

FEM을 이용한 자기부상 열차용 선형 유도전동기의 특성 해석

Characteristic Analysis of LIM for Magnetic Levitation Vehicle by F.E.M.

김정철* 이상우** 윤종학*** 최종묵****

Kim, Jeong-Cheol Lee, Sang-Woo Yoon, Jong-Hack choi, Jong-Mook

ABSTRACT

The recent operating trains including the high speed train are mostly moving system on the rail and system use the mechanical propulsion force to drive the gear and wheel by the traction motor.

Advanced countries are interested in Magnetic Levitation Vehicle and they have been studying about it continuously.

Thus this paper is analyzed the feature of analysis the feature for Linear Induction Motor as the propulsion equipment of Magnetic Levitation Vehicle.

And the Magnetic Levitation Vehicle is being developed for the transportation system of next generation using the Finite Element Method

1. 서론

현재 국내에서 상용중인 전철은 고속 전철을 포함하여 대부분 회전 전동기를 이용하여 기계적 추진력을 기어와 바퀴로 전달하여 레일 위를 달리는 시스템으로 되어 있다. 이러한 시스템에서 발생하는 소음 진동 등의 문제를 개선하기 위하여 선진국에서는 동력 변환 장치 없이 직선 추진력을 직접 얻을 수 있는 Liner Induction Motor 를 이용한 자기부상 열차에 관심을 두고 지속적인 연구 및 상용화가 진행 중에 있다. 이에 본 논문은 차세대 교통수단으로 개발중인

* : (주)로템, 중앙연구소 연구원 ** : (주)로템, 중앙연구소 주임연구원

*** : (주)로템, 중앙연구소 책임연구원 **** : (주)로템, 중앙연구소 수석연구원

자기부상열차용 LIM(Liner Induction Motor)에 대하여 유한요소법을 이용하여 특성해석을 하고자 한다.

2. 본 문

2.1 유한요소법에 의한 지배방정식의 정식화

복잡한 경계조건, 매질의 특성, 형상변화 등 기하학적 처리가 용이한 유한요소법을 적용하여 Maxwell 방정식에 자기 Vector potential의 개념을 도입하여 지배방정식을 유도하였다.

1) 해석 모델 및 가정

선형유도전동기의 해석모델은 그림 1.에 나타냈으며, 모델의 사양은 도표 1.과 같다. 2차원 유한 요소 해석을 위해 축방향으로 CORE만을 적층하여 만든 것으로 가정하고, 설계상의 슬롯과 치부분의 굴곡(round)부분은 그림 2.와 같이 직선으로 처리하여 모델을 단순화 하였다.

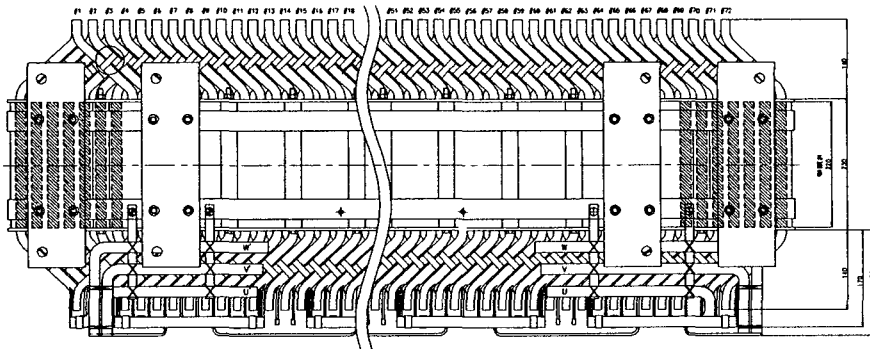


그림 1. STATOR ASS'Y

도표 1. 선형유도전동기의 사양

항목	기준	항목	기준
가선전압	DC 1500 V	기동추력	4,800 N
최대설계속도	110 Km/h	정격전압	1,100 V
최대운전속도	80 Km/h	슬립주파수	12 Hz

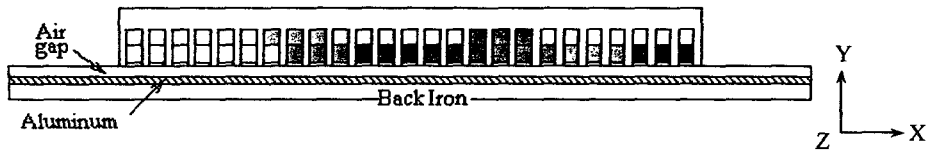


그림 2. 해석을 위해 단순화한 LIM Model

2차원 유한요소법으로 자속밀도 분포특성과 1차측에 흐르는 전류 등을 계산하기 위한 지배방정식의 유도를 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

- ① 1차측 권선에 흐르는 전류는 Z방향 성분만 존재하고 인가전압은 평형 3상 정현파이다.
- ② 변위전류는 무시한다.
- ③ 2차측 Aluminum 도체판과 back iron의 도전율은 일정하고, 표피효과는 무시한다.
- ④ 2차측에 인가하는 입력자속은 Y축 방향의 성분만 가지며, 2차측의 진행방향은 X축 방향으로 진행한다.
- ⑤ 1차측의 도전율은 무시하고 자성체의 재질은 등방성이고 균일하다.

2) 지배방정식

2차원 X-Y평면상의 자속밀도 분포특성을 해석하기 위하여 변위전류를 무시하면 전류밀도 \mathbf{J} 에 의해 발생하는 자계의 세기 \mathbf{H} 는 암페어의 법칙으로부터

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1)$$

로 표현된다.

또 자계의 세기 \mathbf{H} 와 자속밀도 \mathbf{B} 와의 관계는

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2)$$

여기서 μ 는 해석영역 자성체 부분의 투자율이다.

전류밀도 \mathbf{J} 는 그림의 선형유도전동기의 해석모델에서 1차측 권선에 흐르는 전류 \mathbf{J}_s 와 2차측 알루미늄 도체판에 유도된 와전류밀도 \mathbf{J}_e 의 합성된 전류밀도로 식(3)과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{B} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_e \quad (3)$$

자기 Vector potential \mathbf{A} 와 자속밀도 \mathbf{B} 와의 관계는 식 (6)과 같다.

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (6)$$

미소전류가 흐르는 점에서부터 거리 R만큼 떨어진 점에서의 자기 Vector potential \mathbf{A} 는 Biot-savart법칙으로부터 구하면

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \int_{vol} \frac{\mathbf{J}}{R} dv \quad (7)$$

식 (7)에서 자기 Vector potential의 방향은 전류의 방향과 동일 방향으로 직접 자속밀도나 자계의 세기를 구하지 않고 자기 Vector potential을 이용하여 해석하면 같은 결과를 얻을 수 있다.

식 (1)에 자기 Vector potential 식 (6)을 대입하면

$$\nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} \quad (8)$$

이 된다. 벡터의 정리식을 이용하면 식 (9)와 같이 된다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A} \right) - \left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \right) \mathbf{A} = \mathbf{J} \quad (9)$$

식 (9)에서 $\nabla \cdot \mathbf{A}$ 는 정상상태에서 쿨롱의 조건을 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ 으로 놓으면 식 (10)과 같이 비선형 포와송 방정식이 얻어진다.

$$\left(\nabla \cdot \frac{1}{\mu} \nabla \right) \mathbf{A} = -\mathbf{J} \quad (10)$$

가정 ①에서와 같이 입력전류는 Z축 방향성분만 존재한다고 가정하였으므로 Vector potential \mathbf{A} 도 Z성분만 존재하며, 식 (10)을 2차원 직각좌표계로 X-Y 평면에 대해 전개하면

$$\mathbf{J}_z = \sigma \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \quad (11)$$

여기서 $\nu (=1/\mu)$ 는 자기저항율(Magnetic reluctivity)이며, 식 (11)의 기본방정식을 각 영역별로 구분하여 정리하고, 와전류성분이 Z 방향으로만 흐른다는 가정에 의해 2차원 유한요소법으로 정식화하기 위한 LIM의 지배방정식을 정리하면

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z + \sigma \left(\frac{\partial A_z}{\partial t} + (1-S)V_s \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \quad (12)$$

와 같이 된다. 여기서 S는 슬립 V_s 는 동기 속도 이다.

2.2 LIM의 특성 해석

1) 유한요소 해석

위에서 구한 지배방정식을 이용하여 1A/mm², 60Hz를 인가하였을 때 LIM의 유한요소 해석을 통한 자속밀도 분포의 변화는 그림 3.과 같이 나타난다.



그림 3. 유한요소법을 이용한 LIM의 자속밀도 분포변화

공극의 길이를 13mm, 주파수를 60Hz로 일정하게 유지하고 전류밀도를 각각 1A/mm², 2A/mm², 3A/mm², 4A/mm²를 인가하였을 때 공극에서 자속밀도의 RMS치는 각각 $1.59 \times 10^{-2} T$, $3.63 \times 10^{-2} T$, $5.45 \times 10^{-2} T$, $7.27 \times 10^{-2} T$ 가 나타났다. 그리고, 각각의 전류밀도에서 공극 길이에 따른 자속밀도 변화와 수직력 분포그래프를 그림 4.와 그림 5.에 나타내었다.

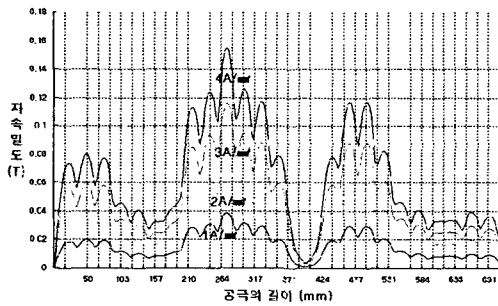


그림 4. 전류밀도 변화에 따른 자속밀도 변화

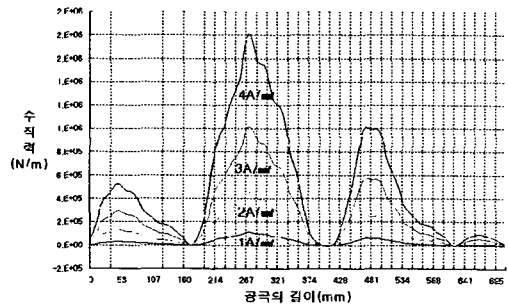


그림 5. 전류밀도 변화에 따른 수직력 분포

공극의 길이를 13mm로 고정하고, 주파수를 10~19Hz까지 변화시켰을 때 공극에서의 수직력과 추진력의 분포그래프는 그림 6. 및 그림 7.과 같이 나타냈으며, 주파수의 크기에 따라 수직력은 커지는 반면 추진력은 작아졌다.

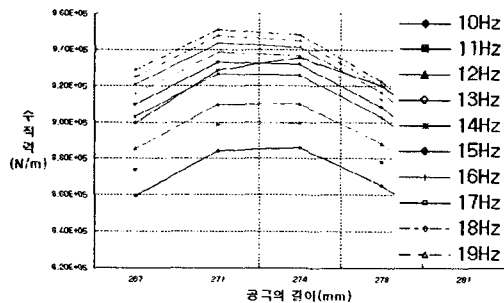


그림 6. 주파수 변화에 따른 수직력 분포

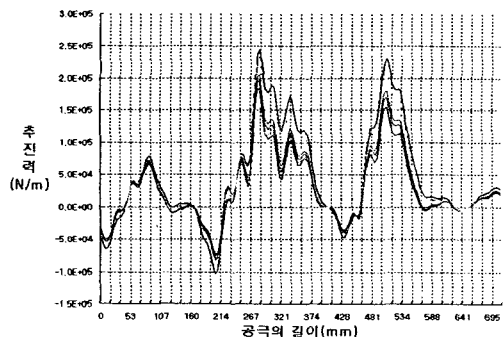


그림 7. 주파수 변화에 따른 추진력 분포

주파수를 12Hz로 고정하고 공극의 길이가 10~15mm로 변화했을 때 공극에서의 자속밀도 변화와 수직력의 분포는 그림 8. 및 그림 9.와 같이 나타난다. 그림 9에서 보는 것과 같이 공극의 길이가 13mm 일 때 수직력이 가장 크게 나타났다.

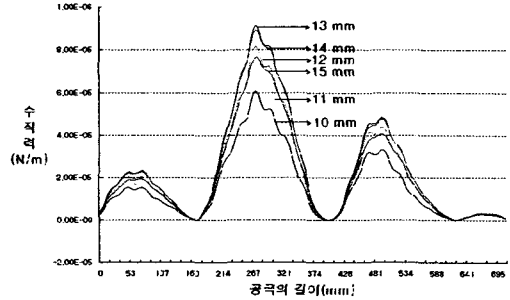
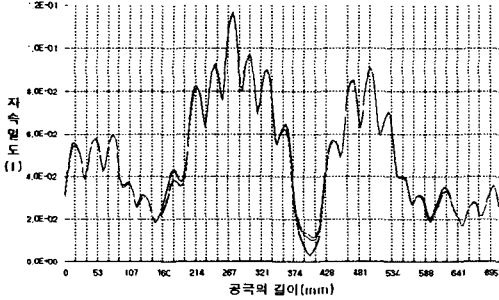


그림 8. 공극의 길이 변화에 따른 자속밀도 변화 그림 9. 공극의 길이 변화에 따른 수직력 분포

3. 결론

이상과 같이 유한요소법을 이용하여 주파수, 전류밀도 및 공극의 길이 변화에 따른 공극에서의 자속밀도 분포와 수직, 추진력의 변화추이 등을 통하여 자기부상 열차용 LIM의 특성을 알아 보았다. 향후 동특성 해석을 통해 보다 정확한 특성 해석 방법을 연구하여 해석적 방법과 앞으로 개발될 LIM의 실험치와 비교하여 LIM의 제어기 개발과 인버터 개발에 활용하고자 한다.

참고문헌

1. Syed A. Nasar, I. Boldea,(1987) “Linear Electric Motors : Theory, Design, and Practical Applications” Prentice- Hall.
2. Jacek F. Gieras,(1994) “Linear Induction Drives” Clarendon Press.
3. Paul C. Krause, Oleg Wasynczuk, Scott D.,(1995) “Analysis of Electric Machinery” IEEE PRESS.
4. 조윤현, 구대현(1992년), “ 정지시 SLIM 의 특성연구” , 최종보고서