

누설 및 프링징 자속을 고려한 종자속형 자기부상 전자석의 힘 특성 해석

유주성, 권두진, 이준병, 백효선, 조한욱
 충남대학교 전기전자통신공학교육과

Analysis on the Force Characteristics of the Longitudinal Flux Type Electromagnet considering the Leakage and Fringing Flux

Ju-Sung Yu, Du-Jin Kwon, Joon-Byung Lee, Hyo-Sun Baek, Han-Wook Cho
 Department of Electric, Electronic & Communication Engineering Edu., Chungnam Nat'l University

Abstract - The attraction force is an important parameter for permanent-magnet(PM) linear machines. This paper aims to analysis lumped magnetic circuit model of a magnetic levitation system. It accounts for the fringing effect and leakage flux which may greatly affect the accuracy of the analytical model for the optimal lumped magnetic circuit model. consequentially it will be able to apply to prospective permanent-magnet(PM) linear machines for accurate analysis.

1. 서 론

자기부상열차(MAGLEV:Magnetically Levitated Vehicle)는 전자기력에 의해 부상하고 가이드웨이 상에서 일정한 공극을 유지한 채 선형전동기로 추진하는 저소음, 친환경적인 미래형 교통수단이다[1]-[2]. 이미 세계의 여러 강대국, 선진국을 중심으로 자기부상열차의 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다

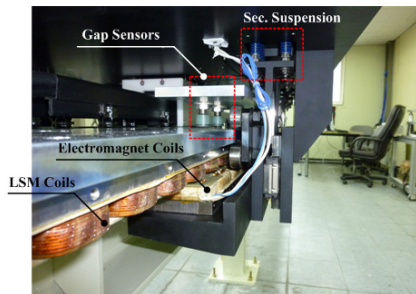
자기부상열차에 적용되는 전자석에는 상전도 전자석, 하이브리드(영구자석+전자석)자석, 초전도 전자석 등이 사용되는데, 자속의 방향에 따라 횡자속형 및 종자속형으로 나눌 수도 있다. 종자속형 자기부상 전자석은 선형동기전동기가 추진시스템으로 적용되는 초고속형 자기부상열차에서의 전자석 형태이며, 독일의 TRANSRAPID, 미국의 MagneMotion사의 자기부상열차 모델이 이미 개발된 예가 있다.

자기부상 전자석의 정확한 특성해석을 위하여 주로 유한요소해석(FEM)이 사용되고 있지만, 본 논문에서는 초기 설계시 여러 파라미터에 따른 부상력 특성해석 결과를 빠르게 얻을 수 있도록 등가 자기회로 해석법(Equivalent Magnetic Circuit; EMC)을 적용하였다. 상대적으로 공극이 큰 자기부상 전자석의 정밀한 자계 및 힘특성 해석을 위해 누설 자속 및 프링징 자속을 정의하고 각 자속경로에 대한 자기저항 모델링 및 자속밀도 해석, 힘특성 해석을 수행하였다.

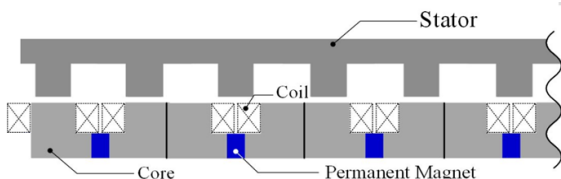
2. 종자속형 전자석을 갖는 축소형 자기부상 시스템

2.1 축소형 자기부상 시스템 구조

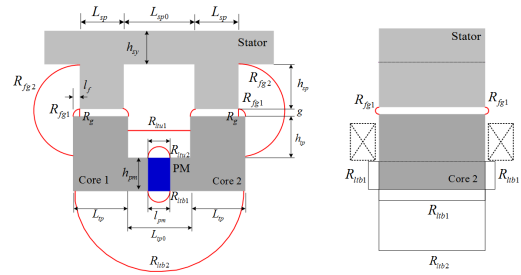
그림 1은 초고속 자기부상열차의 부상시스템으로 적용 가능한 하이브리드 전자석이 적용된 축소형 자기부상열차 시험기를 보여준다. 해석대상 모델은 선형동기전동기의 긴 고정자(Long-Stator)와 이동자(Translator)축으로 크게 나누어지며, 긴 고정자측은 적층 구조상관 및 3상 권선이 설치되고, 차량 측에 부착되는 이동자 측은 부상체로서 적층 구조상관 코어, 영구 자석 및 제어 코일로 구성된다[3].



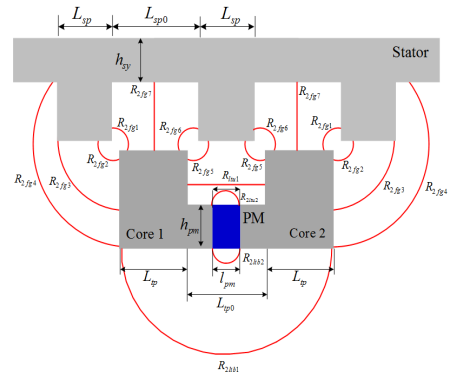
<그림 1> 자기부상시스템의 구조 - 제작 모델



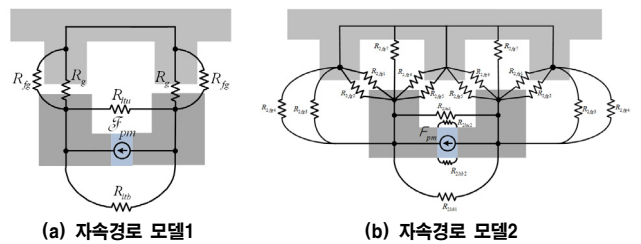
<그림 2> 자기부상전자석 상세 구조



(a) 측면 (b)정면
 <그림 3>전자석의 자속경로 모델 1



<그림 4> 전자석의 자속경로 모델 2

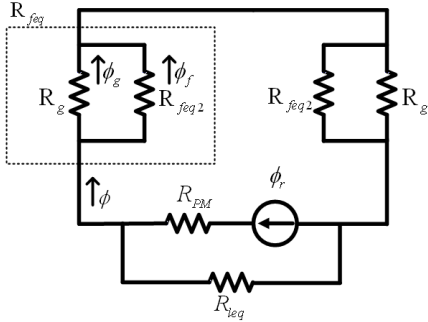


(a) 자속경로 모델1 (b) 자속경로 모델2
 <그림 5> 자속경로를 고려한 자기회로 모델

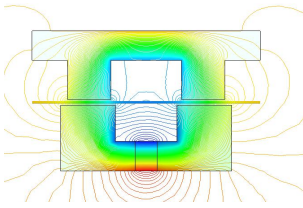
그림 2는 축소형 자기부상시스템의 전체 구조를 나타내고 있으며, 선형동기전동기의 긴 고정자 구조와 영구자석을 갖는 자기부상 전자석의 구조를 자세히 보여준다.

2.2 자속경로 및 자기회로 모델

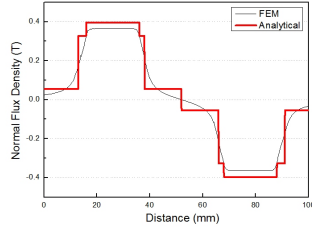
그림 3과 그림 4는 그림2의 자기부상시스템 상세구조에서 고정자 치와 정렬(자속경로 모델 1)된 상태와 비정렬(자속경로 모델 2)된 상태를 각각 분리하여 자속의 흐름을 도시한 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 영구자석 주변에서의 누설 자속과 공극 주변에서의 프링징 자속이 각각의 상태에 대하여 상세히 고려하였다. 그림 5는 자속경로를 고려한 자기회로 모델을 나타낸다.



〈그림 6〉 자속경로 모델 1 및 2의 간이화된 등가회로

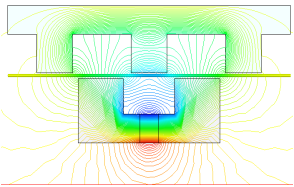


(a) 등자속선 분포

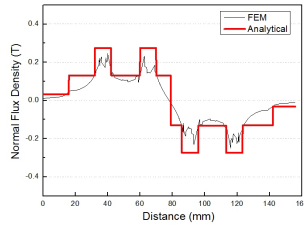


(b) 공극자속밀도 분포 특성

〈그림 7〉 자속경로 모델 1의 자계특성



(a) 등자속선 분포



(b) 공극자속밀도 분포 특성

〈그림 8〉 자속경로 모델 2의 자계특성

3. 누설 및 프린징 자속을 고려한 등가 자기회로 해석

3.1. 등가 자기회로 해석

누설 및 프린징 자속을 고려한 자기회로 모델로 등가화 하기 위하여, 각 경로에 대한 자기저항(또는 퍼미언스) 정의 시, 자속 형태의 평균, 자속경로의 평균 면적 정의, 자속경로의 평균 길이를 정의하였다.

그림 5에 나타낸 자속경로 모델 1과 2의 등가회로는 두 모델 모두 동일하게 그림 6과 같이 간소화 될 수 있다. 그림 6의 등가회로에서 자기저항(\$R\$) 과 자속(\$\phi\$)는 식(1)-(8)으로 정의된다.

$$\Phi = \frac{R_{leq}}{R_{leq} + 2R_{feq}} \phi_R \quad (1)$$

$$\Phi_g = \frac{R_{leq2}}{R_{leq2} + 2R_g} \phi \quad (2)$$

$$B_g = \frac{\Phi_g}{A_g} \quad (3)$$

$$F_g = \frac{B_g^2 \cdot A_g}{2\mu_0} \quad (4)$$

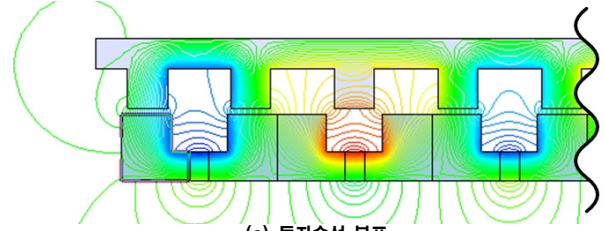
$$\Phi_2 = \frac{R_{2leq}}{R_{2leq} + 2R_{2feq}} \phi_R \quad (5)$$

$$\Phi_{2fg1} = \frac{R_{2feq1}}{R_{2fg1} + R_{2feq1}} \Phi_2 \quad (6)$$

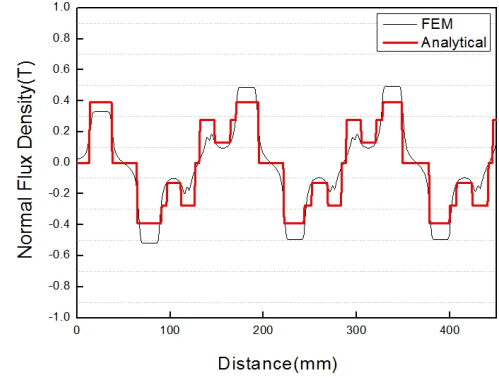
$$B_{2fg1} = \frac{\Phi_{2fg1}}{A_{2fg1}} \quad (7)$$

$$F_{2fg1} = \frac{B_{2fg1}^2 \cdot A_{2fg1}}{2\mu_0} \quad (8)$$

이와 유사한 방법으로 각각의 자속경로에 대한 자속밀도 및 힘을 계산할 수 있다.



(a) 등자속선 분포



(b) 공극자속밀도 분포 특성

〈그림 9〉 전체 구조의 자계특성

〈표 1〉 축소형 자기부상 전자석의 흡인력 해석 결과 비교

	EMC	FEM	Error
Attraction Force	1,150	1,485	22.6(%)

3.2 유한요소해석 및 해석결과 비교

자기부상 전자석의 누설 및 프린징 자속을 고려한 등가 자기회로 해석 결과를 검증하기 위하여 유한요소해석을 수행하고 각 해석결과에 대한 비교를 수행하였다.

그림 7은 자속경로 모델 1의 등자속선 분포 및 공극자속밀도 분포 특성을 나타낸다. 유한요소해석에 의한 등자속선 분포를 통해 누설 및 프린징 자속의 경향을 확인 할 수 있으며, 그림7(b)의 자속밀도 분포 특성은 유한요소해석결과와 본 논문에서 제시한 등가 자기회로 해석에 의한 결과가 유사한 경향을 띠고 있음을 나타낸다. 그림 8(a), (b)는 자속 경로 모델 2의 자계특성 및 공극자속밀도 해석결과를 보여준다.

그림 9(a)는 12개의 극을 갖는 축소형 자기부상시스템에서 유한요소 해석에 의한 등자속선 분포를 나타내며 6극에 해당하는 길이에서의 공극 자속밀도 분포 특성을 그림 9(b)에 나타내었다. 표 1은 12극 자기부상전자석에서의 힘특성을 유한요소해석과 비교한 결과를 나타낸다.

4. 결 론

본 논문에서는 중자속형 자기부상 전자석의 힘 특성을 해석하기 위해 누설과 프린징 자속이 고려된 등가자기회로 해석을 수행하였다. 연구자석을 갖는 자기부상 전자석의 자기회로를 등가화 하여 공극에서의 자속 밀도를 구하고 힘 특성을 계산하였다. 본 연구를 통해 누설자속 및 프린징 자속을 고려한 보다 실제적이고 정확한 자기부상 전자석의 힘 특성을 계산 할 수 있었다. 그러나 등가자기회로의 단순한 결합 해석은 유한요소해석 결과와 약 22.6%의 오차를 보였다. 향후 오차 요소를 제거하기 위한 특성해석을 수행할 예정이다. 또한 자기부상 전자석의 제어 코일을 고려한 힘특성 해석에 관한 추가연구를 진행할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] Hyung-Woo Lee, Ki-Chan Kim, and Ju-Lee, "Review of maglev train technologies," IEEE Trans. Magn., vol.42, no.7, pp.1917-1924, 2007.
 [2] A.Cassat and M. Jufer, "Maglev projects technology aspects and choices," IEEE Trans. App. Suercon., vol.12, no.1, pp915-925, Mar. 2002.
 [3] 조한욱, 김창현, 한형석, 이종민, 김보성, 김동성, 이영신, "초고속 자기부상열차를 위한 하이브리드형 부상 추진 시스템의 설계 및 특성해석," 대한전기학회논문지 59권, 4호, pp.715-721, 2010년 4월.