

자기부상 stage 구동 리니어 모터의 설계 및 특성해석

강규홍*, 안호진, 홍정표, 강도현**
 창원대학교 전기공학과, 한국전기연구원**

Design and Characteristic Analysis of a Linear Motor for Magnetic Levitation

Gyu-Hong Kang*, Ho-Jin Ahn, Jung-Pyo Hong, Do-Hyun Kang**
 Dept. of Electric Engineering, Chang-won University,
 Korea Electro-technology Research Institute(KERI)**

Abstract - This paper deals with design and characteristic analysis of a permanent magnet linear synchronous motor for magnetic levitation stage of semi-conductor manufacture machine. In order to improve the control performance by detent force minimization, skew and PM offset method are used.

1. 서론

최근 모든 산업분야에서 자동화가 요구됨에 따라 자동반송장치 및 생산설비, 수치제어용 공작기 등에서 직선 운동이 가능한 리니어(linear) 서보 시스템의 수요가 날로 증가하고 있다. 현재 대부분의 리니어 시스템은 교류 서보전동기와 회전운동을 직선운동으로 변환하기 위한 기어(gear), 볼스크류(ball screw) 방식의 기계적 동력전달 메커니즘으로 이루어져 있는데, 이러한 회전-직선 변환 메커니즘에 의한 리니어 시스템은 구조가 복잡해지고 마찰에 의한 진동, 소음, 마모가 발생하며 고속화의 한계, 백래쉬(back lash) 현상에 의한 위치오차가 발생하여 시스템 전체의 제어 성능이 저하되는 문제점이 발생하므로 리니어 모터로 직접 추력을 발생시키는 시스템의 연구가 증가하고 있다.[1][2]

리니어 모터는 구조적 특징에 의해 추력뿐만 아니라 수직력도 발생하며 이러한 수직력은 주행 저항으로 작용하여 리니어 시스템의 운전특성을 악화시킨다. 그러나 수직력을 부상시스템의 부상력으로 이용한다면 별도의 부상장치 없이 부상 및 추진력을 확보할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 정밀 위치제어 성능을 확보하기 위해 반도체 제조장비용 자기부상 stage의 부상 및 추진을 위해 영구자석 계자형 리니어 동기전동기의 설계 및 특성해석을 수행하였다. 추진 및 부상 특성은 동기전동기의 d-q축 이론으로부터 전류위상각에 따른 추력 및 흡입력특성으로부터 해석하였다.[1][3] 또한 부상 및 추진 제어성능에 악영향을 미치는 디텐트력(detent force)을 저감시키기 위한 방법을 제안하였다.

2. 추진 및 부상시스템의 특성해석

리니어 동기 전동기를 채용한 추진 및 부상 시스템의 구조를 그림1에, 리니어 동기 전동기의 제원을 표 1에 나타내었다.

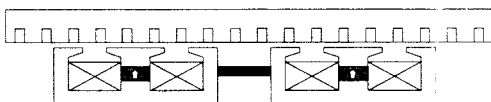


그림 1. 부상 및 추진 시스템의 구조

표 2. 해석모델의 제원

항목		제원	
고정자	철심	공극 길이	3 [mm]
		적층 폭	40 [mm]
		슬롯 폭	10 [mm]
		슬롯 깊이	10 [mm]
회전자	권선	상전류	20 [A]
		슬롯당 도체수	25 [개]
		접적률	50 [%]
가동자	철심	적층 폭	40 [mm]
		슬롯 폭	40 [mm]
		슬롯 깊이	35 [mm]
		슬롯 개구폭	20 [mm]
		가동자 높이	45 [mm]
		가동자 길이	120 [mm]
	영구자석	요크 두께	10 [mm]
		산류자속밀도	1.2 [T]
	폭	20 [mm]	
	높이	10 [mm]	

2.1. 전류위상각에 따른 추력 및 수직력 특성

동기전동기의 d-q축 이론으로부터 전류의 위상이 q축과 이루는 각도를 전류 위상각(current phase angle) γ 로 정의하였으며 전류 위상각 γ 에 따른 전류 벡터도를 그림 2에 나타내었으며 d-q축 전류와 리니어 동기전동기의 발생추력은 다음과 같다.[1][3]

$$I_d = -I \sin(\gamma) \tag{1}$$

$$I_q = I \cos(\gamma) \tag{2}$$

$$F = \frac{\pi}{\tau} (\psi_f I_q + (L_d - L_q) I_d I_q) \tag{3}$$

여기서 τ 는 극간격, ψ_f 는 영구자석에 의한 쇄교자속이며 L_d, L_q 는 d-q축 인덕턴스이다.

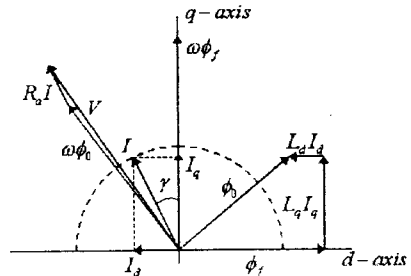


그림 2. 전류 vector diagram

유한요소 해석에 의한 해석모델의 추력 및 수직력 특성을 그림 3에 나타내었다. 발생 추력은 전류 위상각 γ 가 0° 인 q에서 최대추력이 발생하는 반면 수직력은 전류 위상각 γ 가 90° 인 자속이 증가하는 d축에서 최대가 된다. 따라서 추력과 수직력의 최대가 발생하는 위상은 90° 위상차를 가짐을 알 수 있다.

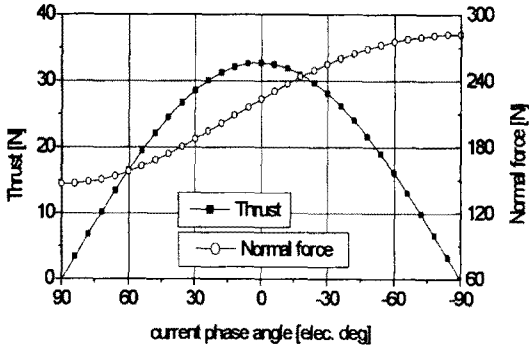


그림 3. 전류위상각에 따른 추력 및 수직력

2.2 가동자 이동에 따른 추력 및 수직력 특성

자기부상 및 추진용 리니어 동기전동기는 운전시 전류 위상각을 일정하게 제어하는 경우 일정 추력 및 부상력이 발생한다. 그러나 고정자 및 가동자에 치, 슬롯 구조를 가지는 경우 슬롯 고조파에 의한 디텐트력이 발생하여 추력 및 수직력 리플이 발생한다.

본 논문에서 제시한 해석모델은 고정자뿐 만 아니라 및 가동자에도 부상제어용 권선을 시행하기 위한 슬롯을 구성하고 있어 디텐트력이 존재한다. 따라서 전류 위상각 제어를 통해 가동자 이동에 따른 추력 및 수직력 특성해석이 요구되어진다. 전류 위상각 제어에 의한 가동자 이동에 따른 유한요소 해석 과정을 그림4에, 추력 및 수직력 특성을 그림 5에 나타내었다.

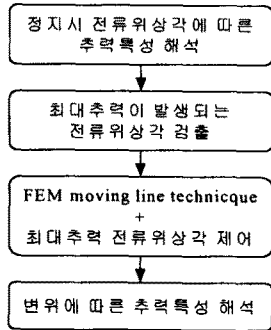


그림 4. 추력특성 해석과정

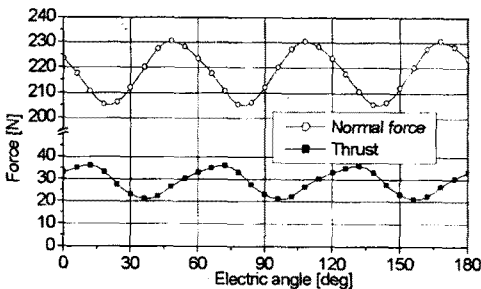


그림 5. 전류 위상각 제어에 따른 추력 및 수직력

전류 위상각 제어에 따른 특성해석 결과 일정한 전류 위상각에서도 추력 및 수직력의 리플은 매우 크게 나타남을 알 수 있다 이러한 추력 및 수직력의 리플은 공극을 유지하는 부상제어에 영향을 미쳐 추진 및 부상특성을 악화시킨다. 따라서 디텐트력의 저감이 요구되어진다.

3. 추진 및 부상시스템의 안정화를 위한 형상설계

부상 및 추진 시스템의 위치제어성능을 만족하기 위해 디텐트력을 감소시키는 것이 매우 중요하다. 본 논문에서는 디텐트력 저감을 위한 방법으로 주로 적용하고 있는 영구자석 또는 슬롯 스큐(skew) 특성과 영구자석 자극 위치 조절법에 의한 디텐트력 특성을 분석하고 디텐트력을 저감을 위한 방법을 제안하였다.

3.1 영구자석의 스큐에 의한 디텐트력 특성

영구자석 스큐에 의한 디텐트력 특성은 그림 6과 같이 다수의 슬라이스(slice)를 가진 영구자석으로 증가화하여 해석하였다. 디텐트력은 슬롯구조와 영구자석과의 상대적인 위치 관계에 의해서 발생하므로 스큐를 주게 되면 각 슬라이스에서 발생하는 디텐트력의 위상차에 의해 디텐트력이 감소한다. 영구자석 스큐에 의한 디텐트력을 그림 7에 나타내었다. 스큐각이 1슬롯 피치인 경우 디텐트력은 완전히 제거되어진다. 스큐를 적용하여 전류 위상각 제어에 의한 추력 및 수직력 특성을 그림 8, 9에 나타내었다. 평균 추력 및 수직력 크기의 변화 없이 리플을 저감시킬 수 있어 추진 및 부상시스템의 안정화가 향상됨을 알 수 있다.

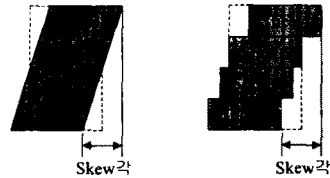


그림 6. 영구자석의 스큐

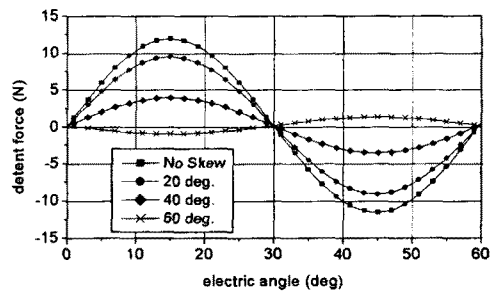


그림 7. 스큐각에 따른 디텐트력

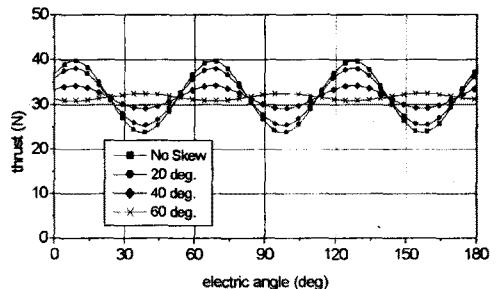


그림 8. 스큐 적용 후 전류 위상각 제어에 따른 추력

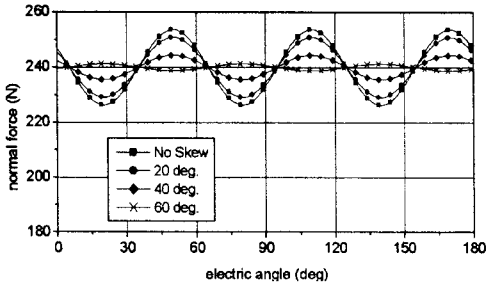


그림 9. 스큐 적용 후 전류 위상각 제어 따른 수직력

3.2 가동자 위치 조절에 의한 디텐트력 특성

영구자석의 스큐와 같은 원리로 영구자석의 자극 위치를 조절하게 되면 디텐트력의 위상차에 의해 이를 상쇄시킬 수 있다. 그러나 본 논문에서 제시한 해석 모델의 경우 가동자에 영구자석 1개가 존재하므로 가동자의 극을 형성하는 치의 상대 위치 변화를 주어야 하며 이에 따른 슬롯 형상의 변화가 발생한다. 따라서 치 및 슬롯 형상의 변화는 설계 시 많은 해석을 수행해야 하는 번거로움이 발생한다. 본 논문에서 제시한 추진 및 부상시스템에서는 2개의 가동자를 직렬로 연결하여 사용하므로 영구자석 자극위치 조절법과 동일하게 두 가동자와 고정자의 상대적 위치 조절을 통해 디텐트력의 저감이 가능하다. 디텐트력 저감을 위해 가동자 위치변화 방법을 그림 10에 나타내었다.

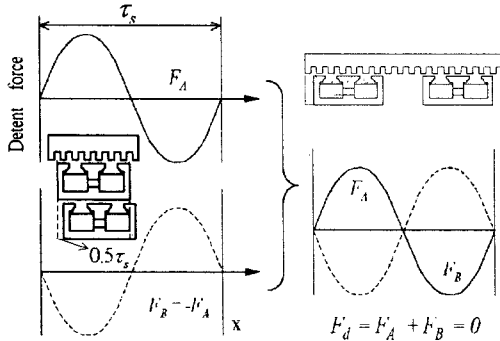


그림 10. 가동자 위치 변화에 의한 디텐트력 저감법

가동자의 상대 위치변화에 따른 디텐트력 특성을 그림 11에 나타내었다. 가동자 하나의 위치를 1/2슬롯(10mm) 피치만큼 위치를 이동시킨 경우 디텐트력을 완전히 상쇄시킬 수 있다. 1/2슬롯 피치 만큼 가동자 위치를 재구성한 모델의 전류 위상각 제어를 통하여 해석한 해석 모델의 등 포텐셜도를 그림 12에, 추력 및 수직력 특성을 그림 13, 14에 나타내었다. 영구자석 스큐와 같은 구조적인 변화 없이 추력 및 수직력의 리플을 저감시킬 수 있어 추진 및 부상시스템의 안정화를 이룰 수 있다.

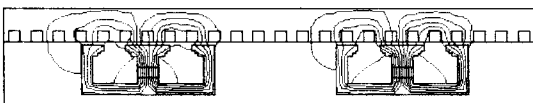


그림 11 가동자 재배치 모델의 등 포텐셜도(1/2슬롯피치)

표 2. 가동자 위치 변화에 따른 디텐트력 크기 비교

offset	디텐트력	저감비(0도 대비)
0[mm]	11.99[N]	100[%]
10[mm]	0.37[N]	3.08[%]

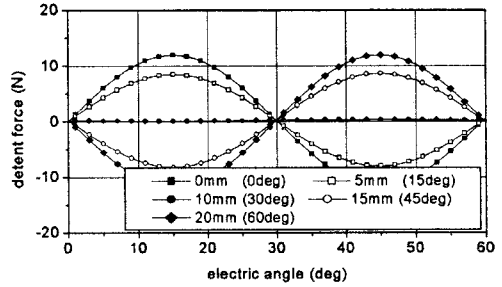


그림 12. 가동자 위치 변화에 따른 디텐트력

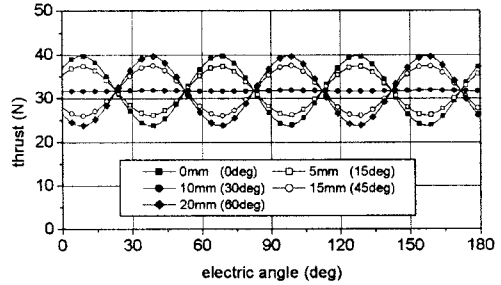


그림 13. 가동자 위치 변화에 따른 모델의 추력특성

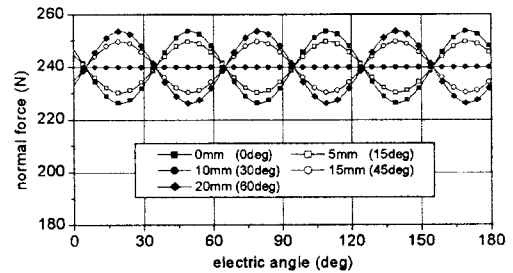


그림 14. 가동자 위치 변화에 따른 수직력 특성

4. 결 론

본 논문에서는 자기부상 stage 추진 및 부상용 리니어 동기전동기의 추력 및 부상력 특성을 전류 위상각을 고려하여 해석하였다. 해석결과 부상 및 추진 병행 시스템의 제어 특성에 악영향을 주는 디텐트력이 매우 크게 발생하여 이를 저감하는 방법으로 영구자석의 스큐각 및 가동자의 위치를 조절하고 디텐트력 및 특성의 변화를 검토, 제시하였다. 해석을 행하였다. 본 논문에서 검토한 두 방법 모두 평균 추력과 수직력의 변화없이 디텐트력을 크게 감소시킬 수 있었으나 리니어 동기전동기의 구조 변화 없이 디텐트력을 저감할 수 있는 가동자 위치 조절법이 본 시스템에서 가장 적절함을 알 수 있다.

따라서, 향후 시스템 특성 향상을 위해 전동기 단체의 특성향상보다는 시스템과 연계한 특성향상의 연구수요가 증가되어질 것으로 생각한다.

(참 고 문 헌)

- [1] Jacek.F.Gieras, "Linear Synchronous Motors", CRC press, 2000.
- [2] 임기재, 우준근, 홍정표, 김규탁, "영구자석 선형동기전동기의 디텐트력 저감법", 전기학회논문지, 제49권, 제11호, 2000.
- [3] 강규홍, 이선권, 홍정표, 김규탁, "단상 영구자석형 유도동기기의 특성해석", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, p144-146, 2000.