

해석적 방법을 이용한 직선형 스위치드 릴럭턴스 전동기의 2차측 와전류 해석

장석명\*, 박지훈\*, 한 철\*, 유대준\*\*, 서진호\*\*\*, 이경복\*\*\*\*  
 충남대학교\*, 청양대학교\*\*, 한국항공우주연구원\*\*\*, 대전 도시철도공사\*\*\*\*

Eddy Current Analysis of Linear Switched Reluctance Motor using Analytical Method

Seok-Myeon Jang\*, Ji-Hoon Park\*, Cheol Han\*, Dae-Joon You\*\*, Jin-Ho Seo\*\*\*, Kyoung-Bok Lee\*\*\*\*  
 Chungnam National University\*, Cheongyang College\*\*, KARI\*\*\*, DJET\*\*\*\*

**Abstract** - This paper deals with eddy current analysis of linear switched reluctance motor using analytical method. First, flux density is calculated using analytical method. From flux density, eddy current is analyzed according to moving speed. Finally, analyzed result is compared with finite element method.

1. 서 론

직선형 스위치드 릴럭턴스 전동기(LSRM)는 1차측에 권선이 시행되고 2차측은 돌극 구조의 철심으로 단순하며 견고한 구조를 갖는다. 또한 직선 운동이 필요나 시스템에서 직접 추력을 발생시키는 장치로 반도체 이송장치 및 물류 수송 시스템의 구동 장치로 응용이 가능하다. 이것은 회전형 기기에서 기어, 크랭크 등과 같은 직선 운동 변환 장치를 통한 추력 발생에 비해 기계적 변환 손실이 없으며, 단위 체적당 토크, 효율 및 컨버터의 정격 등 많은 부분에서 다른 기기에 비해 우수한 특성을 갖는다[1-3].

이러한 LSRM은 가동자의 이동 거리에 대한 고정자의 설치 면적이 요구되며, 회전형 기기에 비해 과도한 제작 비용을 고려하여 2차측인 고정자를 적층하지 않고 제작하는 경우가 있으며, 본 논문의 해석 모델은 1차측이 6극으로 권선이 시행된 가동자이며 2차측은 4극의 고정자로 약 4[m]의 길이를 갖는다. 이때 적용되지 않은 2차측에는 와전류가 유기되어 손실이 발생하게 되는데, 이러한 와전류는 LSRM의 출력에 영향을 미친다.

따라서 본 논문에서는 구동 전류를 고려하여 LSRM의 정렬과 비정렬 위치에 따른 자속밀도를 해석하여 2차측의 와전류를 해석하였다. 해석적인 방법에 의한 와전류는 속도와 자속밀도로부터 계산되어지며, 구동 속도에 따른 와전류를 해석하여 유한요소법과 비교하였다. 해석된 결과로부터 LSRM의 구동 속도에 따른 2차측 와전류 특성을 예측하였으며, 유한요소법과 비교하여 특성 해석의 타당성을 입증하였다.

2. LSRM의 해석 모델 및 와전류 해석

2.1 LSRM 해석 모델

그림 1은 LSRM의 해석 모델이다. 1차측은 권선이 시행된 6극의 가동자이며, 2차측은 적층되지 않은 4극의 가동자의 구조를 가지며, 해석을 위하여 가동자의 입력 전류는  $y = Y_m$ 에 면전류로 분포한다고 가정한다. 또한 공기 영역(analytical region : 1)은 공기의 투자율( $\mu_1$ )을 2차측(analytical region : 2) 고정자는 철심의 투자율( $\mu_2$ )과 도전율( $\sigma$ )을 갖는다. 고정자의 높이는  $Y_s$ , 공기 길이는  $Y_m - Y_s$ , 1차측의 이동 속도는  $u_x$ 이다.

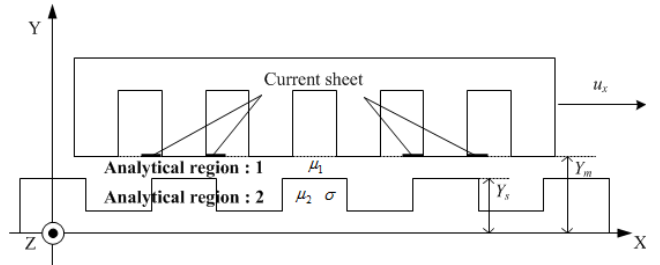
2.2 LSRM 자계 특성 및 와전류 해석

그림 1의 해석 모델과 해석 영역(1, 2) 등을 맥스웰 방정식을 이용하여 면전류로 분포된 1차측의 전류를 모델링하면 식(1)과 같다.

$$J_n = \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} J_{zn} e^{-jk_n x} i_z \quad (1)$$

여기서  $k_n$ 은  $n\pi/\tau$ 이며,  $n$ 은  $n$ 차 고조파 차수,  $\tau$ 는 극 간격이다. 또한,  $J_{zn}$ 은 한 상 전류밀도에 대한  $n$ 차 고조파 최대치이며, 푸리에 급수로 전개하면 식(2)이고,  $J_0$ 는 전류밀도의 크기로 식(3)과 같다.

$$J_{zn} = \frac{J_0}{3\tau_m} \left[ e^{-jk_n \tau_m} - e^{-jk_n \tau_m + \frac{b_0}{2}} + e^{-jk_n 2\tau_m} - e^{-jk_n(2\tau_m - \frac{b_0}{2})} \right] \quad (2)$$



<그림 1> LSRM 해석 모델

$$J_0 = \frac{N\tilde{i}}{b_0/2} = \frac{2N\tilde{i}}{b_0} \quad (3)$$

여기서  $b_0$ 는 슬롯 개구간,  $N$ 은 상당 턴 수,  $i$ 는 입력 전류이다. LSRM의 자계 특성 해석을 통하여 해석 영역의 자속밀도를 해석하기 위하여 자계의 세기와 전류 밀도, 자속 밀도 등 맥스웰 방정식으로부터 LSRM의 각 해석 영역에 대한 지배 방정식은 식(4), (5)와 같다.

$$\frac{\partial^2 A_{1z}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{1z}}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 A_{2z}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{2z}}{\partial y^2} = \mu_2 \sigma u_x \frac{\partial A_{2z}}{\partial x} \quad (5)$$

여기서  $A_{1z}$ ,  $A_{2z}$ 는 해석 영역 1과 2의 자기 벡터 퍼텐셜이며 식(6)과 같다.

$$A_z = A(y)e^{-jk_n x} i_z \quad (6)$$

식(6)의 자기 벡터 퍼텐셜을 식(4)와 식(5)에 대입하면 식(7)과 식(8)과 같이 정리된다.

$$\frac{\partial^2 A_{1z}}{\partial y^2} - k_n^2 A_{1z} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 A_{2z}}{\partial y^2} - k_n^2 A_{2z} = -j\mu_2 \sigma u_x k_n A_{2z} \quad (8)$$

식(4)와 식(5)의 일반해는 식(6)~(8)을 이용하여 식(9)와 식(10)으로 나타낼 수 있다.

$$A_{1z} = (C_1 e^{k_n y} + D_1 e^{-k_n y}) e^{-jk_n x} \quad (9)$$

$$A_{2z} = (C_2 e^{\alpha y} + D_2 e^{-\alpha y}) e^{-jk_n x} \quad (10)$$

여기서  $\alpha^2 = k_n^2 - j\mu_2 \sigma u_x k_n$ 이고, 맥스웰 방정식으로부터 해석 영역 1과 2의 자속밀도 특성식은 식(11)과 같다.

$$B_{1x} = k_n (C_1 e^{k_n y} - D_1 e^{-k_n y}) e^{-jk_n x} \quad (11.a)$$

$$B_{1y} = -jk_n (C_1 e^{k_y y} + D_1 e^{-k_y y}) e^{-jk_n x} \quad (11.b)$$

$$B_{2x} = \alpha (C_2 e^{\alpha y} - D_2 e^{-\alpha y}) e^{-jk_n x} \quad (11.c)$$

$$B_{2y} = -jk_n (C_2 e^{\alpha y} + D_2 e^{-\alpha y}) e^{-jk_n x} \quad (11.d)$$

여기서  $C_1, C_2, D_1, D_2$ 는 해석 영역 1과 2에서의 적분 상수이며, 식(12)의 경계 조건을 이용하여 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} y = Y_m \quad & H_{1x} = J \\ y = Y_s \quad & H_{1x} - H_{2x} = 0 \\ & B_{1y} = B_{2y} \end{aligned} \quad (12)$$

$$y = -\infty \quad A_{2z} = 0$$

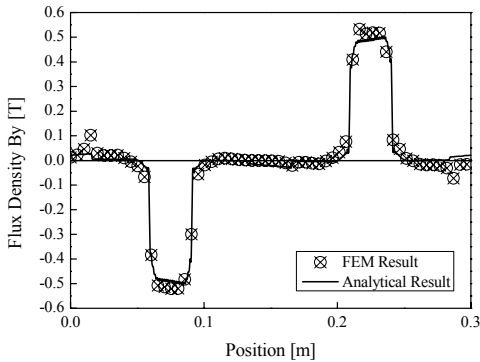
LSRM의 와전류는 식(13)으로부터 해석영역의 투자율과 자속 밀도로 부터 계산되어지며 식(14)로 정리된다.

$$J_{eddy} = \frac{1}{\mu} (\nabla \times B) \quad (13)$$

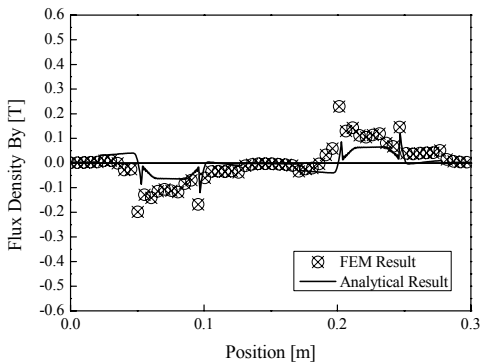
$$J_{2eddy} = \frac{1}{\mu_2} \begin{bmatrix} i_x & i_y & i_z \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ B_{2x} & B_{2y} & 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\mu_2} \left( \frac{\partial}{\partial x} B_{2y} - \frac{\partial}{\partial y} B_{2x} \right) i_z \quad (14)$$

### 2.3 LSRM 특성 해석 결과

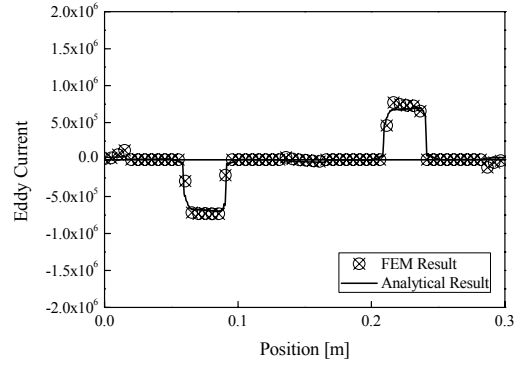
그림 2와 그림 3은 식(11)을 이용하여 해석 영역 2에서 정렬과 비정렬 위치의 자속 밀도를 해석한 결과이고, 그림 4~6은 식(15)와 LSRM의 구동 속도 1[m/s], 5[m/s], 10[m/s]에 따른 와전류를 해석한 결과로 유한요소해석과 비교하여 매우 잘 일치함을 알 수 있다.



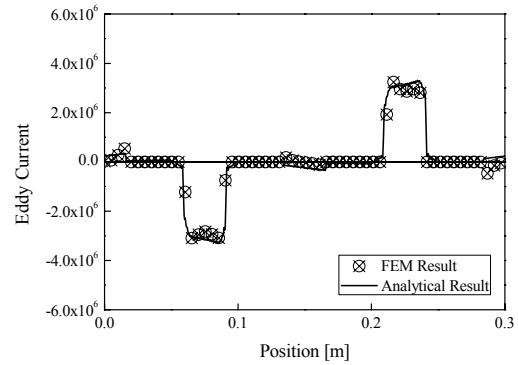
<그림 2> 정렬 위치에서 수직 자속 밀도



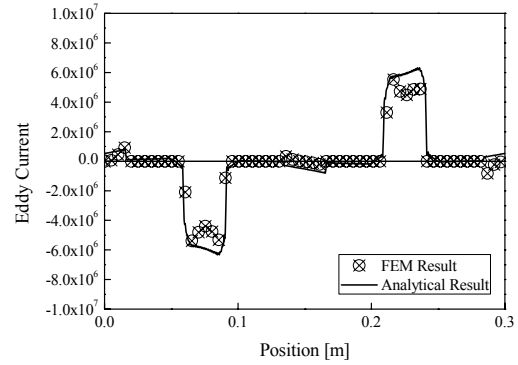
<그림 3> 비정렬 위치에서 수직 자속 밀도



<그림 4> 1[m/s] 와전류



<그림 5> 5[m/s] 와전류



<그림 6> 10[m/s] 와전류

### 3. 결 론

본 논문에서는 직선형 스위치드 릴럭턴스 전동기의 가동자가 긴 제작 구조에서 제작 단가를 고려한 적용되지 않은 가동자에서 와전류가 발생함을 해석적인 방법을 통하여 예측하고 유한요소법과 비교 검증하였다. LSRM의 2차측 와전류는 자속 밀도와 투자율을 이용하여 해석하였으며, 유한요소해석 결과와 비교하여 매우 잘 일치함을 확인하였다. 해석된 결과는 와전류 손실을 이용하는데 적용될 것이며 LSRM의 최적 설계에 유용하게 사용될 것이다.

### [참 고 문 헌]

[1] Youn-Hyun Kim, "Characteristic analysis and design of a single phase switched reluctance motor for high speed application," KIEE Int. Trans. EMECS, vol.4-B, no.3, pp.114-121, 2004.  
 [2] T.J.E. Miller, Switched reluctance motors and their control, Oxford, 1993.  
 [3] R. Krishnan, Switched reluctance motor drives, CRC press, 2001.