

〈논 문〉

제어기 무장착 운송대를 위한 선형운동 자기부상 운송시스템

손 영 옥* · 박 기 환*

(1997년 1월 15일 접수)

Magnetically Levitated Transport System for a Controller-Free Carrier

Y. W. Son and K. H. Park

Key Words: Magnetic Levitation(자기부상) Controller-Free Carrier(제어기 무장착 운송대) Multitrack(다단식 트랙)

Abstract

In this work, a magnetic levitation (maglev) system is developed to transport a wafer between semiconductor fabrication process modules in clean rooms to take advantages of eliminating particle and oil contamination that normally exist in conventional transport systems due to contact motion of mechanical components. A main feature of the maglev system developed in this work is that a controller and power supplying part are not mounted on the moving carrier but on the stationary track, which is defined a controller-free carrier, to reduce carrier's weight. Iron-core electromagnets and irons are used for levitation, and air-core electromagnets and permanent magnets are used for stabilization. Analysis, design, and modeling of the magnetically levitated transport system are presented. The performance of the maglev system is experimentally demonstrated.

1. 서 론

벨트 컨베이어나 관절로봇과 같은 현재의 웨이퍼 운송기는 운송에 따른 각 접촉부위에서의 기계적 접촉을 가지고 있다. 이와 같은 기존의 웨이퍼 운송에는 윤활유 등이 접촉부위에서의 마찰을 감소시키고 유연한 동작을 위하여 사용되어진다. 그러나 기계적 접촉이나 윤활부분에서의 마찰운동은 항상 미세한 먼지입자들을 발생시킨다. 대부분의 입자는 윤활유에 흡수되지만, 일부는 웨이퍼 운송기를 떠나 운송되어지는 웨이퍼의 표면에 확산되어 제조될 고밀도 IC에 직접적인 손상을 주게 된다. 실제로 웨이퍼 운송기는 마이크로전자산업의 제조공정에 있어서 먼지입자 발생의 가장 큰 원인으로 손꼽힌

다.⁽¹⁾

이와 같이 기존의 웨이퍼 운송기는 꾸준한 증가 추세를 보이고 있는 고밀도 IC제조에는 부적합하다. 따라서, 미세한 먼지입자 발생의 원인이 되는 기계적 마찰이나 윤활부분을 제거하기 위해 자기부상을 이용하여 운송시스템에 적용하기 위한 많은 연구가 수행되어지고 있다. 특히 자기부상은 소형 시스템인 경우 청정환경을 필요로 하는 반도체 제조공정에서의 웨이퍼 운송시스템뿐만 아니라 생화학설비, 초정밀구동기,⁽²⁾ 자기베어링,⁽³⁾ 자기헤드⁽⁴⁾ 등에도 응용되어지고 있으며, 대형 시스템인 경우에는 자기부상열차⁽⁵⁾등을 들 수 있다.

부상력을 발생시키는 방법으로는 전자석과 철심,⁽⁶⁾ 전자석과 영구자석⁽⁷⁾사이에 발생하는 힘 등이 있다. 전자석과 철심 사이에 발생하는 힘을 이용한 시스템은 자기부상열차 등에 응용된 사례가 많이

*회원, 광주과학기술원 기전공학과

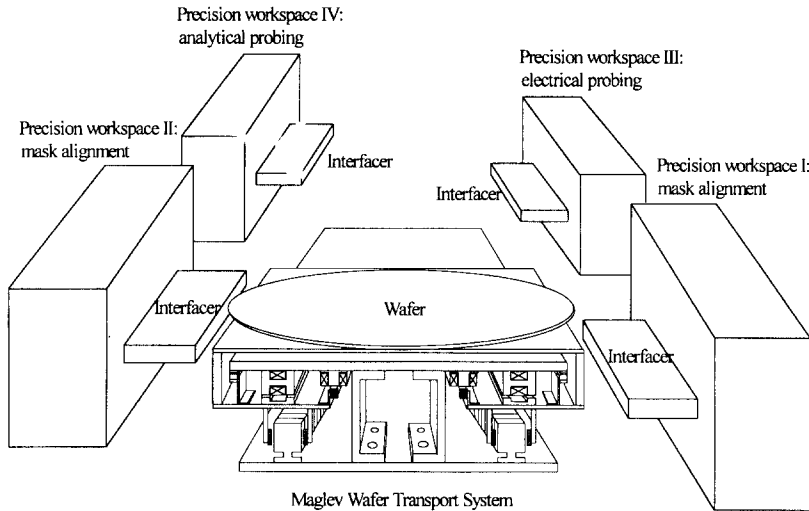


Fig. 1 System layout for semiconductor fabrication process

있다.^(5,6) 이러한 방식은 고정된 트랙과 운송대에 부착되어 있는 전자석사이에서 발생하는 흡인력을 이용하여 부상하게 한다. 흡인력을 이용할 경우 수직 방향으로서는 불안정하기 때문에 운송대의 각 모서리에 부착된 전자석에 제동제어를 하여 시스템의 안정성을 유지할 수 있게 하고 있으나, 전자석에 감은 코일의 무게와 이 코일을 제어하기 위해 운송대에 탑재된 전원 공급원의 무게에 의하여 많은 전력 소모를 필요로 하는 단점이 있다.

본 연구에서도 부상력은 전자석과 철심의 흡인력을 이용하였다. 그러나 본 시스템이 다른 시스템과 특이한 점은 제어기 무장착 운송대(controller free carrier)를 사용하였다는 점이다. 즉 운송대에 센서와 부상철심, 그리고 안정화를 위한 영구자석과 추진을 위한 영구자석만을 설치하였으며, 제어는 모두 고정된 트랙에서만 이루어지도록 하여 운송대에 제어기가 장착되지 않는다. 이 방식을 이용하면 부상철심에 감아줄 코일의 무게와 제어를 해줄 공급원이 필요없기 때문에 운송대의 무게가 매우 가벼워져서 적은 전류만으로도 부상을 할 수 있다. 이 방식은 긴 트랙을 필요로 하지 않고, 작업환경이 고정되어 있으며, 규모가 작은 시스템인 경우에 적합하다. 트랙제작의 용이성을 위해 트랙을 여러 개로 나누어서 제작한 뒤 그것을 연이어서 한 개의 트랙으로 설치한다. 다단식 트랙을 위해 부상트랙 외부에서 운송대의 부상 및 안정화를 꾀하도록 한다. 트랙을 다단식으로 설계할 경우 트랙의 길이를 유연하게 조절할 수 있으며, 또한 완만한 곡선을

이루는 트랙을 만들 수 있는 이점이 있다.

본 연구에서의 자기부상 운송시스템은 반도체 제조, 검사공정의 자동화에 응용될 수 있다. Fig. 1은 반도체 제조, 검사공정의 자동화를 위한 개략적인 구성배치도를 보여준다. 자동화를 위해 제조과정 이송을 위한 웨이퍼 전송장치, 정밀작업공간(precision workspace)에서 이루어지는 마스크 정렬(mask alignment), 기계적 검사(analytical probing) 및 전기적 검사(electrical probing)를 위한 정밀작동기, 전송장치와 정밀작동기를 연결하는 접속용 위치 작동기(interfacer) 등이 필요하다. 본 연구의 목적은 반도체 제조공정 자동화를 위한 3가지 기능중 microelectronics가 집적된 웨이퍼를 원하는 위치에 도달시키게 하는 자기부상 운송시스템을 개발하는 것이다. 이를 위하여 다음과 같은 기능을 만족시켜야 한다. 첫째, 접속용 위치작동기의 작동영역을 $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 로 감안하면 운송장치는 작동영역 내에서 비적재할 수 있는 위치정밀도를 가지면 된다. 둘째, 운송속도는 고속 운송시 웨이퍼가 미끄러질 우려가 있고, 운송대의 특성과 그리 길지 않은 공정간 거리를 감안할 때 적당한 속도를 유지할 수 있으면 된다. 마지막으로, 운송대가 일정한 속도를 가지고 추진할 때 비접촉을 계속 유지할 수 있게 시스템을 설계하여야 한다.

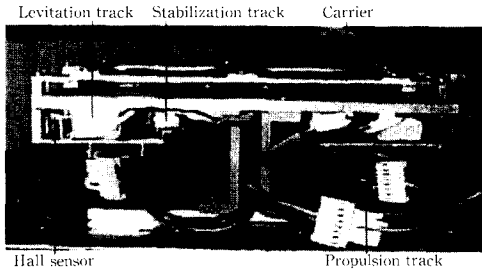
Fig. 2는 본 연구로 제작된 운송시스템의 전반적인 구조를 보여준다. 시스템은 운송대, 부상트랙, 안정화트랙, 추진트랙, 그리고 각 트랙을 지지해주는 지지구조물로 구성된다. 부상을 위해 트랙을 구

성하는 전자석과 철심사이의 흡인력을 이용하였으며, ψ 방향의 안정화를 위하여는 흡인력과 반발력들을 모두 필요로 하므로 방향성을 갖는 영구자석을 사용한다. 부상 및 안정화시스템을 설계할 때에는 운송대의 하중변화에 대한 운송장치의 견고함을 고려하여야 한다. Earnshaw의 이론에 의하면 부상시스템은 제환제어없이 6자유도에서 안정할 수는 없다.⁽⁶⁾ 본 시스템도 개루프제어에서는 시스템이 외란에 매우 민감하며, 또한 자체적으로도 불안정하다. 따라서 시스템의 안정화를 위하여 부상하기 위한 부상트랙 외에도 안정화트랙을 추가설치하여, 각 트랙에서의 제환제어를 통하여, 운송대의 안정화를 이룬다.

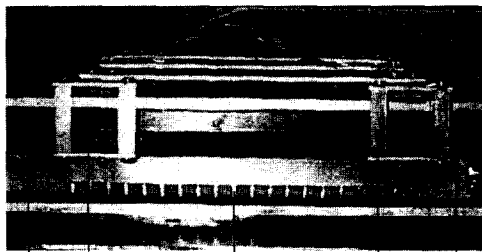
2. 힘해석

2.1 전자석과 철심 사이에 발생하는 힘

Fig. 3(a)에서 코일이 감긴 자심의 자속 이동경로 총길이를 l_1 , 부상체의 자속 이동경로 총길이를 l_2 , 그 단면적을 A , 그리고 공극(airgap)의 길이를 Z 라고 정의한다. N 번의 코일을 감은 투자율, μ 인 강자성 재료(ferromagnetic material)에 전류 I 가 흐른다.



(a)



(b)

Fig. 2 The configuration of the maglev transport system

누설자속과 공극에서의 프링지효과(fringing effect)는 전체자속에 비해 아주 작으므로 무시한다면,⁽⁹⁾ 철심에서 발생하는 자속밀도는 일정하므로 Ampere's circuital law^(10,11)을 적용하여 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

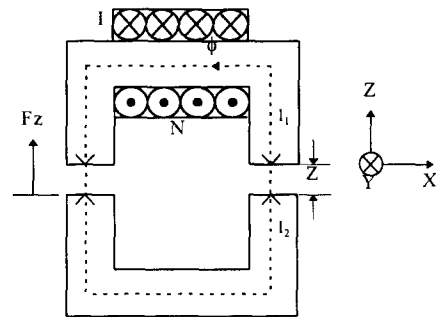
$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = NI \tag{1}$$

여기서, \vec{H} 는 자계의 세기벡터이며, $d\vec{l}$ 은 자속이 흐르는 경로벡터이다. 자속이 이동하는 경로의 면적을 일정하다고 할 때, 자속밀도는 항상 일정하므로 철심에서의 자속밀도를 B_f , 공극에서의 자속밀도를 B_g 라 하면, $B_f = B_g = B$ 가 된다. 철심과 공극에서의 자계의 세기는 각각

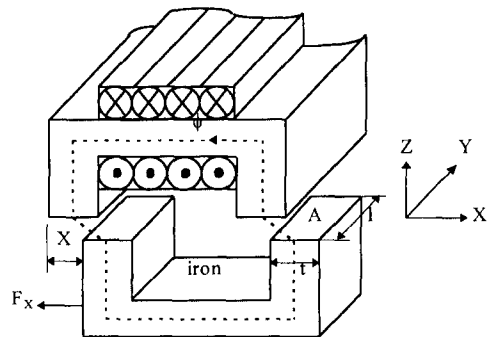
$$H_f = \frac{B}{\mu}, \quad H_g = \frac{B}{\mu_0} \tag{2}$$

이므로, 식 (1)에 적용하면

$$B = \frac{\mu_0 \mu NI}{\mu_0(l_1 + l_2) + 2\mu Z} \approx \frac{\mu_0 NI}{2Z} \quad (\mu \gg \mu_0) \tag{3}$$



(a)



(b)

Fig. 3 Electromagnet and iron

이 된다. 여기서, μ_0 는 공기중에서의 투자율이다. 식 (3)을 이용하여 시스템의 총 자속쇄교(total flux linkage)를 구하면,

$$\lambda = NAB = \frac{\mu_0 N^2 A}{2Z} I = LI \quad (4)$$

이므로, 자계에너지는 다음과 같이 된다.

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_0 N^2 A}{2Z} \right) I^2 = \frac{\mu_0 N^2 A I^2}{4Z} \quad (5)$$

철심에 작용하는 힘을 구하기 위해 자계에너지를 이용한 가상변위의 원리(principle of virtual displacement)^(10,11)를 적용하면,

$$F_z = -\frac{\partial W_m}{\partial Z} = -\frac{\mu_0 N^2 A}{4} \frac{I^2}{Z^2} \quad (6)$$

을 얻을 수 있다. 또한 Fig. 3(b)에서 측면으로 작용하는 힘은 Brzezina and Langerholc⁽¹²⁾에 의해 다음과 같이 유도되어졌다.

$$F_x = -\frac{\mu_0 N^2 A}{2\pi t} \frac{I^2}{Z} \tan^{-1} \frac{X}{Z} \quad (7)$$

여기서, t 는 철심의 두께이다.

2.2 전자석과 영구자석 사이에 작용하는 힘

Y방향으로 놓인 한 가닥 도선에 전류가 흐를 때 그 주위에 발생하는 자속의 세기를 구하기 위해 Ampere's circuital law^(10,11)을 적용하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (8)$$

여기서, \vec{H} 는 도체주위에 생기는 자계의 세기벡터이고, $d\vec{l}$ 는 자계의 미소경로벡터를 나타내며, I 는 도체에 흐르는 전류이다. 식 (8)에 의해

$$\vec{H} = \frac{I}{2\pi} \left[-\hat{X} \frac{Z}{X^2+Z^2} + \hat{Z} \frac{X}{X^2+Z^2} \right] \quad (9)$$

이 된다. 여기서 \hat{X} , \hat{Z} 는 각각 X, Z방향의 단위 벡터이다. 전체 코일에 의해 자석에 미치는 힘은, 각각 다른 좌표 값을 갖고 있는 한 가닥 도선에 의해 자석에 미치는 힘의 총합으로 구할 수 있다는 개념으로 힘을 구하였으므로 권선 수를 고려하지 않는다.

힘해석(force analysis)을 위하여 영구자석을 쌍극자모멘트(dipole moment)의 집합이라고 가정한다. 자기장내에 단위 쌍극자모멘트, \vec{m} 이 있을 때

작용하는 힘은 로렌츠법칙(Lorentz's law)⁽⁹⁾에 의해 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\vec{F} = (\vec{m} \cdot \nabla) \vec{B} \quad (10)$$

자유공간에서 $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$ 의 관계가 있으며, 쌍극자모멘트는 Z방향 성분인 m_z 만 있다고 할 때, 식 (8)~(10)을 이용하여 쌍극자모멘트에 작용하는 힘은 다음과 같은 각 방향으로의 스칼라 식으로 나타낼 수 있다.

$$F_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{(-X^2 + Z^2) m_z}{(X^2 + Z^2)^2} \right] \quad (11)$$

$$F_y = 0 \quad (12)$$

$$F_z = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} \left[\frac{2XZ m_z}{(X^2 + Z^2)^2} \right] \quad (13)$$

여기서 m_z 는 높이, 폭, 길이를 각각 1 mm×5 mm×1 mm의 기본단위로 설정하고, 이 크기를 적용하여 전체 자석의 크기를 구성한다고 가정하였다. 단위 쌍극자모멘트의 값은 0.0103 A/m²이다.

3. 운송시스템의 동작원리

운송시스템의 좌표는 트랙의 측면방향을 X축, 진행방향을 Y축, 그리고 수직방향을 Z축으로 한다. 또한 각각의 Euler's angle⁽¹³⁾을 ψ , ϕ , θ 로 정의한다. 자속은 자기저항이 작은 쪽으로 흐르는 성질이 있기 때문에 운송대가 중심에서 벗어났을 때 자기저항이 커지므로 자기저항이 작아지려는 방향인 철심의 중심으로 돌아오려는 경향이 있다. 이러한 회복력은 X방향으로 안정화한다. θ 방향으로도 같은 원리로 안정화를 꾀한다.

만약 양쪽의 부상트랙에서의 수직 축으로의 부상력이 안정화가 이루어졌다고 하면, Z와 ϕ 방향이 안정화할 수 있다. 그러나 ϕ 방향으로의 안정화는 부상트랙의 자체 케환만으로는 불가능하기 때문에 Fig.4에서 보는 바와 같이 안정화트랙을 부상트랙 옆에 설치하여 해결한다. ϕ 방향으로 외란이 발생했을 경우에는 그림에서 표시된 화살표 방향으로 영구자석에 복원력을 갖도록 전류를 흘리게 한다. 안정화트랙에서의 영구자석은 서로 반대방향의 극성을 갖도록 부착하였기 때문에 전류의 방향에 따라서 외란력을 극복할 수 있는 복원력이 발생한다.

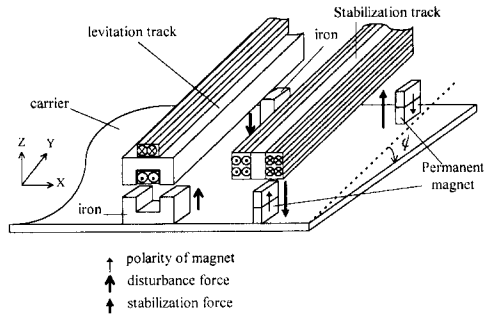
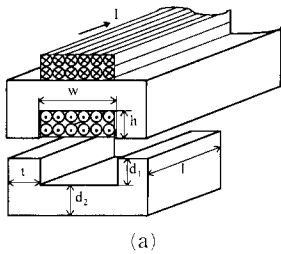
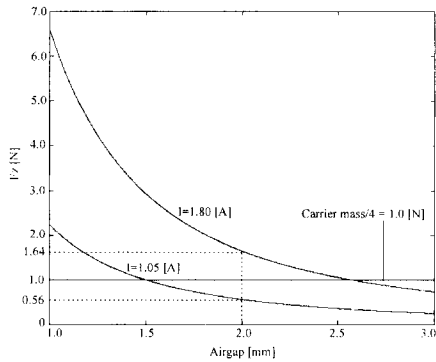


Fig. 4 Stabilization in the ϕ -direction



(a)



(b)

Fig. 5 (a) Specification of the levitation track and iron, and (b) Comparison of 1.05 [A] and 1.80 [A] on the F_z [N]

4. 시스템 설계

4.1 부상트랙 및 철심의 설계

Fig. 5(a)는 부상트랙과 철심의 크기를 나타내고 있다. 일반적으로 코일의 감은 수를 많이 할수록 부상력이 커지지만 시스템의 능률적인 제작을 고려하여, 코일의 감은 수를 180회로 결정하였다. 코일 단면의 너비를 w , 높이를 h 라 할 때 트랙을 다단식으로 설치할 경우 각각의 접촉부위의 사이간격의 원인이 되는 h 를 작게 할수록 좋으나 상대적으로

Table 1 Levitation tracks and irons

Description	Value
Number of coil	180 turns
Track length per one stage	300 mm
Coil cross sectional dimensions	4.5 mm × 10 mm
Levitation current at nominal point	1.05 A
Levitation height, Z_0	-1.5 mm
Maximum levitation force for one iron	2.25 N
Maximum destabilization force for one iron	+1.25 N, -0.44 N
Radial spring force, K_x	127.01 N/m
Destabilization spring constant, K_z	1330.02 N/m
Radial force constant, K_{x1}	0
Stabilization force constant, K_{z1}	1.81 N/A
Iron size, $t \times d_1 \times d_2 \times l$	5 mm × 2 mm × 2 mm × 40 mm

w 가 늘어남에 따라 부상철심의 크기가 커지므로 이러한 점을 고려하여 $w=10$ mm, $h=4.5$ mm로 결정하였다. 전자석과 철심의 설계시 행한 계산은 식 (6)을 바탕으로 하였다. 식 (6)에 의하면 철심에 작용하는 부상력은 전류 I 와, 철심의 접촉 단면적 A , 그리고 전자석과 철심사이의 공극의 길이에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 철심에서의 d_1 과 d_2 는 운송대의 무게를 고려하여 작을수록 좋지만 자속 이동성로가 필요하므로 여기서는 각각 2 mm로 하였다. 부상력은 철심의 접촉면적 $A(t \times l)$ 가 넓을수록 커지지만 운송대와 철심의 크기를 고려해야하므로 $t=5$ mm로 하였고, 또한 추진시 트랙의 접촉부위에서의 힘이 감소하는 영향을 적게 하기 위하여 접촉부위보다 비교적 길이가 길도록 $l=40$ mm로 하였다. 코일에 흐르는 전류가 1.05 A일때 $Z=1.5$ mm에서 부상력과 운송대의 무게가 평형을 이루므로 초기전류는 1.05 A로 하였다. Fig. 5(b)는 부상트랙에 흐르는 전류가 1.05 A, 1.8 A인 경우, 철심 1개에 대해 Z축의 변화에 따른 부상력을 비

Table 2 Stabilization tracks and permanent magnets

Description	Value
Number of coil	140 turns
Track length	20 cm, 40 cm
Coil cross sectional dimensions	7 mm × 5 mm
Maximum stabilization current	1.8 A
Levitation height from the center of track, Z_0	-7.5 mm
Maximum stabilization force for one magnet	-1.75 N, 1.39 N
Stabilization spring constant,	0.88 N/m
Magnetization of unit dipole moment, m_z	0.0103 A/m ²
Magnet size, $h_m \times w_m \times l_m$	5 mm × 5 mm × 50 mm

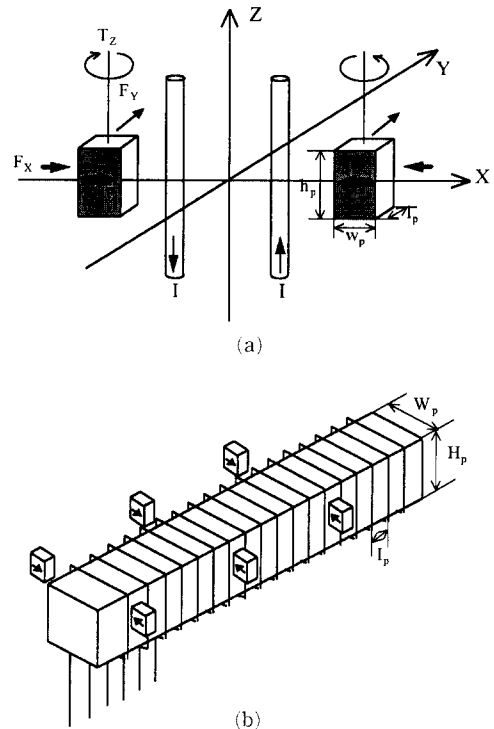
교 설명해 주고 있다. 공극이 외란에 의해 1.5 mm에서 2 mm로 변화했을 경우 전류 값을 1 A에서 1.8 A로 올려주면 1.64 N의 부상력이 발생하므로 운송대는 충분한 복원력을 가질 수 있다.

본 시스템의 주 외란력은 웨이퍼를 loading/unloading 할 때의 웨이퍼 무게의 증가에 따른 부상력의 변화이다. 웨이퍼의 무게는 운송대 전체의 무게에 비해 대략 10% 정도로 제어시스템의 설계시 웨이퍼를 loading 했을 경우로 하여 설계하였다. 또한 그 상태에서 웨이퍼를 loading/unloading할 때 생길 수 있는 변위보다 큰 ± 0.5 mm의 외란에 대해서도 안정화되도록 제어기를 설계하였으므로 충분한 외란을 고려하여 설계하였다 볼 수 있다. 부상트랙과 철심 설계사양은 Table 1과 같다.

4.2 안정화트랙과 영구자석의 설계

본 시스템에서 사용한 영구자석 재료는 부상력을 증가시키는 높은 잔류자속밀도(residual flux density)와, 비자화효과(demagnetization effect)를 감소시키는 강한 보자력(coercive force)을 가지고 있는 NdFeB를 사용하였다.

안정화트랙 및 영구자석의 설계는 식 (11)~(13)을 바탕으로 하였다. 앞절에서의 부상트랙과 철심의 설계와 같은 방식으로 설계하였으며, 이때 자석

**Fig. 6** Configuration of the propulsion track

과 트랙사이의 공극(g_m)은 1 mm, 트랙의 권선수는 140회, 그리고 평형점에서의 부상자석의 부상높이(Z_0)는 트랙의 중앙에서부터 7.5 mm로 하였다. 안정화트랙의 높이(h_s) 폭(w_s)은 각각 7 mm, 5 mm로 했으며, 영구자석의 높이(h_m)와 폭(w_m), 길이(l_m)는 각각 5 mm, 5 mm, 50 mm로 하였다. 최대 안정화 전류를 1.8A로 했을 때, Z축에 대한 시스템 외란이 0.5 mm의 오차로 흔들릴 경우의 최대 외란력은 +1.25 N, -0.44 N이고, 이때의 안정화 힘은 -1.75 N, +1.39 N으로 외란력보다 훨씬 크므로 운송대는 원위치로 복원될 수 있다. 부상시스템은 일반적인 접촉식 기계시스템의 경우와는 달리 운행중 빠른 주파수의 외란이 거의 없으므로 10 Hz 정도의 주파수대역(bandwidth)을 만족하면 될 것으로 예상된다. 안정화트랙과 영구자석 설계 사양은 Table 2와 같다.

4.3 추진트랙과 영구자석의 설계

운송시스템의 추진을 위해서 스텝모터(steping motor)의 원리를 이용한다. 스텝모터 방식은 운송대의 초기위치만 알고 있다면 시스템의 별도의

Table 3 Propulsion track and permanent magnet

Description	Value
Pattern of control current	6
Track size	20 mm × 20 mm × 550 mm
Permanent magnet size, $h_p \times w_p \times l_p$	14 mm × 2 mm × 2 mm
Supply current per each coil	2.5 A
The number of magnets	84
Maximum propulsion force	2.24 N

쾌환제어 없이도 원하는 위치에 정확히 보낼 수 있다는 장점이 있다. 추진시스템을 설계할 때 고려해야 할 사항은 수직방향으로 불안정한 시스템에 추진방향의 다른 힘들을 발생시키지 않도록 하여 운송대에 주는 외란을 최소화해야 한다. Fig. 6(a)에서와 같이 Z방향에 평행하게 전류가 흐르는 경로를 구성하고, 양측면에 서로 극성이 반대방향으로 향하도록 쌍극자모멘트를 구성하면 X방향 및 Y방향으로만 힘이 생기므로 이러한 조건을 만족시킨다. 쌍극자모멘트에 생기는 추진력과 회전력은 식 (11)~(13)을 바탕으로 하였다.

Fig. 6(a)에서 두 개의 쌍극자모멘트가 서로 대칭을 이루고 있을 경우에는 X방향의 힘과 회전력은 크기는 같고 방향이 반대이므로 서로 상쇄되고 추진 방향인 Y방향으로의 힘만 남게 된다. 그러나 서로 대칭이 아닐 경우에는 X방향에 대한 힘과 θ 방향으로의 회전력이 생기게 된다. 그러나 이러한 힘들은 식 (7)에 의해 계산되어지는 시스템의 복원력보다 미세하므로 충분히 극복되어질 수 있다.

추진시스템의 설계를 위해서 우선 추진트랙의 크기를 결정해야 한다. 전체시스템의 크기를 고려하여 추진트랙의 높이(H_p), 폭(W_p)을 각각 20 mm로 하고, 길이는 550 mm로 한다. 또한 코일 사이의 간격(l_p)을 최소화할수록 운송하고자 하는 위치의 정밀도가 높아지나 트랙의 제작과 영구자석의 크기를 고려하여 1.5 mm로 한다. 영구자석의 크기는 클수록 큰 힘을 받으나 운송대의 크기와 무게, 추진트랙의 높이를 고려하여 높이(h_p), 폭(w_p), 길이(l_p)를 각각 14 mm, 2 mm, 2 mm로 결정한다. 자석의 수(M_p)는 운송대의 크기를 최대한 활용하여 한쪽 추진트랙의 한면당 21개씩, 총 84개로

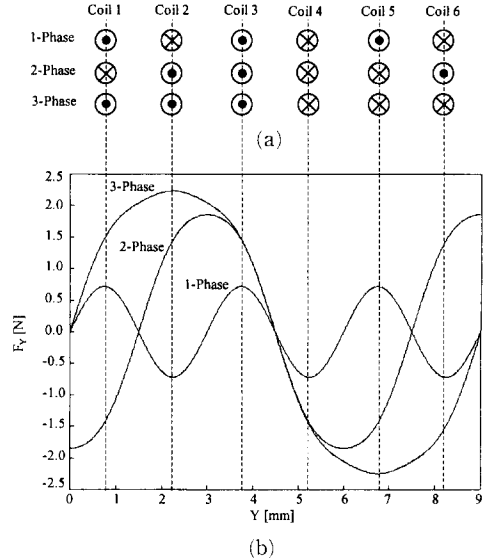


Fig. 7 (a) 1, 2, 3-Phase excitation using stepping motor type
(b) Propelling forces

한다. 추진시 제어할 전류패턴의 수는 추진방식의 가결성과 원활한 제어를 위하여 6개로 한다. 추진트랙 및 영구자석의 설계사양은 Table 3에 나타나 있다.

추진력을 얻는 방법은 스텝핑모터에서의 상-여자방식을 응용한 1상, 2상, 3상-여자방식을 사용한다. 이러한 방식을 이용하면 큰 추진력뿐만 아니라, 스텝핑모터의 특징인 추진시 운송대의 위치에 대한 쾌환제어없이도 초기위치만 알 수 있다면 목표지점에 정확히 운송할 수 있다. Fig. 7은 1상, 2상, 3상 여자방식을 이용할 때의 전류방향과 각각에 대한 추진력을 나타낸다. 공급된 전류는 2.5 A이며, 한 개의 트랙당 42개의 자석을 사용하고, 코일과 자석사이의 간격은 0.7 mm로 한다. Fig. 7(a)에서와 같이 서로 반대방향의 전류가 흐르는 코일 가운데에서는 추진력이 발생하지 않는다는 것을 예측할 수 있으며, Fig. 7(b)에서도 이를 확인할 수 있다. 이와 같은 원리를 이용하여 원하는 위치에 운송대를 정지시킬 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 3상-여자방식을 이용할 때 가장 큰 추진력을 발생하므로 운송시스템의 추진을 위해 이 방식을 이용한다.

여섯 개의 코일에 흐르는 전류의 방향을 제어하기 위해 DSP board를 이용하며, 운송대가 초기에 코일 3, 4 중간에 위치해 있다고 할때, DSP

Table 4 Specification of carrier

Description	Value
Dist. from the y axis to the levitating iron, a	4.05 cm
Dist. from the y axis to the stabilizing magnet, b	7.5 cm
Dist. from the y axis to the edges, c	11.5 cm
Dist. from the x axis to the stabilizing magnet, d	9.5 cm
Carrier mass, m_c	410 g
Principal moment of inertia about the x axis, I_x	12.33 kg · cm ²
Principal moment of inertia about the y axis, I_y	18.07 kg · cm ²
Principal moment of inertia about the z axis, I_z	30.40 kg · cm ²

board의 스위칭에 의해 전류의 방향을 Y방향으로 한단계 이동시키면 자석은 코일 2, 3 중간에서 발생하는 힘을 받게 되어 Y방향으로 추진하게 된다. 이를 연속적으로 스위칭을 계속하면 자석은 계속 추진력을 얻게되고, 스위칭 속도가 빠를수록 추진 속력은 증가하게 된다. 그러나 스위칭속도가 너무 빠르면 자석이 미처 따라오지 못하는 경우가 있으므로 속도에는 한계가 있다. 이와는 반대로 전류의 방향을 -Y방향으로 한단계 이동시키면 자석은 -Y방향으로 추진하게 된다.

5. 운송시스템의 모델링

운송시스템의 동력학을 이해하기 위해 2개의 부상트랙의 중앙에 고정좌표계 XYZ를 설정하고, 운송대의 중앙에 이동좌표계 xyz를 위치시킨다. Eulerian's angle로 표시된 운송대 회전에 대한 운동방정식은 Lagrange 방정식을 적용함으로써 유도할 수 있다. 초기에 xyz좌표계를 주축과 일치하도록 하면, 회전운동에너지는 다음과 같이 된다.

$$T_{rot} = \frac{1}{2} (I_x w_x^2 + I_y w_y^2 + I_z w_z^2) \quad (14)$$

여기서 w_x , w_y , w_z 는 각각 x, y, z축에 대한 각 속도이다. 위식을 Lagrange 방정식에 적용하기 위

하여, Eulerian's angle로써 w_x , w_y , w_z 를 나타내면 다음과 같다.

$$\omega_x = \dot{\phi} - \dot{\theta} \sin\phi \quad (15)$$

$$\omega_y = \dot{\phi} \cos\phi + \dot{\theta} \cos\phi \sin\phi \quad (16)$$

$$\omega_z = \dot{\theta} \cos\phi \cos\phi - \dot{\phi} \sin\phi \quad (17)$$

식 (15) ~ (17)에서의 관계식들을 식 (14)에 대입하여 Lagrange 방정식을 적용하면 Eulerian's angle로 된 복잡한 수식을 얻을 수 있다. 여기서 본 시스템에서 유효한 미소가 변위 가정 하에서는 $\sin\theta = 0$, $\cos\theta = 1$ 로, 그리고 2차와 고차항들을 무시하면, 운동방정식은 다음과 같은 간단한 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$I_z \ddot{\theta} = M_\theta \quad (18)$$

$$I_y \ddot{\phi} = M_\phi \quad (19)$$

$$I_x \dot{\phi} = M_\psi \quad (20)$$

여기서, M_θ , M_ϕ , M_ψ 는 Eulerian's angle의 항으로 된 외부 모멘트이고, I_z , I_y , I_x 는 주관성모멘트이다. M_θ , M_ϕ , M_ψ 는 외부에서 작용하는 힘과 토크를 계산하기 위하여 T_z , T_y , T_x 로 변환하는 것이 필요하다. 이 경우 미소 회전각 변위와, $\theta = \phi = \psi = 0$ 인 원점에 대하여 식 (18) ~ (20)을 미소항의 관계식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I_z \delta \ddot{\theta} = \delta T_z \quad (21)$$

$$I_y \delta \ddot{\phi} = \delta T_y \quad (22)$$

$$I_x \delta \dot{\phi} = \delta T_x \quad (23)$$

병진운동을 일으키는 F_x 와 F_y 는 각 철심 및 자석에 미치는 힘들을 직접 더함으로서 구하면 되고, 이를 미소항의 관계식으로 표시하면 다음과 같다.

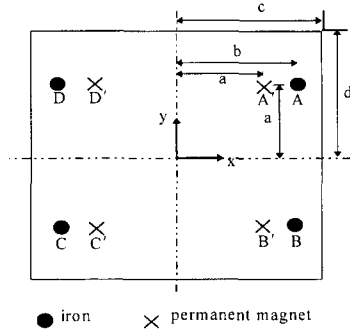
$$m_c \delta \ddot{x} = \delta F_x \quad (24)$$

$$m_c \delta \ddot{z} = \delta F_z \quad (25)$$

여기서, m_c 는 운송대의 질량이다.

F_x , F_z , T_x , T_y , T_z 에 대한 식을 전개하기 위하여, 운송대에 작용하는 모든 힘들을 Fig. 8에 나타낸다. T_x , T_y , T_z 는 xyz 좌표계에서 XYZ 좌표계로의 변환행렬을 사용하여 XYZ 좌표로서 대응하는 힘과 철심, 자석의 위치들로 나타낼 수 있다. 운송대의 설계 사양은 Table 4와 같다.

Fig. 8에서의 힘들은 일반 좌표로 나타낼 수 있으며, 다음과 같이 각각 변위와 전류의 함수인 스프링상수와 힘상수로서 모델링되어 진다.



● iron × permanent magnet

Fig. 8 The forces acting on the carrier

$$F_{AX} = -K_{AX}(-a\theta + X) + K_{AXi}I_A \quad (26)$$

$$F_{AZ} = K_{AZ}(-a\phi + a\psi + Z) + K_{AZi}I_A \quad (27)$$

$$F_{BX} = -K_{BX}(a\theta + X) + K_{BXi}I_B \quad (28)$$

$$F_{BZ} = K_{BZ}(-a\phi - a\psi + Z) + K_{BXi}I_B \quad (29)$$

$$F_{CX} = -K_{CX}(a\theta + X) + K_{CXi}I_C \quad (30)$$

$$F_{CZ} = K_{CZ}(a\phi - a\psi + Z) + K_{Czi}I_C \quad (31)$$

$$F_{DX} = -K_{DX}(-a\theta + X) + K_{Czi}I_D \quad (32)$$

$$F_{DZ} = K_{DZ}(a\phi + a\psi + Z) + K_{Dzi}I_D \quad (33)$$

$$F_{A'X} = K_{A'zi}I_{A'} \quad (34)$$

$$F_{B'X} = -K_{B'zi}I_{B'} \quad (35)$$

$$F_{C'X} = K_{C'zi}I_{C'} \quad (36)$$

$$F_{D'X} = -K_{D'zi}I_{D'} \quad (37)$$

여기서, a 는 Fig. 8에서 정의되었다. $I_A (=I_B)$, $I_C (=I_D)$ 는 각각 부상트랙 A와 B에 흐르는 전류이고, $I_{A'} (=I_{B'})$, $I_{C'} (=I_{D'})$ 는 각각 안정화트랙 A'와 B'에 흐르는 전류이다. K_{AX} , K_{AZ} 는 각각 X, Z방향으로 부상철심 A에 작용하는 스프링상수이고, K_{AXi} , K_{AZi} 는 각각 X, Z방향으로 부상철심 A에 작용하는 힘상수이다. 다른 점에서도 같은 정의가 적용된다. 스프링상수와 힘상수는 다음과 같은 값을 가진다.

$$K_{AX} = K_{BX} = K_{CX} = K_{DX} \\ = \frac{\partial F_{AX}}{\partial X} \Big|_{I=I_0, X=0, Z=Z_0} = K_X \quad (38)$$

$$K_{AZ} = K_{BZ} = K_{CZ} = K_{DZ} \\ = \frac{\partial F_{AZ}}{\partial Z} \Big|_{I=I_0, Z=Z_0} = K_Z \quad (39)$$

$$K_{AXi} = K_{BXi} = K_{CXi} = K_{DXi} \\ = \frac{\partial F_{AX}}{\partial I_A} \Big|_{I=I_0, X=0, Z=Z_0} = K_{Xi} \quad (40)$$

$$K_{AZi} = K_{BZi} = K_{CZi} = K_{DZi} \\ = \frac{\partial F_{AZ}}{\partial I_A} \Big|_{I=I_0, Z=Z_0} = K_{Zi} \quad (41)$$

$$K_{A'zi} = K_{B'zi} = K_{C'zi} = K_{D'zi} \\ = \frac{\partial F_{AZ}}{\partial I_{A'}} \Big|_{I=I_0', Z=Z_0'} = K_{Szi} \quad (42)$$

I_0 , Z_0 는 외란이 없이 일정한 간격을 유지한 채로 부상해 있는, 즉 평형상태에서의 값으로 각각 1.05 A, -1.5 mm이다. I_0' , Z_0' 는 각각 안정화트랙에 흘리는 전류 및 운송대가 평형상태에 있을 때 안정화트랙 중심으로부터 안정화 자석까지의 거리로 0 A, -7.5 mm이다.

모델링된 각 방향의 힘과 모멘트를 식 (21)~(25)에 대입하여 미소각 변위에 의한 2차항과 고차항을 무시하면 다음과 같이 표현된다.

$$m_c \delta \ddot{X} + 4K_X \delta X = 2K_{Xi}(\delta I_A + \delta I_C) \quad (43)$$

$$m_c \delta \ddot{Z} - 4K_Z \delta Z = 2K_{Zi}(\delta I_{A'} + \delta I_{C'}) \quad (44)$$

$$I_X \delta \ddot{\psi} - 4a^2 K_Z \delta \phi = 2aK_{Szi}(\delta I_{A'} + \delta I_{C'}) \quad (45)$$

$$I_Y \delta \ddot{\phi} - 4a^2 K_Z \delta \phi = 2aK_{Zi}(\delta I_C - \delta I_A) \quad (46)$$

$$I_Z \delta \ddot{\theta} + 4a^2 K_X \delta \theta = 0 \quad (47)$$

위의 운동방정식으로부터 각 방향의 미소운동은 독립되어 있으며, X와 θ 방향은 내부적으로 안정되어 있고, Z, ϕ , 그리고 ϕ 방향은 자체적으로 불안정함을 알 수 있다. 이를 안정화하기 위하여 Z, ϕ 방향은 부상트랙에서의 제환제어로서 안정화를 취하며, ϕ 방향은 안정화트랙에서의 제환제어로서 안정화하여야 할 것이다. 위 방정식에서의 계수들의 값이 Tables 1, 2, 4에 나타나 있다. 이 값들을 위 식에 대입하고, 표기의 편의상 δ 를 제거하면 선형화된 방정식을 얻을 수 있다.

6. 실험

6.1 운송시스템의 거리측정방법 및 제어

6.1.1 운송시스템의 거리측정방법

운송시스템의 거리측정을 위해 홀센서(hall sensor)를 사용한다. 홀센서는 홀효과(hall effect)라 하는 일종의 전류자기효과를 이용한 것으로서, 자속밀도의 크기에 비례해서 출력되는 전압으로부터 거리에 대한 정보를 알아낸다. 특히 홀센서는 저가

인 동시에, 크기가 작아 규모가 큰 시스템뿐만 아니라 소형 시스템에도 적합하며, 정자장의 검출, 자계의 강약, 그리고 자극의 판별능력 등 다른 종류에서는 볼 수 없는 뛰어난 성질을 가지고 있다. 그러나 온도에 민감하므로 필요에 따라서는 온도 특성을 고려하여 시스템 및 회로를 설계해야 한다.

홀센서는 일정한 자속밀도를 발생하는 영구자석 등을 이용하여 거리를 측정하는 것이 가장 좋은 방법이다. 그러나 본 시스템에서는 자속이 발생하는 부상트랙과 안정화트랙은 모두 입력전류가 변해서, 자속도 변하게 되므로 홀센서에 이용할 자속으로는 부적합하다. 또한 운송대에 홀센서를 부착해야 하므로 전 운송범위에 걸쳐 영구자석을 설치할 수는 없다. 그래서 본 실험에서는 홀센서를 영구자석에 부착하여 운송대에 설치하고, 시스템 지지대에 얇고 긴 철판을 운송되는 전구간에 걸쳐 부착한다. Fig. 9(a)는 그 구조를 간략하게 나타내고, Fig. 9(b)는 철판과 영구자석사이의 거리에 따라 자속 밀도의 변하는 정도를 보여주며, 그림에 표시되어 있는 데로 거의 선형적인 특성이 있는 범위 내에서 센싱을 한다.

운송대의 Z , ϕ , ψ 방향에 대한 거리 및 각도를 알기 위해 Fig. 8에서와 같이 운송대의 3개의 모서리, 즉 A, B, C점에 홀센서를 부착한다. Z 방향은 A, B점에 위치한 두 개의 홀센서 신호의 합과 기

준전압의 차이를 이용하고, ϕ 방향은 B, C점에 위치한 두 개의 홀센서 신호의 차이를 이용하며, ψ 방향은 A, B점에 위치한 두 개의 홀센서 신호의 차이를 이용한다.

6.1.2 운송시스템의 안정화를 위한 제어

식 (43)과 (47)에서 보이듯이 X 와 θ 방향에 대해서는 자체적으로 안정화되어 있어 시스템의 동특성

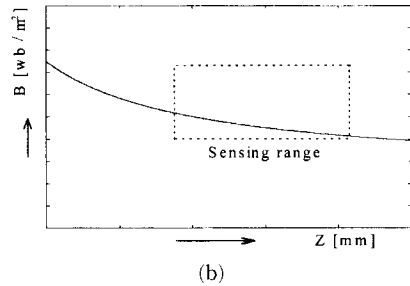
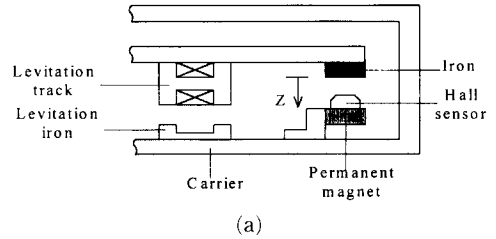


Fig. 9 (a) The configuration and, (b) principle of the sensing part

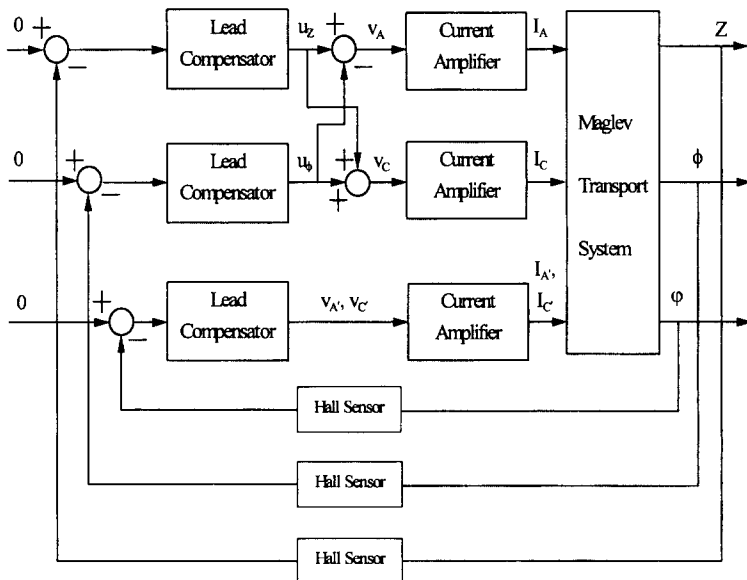


Fig. 10 Configuration of the control loop of the maglev system

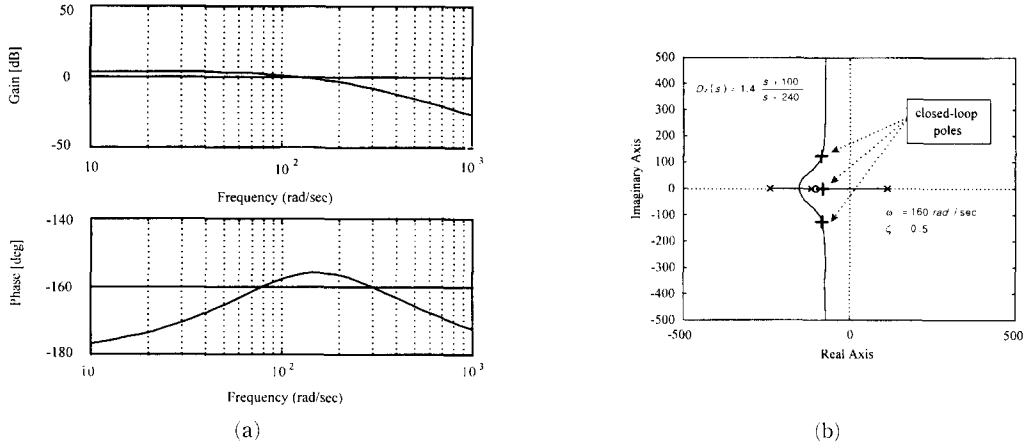


Fig. 11 Control Performance of the feedback system investigated by using a (a) bode plot and (b) root locus

을 파악할 수 있다. X방향에 대한 이론적인 고유진동수(natural frequency)는 5.6 Hz이나, 실제 측정된 X방향 고유진동수는 5.2 Hz이었다. 이러한 차이는 안정화 자석과 홀센서를 운송대에 부착 시 생기는 위치오차와 안정화트랙을 설계할 때와 같이 이상적으로 코일을 감지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 또한 식 (48)을 보면 X방향에 대한 운송대의 운동특성은 감쇠가 일어나지 않는 자유진동을 한다는 것을 예측할 수 있으나 측정결과 실제 시스템은 일정한 주기를 가지고 감쇠를 한다는 것을 알 수 있었다. 이는 운송대가 진동을 함으로서 생기는 속도, v 에 의해 $v \times B$ 의 속도 기전력이 생기므로 시스템의 운동방정식에 변위 X에 대한 1차 미분항이 포함됨으로서 이러한 감쇠현상이 발생하는 것을 알 수 있다. θ 방향에 대한 자유진동도 이와 비슷한 결과를 얻어 생략한다.

Fig. 10은 운송시스템의 블록신도를 나타낸다. u_z , u_ϕ 는 각각 Z방향, ϕ 방향의 센서신호를 증폭하여 제어기를 통한 제어출력신호이며, v_A 와 v_C , $v_{A'}$ 와 $v_{C'}$ 는 각각 부상트랙과 안정화트랙의 전류증폭기의 제어입력전압이고, I_A 와 I_C , $I_{A'}$ 와 $I_{C'}$ 는 각각 부상트랙과 안정화트랙의 코일에 흘릴 전류로 사용된다. 시스템의 운동방정식 (49)~(51)을 보면 Z방향과 ϕ 방향은 입력신호가 I_A , I_C 에 의해 상호 연관되어 있으며, ψ 방향은 독립되어 있다. 따라서 ψ 방향의 제어입력전압 $v_{A'}$, $v_{C'}$ 는 자체의 센서신호를 이용하여 제어를 할 수 있다. 그러나 Z방향과 ϕ 방향의 궤환제어는 운동방정식에서 보는 바와 같이 각각의 제어출력신호에 대한 간단한 연산이 필요하다.

즉 제어입력전압 v_A 는 제어출력신호 u_z , u_ϕ

의 합을 이용하고, 제어입력전압 v_C 는 제어출력신호 u_z , u_ϕ 의 차이를 이용한다. 제어입력전압 v_A 와 v_C 는 각각 전류증폭기에 의해 I_A 와 I_C 로 변환된 후 부상트랙 A와 B에 감긴 코일에 입력될 전류로 사용된다. 시스템의 안정화를 위해 사용된 제어기는 아날로그회로로 구성된 진-보상기(lead compensator)를 이용하였다. 식 (44)의 Z축 방향의 운동방정식을 사용하여 폐회로 제어계가 30°의 위상이득을 갖도록 설계하면 진-보상기 전달함수 $D_z(s)$ 는 다음과 같이 설계된다.

$$D_z(s) = 1.4 \frac{s + 100}{s + 240} \tag{48}$$

제어계 성능을 시간영역에서 보기 위해 root locus를 사용하여 제어계 감쇠율(damping ratio)과 고유진동수(natural frequency)를 살펴보면 Fig. 11에서 보인 바와 같이 각각 0.5와 160 rad/sec(25 Hz) 정도로 나타난다. 나머지 축에 대한 보상기 설계도 같은 방법으로 설계할 수 있으므로 생략한다.

운송대가 일정한 속도를 가지고 추진할 때 비접촉을 계속 유지할 수 있기 위해서는 운송대는 Z, ϕ 와 ψ 방향으로 평형상태에서 각각 $\pm 0.5 \text{ mm}$, $\pm 0.38^\circ$, 와 $\pm 0.38^\circ$ 내에서 움직여야 한다. Fig. 12는 운송대의 초기위치를 $Z=0.5 \text{ mm}$, $\phi=0.38^\circ$, $\psi=0.38^\circ$ 로 주었을 경우 제어기에 의해 평형점으로 돌아가는 시간응답을 보여준다. Z, ϕ , ψ 에 각각 100 ms, 200 ms, 200 ms이내에 정상상태로 돌아옴을 알 수 있다. Z축 방향에 대해 설계한 진보상기의 이론적인 정정시간(settling time)과 비교

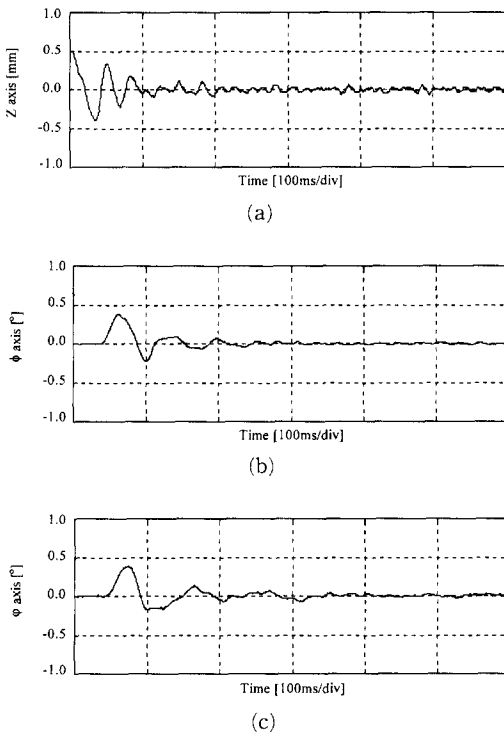


Fig. 12 Control performance in the (a) Z, (b) ϕ , and (c) ϕ -directions

하면 50% 정도 늦게 정상상태로 돌아옴을 알 수 있다. 운송대가 평형점으로 돌아온 후에도 시스템의 흔들림(fluctuation)이 있는 것은 각 방향으로 초기위치를 줄 때의 힘이 X방향 및 θ 방향에도 그 영향을 미쳐 외란으로 작용하고 있을 뿐만 아니라, 시스템 자체의 잡음때문인 것으로 생각된다. 제어기에 의한 시스템의 정상상태응답은 Z방향에 대해서는 $\pm 34 \mu\text{m}$, ϕ 방향에 대해서는 $\pm 0.013^\circ$, ϕ 방향에 대해서는 $\pm 0.017^\circ$ 오차를 가졌다.

그리고 실제 모델링한 시스템의 힘계산은 트랙의 접촉부에서의 힘의 변화는 무시하여 설계하였다. Fig. 13은 접촉부에서 생기는 외란을 검증해보고, 거기에 따른 시스템의 성능을 보여준다. 본 부상시스템은 type 0이므로 진-보상기(lead compensator)를 적용시 Fig. 13에서와 같이 정상상태 오차가 생길 수 있다. 그러나 lead 보상기는 안정성을 증가시키고 빠른 응답특성을 보여주며, 발생한 정상상태 오차는 wafer 운송에 영향을 미치지 않는 범위 내에 있으므로 충분히 요구되는 성능을 얻을 수 있다. 접촉부에서 생기는 Z방향과, ϕ 방향에 대한 최

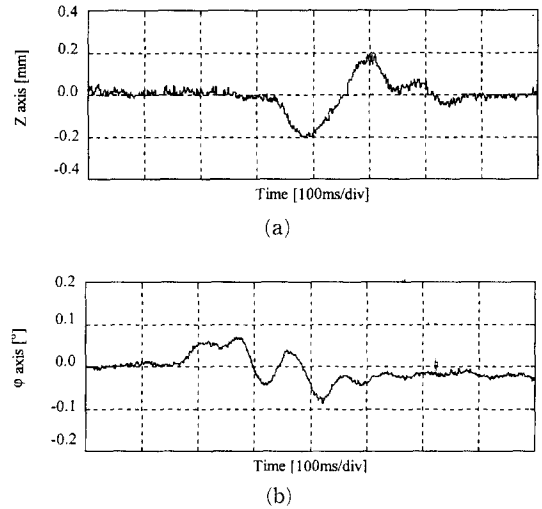


Fig. 13 Position signals in the (a) Z, (b) ϕ -directions in the vicinity of the track connection

대 외란은 Z방향에 대해서는 $\pm 0.21 \text{ mm}$, ϕ 방향에 대해서는 $\pm 0.087^\circ$ 가 발생하였으며, 이는 위에서 언급된 운송대 설계사양 내에 있으므로 제어기에 의해 운송대가 외부와 접촉하지 않고 충분히 극복되어짐을 알 수 있다.

6.2 추진시스템의 제어

앞에서 언급한 것과 같이 운송시스템의 추진력을 발생시키기 위하여 스테핑모터의 3상 여자방식을 이용하였다. 첫 단계에서 운송대에 부착된 각 자석은 추진력이 발생하지 않는 코일의 한가운데에 위치하게 된다. 이 상태에서 한번 스위칭을 하면 초기에 2.04 N의 힘을 받아 1.5 mm만큼 추진하게 된다. 이러한 방식을 계속 되풀이하여 운송대를 운송시킨다. 이런 이유로 운송시스템의 거리분해능은 1.5 mm가 됨을 알 수 있다. 그러나 운송대를 운송시키기 위한 스위칭속도에는 한계점이 있으며, 실험에 의해 운송대의 최고속도는 15.5 cm/s로 운송되어졌다.

7. 결 론

본 논문에서는 전자석과 철심사이에 작용하는 흡인력의 원리를 이용한 자기부상 시스템을 개발하였다. 연구의 특징은 운송대에 센서를 제외한 어떠한 제어기도 탑재하지 않고 고정된 트랙에서의 케환제어에 의해서만 안정화가 이루어졌고, 부상트랙 외

부에서 작용하는 부상력을 이용하여 트랙을 다단식으로 설치할 수 있게 한 점이다. 그리고 본 시스템의 협해석을 통해 최적설계를 한 후, 운동방정식을 유도하였고, 불안정한 요소인 Z , ϕ , ψ 방향은 부상트랙과, 안정화트랙에서의 케환제어에 의해 안정화를 꾀할 수 있는 제어기를 설계, 제작하였다.

앞에서의 이론을 바탕으로 하여 실험을 한 결과 시스템의 불안정한 요소인 Z , ϕ , ψ 방향은 0.25 s 이내에 제어기에 의해 정상상태에 도달함을 확인할 수 있었고, 트랙의 접촉부위에서 생기는 외란도 제어기에 의해 충분히 극복되어질 수 있음을 알 수 있었다. 또한 시스템의 모델링에 의해 얻어진 고유진동수는 5.6 Hz로 실제 시스템에서 얻어진 고유진동수, 5.2 Hz와 근사적으로 거의 일치함을 알 수 있었다. 부상된 운송대에 스테핑모터의 3상여차 방식을 이용하여 추진한 결과 15.5 cm/s로 운송되어졌다.

이러한 비접촉식 자기부상을 이용하여 반도체 제조공정에서의 웨이퍼 운송시스템 등 청정환경을 필요로 하는 공정에서의 운송장치로서 사용할 수 있다. 향후 연구과제로는 웨이퍼 운송시스템 등 운송시스템에 적용할 경우 웨이퍼의 적재/비적재 시스템의 개발뿐만 아니라, 각 작업영역으로의 이동(interfacing)시스템의 개발을 들 수 있다.

후 기

본 연구는 1996년도 교육부 반도체분야 학술연구 조성비(ISRC-96-E-1062)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Calton, M. O., 1991, *Reassessing Contamination Control Requirements as DRAM Capacities Reaxh 16-Mb*, Microcontamination.
- (2) Park Kyihwan, Choi, K. B. Kim, S. H. and Kwak, Y. K. 1995, "Magnetically Suspended Frictionless Manipulator." *KSME J.*, Vol. 9, No. 3, pp. 295~303.
- (3) Suresh Kumar, Dan Cho and William N. Carr, 1992, "Experimental Study of Electric Suspension for Microbearing," *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 23~30.
- (4) Park Kyihwan and Busch-Vishniac, I., 1994, "A New Tracking System for Magneto-optical Disk Drives. Part I: Design," *KSME J.*, Vol. 8, No. 8, pp. 295~302.
- (5) Tsukamoto, O., Yasuda, K. and J. Z. Chen, 1988, "A New Magnetic Levitation System with AC Magnets," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 24, No. 2, pp. 1497~1500.
- (6) Yamamura, S. and Abe, S., 1976, "Control and Speed Characteristics of Magnetically Levitated Vehicles of Attracting Magnet Type," *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 96, No. 3, pp. 41~49.
- (7) Park, Kyihwan Lee, S. K., Kim, J. H., Kim, S. H., and Kwak, Y. K., 1996, "Contactless Magnetically Levitated Silicon Wafer Transport System," *Mechatronics Int. J.*, Vol. 6, No. 5, pp. 591~610.
- (8) Earnshaw S., 1842, "On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether," *Trans. Comb. Phil. Soc.*, 7, pp. 97~112.
- (9) David J. Griffiths, 1989, *Introduction to Electrodynamics*, Prentice Hall.
- (10) David. K. Cheng, 1989, *Field and Wave Electromagnetics*, Addison Wesley.
- (11) William H. Hayt, Jr., 1989, *Engineering Electromagnetics*, McGraw-Hill.
- (12) Brzezina, W. and Langerholc, J., Apr. 1974, "Lift and Side Forces on Rectangular Pole Pieces In Two Dimensions," *Journal of Applied Physics* Vol. 45, No. 4, pp. 1869~72.
- (13) John J. Craig, 1989, *Robotics*, Addison Wesley.