고정밀 회전 및 축방향 이송을 위한 신개념 원통형 자기부상 스테이지

Novel Cylindrical Magnetic Levitation Stage for Rotation as well as Translation along Axles with High Precisions

전 정 우^{*} · Mitica Caraiani^{*} · 이 창 린^{*} · 정 연 호^{*} · 김 중 문^{*} · 오 현 석^{*} · 김 성 신^{**}
(Jeong-Woo Jeon · Mitica Caraiani · Chang-Lin Lee · Yeon-Ho Jeong · Jong-Moon Kim ·
Hyeon-Seok Oh · Sungshin Kim)

Abstract - In this paper, a conceptual design and a detailed design of novel cylindrical magnetic levitation stage is introduced. This is came from planar-typed magnetic levitation stage. The proposed stage is composed of cylinder-typed permanent magnet array and semi-cylinder-typed 3 phase winding module. When a proper current is induced at winding module, a magnetic levitation force between the permanent magnet array and winding module is generated. The proposed stage can precisely move the cylinder to rotations and translations as well as levitations with the magnetic levitation force. This advantage is useful to make a nano patterning on the surface of cylindrical specimen by using electron beam lithography under vacuum. Two methods are used to calculate required magnetic levitation forces. The one is 2D FEM analysis, the other is mathematical modeling. This paper shown that results of two methods are similar. An assistant plate is introduced to reduce required currents of winding module for levitations in vacuum. The mathematical model of cylindrical magnetic levitation stage is used for dynamic simulation of magnetic levitations. A lead-lag compensator is used for control of the model. Simulation results shown that the detail designed model of the cylindrical magnetic levitation stage with the assistant plate can be controlled very well.

Key Words : Cylindrical magLev stage, Magnetic levitations, Roller-typed micro/nano lithography, Printed electronics

1. 서 론

일반적으로 웨이퍼 상에 나노패턴을 만들기 위해 반도체 제조 공정이 사용된다. 반도체 제조 공정은 수백 가지 복잡한 공정으로 이루어져 있으며, 이로 인해 고비용이 소요되고 있다. 최근에 이러한 공정과 비용을 절감할 수 있는 나노임프린트 리소그래피(NanoImprint lithography, NIL)에 대한 관심이 증가하고 있다 [1]. 나노임프린트 리소그래피는 나노패턴을 만들기에 용이하기 때문에, 차세대 리소그래피 기술을 위한 해결방안 중 하나이다. 현재, 나노임프린트 리소그래피는 12인치 웨이퍼까지 적용 가능한 수준이다 [2]. 그러나, 나노임프린트 리소그래피는 대량 생산에 한계가 있다. 이러한 한계를 극복할 수 있는 해결방안 중의 하나로 롤형 나노임프린트 리소그래피가 있다 [3]. 롤형 나노임프린트 리소그래피를 활용하기 위해 나노패턴이 새겨진 원통형 스텝프가 요구된다. 이러한 스텝프는 전자빔 리소그래피와 같은 전통적인 나노 패터닝 방법에 의해 제조될 수 있다 [4, 5]. 그러나, 아직까지 원통 표면의 일부분에만 나노 패턴이 되고 있어서 대량 생산에 적용하기에는 다소 무리가 있다.

전자빔 리소그래피를 이용하여 원통 표면 전체에 나노패턴을 하기 위해서는 진공 중에 원통시편을 나노급 분해능으로 회전 및 이송할 수 있는 특별한 스테이지가 필요하며, 비접촉 베어링 방식을 적용한 스테이지가 좋은 수단 중의 하나가 될 수 있다. 비접촉 베어링 방식으로는 공기 부상 베어링 또는 자기 부상 베어링이 고려될 수 있으며, 특히 자기 부상 베어링은 공기 부상 베어링 보다는 진공 환경에 적용하는 것이 더 적합하다. 그러나 몇 가지 제약 사항이 있다. 자기 부상 베어링은 원통의 축 방향을 따라 움직이는데 한계가 있고, 전자빔 경통과 함께 설치하는데 있어서 기구적인 간섭으로 인해 설치가 용이하지 않다. 베어링 리스형 모터는 진공중 회전을 위한 또다른 수단이 될 수 있다. 그러나 원통시편을 고정밀로 회전하는데 한계가 있다 [7-10]. 본 논문에서는 신개념 원통형 자기 부상 스테이지를 제안하고자 한다. 이 스테이지는 진공 중에서 원통 시편을 부상하는 것은 물론 고정밀로 회전 및 이송을 시킬 수 있는 특징이 있다. 2장에서, 신개념 원통형 자기부상 스테이지에 대한 개념 설계 및 상세 설계를 보이며, 영구자석과 권선모듈 사이에 발생하는 자기 부상력에 대한 원리가 설명된다. 또한, 자기 부상력을 보조하고 권선모듈에 요구되는 전류를 줄이기 위한 보조판이 소개된다. 3장에서, 신개념 원통형 자기부상 스테이지에서 요구되는 자기 부상력을 계산하기 위해 2가지 방법이 소개된다. 첫 번째 방법은 2차원 FEM 해석이고, 다른 방법은 수학적 모델링 방법이다. 이 2가지 방법으로 구한 자기 부상력이 서로 비슷함을 보인다. 4장에서, 시뮬레이션을 위한 동적 모델과 그 결과를 보인다.

* Korea Electrotechnology Research Institute

** Pusan National University

† Corresponding Author : Korea Electrotechnology Research Institute(Busan National University)

E-mail : jwjeon@keri.re.kr

접수일자 : 2012년 10월 12일

최종완료 : 2012년 11월 26일

2. 신개념 원통형 자기부상 스테이지

본 장에서는 신개념 원통형 자기 부상 스테이지의 개념 설계 및 상세 설계를 소개한다. 상세 설계는 자기 부상력의 생성 원리를 보여준다. 또한 자기 부상력을 보조하기 위한 보조판이 소개된다.

2.1 개념설계

그림 1(a)에 기존 평판형 자기부상 스테이지의 기본 개념을 보여 준다 [11, 12]. 이것은 영구자석 배열(가동부)과 전자석 배열(고정부)로 구성된다. 여기서, 영구자석 배열은 Halbach 배열로 조립되고, 전자석 배열은 3상 권선으로 조립된다. 권선에 적절히 인가된 전류에 의해 Halbach 배열과 권선 사이에 자기 반발력이 발생되고, 이 자기 반발력은 부상력은 물론 추진력으로 동시에 활용된다. 그림 1(b)에 신개념 원통형 자기부상 스테이지의 기본 개념을 보였다. Halbach 영구자석 배열은 원통 형상으로 성형될 수 있고, 3상 권선은 반 원통 형상으로 성형될 수 있다. 평판형 자기부상 스테이지와 동일하게, 권선에 적절히 인가된 전류에 의해 원통형 영구자석 배열과 반 원통형 3상 권선 사이에 자기 반발력이 발생된다. 이 자기 반발력은 부상력은 물론 회전력 (평판형 자기부상 스테이지에서 추진력에 해당됨)으로 활용된다.

(a) 평판형 자기부상 스테이지

(b) 원통형 자기부상 스테이지

그림 1 자기부상 스테이지 기본 개념

Fig. 1 Basic Concepts of Mag-Lev Stage

2.2 상세설계

그림 2에 신개념 원통형 자기부상 스테이지의 3차원 모델을 보였다. 이 스테이지는 부상된 후, 비접촉으로 축방향 이송은 물론 축을 중심으로 회전될 수 있다. 원통형 자기부상

스테이지는 원통형 가동부와 2개의 반 원통형 고정부로 구성된다. 가동부는 원통 시판과 2개의 원통형 Halbach 영구자석 배열로 구성되고, 2개의 고정부 위에 놓여진다. 가동부에 있는 2개의 Halbach 영구자석 배열은 원통시판의 양끝단에 각각 조립되고, Halbach 영구자석 배열의 방향은 서로 직교이다. 2개의 반 원통형 고정부는 3상 권선으로 구성된다. 2개의 고정부의 배열 방향도 영구자석 배열과 같이 서로 직교한다. 그림 3에 상세 설계된 원통형 자기부상 스테이지를 보였다. 권선 모듈에 적절히 인가된 전류에 의해 Halbach 영구자석 배열과 3상 권선 사이에 자기 반발력이 발생된다. 이때, 전류의 위상을 적절히 조절하면, 자기 반발력은 부상력은 물론 추진력으로 활용될 수 있다. 여기서 추진력은 영구자석과 권선의 배열 방향에 의해 각각 다르게 발생된다. 그림 3(a)와 (b)에서, 영구자석과 권선의 배열 방향은 회전방향으로 배치되어 있어서, 부상력과 회전력이 동시에 발생된다. 그림 3(c)와 (d)에서, 영구자석과 권선의 배열 방향이 축을 따라 배치되어 있어서, 부상력과 추진력이 동시에 발생된다. 영구자석과 3상 권선 사이에 발생하는 모든 자기력이 복합적으로 작용하여, 가동부는 부상은 물론 회전과 이송을 동시에 할 수 있게 된다.

그림 2 원통형 자기부상 스테이지 3차원 모델

Fig. 2 3D Model of Cylindrical Mag-Lev Stage

2.3 자기부상력

그림 3에서, 검정색 점선으로 표기된 3상 권선은 6개의 권선으로 구성되고, 그림과 같이 I와 J 열로 구성하였다. 자기 반발력 (F_n) 은 3상 권선 모듈에 전류를 적절히 인가하여 영구자석 배열과 3상 권선 모듈 사이에 발생하는 로렌츠 힘이다. 자기 반발력 (F_n) 의 방향은 3상 권선 모듈의 배치 방향에 의해 결정될 수 있으며, I 와 J 권선 모듈의 방향은 $\pm 30^\circ$ 이다. 자기 반발력 (F_n) 은 자기 부상력 (F_z) 와 자기 안내력 (F_y) 로 나뉘질 수 있다. 그림 3(a)와 (b)에서 영구자석과 3상 권선의 회전방향 배열로 인해 자기 반발력 (F_n) 의 직각 방향 힘 (F_r) 이 발생될 수 있으며, 이 힘으로 가동부는 축을 중심으로 회전될 수 있다. 그림 3(c)와 (d)에서, 영구자석과 3상 권선의 직선방향 배열로 인해 자기 반발력 (F_n) 의 직각 방향 힘 (F_x) 이 발생될 수 있으며, 이 힘으로 가동부는 축 방향으로 이송될 수 있다.

그림 3 3차원으로 설계된 원통형 자기부상 스테이지
Fig. 3 3D designed of Cylindrical Mag-Lev Stage

2.4 자기부상 보조력

자기 부상력은 3상 권선 모듈에 인가된 전류의 크기에 의해 제어될 수 있다. 여기서, 고 전류는 권선에 고온을 야기할 수 있으며, 진공에 불리하다. 왜냐하면, 열은 진공을 통해 전달될 수 없기 때문이다. 본 연구에서, 권선의 발열 문제를 줄이기 위해 자기부상 보조판이 그림 4에 보여진 것과 같이 고려된다. 이 판은 영구자석의 상부에 위치되고, 보조판과 영구자석 사이에 발생하는 흡인력이 발생되어 원통 가동자를 부상시키는데 도움을 줄 수 있다. 이 흡인력은 보조판과 영구자석사이의 거리에 의해 조절될 수 있다. 3상 권선 모듈에 인가된 전류는 이 흡인력으로 인해 줄일 수 있게 된다. 여기서 흡인력의 크기는 요구되는 총 부상력의 절반으로 고려하였다.

그림 4 자기부상 보조판 개념
Fig. 4 Concepts of Mag-Lev Assistant Plate

3. 원통형 자기부상 스테이지의 모델링

본 장에서는 자기 부상력 계산을 위해 2가지 방법이 소개된다. 첫 번째 방법은 2차원 FEM 해석이고, 두 번째 방법은 수학적 모델링이다. 두 가지 방법의 결과를 서로 비교 하였다.

3.1 원통형 자기부상 스테이지의 전자기 FEM 해석

원통형 자기부상 스테이지의 전자기 FEM 해석 모델을 그림 5(a)에, 자기 부상력 및 회전 각도에 따른 수평력의 해석 결과를 그림 5(b)에 각각 보였다. 부상력은 3상 권선 전류의 크기에 비례한다. 그러나 이 힘은 영구자석 배열의 회전 각도에 따라 변화된다. 왜냐하면 자속밀도가 회전 각도에 따라 권선 모듈의 끝에서 변화하기 때문이다. 또한, 수평력도 같은 이유로 변화된다. FEM 해석에 적용된 파라미터를 표 1에 보였다. 만일, 3상 전류로 위상 0도일 때 1 [A]가 인가된다면, 그림 5(b)로부터 부상력 밀도 (FD_z)는 약 333 [N/m] 이다. 부상력은 부상력 밀도에 권선 모듈의 길이를 곱하여 구해질 수 있다. 이때, 그 길이는 권선 모듈의 유효 길이만 고려되어야 한다. 회전부의 권선 형태를 그림 6에 보였다. 권선의 총 길이는 $L1$ (= 104.36 [mm]) 이지만, 자기 부상력 발생을 위한 권선 형태에 따른 유효 길이는 $L2$ (= 76.28 [mm]) 이다. 유효한 자기 부상력 $[F_z]$ 는 다음 식 (1)과 같이 구해진다.

$$F_z = FD_z \cdot \frac{L2}{L1} \cdot L3 \quad (1)$$

그림 5 원통형 자기부상 스테이지의 2D 전자기 FEM 해석
Fig. 5 2D FEM Analysis of Mag-Lev Assistant Plate

표 1 FEM 해석 파라미터

Table 1 Parameters of FEM Analysis

Item	Value
Thickness of PM	10 [mm]
Air Gap	0.95 [mm]
Winding Fill Factor	0.53
Current Density	5 [A/mm ²]
Diameter of Winding	0.7 [mm]
Magnet Remanence	1.465 [T]
Coercive Force	1142 [kA/m]
Number of Turns	180
Phase	3

그림 6 회전부 권선 형태 [단위: mm]

Fig. 6 Shape of Winding of Rotation Part [Units: mm]

여기서, L_3 은 축방향으로의 회전부 영구자석의 총 길이이고, 그 값은 261.8 [mm]이다. 권선 형태에 따른 유효비 (L_2/L_1)은 약 0.731이다. 회전부의 유효 총 자기 부상력 (F_z)은 약 63.728 [N]이다. 또한, 직선부의 총 자기 부상력도 회전부와 동일하다. 왜냐하면, 직선부의 유효 길이가 회전부 권선의 유효길이가 같도록 설계되었기 때문이다. 회전부와 직선부의 총 자기 부상력의 합은 약 127.456 [N]이다.

그림 7 보조판과 영구자석 사이의 2D 전자기 FEM 해석
Fig. 7 2D FEM Analysis between Assistant Plate and PM

3.2 보조판의 전자기 FEM 해석

회전부의 영구자석과 보조판 사이의 자기장 해석 모델을 그림 7(a)에 보였고, 자기력을 위한 해석결과를 그림 7(b)에 보였다. 여기서, 보조판은 순철을 고려하였고, 판의 두께는 5 [mm], 판의 길이는 200 [mm]이다. 전자기 FEM 해석을 위한 파라미터는 앞의 표 1과 같다. 그림 7(b)에서, 자기력 밀도 (이것은 흡인력임)는 보조판의 위치가 영구자석으로부터 멀리 떨어질수록 감소된다. 회전각도 0도에서의 자기력 밀도는 15도에서와 거의 동일하다. 회전각도에 따른 자기력 밀도의 변화가 작음을 알 수 있다. 보조판과 영구자석 사이의 자기 부상력은 가동자 총 무게의 50%까지 부담하도록 결정한다. 왜냐하면, 만일 이 부담이 가동자의 총 무게의 50%를 넘어가면, 제어가 불안정할 때 가동자가 보조판의 하부에 붙을 수 있기 때문이다. 보조판과 영구자석의 거리가 20 [mm]일 때, 자기력 밀도는 약 277.69022 [N/m]이다. 축방향으로의 회전부 영구자석의 총 길이 (L_3)는 261.8 [mm]이므로, 보조판에 의한 회전부의 자기 부상력은 약 72.6993 [N]이 된다. 보조판은 회전부와 직선부에 각각 적용하기 때문에, 회전부와 직선부 보조판에서 발생하는 총 자기 부상력은 145.3986 [N]이다. 가동자의 총 무게를 약 30 [kg]으로 예상되므로, 보조판과 영구자석의 거리를 20 [mm]로 하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

3.3 원통형 자기부상 스테이지의 수학적 모델링

원통형 자기부상 스테이지에서 발생하는 자기 반발력은

영구자석과 3상 권선의 사이에 발생하는 로렌즈 힘이다. 이 힘은 앞의 그림 3과 같이 자기 반발력 (F_n) 과 그 직각 방향 힘 (F_r 과 F_z) 으로 구성된다. 자기부상 스테이지의 한 피치에 대한 이들 힘의 공식은 다음과 같다 [11].

$$\begin{bmatrix} F_r \\ F_n \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \mu_0 M_0 \eta_0 N_m G e^{-\frac{2\pi}{l} z_0} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$G = \frac{\sqrt{2\omega l^2}}{\pi^2} (1 - e^{-\frac{2\pi}{l} \Gamma}) (1 - e^{-\frac{2\pi}{l} \Delta}) \quad (3)$$

여기서, $\mu_0 M_0$ 는 자기 레머넌스(magnet remanence) 이고, 그 값은 1.465 [T] 이다. η_0 는 턴 밀도(turn density)이고, 그 값은 $1.6026e^6$ [Turn/mm²] 이다. N_m 는 유효한 영구자석 피치의 수이고, 그 값은 1 이다. ω 는 영구자석 한 피치의 길이이고, 그 값은 52.18 [mm] 이다. l 은 3상 권선의 한 피치의 길이이고, 그 값은 52.18 [mm] 이다. Γ 는 영구자석의 두께 이고, 그 값은 10 [mm] 이다. Δ 는 권선의 두께이고, 그 값은 14.04 [mm] 이다. z_0 는 부상 간극이고, 그 값은 0.95 [mm]이다. 자기부상 스테이지의 한 피치에 대한 자기 반발력 (F_n) 과 그 직각 방향 힘 (F_r 과 F_z) 은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} F_r \\ F_n \end{bmatrix} = 12.1695 \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

만일, 입력전류 (i_q, i_d)의 값이 각각 1 [A] 이면, 자기 반발력 (F_n) 과 그 직각 방향 힘 (F_r 과 F_z) 는 12.1695 [N] 이다. 자기 반발력 (F_n) 은 수직력 (F_z) 와 수평력 (F_y) 로 구성되며, 다음 식과 같다.

$$\begin{bmatrix} F_z \\ F_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_n \cdot \cos\theta \\ F_n \cdot \sin\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, θ 는 자기 반발력의 각도이고, 그 값은 30도이다. 수직력 (F_z) 와 수평력 (F_y) 는 각각 약 10.5391 [N] 과 약 6.0847 [N] 이다. 만일, 권선 형태에 따른 유효비 ($L2/L1 = 0.731$) 가 고려된다면, 이 값들은 각각 약 7.7041 [N] 과 약 4.4479 [N] 로 수정된다. 축방향으로의 회전부 영구자석의 총 길이 ($L3$) 는 261.8 [mm] 이므로, 여기에 해당하는 권선 모듈의 수는 I 와 J 열 각각 5개이고, 여기에 직선부를 고려하면, 원통형 자기부상 스테이지에서 발생하는 수직력 (F_z) 의 총합은 약 154.0814[N] 이다. 계산된 자기 수직력 (F_z) 는 앞의 3.1에서 도출한 전자기 FEM 해석 결과와 크게 다르지 않다.

4. 시뮬레이션 결과

본 장에서는, 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 동적 모델에 대하여 소개된다. 그리고 Lead-Lag 보상기가 자기부상 제어를 위해 사용되고, 자기부상 시뮬레이션 결과를 보인다.

4.1 동적 모델

자기부상 시뮬레이션을 위한 동적 모델을 그림 8에 보였

다. 부상 높이 (z) 는 Lead-Lag 보상기, 보조관에 의한 흡인력 계산 모델, 자기부상 스테이지 모델로 각각 피드백 한다. Lead-Lag 보상기 출력 (I_d) 은 자기부상 스테이지 모델로 입력된다.

그림 8 동적 시뮬레이션 구성

Fig. 8 Configurations of Dynamic Simulation Model

원통형 자기부상 스테이지의 동적 모델은 다음 식과 같다.

$$m\ddot{z} = F_z(z, I_d) + F_A(z) - mg \quad (6)$$

여기서, m 은 가동자의 총 무게이고, 그 값은 30 [kg] 이다. z 는 부상 높이이고, I_d 는 3상 권선의 입력전류이고, $F_z(z, I_d)$ 는 식(5) 에서 영구자석과 권선모듈 사이에 발생하는 수직력 (F_z)의 총합이다. 이때, 총 수직력 ($F_z(z, I_d)$) 는 회전부와 직선부의 각 10개 권선 모듈에서 발생하는 수직력의 합이다. $F_A(z)$ 는 회전부와 직선부의 보조관과 영구자석 사이에서 각각 발생하는 흡인력의 총합이고, g 는 중력 가속도이다. 보조력 ($F_A(z)$) 는 그림 7(b)에 보인 전자기 FEM 해석 결과를 Matlab의 커브피팅 알고리즘으로 구하였 으며, 다음식과 같이 표현된다.

그림 9 시스템의 보드선도

Fig. 9 Bode Plot of System

$$F_A(z) = 4.948e^{-238.1z} + 24.02e^{11.78z} \quad (7)$$

여기서 총 보조력은 $F_A(z)$ 의 2배이다. 왜냐하면, 이 보조력은 회전부는 물론 직선부에서도 동시에 발생되기 때문이다. 자기부상 제어에 적용된 Lead-Lag 보상기는 다음식과 같다.

$$C(s) = K \frac{s+A}{s+B} \frac{s+C}{s+D} \quad (8)$$

여기서, $K = 1.051 \times 10^6$, $A=38.7857$, $B=1252.3954$, $C=2.9483$, $D=0.0013$ 로 정하였으며, 정상상태에서의 제어를 포함한 페루프 시스템의 선형화 결과는 다음 식과 같다.

$$G(s) = \frac{6.054 \times 10^5 (s + 38.79)(s + 2.948)}{(s + 41.02)(s + 3.061)(s^2 + 1.208s + 5.513 \times 10^5)} \quad (9)$$

페루프 시스템과 개루프 시스템의 보드선도를 그림 9에 각각 보였다. 그림에서와 같이 선형화된 페루프 시스템이 안정함을 보였다. 이때, 페루프 시스템의 크로스오버 주파수 (crossover frequency)는 356.6469 [rad/sec] 이고, 위상 여유 (phase margin)는 134.9171 [deg] 이다.

4.2 시뮬레이션 결과

동적모델에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 10에 보였다. 기준 부상 높이 (Ref. Z) 는 950 [um] 까지 점진적으로 증가시켰다. 왜냐하면, 부상 초기에 발생하는 과도상태를 최소화하기 위함이다. 그림 10(a)에서, 실제 부상 높이 (Real Z) 가 기준을 잘 추종하고 있음을 알 수 있다. 그림 10(b)에서, 오차는 작은 범위로 유지됨을 보이며, 그림 10(c)에서, 보조판에서 발생하는 흡인력은 약 145 [N]에서 약 166 [N]으로 변화되고, 자기부상 스테이지에서 발생하는 부상력은 0 [N]에서 약 128 [N]으로 증가되어 안정화됨을 보였다. 결론적으로 가동자를 부상시키기 위해 요구되는 총 부상력이 약 294 [N] (= 30 [kg] x 9.8 [m/s²]) 임을 확인하였다. 그림 10(d)에서, 한 개의 권선 모듈의 전류는 부상 완료 후 0.83 [A] 부근에서 유지되고 있으며, 보조판에서 발생하는 흡인력이 부상시 권선 모듈에 요구되는 전류를 줄여주는 데 도움이 됨을 확인 하였다. 이 결과는 실제 시스템 구성시 앰프의 성능을 결정하는데 사용될 수 있다.

(a) 부상 높이

(b) 오차

(c) 부상력

(d) 권선 전류

그림 10 시뮬레이션 결과

Fig. 10 Simulation Results

5. 결 론

본 논문에서 신개념 원통형 자기부상 스테이지를 제안하였다. 이 스테이지는 진공 중에 원통을 부상은 물론 고정밀로 회전 및 이송할 수 있는 특징이 있다. 이러한 장점은 진공 환경에서 전자빔 리소그래피를 이용한 원통시편 표면상에 나노패턴을 만들기 위해 유용하다. 나노패턴이 되어 있는 원통시편은 대량생산을 위한 롤 형태의 나노 임프린트 리소그래피에 적용될 수 있다. 본 논문에서, 요구되는 자기부상력을 계산하기 위해 두 가지 방법이 사용되었다. 첫 번째 방법은 2차원 FEM 해석이고, 두 번째 방법은 수학적 모델링 방법이다. 두 가지 방법으로부터 구한 자기부상력이 서로 비슷함을 확인하였다. 수학적 모델은 Lead-Lag 보상기와 함께 동적 시뮬레이션을 위해 사용되었다. 권선 모듈에 요구되어지는 전류를 줄여서, 진공 중 동작시 발생하는 열 문제를 최소화하기 위해, 영구자석의 상부에 보조판을 추가하는 것을 추가로 제안하였다. 시뮬레이션 결과는 보조판을 포함한 신개념 원통형 자기부상 스테이지가 Lead-Lag 보상기에 의해 안정하게 부상되고 제어될 수 있음을 보였다. 향후, 제안된 신개념 원통형 자기부상 스테이지를 테스트 벤치로 제작하여 시험할 계획이다.

References

- [1] L Jay Guo, "Recent progress in nanoimprint technology and its applications", J. Phys. D: Appl. Phys. 37, pp.123-141, 2004.

- [2] C.M. Sotomayor Torres, S. Zankovych, J. Seekamp, A.P. Kam, C. Clavijo Cedeno, T. Hoffmann, J. Ahopelto, F. Reuther, K. Pfeiffer, G. Bleidiessel, G. Gruetzner, M.V. Maximov, B. Heidari, "Nanoimprint lithography: an alternative nanofabrication approach", Materials Science and Engineering C 23, pp.23-31, 2003.
- [3] Shuhuai Lan, Hyejin Lee, Jun Ni, Soohun Lee, Moongu Lee, "Survey on Roller-type Nanoimprint Lithography (RNIL) Process", ICSMA 2008, pp.371-376, April 2008.
- [4] Shih Chun Tseng, Wen Yang Peng, Yi Fan Hsieh, Ping Jen Lee, Wen Lang Lai, "Electron Beam Lithography on Cylindrical Roller", Journal Microelectronic Engineering, Vol. 87, Issue 5-8, pp.943-946, May 2010.
- [5] Noriyuki Unno, Jun Taniguchi, and Kiyoshi Ishikawa, "Fabrication of a seamless roll mold using inorganic electron beam resist with postexposure bake", Journal of Vacuum Science & Technology B, Vol. 29, Issue 6, October 2011.
- [6] Shinshi Tadahiko, Zhang X, Shimokobe Akira, "Realization of High Precision Rotation Using Magnetic Bearing", Machine Design and Tribology Division Meeting in JSME, Vol. 3, pp.167-168, 2003.
- [7] Zhenyao Xu, Fengge Zhang, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn, "Design and Analysis of Novel 12/14 Hybrid Pole Type Bearingless Switched Reluctance Motor with Short Flux Path", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.7, No.5, pp.705-713, 2012.
- [8] Franz Zurcher, Thomas Nussbaumer, Johann W. Kolar, "Principles of Magnetic Levitation Force and Motor Torque Generation by Superposition of Harmonics in Bearingless Brushless Motors", IECON 2009 Proceedings, pp.1242-1247, 2009.
- [9] Thomas Reichert, Johann W. Kolar, Thomas Nussbaumer, "Design Study for Exterior Rotor Bearingless Permanent Magnet Machines", Energy Conversion Congress and Exposition(IECE), pp.3377-3382, 2011.
- [10] P. Kascak, T. Dever, R. Jansen, A. Nagorny, and K. Loparo, "Motoring Performance of a Conical Pole-Pair Separated Bearingless Electric Machine", in the Conference Record of IEEE EnergyTech, May 2011.
- [11] Won-jong Kim, David L. Trumper, Jeffrey H. Lang, "Modeling and Vector Control of Planar Magnetic Levitator", IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 34, No. 6, pp.1254-1262, 1998.
- [12] Jeong-Woo Jeon, Mitica Caraiani, Hyeon-Seok Oh, Sungshin Kim, "Experiments of a Novel Magnetic Levitation Stage for Wide Are Movements", Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 7, No. 4, pp.558-563, 2012.

저 자 소 개

전 정 우 (全 廷 佑)

1994년 영남대학교 전기공학과 졸업, 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2006년 부산대학교 전기공학과 박사 수료, 1996년~현재 한국전기연구원 선임 연구원.

Tel : 055-351-3871

E-mail : jwjeon@keri.re.kr

Mitica Caraiani

1976년 Politecnica 공과대학교 졸업, 2007년~현재 한국전기연구원 선임연구원.

Tel : 055-351-3871

E-mail : miticacaraiani@gmail.com

이 창 린 (李 彰 麟)

2006년 금오공과대학교 전파통신공학과 졸업(석사), 2011년 부산대학교 나노융합 기술학과 박사수료, 2008년~현재 한국전기연구원 연구원.

Tel : 055-351-3871

E-mail : leechangrin@gmail.com

정 연 호 (鄭 然 鎬)

1993년 충남대학교 전기공학과 졸업, 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사) (전기기기 및 재료 전공), 1996년~현재 한국전기연구원 책임연구원.

Tel : 055-280-1488

E-mail : yhjeong@keri.re.kr

김 종 문 (金 鍾 文)

1988년 인하대학교 전기공학과 졸업, 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2005년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1990년~현재 한국전기연구원 책임연구원.

Tel : 055-351-3872

E-mail : jmkim@keri.re.kr

오 현 석 (吳鉉錫)

1982년 부산대학교 기계공학과 졸업,
1984년 동 대학원 기계공학과 졸업(석사), 1998년 Braunschweig 공과대학교 졸업(박사), 2006년~현재 한국전기연구원 책임연구원 (밀양나노센터 센터장)

Tel : 055-351-3870

E-mail : hallo_oh@keri.re.kr

김 성 신 (金成信)

1984년 연세대학교 전기공학과 졸업,
1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1996년 미국 Georgia Tech 졸업(박사), 1997년~1998년 Appalachian Electronics Instruments Inc. 협동연구원, 1999년~현재 부산대학교 전자전기공학부 교수

Tel : 051-510-2374

E-mail : sskim@pusan.ac.kr