

공극력의 능동적 보상을 통한 횡자속 선형 유도 구동기의 추력과 부상력의 비연성화

정광석[#], 백윤수^{*}

Decoupling of Thrust Force and Levitation Force of Transverse Flux Linear Induction Motor by the Active Compensation of Magnetic Force across the Air-Gap

Kwang Suk Jung[#] and Yoon Su Baek^{*}

ABSTRACT

TFLIM(Transverse Flux Linear Induction Motor), making its closed magnetic path with the direction of the traveling field orthogonal, had been developed to decrease an edge effect of the general induction motor. To control the levitation force and the thrust force on the secondary part of TFLIM independently, the various methodologies have been presented. When we try to achieve the independent control using only the multi-phase inputs assigned in the stator coils as an approach, in which condition we can minimize the coupling effect between two forces? In this paper, we show the qualitative influence of a slip frequency, an ac magnitude, a dc offset superposed in the ac power, and a major parameter of TFLIM on the couple through the computer simulation. And to realize the independent motions between levitation and thrust motion without any auxiliary means for isolation of the secondary part of TFLIM, the decouple compensator is suggested, including the experimental results.

Key Words : DC-biased ac current(직류 중첩된 교류 전류), FEM analysis of magnetic field (자기장의 유한 요소 해석), Transverse flux linear induction motor (횡자속 선형 유도 구동기), Decouple control (비연성 제어)

1. 서론

회전 모터 또는 선형 모터는 일차측(primary)과 이차측(secondary)간의 공극(air-gap)을 통한 자기 상호 작용을 통해 회전력/추력을 발생시키기 때문에 부수적으로 반경 방향력/부상력이 발생하는 물리적인 특성을 갖는다. 따라서, 이러한 부수적으로

발생되는 힘을 능동적으로 이용하여 이차측 즉, 회전자 또는 이동자를 기계적인 접촉없이 공간상에 부상시켜 고속 구동, 정밀도 향상, 미세 먼지/분진 제거, 이동자의 표면 파손 방지 등의 목적으로 이용하려는 시도가 보고되고 있다.¹⁻⁵ 특히 자기 부상 철도의 예를 통해서도 알 수 있듯이 구동기의 집적화를 위해 부상용 구동기를 별도로 설

접수일: 2004 년 1 월 27 일; 게재승인일: 2004 년 8 월 13 일
교신저자: 충주대학교 기계공학과
Email: ksjung@chungju.ac.kr Tel. (043) 841-5135
연세대학교 기계공학부

치하지 않고 추진용 구동기와 통합시켜 구현하려는 노력이 시도되어왔다.⁶⁻¹⁰ 그러나 회전 또는 선형 모터에서 발생하는 반경 방향력/부상력은 근본적으로 회전력/추력 특성에 의존하는 부수력이기 때문에 두 힘 사이의 독립적인 제어 가능성은 난제로 남아있는 실정이다. 특히 회전 모터의 경우 반경 방향력의 독립 제어를 위해 별도의 코일을 기존 구동 코일에 추가 배치함으로써 기존 회전자장에 미치는 영향을 최소화한 베어링 통합형 즉, 반경 방향 힘을 능동적으로 이용하는 모터가 보고되었다.³ 기존 구동기의 구성 변형 없이 하나의 구동기에 인가되는 다상 입력만으로 부상과 추진 운동을 독립적으로 제어하려는 선형 모터에 대한 시도는 2 차축이 철만으로 구성된 유도 모터와 일반 구성의 유도 모터에 대해 다양한 접근 방법을 이용하여 연구되고 있다.² 유도 모터에 인가되는 전원이 다상 입력이라는 것과 이동자의 슬립 (slip) 특성이 모터 성능에 미치는 영향을 고려하면 독립 제어를 구현하기 위한 다양한 조합이 존재할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 부상력은 자속 일정 제어를 그리고 추력은 슬립 주파수 제어를 수행하여 독립 제어를 구현한 예⁶ 나 수직력 제어를 위해 고주파 성분을 이용한 방식이 제안되기도 하였으며⁷ 추력과 부상력 크기 사이의 슬립 주파수의 의존 특성을 이용하거나⁸ 벡터 제어 응용 인버터를 이용한 방법도 제안되었다.⁹

본 논문에서는 횡자속 선형 유도 모터, TFLIM (Transverse Flux Linear Induction Motor),를 대상으로 모터에 인가되는 다상 교류 입력에 직류 신호를 중첩시켜 이러한 교류와 직류 신호의 조합에 의해 추력과 부상력을 독립적으로 제어하는 방법론을 제시한다. 특히 교류 신호에 대해 주파수 변화만이 아닌 그 크기 변화에 따른 부상력에 대한 연성(連性) 효과를 정량화하고 중첩된 직류의 크기 변화에 따른 추력에의 영향도 살펴본다. 또한 TFLIM의 주요 설계 변수의 변화가 이러한 두 축 운동사이의 연성에 미치는 영향도 조사하여 어떠한 입력 신호 조합 하에서 그리고 어떠한 설계 변수에서 독립 제어 성능이 보장되는지를 논의한다. 이를 기초로 두 운동을 비연성화 하는 보상 알고리즘을 제안하고 시험 결과를 통해 확인한다.

2. Characteristics of TFLIM for variation of the major parameters

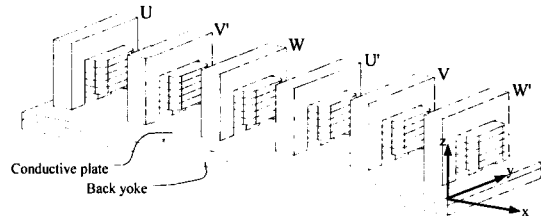


Fig. 1 Perspective layout of Transverse Flux LIM

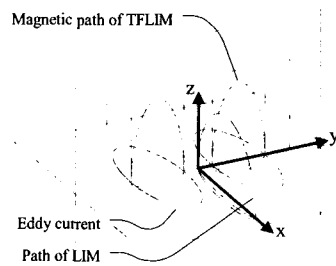


Fig. 2 The closed magnetic path of TFLIM compared with general LIM

2.1 General characteristics of TFLIM

Fig. 1에 나타난 TFLIM은 기존 선형 유도 모터의 변형된 형태로서 전자석 코어의 페루프 자기 회로의 방향을 Fig. 2와 같이 진행 자계 방향 그리고 와전류 분포 평면과 직교하게 구성한 형태의 모터이다. TFLIM은 기존 유도 모터의 에지(edge) 효과를 줄이려는 목적으로 개발되었으며¹⁰ Fig. 1에서 알 수 있듯이 모터를 구성하는 각각의 전자석이 독립적으로 부상력 제어를 실현할 수 있는 가능성을 제공한다는 면이 일반 유도 모터와 가장 대별되는 부분이다. 이러한 TFLIM 역시 일반 유도 모터와 같이 3상 이상의 다상이 공급되는 코일과 코일의 강자성 코어로 구성된 일차측, 그리고 공극을 사이에 두고 전도체와 back-yoke로 구성된 이차측으로 구성되어 있다. 물론, 이러한 이차측이 코일의 양쪽에 모두 배치되어있는 double-sided TFLIM도 고려될 수 있다. 이러한 TFLIM의 해석은 기본적으로 이차측에 발생하는 와전류 분포의 연속적/비선형적 특성으로 인해 폐형해로 구하는 것이 대단히 어려우며 맥스웰 방정식에 기초

하여 수치 해석적인 방법을 통해 구하는 것이 일반적이다. 즉 1 차측 여자 전류에 의해 발생하는 공간상의 자계 B 를 앙페르 법칙(Ampere's law)을

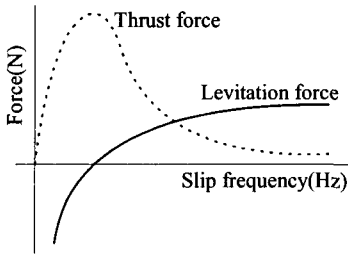


Fig. 3 Levitation and thrust characteristics for frequency variation

통해 구하고 이러한 자계의 시간 변동에 따라 이차측에 유도되는 기전력을 페러데이 법칙(Faraday's law)을 통해 구한 후 유도 기전력을 옴의 법칙(Ohm's law)에 적용하면 이차측 전도판에 발생된 와전류 밀도 J 를 구하는 것이 가능하다. 이러한 와전류 밀도와 앞서서의 공간상의 자계를 로렌츠 법칙(Lorentz's law) $F=J \times B$ 에 대입하면 이차측의 자기력 F 를 구할 수 있다.¹¹

우선, 적당한 TFLIM 의 초기 모델을 대상으로 슬립 주파수에 따른 부상력과 추력의 변화를 도시하면 Fig. 3 과 같다. 저주파수 대역에서는 전자석과 이차측의 back-yoke 의 자화력으로 인해 부상력이 흡인력의 특성을 갖지만 고주파수로 감에 따라 와전류에 의한 영향으로 반발력의 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 또한 추력의 경우에는 고주파수로 감에 따라 일차측 코일에 인가되는 입력 전원과 이차측 전도판에 유도되는 와전류의 위상 전이 때문에 증대되다가 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 두 힘의 연성 특성을 배제할 수 있다면 부상력의 경우 주파수에 따라 push/pull 제어를 할 수 있음을 간접적으로 알 수 있다. 그러나 앞서 언급한 것처럼 부상력은 추력에 연동되어 발생하는 부수력이기 때문에 부상력의 변화는 곧 추력의 변화를 가져온다. 따라서 두 힘의 독립 제어를 위해서 본 논문에서는 교류 전원에 직류 전원을 중첩하는 가능성에 대해 고찰한다.

2.2 Qualitative results using FEM – Possibility of the independent control between levitation and thrust motion

이차측이 철로만 구성된 TFLIM 을 대상으로 교류 전원에 직류 전원을 중첩시킨 다상 입력을 이용하여 교류 전원의 주파수 변화로 추력을 그리

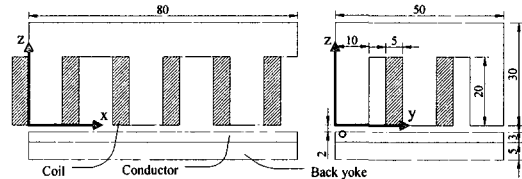


Fig. 4 Primary specification of TFLIM used in FEM analysis

고 직류 전원의 크기 변화로 부상력을 제어하는 방법이 제안되었다. 그러나 일반 전도체에 비해 철의 작은 전도율로 인한 미약한 추력의 크기로 인해 그 응용 범위는 후판의 반송으로 제한되었다. 또한 제안된 방법은 연성에 대한 능동적인 대책은 없이 단지 추력과 부상력 사이의 연성을 최소화하는 작동 조건 하에서의 동시 제어일 뿐이다². 특히 일반적인 구성의 이차측을 갖는 TFLIM 의 경우에 대한 독립 제어 시도는 보고되지 않고 있으며 위의 직류 중첩된 다상 교류 입력이 인가될 때 LIM 의 추력은 단지 심하게 음, 양의 방향으로 요동 친다고 알려져 있다. 본 절에서는 이러한 형태의 입력을 TFLIM 에 인가할 때 입력 요소의 변화가 성능에 미치는 영향을 정성적/정량적으로 살펴 보고 독립 제어 가능성에 대해 조사한다.

우선, 상용화된 FEM 틀을 이용한 모의 시험에 사용된 TFLIM 의 주요 스펙을 Fig. 4 에 나타낸다. 사용된 모델은 2 극, 3 상 모델이며 진행 방향 x 에 대해 대칭이므로 half-model 을 이용한다. 앞서 묘사된 Fig. 1 과 달리 Fig. 4 는 일차측 전자석들 사이에 연계용 철을 갖는 구조이며 이는 추력 특성의 향상을 위해 변형된 모델이다.

2.2.1 Selection of target factors to be controlled independently

부상력/추력의 독립 제어를 위한 방법으로서는 먼저 주파수와 중첩 직류의 변화에 따른 결과를 고려한다. 독립 제어 가능성을 결정하는 가장 중

요한 인자로 판단되는 각각의 입력 요소에 따른 연성 효과에 관한 모의 시험을 수행하여 주파수 변화에 따른 부상력의 변화를 Fig. 5 에 그리고 중첩 직류 크기에 따른 추력의 변화를 Fig. 6 에 나타내었다. 또한 Fig. 5 에 유한 요소 모델의 모의 시험 결과를 보정 시험 결과와 비교하여 해석 모델의 타당성을 나타내었다. 특히 Fig. 6 의 결과는

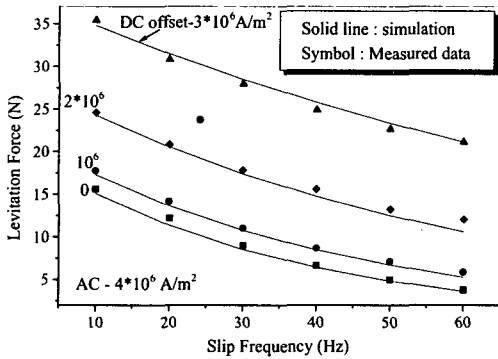


Fig. 5 Variation of levitation force for the slip frequency

력의 감소는 거의 무시할 수 있다. 또한 부상력의 경우엔 슬립 주파수의 증대에 따른 와전류의 증가로 부상력이 급격히 감소함을 알 수 있다. 이는 직류 전원의 크기에 상관없이 일관된 경향을 보이기 때문에 이처럼 슬립 주파수로 추력을, 직류 전원으로 부상력을 제어하는 데에는 연성으로 인해 한계가 있음을 알 수 있다. 독립 제어 가능성을

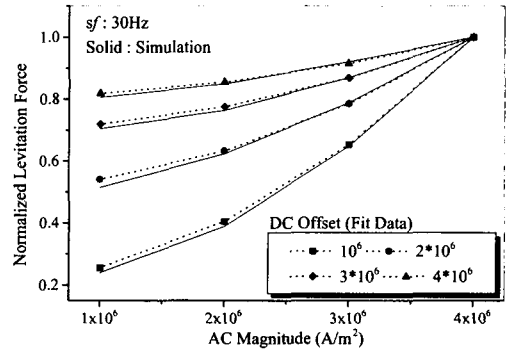


Fig. 7 Variation of the dimensionless levitation force for multi-phase AC magnitude

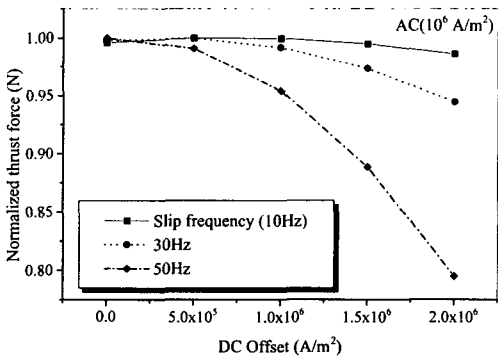


Fig. 6 Variation of thrust force for the superposed DC

DC 편이 되어있지 않은 기존 다상 입력에 대한 값을 기준으로 정규화(Normalization)하여 무차원 변수로 표현하였다. 추력의 경우엔 10~30Hz 의 슬립 주파수 영역에서는 직류 변화에 대해 큰 감소는 보이지 않으나 50Hz 에서는 DC 편이가 없을 경우 대비 약 20% 감소한다. 그러나 대상 TFLIM 의 작동 조건은 DC 읍셋에 의한 Brake 력의 급격한 증가를 방지하고 추력 절대치를 극대화하기 위해 30Hz 근방에서 유지되므로 DC 편이에 따른 추

확보하기 위해서는 변수에 대해 힘의 크기 변화 즉, 힘 상수(Force constant)가 작동 범위 내에서 약 1-20% 내에 존재해야만 선형 제어기의 이득 여유 (Gain margin)로 보상될 수 있는 범위 안에 놓이게 된다. 따라서 위의 방법론으로는 독립 제어를 구현하는 것이 대단히 어렵다는 것을 알 수 있다.

다음으로 다상 교류 전원의 크기와 중첩 직류의 변화를 이용하는 경우를 고려한다. 직류의 변화에 따른 추력의 결과는 앞서 수행된 결과와 동일하므로 교류 전원의 크기 변화에 따른 부상력의 변화만을 Fig. 7 에 묘사한다. 그림에서 변화의 정성적인 측면을 강조하기 위해 부상력은 Fig. 6 과 같이 정규화 된 수치로 나타내었다. 교류 크기에 비해 중첩 직류가 작을 때에는 앞서 수행된 주파수 변화에 따른 해석에서처럼 부상력이 큰 폭으로 변화하지만 직류 읍셋량이 커짐에 따라 이러한 변화는 교류 전원의 크기 변화에 관계없이 가제어성 영역 안으로 오는 것을 알 수 있다. 특히 직류 읍셋량의 크기는 이차측의 무게와 직접적인 연관을 갖기 때문에 읍셋량의 크기 증가는 최종 시스템의 가반 중량(payload)를 증대시킬 수 있다는 관점에서도 긍정적임을 알 수 있다. 따라서 교류 전원의 크기

로 추력을, 직류 전원의 크기로 부상력을 독립적으로 제어할 수 있는 가능성을 확인할 수 있다. 따라서 능동적인 연성에 대한 해결책 없이도 독립 제어성을 확보할 수 있는 TFLIM 의 적당한 동작 스펙이 존재하는 것을 간접적으로 알 수 있다.

2.2.2 Influence of primary design parameters

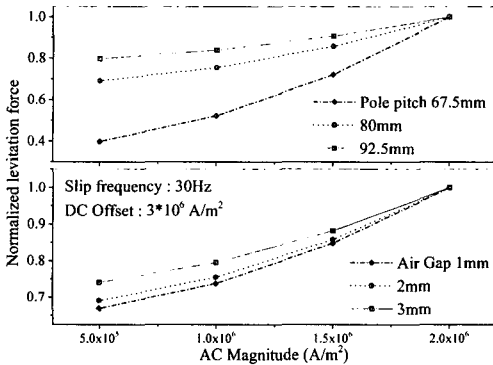


Fig. 8 Variation of the normalized levitation force for TFLIM spec.

전항에 서술된 것처럼 TFLIM 의 경우 교류 입력에 중첩된 직류 전원의 조합에 의해 부상력과 추력을 독립적으로 제어하기 위해서는 적당한 작동/입력 조합 또는 스펙이 존재함을 확인하였다. 앞서 논의된 결과는 TFLIM 의 물리적인 제한이 고정되어있는 상태에서 즉, Fig. 4 에서처럼 주요한 설계 변수가 초기에 고정되어있는 상태에서 수행된 결과이다. 따라서 전항의 결과에 추가하여 이러한 물리적 변수 변화가 이러한 성능에 어떤 영향을 주는지를 고찰한다. 특히 다양한 변수 변화 중에서 TFLIM 의 성능에 가장 지배적인 영향을 미치는 요소로 알려진 일차측과 이차측 사이의 공극의 크기 변화와 극 피치를 변수로 삼아 전항의 해석을 수행하고 그 결과를 Fig. 8, 9 에 각각 나타내었다.

우선 부상력의 경우를 고려하면, 공극의 크기가 클수록 그리고 극 피치가 클수록 부상력의 변화량이 작아짐을 알 수 있다. 물론 공극이 커진다는 의미는 곧 부상력의 감소를 의미하는 것이며 그래프의 결과는 정규화 된 값의 변화만을 의미한다. 또한 추력의 경우는 이와는 반대로 공극이 작을 때 그리고 극 피치가 작을 때 변화가 더 완만

하다. 특이한 것은 공극과 극 피치가 커짐에 따라 이러한 추력 선도에 기울기의 부호 변화가 생긴다는 점이다. 여기에서 변화량의 정도와 그 크기의 절대량은 구별해야 할 점이다. 두 결과를 통해서 공극과 극 피치 거리는 연성 특성에 trade-off 의 관계가 있음을 알 수 있다. 또한 힘의 변화량과 그 절대적인 크기 사이에 일관된 경향이 보이지 않기

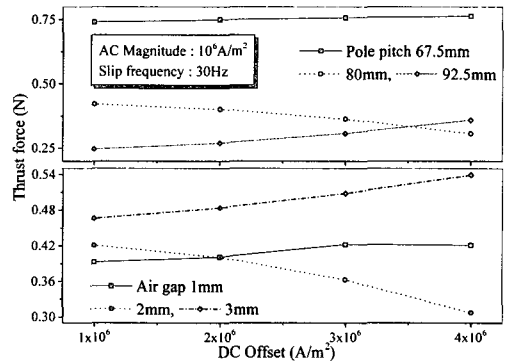


Fig. 9 Variation of the thrust force for TFLIM spec.

때문에 앞서 전항에서 논의한 작동 조건과는 달리 최적의 결과 도출보다는 이차측의 가반 중량이나 일차측의 파워 드라이버 성능 등을 고려한 적당한 선택이 바람직함을 알 수 있다.

3. Active compensation of couple between levitation and thrust motion

전항에서 연성에 대한 특별한 고려 없이도 적당한 조합의 작동 조건을 선택하여 부상력과 추력 사이에 독립 제어 가능성이 존재함을 모의 시험 결과를 통해 확인하였다. 그러나 이러한 수동적인 방법만으로는 가반 중량의 변화나 작동 조건의 변화 등에 적절히 대처하는 것이 불가능하고 또한 이러한 방식을 취하는 TFLIM 이 엄밀한 의미의 베어링 통합 기능을 갖는다고 보기에는 한계가 있으므로 이러한 두 힘 사이의 연성을 능동적으로 보상하는 방법을 제안한다. 즉, 추력과 부상력을 다상 교류와 중첩 직류로 각각 제어하려 할 때 Fig. 6 과 7 에서 확인할 수 있듯이 추력의 크기가 직류 전원에 거의 무관하다고 가정하면, 즉 슬립 주파수의 작동 범위를 30Hz 근방으로 제한하면, 결국 다상 교류 전원과 부상력과의 관계를 중첩 직류로

보상하는 방법을 취하여 해결할 수 있다.

우선 TFLIM 은 E 자형 형태의 각각의 단위 전자석의 조합으로 구성되어 있으므로 단일 요소에 대해 집중 변수 모델링을 수행한다.¹² 코일과 이차측 사이에 공극이 일정하다고 가정하면 자화력의 모델링은 다음과 같다.

$$F_z = k \frac{i^2}{z_0^2} = k'(i_D + i_A \sin \phi)^2 \quad (1)$$

위 식에서 k, z_0, i_D, i_A, ϕ 는 각각 코일의 인덕턴스를 포함하는 힘 상수, 공칭 공극, 직류 전류, 교류 전류의 크기, 위상을 나타낸다. 위 힘의 시평균 값 (Time-average force)을 구하면

$$\bar{F}_z = \tilde{k}(i_D^2 + \frac{1}{2}i_A^2) \quad (2)$$

그러나 다상 전원과 이차측 사이의 부상력은 이러한 자화력으로 인한 흡인력 뿐만 아니라 와전류 생성에 의한 반발력도 존재한다. 이러한 반발력은 앞서 언급한 것처럼 와전류 분포의 비선형적 특성에 의해 폐형해로 구하는 것이 대단히 어렵지만 적당한 가정에 의해 다음과 같이 모델링 한다.

우선 와전류에 의한 반발력은 다음과 같이 코일에 의해 생성된 자기장 B_p 와 와전류에 의해 생성된 자기장 B_s 사이에 로렌쯔 법칙을 적용하여 구한다.

$$F_e = k_e \cdot B_p \times B_s \quad (3)$$

공극과 슬립 주파수가 일정하게 유지된다고 가정하면 와전류에 의한 자기장 역시 전류만의 함수가 되므로 Fig. 4 의 좌표축을 기준으로 식 (3)의 z 방향 성분은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$F_e|_z = \{k_e \left[\sum_{i=1}^3 k_{pi}(i_D + i_A \sin \phi) \vec{n}_i \right] \times \left[\sum_{j=1}^3 k_{sj} i_A \sin(\phi + \phi_0) \vec{n}_j \right] \}_z \quad (4)$$

위 식에서 $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$ 는 각각 단위 벡터 $\vec{x}, \vec{y}, \vec{z}$ 를 그리고 ϕ_0 는 위상 지연을 나타낸다. 또한 k_p, k_s 는

슬립 주파수와 전도체 형상 그리고 폐 자기장 등에 의존하는 상수를 의미한다. 특히 와전류 발생은 자기장의 시간 변화에 기인함을 생각하면 교류 전류에만 관련됨을 알 수 있다. 위 반발력의 시평균 값을 구해보면

$$\bar{F}_e|_z = \frac{1}{2} k_t \cdot i_A^2 \quad (5)$$

이다. 따라서 식(2)와 (5)를 종합하면 전체 부상력의 값은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{F}_t = \tilde{k} \left(i_D^2 + \frac{1}{2} i_A^2 \right) - \frac{1}{2} k_t \cdot i_A^2 = \tilde{k} \left(i_D^2 + \frac{1}{2} \alpha \cdot i_A^2 \right) \quad (6)$$

위 식을 이용하여 Fig. 7 의 다상 전원에 따른 부상력의 크기 변화 선도에 대입하면 슬립 주파수 30Hz 에서 $k'=35.5, \alpha=0.48$ 임을 알 수 있으며 다상 전원과 직류량의 크기에 무관하게 모의 시험 결과와 거의 일치함을 알 수 있다. 이는 TFLIM 의 자로가 일반 LIM 에 비해 극히 작아서 손실 자장의 크기가 최소화 됨에 기인한다. 따라서 이러한 부상력의 정량적인 모델링을 기초로 연성 보상 알고리즘 구현이 가능하다. 즉, 가상 제어 변수 i_d, i_q 를 다음과 같이 도입하면

$$\begin{aligned} i_d &= \bar{i}_A \\ i_q &= \frac{1}{2} \alpha \tilde{i}_A + \tilde{k} \bar{i}_D \end{aligned} \quad (7)$$

식 (8)과 같이 추력과 부상력 사이에 두 제어 입력 i_d, i_q 에 대해 비연성화가 가능하다. 여기에서 \bar{i}_A, \bar{i}_D 는 각각 i_A^2, i_D^2 를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

위에서 β 는 추력 힘 상수를 의미한다.

4. Test results

전장에서처럼 TFLIM 을 구성하는 일차측 코일에 직류 전원을 중첩한 다상 교류 전원을 입력하

여 부상 운동과 추진 운동을 독립적으로 제어하여 one input two output 제어를 수행하는 시스템의 페루프 블록 선도를 Fig. 10 에 예시하였다. 위치 센서와 공극 센서를 통해 되먹임된 측정 변수와 설계 변수를 기초로 PC 기반의 선형 제어기를 거쳐 제어 입력을 생성하고 식 (7), (8)의 연성 보상 알

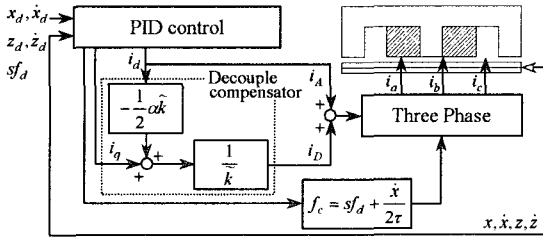


Fig. 10 Block diagram of TFLIM with the couple compensation algorithm

고리즘을 통해 추진, 부상 운동 사이의 비연성화를 시킨 후 최종 제어 입력은 인가 주파수 값과 조합하여 3 상 전원을 발생시켜 TFLIM 에 인가한다. 전장의 연성 보상 알고리즘은 슬립 주파수가 일정하게 유지된 상태에서 구현이 되므로 다음과 같이 추진 운동 속도를 되먹임 받아 다상 전원에 인가되는 주파수를 결정하게 된다.

$$f_c = sf_d + \frac{\dot{x}}{2\tau} \quad (9)$$

위 식에서 f_c, sf_d, τ 는 각각 전원 주파수, 슬립 주파수, 극 피치를 의미한다. 이러한 보상 알고리즘을 검증하기 위한 실험 장치의 사진을 Fig. 11 에 나타내었다. 추진 운동과 부상 운동 사이의 비연성화에 관련된 검증에 초점을 맞추어 구리 전도체와 back-iron 으로 구성된 2 차축은 단지 추진 운동과 부상 운동만을 하도록 구축되어있다.

초기 위치(공극 길이 3000 μm)에 놓여있는 2 차축에 대해 우선 공칭 위치인 1500 μm 까지 2 초에 걸쳐 부상시킨 후에 두 운동 모두 각각 2000 μm , 500 μm 의 사인 운동을 시킨 결과를 Fig. 12 에 나타내었다. 그림에서 점선은 설계 변수 궤적을 나타내는데 추진 운동의 경우 사인 곡선의 극점 부근에서 오차가 상대적으로 증가됨을 알 수 있다. 이는 이동 자장에 의해 생성된 와전류로 구동되는 TFLIM 의 물리적 특성을 감안하면 충분히 예견할

수 있는 결과이며 연성 보상 알고리즘으로 인해 부상 운동 역시 극점에서 지터(jitter)량이 상대적으로 증가함을 알 수 있다. 또한 이러한 오차는 교류 전원에 대해 시간 의존을 특성을 갖는 부상력을 시평균 값으로 대체한 것에 부분적으로 기인한다. 그러나 목표 궤적(Desired path)의 사인 주파수에 비해 인가 주파수가 대단히 크기 때문에 그 영향은 미미한 것으로 판단된다.

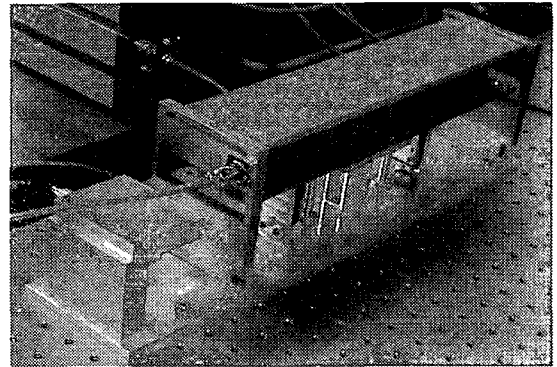


Fig. 11 Photograph of test-setup

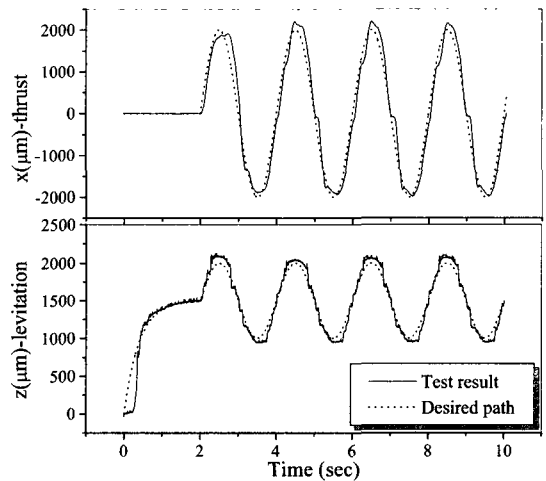


Fig. 12 Sinusoidal motion test of levitation and thrust axes

전체적으로 두 운동 사이에 2 차축의 안정성을 저해하는 정도의 연성량은 모두 저감되어 있는 것을 확인할 수 있으며 이러한 공극력의 능동적인 조절은 2 차축 Payload 의 시변 특성에 대상 시스템이 효과적으로 대응할 수 있다는 것을 의미한다.

특히 저속구간에서는 TFLIM 의 시공간 변화 특성을 E 형 전자석의 집중 변수 모델링만으로도 정량적으로 추론하는 것이 가능하다. 따라서 제안된 연성 보상 알고리즘을 통해 선형 가이드(Linear guide) 없이도 TFLIM 2 차축의 비접촉 구동이 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 선형 유도 모터의 일종인 TFLIM 을 대상으로, 선형 모터에 부수적으로 수반되는 공극 방향에 수직으로 작용하는 부상력을 효율적으로 이용하는 방법의 일환으로서 직류 전류를 증첩한 다상 교류 전원을 TFLIM 의 일차축에 인가하여 교류 전류의 크기로 추력을, 그리고 직류 전류의 크기로 부상력을 제어하는 방법을 제안하였다. 이 때 두 출력에 대한 다른 입력 요소와의 연성 효과를 모의 시험을 통해 확인하고 두 축 운동 사이에 연성을 최소화하는 가장 바람직한 입력 작동 조합이 존재하는 것을 확인하였다. 또한 약간의 연성 효과로 야기되는 출력의 요동 특성은 빠른 궤환 특성을 갖는 또는 힘 상수의 변화를 고려하는 제어기 구축으로 보상될 수 있음을 논하였다.

또한 TFLIM 을 구성하는 각각의 설계 변수 중에서 공극 변화와 극 피치를 주요 변수로 설정하여 이의 변화에 따른 부상력/추력의 특성을 해석하여 두 변수 사이에는 독립 제어성을 대상으로 trade-off 가 있음을 확인하였다.

이러한 수동적인 논의에 추가하여 부상력에 대한 근사화 된 집중 변수 모델링을 기초로 두 축 운동 사이에 연성 보상 알고리즘을 적용하여 두 축 운동에 대한 능동적인 독립 제어 구현이 가능함을 실험을 통해 확인하였다. 이러한 단일 전원 입력 하에서의 독립 제어 구현 가능성으로 별도의 공극 유지 기구 없이 즉, 슬라이드 베어링과 같은 보조 기구 없이 베어링 기능을 통합한 TFLIM 을 이용한 이송 장치 등에의 폭 넓은 적용이 기대된다.

후 기

이 논문은 2003 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.(KRF-2003-003-D00040)

참고문헌

1. Fujisaki, K., "Application of Electromagnetic Force to Thin Steel Plate," IEEE, pp. 864-870, 2002.
2. Hayashiya, H., Ohsaki, H., Masada, E., "The combined lift and propulsion system of a steel plate by transverse flux linear induction motors," IEEE Trans. Magnetics, Vol. 35, pp. 4019-4021, 1999.
3. Chiba, A., Deido, T., Fukao, T., Rahman, M. A., "An analysis of bearingless ac motors," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No. 1, pp. 61-68, 1993.
4. Lee, S. H., Jung, K. S., Baek, Y. S., "Switched Reluctance Contact-Free Linear Actuator Using Attractive Magnetic Forces," J. of the KSPE, Vol. 20, No. 10, pp. 47-55, 2003.
5. Liu, C. T., Sheu, N., "Optimal Pole Arrangement Design of a Linear Switched Reluctance Machine for Magnetic Levitation and Propulsion System," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 32, No. 5, pp. 5067-69, 1996.
6. 多田隗, "Magnetic Levitation and Propulsion System using SLIM," 電氣學會論文誌 B (in Japanese), Vol. 100, No. 6, pp. 353-360, 1995.
7. 森實, "Thrust and attractive force control of the magnetically levitated linear induction motor with no coil for levitation," Linear Drive Research Group Report LD98-35 (in Japanese), pp. 31-36, 1998.
8. Yoshida, K., Yoshida, T., "Soft Touch Mass-Reduced-Mode Control of Attractive Force in SLIM Vehicle Propulsion," IEEJ Trans. IA, Vol. 123, No. 5, pp. 575-581, 2003.
9. Takahashi, I., Ide, Y., "Decoupling Control of Thrust and Attractive Force of a LIM Using a Space Vector Control Inverter," IEEE, pp. 565-570, 1990.
10. Nasar, S. A., Unnewehr, L. E., Electromechanics and Electric Machines, John Wiley & Sons, Inc., 1983.
11. Wangsness, R. K., Electromagnetic Fields, John Wiley & Sons, 1979.
12. Han, Y. H., Yoon, H. J., Jung, K. S., Baek, Y. S., "Compensation Algorithm of Couple between Levitation and Thrust Force for Transverse Flux Linear Induction Motor with Imbedded Bearing Function," Proc. of KSPE, pp. 480-483, May, 2004.