

영구자석의 반발력을 이용한 자기부상레일의 해석 및 설계

이강원

한양대학교 정밀기계공학과, 한국생산기술연구원
충남 천안시 330-820

송창섭

한양대학교 정밀기계공학과
서울 133-791

(1998년 8월 10일 받음 1998년 12월 20일 최종수정본 받음)

자기부상형 리니어 모터와 비접촉 구동에 의한 크린룸 환경용 물류 운송장치를 개발하기 위하여 접촉 없이 완전하게 부상되는 자기부상레일을 개발하고자 하였다. 영구자석의 같은 극을 마주보게 배치할 때 생성되는 작용력에 의한 부상 특성을 파악하고, 해석을 통하여 외력 변화에 강인하고 부상위치의 변화가 작은 반발부상형 레일을 설계·제작하였다. 개발된 부상 레일은 고정자석 양면에서 서로 반발되게 자석을 배열하여 부상하는 구조로 상호 반발력에 의하여 평형이 이루어지기 때문에 부상체에는 횡력만 작용하게 된다. 부상계에서 발생되는 횡력은 부상체의 부상 중심 위치에 반발력을 이용한 보조자석을 설치하여 제어하고자 하였다.

I. 서 론

이제까지 회전형 모터를 위한 자기부상지지기구에 대해서는 많은 연구와 상품화가 이루어져 왔으나 직선 운동형 자기부상기구는 수송용을 제외하고는 응용연구 단계에 머물고 있다. 그러나 최근 리니어 모터의 실용화와 산업환경의 변화에 따라 공장 내 자동 고속운반장치와 크린룸 환경을 위한 운반 및 자동화장치 등 응용분야가 확대되고 있으며, 많은 연구가 진행되고 있다[1, 2]. 특히 높은 청정도가 요구되는 크린룸 환경에 많이 응용되는 이유는 자기부상에 의한 지지기구의 단순한 구조와 유지보수의 용이성뿐만 아니라 분진 발생과 소음이 매우 작고 또한 마찰저항이 없어 정밀한 위치제어가 가능하기 때문이다[3, 4].

이러한 자기부상의 방법에는 활용도와 특성에 따라 다양한 방법이 개발되고 있으며, 원리적으로 영구자석에 의한 반발 또는 흡인부상, 초전도 반발부상, 유도 와전류(eddy current)에 의한 반발부상, 자계와 전류의 작용력에 의한 부상 및 전자석에 의한 흡인부상 등이 있다.

영구자석 반발부상장치는 많은 장점이 있음에도 불구하고 실용화가 미흡하다. 그러나 최근에 많은 응용개발이 이루어지고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이와 같은 영구자석을 이용한 반발부상계의 특성을 규명

하고, 접촉 없이 완전하게 부상될 수 있는 자기부상레일을 제안하고자 하였다.

영구자석에 의한 반발부상력을 이용한 이동레일장치는 60년대 Polygreen에 의하여 제안되었고, 70년대 중반 Bahmanyer와 Ellison에 의하여 실험적인 실용화에 접근하였다[5]. 최근에 보자력이 큰 희토류자석 등이 개발되면서 많은 연구가 이루어지고 있다. 현재 실용화되어 있는 영구자석 반발부상장치는 자세유지를 위하여 보조구속기구를 사용하고 있으며, 주로 안내용 전자석의 능동제어나 롤러 베어링을 이용하고 있다[6]. 본 연구에서는 영구자석 반발 부상계는 종래 자유 부상체의 자중에 의하여 평형을 이루는 구조와 달리 부상체의 상하 방향에서 상호 반발력에 의하여 운동이 구속되는 부상구조를 제안하고자 하였다.

II. 영구자석 반발부상계 해석

2.1 기초이론[7, 8]

영구자석을 이용한 반발부상장치는 고정자석과 이동자석으로 구성되며 Fig. 1과 같다.

자속분포가 일정한 2개의 영구자석에 상호 작용하는 힘은 반발력(repulsive force), 횡력(lateral force) 및 추력(thrust force)등으로 나눌 수 있다.

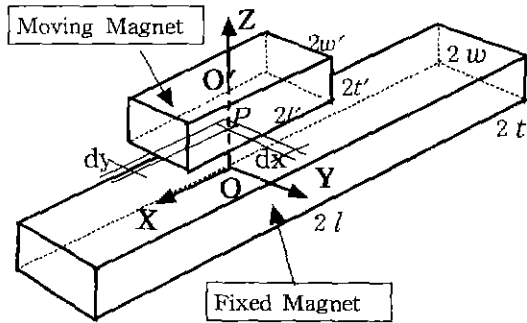


Fig. 1. Analysis model of a magnetic repulsive levitation system using permanent magnet.

직각 좌표계에서 이동자석 위의 점 $P(x,y,z)$ 의 미소면적 ΔP 에 미치는 힘은 쿨롱 법칙에 의하여 각 방향 분력으로 정의되며, 잔류자속밀도와 각 방향 자계의 세기에 의하여 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} df_x &= B_r dx dy \cdot H_x \\ df_y &= B_r dx dy \cdot H_y \\ df_z &= B_r dx dy \cdot H_z \end{aligned} \quad (1)$$

잔류자속밀도가 서로 다른 이동자석(B_r)과 고정자석(B_r) 사이의 부상력(f_z)과 횡력(f_x)은 이동자석의 밑면에 대하여 적분한 식 (2),(3)에 의하여 계산된다. 여기서 고정자석의 길이가 충분히 길고 자속분포가 균일하다면, 길이방향으로의 추력(f_z)은 무시된다.

$$f_y(x,y,z) = \frac{B_r B_r'}{4\pi\mu_0} \int_{x-l}^{x+l} \int_{y-w'}^{y+w'} a(x,y,z) dx dy \quad (2)$$

$$f_z(x,y,z) = \frac{B_r B_r'}{4\pi\mu_0} \int_{x-l}^{x+l} \int_{y-w'}^{y+w'} b(x,y,z) dx dy \quad (3)$$

여기서 x,y,z 는 자석중심으로 부터 거리이고, a,b 는 2극 직육면체 자석으로 형성되는 자계 공간상 임의의 점 P에 미치는 자속밀도 관계식으로 진행방향의 고정자석이 충분히 길다면, 다음 식 (4),(5)와 같은 근사식이 성립한다[9].

$$a(x,y,z) \cong \log \frac{(w+y)^2 + z^2}{(w-y)^2 + z^2} \quad (4)$$

$$b(x,y,z) \cong 2 \tan^{-1} \frac{(w-y)}{z} + 2 \tan^{-1} \frac{(w+y)}{z} \quad (5)$$

부상계에 대한 반발력과 횡력은 영상자극면(mirror pole plane)을 고려하여 식 (4),(5)을 이용하여 각 자극면에 대한 작용력을 구하고 이를 합산하여 계산한다.

이때 요크를 사용하면 두께를 2배로 입력하여 계산한다. P_m' , P_m 와 μ_r' , μ_r 를 이동자석과 고정자석의 퍼미언스와 리코일 비투자율이라 할 때 동작점 감자계는 다음 식으로 구해진다.

$$\mu_0 H_f = \frac{B_r + P_m' H_a}{\mu_r + P_m'} \quad (6)$$

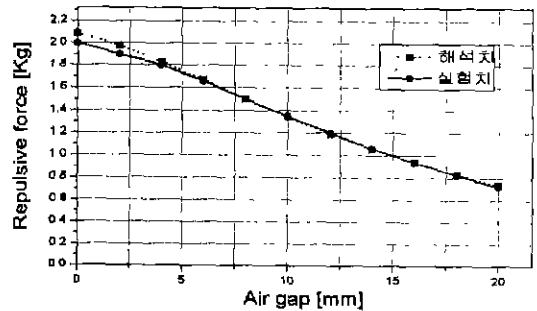
$$\mu_0 H_v = \frac{B_r + P_m H_a'}{\mu_r + P_m} \quad (7)$$

H_f 는 이동자석의 동작점 감자계이고, H_v 는 고정자석의 동작점 감자계이다.

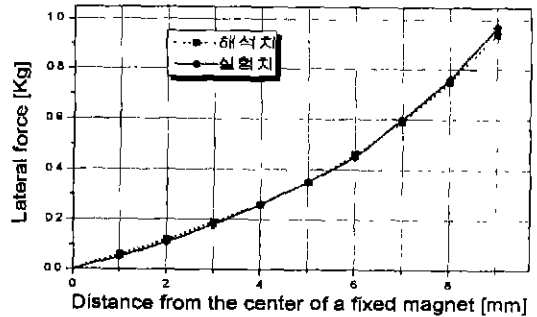
2.2 영구자석 반발 부상계의 특성

고정자석의 중심을 좌표원점으로 하고 이동자석 밑면의 중심을 상하와 좌우로 이동하여 부상력과 횡력의 변화를 계산하였다. 실험 및 해석에 사용된 고정자석과 이동자석의 두께는 10 mm이고, 폭은 각각 40 mm와 20 mm인 네오뮴계 영구자석($B_r = 0.32$ T)을 이용하였다.

식 (2),(3)을 Newton-Cotes의 수치해석법으로 계산하였다. Fig. 1과 같은 단순구조의 영구자석의 작용력을



(a) Repulsive force to various air gap.



(b) Lateral force to various distance from the center of a fixed magnet.

Fig. 2. Analysis and measuring results.

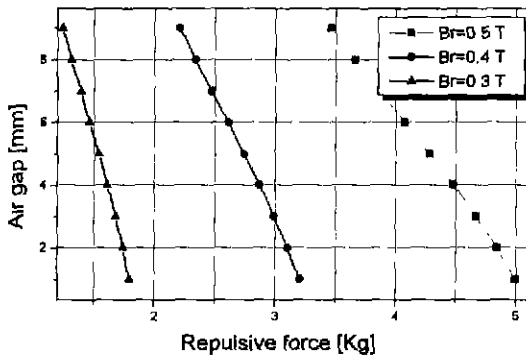


Fig. 3. Repulsive forces to various B_r .

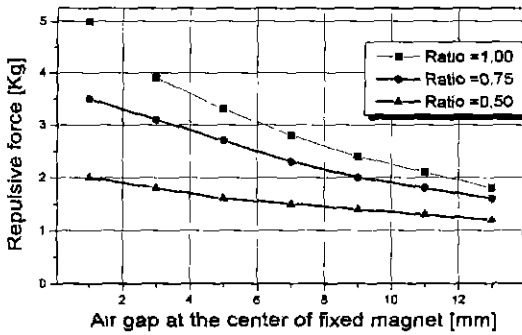


Fig. 4. Repulsive force to various width ratio (w/w) of magnet pair

하중센서를 이용하여 측정된 결과 해석치와 측정치가 잘 일치함을 알 수 있었다. 따라서 이 해석결과를 바탕으로 부상계에 대한 특성을 기술하고자 한다

Fig. 2(a)는 이동자석의 원점이 고정자석의 중간에 놓일 때 공극변화에 따른 부상력 분포와 측정값이고, Fig. 2(b)는 공극을 2 mm로 고정하고 이동자석의 원점을 좌우로 이동할 때 나타나는 횡력의 분포와 측정 결과이다. 부상력은 고정자석의 중심으로 종 모양의 포물선을 이루며, 횡력은 편심에 따라 지수함수 형태로 증가됨을 알 수 있다. Fig. 3은 이동자석과 고정자석의 잔류자속밀도에 따른 부상력의 변화를 나타내었다. 잔류자속밀도가 클수록 공극변화에 매우 민감한 변화를 보이며 잔류자속밀도를 적절하게 조절하면 공극변화에 따라 선형적인 부상력을 얻을 수 있다.

Fig. 4는 마주보는 고정자석과 이동자석의 자극면 폭에 대한 비율(w/w)과 부상력의 상관관계를 나타내며, 폭 비가 50 %이하로 될 때 공극변화에 의한 부상력은 선형적인 관계로 변화하며 폭 비에 따라 발생 부상력은 현저히 저하된다.

III. 부상 레일의 설계

Fig. 1과 같은 구조를 평행하게 2열로 배치하면, 1열 배치와 마찬가지로 종 모양의 부상력이 형성되며 미소한 변위에 대해서도 상하와 좌우에 큰 자기모멘트가 생성되기 때문에 부상 자세의 평형을 이룰 수 없는 불안정한 구조가 된다 따라서 평형 유지를 위해서 외부 구속장치가 필요하게 된다. 일반적으로 물류 이송용 영구자석 반발부상장치는 상부 구속이 없는 자유 부상 방식으로 부상 레일 설계의 주안점은 중력 방향으로 작용하는 부상체의 자중과 자석의 반발력에 의한 부상 평형 위치 설정과 부하변동에 의한 동적인 운동 특성에 합당한 구조를 갖도록 설계하는 것이다. 이 방식은 부상위치가 높게 형성되기 때문에 계의 자중에 대하여 부하 변동비가 크게되면 부상위치 변동 또한 커지게 되어 동적 특성이 저하되는 단점이 있다. 따라서 비접촉 부상을 위해서는 rolling(θ), yawing(ϕ) 및 pitching(ψ)운동에 대한 능동 제어형 전자석이 요구된다.

제안된 영구자석 반발력에 의한 자기부상 레일은 부상방향에 대하여 상하를 반발력으로 구속하여 자유부상 방식보다 부하변동에 강인한 구조로 부하변동에 따른 부상위치의 변화가 작고 구속에 의한 복원력이 작용하게 되어 계의 damping이 커지게 된다. 따라서 미세한 부하변동에 대해서는 능동형 자세 제어 없이도 안정된 응답성을 얻을 수 있다. 제안된 부상형 리니어 모터를 위한 영구자석 부상 장치는 Fig. 5와 같다. 고안된 부상계는 부상체의 양면에 레일 고정자 자석면에 대항하는 동일한 자극을 배치하여 상하 반발력을 발생시켜 부상체를 강제로 구속하여 지지하는 구조이며,

영구자석 반발에 의하여 발생하는 횡력을 제어하기 위하여 실험 단계에서는 부상 중심 위치에 상하부상과

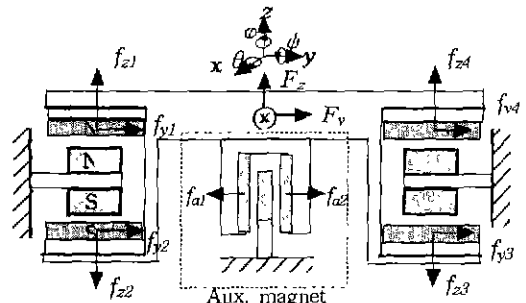


Fig. 5. Free body diagram of a magnetic levitation system using the repulsive force of P.M.

같은 구조의 반발계 한 쌍을 중앙에 배치하였다.

전술한 반발 부상특성을 활용하여 부상영역 내에서 선형적인 부상력을 얻도록 하였고 또한 횡력 발생을 최소화하여 영구 자석의 미소 반발력으로 yawing 운동을 구속할 수 있도록 설계하였다.

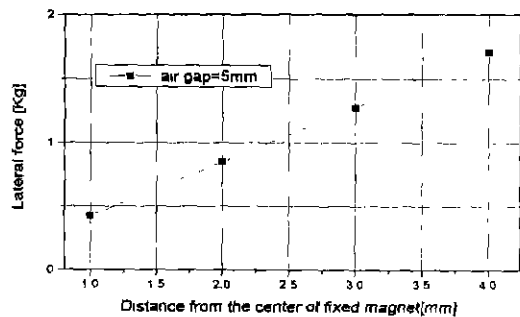
고안된 장치는 코일가동형(Moving coil: MC) 리니어 직류모터를 이용하여 부상체 양편에서 구동하고자 하였다. 최대 부하를 1.5 Kg로 설정하였고, 이때 평형상태로부터 부상공극변화를 ±1.5 mm 이내로 설정하였고, 측면 공극은 ±2 mm 이내로 유지하고자 하였다.

고안된 부상레일에 대한 역학적 관계는 영구자석의 상호 반발력(f_z)과 횡력(f_y) 및 자중과의 관계로 다음 식과 같다.

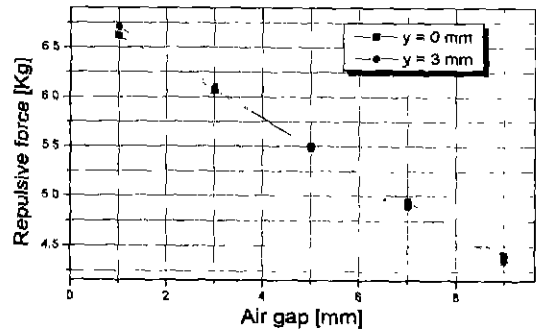
$$F_z = \sum_{i=1}^4 f_{zi} - mg \quad (8)$$

$$F_y = \sum_{j=1}^4 f_{yj} - f_{a1} + f_{a2} \quad (9)$$

여기서 부상체의 자중을 고려하지 않으면 부상평형위치는 상하 이동자석의 중앙에서 결정되며, 자중을 고



(a) Lateral force



(b) Repulsive forces

Fig. 6. Analysis results of upper 2 pairs of the suggested magnetic levitation rail.

Table I. Design specifications of magnets

구분	구성	잔류자속 밀도[T]	사양(mm) (w×b×l)
부상레일	고정자석	0.32	2000×20×10
	이동자석	0.32	130×40×10
보조자석	고정자석	0.28	2000×20×20
	이동자석	0.28	130×40×10

려하면 보다 낮은 지점에서 평형점이 형성된다.

설계변수는 부상력의 민감도로 설정하였으며, 민감도는 평형을 이룬 부상위치에서 외부로부터 작용하는 힘에 따라 형성되는 평형위치 변화의 관계로 정의할 수 있다. 이것은 부상위치 변화에 따른 반발력의 변화를 나타내는 스프링상수(K_f)로 표현할 수 있다. 이 계의 스프링상수는 식 (3)으로부터 식 (10)과 같이 계산된다.

$$K_f = \frac{\Delta F_z}{\Delta z} = \frac{F_z(x_0, y_0, z) - F_z(x_0, y_0, z_0)}{\Delta z} \quad (10)$$

여기서, x_0, y_0 는 평형상태에서의 값이고 Δz 는 기준점인 평형상태 부상위치로부터 변화된 부상위치이다. 식 (10)의 근사 값은 Fig. 6(b)와 같이 해석된 선형적으로 변화되는 공극에 따른 부상력 변화 곡선으로부터 구할 수 있다. 설정된 기하학적인 사양을 만족하면서 설계 변수인 스프링계수를 만족하는 자석은 Table I과 같다.

자중을 고려하지 않은 부상체의 평형부상위치는 고정자석의 윗면에서 5 mm가 되도록 하였고, 영구자석 반발특성으로부터 안정된 반발력을 얻기 위하여 자석 폭의 비를 0.5로 구성하였으며, 잔류자속밀도를 0.32 [T]로 설계하였다. 자중을 고려하지 않을 때 평형위치를 기준으로 ±1.5 mm 내에서 부상위치가 변화될 때, 허용 외력은 약 3.2 Kg로 평가되었고, 스프링상수는 1.07 Kg/mm로 해석되었다. 이 때 이동자석의 편심에 따른 횡력은 Fig. 6(a)와 같이 부상력의 1/4정도로 나타났다. 따라서 Fig. 5와 같이 중심부에 부상레일과 같은 한 쌍의 반발기구를 설치하여 횡력을 제어하고자 하였다.

IV. 실험 및 결과

설계된 부상레일을 제작하고 Fig. 7과 같은 실험장치를 구성하여 발생력 및 부상 특성의 실험을 추진하였다.

먼저 보조 구속자석이 없이 부상위치와 편심에 따른

발생력을 측정된 결과 Fig. 8(a), (b)과 같이 나타났다. 고정자석의 진행 방향의 중심으로부터 이동자석의 편심량에 따른 계의 횡력 분포는 Fig. 8(a)와 같고, 해석값과 유사한 변화를 보이고 있으나 편심량 증가에 따라 오차도 증가하는 경향이 있다. 해석결과 횡력은 자중이 고려된 부상위치(4.0 mm)나 자중이 고려되지 않은 위치(5 mm)에서 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

공극변화에 따른 부상력의 변화에 대한 해석값과 측정값은 Fig. 8(b)와 같다. 5 mm 위치는 자중이 고려되지 않은 상태의 해석 평형점이고 실제 자중에 의하여

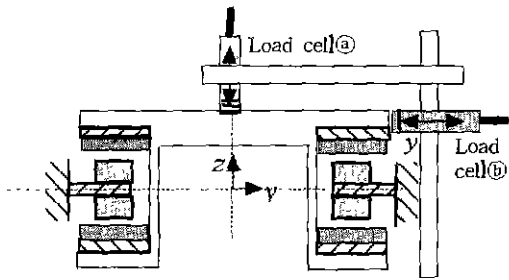
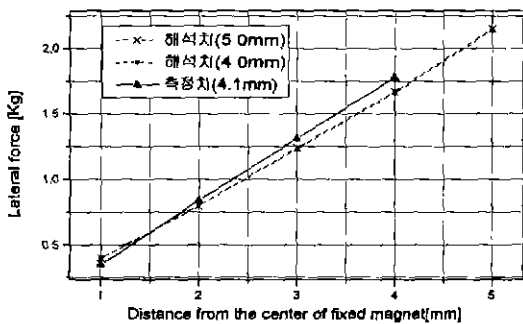
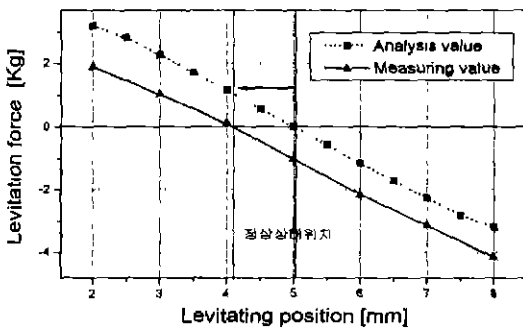


Fig. 7. Experimental setup for force measuring of a magnetic levitation rail.



a) Lateral force



b) Levitating force.

Fig. 8. Experimental results of the suggested magnetic levitating rail.

형성된 정상상태의 부상위치는 4.1 mm가 되어 해석결과와 다소 차이가 있었지만 만족한 결과를 얻을 수 있었다.

실험결과를 토대로 고정자석과 같은 두께의 보조 구속자석을 부상체의 중심에 배치하여 두 자석사이에 발생하는 반발력으로 부상체의 횡력을 상쇄하고자 하였다. 부상계의 발생 횡력을 상쇄하기 위하여 허용 편심 즉, 보조자석의 공극의 허용범위 내에서 제어력을 갖도록 Fig. 9와 같이 설계하였다.

부상 특성 실험 결과 제안된 부상계는 비교적 안정된 자세를 유지하였고, 부상체의 z축과 y축 중심에 대한 충격실험을 수행하여 측정된 impulse 응답특성은 Fig. 10과 같고, 계의 damping 계수는 0.23정도로 추정되었다.

안정된 부상체에 미약한 힘을 가하여 슬라이딩 실험을 한 결과, 요크 위에 부착된 segment 자석열의 자속 밀도가 불균일 하면 Fig. 11과 같은 평균부상 위치의 변화가 발생된다 부상체에 부착된 자석의 자속분포가 균일할 때 슬라이딩에 대한 z축 변위는 요크에 순차적으로 부착된 단위 직육면체 자석의 자속밀도 분포에

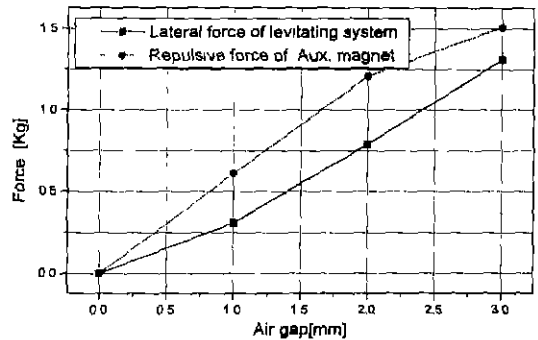


Fig. 9. Repulsive force analysis results of a auxiliary magnets.

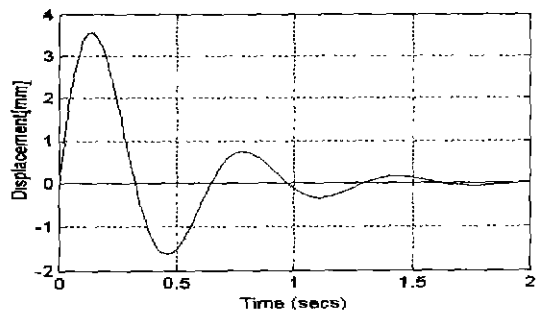


Fig. 10. Impulse response of a magnetic levitation rail. (Laser vibrometer, Polytec OFV3000).

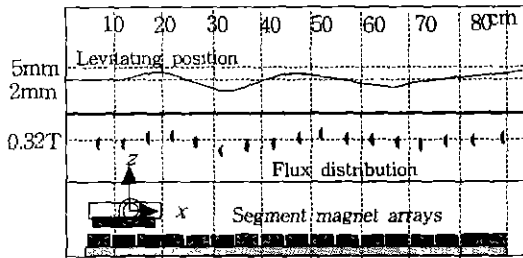


Fig. 11. Unstable sliding motion of the magnetic levitated body (Gap sensor, Gaussmeter FH-27 (Mangnet-physik. GmbH)).

따라 변화하며 진행 방향의 가장자리에 오는 고정자 자속밀도에 지배되는 현상을 볼 수 있다. 이로 인하여 부상체 중심에 대한 회전모멘트가 발생되어 pitching 운동이 일어나며, 운동과 자세유지의 안정성을 저해한다. 행정 길이가 긴(1 m 이내) 부상레일로 안정된 슬라이딩 운동을 확보하려면 고정자 자석열에 대한 잔류자속밀도 분포를 균일하게 배열하여야 안정되고 보다 매끄러운 운동을 얻을 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 자기부상형 리니어 모터와 크린룸 환경을 위한 비접촉 구동형 물류 이송장치의 개발을 위하여 영구자석 반발력에 의한 직선 운동형 자기부상지 지지구를 고안하고자 하였다. 기초적인 영구자석 반발 구조에 대한 특성 해석을 통하여 접촉 없이 부상되는 레일의 기본구조를 설계하고 제작하였다. 실험 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 영구자석의 반발부상력은 Fig. 4에서와 같이 마주 보는 자극쪽의 비를 적절히 조절하면 부상력은 줄어들지만 공극에 따른 변화가 작게 되어 선형적인 부상력을 얻을 수 있다.

둘째, 고안된 구조와 같이 영구자석 반발지구를 서로 마주보게 배치하면 선형적인 부상력을 유지할 수

있고, 평형 부상위치를 작게 할 수 있다. 또한 자기 스프링계수가 큰 강인한 부상지지구조를 얻을 수 있다.

셋째, 고안된 구조와 같이 부상중심에서 편심으로 발생하는 횡력보다 충분히 큰 영구자석 반발력을 주면 부상체의 횡력이 제어될 수 있어 기계적인 접촉기구 없는 안정된 부상구조를 구현할 수 있다.

본 기초 연구를 토대로 영구자석 반발 부상계의 실용화를 위한 부상체의 동적 모델 정립과 추진계를 포함하는 부상형 리니어 모터 시스템에 대한 설계 및 제어 기술을 정립하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] 正田英介, 리ニア드라이브 技術と その應用, 오ーム社, 98(1991).
- [2] T. Onuki, Y. Toda, Optimal Design of Hybrid Magnet in Maglev System with Both Permanent and Electro Magnets, IEEE Trans. on Magnetics, **29**(2), 1783 (1993).
- [3] D. Ebihara, K. Imagawa, M. Watanabe, Analysis of Levitating and Lateral Forces of Magnetic Levitating System of Permanent Magnet Repulsion Type, Elec. Eng. in Japan, **106**(6), 135(1986).
- [4] K. H. Park, K. Y. Ahn, Y. K. Kwak, Wafer Distribution System for a Clean Room Using a Novel Magnetic Suspension Technique, IEEE/ASME. Trans., on Mechatronics. **3**(1), 73(1998)
- [5] Jayawant, Electromagnetic Suspension and Levitation, IEE proc., **129**(8), 557(1982).
- [6] 山田一, 外, 리니어 모터 응용핸드북, 세화 출판사 편집부 역(1988), pp. 491-516.
- [7] W. Brzezine, J. Langerholc, Lift and side forces on rectangular pole pieces in two dimensions, J. of Applied Physics, **45**(4), 1869(1973).
- [8] M. Watanabe, D. Ebihara, et al., A Simple Calculation of Levitation Force using Rear Earth Magnets on Repulsion Mode, IEEJ. Tech. Meetings on Magnetics, MAG-82, 86(1982).
- [9] 大川光吉, 永久磁石磁氣回路の設計特性計 算法[III] 應用編, 總合電子リサーチ(1993), pp. 199-212

Analysis and Design of a Magnetic Levitation Rail using the Repulsive Force of Permanent Magnets

Kang Won Lee

*Dept. of Precision Mechanical Eng., Hanyang University,
Korea Institute of Industrial Technology, Chonansu 330-820, Korea.*

Chang Seop Song

Dept. of Precision Mechanical Eng., Hanyang University, Seoul 133-791

(Received 10 August 1998, in final form 20 December 1998)

For the high speed linear motor and the transportation device at clean room, a magnetic levitation rail without contact using the repulsive force of permanent magnets was newly developed. The characteristics of repulsive and lateral forces of the magnetic levitating system using permanent magnet was studied and the devised magnetic levitating system was evaluated by analytical and experimental approaches. This system is composed of two fixed guide rails with the rare earth permanent magnet array and a moving unit which is attached two magnet pairs at each sides. Because this system was forcedly levitated by the face to face repulsive forces, levitating air gap length can be reduced and levitation stiffness will be improved remarkably. To this system, lateral force can be offset by very small repulsive force of an auxiliary magnetic repulsion system on the center of moving unit.