

자기부상/추진 일체화를 위한 선형 스위치드 릴렉턴스 모터의 모델링

성소영*, 조한욱*, 성호경*, 장석명**

한국기계연구원 자기부상연구팀*, 충남대학교 전기공학과**

Modeling of Linear Switched Reluctance Motor For Self Levitation and Propulsion

Soyoung Sung*, HanWok Cho*, Hokyung Sung*, Seokmyung Jang**

Division of MagLev Research Team of KIMM*, Dept. of Electric Eng. of ChungNam Natioanl Univ.**

Abstract - This paper proposes a mathematical modelling about Levitation Force and Propulsion Force in a system, where Primary and Secondary LSRM air-gap is irregular. This can be a suitable model for Magnetically levitation Train, where Primary and Secondary air-gap mechanically has to control simultaneously Levitation Force and Propulsion Force.

1. 서 론

스위치드 릴렉턴스 모터(Switched Reluctance Motor)는 1838년 영국의 Glasgow-Edinburgh간의 기차에 사용된 이래, 구조적 단순성과 높은 효율, 냉각의 용이성, 초고속성, 낮은 제작비용 및 넓은 범위의 가변속 구동이 가능하다는 장점으로 인해 다양한 분야에 적용하기 위한 연구가 진행되어져 왔다[1]. SRM은 동기형 릴렉턴스 전동기와 마찬가지로 전자기토크보다는 릴렉턴스 토크를 이용한 VR(Variable Ruluctance Motor)전동기로서 1980년대 전력전자 기술의 발달과 더불어 급속히 발전하였다. 이후 SRM의 단점인 소음진동에 대한 분석과 이를 억제하기 위한 새로운 제어방식 및 드라이브에 대한 많은 연구가 진행되어져 왔다[2]. LSRM은 스위칭 제어 장치가 결합된 특수형태의 모터로 분류되어진다. LSRM은 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조를 하고 있으며 각기 다른 개수의극을 가지고 있다. 특히, 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 권선이나 영구자석이 존재하지 않는 간단한 구조를 가진다. LSRM의 구동원리는 고정자의 각 상을 순차적으로 여자시킬 때 고정자의 쇄교자속이 최대가 되려는 방향으로 회전자가 회전하려는 특성을 이용한 것으로 회전자의 위치에 따라 고정자의 해당 권선을 여자시킴으로서 토크를 얻게 된다. 즉, 스위칭 소자를 ON, OFF시켜 해당권선에 전압을 인가하여 전류의 크기를 조절하고, 그때의 전류 크기와 비례하는 쇄교자속 수에 의해 가변속 운전이 가능하게 된다. SRM은 이러한 간단한 구조이기 때문에 제작 생산적인 측면에서 상당한 이점을 지니고 있고, 직류모터와 같이 기동특성이 좋고 토크가 큰 반면에 정기적으로 브레이커를 교환하는 등 유지, 보수의 필요성이 적으며, 유도전동기에 비하여 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적 당 토크, 효율 및 컨버터의 정격 등 많은 부분에서 우수한 특성을 지니고 있다.[1] LSRM은 SRM을 축 방향으로 잘라 평쳐놓은 형태의 기기로 회전기가 직선 추력을 얻기 위하여 기어, 벨트 등을 연결하는 반면에 직접 추력을 전달할 수 있다. 그러나 직선기의 경우 구조적으로 수직력이 크게 발생하게 되어 공극의 크기를 십 수 mm 정도로 취해야만 하므로 회전기에 비하여 역률이 나쁘다. 또 단부 효과 및 공극에서의 누설자속을 적게 하기 위하여 극 간격이 가능한 한 크게 해야 하는 등 회전기와는 구조 및 특성이 매우 다르다.[3]

한편, 이러한 연구들을 기반으로 SRM을 축방향으로

펼친 LSRM으로 확장한 여러 연구가 진행되어져 왔으나, 이러한 LSRM은 모두 SRM의 설계기법과 모델링을 기반으로 하고 있어, 1차측과 2차측의 공극이 기계적 구속으로 인하여 공극이 일정한 상태에서 LSRM의 설계 및 제어가 이루어져 왔다. 따라서 본 논문에서는 1차측과 2차측의 공극이 변하는 LSRM에 대한 모델링을 제안하고자 한다. 이러한 시스템은 자기부상열차와 같이 1차측과 2차측의 공극을 기계적인 장치로 고정할 수 없는 경우와 같은 분야에 활용될 수 있을 것으로 사료 된다.

2. 본 론

2.1 정렬상태의 부상모델

그림 1과 같은 3상 LSRM은 각 상이 독립적으로 제어가 가능한 구조로 이루어져 있으므로 부상계는 세 개의 전자석이 병렬로 연결되어져 있는 시스템으로 모델할 수 있다. 그림1에서와 같이 A상에 전자석이 정렬되어 있는 경우, 하나의 전자석을 갖는 부상시스템의 모델은 상전도 흡인식 부상시스템으로 [3]로부터 식 1로 쓸 수 있다.

$$w_m(t) = \frac{1}{2} [L(g_z, i)]^2 \quad (1a)$$

$$F_z^d(g, i) = \frac{d w_m(t)}{dt} = \frac{1}{4} \left[\frac{L(g_z)}{dg_z} i + \frac{L(i)}{di} g_z \right] \quad (1b)$$

$$F(g, i) + m \frac{d^2 g_z}{dt^2} = mg + f_d(t) \quad (1c)$$

$$\begin{aligned} v_o(t) &= R_a i_a(t) + L(g_z, i_o) \frac{di_o(t)}{dt} \\ &= R_a i_a(t) + \frac{d}{dg_z} [L(g_z, i_o)] i_o(t) \end{aligned} \quad (1d)$$

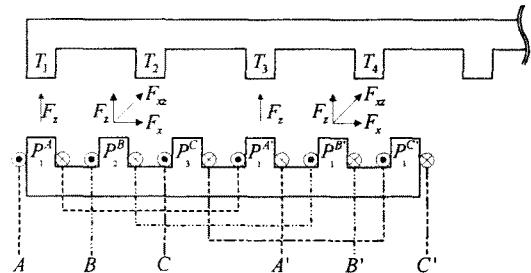


그림 1. 가변공극을 갖는 LSRM

식(1)로부터 A상이 정렬되었을 경우의 상태방정식은 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{\mu_0 N^2 A}{4m} \left(\frac{x_3}{x_1} \right)^2 + G \\ \dot{x}_3(t) &= \frac{x_2}{x_1} x_3 - \frac{2R}{\mu_0 N^2 A} x_1 x_3 + \frac{2x_1}{\mu_0 N^2 A} u \\ y &= x_1\end{aligned}\quad (2)$$

여기서 x_1 은 수직방향의 공극, x_2 는 수직방향의 상대속도, x_3 는 수식방향의 가속도이다. 식(2)의 시뮬레이션 블록도를 그림 2에 보였다.

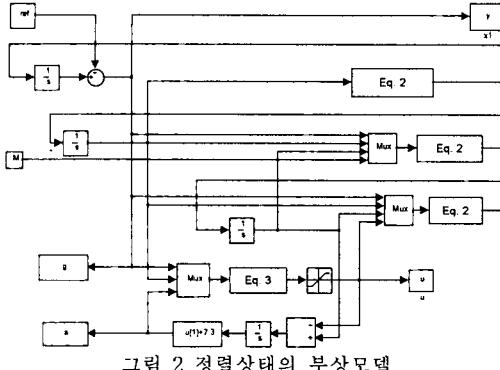


그림 2 정렬상태의 부상모델

그림 2에서 식(3)은 제어식으로 다음식으로 나타난다.
 $u = k_1(r - x_1) + k_2x_2 + k_3x_3$ (3)

식(3)에서 k_1 , k_2 , k_3 는 제어이득이다.

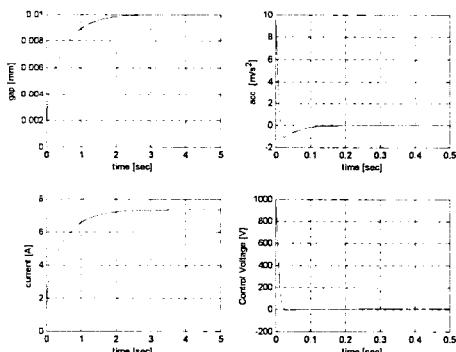


그림 3 정렬상태에서의 부상시스템 시뮬레이션 결과

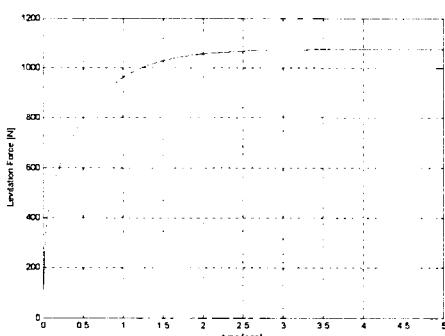


그림 4 정렬상태에서의 부상력

2.2 비정렬 상태의 부상모델

비정렬 상태인 경우(B상)는 부상력 F_x 와 추진력 F_z 가 동시에 존재하므로 전기적 에너지는 공간에 저장되는 에너지와 기계적으로 변환되는 에너지로 나타낼 수 있다.

$$dw_e = d(w_i + w_s + w_m) \quad (4)$$

여기서 dW_t 은 열 손실로 인한 에너지 손실이다.

P_x^B 가 x 방향으로 dx 변위만큼 움직인다고 가정하면 기계적인 에너지는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$w_{mx} = f_x \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

여기서 f_x 는 x 축 방향의 추진력이다.

공극에서의 자속밀도는 식 (6)으로 나타난다.

$$B_g = \frac{\phi}{XY} \quad (6)$$

여기서 XY 는 1차측과 2차측이 만나는 면의 면적이다. LSRM의 경우 공극이 SRM에 비해서 매우 크고 공극의 자기저항이 철심의 자기저항에 비해서 매우 크므로 자속은 공극에서만 나타난다. 즉,

$$\phi = B_g A_{eff} \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하면,

$$\phi = B_g \cdot XY = \mu_0 H_g \cdot XY = \mu_0 \frac{N_{ph} i}{Z} \cdot XY \quad (8)$$

식 (8)에서 N_{ph} 는 한상의 권선수이다. 따라서,

$$N_{ph} i = \frac{\phi Z}{\mu_0 XY} \quad (9)$$

로 나타낼 수 있다.

전기적 에너지는 w_e 는

$$dw_e = i \cdot d\lambda = i \cdot N_{ph} d\phi = \frac{\phi Z}{XY} \cdot d\phi \quad (10)$$

또한, 공간상에 저장되는 에너지는

$$w_s = \frac{B_g^2 \cdot XYZ}{2\mu_0} = \left(\frac{\phi}{XY} \right)^2 \cdot \frac{XYZ}{2\mu_0} = \frac{\phi^2 Z}{2\mu_0 XY} \quad (11)$$

x 축 방향으로 변화하는 공간상의 에너지는 다음식으로 주어진다.

$$w_{sx} = - \frac{\phi^2 Z}{2\mu_0 X^2 Y} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\phi Z}{\mu_0 XY} \cdot d\phi \quad (12)$$

따라서 추진력으로 나타나는 에너지는 식 (10)과 식 (12)로부터

$$\begin{aligned}dw_{mx} &= dw_e - dw_{sx} \\ &= \frac{\phi Z}{\mu_0 XY} \cdot d\phi + \frac{\phi^2 Z}{2\mu_0 X^2 Y} \cdot dx - \frac{\phi Z}{\mu_0 XY} \cdot d\phi \\ &= \frac{\phi^2 Z}{2\mu_0 X^2 Y} \cdot dx\end{aligned} \quad (13)$$

따라서, 추진력은 식 (5)로부터

$$f_x = \frac{dw_{mx}}{dx} = \frac{\phi^2 Z}{2\mu_0 X^2 Y} = \frac{(B_g XY)^2 Z}{2\mu_0 X^2 Y} = \frac{B_g^2}{2\mu_0} \cdot YZ \quad (14)$$

z 축 방향으로 움직이는 에너지의 변화는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$dw_{xz} = \frac{\phi^2}{2\mu_0 XY} \cdot dz + \frac{\phi Z}{\mu_0 XY} \cdot d\phi \quad (15)$$

또한 z 축 방향으로 움직이는 기계적 에너지는

$$\begin{aligned}
dW_{mz} &= dW_e - dW_{sz} \\
&= \frac{\phi Z}{\mu_0 XY} \cdot d\phi - \frac{\phi^2}{2\mu_0 XY} \cdot dz - \frac{\phi Z}{\mu_0 XY} \cdot d\phi \\
&= -\frac{\phi^2}{2\mu_0 XY} \cdot dz
\end{aligned} \tag{16}$$

따라서, 부상력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$f_z = \frac{dW_{mz}}{dz} = -\frac{\phi^2}{2\mu_0 XY} = -\frac{(B_g XY)^2}{2\mu_0 XY} = \frac{B_g^2}{2\mu_0} \cdot XY \tag{17}$$

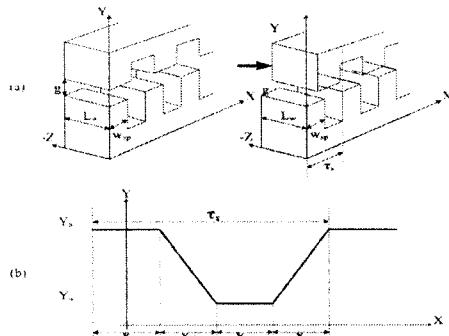


그림 5 Analytical Force calculation model

3. 결 론

본 논문에서는 추진력과 부상력을 동시에 가지는 LSRM에서의 정렬상태일때의 부상시스템에 대한 해석과 비선형 동특성 모델을 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였으며, 비정렬상태일때의 부상력과 추진력의 모델을 해석적인 방법과 유한요소해석법을 통하여 비교 분석하였다.

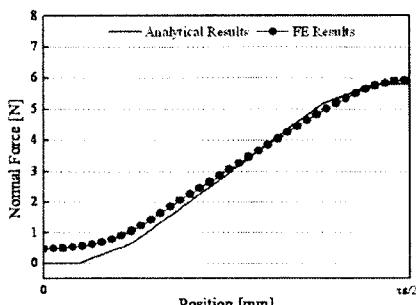


그림 6 해석모델의 부상력

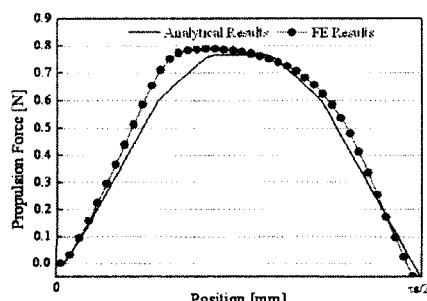


그림 7 해석모델의 추진력

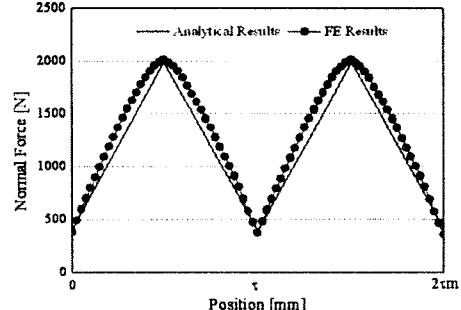


그림 8 해석모델의 부상력

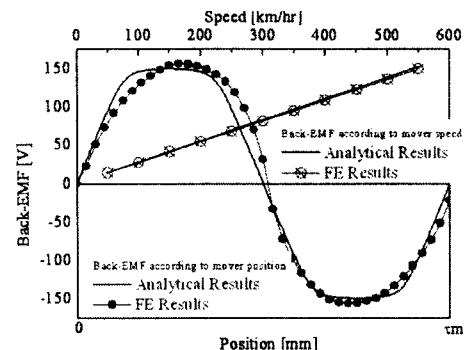


그림 9 속도에 따른 해석모델의 추진력과 역기전력

【참 고 문 헌】

- [1] 김윤현, 토크 리플 저감을 위한 SRM 최적 설계 및 직접 토크 제어, 박사학위논문, 한양대학교, 2001.
- [2] 정연호, VVVF 인버터로 구동되는 LIM의 동특성, 석사학위논문, 충남대학교, 1996.
- [3] K.N.Srinivas, R.Arumugam, "Analysis and characterization of switched reluctance motors," IECON '03, The 29th Annual Conference of the IEEE, vol.3, 2-6 Nov. 2003, pp.2690-2698.
- [4] R.Krishnan, Switched reluctance motor drives, CRC Press, 2001.
- [5] Seok Myeong Jang, Ji Hoon Park, Jang Young Choi, Han Wook Cho, "Analytical prediction and measurements for inductance profile of linear switched reluctance motor," IEEE Trans. Magnet., vol.42, Oct. 2006, pp.3428-3430.