

# A Study on the Levitation Force of Maglev Logistics Transport System Based on Magnetic Equivalent Circuits Considering the Fringing Effect

프린징 효과를 고려한 자기등가회로 기반 자기부상 물류이송시스템의 부상력에 관한 연구

Junho Kang · Jung Ho Ahn · Hyunwoo Kim · Seoung-Taek Oh · Ju Lee · Chang Hyun Kim

강준호\* · 안정호\* · 김현우\* · 오승택\* · 이 주\* · 김창현†

## Abstract

In this paper, the EMS(Electro-Magnet Suspension) E-type magnetic levitation system is interpreted through magnetic equivalent circuit. In addition, the system is interpreted through the finite element analysis program, and the improved equivalent circuit analysis method is introduced to reduce the error of magnetic equivalent circuit calculation result. As an improvement method, a magnetic equivalent circuit model with fringing effect is introduced at the teeth of the iron core adjacent to the air gap. Finally, the feasibility of the improvement model is verified by comparing the improved magnetic equivalent circuit model with the FEA result.

## Key Words

Magnetic Equivalent Circuit, Magnetic Levitation Transport System, Fringing Effect

## 1. 서론

최근 디스플레이는 TV, 컴퓨터, 휴대폰 등 많은 어플리케이션에 널리 사용되고 있다. 특히 대형 디스플레이에 대한 수요 증가에 따라 증착 공정 설비도 더욱 커지고 있다. 일반적으로 대형 디스플레이일수록 높은 등급의 패널을 요구한다. 하지만 기존 증착 공정은 컨베이어 벨트를 통해서 접촉식으로 이루어졌고 이는 소음·진동·분진 등의 문제를 가지고 있다. 특히 분진 등의 입자는 디스플레이 장치의 주여 결합의 원인이 된다. 따라서 이와 같은 단점을 극복하기 위해 새로운 공정 시스템인 자기부상 시스템이 많은 관심을 받고 있다[1-2].

자기부상 시스템은 영구자석 또는 전자석을 통해 전자기력을 만들어 물체를 부상시킨다. 물체를 마찰 없이 이동시키므로 진동, 소음, 분진 등이 발생하지 않아 자기부상 열차, 물류 이송용 등 다양한 분야에서 응용된다[3]. 자기부상 시스템을 설계하기 위해서는 정확한 부상력 예측이 요구된다. 일반적으로 2D 자기등가회로를 기반으로 부상력을 계산하지만 유한요소법(FEM)과 오차가 발생하여 부상력 예측이 어려워진다. 이러한 원인은 프린징 효과에 의해서 발생하며 이를 고려한 자기등가회로를 통해 정확한 부상력 예측이 가능해진다. 따라서 본 논문에서는 기존 자기등가회로 방식에서 프린징 효과를 포함하여 식을 도출하였고 부상력을 분석하였다. 기존 자기등가

회로, 제안한 자기등가회로, FEM해석을 비교하기 위하여 기초 모델로 전자석 E-type를 선정하였다. 기존 자기등가회로 방식을 이용하여 기초 모델의 부상력을 분석하였고 FEM 해석과의 오차를 비교분석하였다. 정확한 부상력을 예측하기 위하여 프린징 효과를 고려한 자기등가회로를 통해 부상력을 도출하였다. 도출된 부상력을 검증하기 위하여 FEM 해석과 비교하였고 기존 자기등가회로와 제안한 자기등가회로, FEM 해석 오차를 비교하였다.

## 2. 본론

### 2.1 자기 부상체의 원리와 기초 모델

제안한 자기등가회로를 검증하기 위하여 흡인식 E-type 자기부상체를 선정하였다. 흡인식 E-type 자기부상은 릴럭턴스 힘을 이용하므로 그림 1과 같이 코어와 코일로만 구성되어 있다. 코일에 전류를 흘려주면 자속이 발생하며 자기에너지가 최소로 발생하는 릴럭턴스 힘에 의해 부상체가 부상하게 된다. 기초 모델은 공극 4[mm]에서 50[kg]의 무게를 부상하도록 선정하였다. 따라서 자기 부상체는 공극 4[mm]에서 부상력 500[N]를 요구하나 10% 마진을 고려하여 550[N]로 설계하였다. 표 1은 기초 모델에 대한 사양을 나타내었다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Vision College of Jeonju, Korea.  
E-mail: chkim@jvision.ac.kr  
\* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.  
<https://orcid.org/0000-0002-6446-4109>

Received : November 16, 2020 Revised : November 26, 2020 Accepted : November 28, 2020

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

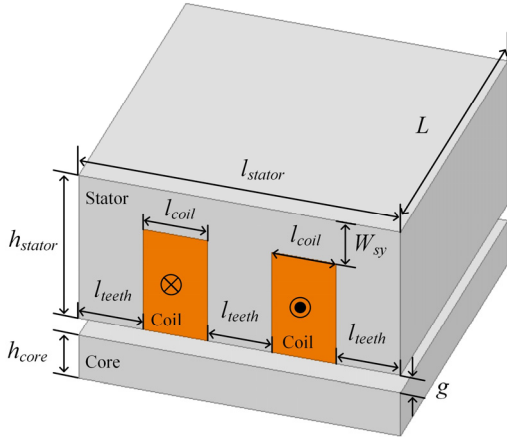


그림 1 기초 자기부상 모델  
Fig. 1 Basic maglev model

표 1 기초 자기부상 모델의 사양

Table 1 Specification of basic maglev model

Parameter	Symbol	Value	Unit
$N$	Number of turns	320	turn
$I$	DC Current	10	A
$g$	Airgap Length	4	mm
$L$	Model Length	100	mm
$l_{stator}$	Stator Width	100	mm
$h_{stator}$	Stator Height	50	mm
$h_{coil}$	Coil Height	10	mm
$l_{teeth}$	Stator Teeth Width	20	mm
$l_{coil}$	Coil Width	20	mm
$W_{sy}$	Stator Yoke	10	mm
$M$	Mass	50	kg
$F$	Force	550	N

### 2.2 기존 자기등가회로

그림 1의 기존 모델의 자기 부상력을 예측하기 위하여 기존 방식의 자기등가회로를 이용하였다. 자기회로를 전기회로와 같이 나타낼 수 있으며 자기저항은 식 (1)로, 자계의 옴의 법칙은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (1)$$

$$NI = R_m \phi \quad (2)$$

여기서  $R_m$ 은 자기저항,  $l$ 은 자속경로의 길이,  $S$ 는 자속이 통과하는 면적,  $\mu$ 는 재료의 투자율,  $N$ 은 턴수,  $I$ 는 전류,  $\phi$ 는 자속이다.

그림 2는 기존 모델의 자기등가회로도를 나타낸다. 그림 2의 자기등가회로의 전체 등가저항  $R_{eq}$ 는 식 (3)과 같이 구할 수 있고, 이를 통해 자기회로에 흐르는 전체 자속은 식 (4)와 같다.

$$R_{eq} = R_g + \frac{1}{2}(R_c + R_{c1} + R_{c2} + R_g) \cong \frac{3}{2}R_g \quad (3)$$

$$\phi = \frac{NI}{R_{eq}} \quad (4)$$

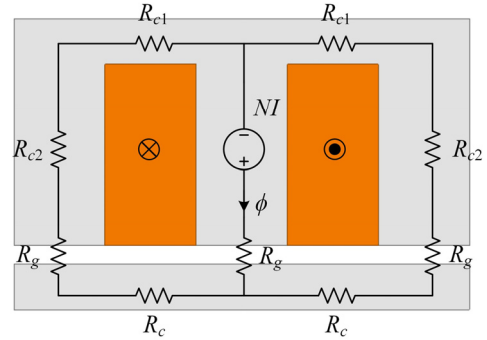


그림 2 기초 모델의 자기등가회로도

Fig. 2 Magnetic Equivalent Circuits of basic maglev model

여기서  $R_g$ 는 공극의 자기저항,  $R_c$ 는 부상체의 자기저항,  $R_{c1}$ 과  $R_{c2}$ 는 각각 고정자의 윗면, 옆면의 자기저항,  $R_{eq}$ 는 등가 자기저항이다. 하지만, 철심에서의 비투자율은 약 1000으로 공극의 비투자율인 1보다 매우 크므로 철심의 자기저항을 무시하여 계산을 진행하였다.

저장된 자기에너지의 식으로부터 부상체에 작용하는 부상력을 식 (5)를 통해 계산할 수 있으며 자속의 제곱 비례, 진공의 투자율에 반비례, 공극 면적에 반비례하는 것을 알 수 있다.

$$F_{core} = \frac{3}{4} \frac{\phi^2}{\mu_0 S_g} = \frac{3}{4} \frac{B_g^2}{\mu_0} S_g \quad (5)$$

여기서  $F_{core}$ 는 부상체에 작용하는 부상력,  $\mu_0$ 는 진공의 투자율,  $S_g$ 는 치에 맞는 공극의 단면적, 그리고  $B_g$ 는 중앙 치 중심의 공극자속밀도이다. 여기서 표 1을 참조하여 공극의 단면적  $S_g$ 는  $l_{teeth}$ 로 구하고, 공극의 자속경로 길이  $g$ 를 통해 모델의 자기저항 및 부상력을 구할 수 있다.

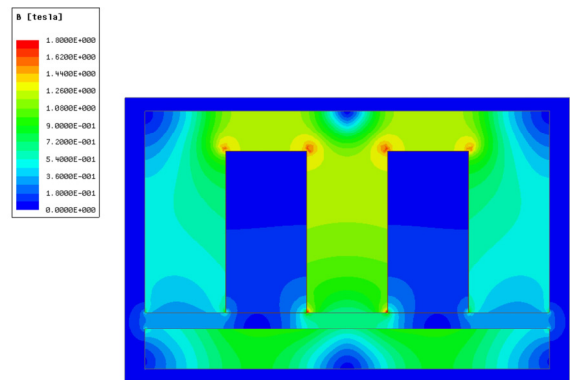


그림 3 기초 모델의 자속밀도 분포

Fig. 3 Magnetic flux density of the basic model

자기등가회로 및 FEM 모델의 중앙 치에서의 결과는 표 2와 같이 나타난다. 자기등가회로와 FEM 결과를 비교했을 때 자속밀도는 큰 차이를 보이지 않지만 부상력에서 오차가 생기는 것을 확인할 수 있다. 그림 3은 FEM 모델의 자속밀도 분포도이고, 그림 4는 공극자속밀도를 나타낸다. 그림 3과 4로부터 알 수 있듯이 공극뿐만 아니라 고정자 치에 맞는 면적과 치의 양 옆에도 프링징 효과로 인해 자속이 존재하는 것을 알 수 있다. 식 (5)와 같이 기존 자기등가회로로부터 구한 부상력은 공극사이에서 발생하는 자속만 고려한 것이므로 그림 4에서와 같이 프링징 효과에 의한 부상력은 고려하지 못한다. 따라서 정확한 부상력 예측을 위해서는 프링징 효과를 고려한 자기등가회로가 필요하다.

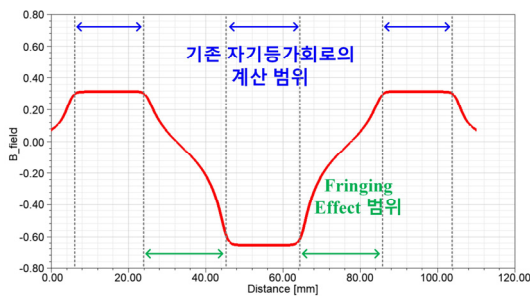


그림 4 기초 모델의 공극자속밀도 분포  
Fig. 4 Airgap flux density of the basic model

표 2 자기등가회로 및 FEM 결과 비교

Table 2 Comparison of Magnetic equivalent circuit and FEM result

Contents	자기등가회로	FEM	오차율
$B_g$ [T]	0.67	0.65	2.99%
$F_{core}$ [N]	536.17	556.26	3.61%

### 2.3 프링징 효과를 고려한 자기등가회로

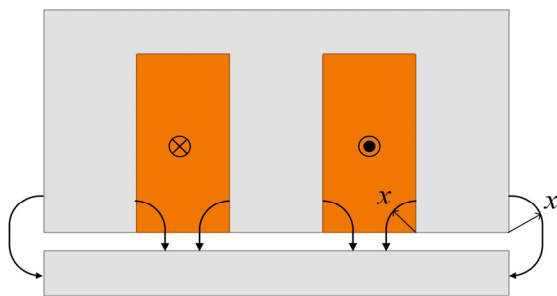


그림 5 프링징 효과의 자속 흐름  
Fig. 5 Magnetic flux flow of fringing effect

그림 6은 프링징 효과가 고려되었을 때 자기등가회로도 나타낸다. 그림 5에서와 같이 고정자의 치 구조에 의해 자속이 치에 맞는 면적의 공극뿐만 아니라 치의 양 옆에서도 자속이 흐르게 된다. 이 때 프링징 효과의 경로를 여러 가지 방법으로 설정할 수 있지만 본 논문에서는 그림 5와 같이 자속

이 원형으로 들어가 공극에서 직진하는 모델로 선정했다. 하지만 고정자 양쪽 치의 바깥쪽의 자속 경로와 안쪽 및 중앙 치의 자속 경로는 Core의 형상에 의해 다르기 때문에 이 자속 경로를 고려하여 자기저항을 구한다. 프링징 효과의 자기저항은 프링징 효과에 의한 원주 반경  $x$ 와 공극 길이에 의해서 결정되며 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

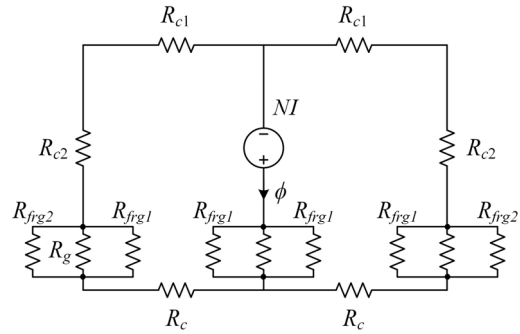


그림 6 프링징 효과가 고려된 자기등가회로  
Fig. 6 Magnetic equivalent circuit considering fringing effect

$$R_{frg} = \frac{\pi}{\mu_0 L} \frac{1}{\ln\left(1 + \frac{\pi x}{g}\right)} \quad (6)$$

프링징 효과의 자기저항은 치의 양 옆으로 흐르므로 공극 자기저항과 병렬로 배치한다. 공극자기저항과 프링징 효과의 자기저항을 포함한 전체 등가자기저항의 식은 식 (7)과 같이 구할 수 있다. 여기서 식 (7)의 첫 번째 항은 중앙의 등가 공극 자기저항이고, 두 번째 항은 양쪽의 등가 공극자기저항이다. 또한 식 (7)과 식 (4)를 통해 자기회로에 흐르는 전체 자속을 구할 수 있다.

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{\mu_0 S_g}{g} + \frac{2\mu_0 L}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi x}{g}\right)} + \frac{0.5}{\frac{\mu_0 S_g}{g} + \frac{\mu_0 L}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi x}{g}\right) + \frac{2\mu_0 L}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi x}{2g}\right)} \quad (7)$$

프링징 효과의 자속선이 구성하는 면적이 일정하지 않아 부상체에 가해지는 부상력은 식 (5)를 통해서 구할 수 없으므로, 자기에너지 식과 가상변위 원리를 이용하여 식 (8)과 같이 부상력을 계산할 수 있다.

$$F_{core} = -\frac{\phi^2}{2} \left\{ \left( \frac{\mu_0 S_g}{g} + \frac{2\mu_0 L}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi x}{g}\right) \right)^{-2} \times \left( \frac{\mu_0 S_g}{g^2} + \frac{2\mu_0 L}{\pi} \frac{\frac{\pi x}{g^2}}{\left(1 + \frac{\pi x}{g}\right)} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\mu_0 S_g}{g} + \frac{\mu_0 L}{\pi} \right) \right.$$

$$\left. \begin{aligned} & \times \ln\left(1 + \frac{\pi x}{g}\right) + \frac{2\mu_0 L}{\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi x}{2g}\right) \left( \frac{\mu_0 S_g}{g^2} + \frac{\mu_0 L}{\pi} \right. \\ & \left. \times \frac{\frac{\pi x}{g^2}}{\left(1 + \frac{\pi x}{g}\right)} + \frac{\mu_0 L}{\pi} \frac{\frac{\pi x}{g^2}}{\left(1 + \frac{\pi x}{2g}\right)} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

2.4 FEA 결과 분석 및 비교

그림 7은 유한요소 해석을 통한 자속밀도와 자속선의 분포를 보여준다. 그림 7을 통해 자속이 치에 맞는 뿐 아니라 치의 양 옆에서도 흐르는 것을 알 수 있다. 표 3은 기존 자기등가회로, 제안한 자기등가회로, 그리고 FEA를 통해 얻은 자속밀도 및 부상력의 크기 비교를 보여준다.

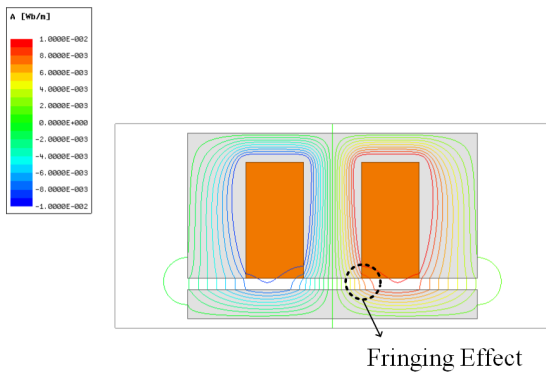


그림 7 프링징 효과가 고려된 자속선도  
Fig. 7 Magnetic flux line considering fringing effect

표 3 해석 방법에 따른 부상력

Table 3 Levitation force according to analysis method

Contents	기존 자기등가회로	제안한 자기등가회로	FEA
$B_g$ [T]	0.67	0.65	0.65
$B_g$ 오차율 [%]	2.99	0	-
$F_{core}$ [N]	536.17	552.85	556.26
$F_{core}$ 오차율 [%]	3.61	0.61	-

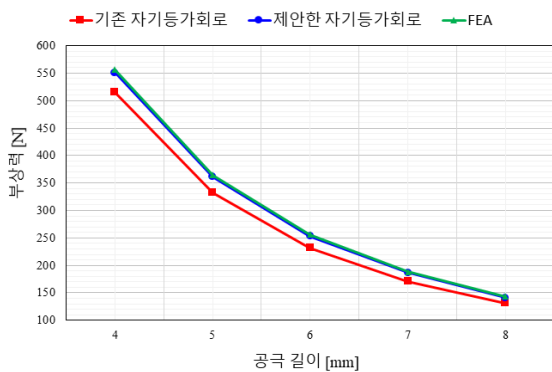


그림 8 공극 길이에 따른 부상력의 크기 비교  
Fig. 8 Comparison of the magnitude of the levitation force according to the airgap length

표 3으로부터 FEA 결과 대비 자속밀도는 제안한 자기등가회로에서 차이가 없었고, 부상력의 차이는 기존 자기등가회로가 약 3.61%, 제안한 자기등가회로는 약 0.61%의 차이가 발생한다. 따라서 제안한 자기등가회로를 통해 정확한 부상력 예측이 가능하다.

3. 결론

본 논문에서는 흡인식 전자석 E-type의 기존 자기등가회로와 제안한 자기등가회로를 FEA 결과와 비교하였다. 기존 자기등가회로와 FEA 결과를 비교한 결과 오차가 발생하였으며 프링징 효과에 의해서 발생한 것으로 분석하였다. 정확한 부상력을 예측하기 위하여 프링징 효과를 고려하여 자기등가회로를 제안하였다. 제안한 자기등가회로와 FEA 해석을 비교한 결과 거의 동일한 것을 확인하였다. 이를 통해 제안한 자기등가회로의 신뢰성을 검증하였으며 제안한 자기등가회로를 이용하여 정확한 부상체 설계가 가능하다.

Acknowledgements

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R111A3071514)

References

- [1] Chang-Hyun Kim, Jong-Min Lee, and Hyung-Suk Han, "Development of a Maglev LCD Glass Conveyor," The 21st International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, October 10-13, 2011.
- [2] Chang-Hyun Kim, Jong-Min Lee, Hyung-Suk Han, and Bong-Seup Kim, "Development of magnetically levitated LCD glass conveyor," in Proc. Int. Conf. on Linear Drives for Industrial Applications (LDIA), Eindhoven, The Netherlands, Jul. 2011.
- [3] Kim min, Chang-Hyun Kim, Chang-Wan Ha, Jaewon Lim and Mooncheul Won, "The evitation Force Controller for High Accuracy Magnetic Levitation Transport System?" Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway, pp. 314-319, 2016.
- [4] B. J. H. de Bruyn, J. W. Jansen, and E. A. Lomonova, "Comparison of Force Density of Various Superconducting Linear Motor Types Considering Numerically Evaluated AC Losses," IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 26, NO. 3, APRIL 2016
- [5] D. C. Hanselman, "Brushless permanent-magnet motor design," 2nded. Cranston, RI : The Writers' Collective, 2003.

저자소개



**강준호 (Junho Kang)**

1994년 7월 30일생. 2019년 충북대학교 전기공학부 졸업. 2019년~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 석박통합과정.

Tel: 02-2220-0349

E-mail: rwg1783@nate.com



**안정호 (Jung Ho Ahn)**

1993년 1월 20일생. 2020년 대구대학교 전자전기공학부 졸업. 2020년~현재 한양대학교 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel: 02-2220-0349

E-mail: ahnleo@naver.com



**김현우 (Hyunwoo Kim)**

1993년 11월 19일생. 2017년 한양대학교 전기공학부 졸업. 2017년~현재 동 대학원 전기공학과 석박통합과정.

Tel: 02-2220-0349

E-mail: khw7481@hanyang.ac.kr



**오승택 (Seung-Taek Oh)**

1991년 7월 15일생. 2016년 한경대학교 전기전자제어공학부 졸업. 2018년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 2018년~동 대학원 박사과정.

Tel: 02-2220-0349

E-mail: ost9107@naver.com



**이 주 (Ju Lee)**

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대학교 전기생체공학부 교수.

Tel: 02-2220-0342

E-mail: julee@hanyang.ac.kr



**김창현 (Chang Hyun Kim)**

1978년 11월 17일생. 2006년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2015~2016년 한국조선해양기자재연구원 선임 연구원. 2016년~현재 전주비전대학교 전기공학부 조교수

Tel: 063-220-3832

E-mail: chkim@jvision.ac.kr