축 방향 최대 오차변위는  $\pm 0.2\mu\text{m}$  로 측정되었다. 이로부터 y 축 방향으로 는 x 축 방향 변위의 약 4.4%에 해당하는 오차변

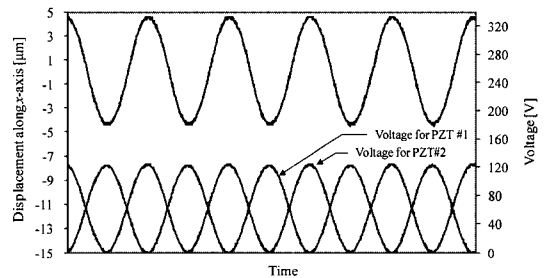


Fig. 15 Experimental result on x-axis linear displacement

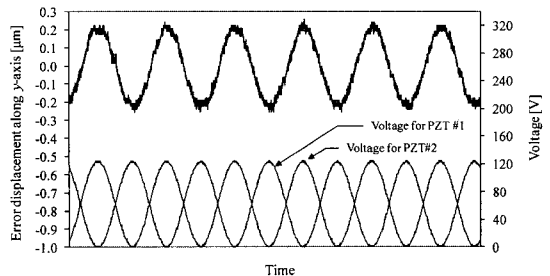


Fig. 16 Experimental result on y-axis error linear displacement



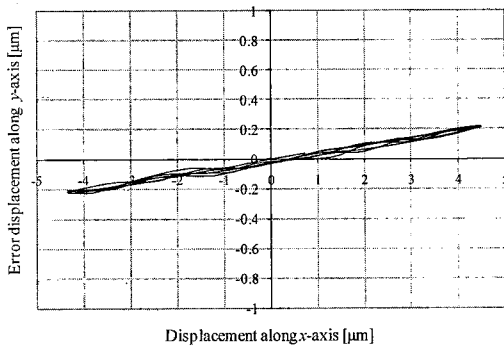


Fig. 17 Experimental results on x-axis displacement vs. y-axis error displacement

위가 발생함을 알 수 있다. Fig. 17 은 x 축 방향의 변위와 y 축 방향의 오차변위를 하나의 그래프 상에 나타낸 것이다. 그림으로부터 이들 사이의 관계는 선형적임을 알 수 있다. 그림에서 측정값에 산포가 발생하는 것은 압전소자의 이력(hysteresis) 특성 때문인 것으로 판단된다.

본 회전장치에 이러한 병진운동이 존재함(회전 자유도 이외의 자유도가 추가됨)으로 인해 장치의 회전 정밀도는 저하될 수 있다. 그러나 이러한 병진자유도의 추가로 작은 범위나마 회전자의 직선 운동이 가능해지고 또한 회전 중심을 능동적으로 변화시킬 수 있게 됨으로써 본 회전장치의 응용범위가 보다 넓어질 수 있을 것으로 기대된다.

**6. 결론**

본 논문에서는 압전소자를 구동원으로 하고 충격 구동 메커니즘을 구동원리로 하는 초정밀 회전장치를 설계, 제작하고 제작된 장치에 대하여 기초적인 구동실험을 수행하였다. 독자적인 형태의 장치 구조에 대한 아이디어를 도출하였으며 회전장치의 정적 및 동적 특성 즉 정적 변위, 응력, 진동 모드 등에 관한 수치해석을 수행하였다. 또한 제작된 회전장치의 동적 특성을 알아보기 위해 압전소자가 장착된 몸체판에 대하여 주파수 응답 특성을 측정하였다.

최초 압전소자에 크기 80V 의 톱니파형 전압을 인가함으로써 회전장치는 성공적으로 회전 구동되었다. 구동전압의 크기와 주파수, 그리고 예압력의 크기에 따른 회전장치의 구동 특성(각속도)에 관한 실험을 수행한 결과, 회전각속도는 구동주파수와 구동전압이 증가함에 따라, 또 예압력이 감소함에 따라 증가함을 보였다. 한편 본 회전장치는 회전

운동뿐만 아니라 1 축 병진운동도 얻을 수 있는 특징을 가지고 있다. 하나의 압전소자에 오픈셋전압 60V, 진폭 60V 인 정현파 구동신호를 인가하고 다른 하나의 압전소자에 이와 180°의 위상차를 가지는 구동신호를 인가한 결과, 회전장치에는 최대 ±4.56μm 의 병진 운동이 발생하였다. 본 논문을 통해 고안되고 설계, 제작된 초정밀 회전장치는 초정밀 가공기나 조립장치, 반도체 제조장치, 초정밀 측정장치 등 다양한 장치의 초정밀 회전 스테이지로서 충분히 활용 가능할 것으로 기대된다.

**후 기**

이 논문은 2007 년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-521-D00049).

**참고문헌**

1. Choi, H.-S., Lee, J., Jung, M. C., Yun, D. W., Han, C.-S., Hong, W. P., Kang, E. G. and Choi, H. J., "Review of a High Precision Actuator Mechanism Using PZT," Proc. Korean Society of Machine Tool Engineers Spring Conf., pp. 524-529, 2004.
2. Lee, S. and Jeon, J. U., "A Study on Ultra Precision Rotational Device Using Smooth Impact Drive Mechanism," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 4, pp. 140-147, 2008.
3. Higuchi, T., Yamagata, Y., Furutani, K. and Kudoh, K., "Precise Positioning Mechanism Utilizing Rapid Deformations of Piezoelectric Elements," Proc. IEEE Workshop on MEMS, pp. 222-226, 1990.
4. Yoshida, R., Okamoto, Y. and Okada, H., "Development of Smooth Impact Drive Mechanism (2nd Report)," Journal of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 68, No. 4, pp. 536-541, 2002.
5. Yoshida, R., Okamoto, Y., Hamamatsu, A. and Higuchi, T., "Development of Translation Stage Using Smooth Impact Drive Mechanism," 1998 Japan U.S.A. Symp. on Flexible Automation, pp. 61-67, 1998.