

## 스무즈 임팩트 구동 메커니즘을 이용한 초정밀 회전장치에 관한 연구

이상욱\*, 전종업#

### A Study on Ultra Precision Rotational Device Using Smooth Impact Drive Mechanism

Sanguk Lee\* and Jong Up Jeon#

#### ABSTRACT

This paper represents an ultra precision rotational device where the smooth impact drive mechanism (SIDM) is utilized as driving mechanism. Linear motions of piezoelectric elements are converted to the rotational motion of disk by frictional forces generated between the rotational disk and the friction part that is attached to the piezoelectric element. This device was designed to drive the rotational disk using slip-slip motion mechanism instead of stick-slip motion mechanism occurred in conventional impact drive mechanism. Experimental results show that the angular velocity is increased in proportion to the magnitude and frequency of supplied voltage to piezoelectric element and decreased as the preload is increased. In our device, the smooth rotational motion was obtained when the driving frequency has been reached to 500Hz under the driving voltage of 100V.

**Key Words** : Smooth impact drive mechanism (스무즈 임팩트 구동 메커니즘), Precision rotational device (초정밀 회전장치), Piezoelectric element (압전소자), Friction force (마찰력)

#### 1. 서론

최근 초정밀 가공기나 조립장치, 반도체 제조장치, 초정밀 측정장치 등의 구동기구에 있어서, 나노미터 크기의 분해능을 가지는 액추에이터에 대한 필요성이 증대일로에 있다. 고분해능의 위치결정을 가능하게 하는 액추에이터로서 PZT 로 대표되는 압전소자를 들 수 있으나 압전소자는 발생할 수 있는 변위량이 매우 작다는 단점을 가지고 있

다. 그 변위량은 압전소자 전체 길이의 약 0.1%로, 예를 들어 10mm 소자의 경우 최대 변위량은 약 10 $\mu$ m 정도에 불과하다. 이 때문에 종래에는 대변위와 고분해능이 동시에 요구되는 경우, 압전소자를 이용한 미동(微動)기구와 기타 대변위를 가지는 조동(粗動)기구를 병행하여 사용하는 등 많은 경우 복수의 액추에이터가 조합되어 사용되고 있다. 그러나 복수의 액추에이터를 사용한 구동장치는 구동기 전체 구조가 매우 복잡해지고 그 크기

접수일: 2007년 9월 17일, 게재승인일: 2008년 1월 31일

\* 울산대학교 대학원 기계자동차공학과

# 교신저자: 울산대학교 기계자동차공학과

E-mail: jujeon@ulsan.ac.kr Tel. (052) 259-2139

가 매우 커지며 제어회로가 복잡해지는 등 여러 가지 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하고자 현재 압전소자 구동기만으로 고분해능과 대변위를 동시에 달성할 수 있는 구동장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

압전소자를 이용한 고분해능, 대변위의 구동장치에 관한 연구는 크게 표면의 파동을 이용하는 방식(surface wave type),<sup>1</sup> 마찰력을 이용하는 방식(friction drive type),<sup>2,3</sup> 인치웜 방식(inchworm type),<sup>4</sup> 관성력을 이용하는 방식(inertial type)<sup>5</sup> 등 크게 네 가지 방식으로 진행되어 왔다.<sup>6</sup> 표면의 파동을 이용하는 방식은 콤팩트한 디자인이 가능하고 높은 페이로드(payload)를 가지는 반면 구동시 열이 발생하고 위치 정밀도가 낮은 단점을 가진다. 마찰력을 이용하는 방식은 구동기의 구조가 비교적 간단하고 제작이 용이한 장점을 가지고 있으나 다수의 압전소자를 필요로 하며 마찰면의 마모가 심하므로 마찰면의 교환과 청결 유지를 필요로 하는 단점을 가진다. 한편, 인치웜 방식은 비교적 오래 전부터 연구개발이 진행되어 현재 상용 제품이 출시되어 있는 방식으로, 이 방식은 압전소자를 세 개 이상 필요로 하므로 구동장치의 가격이 비싸지는 단점을 가지고 있다. 또한, 제어기가 복잡하고 고속의 이동 속도를 얻기 어려우며 회전운동 메커니즘의 경우 직선운동 메커니즘보다 그 구조가 훨씬 더 복잡해지는 단점을 가지고 있다.

이상에서 기술한 마찰력을 이용한 방식과 인치웜 방식에 비해 관성력을 이용한 방식은 단 한 개의 압전소자만을 사용하여 고분해능과 대변위를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 그 구조가 간단하여 구동기의 구현이 매우 용이한 장점을 가지고 있다. 이 방식은 압전소자의 급속 신장(수축) 및 저속 수축(신장) 과정을 통해 몸체가 바닥면에 대해 '스틱-슬립'하는 과정을 반복하게 함으로써 이동량을 얻는 방식으로, 압전소자의 급속한 수축/신장에 의한 충격 관성력(impulse inertial force)을 이용한다는 것으로부터 IDM(impact drive mechanism) 방식이라고도 불리운다. 그러나 이러한 IDM 방식은 그 원리상 몸체의 운동이 매끄럽지 못한 단점을 가지고 있다. 이에, Yoshida 등은 IDM에 비해 보다 매끄러운 움직임을 얻을 수 있는 SIDM(smooth impact drive mechanism)이라고 명명한 새로운 구동방식을 제안하였으며 이 구동원리를 이용한 리니어 스테이지 및 소형의 직선 운동 기구를 개발하였다.<sup>7,9</sup>

본 논문에서는 이러한 SIDM의 구동원리를 회전기구에 응용함으로써 그 구성이 비교적 간단하고 매끄러운 회전운동을 얻을 수 있는 초정밀 회전 구동장치를 제작하였으며 제작된 장치의 구동 특성에 관한 기초적인 실험을 수행하였다.

## 2. SIDM의 원리<sup>7-10</sup>

Fig. 1은 IDM과 SIDM 원리를 이용한 구동기의 구조를 나타낸다. 구동기는 그림에서 보는 바와 같이 고정부(fixture)와 이에 부착된 압전소자, 그리고 압전소자의 다른 쪽 끝단에 부착된 마찰용 부재(friction part)와 그 위에 놓여 있는 슬라이더(sliding)로 구성된다. 압전소자를 서서히 신장시키면 슬라이더와 마찰용 부재 사이의 마찰력이 슬라이더의 관성력보다 크므로 슬라이더는 마찰용 부재와 같이 이동하고(스틱(stick) 상태라고 함), 다음으로 압전소자를 급속히 수축시키면 슬라이더의 관성력이 마찰력보다 커져 슬라이더와 마찰용 부재 사이에 미끄러짐이 발생하게 되고, 따라서 슬라이더는 거의 제자리에 머물러 있게(슬립(slip) 상태라고 함) 된다. 이러한 과정을 반복함으로써 슬라이더는 연속적으로 이동하게 된다. 슬라이더를 반대방향으로 움직이게 하기 위해서는 상기와 반대로, 즉 압전소자를 급속하게 신장시키고 서서히 수축시키는 과정을 반복하면 된다. 이 방식은 압전소자의 급속한 수축/신장에 의한 충격 관성력을 이용한다는 것으로부터 IDM 방식이라고 불리우며, 슬라이더가 마찰용 부재에 대해 '스틱-슬립'하는 과정을 반복한다는 것으로부터 '스틱-슬립' 구동방식으로도 불리운다. Fig. 2(a)는 IDM 방식에 있어서 슬라이더의 움직임을 나타낸 것이다.

한편, 압전소자에 수축과 신장운동을 발생시키는 구동 전압의 구동 주파수를 점점 크게 하면 슬라이더의 관성력이 점점 커지게 되어 저속 수축/신장 단계에서도 슬라이더의 관성력이 마찰력보다 커져(이 경우, 고속 신장/수축 단계에서 관성력이 마찰력보다 큰 것은 명백함) 슬라이더에 미끄러짐이 발생하는 주파수에 도달하게 된다. 이 구동주파수보다 높은 주파수 영역에서는 슬라이더는 항상 미끄러짐 상태에 놓이게 되며, 이 때 슬라이더는 방향에 따라 동마찰력이 걸리는 시간의 차이에 의해 이동하게 된다. 이 때 슬라이더의 움직임이 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 IDM보다 매끄럽다

고 하여 이를 SIDM 방식이라고 하며 슬라이더가 마찰용 부재에 대해 '슬립-슬립'하는 과정을 반복한다는 것으로부터 '슬립-슬립' 구동방식이라고도 한다.

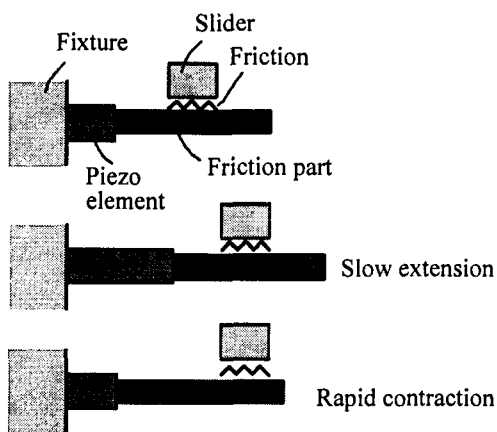


Fig. 1 Driving principle of IDM and SIDM<sup>7</sup>

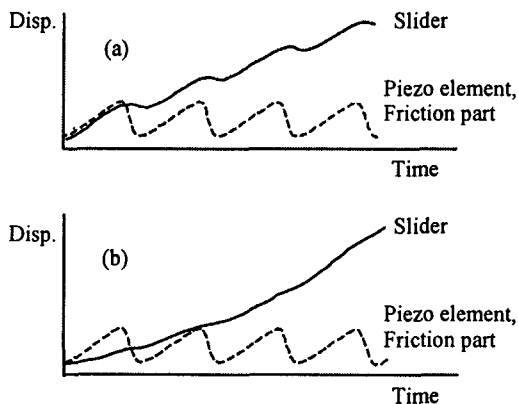


Fig. 2 Displacement of slider in (a) IDM and (b) SIDM<sup>7</sup>

### 3. 초정밀 회전 구동기

본 논문에서는 제 2 장에서 기술한 SIDM의 구동원리를 회전구동에 응용하였으며 이하, 그 구동기의 구성 및 장치에 관하여 기술한다.

#### 3.1 구동기의 구성

Fig. 3은 본 연구에서 제작한 초정밀 회전 구동기의 구성 및 구동원리를 나타낸 것이다. 회전장치는 회전 디스크(rotational disk), 압전소자, 탄성힌지

(elastic hinge) 구조가 포함된 압전소자 고정부(fixture), 마찰용 부재(friction part), 예압(preload) 장치 등으로 구성된다. 마찰용 부재와 압전소자, 압전소자 고정부는 기계적으로 체결되어 하나의 몸체처럼 되어 있다. 이후 이 세 부분을 '선형 구동부'라고 칭한다.

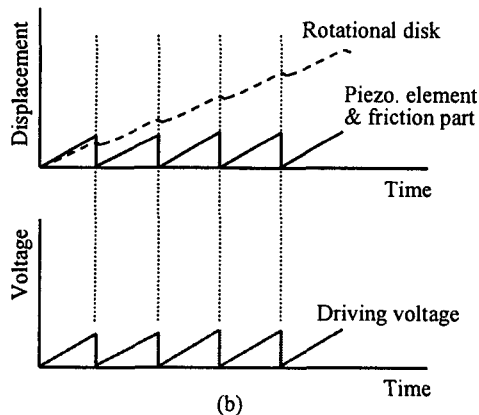
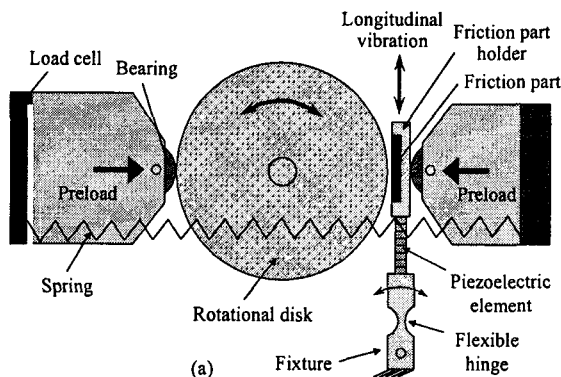


Fig. 3 (a) Schematic drawing of the rotational device and (b) driving voltage and the angular displacement of disk

장치 작동시, 마찰용 부재는 예압장치, 즉 스프링에 의해 회전 디스크 쪽으로 변위하여 회전 디스크의 외주부에 접촉하게 된다. 이 때 스프링의 강성을 이용하여 예압력의 크기를 조절함으로써 마찰용 부재와 회전 디스크 간의 마찰력의 크기를 조절할 수 있도록 하였다. 예압의 크기는 로드셀을 이용하여 그 값을 정확히 측정할 수 있도록 하였다. 그럼에서 알 수 있듯이 예압 인가시 선형구동부는 고정부의 끝단(그림에서 고정부 끝

단의 빗금친 부분)을 중심으로 회전 운동을 하게 된다. 또한, 회전 디스크의 회전 운동시, 회전 디스크의 진원도 오차, 회전 디스크의 회전 운동 중심과 기하학적 형상 중심 간의 불일치 등으로 인해 선형 구동부의 회전 운동은 불가피하게 발생한다. 이러한 회전 운동은 선형 구동부에 불필요한 응력을 발생시켜 장치의 성능 변화 및 저하, 심한 경우 선형 구동부의 파손을 초래하므로 본 장치에서는 고정부에 탄성힌지를 설치하여 회전 운동을 흡수하도록 하였다. 한편, 본 장치에 있어서 마찰용 부재와 회전 디스크는 항상 마찰 상태에 놓여 있으므로 장기간 작동시 마모가 발생하여 구동 불능 또는 구동 특성에 있어서 변화가 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 내마모성 소재인 세라믹 물질을 사용하였다.

Fig. 3(b)는 압전소자에 인가되는 전압 및 예상되는 회전 디스크의 회전 각변위를 나타낸 것이다. Fig. 3(b)에 나타난 톱니 파형의 전압이 압전소자에 인가되면 압전소자와 마찰용 부재는 축방향으로 저속 전진 및 고속 후퇴 운동을 반복하게 되고 이러한 마찰용 부재의 반복 운동은 전술한 SIDM의 원리에 의해 회전 디스크의 회전 운동으로 변환된다. 압전소자에 Fig. 3(b)의 전압 파형과 반대되는 파형을 인가하면(즉, 압전소자와 마찰용 부재가 고속 전진, 저속 후퇴 운동을 하게 되면) 회전 디스크는 상기와 반대방향으로 회전하게 된다.

### 3.2 구동 및 실험장치

Fig. 4는 본 연구에서 제작한 구동장치의 사진을 나타낸 것이고 Fig. 5는 구동실험을 수행하기 위한 실험장치의 구성도이다. 압전소자로써는 최대 인가 전압 150V에서 최대 변위가  $9.1 \pm 1.5 \mu\text{m}$ 인 NEC/TOKIN사의 모델 AE0203D08을 사용하였다. 일반적으로 압전소자를 최대 인가 전압에서 반복적으로 사용하면 압전소자 자체에 좋지 못한 영향을 주므로 본 논문에서는 100V 이하에서 압전소자를 구동하였다. 인가전압 100V에서 압전소자의 변위는  $6.1 \pm 1.5 \mu\text{m}$ 이다. Table 1은 본 연구에서 사용한 압전소자의 주된 규격을 나타낸 것이다. 압전소자에 인가하기 위한 구동 전압의 파형은 NF사의 파형발생기(waveform generator) WF 1946A를 사용하여 생성하였으며 이 전압을 고전압으로 증폭하기 위한 증폭기로는 증폭률 100인 PI사의 모델 E471.00을 사용하였다.

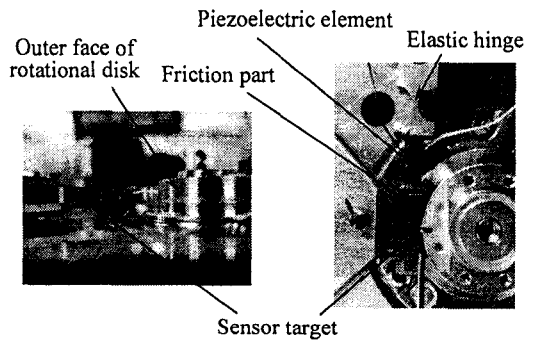
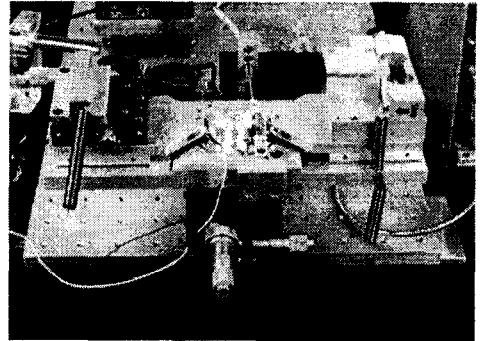


Fig. 4 Photographs of the rotational device

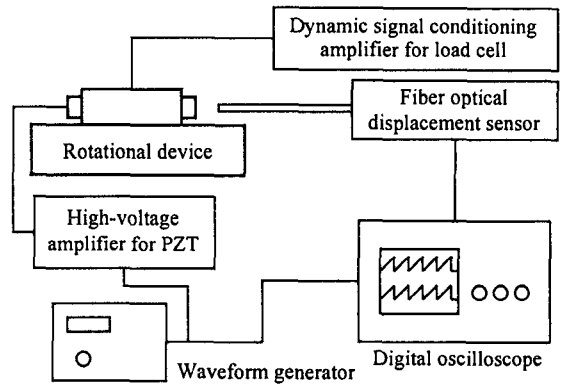


Fig. 5 Schematic diagram of the experimental setup

Table 1 Principal specifications of piezoelectric element

Item	Value
Displacements	$9.1 \pm 1.5 \mu\text{m} @ 150\text{V}$
	$6.1 \pm 1.5 \mu\text{m} @ 100\text{V}$
Generated force	200N
Resonance frequency	138kHz
Overall length	10mm

마찰용 부재와 회전 디스크 외주부 사이에 작용하는 수직력, 즉 예압력에 따라 초정밀 회전 장치의 운동특성이 다르게 나타날 것으로 예상되기 때문에 이 수직력을 측정하기 위하여 로드셀을 장착하였다. 본 연구에서 사용한 로드셀의 정격하중은 3kgf 으로 하중에 따라 로드셀에서 출력되는 전압이 매우 작기 때문에 Instrument Division 사의 dynamic signal conditioning amplifier 를 사용하여 신호를 1000 배 증폭하여 사용하였다. 이 신호 증폭기는 대역폭 10kHz 의 LPF(low pass filter)를 탑재하고 있으며 최대 출력 전압은  $\pm 10V$  이고 최대 3000 배의 신호 증폭율을 가지고 있다.

마찰용 부재의 변위와 그에 따른 회전 디스크의 각변위는 Nanotex 사의 광 파이버 변위 센서 (fiber optical displacement sensor)를 사용하여 측정하였다. 이 센서는 직선변위 측정용 센서이므로, 회전 디스크의 각변위는 디스크 외주부에 반사거울을 설치하고 디스크의 회전에 따른 이 거울의 직선 변위를 측정함 다음 이 변위와 원판의 반경으로부터 간단한 수식을 이용하여 산출하였다. 회전 각이 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.

마찰용 부재의 재질로는 세라믹 계열의 알루미늄 나( $Al_2O_3$ ) A99 를 사용하였고 마찰이 이루어지는 부근의 표면 거칠기는 약 26nm 이었다. 마찰용 부재의 질량은 3.02g 이다. 회전 디스크로는 마찰용 부재와 동일한 재질인 알루미늄 디스크를 가공하여 사용하였고, 회전 디스크를 지지하기 위한 베어링으로는 3.5 인치 하드 디스크용 베어링을 사용하였다. 회전 디스크 외주부의 표면 거칠기는 평균 107.5nm 이었다.

#### 4. 실험 및 결과

본 장에서는 SIDM 을 이용한 초정밀 회전장치의 구동 특성을 살펴보기에 앞서 그 모태가 되는 IDM 원리에 의한 회전장치의 구동 실험을 수행하였고, 그 후 SIDM 방식을 이용한 초정밀 회전장치의 구동 실험을 수행하였다. 또한, 구동전압의 크기와 주파수, 그리고 예압력의 크기에 따른 회전장치의 구동 특성(각속도)에 관한 기초적인 실험을

수행하였다.

#### 4.1 IDM 구동실험

Fig. 6 은 IDM 원리를 이용하여 회전장치의 구동실험을 수행한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 압전소자에 크기 100V 의 톱니파형의 전압을 인가하였으며 톱니파형과 파형 사이에 4 사이클 동안의 휴지상태를 유지하였다. 완만한 기울기로 증가하는 전압이 압전소자에 인가되면 마찰용 부재와 회전 디스크의 외주부는 스틱상태를 유지하게 되어 마찰용 부재는 회전 디스크를 미끄러짐 없이 회전시키지만, 급격한 기울기로 전압이 감소되면 마찰용 부재와 회전 디스크의 외주부 사이에 슬립이 발생하여 마찰용 부재는 회전 디스크를 완벽히 초기 위치로 복귀시키지는 못한다. 결과적으로 디스크의 회전운동을 얻게 된다. Fig. 6 에 있어서 한 스텝당 회전각은 약  $5 \times 10^{-5}$  rad 이었다. IDM 구동 방식은 SIDM 구동방식에 비해 저 주파수 영역에서 구동하는 방식으로 스텝당 고정밀도의 위치 이동이 가능한 장점을 가지고 있으나 저 주파수 영역에서 구동하기 때문에 이송속도가 느린 단점을 가지고 있다.

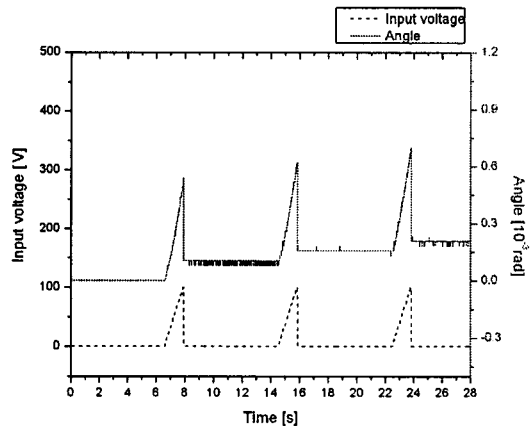


Fig. 6 Experimental result on angular displacement of the rotational device (IDM response)

Fig. 7 은 Fig. 6 과 같이 톱니파 사이에 휴지상태를 설정하지 않고 100V 의 진폭을 갖는 1Hz 의 톱니파를 연속적으로 압전소자에 인가하였을 때 나타나는 각변위를 측정함 결과이다. Fig. 6 과 비교하면 압전소자가 완만한 속도로 늘어날 때 회전

디스크는 미끄러짐 없이 회전하지만, 압전소자의 급격한 수축에 의해 원래의 위치로 복귀하는 각변위량은 매우 작음을 알 수 있다. 이는 회전 디스크가 원래의 위치로 복귀하는 도중에 반대 방향으로 다시 마찰력이 가해지기 때문인 것으로 판단된다. 앞에서 기술한 바와 같이 IDM 구동은 비교적 낮은 주파수로 구동할 때 나타나는 현상으로 스틱 운동구간과 슬립 운동구간이 비교적 명확하게 구분되며, 스틱 운동구간에서는 피구동 물체의 변위와 압전소자의 변위가 거의 동일하게 나타난다.

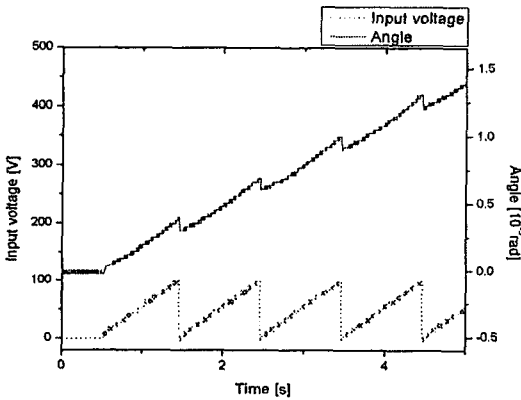


Fig. 7 Experimental result on angular displacement of the rotational device when the voltage of 100V, 1Hz is supplied to PZT (IDM response)

### 4.2 SIDM 구동실험

마찰용 부재의 구동 주파수를 높게 하면 전 운동구간에 걸쳐 슬립운동이 일어나며, 이 슬립운동으로 인해 디스크의 회전운동이 발생한다. Fig. 8은 100V의 진폭을 갖는 50Hz의 톱니파를 압전소자에 인가하였을 때 나타나는 회전 디스크의 각변위를 측정된 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 회전 디스크의 운동에 있어서 앞 절에서 기술한 IDM 운동과는 달리 스틱-슬립 운동구간이 명확하게 구분되지 않는 것을 알 수 있다.

한편, Fig. 9는 진폭은 100V로 Fig. 8의 경우와 동일하지만 주파수를 Fig. 8보다 10배 증가시켜 인가하였을 때 나타나는 각변위를 측정된 결과이다. Fig. 6과 Fig. 7에 나타난 IDM 구동 결과에 비해 디스크 회전 운동이 매우 매끄러움을 알 수 있다.

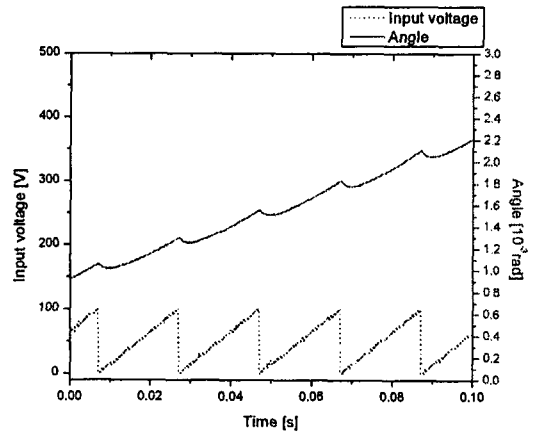


Fig. 8 Experimental result on angular displacement of the rotational device when the voltage of 100V, 50Hz is supplied to PZT (SIDM response)

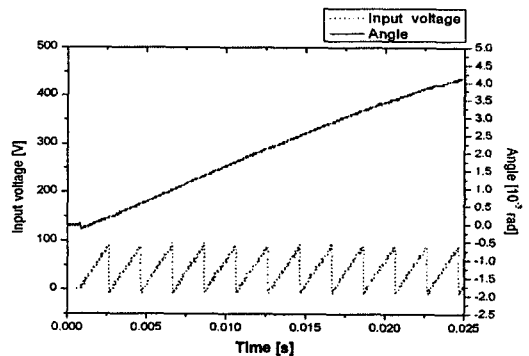


Fig. 9 Experimental result on angular displacement of the rotational device when the voltage of 100V, 500Hz is supplied to PZT (SIDM response)

### 4.3 구동전압 및 예압력에 따른 각속도

초정밀 회전장치의 구동 특성에 압전소자의 직선 변위의 크기가 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 압전소자에 인가되는 전압의 크기를 바꾸어 가며 구동실험을 수행하였다. Fig. 10은 2N의 예압력을 작용시켜 놓은 상태에서 압전소자에 인가되는 구동 전압과 주파수가 변화함에 따라 각속도가 어떻게 변화하는지를 측정된 결과이다. 주파수가 증가함에 따라 각속도는 대략 선형적으로 증가함을 알 수 있고, 동일한 주파수에서 살펴 보면 구동전압이 증가할수록 각속도가 대체적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

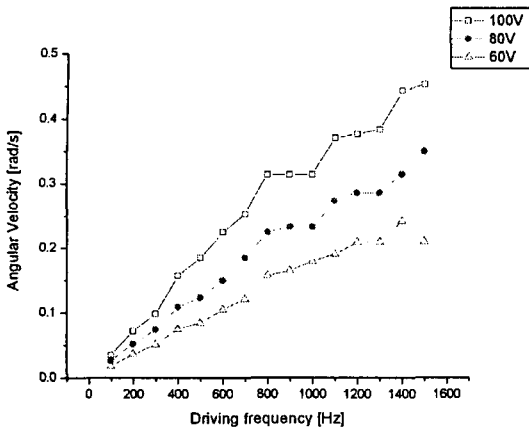


Fig. 10 Experimental result on angular velocity vs. driving voltage and frequency where 2N preload is applied

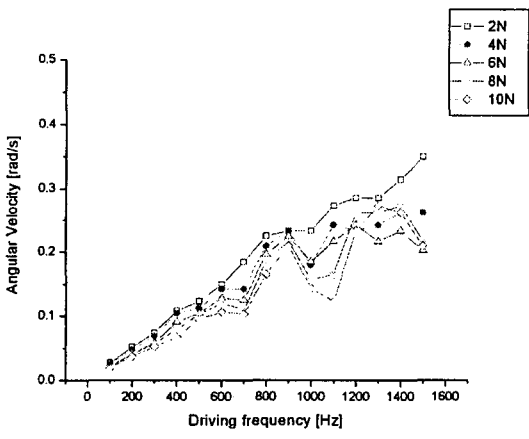


Fig. 11 Experimental result on angular velocity vs. preload where 80V driving voltage is applied

초정밀 회전 장치의 마찰부에 작용하는 예압력의 크기가 회전 장치의 구동 특성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위하여 마찰부에 작용하는 예압력의 크기를 바꾸어 가며 구동실험을 수행하였다. Fig. 11 은 80V 의 구동전압을 인가한 상태에서 마찰부에 작용하는 예압력과 압전소자에 인가되는 구동주파수가 변화함에 따라 각속도가 어떻게 변화하는지를 측정한 결과이다. 동일한 주파수에서 살펴 보면 대체적으로 마찰부에 작용하는 예압력이 증가함에 따라 각속도가 느려지는 경향을 보임을 알 수 있다. 그림에서 보면 예압이 4N 이

상일 때 약 1kHz 부근에서 각속도가 급격하게 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다. 이는, 압전소자의 움직임이 디스크의 회전운동으로 전달되는 과정에 1kHz 부근에서 그 특성이 현저하게 변화하는 예압과 관련된 어떤 동특성이 게재되어 있다는 것을 의미하는데 현재 그 실체가 무엇인지에 대하여 다각도로 연구, 분석 중에 있다.

SIDM 방식을 이용한 구동장치는 IDM 방식을 이용한 장치보다 전술한 바와 같이 훨씬 매끄러운 움직임을 얻을 수 있을 뿐만 아니라 더 큰 구동속도를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한 IDM 방식의 경우 일반적으로 구동 주파수로 가칭 주파수 영역을 사용하기 때문에 장치 작동시 귀에 거슬리는 소음이 발생하는 문제점이 있으나 SIDM 방식의 경우, 장치를 소형화하고 구동 주파수를 가칭 주파수보다 높게 설정함으로써 전혀 소음이 발생하지 않게 할 수 있는 장점이 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 SIDM 을 구동원리로 하는 초정밀 회전 구동장치를 제작하고 제작된 장치에 대하여 기초적인 구동실험을 수행하였다. 압전소자에 진폭 100V 의 톱니파형 전압을 인가함으로써 회전 장치는 성공적으로 구동되었으며, 실험결과, 회전 각속도는 구동주파수와 구동전압이 증가함에 따라, 또 예압력이 감소함에 따라 증가함을 보였다. 본 회전장치는 100V, 500Hz 의 구동전압에서 아주 매끄러운 회전운동을 보여 주었다.

본 연구는 SIDM 을 이용한 초정밀 회전 장치를 1 차 제작하고 기초적인 특성 실험을 수행하는데에 주안점을 두고 진행하였으나 향후 보다 신뢰성 있고 보다 나은 구동특성을 갖는 회전장치를 개발하기 위해서는 추가적인 연구가 진행되어야 한다. 향후, 이론적인 모델링을 통한 회전장치의 구동 특성 파악, 최적의 구동특성을 얻기 위한 최적의 전압 파형, 마찰용 부재와 디스크 외주부의 표면거칠기가 구동특성에 미치는 영향 등에 관한 연구를 수행할 예정이다.

### 후 기

이 논문은 2007 년 울산대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

### 참고문헌

1. Kurosawa, M. K., "State-of-the-Art Surface Acoustic Wave Linear Motor and its Future Applications," *Ultrasonics*, Vol. 38, Issues 1-8, pp. 15-19, 2000.
2. Friend, J., Umeshima, A., Ishii, T., Nakamura, K. and Ueha, S., "A Piezoelectric Linear Actuator Formed from a Multitude of Bimorphs," *Sensor and Actuator A*, Vol. 109, Issue 3, pp. 242-251, 2004.
3. Kim, S. C. and Kim, S. H., "A Precision Linear Actuator using Piezoelectrically Driven Friction Force," *Mechatronics*, Vol. 11, Issue 8, pp. 969-985, 2001.
4. Burleigh Co. website, "<http://www.exfo.com/en/products/>"
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Yoshida, R., Okamoto, Y., Hamamatsu, A. and Higuchi, T., "Development of Translation Stage Using Smooth Impact Drive Mechanism," *Japan U.S.A. Symp. on Flexible Automation*, pp. 61-67, 1998.
9. Yoshida, R., Okamoto, Y., Higuchi, T. and Hamamatsu, A., "Development of Smooth Impact Drive Mechanism," *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 65, No. 1, pp. 111-115, 1999.
10. Morita, T., "Miniature Piezoelectric Motors," *Sensor and Actuators A*, Vol. 103, Issue 3, pp. 291-300, 2003.