

선형 유도기 구동 방식 공기 베어링 스테이지에 관한 연구

Study on the Air-bearing Stage Driven by Linear Induction Motors

정광석^{1,✉}, 심기본²
Kwang Suk Jung^{1,✉} and Ki Bon Shim²

¹ 충주대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Chungju National Univ.)

² 충주대학교 기계공학과 대학원 (Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Chungju National Univ.)

✉ Corresponding author: ksjung@cjnu.ac.kr, Tel: 043-841-5135

Manuscript received: 2010.2.3 / Accepted: 2010.4.17

Linear induction motor is adopted as an actuator of the planar stage. An inherently poor characteristic at zero or ultra-low speed zone of the induction motor is remarkably improved due to a recent development of power electronic semiconductor technology and a spatial vector control theory. At present, a servo response speed of the induction motor reaches 90 percent of one of PM synchronous or BLDC motor. Specially, as a secondary of the induction motor can be constructed using uniform conducting sheets, there is no periodic force ripple as in PM motors. So, the induction motor can be superior to another driving means under a certain condition. This paper discusses the overall development procedure of non-contact planar stage with a big workspace using linear induction motors.

Key Words: Air Bearing Stage (공기 베어링 스테이지), Linear Induction Motor (선형 유도 모터), Magnetic Circuit (자기 회로), Nano Step Test (나노 계단 시험), Vector Control (벡터 제어)

1. Introduction

대면적 평면 스테이지의 구동 원리로는 빠른 응답 특성과 큰 힘 밀도로 인해 브러쉬리스 모터(BLDC)를 x-y 축으로 중첩시킨 형태가 가장 보편적으로 이용되고 있다. 그러나 더욱 대형화되고 있는 공정예의 적용으로 인해 이러한 중첩 형태의 연결 메커니즘은 계측(kinematic metrology)시 오차 보정에 큰 제약이 되고 있으며 따라서 10^{-7} 이상의 상대 불확도(relative uncertainty)를 요하는 공정의 경우 전세기적으로 특정 소수 업체에 의존하는 경향이 더욱 심화되고 있다.^{1,2} 본 논문에서는 그 대책의 일환으로 영구자석형 모터 대신 선형 유도 모터(이하 LIM; Linear Induction Motor)를 채택한 공기 베어링 스테이지의 기초 연구 결과를 소개한다.

이러한 시스템의 경우 동일 평면상에서 모든 구동력이 발생되어 연결 구조가 필요없으며 스테이지 하부 프레임의 경우 전도성 시트(sheet)를 적층해서 구성하면 BLDC 시스템에서 일반적으로 나타나는 운동 방향으로의 주기적인 힘의 리플이 전혀 발생하지 않는다. 또한 하나의 프레임으로 스테이터를 포함한 스테이지를 구성할 수 있어 강성 조절은 물론 프레임 오차 보정이 간편하다는 이점이 있다.³ 현재 유도기의 서보 응답성은 전력전자 반도체 기술과 공간 벡터 제어기술 덕분에 영구자석형 모터의 약 90% 이상을 상회하고 있고 유도기의 영속(zero speed), 극저속(ultra-low speed) 구간에서의 응답성도 상당히 향상되고 있다.^{4,6}

본 논문에서는 느린 동특성과 제어의 어려움 등 여러 이유로 인해 거의 시도되지 않았던 특히

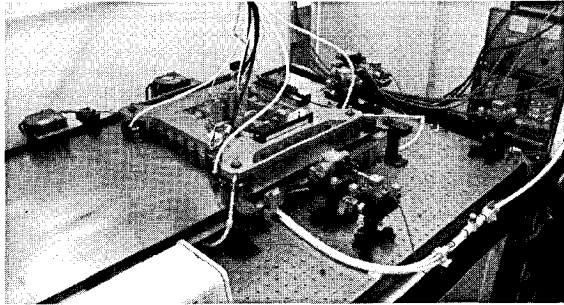


Fig. 1 Photograph of the air-bearing planar stage using linear induction motors

대면적 스테이지의 구동 방식으로는 적합하지 않은 것으로 알려져 왔던 ^{7,8} LIM 을 구동 원리로 채택한 공기 베어링 스테이지에 관한 연구 결과 소개를 통해 한계 인자에 대한 논의와 동시에 그 가능성을 모색해 본다.

2. Overall layout of the planar stage

대상 스테이지의 초기 개발 모델은 네 개의 단동 LIM 을 사각으로 배치하여 각 LIM 의 추력, 수직력 등의 이축력을 이용하여 구동되는 형태인데 이 때 LIM 과 하부 강자성 프레임간의 저주파 흡인력은 스테이지의 네 모서리에 장착된 공기 베어링의 부상력과 평형을 이룬다.

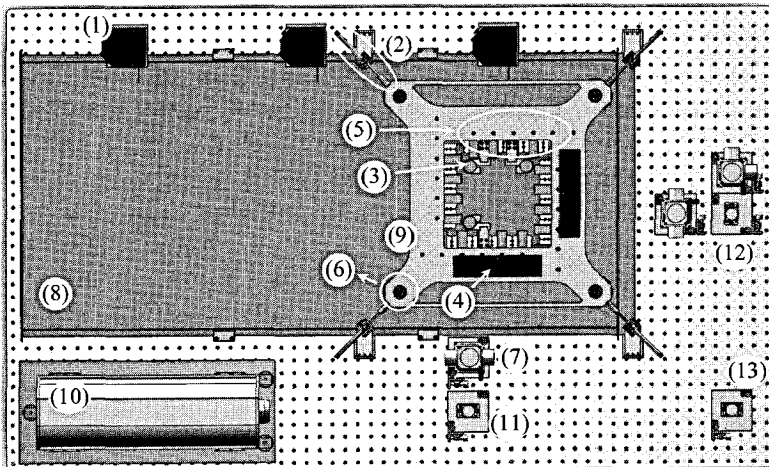
2.1 Main specifications

개발된 시스템의 전체 사진은 Fig. 1 과 같고 그

구성 요소는 Fig. 2 와 같다. 구리 시트와 공극 자기장의 차로 구성을 위한 계철 위에 스테이지 프레임이 놓여있다. 스테이지는 네 쌍의 LIM 으로 구동되며 진술한 바와 같이 네 모서리의 공기 베어링에 의해 부상된다. 따라서 LIM 의 흡인력과 스테이지 중량은 공압력과 공칭 공극에서 평형을 이룬다. 스테이지의 공간 위치는 면내(in-plane) 운동의 경우 3 축의 레이저 간섭계(ZYGO, ZMI-2000)로 측정되며 면외(out-of-plane) 운동은 스테이지 프레임에 장착된 3 축의 정전용량센서(MTI, AS-9000)로 측정된다. 또한 그림에서 확인할 수 있듯이 특정 축 방향(x 축)으로의 긴 구동 영역을 레이저 간섭계로 측정하기 위해서는 구동 영역 크기만큼의 반사 거울이 필요하므로 현실적인 이유로 세 개의 레이저 센서를 이용하여 y 축 방향으로의 이동량을 보조적으로 측정한다. 물론 100 mm 이내의 영역은 3 축의 간섭계만으로 측정할 수 있으며 x 축 방향으로 장변위(long distance) 시험을 할 때에만

Table 1 Main specifications of the planar stage

Item	Value	
Stage frame	442 mm × 442 mm × 46 mm 6.25 kg	
Conductor & Back-yoke	1.2 m × 0.55 m × 5 mm, 10 mm	
LIM	Core material	Permalloy
	Size	95 mm × 40 mm × 19 mm
	Pole length	108 mm
	No. of pole pair	2
	No. of phase	3



- (1) Laser displacement sensor
- (2) Initializing chuck
- (3) Capacitive probe
- (4) Plane mirror
- (5) Linear induction unit
- (6) Porous air-bearing
- (7) Laser interferometer
- (8) Secondary (copper + back iron)
- (9) Primary frame
- (10) Laser source
- (11) 33% Beam splitter
- (12) 50% Beam splitter
- (13) Mirror

Fig. 2 Overall layout of the planar stage and its part description

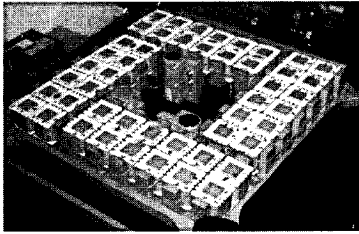


Fig. 3 Bottom view of the planar stage

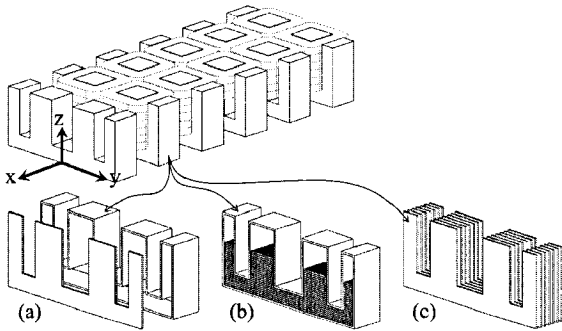


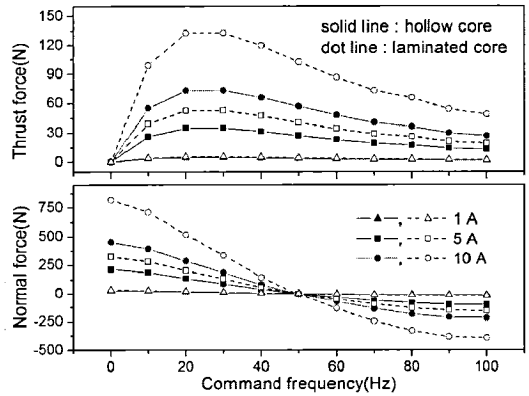
Fig. 4 Magnetic circuit of the single linear induction unit and compared core types (a) hollow core (b) with powder (c) laminated core

이러한 레이저 변위 센서의 스위칭을 이용한다. 따라서 스테이지 프레임은 전원, 에어 케이블, 정전용량센서 케이블, 그리고 LIM 의 자속 센서 케이블과 연동된다.

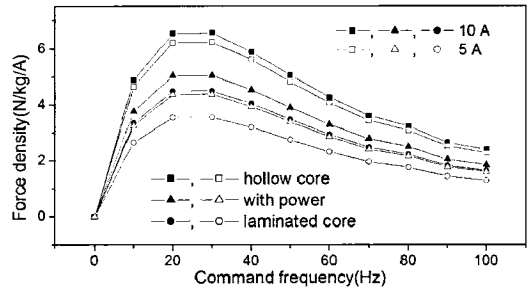
평면 스테이지의 주요 제원을 Table 1 에 제시하였다. 스테이지 프레임과 전도성 평판의 크기를 통해 스테이지의 구동 영역이 x 축 방향으로 약 750 mm 에 달하는 것을 확인할 수 있으며 이는 시작 스테이지의 대변위 동특성 시험을 위한 것이다.

2.2 Design of LIM

스테이지의 초기 개발 목표 가속도와 최대 속도는 상용화되고 있는 중저가 스테이지 제원을 참조하여 각각 1 g' (이하 g' = 9.8 m/s²), 1 m/s 로 설정하였다. 이러한 목표를 달성하기 위해서 가급적 스테이지 프레임뿐만 아니라 각각의 LIM 역시 소형, 경량 구조를 취해야 하는데 이럴 경우 LIM 의 자기 회로 구성이나 코일을 위한 충분한 공간이 부족하기 때문에 역으로 각 LIM 의 힘 밀도가 저하되는 문제가 발생한다.⁹ 이러한 문제에 대처하기 위해 스테이지의 초기 제원을 기준으로 자기회로 설계를 반복, 수정하여 Fig. 3 과 같은 형태로 구축하였다. 실제 LIM 자기회로는 Fig. 4 와 같은 이중



(a) Comparison of magnetic forces between hollow core and laminated core



(b) Comparison of force density per unit weight and ampere

Fig. 5 Force comparison for three types of cores according to command frequency

회자속 폐회로 형태를 취하는데 이때 힘 밀도를 극대화하기 위한 방법으로 코어 내부 구조를 그림에서와 같이 (a) 속이 비어있는 코어, (b) 내부를 강자성 분말로 채운 코어, 그리고 일반적인 (c) 적층 코어를 대상으로 비교 시험을 수행하여 그 결과를 Fig. 5 에 나타내었다. 코어의 단면이 작아질 경우 자속 포화가 쉽게 일어나므로 코어는 2 T (2×10⁴ Gauss) 이상의 높은 자화 밀도를 갖는 퍼말로이 (permalloy) 재질로 제작하였다.

세 가지 코어로 구성된 각각의 LIM 에 대해 명령 주파수 변화에 따른 자기력 변화 선도를 Fig. 5(a)에 그리고 각 LIM 의 중량과 입력 전류를 고려한 힘 밀도 비교 선도를 Fig. 5(b)에 나타내었다. RMS 기준 저전류(1 A) 입력의 경우 두께 1 mm 의 외피만 갖는 코어의 자기력은 일반적인 적층 코어와 거의 유사하다. 그러나 전류가 커질수록 속이 빈 코어는 큰 자기저항과 자속 포화로 인해 10 A 입력의 경우 자기력이 적층 코어의 50% 이하로

Table 2 LIM weight and force density for core types

Core type	Mass	Force density(N/kg/A) at 30 Hz, 5 A
Hollow core	1.122 kg	6.24
With powder	2.07 kg	4.38
Laminated core	2.955 kg	3.55

떨어진다. 그러나 단위 중량을 고려하면 Fig. 5(b)와 같이 상이한 결과를 얻을 수 있다. 위 세가지 코어를 이용하여 제작된 LIM의 중량을 고려하면 Table 2에서와 같이 속이 빈 코어가 적층 코어 대비 38%에 불과하기 때문에 5 A, 30 Hz의 입력전류에서 단위 중량, 전류당 힘 밀도는 대략 1.75 배에 달한다. 따라서 본 스테이지에 이용된 LIM의 코어는 속이 빈 퍼말로이 재질로 구성하였다. 또한 중량 절감을 위해 구리 코일 대신 알루미늄 코일을 이용하였으며 스테이터는 Gramme 방식으로 와인딩(winding) 되어 있다.

스테이지 총 중량은 Table 1과 같이 6.25 kg이고 Fig. 5(a)에서와 같이 정격 3 상 전류 5 A에서 단위 LIM 당 추력은 약 35 N 이므로 총 추력은 70 N 이고 따라서 단순히 산술적인 계산으로 이론 가속도는 약 1.14 g임을 알 수 있다. 그러나 후술하는 바와 같이 피드백 루프 안에서 서보 시스템의 운동 정밀도와 정속 안정성을 고려하여 수행된 시험 결과로는 초기 상승시간 제약 때문에 이러한 정추력의 값보다 훨씬 더 큰 값을 가져야만 목표 가속도가 안정적으로 달성되는 것을 확인할 수 있다. 이번 비교에 사용된 코어 형태는 열적인 문제에 대한 특별한 고려는 하지 않았다. 스테이지의 듀티 비(duty ratio)가 비교적 작기 때문에 합리적인 측면이 있으나 이차측이 적층 구리 시트만으로 구

성되어있는 경우 연속 사용시에는 국부 가열로 인한 만곡 현상 등등의 대처를 위해 별도의 강제 냉각(forced cooling) 방법이 필요할 것으로 예측된다.

3. Driving methodology of the planar stage

개발된 스테이지는 범용 스테이지와 유사한 절차와 방법론에 따라 구동된다. 본 장에서는 Fig. 6에 묘사된 것과 같이 하드웨어 구성에 기초한 센서 기구학으로부터 전류 커뮤테이션(commutation)에 이르는 전 과정을 구체적인 수식을 기반으로 전개한다.

스테이지 메인 프레임의 공간상에서의 위치는 전술한 바와 같이 3 축의 레이저 간섭계(L₁, L₂, L₃)와 세 개의 정전용량 센서(Z₁, Z₂, Z₃)를 통해 측정된다. 간섭계를 통해 면내 위치 P₁를 그리고 정전용량 센서를 통해 면외 위치 P_O를 독립적으로 측정한다. 각 측정기의 국부 좌표값은 Fig. 7을 참조하면 다음과 같은 역기구학 관계에 의해 스테이지의 기준 좌표계로 변환된다.

$$P_1 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \gamma \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 2 & 0 & 0 \\ 0 & -1/p_l & 1/p_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$P_O = \begin{bmatrix} z \\ \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{1}{2p_c} \begin{bmatrix} 0 & p_c & p_c \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

스테이지의 위치 오차 보상을 위한 제어력은 (1), (2)와 목표값(P₁, P_O)과의 오차에 기초한 선형 제어기 (3)을 통해 결정되는데

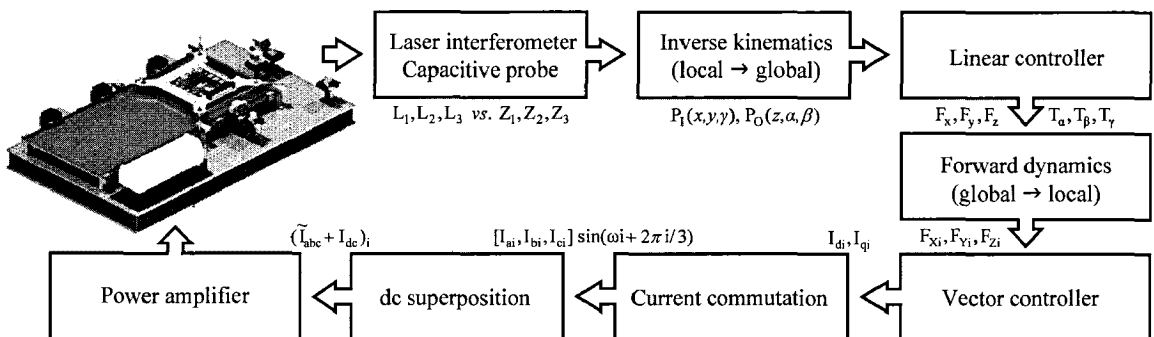


Fig. 6 Operating flow chart of the planar stage including signal commutation

$$\begin{aligned} & [F_x, F_y, T_y, F_z, T_\alpha, T_\beta]^T = \\ & \mathbf{K}_p \mathbf{e} \left(= \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{P}}_1 - \mathbf{P}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \bar{\mathbf{P}}_0 - \mathbf{P}_0 \end{bmatrix} \right) + \mathbf{K}_D \dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_I \int \mathbf{e} dt \quad (3) \end{aligned}$$

이는 유도기의 경우 면내 운동 방향으로 이중 적분기(double integrator) 형태의 동특성에 전혀 변화가 없고 공극은 항상 일정하게 유지되기 때문이다. 얻어진 제어력은 Fig. 7 을 기초로 다음 순동역학 관계를 이용하여 각 선형 유도기의 제어력 F_{Xi}, F_{Yi}, F_{Zi} 로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} F_{X1} \\ F_{X2} \\ F_{Y1} \\ F_{Y2} \end{bmatrix} = \frac{1}{4p_f} \begin{bmatrix} -2p_f & 0 & 1 \\ 2p_f & 0 & 1 \\ 0 & -2p_f & 1 \\ 0 & 2p_f & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ T_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} F_{Z1} \\ F_{Z2} \\ F_{Z3} \\ F_{Z4} \end{bmatrix} = \frac{1}{4p_f} \begin{bmatrix} -p_f & -2 & 0 \\ -p_f & 0 & -2 \\ -p_f & 2 & 0 \\ -p_f & 0 & 2 \end{bmatrix} \times \quad (5)$$

$$\left(\begin{bmatrix} F_z \\ T_\alpha \\ T_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -p_a & -p_a & -p_a & p_a \\ p_a & p_a & -p_a & -p_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{A1} \\ F_{A2} \\ F_{A3} \\ F_{A4} \end{bmatrix} \right)$$

각 단동 유도기의 이축력(designed or target force) 이 (4), (5)와 같이 결정되었으므로 이를 통해 유도기 입력 전류를 벡터 제어기를 통해 계산한다. 우선 유도기의 추력 F_{Xi} 혹은 F_{Yi} 와 수직력 F_{Zi} 는 dq 전류와 다음의 관계를 갖는다.^{10,11}

$$F_{Xi} \text{ or } F_{Yi} = \frac{3L_m}{4\tau} I_{di}^e I_{qi}^e \quad (6)$$

$$F_{Zi} = \frac{1}{\mu_0 A} (L_m I_{di}^e)^2 \quad (7)$$

여기에서 L_m, τ, μ_0, A 는 각각 공극 인덕턴스, 극 길이, 공기 투자율, 유도기 코어 단면적을 나타낸다. 또한 상첨자 e 는 코일 즉 스테이터 기준의 자속각이며 전류 또한 스테이터의 dq 축을 기준으로 한 값들이다. 위 식에서 볼 수 있듯이 d 축 전류는

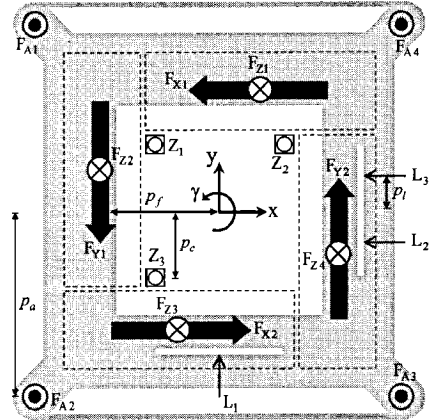


Fig. 7 Force diagram including location of sensing units for the stage frame

양쪽 자기력에 깊이 관여하고 있기 때문에 제안된 시스템에서와 같이 수직력이 가이드 메커니즘에 의해 구속되지 않는다면 입출력간의 비연성화 과정이 필요하다. 따라서 위 시스템에서는 이러한 비연성화를 위해 d 축 자속에 관련된 d 축 전류는 공기 베어링의 반발력과 평형을 유지하도록 일정한 값으로 유지시키고 대신 3 상 전류에 편이된 dc 전류로 수직력 제어를 한다.^{3,11,12} 식 (5)에서 F_z, T_α, T_β 를 0 으로 놓고 얻어진 공칭력 평형을 위한 수직력을 \bar{F}_{Zi} 라 할 때 공칭 d 축 전류와 추력 제어를 위한 q 축 전류는 다음과 같다.

$$I_{di}^e = \frac{1}{L_m} \sqrt{\mu_0 A \bar{F}_{Zi}} \quad (8)$$

$$I_{qi}^e = \frac{4}{3} \tau \frac{F_T}{\sqrt{\mu_0 A \bar{F}_{Zi}}} \quad (9)$$

각 유도기의 자속각 기준 dq 축 입력 전류는 스테이터 코일 기준의 3 상 전류로 다음의 변환식을 이용하여 변환된다.

$$\begin{bmatrix} \tilde{I}_{ai} \\ \tilde{I}_{bi} \\ \tilde{I}_{ci} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \sqrt{3} \\ -1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e \\ \sin \theta_e & \cos \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{di}^e \\ I_{qi}^e \end{bmatrix} \quad (10)$$

위 식에서 자속각 θ_e 는 스테이터 코일 좌표계를 기준으로 플럭스 센서를 이용하여 측정된 dq 축

공극 자속을 이용하여 근사적으로 얻을 수 있다.

$$\theta_e \approx \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_q}{\lambda_d} \right) \quad (11)$$

각 코일로의 최종 입력은 전술한 바와 같이 면의 운동 제어를 위한 dc 전류가 위 (10)의 AC 전류에 편(bias)된다. 즉, 식 (5)에서 공압에 관련된 항을 소거하고 순수하게 스테이지 프레임의 면의 운동에만 관련된 항을 대상으로 얻어진 수직력을 기초로 얻어진 dc 전류를 3 상 전원에 증첩시키는데 기본적으로 이러한 편 전류는 스테이지의 설정 제어에만 이용되므로 그 양이 대단히 미미하고 추력 크기에는 아무런 영향을 주지 않는다.^{11,12} 따라서 연성에 대한 고려없이 쉽게 수직력 제어에 이용할 수 있다. 따라서 최종 입력 전류는 명령 주파수를 ω 라 할 때

$$I_{abc}|_i = \tilde{I}_{abc}|_i \sin(\omega t + 2\pi/3) + I_{dc}|_i \quad (12)$$

이며 파워 증폭기를 거쳐 각 유도기에 인가된다. 이러한 과정을 거쳐 스테이지는 공간상에서 안정되게 부상되어 구동된다.

4. Performance test

구축된 시스템을 대상으로 전장에서 논의한 구동 방법에 따라 수행된 시험 결과를 본 장에 서술한다. 스테이지의 공간 위치 측정을 위한 레이저 간섭계와 정전용량센서의 분해능은 각각 0.3 nm와 10 nm 이지만 시스템이 놓여진 환경에서는 전자노이즈 최소 성분이 약 30 nm 로 관측되며 따라서 이러한 잡음 수치를 고려하여 계단 입력의 크기가 결정되었다. LIM 에 인가되는 3 상 전원의 명령 주파수는 30 Hz 로 설정되었으며 따라서 하부 강자성 프레임으로 인해 LIM 에는 강한 흡인력이 상시 작용한다. 이러한 흡인력을 보상하기 위한 공기 베어링의 공극은 약 20 μm 이며 공압력과 평형을 이루는 LIM 의 공칭 공극은 800 μm 로 설정되었다.

우선, 다양한 가속 능력 검증을 위해 총 이동 거리 600 mm 에 대해 속도 프로파일을 이동 거리의 절반 동안 가속하고 절반 동안 감속하도록 설정해 놓은 상황에서의 시험 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 그림의 상단에서부터 가속도가 점점 커지

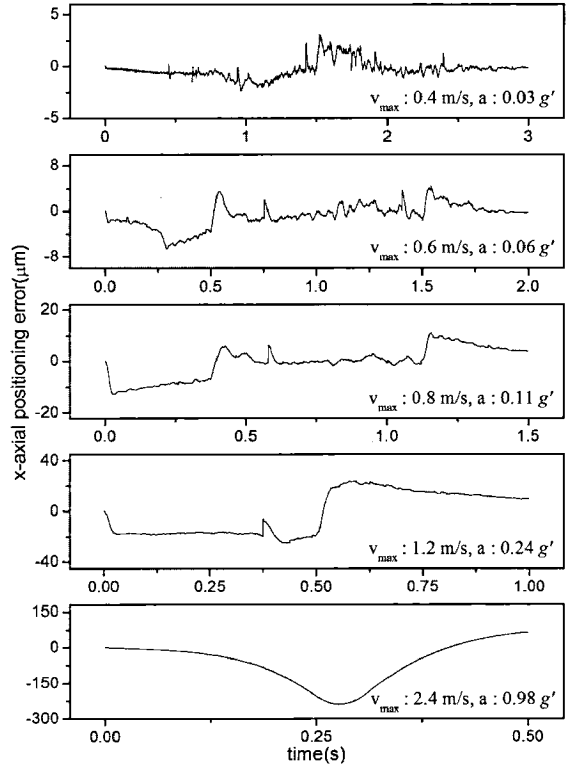


Fig. 8 Tracking test result for 0.6 m distance according to various accelerations

고 구동 시간은 짧아지기 때문에 이동 거리의 중앙점을 지날 때 속도는 최대값에 도달한다. 구동 시점과 종점 부근에서 가속도가 커짐에 따라 이송 오차가 점점 커지다가 0.98 g' 의 목표 가속도 입력에 대해서는 구축된 LIM 으로는 해당 프로파일을 거의 추종하지 못하고 큰 위상 지연을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 시점, 종점을 제외한 중심 영역에서도 스테이지는 전술한 반복 정밀도를 전혀 나타내지 못하고 있는 것을 알 수 있는데 이는 해당 시험의 속도 프로파일이 일정하지 않고 계속해서 가속과 감속을 반복하기 때문이며 이러한 부분들은 후술하는 정속 시험 결과에서 확인할 수 있다.

2 장에 서술한 해당 스테이지의 초기 목표 속도에 근접한 최대 속도가 1.2 m/s 인 네 번째 시험 결과를 보면 최대 운동 오차가 거리 기준으로 약 $\pm 20 \mu\text{m}$ 에 달하는 것을 알 수 있는데 이는 초기 오차가 빠르게 보상되지 않고 누적되기 때문이며 해당 가속도 값으로 미루어 보면 구축된 LIM 의 응답성 부족에 기인한 것으로 판단된다. 특히 1 g'

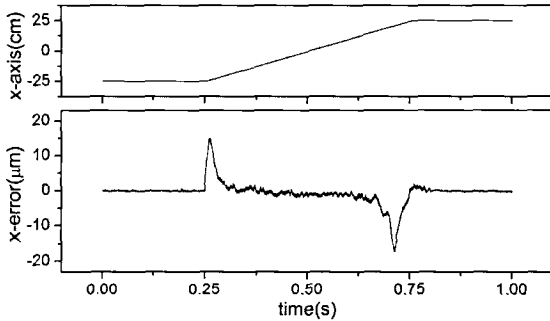


Fig. 9 Test result for profile with a constant speed

이상의 목표 가속도 달성을 위해서는 이러한 응답성뿐만 아니라 정추력 역시 시험 결과치보다 훨씬 커야 할 것으로 판단된다. 위 스테이지의 면내 운동 시험에서 이송 오차를 기준으로 결정되는 각 축 방향 제어력은 선형 제어기를 통해 결정되는데 이 때 스테이지가 횡방향으로 이송 적분기 형태의 동특성을 가지므로 모든 시험에 걸쳐 동일한 제어 계인을 이용하였다. 따라서 벡터제어기에 우선하는 단동 유도기의 목표 제어력을 결정하는 선형 제어기만을 고려하면 스테이지는 이동 방향으로 동일한 강성, 댐핑 능력을 갖는다.

위 Fig. 8 과 달리 시점, 종점에서의 급격한 가속 이후 일정 속도로 구동되는 정속 프로파일에 대한 추종 시험 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 총 이동 거리 500 mm 를 0.5 초에 도달하므로 평균 속도는 1 m/s 에 해당한다. 이전 결과와 달리 급격한 가속 구간에서의 약 $\pm 15 \mu\text{m}$ 의 오버슈트를 제외하고는 정속 구간에서는 이송 오차가 변위 기준으로 $2 \mu\text{m}$ 이하로 수렴되는 것을 확인할 수 있다. 이송 속도를 더욱 증가시킬 경우 재현성에서 많은 문제를 야기하는 것을 확인할 수 있으며 특히 초기 가속 구간에서의 오차가 Fig. 8 에서와 마찬가지로 빠르게 보상되지 못하고 지연되는 것을 확인하였다. 따라서 이 이상의 정속 시험에서는 만족할 만한 결과를 얻을 수 없었다.

구축된 스테이지의 계단 입력을 통한 분해능 시험은 전술한 바와 같이 전자 잡음을 고려하여 30 nm 로 설정하여 수행하였으며 그 결과를 Fig. 10 에 나타내었다. 계단 시험은 120 mm 인 레이저 간섭계 수광 거울의 크기를 고려하여 원점에서 그리고 x 축 방향으로 100 mm 이동한 후에 각각 수행되었다. 반복 횟수에 관계없이 재현성 있는 결과를 얻을 수 있었으나 그림의 상하 결과 비교에서

알 수 있듯이 원점에서보다 100 mm 이동 후의 결과가 다소 거친 것을 확인할 수 있다. 프레임 계측 오차의 불완전한 보상에 기인하는 것으로 판단된다. 특히 이러한 분해능 수준의 계단 시험에 있어 스테이지의 γ 축 오차는 이송 오차에 큰 영향을 미친다. 이러한 γ 축 오차는 제어기에서 보상되지만 스테이지 계측 프레임의 보정 단계에서 이미 분해능 이하 수준으로 보상되어야 한다.

현재까지 수행된 성능 시험은 범용 스테이지 제원에서 보듯이 최대 속도를 기준으로 한 퍼센티지 정속 안정성이나 직진도, 평행도 등과 관련된 값들을 얻기 위한 것은 아니다. 대신 유도 구동 방식을 갖는 대상 스테이지의 정적, 동적 성능에 대한 개략적인 결과와 그 가능성 그리고 이를 통한 주요한 한계 인자의 동정(identification)에 그 의미가 있으며 따라서 성능치 역시 외부 계측기를 통한 레퍼런스 비교없이 단지 장착된 측정기를 통하여 측정된 결과들이다.

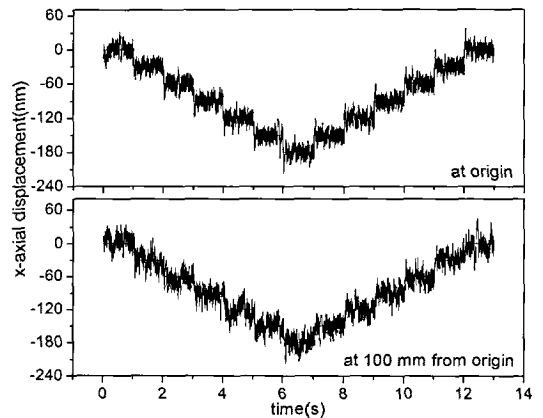


Fig. 10 Step test result at origin and after moving

5. Conclusion

현재 반도체 웨이퍼 사이즈는 12 인치(300 mm)를 뛰어 넘어 조만간 400 mm 웨이퍼 시대를 열 것으로 예측되고 있으며 LCD(액정 평판 디스플레이)의 경우 8 세대를 거쳐 9 세대 투자가 이뤄질 정도로 기판 사이즈가 급격히 증가하고 있다. 따라서 이러한 기판 사이즈에 대응하기 위해 공정 장비 역시 더욱 대형화가 가속화되고 있다. 반도체 공정의 경우 노광용 웨이퍼 스테퍼, 프로빙 스테이션이나 LCD 의 노광, 패턴 검사기 등에 폭넓

게 이용되는 대면적 스테이지의 경우 위 영역 확대에 대응하는 것이 기술적으로 물리적 한계에 달하고 있다는 분석이 나올 정도로 기존 시스템을 단순히 확대하여 대응하는 데에는 분명히 한계가 있다.^{1,2}

본 논문은 기존 스테이지의 구동 방식을 유도기로 대체하여 구현해 봄으로써 전기동역학적 구동 원리의 가능성 타진과 함께 다양하게 존재하는 제한 요소들을 확인해 보는데 그 의의가 있다. 초기 시작품으로 제작된 시스템은 길이 방향으로 750 mm 의 구동 영역과 1 m/s 이상의 정속 구동 성능을 나타내는 것으로 확인되었으나 목표 제원으로 삼았던 1 g² 이상의 가속 능력에는 미흡한 것으로 보인다. 그 동안 수송용, 정속 구동용에 한정되어 적용되어온 유도 시스템은 기계적 구조의 강건성과 보수 측면에서의 이점 외에 평면 스테이지와 같은 첨단 시스템에도 응용 가능한 많은 장점이 있는 바 향후 더욱 많은 연구가 기대된다.

제안한 시스템에 한정되어 추가로 고려되어야 할 문제들은 우선 서보 안정성을 위해 구동 액추에이터에서 흔히 마주치는 열 포화에 대한 냉각 대책이 필요하고 스테이지의 음양의 방향 전환시 과도한 상승 시간을 줄이기 위한 보조 회로에 대한 연구 역시 대단히 시급히 해결되어야 한다. 또한 근본적인 LIM 의 힘 밀도를 더욱 높이기 위해 보전 방법이 거의 정립되어있지만 본 연구에서는 고려되지 않았던 와전류손, 철손 등의 여러 손실에 대한 보상을 비롯하여 대면적 스테이지 전용의 최적화된 자기 회로에 대한 연구도 병행되어야 할 것으로 보인다.

후 기

이 논문은 2009 년 정부재원(교육과학기술부 학술연구구성사업비)으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(2009-0071607).

참고문헌

1. Ministry of Knowledge Economy of Korea, "Research Planning Report for Core Technology Development of Digital Lithography Equipment," 2008.
2. Han, H. and Seo, M. H., "FPD Element Equipment - LCD Equipment," TCI Report, 2006.
3. Jung, K. S., Park, J. K. and Kim, H. J., "Improvement of dynamic characteristic of large-areal planar stage using induction principle," J. of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 15, No. 7, pp. 675-682, 2009.
4. El-Halim, A., Ashraf, M. A. and Al-Arabawy, I. F., "Design two degree of linear motion X-Y plane machine using linear induction motor," 12th Int. Middle-East Power Sys. Conf., Vol. 28, pp. 109-113, 2008.
5. Hsu, S. and Fu, L., "Adaptive decentralized control of robot manipulators driven by current-fed induction motors," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 10, No. 4, pp. 465-468, 2005.
6. Dittich, P. and Radeck, D., "3-DOF Planar Induction Motor," IEEE Int. Conf. on Electro/Information Tech., pp. 81-86, 2006.
7. Onuki, T., Jeon, W., Hayashi, K. and Yoo, J., "Driving characteristics of x-y linear induction motor with two-dimensional primary winding," Electrical Engineering in Japan, Vol. 128, No. 2, pp. 83-90, 1999.
8. Ohira, Y., Koseki, T. and Masada, E., "Fundamental Characteristics of an X-Y Linear Induction Motor, X-Y LIM," J. of Magnetic Society of Japan, Vol. 21, No. 5, pp. 929-934, 1997.
9. Spicer, D. F., Sackett, J. N. and Black, C. T., "Precision X-Y positioning systems using linear induction motors," IEEE Colloquium on Limited Motion Electrical Actuation System, pp. 6/1-6/3, 1998.
10. Vas, P., "Sensorless vector and direct torque control," Oxford University Press, pp. 263-379, 1996.
11. Jung, K. S. and Lee, S. H., "The modified two-axis vector controller of linear induction motor to apply to the non-contact stage with large workspace," J. of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 14, No. 4, pp. 385-391, 2008.
12. Jung, K. S. and Baek, Y. S., "Decoupling of thrust force and levitation force of transverse flux linear induction motor by the active compensation of magnetic force across the air-gap," J. of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 11, pp. 91-98, 2004.