

# 전자기력 제어를 이용한 6 자유도 초정밀 스테이지

정광석\*, 백윤수\*\*

## Six D.O.F Ultra Fine Stage using Electromagnetic Force Control

Kwang Suk Jung\*, Yoon Su Baek\*\*

### ABSTRACT

In recent year, desire and request for micro automation are growing rapidly covering the whole range of the industry. This has been caused mainly by request of more accurate manufacturing process due to a higher density of integrated circuits in semiconductor industry. This paper presents a six d.o.f fine motion stage using magnetic levitation technique, which is one of actuating techniques that have the potential for achieving such a micro motion. There is no limit in motion resolution theoretically that the magnetically levitated part over a fixed stator can realize. In addition, it is possible to manipulate the position and the force of the moving part at the same time. Then, the magnetic levitation technique is chosen into the actuating method. However, we discuss issues of design, kinematics, dynamics, and control of the proposed system. And a few experimental results for step input are given.

**Key Words** : Fine stage(정밀 스테이지), Six degree of freedom(6 자유도), Magnetic levitation(자기 부상), Micro motion(미세 운동), Step input control(계단 입력 제어)

### 1. 서론

반도체 산업을 비롯한 정보 산업의 발전은 관련 기기의 소형화, 집적화 그리고 제조 기술의 비약적인 성장을 요구하고 있다. 따라서 더욱 정교한 운동을 구현하는 마이크로 시스템에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 이러한 정밀한 운동을 가능하게 하는 마이크로 구동 기술로는 기능 요소(Functional elements)라 불리는 압전 소자, 형상 기억 합금 등을 이용한 제품이 이미 상용화되어 사용되고 있으며 정전기나 전자기 방식 등도 활발히 연구되고 있다<sup>(1-3)</sup>. 본 논문에서는 이러한 정밀 구동 기술 중 전자기 기술을 이용한 자기 부상 방식의 6 자유도 정밀 스테이지를 다룬다. 다른 마이크로 구동 기술과는 달리 자기 부상 방식은 기계적

인 요소들간에 완전한 분리가 가능하므로 이론적으로 이동 부위의 정밀도에는 한계가 없다<sup>(4)</sup>. 또한 반도체 제조 공정 중 완성된 웨이퍼의 검사 장비는 집적회로의 고밀도화 등으로 인해 웨이퍼 표면의 손상 방지를 위해 정밀한 위치 제어 뿐만 아니라 미세한 힘 제어도 요구하고 있다. 따라서 가동 부분의 위치 제어 뿐만 아니라 동시에 힘 제어도 가능한 자기 부상 방식의 구동 기구가 제안되어 연구되고 있다<sup>(5)</sup>. 이러한 자기 부상 기구는 기본적으로 부상 부위의 충분한 강성 확보를 위해 평행 구조의 형태를 띠고 있으므로 제안된 시스템 또한 평행 구조 메커니즘 형태를 지닌다. 본 논문에서 이러한 자기 부상 방식을 이용한 6 자유도 정밀 스테이지의 설계, 기구학, 동력학 문제를 논의하고 제작된 프로토타입을 이용한 간단한 계단 입력에

\* 연세대학교 기계공학과 대학원

\*\* 연세대학교 기계전자공학부

대한 실험 결과와 하이브리드 제어 구현의 용이함을 논의한다.

## 2. Design issues of Fine stage

일반적으로 원천 전류가 있을 경우 전자기 요소들간에 발생하는 현상을 지배하는 방정식은 프와송 방정식이며 비점성 유체의 지배 방정식과 유사한 형태를 지닌다. 따라서 특수한 경우를 제외하고는 폐형 해가 존재하지 않으며 대다수의 연구자들은 수치 해석적인 기법을 통해서 이런 문제를 해결하고 있다<sup>(6)</sup>. 그러므로 자기 요소를 정밀 운동 구동 원으로 선택하는 경우 가능한 한 모델링하기 어려운 비선형 요소들을 배제하는 요소들의 선택이 바람직하다.

### 2.1 Selection of basic magnetic elements

전자기 시스템은 능동적 요소들간의 조합 또는 수동적 요소와의 조합으로 구성된다. 본 연구에서는 능동적인 요소로 공심 솔레노이드를, 수동적인 요소로 영구 자석을 선택하였다. 일정 전류 하에서 공심 솔레노이드에 의해 생성되는 자기장의 크기는 솔레노이드의 체적을 고정시킬 경우 솔레노이드의 외경에 비례하지만 자기장의 구배(gradient)는 특정한 값에서 최대의 값을 갖는다<sup>(7)</sup>. 따라서 적은 간극을 사이에 두고 상호작용을 하는 자기 요소들의 성능을 극대화하기 위하여 최적화의 필요성이 대두된다. Fig. 1은 솔레노이드의 부피를 일정하게 유지시킬 때 솔레노이드의 구배를

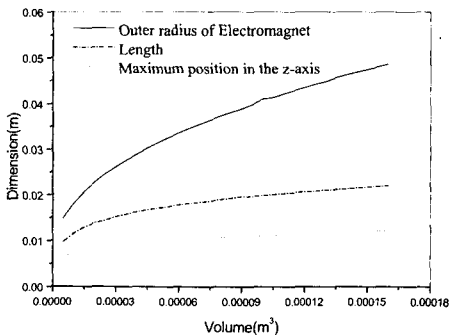


Fig. 1 Optimization of solenoid dimension & operating position maximizing electromagnetic force for constant volume

최대로 하는 즉 상호 작용을 하는 영구 자석에 가하는 자기력을 최대화 시키는 솔레노이드의 각 치수와 그 때 영구 자석과의 상대 위치를 도식한다.

### 2.2 Realization of six degree of freedom

솔레노이드와 영구 자석간의 조합에 의해 솔레노이드의 축 방향으로 구동력을 발생시키는 메커니즘을 6 자유도로 확장하기 위해 Fig. 2와 같은 형태의 자기 부상 스테이지를 고안하였다. 영구 자석과 그것을 지지하는 프레임이 고정 단에 부착되어 있는 솔레노이드 위에서 앞서 언급한 자기력에 의해 부상하게 된다. 즉 z축 방향을 향하고 있는 3개의 솔레노이드는  $z, \alpha, \beta$ 의 운동을 만들어내고 z축에 수직인 평면에 놓여있는 6개의 솔레노이드는  $x, y, \gamma$ 의 운동을 만들어내는데 이러한 두 가지 형태의 운동이 서로 조합되어 6 자유도를 만들어낸다. 이처럼 단일 자유도 구동력을 확장하여 6 자유도를 구현하기 위해서는 부상되어 있는 스테이지의 6 자유도 강성이 모두 충분히 강건해야 한다. 즉 스테이지의 위치나 힘을 제어할 경우 어떤 특정한 방향으로 구동기에 과도한 부하가 걸리지 않기 위해서는 6 자유도 전체에 걸쳐 Fig. 2에서처럼 자기 요소들 간에 서로 반발력이 작용하는 형태로 메커니즘이 구성되어야 한다. 스테이지에는 세계의 2 자유도 position sensitive detectors(PSD)가 장착되어있고 수광 평면에 조사되는 LED의 빔 스폿(spot) 위치를 자체 국부 좌표계에서 계산해낸다. 따라서 부상되는 로터의 공간상의 위치는 PSD에 조사되는, 로터의 중심을 기준으로 120도의 등간격으로 부착되어 있는 적외선 LED의 빔 스폿 위치를 감지한 후 다음 장에서 논의되는 적절한 기구학 계산을 통하여 제어기로 되먹임된다.

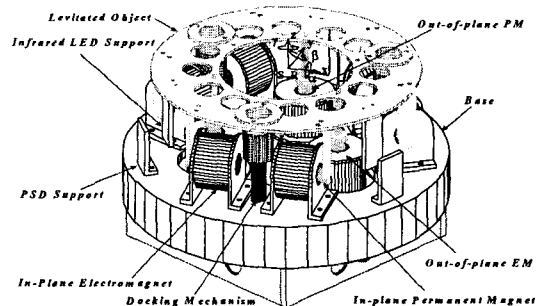


Fig. 2 Entire configuration of the proposed stage

### 3. Analysis procedures of the proposed system

앞장에서 제시한 6 자유도 정밀 스테이지의 운동 특성과 적절한 제어 알고리즘 개발을 위해 다음과 같은 과정을 통해 전체 시스템의 기구학적, 동력학적 문제를 해결한다.

#### 3.1 Forward & inverse kinematics

솔레노이드가 놓여있는 스테이터 위에서 부상하는 스테이지의 공간상의 위치는 Fig. 3에 나타내 있는 것처럼 스테이지에 장착되어있는 3개의 적외선 LED의 빔을 스테이터에 놓여있는 PSD에 조사시키고 PSD 평면상에서 그 빔의 스폿 위치를 적절한 신호 프로세싱을 통해 처리한 후, 다음과 같은 변환 과정들에 의해 스테이터 좌표계 S에서 스테이지 즉, 로터 좌표계 R의 원점 위치를 구한다.

우선 R의 위치 정보가 주어질 경우 각 PSD의 빔 스폿 위치를 계산하는 과정을 살펴본다. Fig. 3에서 A~C는 PSD의 기준 좌표계를 나타낸다. 로터의 원점을  $p_0$ 라 할 경우 위치  $p$ 는 스테이터 좌표계에서  ${}^S p = {}^S Q^R p + p_0$ 로 표현할 수 있다. 여기에서  ${}^S Q$ 는 S와 R사이의 적절한 회전 행렬을 나타내며 Q의 각 열은 스테이터 좌표계에서 나타낸 로터의 기준 벡터  ${}^R b_x, {}^R b_y, {}^R b_z$ 의 방향 코사인 값이다. 따라서 위의 식을 통해 변환된 LED의 기준 벡터들과 PSD 평면과 교차하는 점을 구하면 쉽게 빔 스폿 위치를 알 수 있다. 또한 PSD 평면의 빔 스폿 위치를 알 경우 로터의 공간상의 위치는 장착된 LED 빔 기준 벡터가 서로 120도를 이루고

동일 평면상에 존재한다는 성질을 이용하면 간단하게 구할 수 있다. 즉 각 평면의 빔 스폿 위치를  $a, b, c$ 라 할 경우  $p_0, a, b$ 와  $p_0, b, c$  그리고  $p_0, a, c$ 로 이루어진 삼각형에 외접하는 원의 중심점들을 서로 이으면 정삼각형이 된다. 따라서  $a, b, c$ 에서 원점까지의 벡터는 각 외접원의 중심점을 잇는 선분 벡터와 일정한 비율의 기하학적 관계를 갖는 것을 도식적으로 쉽게 알 수 있다. 또한 로터의 회전 이동량은  $a, b, c$ 로 이루어진 평면의 법선 벡터와 스테이터의 z축과의 상관 관계를 통해 구할 수 있다.

#### 3.2 Dynamics

##### 3.2.1 Interaction modeling of magnetic elements

솔레노이드의 축 방향을 z라 할 때 솔레노이드가 만드는 자기장 내에 놓여있는, 역시 z축을 향하고 있는 자기 쌍극자 모멘트  $m_z$ 로 가정된 영구 자석에 작용하는 힘과 토크는 외부 자기장 B의 구배(gradient)에 의해 나타낼 수 있다<sup>(6)</sup>.

$$F = (m_z \cdot \nabla)B \text{ or } F_n = m_z \frac{\partial B_n}{\partial z} \quad (1)$$

$$T = m_z \times B = m_z B_x j - m_z B_y i \quad (2)$$

여기에서  $n$ 은  $x, y, z$ 를 나타낸다. 위식에서 자기장 B에 대한 엄밀 해는 본 연구에서 채택된 것과 같은 다중 겹 솔레노이드에 대해서는 존재하지 않는다. 그러나 전류 루프 하나가 만드는 축 방향의 자기장을 중첩한 형태의 근사 해를 구해 사용하는 것이 가능하다<sup>(7)</sup>. 또한 영구 자석의 상하 방향으로의 움직임에 의해 솔레노이드에는 기전력,  $\varepsilon_z$ 이 유도되는데 이러한 기전력은 영구 자석이 만드는 자속의 변화를 상쇄시키는 방향 ( $\varepsilon = -d\phi/dt$ )으로 생겨나므로 실제 시스템에서는 댐핑 효과로 나타난다. 유도된 기전력에 의해 코일에는 다음과 같은 유도 전류가 흐른다<sup>(7)</sup>.

$$i_{ind} = \frac{\varepsilon_z}{R} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (3)$$

여기에서  $\varepsilon_z$ 는 코일에 유도된 기전력을, R은 코일의 저항을,  $\tau$ 는 유도 시간 상수를, 그리고  $i_{ind}$ 는 전류를 의미한다. 이러한 유도 전류는 다시 자기

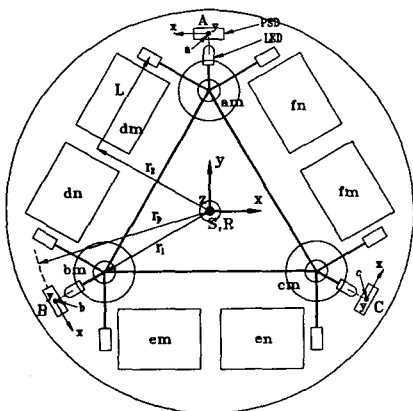


Fig. 3 Upper view of system (Bold line : stage)

장을 발생시키는데 발생한 자기장과 자기 쌍극자, 즉 영구 자석과의 상호 작용에 의해 영구 자석에는 다음과 같은 댐핑력이 작용하게 된다<sup>(7)</sup>.

$$F_d = m_z \frac{\epsilon_z}{R} (1 - e^{-t/\tau}) \frac{\partial}{\partial i} \left( \frac{\partial B_z}{\partial z} \right) \quad (4)$$

여기에서 모든 하 첨자에  $z$ 가 붙은 것은 솔레노이드와 영구 자석의 축 방향이 모두  $z$ 축을 향해 있다고 가정했기 때문이다.

### 3.2.2 Linear perturbation method

Fig. 2, 3, 4에서  $S, R$ 은 앞서 언급한 것처럼 각각 스테이터(고정 단)와 로터(부상되는 스테이지)의 기준 좌표계를 나타낸다. 초기에 스테이터와 로터의 원점이 일치하고 로터의 축이 스테이터의 축과 나란하다고 가정한다. 로터가 스테이터에 대해  $(\delta x, \delta y, \delta z, \delta \alpha, \delta \beta, \delta \gamma)$ 의 섭동을 취할 때 솔레노이드와 영구 자석의 상호작용에 의해 발생하는 자기력은 강성력과 댐핑력의 합으로 표현하는 것이 가능하다. 그 이유는 이러한 적은 간극(narrow gap)을 사이에 두고 작동하는 장치들은 공칭 위치에서 실제 비선형 힘 분포의 테일러 급수 확장에 기초한 선형 시스템 해석이나 제어 기법을 이용한다는 것을 상기하면 충분히 추론 가능하다. 앞서 언급한 것처럼 자기장은 전류  $i$ 와 위치  $r$ 의 함수이고 유도 기전력은 속도  $\dot{r}$ 과 위치  $r$ 의 함수이므로 힘의 일차 변분은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta F(r, r, i) &= \delta F_d(\dot{r}, r) + \delta F_s(r, i) = \frac{\partial F_d}{\partial \dot{r}} \delta \dot{r} + \frac{\partial F_s}{\partial r} \delta r + \frac{\partial F_s}{\partial i} \delta i \\ &= c_r \Big|_{r=r_0} \delta \dot{r} + k_r \Big|_{r=r_0, i=i_0} \delta r + k_i \Big|_{r=r_0} \delta i \end{aligned} \quad (5)$$

여기에서  $r_0$ 과  $i_0$ 는 각각 공칭 위치와 공칭 전

칭 전류를 의미한다. 강성력  $F_s$ 는 (1)에 의해 계산되고 댐핑력  $F_d$ 는 (4)에 의해 계산되는데 댐핑력에 대한  $r$ 의 영향은 무시한다. 또한 위식에서  $c_r, k_r, k_i$ 는  $r$ 방향으로의 댐핑 계수, 강성 계수, 힘 상수를 의미한다. 작용력을 (5)와 같이 모델링 할 경우 Fig. 4에서처럼 솔레노이드와 영구 자석사이에 가상 스프링과 가상 댐퍼가 있는 등가 모델로 간주할 수 있다. 이런 경우 시스템 전체의 운동 방정식은 전형적인 선형 진동 해석 방법에 의해 쉽게 유도할 수 있다. 그림에서 강성 계수, 댐핑 계수에 붙은 하 첨자  $ip, op$ 는 in-plane 운동( $x, y, \gamma$ )과 out-of-plane( $z, \alpha, \beta$ ) 운동을 위한 자기 요소들을 의미한다. 여기에서 주의할 것은 솔레노이드의 반경 방향으로의 각 계수의 값은 고려가 되지 않고 있는데 실제 힘 보정 실험을 수행하면 본 연구에서 제작된 로터의 운동 범위가 2mm 정도 되므로 이 범위 안에서는 축 방향 값들의 약 20% 미만의 값을 취한다. 따라서 반경 방향의 강성 계수, 힘 상수 모두 축 방향 값의 20%로 값을 선택하였다. 예로 공칭 점에서 공칭 전류를 의해 로터의 무게를 상쇄시키고 변분  $\delta$ 를 소거하면  $x, z$ 에 대해 다음과 같은 운동 방정식을 쉽게 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} m\ddot{X} + c_x \dot{X} + k_x X &= m\ddot{X} + 3c_{ip} \dot{X} + (2.4k_{ip} - 0.6k_{op})X \\ &= \frac{1}{2} k_{pi} [(I_{dm} - I_{dn}) - 2(I_{em} - I_{en}) + (I_{fm} - I_{fn})] \\ m\ddot{Z} + c_z \dot{Z} + k_z Z &= m\ddot{Z} + 3c_{op} \dot{Z} + (3k_{op} - 1.2k_{ip})Z \\ &= k_{opi} (I_{am} + I_{bm} + I_{cm}) \end{aligned} \quad (6)$$

## 4. Experimental results

2장에서 언급한 것처럼 최적화 과정을 통하여 결정된 솔레노이드의 각 수치를 이용하여 Fig. 2와 같은 자기 부상 정밀 스테이지를 제작하였다. 부상되는 스테이지의 무게는 274.9g이며 사용된 영구 자석은 강한 응집력을 갖는, 자화 강도가 867,000A/m인 NeFeB 계열의 자석이다. In-plane 운동과 out-of-plane 운동을 위한 솔레노이드와 영구 자석들은 각각 동일한 특성과 크기를 갖는 요소들로 선택하였다. 또한 솔레노이드에 사용된 코일은 AWG 24 계열이며 본 연구에서 솔레노이드 코일의 열 포화(thermal saturation) 문제는 고려하지 않았다. 실제 시스템의 주요 변수는 Table 1과 같다. Table

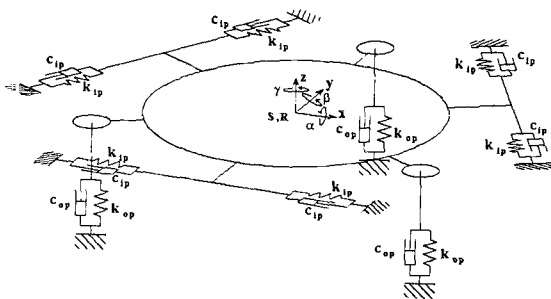


Fig. 4 Equivalent model of the proposed maglev system

Table 1 Principal dimensions of System

Parameter	Description	Value
$D_1 / d_2(m)$	Inner dia. of solenoids	0.016/0.016
$D_1 / D_2(m)$	Outer diameters	0.0362/0.0367
$L_1 / l_2(m)$	Length	0.0246/0.0238
$Z_1 / z_2(m)$	Nominal position	0.0151/0.0164
$I_1 / I_2(A)$	Nominal current	0.4273/0.535
$N_1 / N_2$	Coil turns no.	996/986
$r_1(m)$	Referred to Fig. 3	0.05
$r_2(m)$	Fig. 3	0.0715
$L(m)$	Fig. 3	0.05

Table 2 Calibrated parameter values

Parameter	In-plane	Out-of-plane
$K_{ip} / k_{op} (N/m)$	21.403	40.405
$c_{ip} / c_{op} (N \cdot s/m)$	0.199	0.159
$k_{ipi} / k_{opi} (N/A)$	1.179	1.054

에서 하 첨자 1 은 in-plane 운동을 위한 요소들을, 2 는 out-of-plane 운동을 위한 요소들을 의미한다. 제시된 자기 요소들간의 자기력과 동특성을 지배하는 식(6)의 각 계수 값을 결정하기 위해 보정 실험을 수행하였다. 솔레노이드와 영구 자석간의 상대 위치는 마이크로 스테이지로 조절되며 드라이버에 의해 적정한 전류가 솔레노이드에 인가된다. 이때 측정되는 자기력의 값을 이용하여 산정된 (6)의 각 계수 값이 Table 2 에 제시되어있다.

### 4.1 System identification

기 제작된 스테이지의 시스템 동정과 주요 성능을 확인하기 자유 진동 실험을 수행하였다. 전체 제어 로직은 Fig. 5 에 주어져 있는데 여기에서 특이한 점은 제어되지 않는 자유도, 즉 수동 안정성을 갖는 자유도가 존재하기 때문에 6 자유도 전체에 대한 제어가 수행된 것은 아니라는 것이다. 이것은 본 논문에서 제안된 시스템이 공간상에서 전체 자유도에 대한 안정성 확보를 위한 필요조건을 갖추고 있으므로 다 자유도 안정성이 보장된다<sup>(9)</sup>. 그러나 공간상에서 초진도체와 같은 시스템을 제외하고는 위치 신호의 되먹임없이 모든 자유도에 대한 안정성 확보가 불가능하므로 제어 로직에서처럼 제어되는 자유도와 단지 공칭 전류가 인가되는 제어되지 않는 자유도로 분리되어 실험이 수행되었다. 스테이지의 x 를 공칭 점에 있도록 제어하면서 동시에 스테이지에 임펄스를 가한 후의 시스템 응답을 앞서 언급한 PSD 로 측정된 결과를

Fig. 6 에 나타내었다. 자유 진동 해석 결과를 이용하여 시스템의 강성, 댐핑 결과를 logarithmic decrement method 등을 통해 계산해보면 실제 이론적으로 유도된 운동 방정식과는 약간의 차이를 보이는데 가장 큰 이유는 시스템에 사용된 in-plane 운동과 out-of-plane 운동을 위한 솔레노이드와 영구 자석들이 서로 각각 동일하다고 가정한다기 때문이다. 즉 Fig. 7 은 1A 의 전류가 인가된 각 솔레노이드와 쌍을 이루는 영구 자석에 가해지는 힘의 상대 위치를 변화 시켜가면서 측정한 그래프인데

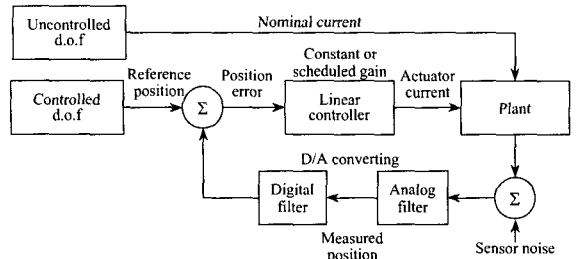


Fig. 5 Overall control block diagram

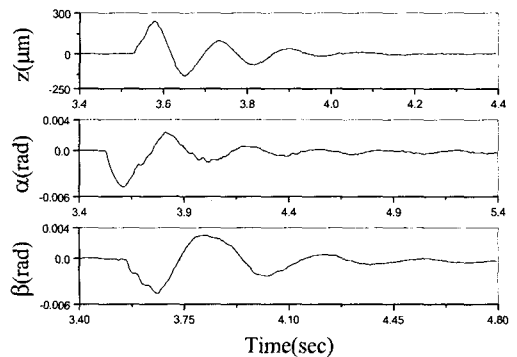


Fig. 6 Free vibration analysis for the uncontrolled d.o.f

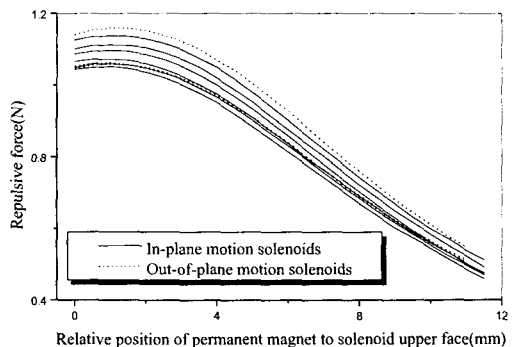


Fig. 7 Force calibration of each electromagnet

최대 약 0.1N의 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 중첩을 통해 구한 자기력의 이론 해와 힘 보정 실험 결과 자체는 정성적으로, 정량적으로 모두 비슷한 경향을 보이지만 이러한 약간의 오차들이 누적되어 운동 방정식과 자유 진동 해석 결과는 약간의 차이를 보였다.

#### 4.2 Step input control

앞서 유도된 운동 방정식을 기초로 다음과 같은 전형적인 비례 미분 제어 기법을 통해 계단 입력에 대한 제어를 수행하였다.

$$u(i) = k_p(r - r_d) + k_d \dot{r} \quad (7)$$

위식에서  $i$ 는 솔레노이드에 인가되는 전류인데 실제 스테이지는 솔레노이드 위에서 부상하므로 스테이지가 외부와 상호 작용을 할 때는 위식에서 공칭 점과 계인을 조절함에 따라 다른 강성을 갖는 등가 시스템으로 변환 시킬 수가 있다. 따라서 이러한 스테이지는 힘과 위치의 동시 제어, 즉 하이브리드 제어시 기존 로봇 메커니즘에서처럼 시스템의 정적 안정성에 손상을 입힐 염려가 없이 수행할 수 있다는 큰 이점이 있다. Fig. 5의 제어 로직에 따라  $z(4 \mu\text{m})$ ,  $x(200 \text{nm})$ 에 계단 입력 제어를 수행한 결과를 Fig. 8에 도시하였다. 제어 계인은 상수로 주어지지만 초기 위치에서 공칭 점까지 이동할 때에는  $z$  축 방향으로 약  $1000 \mu\text{m}$  정도 움직이므로 일정한 계인으로는 시스템이 불안정해진다. 따라서 구간을 일정한 간격으로 분할하여 각 지점에서 선형화 한 운동 방정식과 그때 가장 적합한 계인을 이용하는 gain-schedule 기법을 이용하였다. 실험 장치에 사용된 아날로그-디지털 변환기는 16bit 인 Advantech사의 PCL-816이며 PSD의 측정 범위가  $4.7\text{mm}$  이므로 노이즈나 변환기의 quantization 오차를 고려하지 않더라도 산술적으로 약  $70\text{nm}$ 의 분해능을 갖는다. 따라서  $200\text{nm}$ 의 계

단 입력에 대한 결과는 구성된 제어 시스템 성능으로 판단해 보면 만족스러운 것으로 판단된다. 이처럼 부상 시스템은 이론적으로 구현 가능한 정밀도에 한계가 없으므로 더욱 우수한 센서를 채택하던가 아니면 작동 범위를 더욱 축소 시켜서 정밀도를 배가 시킬 수 있다.

#### 5. 결론

전자기력 제어를 이용하는 자기 부상 방식의 6 자유도 정밀 스테이지가 제안되었다. 반발 구조 형태의 자기 요소들을 근간으로, 동일한 스펙에서 시스템의 강성을 최대화 할 수 있도록 설계되었으며 공간상의 강체가 안정성을 확보하기 위한 필요 조건을 갖추고 있어서 다 자유도의 수동적 안정성을 갖는다. 또한 공간상에서 스테이지의 위치는 120도 간격으로 놓여있는 포토 다이오드에 조사되는 LED 빔의 위치를 간단한 기하학적 계산에 의해 변환된 후 제어기에 되먹임된다. 적은 간극을 갖는 기기에 적용되어온 선형화 해석 기법들을 이용하여 등가의 진동 시스템으로 모델링하여 운동 방정식을 유도했으며 간단한 자유 진동 실험에 의해 이론적 검증을 수행하였다. 또한 이론적으로 제한되지 않은 분해능의 성능 실험을 위해 약  $200 \text{nm}$  정도의 계단 입력에 대한 실험이 간단한 선형 제어 기법을 통하여 수행되었다. 이처럼 고정부와 기계적인 마찰이 없는 스테이지는 기존의 하이브리드 제어 기법을 더욱 용이하게 적용할 수 있다.

#### 후 기

본 연구는 97년도 한국과학재단 지정 연세대학교 정보저장기기센터(CISD) 지원과제(과제명 : 초정밀 위치 기기 및 제어 기술 개발, 과제번호 : 1997G0102) 연구비 지원에 의한 연구 결과이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

#### 참고문헌

1. Ishihara, H., Arai, F., Fukuda, T., "Micro Mechatronics and Micro Actuators," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 1, pp. 68 - 79, 1996.
2. Smith, A.R., Gwo, S., Shih, C.K., "A new high-

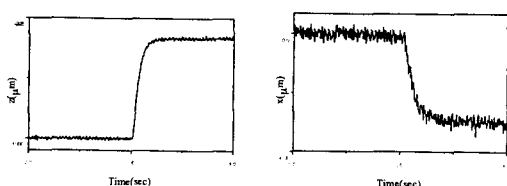


Fig. 8 Step input result

- resolution two-dimensional micropositioning device for scanning probe microscopy applications," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 65, pp. 3216 - 3219, 1994.
3. Echeverria, I., Rubio, M., "High-precision magnetic levitation device with electro-optical feedback," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 66, pp. 3931 - 3938, 1995.
  4. Holmes, M., Trumper, D., Hocken, R., "Atomic-Scale Precision Motion Control Stage(The Angstrom Stage)," *Annals of the CIRP*, Vol. 44, pp. 455 - 460, 1995.
  5. Steve Chen, S.J., Busch-Vishniac, I.J., "A magnetically levitated, automated, contact analytical probe tool," *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, Vol. 8, pp. 72 - 78, 1995.
  6. Albertz, D., Dappen, S., Henneberger, G., "Calculation of the Induced Currents and Forces for a Hybrid Magnetic Levitation System," *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 33, pp. 1263 - 1266, 1997.
  7. Jung, K.S., Baek, Y.S., "Fine motion device using magnetic levitation," 1<sup>st</sup> Korea-Japan Symposium of Frontiers in Vibration Science and Technology, pp. 121 - 129, 1998.
  8. Purcell, E.M., *Electricity and Magnetism*, McGRAW-Hill, pp. 411 - 421, 1994.
  9. Jayawant, *Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques*, London : Edward Arnold, 1981.