

비접촉 회전 스테이지에의 구동 원리로서의 횡자속 원주형 유도 방법

정광석[#], 김효준^{*}

Transverse flux circumferential induction method
as a driving principle of the contact-free revolving stage

Kwang Suk Jung[#] and Hyo Jun Kim^{*}

ABSTRACT

Compared with linear induction principle, the transverse flux circumferential induction principle is suggested as a driving mechanism of the revolving stage, which can rotate contactlessly without any supporting structure. The stage realizes the integrated motion of levitation, rotation, and planar perturbation, using the two-axis forces, normally directed force of the air-gap and tangential force, of the induction drivers mounted on the stator uniformly. In this paper, the force generating mechanism of the stage is described in detail. First, the various core shapes generating the transverse flux are analyzed to guarantee the proper thrust force. And the vector force intensity of the circumferential induction driver constituting the stage is compared with that of the linear induction driver. Especially it is shown that the magnetic force of the suggested system can be modeled with the linear equivalent model, including the test verification.

Key Words : Electromagnetic analysis (전자기 해석), Integrated driver (통합 구동기), Revolving stage (회전 스테이지), Transverse flux circumferential induction principle (횡자속 원주형 유도 원리)

1. 서론

고전적인 Multi-coordinate drives(MCD)는 대개 직렬로 연성화 된 몇몇의 드라이브 모듈로 구성되어 있다. 이러한 장비 Set-up 에서 필요한 드라이브 모듈의 수는 시스템이 구현하려는 자유도와 일치하며 회전-선형 운동 변환기를 사용하여 필요한 선형 운동을 구현하기도 한다. 이러한 MCD 는 상업적으로 이용 가능하며, 가격면에서 효율적인 요

소들로 구성되어있는 반면에 구동 변수가 기계 구조물에 강한 의존 특성을 보이고 있기 때문에 정밀도의 제한을 갖는다. 이러한 문제는 잘 알려진 기능적/공간적 통합 원리(Principle of functional and spatial integration)를 이용하여 전체 시스템을 최적화하는 메카트로닉스적인 설계 접근법에 의해 혁신적으로 해결될 수 있다.¹

이러한 접근 방법을 갖는 MCD, 특히 초정밀 스테이지는 이미 마이크로 오토메이션, 계측, 의생

접수일: 2005 년 1 월 25 일; 게재승인일: 2005 년 8 월 9 일

교신저자: 충주대학교 기계공학과

E-mail ksjung@chungju.ac.kr Tel. (043) 841-5135

* 삼척대학교 기계공학과

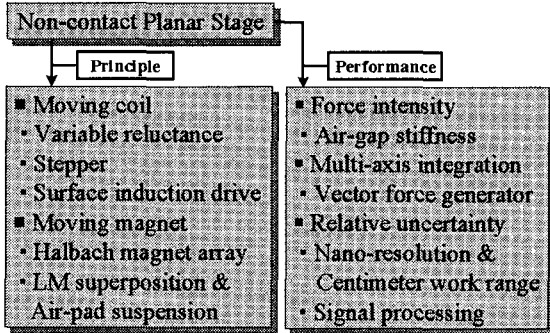


Fig. 1 Focused issues of the existing contact-free planar stages

명 분야의 급진전에 큰 매개체가 되고 있지만 나노급 분해능에 더해 대부분 수 $\mu\text{m}\sim\text{cm}$ 의 평면 작업 영역을 갖는 평면 스테이지에 연구 역량이 집중되고 있다.² 지금까지 개발되어온 다양한 스테이지의 개발 방향을 도식화한 Fig. 1 에서도 알 수 있듯이 초기에 벡터력 발생의 물리적 원리에 집중되어왔던 경향이²⁻⁷ 근자에 들어 경쟁관계에 있는 다른 구동기와의 차별적 우월성 확보를 위해 횡방향으로의 높은 대역폭⁸, 다축 통합⁵, 향상된 상대 불확도의 확보² 등 시스템 성능 향상쪽으로 바뀌어 가고 있다. 특히 선형 구동 능력에 추가로 30도 안팎의 회전(보정차원의 여자유도)까지 구현 가능한 개발 사례들도 발표/적용되고 있지만⁹ 역의 개념으로 공간상에 부상되어 360도 회전이 가능하면서 보정 차원의 평면 여자유도를 갖는 스테이지의 개발 사례들은 거의 전무하다. 이는 기존 시스템의 경우 스테이지와 연동되는 자기 요소와 고정자에 안착되어있는 능동 코일 간의 상호 접합 영역의 제한 때문에 구동 원리상 회전 운동의 확장이 불가능한 접합 구조이기 때문이다. 따라서 저자들은 기존 평면 스테이지가 갖는 회전 운동의 제약을 극복하기 위해 횡자속 원주형 유도 원리를 적용한 비접촉식 회전 스테이지를 제안한다. 제안된 시스템은 공간상에 부상되어 회전할 수 있으며, 반경 방향으로의 섭동이 가능한 부상, 회전, 평면 운동 통합 시스템이다.

본 논문에서는 제안된 시스템의 설계 변수 선택을 위해 스테이지를 구성하는 단위 힘 발생 요소인 횡자속 원주형 유도 모터(TFCIM; Transverse flux circumferential induction motor)를 대상으로 추력

향상을 위한 최적의 코어 형상을 도출하고 원형 배열의 타당성을 검증한다. 또한 기 수행된 선형 등가 모델인 횡자속 선형 유도 모터(TFLIM; Transverse Flux Linear Induction Motor)의 모델링을 기초로 기하학적인 곡률 반경을 고려한 자기력 정량화를 수행하고 실험 결과와 비교한다. 특히 기존 공극 센서를 이용하여 스테이지 회전량을 비접촉으로 측정할 수 있는 방법을 제안한다.

2. Force Characteristics of Transverse Flux Induction Driver

기존 선형 유도 모터의 단 효과(Edge effect)를 제거하기 위해 제안된 TFLIM 의 일, 이차측 사이에는 공극 방향으로의 자기 흡인력과 접선 방향으로의 로렌즈력이 발생한다. 본 장에서는 이러한 유도 원리를 회전 스테이지에 적용하기 앞서 일차측 코어의 형상에 따른 자기력 변화를 고찰한 후 추력 특성 향상을 위한 형상을 도출한다.

2.1 Layout of TFLIM and TFCIM

단위 코어가 병렬로 구성된 일차측(Primary)과 전도체, 계철(Back-yoke)을 이차측(Secondary)으로 갖는 TFLIM 의 힘 발생 선도는 Fig. 2(a)와 같다. 전술한 것처럼 단 효과를 제거하기 위해 코어에 의한 자기장의 폐회로는 이동 자장과 직교하며, 또한 일차측은 일반적으로 개별적인 전자석으로

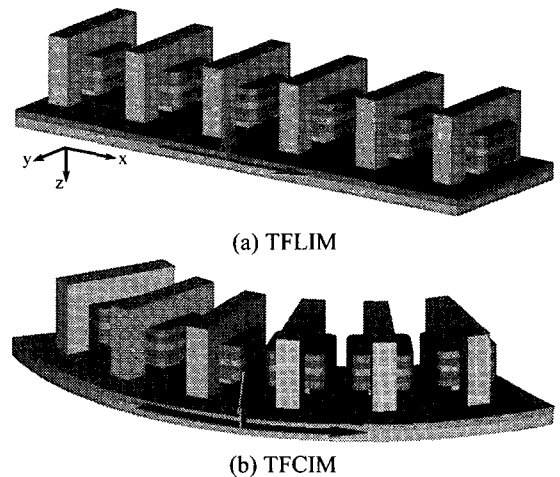


Fig. 2 Force diagram of TFLIM and TFCIM

구성되어있다. 따라서 이러한 특성이 부상력과 추력을 동시에 제어할 수 있는 가능성을 제공한다. 이와 대별되어 회전 스테이지를 구성하기 위해 제안된 TFCIM 은 앞서 TFLIM 의 일차측 전자석을 원주 방향으로 정렬시킨 형태로 힘 선도는 Fig. 2(b)와 같다. 그러나 그림에서처럼 실제 발생하는 힘은 회전력이 아니라 후술하는 것처럼 각 전자석을 연결하는 방향 성분을 갖는 여러 힘의 벡터합일 뿐이다. 이러한 정렬이 갖는 장점을 논하기에 앞서 다음 절에서는 TFLIM 의 일차측 코어 형상 변화에 따른 자기력 변화 특성을 살펴보고 바람직한 형상을 제안한다.

2.2 Force variations for core shapes of TFLIM

TFLIM 의 일차측을 형성하는 코어 형상을 논의하기 위해 코어에 의한 횡자속 형성을 제한 조건으로 하여 Fig. 2(a)의 형상을 Case I, Fig. 3(a)와 같이 단위 전자석이 연계되어있는 형상을 Case II, Fig. 3(b)와 같이 횡자속 발생에 더해 이동 자장쪽으로 닫힌 회로를 갖는 형상을 Case III 이라 하자. 이러한 코어 형상에는 묘사된 경우와 다른 형태들이 존재할 수 있으나 주된 폐회로 형상만을 고려하면 제시된 세 범주 안에 모두 포함된다. 3상, 2극의 일차측을 대상으로 동일한 입력조건 하에서 상업용 FEM Tool 인 ANSYS 를 이용하여 수행한 힘 특성 결과는 Fig. 4 와 같다. 세 경우에 대한 추력, 반발력, 흡인력의 최대 값을 1로 하여 그 상대적인 크기를 비교하였다. 반발력의 크기는 높은 인가 주파수, 이로 인한 큰 슬립 주파수를

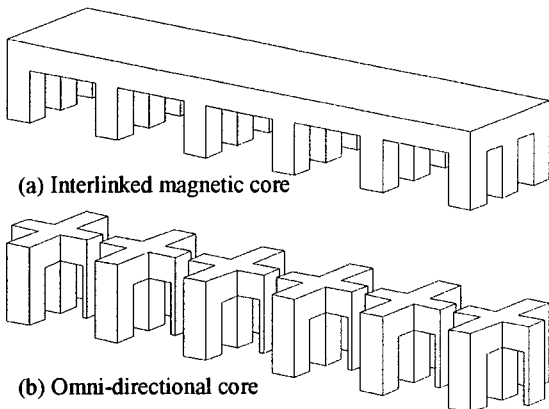


Fig. 3 Various core shapes of TFLIM

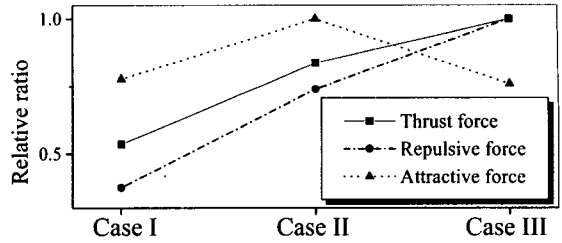


Fig. 4 Force variation for three types of core shapes

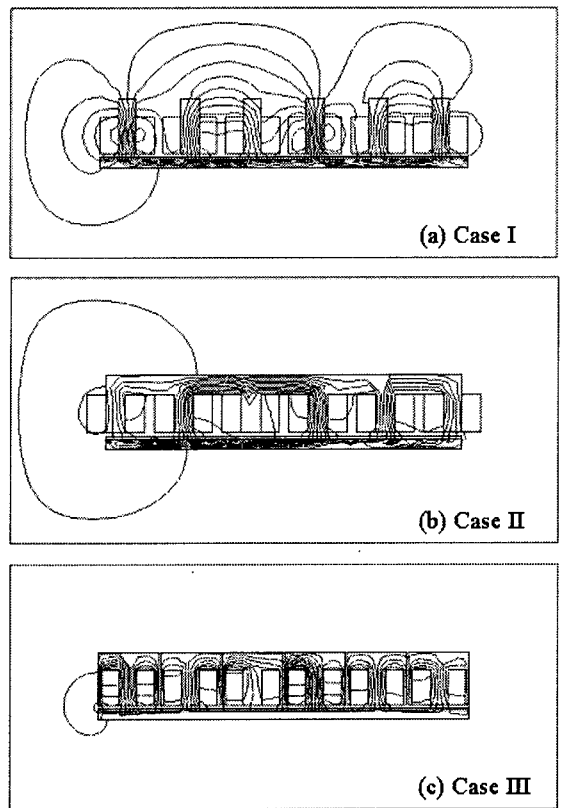


Fig. 5 Visualized closed-magnetic path for applied current of three phase, two pole

갖는 일반적인 고속 유도 모터의 경우가 아니기 때문에 그 절대량은 흡인력에 비해 상대적으로 미약하지만 정성적인 비교를 위해 추가하였다.

주요한 힘 성분인 추력은 Case III가 가장 크고 이에 비해 흡인력은 Case II가 가장 큰 것을 알 수 있다. 흡인력의 경우 연계용 철로 인해 닫힌 폐회로 성분이 많은 Case II의 철심 끝단에서의

자기 강도가 가장 큰 것에 기인하는 것을 예측할 수 있다. 그러나 추력의 경우엔 이러한 자기 강도 뿐만 아니라 이차측에 유기되는 와전류에 크게 의존하기 때문에 Case II 의 경우 연계용 철로 인한 위상 전이가 상대적으로 크고 따라서 Case III 가 가장 큰 것으로 판단된다. Case I 에 대한 폐 자기 회로를 묘사하는 Fig. 5 에서와 같이 $\pi/3$ 의 위상차를 갖는 각각의 단위 전자석은 인접한 요소뿐만 아니라 부분적으로 원거리에 있는 요소와도 폐회로를 구성한다. 이러한 특성은 단일 개체로 이루어진 이차측에서 더욱 두드러지며, 따라서 이차측에 유기된 와전류에 의한 자장과 $2\pi/3, \pi$ 의 위상차를 갖는 대항 요소 사이에는 브레이크 힘 특성을 갖는 추력에 반하는 힘이 형성된다. 같은 이유로 와전류에 의한 반발력도 Case III 가 가장 큰 것으로 보인다.

그러나 흡인력의 절대 크기는 추력에 비해 대단히 크고 따라서 Case II 에 비교하여 약 25% 정도인 Case III 의 흡인력 감소는 문제가 되지 않는다. 결국 추력 특성의 향상을 위해 일차측 코어는 Case III 와 같은 횡자로와 이동 자장으로의 부분적인 자로를 갖는 형태로 한다.

3. TFCIM as a principle of the revolving stage

본 장에서는 전술한 것처럼 TFLIM 을 원주방향으로 정렬한 형태를 갖는 TFCIM 을 회전 스테이지의 구동 요소로 할 경우 스테이지의 조합 힘 특성과 공극 사이의 자기력 모델링 방법에 관해 살펴본다.

3.1 Arrangement of TFCIM

전 장에서와 같은 일차측 코어 형태를 갖는 TFCIM 을 회전 스테이지의 기본 구동 요소로 선정하여 공간상에 부상되어 회전할 수 있는 운동을

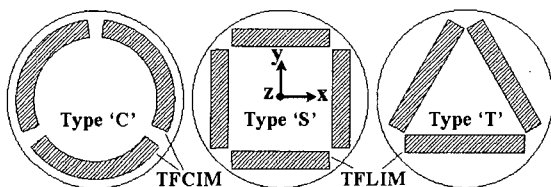


Fig. 6 Arrangements of basic force elements for the revolving stage

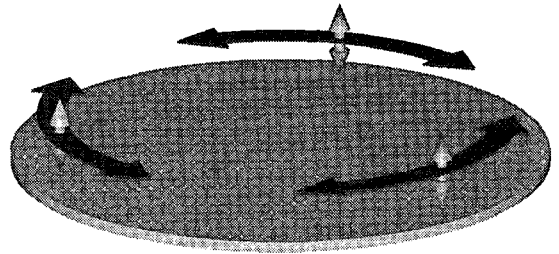


Fig. 7 Resulting force diagram of Type 'C' arrangement

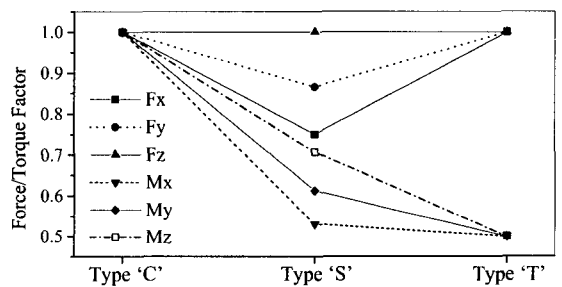


Fig. 8 Resulting six d.o.f force characteristics for three types of arrangements

구현하기 위해 Fig. 6 의 Type 'C'와 같이 TFCIM 을 배치한다. 이러한 정렬은 결국 Fig. 7 과 같은 세 개의 회전력과 세 개의 수직력을 생성하며, 결국 6 자유도의 힘 제어 성분을 갖게 한다.

이러한 정렬에 추가하여 회전 운동을 구현하기 위한 일반적인 방법으로 기존의 LIM 을 조합한 Type 'S'와 Type 'T' 역시 고려할 수 있다. 하나의 기본 요소가 갖는 추력과 수직력의 크기가 일정하다고 가정할 경우 조합된 힘에 의해 스테이지에 인가되는 6 축 힘 특성을 고찰하면 Fig. 8 과 같은 결과를 얻을 수 있다. 네 개의 요소를 갖는 Type 'S'의 조합 특성이 가장 우수할 것으로 예상되지만 교차 축에 전혀 기여를 못하는 90 도 배열로 인해 6 축 힘, 모멘트 모두 Type 'C'에 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 또한 Type 'T'의 경우 힘 특성은 Type 'C'와 동일하지만 배열상의 이유로 짧은 모멘트 암으로 인해 모멘트 특성은 Type 'C'의 50%에 불과한 것을 알 수 있다. 따라서 비접촉 회전형 스테이지 구현을 위한 힘 구동 요소로 TFCIM 을 이용한 정렬이 가장 바람직한 것을 알 수 있다.

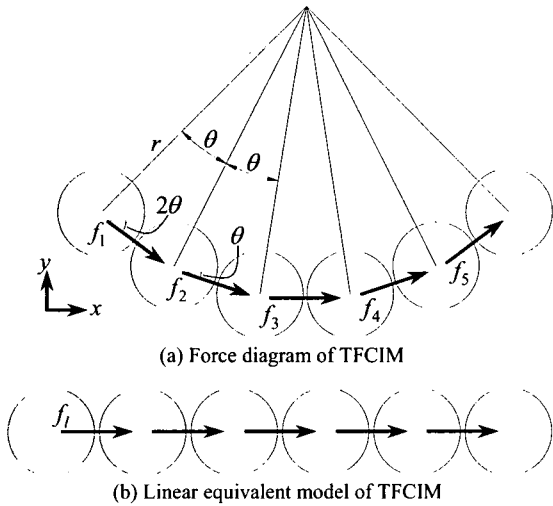


Fig. 9 Thrust force diagram of TFCIM consisting of cores with the omni-directional magnetic flux and its linear equivalent model

3.2 Linear equivalent modeling of TFCIM

전 절에서 세 가지 형태의 정렬에 따른 힘 특성을 논의할 때 각 기본 요소의 추력, 수직력 크기는 동일하다고 가정하였다. 그러나 TFCIM의 굴곡으로 인해 TFLIM에 비해 그 크기의 저감이 예상된다. 본 절에서는 TFCIM의 선형 등가 TFLIM을 이용하여 그 크기를 모델링 한다.

우선 3 상, 2 극의 TFCIM의 추력 선도는 Fig. 9(a)와 같이 표현할 수 있다. 간략히 표현하면 두 EM 사이의 위상 차로 추력이 형성되는데 이러한 힘은 다상 입력에 따라 회전 방향으로 이동 자장이 형성되면서 일반적으로 알려진 선형 모터의 추력으로 나타난다. 따라서 시 평균(Time-averaging) 값을 고려하면 두 요소 사이의 힘 f_i 가 동일하다고 가정할 수 있으며 전체 추력 F_x 는 다음과 같이 표현된다.

$$\sum F_x = f_i (2 \cos 2\theta + 2 \cos \theta + 1) \quad (1)$$

이 때 TFCIM과 원호 길이가 동일한 선형 등가 모델을 Fig. 9(b)와 같이 가정하면 전체 추력은 $5F_i$ 이 된다. 초기 모델로 코어 반경 3cm, 원호 길이 18.85cm, 인가 전류 10^6 A/m, 슬립 주파수 10Hz인 경우 3 상, 2 극의 일차측에 대한 모의 시험을

수행하면 Fig. 9(a)는 Fig. 9(b)의 91%의 결과를 낸다. 따라서 초기 TFCIM의 $\theta = 18^\circ$ 이므로 f_i 와 F_i 의 크기가 동일하다면 이론적으로 두 모델의 추력 비는 $4.52/5 = 0.904$ 이다. 따라서 기하학적 원호의 영향이 그대로 추력에 반영된 것으로 볼 수 있으며 수직력의 경우엔 그 차이가 1% 내외이다. 따라서 TFCIM의 추력, 수직력 모델은 저자에 의해 수행된 TFLIM의 모델 결과를 참조하여 다음과 같이 표현할 수 있다.¹⁰

$$F_x = -(2 \cos 2\theta + 2 \cos \theta + 1) \frac{\sigma}{2} \omega \beta B_m^2 \operatorname{Re}(\Gamma_1 \cdot \Gamma_1^*) \quad (2)$$

$$F_z = \frac{1}{2\mu_0} \beta^2 B_m^2 \Lambda_0^2 e^{2j\alpha x}$$

위식에서 $\Gamma_1 = (p_1 e^{\alpha x} + q_1 e^{-\alpha x}) e^{-j\beta x}$, $\Lambda_0 = q_2 e^{-\beta x} e^{-j\beta x}$ 이며 계수 p_i, q_i 는 다음과 같다.

$$p_1 = \frac{(-\alpha\mu + \beta\mu_0)i}{\beta(\alpha\mu - \beta\mu_0 + e^{2h\alpha}(\alpha\mu + \beta\mu_0))}$$

$$q_1 = -\frac{e^{h\alpha}(\alpha\mu + \beta\mu_0)i}{2\beta(\alpha\mu \cosh[h\alpha] + \beta\mu_0 \sinh[h\alpha])} \quad (3)$$

$$q_2 = -\frac{e^{h\beta} \alpha\mu i}{\beta(\alpha\mu \cosh[h\alpha] + \beta\mu_0 \sinh[h\alpha])}$$

또한 $\alpha, \beta, \mu, \mu_0, \omega, h, B_m$ 은 각각 이차측 전도체

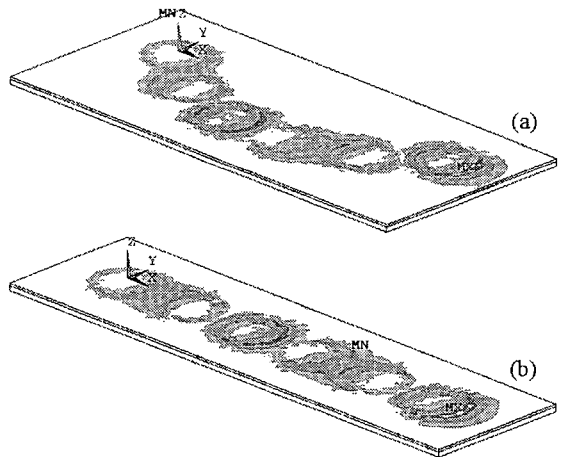


Fig. 10 Magnetic intensity due to eddy currents induced in the conductor (a) TFCIM (b) TFLIM

의 전도율, 파수, 이차측 계철의 투자율, 공기의 투자율, 인가 주파수, 전도체 두께, 코어 하단에서의 자기장 세기를 나타낸다. 위 식 (2)에서 이차측에 의한 반발력은 흡인력에 비해 대단히 작기 때문에 고려하지 않았다. 이러한 두 모델 사이의 유사성은 Fig. 10 에 묘사된 것처럼 ANSYS 의 3D Nodal-based Magnetic Vector Potential 방법을 이용한 Harmonic 모의 해석을 통하여 얻어진 이차측 자기장 강도(Magnetic intensity) 사이의 유사성을 통해 더욱 분명히 알 수 있다. 그림에서 두 모델은 장(field)의 왜곡 없이 거의 유사한 분포를 갖는 것을 알 수 있으며 따라서 TFLIM 의 모델링에 기하학적 곡률에 의한 영향만을 고려해도 TFCIM 의 자기력 정량화에 큰 무리가 없음을 알 수 있다.

앞서 얻어진 결과를 기초로 3 상, 6 극의 횡자속 스테이지를 제작하였으며 그 제원은 Table 1 과 같다. 기 언급한 것처럼 일차측 코어는 횡자속과 부분적인 이동 자장 방향의 자속을 형성하는 형태를 취하는데 제작상의 편리를 위해 원형으로 하였으며 따라서 코일은 실린더 형태를 갖는다.

Table 1 Primary values of the constructed revolving stage

Parameter	Specification
Core size(outer×inner dia.×height)	30×21×23.5mm
Core numbers	18EA
Phase & Poles	3 phase, 6 pole
Coil turns number	700
Coil diameter	0.35mm
Secondary diameter	250mm
Conductor height	1mm
Back yoke height	2mm
Nominal gap length	2mm

앞서 얻어진 TFCIM 모델링의 타당성을 검증하기 위해 제작된 단위 요소 조합을 대상으로 힘보정 시험을 수행하였다. Fig. 11 에서와 같이 얻어진 결과의 정량적인 측면보다 TFLIM 대비 TFCIM 의 상대 비를 강조하기 위해 결과는 무차원 수로 표시하였다. TFCIM 의 일차측에 3 상 전원을 인가하고 이차측 전도체를 힘 센서에 고정시켜 자기력을 측정하였으며 이때 슬립 주파수의 변화는 슬립률이 0 인 상태이므로 전원의 명령(command) 주파

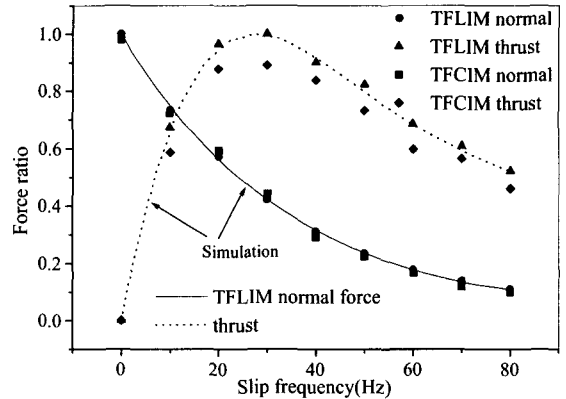


Fig. 11 Qualitative comparison between the derived equations and test results

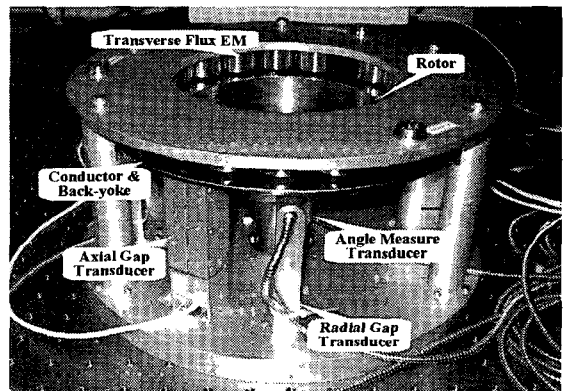


Fig. 12 Photograph of the constructed revolving stage

수를 변화시켜가며 수행하였다. 결과를 통해 알 수 있듯이 TFCIM 의 추력 크기는 슬립 주파수 전 영역에 걸쳐 TFLIM 추력의 약 90% 수준의 값을 나타내고 있다. 또한 수직력은 실험 오차의 정도를 고려하여도 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 식 (2)의 TFCIM 모델식을 서보 루프(Servo loop)에서 힘 이득(Force gain)으로 사용하는 데에 무리가 없음을 알 수 있다.

4. Indirect measurement of rotating angle

Table 1 에 나타난 제원을 갖는 비접촉 회전 스테이지의 사진을 Fig. 12 에 나타내었다. 18 개의 단위 전자석으로 이루어진 3 상, 6 극의 코일과 이에

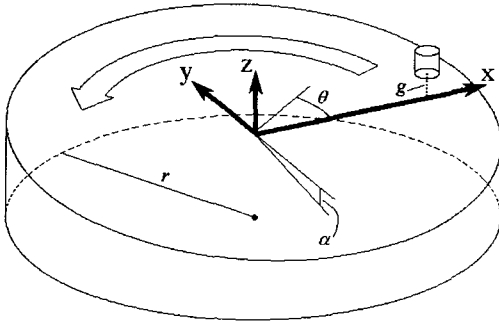


Fig. 13 Measuring principle of rotating angle using the inclined surface

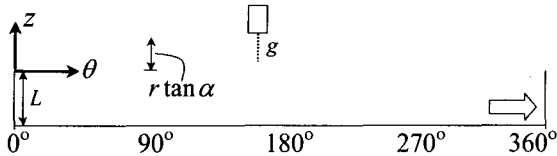


Fig. 14 Relation between angle and air-gap length (Transformation into cylindrical frame)

대면하는 전도체와 계철로 구성된 이차측 간의 수직 방향의 공극 측정과 면내 운동 측정을 위한 정전 용량형 탐침 헤드 (Capacitance type probe heads)가 설치되어있다. 특히 비접촉으로 스테이지의 회전량을 측정하기 위한 방법이 가장 중요한 문제로 대두되는데 본 장에서는 이러한 회전량을 간접적으로 정밀하게 측정할 수 있는 방법에 관해 논한다.

공간상에 부상되어 회전하는 이차측은 상면은 전도체와 계철로 이루어진 원판이며 원판 하부에는 Fig. 13 과 같이 평면과 α 의 각도로 사면 가공되어있는 실린더 블록이 부착되어있다. 따라서 그림에서와 같이 사면 위의 어떤 특정 점을 갭 센서로 측정하면 원주 방향으로 사면의 높낮이가 변하기 때문에 공극 정보를 통해 회전량을 간접적으로 측정하는 것이 가능하다.

직교 좌표계를 회전 좌표계로 변환하여 정량적인 관계를 알 수 있는데 우선 Fig. 13 블록의 단면을 원주 방향으로 펼쳐놓으면 Fig. 14 와 같다. L 을 공칭 공극의 크기, r 을 센서가 놓여 있는 위치까지의 반지름이라 하면 갭 센서의 정보 g 와 회전각 θ 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$g = L + r \tan \alpha \sin \theta \quad (4)$$

따라서 g 를 알면 θ 값을 얻을 수 있다. 구축된 시스템 회전판의 사면 각 α 는 0.0125rad이며 최대 공극 변화량은 1.2mm이다. 공극 측정에 사용된 정전 용량형 갭 센서의 위치 분해능은 약 40nm이므로 최대 분해능에 해당하는 회전각은 약 0.21mrad이다. 이러한 회전 분해능은 30000 펄스 광학식 엔코더에 대응하는 능력이며 보다 정교한 센서의 선택에 의해 회전 분해능은 더욱 향상될 수 있다.

현재 구축된 시스템을 대상으로 비접촉 회전 운동시의 진원도 측정, 반경 방향으로의 외란 대항 능력, 대역폭 등의 다양한 성능 시험과 수직력, 추력간의 엄밀한 비연성화를 위한 고품위 벡터 제어 기법 등에 관련된 작업을 수행하고 있다.

5. 결론

반도체 photolithography 공정에서의 웨이퍼 회전, 홀로그램 저장매체에서의 광평향 장치, 주사 탐침/원자력 현미경에서 시편의 초정밀 회전 등은 교차측의 반경 방향으로 보정 차원에서의 작은 평면 구동 능력/컴플라이언스(Compliance) 제어 능력과 상대 불확도가 큰 회전 운동의 구현을 더욱 요한다. 그러나 이러한 성능 요구에 대응하는 기존 회전형 스테이지는 다양한 구조적/물리적 한계와 문제점을 내포하고 있다. 이러한 점을 극복하기 위해 본 논문에서는 TFCIM을 이용하는 비접촉 회전 스테이지를 제안하였다.

TFLIM을 원주 방향으로 굴곡 시킨 형태의 TFCIM의 추력 특성을 향상시키기 위해 TFLIM을 대상으로 바람직한 코어 형상을 선정하였고 스테이지의 부상, 회전, 보정 운동을 구현하는 일반적인 정렬을 갖는 TFLIM에 비교하여 TFCIM의 조합이 더욱 우수한 6축 힘/토크 특성을 갖는다는 것을 다양한 배치 형태를 대상으로 논하였다. 또한 TFCIM의 자기력 모델링 작업을 선형 등가 모델인 TFLIM과 곡률 반경을 이용하여 유도하고 이의 실험 검증 결과를 제시하였다. 마지막으로 구축된 스테이지의 미소 회전량을 비접촉으로 정밀하게 측정하는 방법을 묘사하였다.

후 기

이 논문은 2004 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2004-002-D00053)

Flux Linear Induction Motor using DC-biased Multi Phase Inputs," Korea Society of Mechanical Engineering A, Vol. 28, No. 11, pp. 1733 - 40, 2004.

참고문헌

1. Saffert, E. and Kallenbach, E., "Integrated Planar Drives and Their Applications," Annals IEEE AMC 2000-Nagoya, pp. 3127 - 3131, 2000.
2. Holmes, M., Hocken, R. and Trumper, D., "The long-range scanning stage : a novel platform for scanned-probe microscopy," Precision Engineering, Vol. 24, pp. 191 - 209, 2000.
3. Sawyer, B., "Actuating system," U.S. Patent No. 3,857,078, 1974.
4. Yamazaki, K., Shimizu, T. and Kimura, G., "Development of a new type surface actuator," IEEE Conf. on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, Vol. 1, pp. 509 - 513, 1994.
5. Fujii, N. and Fujitake, M., "Two-Dimensional Drive Characteristics by Circular-Shaped Motor," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 35, No. 4, pp. 803 - 809, 1999.
6. Tomita, Y. and Koyanagawa, Y., "Study on a surface motor driven precise positioning system," J. of Dynamic systems, measurement and control, Vol. 117, pp. 311 - 319, 1995.
7. Jung, K. S., Lee, S. H. and Baek, Y. S., "Repulsive & Attractive Type Magnetic Levitation for Mechanical Isolation of the Planar Stage Mover," Korea Society of Precision Engineering, Vol. 20, pp. 76 - 83, 2003.
8. Lee, S. and Gweon, D., "A new 3-DOF Z-tilts micropositioning system using electromagnetic actuators and air-bearings," Precision Engineering, Vol. 24, pp. 24 - 31, 2000.
9. Melkote, H. and Khorrani, F., "Closed-loop Control of a Base XY stage with Rotational Degree-of-Freedom for a High-Speed Ultra-Accurate Manufacturing System," Proc. of IEEE Conf. on Robotics & Automation, Michigan, pp. 1812 - 1817, 1999.
10. Jung, K. S., Huh, J. H. and Baek, Y. S., "Decoupling Control of Levitation and Thrust of The Transverse