

## 영구 자석과 전자석의 상호작용을 이용한 초정밀 양방향 구동기 설계

김기현<sup>#</sup>, 권대갑<sup>\*</sup>

### Design of ultraprecision bi-directional actuator for nm using a permanent magnet and electromagnet

Ki-Hyun Kim<sup>#</sup> and Dae-Gab Gweon<sup>\*</sup>

#### ABSTRACT

A precision bi-directional actuator for a high precision leveling system with  $Z\theta_x\theta_y$  motions is proposed and designed in this paper. The actuator is composed of a force generation structure, a guide mechanism, and a symmetric structure. At first, its driving force is generated by a change of flux in air gaps by permanent and changeable flux. The permanent flux is generated by a permanent magnet. The changeable flux is created by variable current flowing through coil. The combination of permanent and changeable flux makes various flux densities in air gaps between moving part and fixed yokes. And then, the difference between flux densities in lower and upper gaps creates forces for the bi-direction( $\pm z$ ) motion. The guide mechanism of this actuator is composed of two circular plates and one shaft. Reducing motions generated by forces except z-motion, these circular plates endow the actuator with high stiffness for fast settling time. And the function of the shaft is to transfer motion to an object. At last, total body has a symmetric structure to be stable on thermal error. The actuator is designed by MAXWELL 2D and ProMECHANICA. The designed actuator is evaluated by 8nm laser doppler vibrometer, dynamic signal analyzer, and simple PID controller.

**Key Words :** High precision, bi-directional actuator, permanent magnet, electromagnet, leveling system

#### 기호설명

$\lambda$  = Wavelength of light source(nm)  
 $D_{x,y}$  = Field Size of x and y axis(mm)  
 $\phi_{tilt}$  = Allowable tilting range(urad)  
 $\phi_{change}$  = Changeable flux by activated coil(Wb)  
 $\phi_{permanent}$  = Permanent flux by permanent

magnet(Wb)  
 $z1$  = Gap between upper fixing plate and moving yoke(mm)  
 $z2$  = Gap between lower fixing plate and moving yoke(mm)  
 $\phi_{gap\_z1, z2}$  = Total flux in z1 and z2 gap (Wb)  
 $\lambda_{gap\_z1, z2}$  = Total flux linkage in z1 and z2 gap

<sup>\*\*\*</sup> 접수일: 2004 년 11 월 22 일; 게재승인일: 2005 년 7 월 8 일

<sup>\*</sup> 한국과학기술원 기계공학과 NOM Lab.

<sup>#</sup> 교신저자, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail [khkim12@kaist.ac.kr](mailto:khkim12@kaist.ac.kr) Tel. (042) 869-8763

- (Wb · turns)
- $B_{gap\_z1,z2}$  = Flux density in gap between fixing plate and moving yoke(T)
- $A_{gap}$  = Area of gaps(m<sup>2</sup>)
- $N$  = Number of coil turn(turns)
- $F_{gap\_z1, z2}$  = Forces in gaps(N)
- $F$  = Actuating force(N)
- $R$  = Resistance of fluxlinkage(A\*turns/Wb)
- $I$  = Current through coil(A)
- $\mu_0$  = Permeability of air(H/m)
- $F_{permanent}$  = Force due to permanent magnet due to the variation of air gap(N)
- $k_{permanent}$  = Constant of permanent magnet due to air gap(N/m)
- $F_{electro}$  = Force due to electro-magnet due to the variation of current (N)
- $k_{electro1}$  = Constant of electro-magnet due to current(N/A)
- $k_{electro2}$  = Constant of electro-magnet due to air gap(N/m)
- $D_{coil}$  =Diameter of Coil(mm)
- $t_{mag}$  = Thickness of permanent magnet(mm)
- $D_{mag\_in}$  =Inner diameter of permanent magnet(mm)
- $D_{mag\_out}$  =Outer diameter of permanent magnet(mm)
- $t_{cir}$  =Thickness of guide plate(mm)
- $D_{cir\_in}$  =Inner diameter of circular guide plate(mm)
- $D_{cir\_out}$  =Outer diameter of circular guide plate (mm)

## 1. 서론

정보화 산업의 급속한 발전을 정밀 부품의 가공 및 검사 장치의 필요성을 증가시키고 있다. 100~300nm 의 극자외선 광원과 0.5 이상의 높은 개구수(Numerical Aperture : NA)의 광학 시스템을 이용하는 반도체 포토리소그래피 장비는 반도체 선 폭에 따라 다르지만, 현재 서브 um 이하의 허용 초점 심도(Usable depth of focus : UDOF)가 존재한다. 서브 um 이하의 허용 초점 심도는 고정밀도의 레벨링 시스템을 요구하게 된다.<sup>1</sup> 또한, 초정밀 가공 및 측정 장치는 시편을 평면 운동 뿐만 아니라,  $Z\theta_x\theta_y$  레벨링 할 수 있는 기구를 포함하여야 한다. 특히, 현재 기술에서는 약 100nm 이하 운동 정

밀도를 수행 해야한다. 또한, 생물 시편과 반도체 회로 시편 등 정밀 시편 두께를 고려할 때 100um 이상 행정거리를 구현할 수 있는 양방향 초정밀 Z 축 운동 및 틸트 운동을 갖는 레벨링 시스템이 요구되고 있다.<sup>2</sup> 레벨링 시스템을 구현할 수 있는 구동기로서 정밀 구동 시스템에 대표적으로 사용되는 피에조 구동기는 100um 이상의 구동 영역을 구현하기 위하여는 크고 복잡한 증폭기 혹은 100mm 이상 길이를 갖는 구동기가 사용 되어야 한다.<sup>3</sup> 다른 예로써, 주로 스위칭 시스템으로써 사용되는 선형 솔레노이드 구동기가 있다.<sup>4</sup> 솔레노이드는 구성 상 전류를 인가하였을 경우 한 방향의 힘만 발생하고 그 때 구동기는 기준면에서 한 방향으로 운동한다. 솔레노이드가 초기 위치로 돌아오기 위한 복원력은 스프링의 복원력만으로 이루어진다. 결국, 상기 구동기들은 100um 이상의 정밀 레벨링을 위한 양방향 운동을 수행하기에 적합하지 않다.

본 논문의 첫 장에서는 기준 면을 중심으로 100um 이상 양방향 초정밀 운동을 수행할 수 있는 구동기를 제안하고, 둘째 장에서는 개념 설계된 구동기의 모델링과 상용 해석 프로그램을 이용하여 설계하며, 끝으로 실험을 통한 설계 검증 및 성능 평가한다.

## 2. 초정밀 양방향 구동기의 개념 설계

본 논문에서의 양방향 정밀 구동기는 Fig. 1 에서와 같은 시스템에 적용되기 위하여 제안된다. 특별하게 본 논문에서 제작되는 양방향 구동기 사양은 극자외선 반도체 포토리소그래피 시스템에 적용 가능하도록 아래와 같이 주어진다. 광원 파장( $\lambda$ )은 248nm 그리고 개구수(NA)는 0.54 로 가정한다.

$$UDOF = 0.5 \frac{\lambda}{NA^2} \approx 700 (nm) \quad (1)$$

또한, 포토리소그래피 장비를 통하여 생산될 수 있는 다이(die)의 크기는 25×36(mm<sup>2</sup>)로 고려할 때, 허용 틸트 각도는 식 (2)와 같이 주어진다.

$$\phi_{min} \approx 0.5 \frac{\lambda}{NA^2 D_{x,y}} \approx 19 \sim 28 (urad) \quad (2)$$

끝으로, 백철구 등 생물 및 미세 가공 기술에 의한 제품을 폭넓게 측정할 수 있도록 200um ( $\pm 100\text{um}$ )의 행정 거리를 갖도록 구동기가 제안된다. 또한, 1.5kg의 무게를 지지하는 동안, 일반적으로 구동기의 0.1 초 이하의 정착 시간을 위하여 50Hz 이상 공진 주파수를 갖도록 한다.

본 논문에서 제안되는 초정밀 양방향 구동기는 구동력 생성부와 힘을 전달하는 가이드부로 구성된다. 구동력 생성부는 도넛츠 형 코일과 영구자석, 그리고 자속 흐름의 폐회로를 위한 요크 시스템으로 구성된다. 특히, 구동력은 코일을 통하여 흐르는 전류에 의한 변형 자속( $\phi_{change}$ )과 영구 자석의 일정 자속( $\phi_{permanent}$ ), 그리고 상하 공극의 상호 작용에 의한 자속( $\phi_{gap}$ )으로부터 생성된다. 생성된 구동력은 가이드 부를 통하여 시편부에 전달 된다. 가이드 부는 기생 운동에 대한 강성과 운동 특성을 높이기 위하여 원형 판을 이용한다. 각 구성 요소는 원통형 대칭 구조로 정밀 양방향 구동기 프레임 구성한다.

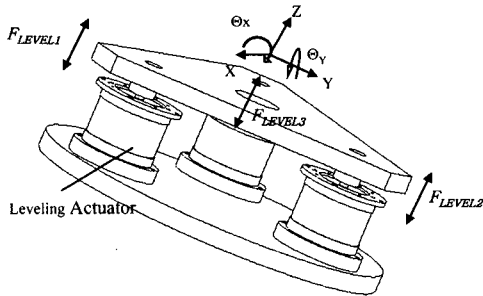


Fig. 1 ZΘxΘy mechanism with bi-directional actuators

### 2.1 전자석과 영구자석을 이용한 초정밀 양방향 구동기

앞에서 언급하였듯이, 양방향 구동기의 일정 자속을 위하여 Fig. 2 에서 보여지는 것과 같은 NdFe40의 도넛츠 형 영구 자석을 이용한다. 제안된 정밀 양방향 구동기의 개념도인 Fig. 3 에서 점선이 표현하는 일정한 자속 방향을 갖는 반 영구 자속( $\phi_{permanent}$ )은 영구자석에 의하여 생성된다. 위 공극에서는 -z 방향 자속이 아래 공극은 +z 방향의 일정한 자속이 존재한다. 이 때, 영구자석 위·아래 코일에 전류를 시계 반대방향으로 인가하면, 요크로 구성된 폐자속 회로를 통하여 실선의 +z 방향 흐름을 갖는 변형 자속( $\phi_{change}$ )이 생성된다. 전

류를 시계방향으로 인가하였을 경우는 -z 방향의 변형 자속이 생성 된다.<sup>5,6</sup> 생성된 영구· 변형 자속들은 요크들 사이 상하 공극들( $z1, z2$ )에서 상호 작용을 하여 전체 자속( $\phi_{gap\_z1, z2}$ )의 변화를 발생시킨다. 이러한 자속 변화는 위· 아래 공극에서 힘( $F_{gap\_z1, z2}$ )을 생성한다. 전류 방향에 따라 두 힘의 차이가 제어되며, 초기 기준면을 기준으로 하여 구동기 이동부가 위· 아래 운동을 갖는다. 식(3)은 위· 아래 공극의 영구자석과 전자석에 의한 자속을 표현한다. 식(4)는 영구 자석과 전자석에 의한 힘이 공극의 변화에 따른 변화를 나타낸다. 마지막으로 식(5)은 공극 사이의 힘들을 이용하여 구동기의 구동력 생성을 설명한다.

앞에서 설명된 방법에 의하여 생성된 자속들의 흐름을 원활히 하기 위하여 탄소 함유량이 낮은 S10C의 철을 요크로써 사용하였고, 전체 외곽 프레임은 대칭적으로 구성한다. 생성된 구동력은 다음 장에서 설명될 원형 판 가이드를 통하여 시편부에 전달된다.

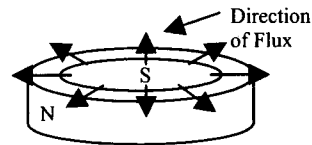


Fig. 2 Permanent magnet generating permanent flux

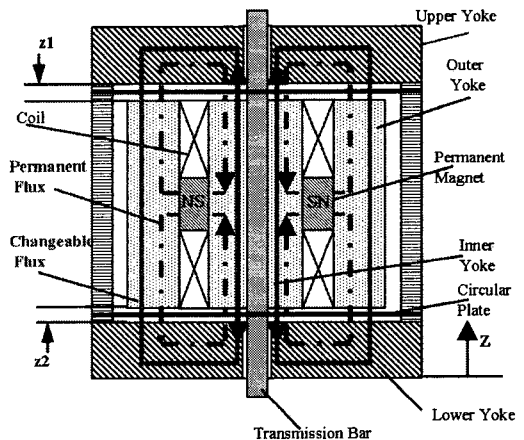


Fig. 3 The sectioned picture of proposed actuator

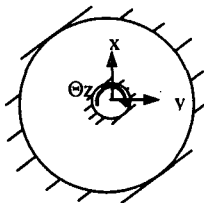
$$\lambda_{gap1,2} = N \phi_{gap\_z1,z2} = N (\phi_{permanent} \mp \frac{NI}{R}) \quad (3)$$

$$F_{gap1,2} = \frac{d(\int \lambda_{gap1,2} di)}{dz} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \lambda_{gap1,2} A_{gap} \quad (4)$$

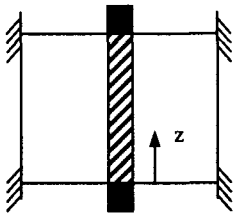
$$F = F_{gap1} - F_{gap2} \quad (5)$$

### 2.2 가이드 시스템

구동 시스템은 구동력 생성부에 의한 힘을 전달하여 주는 가이드 시스템이 필요하다. 특히, 초정밀 시스템 설계에서 마찰 없는 가이드 시스템은 구동기의 성능을 좌우하는 절대적 요소가 되었으며 중요 시 되고 있다.<sup>7</sup> 본 논문에서 제안되는 정밀 양방향 구동기는 nm 정밀도의 초정밀 측정 및 구동 시스템에 적용을 목적으로 하며, 200um의 행정거리의 사양을 갖고 있다. 특히, 가이드 기능을 위하여 직선 운동 외의 기생 운동에 대한 높은 강성이 요구되며, 틸트 운동에 필요한 피치( $\theta_x$ )와 롤( $\theta_y$ )에 대한 자유도를 갖고 있어야 한다. 또한, 빠른 응답 특성을 위하여 높은 가이드 강성이 요구된다. 이를 위하여, 본 논문에서는 원판 형태를 갖는 판 스프링을 구동기의 위·아래 대칭으로 적용한다. 본 논문에 사용될 가이드 시스템 개념도는 Fig. 4에서 나타난다. 원형 가이드의 탄성 계수와 운동 특성의 해석 및 설계를 위하여 Pro-MECHANICA<sup>TM</sup>이 사용된다.



(a) Clamped Circular plate



(b) The assembly of Shaft and circular plate

Fig. 4 Guide system using two clamped plates and a shaft

### 3. 초정밀 양방향 구동기 설계

본 논문의 앞장에서 제안된 구동기의 상세 설계는 구성 요소들의 관계성과 사양을 고려하여 유한 요소 기법을 통한 여러 번의 반복을 통하여 획득하였다.

구동력을 생성하는 자기 회로의 해석은 Fig. 5에서 보여지는 것과 같이 구동기의 대칭적 구조 장점을 이용하기 위하여 실린더 좌표를 사용할 수 있는 Maxwell<sup>TM</sup> 2D가 사용된다. 결과적으로 구동기의 해석 시 전체 3 차원적 형상을 구현하지 않고 절단면 만을 이용한다. 해석 결과로써, Fig. 5를 통하여 영구 자석에 의한 자석선도를 관찰하면, 자석을 둘러싸고 있는 요크에 의하여 자속의 흐름이 원활하게 움직이고 있음을 관찰할 수 있다. 본 논문에서 제안된 구동기의 이동 부분은 자석을 포함한 원통형 내부 요크, 외부 요크, 그리고 두 개의 코일이다. 설계 결과로써 획득된 시스템은 코일 지름과 감긴 수가 0.4mm와 520번, 자석의 내부 지름 15mm, 외부 지름 25mm, 두께 4mm이다.

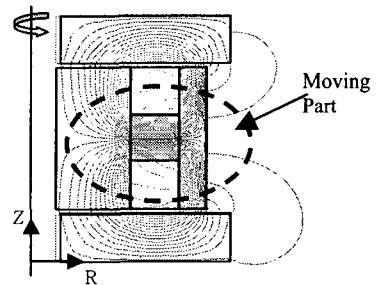


Fig. 5 Cylindrical coordinate modeling using MAXWELL<sup>TM</sup> 2D

제안된 구동기의 내부 구동부의 위치가 구동기의 중앙이라고 가정할 경우, 영구자석에 의한 위·아래 간격에서의 자속 밀도의 크기는 같다. 그러나, 내부 구동부가 위·아래로 움직일 경우 자속 밀도는 조금씩 변화를 한다. 그 차이로 인한 힘은 Fig. 6과 같이 나타난다.

영구 자석에 의한 힘은 본 논문에서 Fig. 6에서 보여지는 것과 같이 목표로 하는  $\pm 0.1\text{mm}$  행정영역 안에서 선형적 특성을 갖는다고 가정될 수 있다. 이러한 구동기의 선형적 특성은 영구 자석

에 의한 구동력( $F_{permanent}$ )을 선형적으로 모델링 할 수 있는 가정을 허락한다. 따라서 영구자석에 의한 힘의 특성은 스프링( $k_{permanent}$ )개념을 도입하여 식(6)과 같이 표현된다.

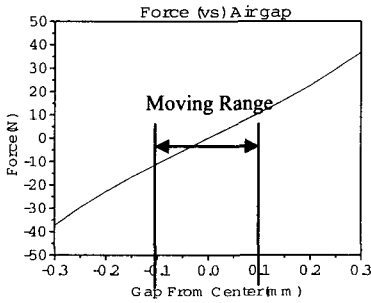


Fig. 6 Force variation according to the variance of gap by a permanent magnet

$$F_{permanent} \approx k_{permanent}z = 0.118(N / \mu m) \times z \quad (6)$$

앞 장에서 언급된 개념을 기초로 하여 전자석을 형성하기 위하여 코일에 전류를 인가할 시, 위 · 아래 공극에서 자속 밀도의 변화가 이루어진다. 변화를 통하여 Fig. 7 에서 보여지는 것과 같이 전류에 따라 힘의 변화가 이루어진다. (+) 전류는 시계 방향 전류가 구동기에 인가되고 자속은 (-)방향으로 흐르고 있음을 표현한다. 결과적으로 표현되는 (+) 힘은 (+) z 축 방향의 힘이다. 영구자석이 결합된 시스템에서 전류가 인가된 경우 전류 · 공극 변화와 힘의 관계는 Fig. 9 에서와 같이 보여진다.

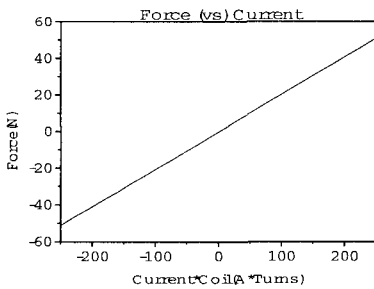


Fig. 7 Force variation according to the variance of current

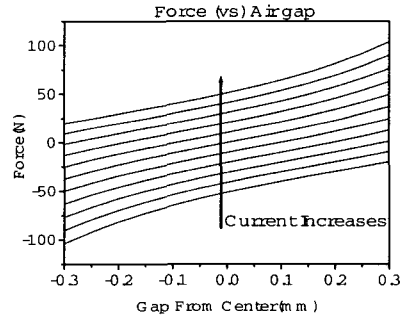


Fig. 8 Force variation according to the variance of gap and current with a permanent magnet

앞에서 영구 자석에 의한 힘이 미소 영역에서 선형화되었듯, 공극의 변화가 없는 경우 다시 말해, 기준면에 이동부가 놓여있는 경우, 전류와 전자석 힘( $F_{electro1}$ )의 관계는 식 (7)과 같이 선형화된다. 전류에 의한 전자석( $F_{electro2}$ )과 공극 변화의 관계는 앞서 설명한 영구자석의 특성과 같다. 결국, 전자석에 의한 힘( $F_{electro}$ ) 지배 방정식은 식(7)로 표현된다.

$$F_{electro1} \approx k_{electro1}I = 106.4(N / A) \times I = F_{electro} \quad (7)$$

식(8)은 Fig. 8 를 통하여 최종적으로 영구자석과 전자석에 의한 설계된 양방향 구동기 구동력을 전류와 공극으로 표현한 것이다.

$$F = k_{electro1}I + k_{permanent}z \approx 106.4(N / A)I + 0.118(N / \mu m)z \quad (8)$$

원형 판 스프링 가이드는 비선형성 시스템이다. 수식적 모델을 세워 계산하기에 복잡한 문제이므로 본 논문에서는 Fig. 9 와 같이 Pro-MECHANICA™에서 제공하는 형상에 따라 구조물의 해석 수식을 창출하고 이용하는 AUTO-Gem (Geometric Element Method)을 통하여 가이드 시스템에 대한 분석 및 적용을 시행하였다. 원형 판 스프링의 설계 조건은 Fig. 4 에서 보여진 것과 같다. 다시 말해, 원판의 외곽 부분에서 클램핑 조건을 부여한다. 본 논문에서 사용되는 원형 판 스프링의 형상은 반복적인 해석을 통하여 얻은 결과로써 스테인레스 재질의 두께( $t_{cir}$ ) 0.25mm, 내부 지름( $D_{cir\_in}$ ) 5mm, 그리고 외부 지름( $D_{cir\_out}$ ) 30mm 이다.

최종적으로 판 스프링을 가이드 시스템에 적용하였을 경우 Fig. 10 에서 보여지는 것 같이 구동기에 인가되는 힘과 가이드의 변형이 나타난다.

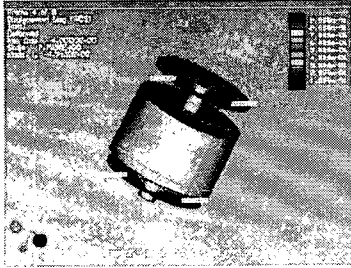


Fig. 9 Clamping Constraint for circular plate in ProMECHANICA™

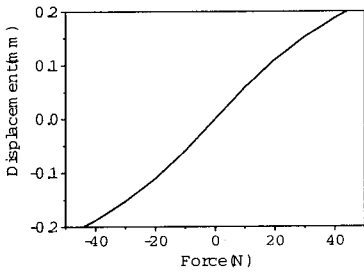


Fig. 10 Guide deflection according to induced force to the proposed actuator

변형 구간 중 본 논문에서 사용되는 구간은 앞에서 언급하였듯이  $\pm 0.1\text{mm}$  구간이기 때문에, 식 (9)과 같이 원형 판 스프링의 탄성계수( $k_{cir}$ )를 선형적으로 가정한다.

$$F = k_{cir}z = \frac{z}{0.0056(\text{mm} / \text{N})} \quad (9)$$

식(6)~(9)을 이용하여, 앞 장에서 제안되고 본 장에서 설계된 양방향 구동기의 지배 방정식은 식 (10)과 같이 표현될 수 있다.

$$M \ddot{x} + k_{cir}z = F - Mg \quad (10)$$

$$= F_{permanent} + F_{electro} - Mg$$

힘에 변화에 따른 가이드 변화를 통하여 구동기의 정적인 설계 후 빠른 응답 특성을 위하여 구

동기의 동적 해석을 시도하였다. 해석 결과 양방향 구동기의 108g 의 이동 부분 하중 만 인가 되었을 경우 Fig. 11 과 같이 195Hz 공진 주파수를 갖는다. 1.5kg 하중 인가 시, 구동기의 공진 주파수는 55Hz 가 되어 설계 사양에 만족한다.

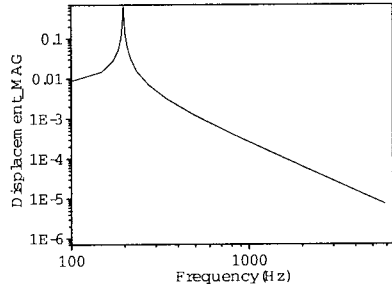


Fig. 11 FRF of designed proposed actuator

#### 4. 초정밀 양방향 구동기 제작 및 성능 평가

레벨링 시스템을 위하여 제안되고 설계된 정밀 양방향 구동기는 요크의 재질로써 저탄소 재질인 S10C 그리고 영구자석은 높은 자력을 생성할 수 있는 NdFe40 이 사용되었다. 영구 자석의 상·하에 존재하는 0.4mm 지름의 구리로 만들어진 두 개의 코일부는 서로 직렬 연결된다. 가이드로써 원형 판 스프링은 판금 작업과 후 처리된 두께 0.25 mm 스테인레스 철판이 사용되며, 구동기의 이동부를 사이로 위·아래에 위치한다. 가이드를 통하여 힘을 시편부에 전달하기 위한 가이드 봉 (shaft)으로써는 자속 흐름을 방해하지 않기 위하여 AL7075 지름 5mm 봉이 이용된다. 전체 시스템은 높은 열방출 능력을 갖는 AL7075 을 이용하여 대칭형으로 제작되었다. 제작된 정밀 양방향 구동기는 높이 50mm, 지름 40mm 이다.

코일에 의한 열 방출을 구동되는 시편 시스템에 전달되지 않도록 열을 차단함과 동시에 시스템 제어 시 불안정한 상태가 발생하여 움직이는 내부 요소와 외부 고정부의 충돌로 생기는 코일의 절단 및 손상, 그리고 시스템 문제를 완화시키기 위하여 움직이는 부분의 상·하에 300um 두께의 플라 스틱 코팅을 하였다. 결과적으로 정밀 양방향 구동기의 허용 구동 영역은  $\pm 200\mu\text{m}$  로 한정된다. 끝으로 가이드 클램프 조건을 만족하기 위하여 Fig. 12 와 같이 원형 판 스프링 고정 요소에 홈을 형

성하여 스프링들을 고정하였다.<sup>8</sup>

Table 1 과 Fig. 13 은 최종적으로 제작된 정밀 양방향 구동기의 형상 및 특징을 설명한다.

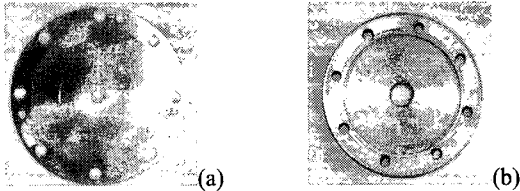


Fig. 12 Guide plate and Fixing jig  
(a) Circular plate (b) upper yoke as a Fixing Jig

Table 1 The Parameters of the designed actuator

Mass	Resistance Of Coil	Turns	Coil Diameter.	Magnet (mm)	Circular Plate(mm)
330g	8.5Ω	520	$D_{coil} : 0.4$ (Bare)	NdFe40 $t_{mag} : 4$ $D_{mag\_in} : 15$ $D_{mag\_out} : 25$	$t_{cir} : 0.25$ $D_{cir\_in} : 5$ $D_{cir\_out} : 30$

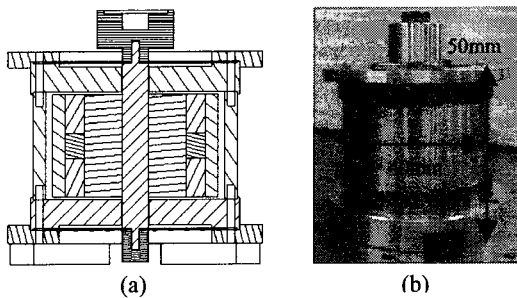


Fig. 13 The embodied actuator  
(a) The Section figure (b) The embodied actuator

상기에서 제작된 정밀 양방향 구동기 특성을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 100um 이상의 행정거리에 나노 미터 수준 구동기의 정밀 운동 측정을 위하여 Polytec™의 8nm 분해능을 갖는 LDV(Laser Doppler Vibro-meter)를 이용한다. 또한, 빠른 응답 특성을 평가하기 위하여 모드 해석이 가능한 Hewlett Packard 사의 동적 분석기(Dynamic analyzer) 35670A 가 사용된다. 구동기의 구동을 위한 전류를 증폭하기 위하여 APEX 사의 PA02 파워 앰프로 구성된 파워 증폭기가 설계· 이용된다. 실

험 장치는 Fig. 14 에서 보여진다. 끝으로 제작된 정밀 양방향 구동기의 위치 추적 능력을 검증하기 위하여 NITM의 데이터 처리 보드를 이용하여 PID 를 이용한 저속 제어를 수행하였다.

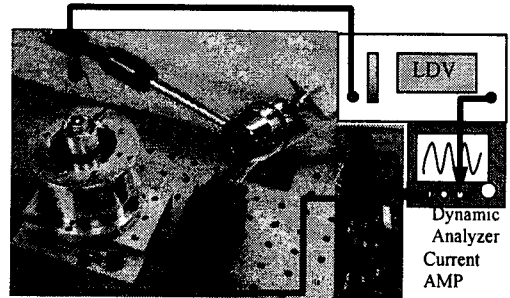


Fig. 14 Experimental Setup

첫 번째 구동기 특성 평가항목으로 공진 주파수를 알아보았다. 제작된 구동기의 첫 번째 모드는 설계 시 보인 공진 주파수인 190Hz 에서 생성되고 있음을 Fig. 15 에서 관찰할 수 있다. 그러나, Fig. 15 의 부차적인 공진 주파수와 노이즈 들은 시스템의 조립 시 발생된 틀어짐, 부차 공진 주파수들, 그리고 장행정·고정밀을 측정하는 측정 센서에서 발생하는 노이즈 영향이다.

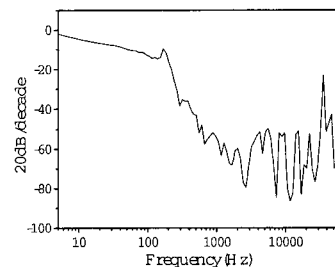


Fig. 15 Frequency Response of the proposed bi-directional actuator

행정 거리 특성 검증을 위하여 구동기에 전류를 인가 시, Fig. 16 과 같이 구동기 움직임이 측정된다. 결과적으로, ±0.2A 인가한 경우에 ±100um 행정을 얻을 수 있음을 예측할 수 있다. 이 실험 결과는 앞장에서 Fig. 6~8 를 통하여 얻어진 결과와 비교하였을 때, 10% 오차 이내 결과를 갖는다.

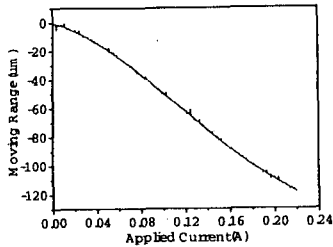


Fig. 16 The movement of this actuator due to applied current

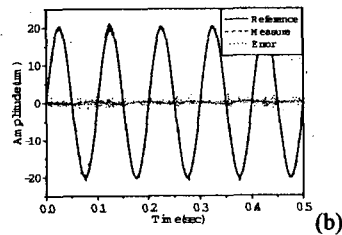
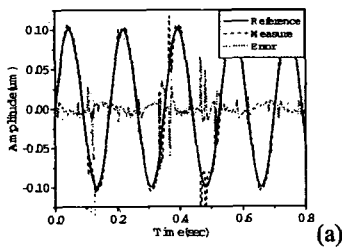


Fig. 17 Experiment results of linear actuator  
(a) 100nm 6Hz sine wave (b) 20um 10Hz sine wave

끝으로, 구동기 추적 능력을 검증하기 위하여 100nm-6Hz 와 20um-10Hz 사인 곡선을 기준 입력으로 선정 후 간단한 PID 를 이용하여 간단한 제어가 수행되었다. 정밀 양방향 구동기는 Fig. 17 에서와 같이 50nm 이하의 추적 능력을 보인다. 이것은 본 논문에서 목표한 구동기의 사양에 만족한다. 제작된 양방향 구동기 세 개를 적용한다면, 정밀 레벨링 시스템의 구현이 가능함을 알 수 있다.

### 5. 결론

본 논문은 정밀 레벨링 시스템을 위한 양방향

구동기를 제안·설계, 제작, 그리고 성능 실험을 수행하였다. 제안된 구동기는 자속 변화를 이용한 구동력 생성부와 가이드 부, 그리고 구조부로 구성된다. 본 논문에서는 제안된 구동기의 설계 시 자속 해석은 Maxwell 2D 유한 요소 해석을 이용, 구조적 성능은 ProMECHANICA 를 통하여 수행되었다. 유한 요소 기법을 이용하여 설계된 구동기는 최종적으로  $\pm 100\mu\text{m}$  이상의 행정거리와 190Hz 의 공진 주파수, 그리고 500um/A 의 특성을 갖는다. 이러한 특성과 함께 50nm 이하의 분해능을 유지하면서 사인 궤적을 추적할 수 있는 양방향 구동기가 본 논문에서 실현되었다.

### 후 기

본 논문은 한국과학재단에서 지원하는 한·러 국제 공동과제의 연구를 통한 결과물이며, 실험 장치 개발에 도움을 주신 한국오토피아에 감사로 표현합니다.

### 참고문헌

1. Van den Brink, M.A., Katz, B.A. and Wittekoek, S., "New 0.54 Aperture i-Line wafer stepper with field by field leveling combined with global alignment," SPIE, pp. 709-724, March 1991.
2. Kim, W.J. and Maheshwari, H., "High-Precision Control of a Maglev Linear Actuator with Nanopositioning Capability," AACC, pp.4279-4284, 2002.
3. <http://www.physikinstrumente.com>
4. Mitsutake, Y., Hirata, K. and Ishihara, Y., "Dynamic Response Analysis of A Linear Solenoid Actuator," IEEE T MAGN, Vol. 33, No. 2, pp. 1634-1637, March 1997.
5. Fitzgerald, A. E., Charles, K. and Umans, S. D., Electric Machinery, McGraw Hill Inc., pp.1-49, 1990.
6. Hanselman, Duane C., "Brushless Permanent-magnet Motor Design," McGraw Hill Inc., pp.13-59, 1994.
7. Sawada, K., "Explanation of Ultra Precision (Nano) Machine Tools," ICPT, pp. 3-12, 2004.
8. Smith, Stuart T., "Flexure," Taylor & Francis, pp. 388-390. 2000.