

자기부상 및 추진 일체형 동기 리니어 모터의 설계 및 특성 해석

장석명*, 정상섭*, 이성호*, 박영태**
충남대학교 전기공학과, 한국표준과학연구소

Design and Characteristic Analysis of the Linear Homopolar Synchronous Motor

Seok-Myeong Jang*, Sang-Sub Jeong*, Soung-ho Lee*, Young-Tae Park**
*Chungnam Nat'l University, **KRISS

Abstract - The LHSM is the combined electromagnetic propulsion and levitation, braking and guidance system for Maglev. In this paper, the LHSM has the figure-of-eight shaped 3φ armature windings, the field winding, and segmented secondary having transverse bar track. we treat of the development - design, analysis - of a combined electromagnetic propulsion/levitation systems, LHSM.

1. 서 론

세계적인 개발현황과 추진시스템의 용용추이를 검토한 결과, 적합한 추진 시스템으로 편축식 유도형 리니어모터가 널리 이용되고 있지만, 근년에는 동기형을 추진시스템에 주로 채용하고 있다. 더구나 최근에는 LHSM(Linear Homopolar Synchronous Motor)과 LUSM(Linear Unipolar Synchronous Motor)과 같이 추진 및 부상을 단일체시스템에서 동시에 시행하는 모델을 개발하고자 노력하는 추세이다. 이 방식은 시스템의 경량화 및 부속장치의 단순화 등에서 매우 효과적인데, 오늘날 가동, 제어 등 제반기술의 발전으로 이러한 모델의 설계, 제작, 제어가 가능해졌다.

LHSM은 자기부상시스템에서 필요한 전자기 추진 및 부상력, 제동력, 안내력을 단일체에서 발생시키는 전자기시스템이다. 즉 이 모터를 자기부상 차량의 추진 및 부상 시스템으로 이용할 때는 LIM(Linear Induction Motor)과 전자석이 개별적으로 구성되는 시스템에 비해 출력/중량비, 역률, $\eta \cos \theta$ 이 높다. 따라서 에너지변환 효율, 신뢰성, 유지보수 등에서 유리하며 운전시 전력공급기의 용량과 무게가 작아진다.

본 논문에서는 8자형 3상 전기자 권선과 DC 계자권선을 갖는 1차측, 그리고 횡방향 세그먼트형 트랙을 갖는 LHSM을 기본특성식과 등가회로 파라미터식에 의해 설계하였다. 그리고 전류형 인버터 운

전시의 정상특성을 시뮬레이션을 이용하여 해석하였다.

2. LHSM의 기본 원리 및 모델

LHSM은 1차측 철심에 직류권선과 3상 아마츄어 권선이 별도로 감겨지며, 2차측 트랙은 가변 퀼력 턴스 구조로 세그먼트형이나 놋치형으로 구성된다. 직류권선은 2차측과 작용하여 수직방향의 부상력을 발생시키고, 3상 권선은 이동자계를 발생시켜 진행 방향의 추력을 발생시킨다.

LHSM은 그림 1과 같이 이동자의 운동방향을 가르는 자속경로를 갖는 횡방향 자속형과 그림 2와 같이 운동방향의 자속경로를 갖는 길이방향 자속형이 있다. 따라서 1차측 철심도 각각 자속경로에 따라 횡방향과 길이방향으로 적층을 하는 것이 일반적이다.

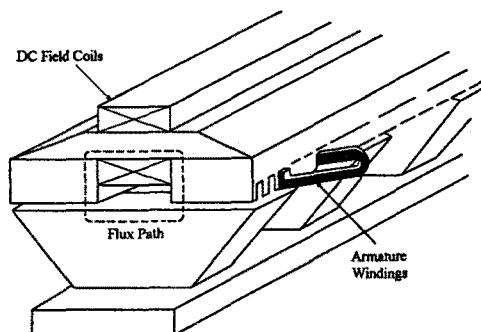


그림 1 횡방향 자속형 LHSM

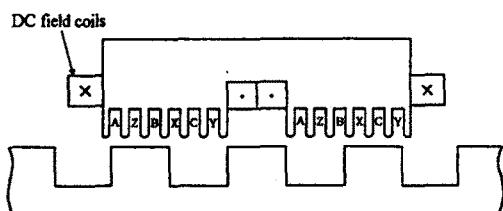


그림 2 길이방향 자속형 LHSM

위의 두 가지 형태는 단순하고 비용이 저렴한 긴 레일에 적합하다. 두께가 얇은 2차측은 길이방향 LHSMS에 필요하고, 반면에 견고한 구조는 횡방향 LHSMS에 이용된다.

3. 설계

3. 1 설계를 위한 기본 특성식

LHSMS의 추력은 식(1)과 같다.

$$F_x = \frac{3 E_1 I_1 \cos \gamma_o}{U_s} \quad (1)$$

여기서 E_1 은 전기자 권선에 유기되는 전압, γ_o 은 전기자와 계자자속(파형의 중심선)의 위상차, I_1 은 상전류, U_s 는 동기속도이다.

수직력은 모터의 길이 방향으로의 자속밀도 분포에 의해 다음 식(2)에 계산된다.

$$F_n = \frac{2a p \tau}{\mu_o} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} [B_f + B_{al} \sin(\frac{\pi x}{\tau} - \gamma_o)]^2 dx \quad (2)$$

여기서 B_f 는 2차측 pole 영역에서의 DC 계자에 의한 공극자속밀도, B_{al} 는 전기자에 의한 기본파 공극자속밀도, $2a$ 는 한쪽 스택의 유효폭, p 는 pole pair의 수, τ 는 극간격이다.

3. 2 설계를 위한 등가회로 정수

LHSMS의 운전특성은 그림3과 같은 일반적인 돌곡형 $d-q$ 리액턴스 등가회로 모델로부터 구해진다. 전기자 누설 리액턴스는 일반 회전기기의 slot, tooth tip, end winding 리액턴스에 고조파 누설리액턴스를 더해져서 구해진다.

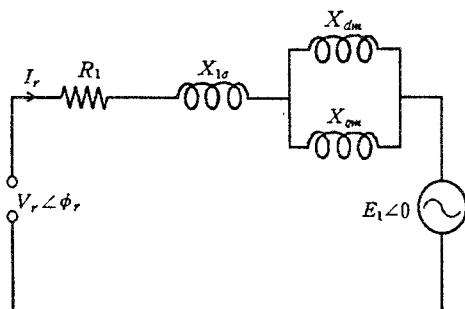
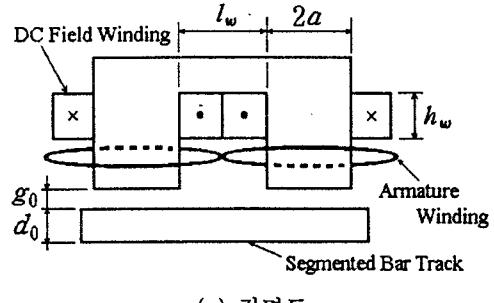


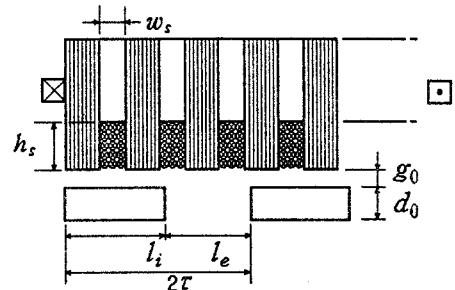
그림 3 LHSMS의 d-q 등가회로

3. 3 설계 모델 및 요구 사양

LHSMS는 2절에서 설명했듯이 크게 두 가지 기본적인 형태로 나뉘어지고 2차측도 여러 가지 형태가 있다. 본 논문에서는 기존의 철심으로도 간단히 만들 수 있는 횡방향 자속형을 설계모델로 정하였고 아마추어 코일은 일반적인 권선법에 의해 8자 모양을 선정했다. 또한 2차측은 세그먼트형으로 횡방향 bar track의 형태를 선택하였다. 그림 4는 선정된 설계모델 형상과 파라미터이다.



(a) 정면도



(b) 측면도

그림 4 설계모델의 형상과 파라미터

LHSMS 설계 사양과 지침은 응용되는 분야, 예를 들어 도시형 열차인가, 고속형 자기부상열차인가, 또는 산업 자동화용인가에 따라 결정된다. 표 1의 설계 사양 및 지침은 LIM 설계와 운전의 경험자료를 통해 얻어졌다.

표 1 설계 사양 및 지침

기호	파라미터	값 [단위]
F_{sr}	정격 추력	200 [N]
F_{nr}	정격 수직력	2000 [N]
U_r	정격 속도	7.2 [m/s]
g_o	정격 공극	4 [mm]
$4a$	총 스택 폭	800 [mm]
B_t	치의 설계 자속밀도	1.5 [T]
J_{CF}	계자권선 전류밀도	3 [A/mm ²]
J_C	전기자권선 전류밀도	4 [A/mm ²]

2차측 세그먼트 또는 노치의 길이 및 간격, 형상에 따라 공극 합성자속과의 작용이 결정되므로 2차측 트랙은 전체 힘특성에 영향을 주는 매우 중요한 설계 파라미터가 된다. 추진과 부상을 함께 하는 시스템에서는 그림 4(b)에서 세그먼트 길이 l_i 는 거의 τ 와 같게 되어 추진력으로만을 이용하는 시스템보다 좀 더 긴 세그먼트 길이가 필요하다. 또한 세그먼트 두께 d_0 는 누설을 줄이기 위해 $(g_0 / d_0) < 0.25$ 이어야 한다[1]. 그림 5는 설계과정을 간단히 요약한 순서도이고 표 2는 설계결과

와 등가회로수값이다.

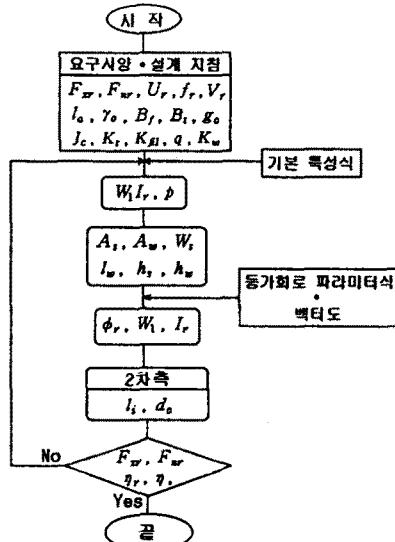


그림 5 설계 순서도

표 2. 설계 파라미터 및 등가회로 정수

기호	파라미터	값 [단위]
B_{al}	전기자 기본파 자속밀도	0.38 [T]
W_1	상당 권선수	522
I_r	정격 전류	3.0 [A]
P_1	극수	4
τ	극간격	60 [mm]
w_s	슬롯폭	5.2 [mm]
l_w	창폭	150 [mm]
h_s	전기자 높이	27 [mm]
h_w	창높이	67 [mm]
w_t	치폭	3.2 [mm]
n_c	코일당 턴수	58
$W_f I_f$	계자권선의 암페어-턴	6366 [AT]
R_1	상당 전기자 권선저항	14.21 [Ω]
X_{1s}	상당전기자 누설 리액턴스	39.49 [Ω]
X_m	상당 자화 리액턴스	15.26 [Ω]
E_0	상당 유기기전력	175.41 [V]
l_i	2차측 세그먼트 길이	60 [mm]
d_0	2차측 세그먼트 두께	17 [mm]

4. 인버터로 운전되는 LHSM의 정상 특성

LHSM의 Y결선된 전기자 권선과 계자권선에 각각 이상적인 전류형 인버터와 DC 전압원에 의해 전원이 공급된다면, 가정에 의해 모터의 상전류는 그림 6과 같다.

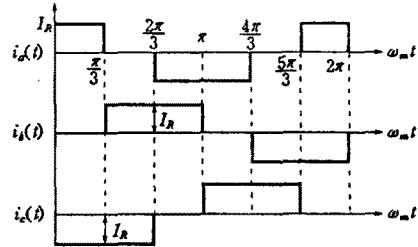


그림 6 이상적인 모터의 상전류 과정

그림 7은 모터 방정식에 의해 계산된 정상상태에서의 추력 및 수직력 특성과 그 때의 계자전류 과정을 보여준다.

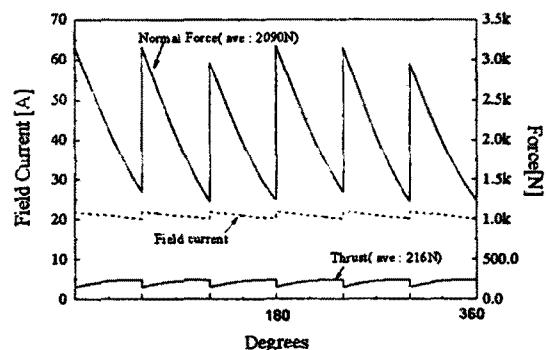


그림 7 정상상태에서의 힘 특성과 계자전류

그림 7에서 계자전류는 속도에 의해 유기된 요소를 포함하고 추력과 수직력은 주파수의 6배에 해당하는 맥동이 존재함을 알 수 있다. 이러한 추력의 맥동은 고속에서는 큰 관성에 의해 무시될 수 있으나 수직력 맥동은 부상제어를 어렵게 만들고 추력만을 이용하는 시스템에서는 이 모터를 활용하기 어렵게 만든다.

5. 결론

추력 200N, 수직력 2000N의 횡방향 자속형 LHSM을 설계모델로 정하고, 기본 특성식과 등가회로 및 백터도를 이용하여 기본 설계법을 확립하였다. 또한 이를 토대로 전류형 인버터 운전시 정상특성을 해석하였다. 따라서 향후 자기부상열차는 물론이고 반도체 공정에서의 웨이퍼 이송장치 등의 분야의 응용 개발을 위한 기초 자료를 얻을 수 있었다.

앞으로 FEM해석을 통해 설계법을 확립하고 제작 및 시험을 통해 이를 확인해야 할 것이다.

(참고문헌)

- [1] I. Boldea and S.A. Nasar, "Thrust and normal force pulsations of current-inverter fed linear inductor motors", EME, Vol. 7, No. 2, 1982