

릴럭턴스형 횡자속 선형전동기의 특성분석

류호길, 이지영, 하경호, 홍정표, 강도현*
 창원대학교 전기공학과, 한국전기연구원*

Characteristics Analysis of Reluctance Type Transverse Flux Linear Motor

Ho-Gil Ryu, Ji-Young Lee, Kyung-Ho Ha, Jung-Pyo Hong, Do-Hyun Kang*
 Chang-won National Univ., Korea Electrotechnology Research Institute*

Abstract- This paper deals with 2D and 3D analyses by finite element method for the characteristics of reluctance type transverse flux linear motor. Although 3D analysis is essential because of the characteristics by flux direction, 2D analyses are also used by considering the effective axial length and using the equivalent reluctance 2D model. The thrust, the normal force and the coenergy of the machine are calculated and compared by the results of the three analysis methods.

서, 등포텐셜분포를 함께 나타내었다. 이동자의 이동에 따른 영향은 그림 3(a)와 같은 해석모델의 해석결과로부터 산정 할 수 있고, 이 모델에서 고려해주시 못하는 x축 방향의 프린징 현상을 그림 3(b)와 같은 해석모델을 통해 산정된 유효 적층 길이로서 보상하였다.

1. 서 론

최근들어 고속, 대용량 승강기 개발에 대한 요구와, 출력 밀도와 효율이 높은 중저속의 부상 및 안내 결합형 추진시스템의 필요성에 의해 이에 적합한 전동기로서 횡자속 전동기에 대한 관심이 증대되고 있다[1]-(2). 횡자속 전동기는 자속의 흐름이 이동자의 이동방향에 대해 횡방향이며, 전류는 이동자의 이동과 같은 방향으로 흐른다. 이와 같은 구조적 특징으로 인해 횡자속 전동기는 극간격의 크기를 작게 설계하여 높은 출력 밀도를 얻을 수 있고, 오버행이 없는 링형태의 권선으로 동의 양을 절약함으로써 효율이 높은 장점이 있다[3].

본 논문에서는 여러 가지 형태의 횡자속 전동기 중, 릴럭턴스형 횡자속 선형 전동기에 대해 3차원과 2차원 유한요소법(Finite Element Method, FEM)에 의한 해석을 수행하였다. 릴럭턴스형 횡자속 전동기는 이동자와 고정자가 모두 철심으로만 구성되고, 고정자에만 권선이 감겨져 있는 형태로서, 여러 가지 횡자속 전동기 중에서 가장 간단하고 기본적인 모델이다. 그러나 이 역시, 3차원적인 현상의 횡방향 자속을 고려하기 위해 스칼라 포텐셜을 계변수로 하는 3차원 해석을 수행하였고, 2차원 스칼라 포텐셜에 의한 FEM해석의 경우에는 해석모델의 축방향 프린징 현상을 유효적층길이로서 보상하여 3차원 현상을 고려해 주었다. 또한 벡터 포텐셜을 계변수로 하는 경우에는 가정자료를 이용하여 3차원 모델을 2차원 등가 모델로 치환함으로써 유한요소해석을 수행하였다. 이상의 세가지 방법에 의한 해석 결과로부터 일정한 기자력에 대해 이동자의 이동에 따른 추력, 수직력, 자기수반에너지를 산정하여 비교, 분석하였다.

2. 해석 모델 및 해석이론

2.1 해석모델

그림 1은 본 논문의 해석 모델인 릴럭턴스형 횡자속 선형전동기이다. 그리고, 그림 2는 3차원 스칼라 포텐셜 해석을 위한 모델로서 그림 1과 같이 축방향으로 여러개의 쌍을 이루고 있는 고정자와 이동자에 대해 한쌍의 고정자극과 하나의 이동자극을 모델링 한 것이다.

그림 3은 2차원 스칼라 해석을 위해 간이화된 모델로

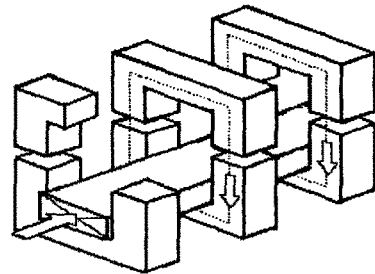


그림 1. 릴럭턴스형 횡자속 선형 전동기

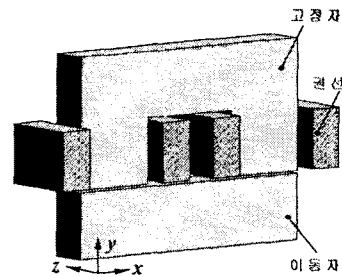
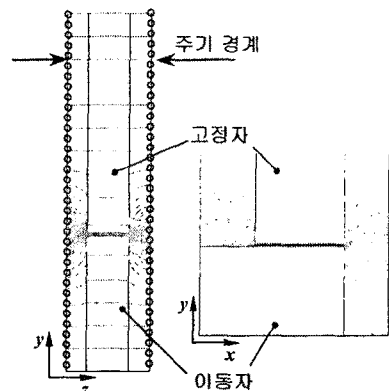


그림 2. 3차원 스칼라 해석모델



(a)Side View (b)Front View
 그림 3. 간이화된 2차원 스칼라 해석모델

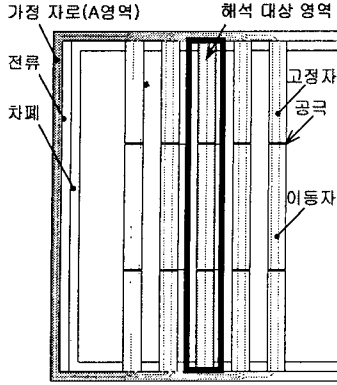


그림 4. 간이화된 2차원 벡터해석 모델

표 1. 해석 조건

기 자 력	5000 [AT]
철 심	S40

그림 4는 2차원 벡터 포텐셜에 의한 유한요소 해석을 위한 등가해석 모델로서 고정자 경로의 자로를 구성하기 위하여 A영역과 같이 가정자로를 두어 무한대의 투자율을 가지도록 하였고, 이 자료가 실제 해석모델에 미치는 영향을 제거하기 위하여 자기 차폐를 하였다.

2차원과 3차원 FEM에 의한 해석 결과는 그림 2와 같이 하나의 이동자와 한 쌍의 고정자 극에 대한 것만 비교하였으며, 해석 조건은 표 1과 같다.

2.2 해석 이론 (4)-(5)

가. 지배방정식 및 추력산정

일반적으로 변위전류를 무시할 수 있는 준정상상태에 대한 맥스웰 방정식은 식 (1), (2)와 같이 표현된다. 이 때 보조 방정식은 식 (3)과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} \quad (2)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3)$$

여기서 \vec{B} , \vec{H} , \vec{j} , μ 는 각각 자속밀도, 자계의 세기, 전류밀도, 매질의 투자율이며, 이때 매질은 선형, 등방성, 균질매질이다. 자기 스칼라 포텐셜 Ω 는 식 (4)와 같이 정의되며, 이를 식 (1)과 (3)에 의해 정리하면 식 (5)와 같이 자기 스칼라 포텐셜을 계변수로 하는 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\vec{H} = -\nabla \Omega \quad (4)$$

$$\mu \nabla^2 \Omega = 0 \quad (5)$$

자기 벡터 포텐셜 \vec{A} 는 식(6)과 같이 정의되며 식 (2),(3)에 의해 벡터포텐셜을 계변수로 하는 전자계 지배방정식은 식 (7)과 같다.

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

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) \right] = \vec{j}_0 \quad (7)$$

여기서, \vec{j}_0 는 입력전류밀도이다.

회자속 선형 전동기의 추력은 맥스웰 응력법으로 산정하였고, 이에 대한 추력 \vec{F} 는 다음과 같다.

$$\vec{F} = \oint_s \vec{p} \, ds \quad (8)$$

$$\vec{p} = \frac{1}{\mu_0} (\vec{n} \cdot \vec{B}) \vec{B} - \frac{1}{2\mu_0} B^2 \vec{n}$$

여기서, \vec{p} 는 맥스웰응력(Maxwell stress tensor)을 나타내고 \vec{n} 은 표면적에 수직인 외향 단위법선벡터이다.

나. 유효 적층길이 산정

2차원 스칼라 포텐셜에 의한 FEM 해석시, 해석모델의 축방향 길이에 대한 프린팅 효과를 고려해 주기 위하여 유효적층길이 l_{eff} 가 산정된다. 즉, 자기저장에너지를 구하기 위한 식 (9)와 자기저항을 구하기 위한 식 (10)에 의해 유도된 식 (11)에 의해 계산할 수 있다. 식(11)의 자기저장에너지는 임의로 인가된 기자력 F 에 의해 FEM으로부터 산정된 값이다.

$$W_m = \frac{1}{2} R \Phi^2 \quad (F = \Phi R) \quad (9)$$

$$R = \frac{l_g}{\mu_s} = \frac{l_g}{\mu l_{eff} l_x} \quad (10)$$

$$l_{eff} = \frac{l_g}{\mu_0 \cdot l_x} \cdot 2 \frac{W_m}{F^2} \quad (11)$$

여기서, R : 자기 저항, Φ : 쇄교자속

l_g : 공극 길이, W_m : 자기저장 에너지,

μ_0 : 공기중의 투자율, F : 인가된 기자력

l_x : 축방향 길이 (2차원 해석 시 = 1m)

3. 해석 결과 비교

3.1 추력 비교

그림 5는 스칼라 포텐셜에 의한 2차원과 3차원 해석 결과와 벡터 포텐셜에 의한 2차원 해석결과로서, 이동자의 이동에 따라 Maxwell 응력법으로 계산한 추력을 비교한 것이다. 평균 추력값은 표 2에서 비교하였으며 3차원 해석 결과를 기준으로 오차를 비교해 보았다. 벡터 포텐셜과 스칼라 포텐셜에 의해 각각 계산한 2차원 해석 결과는 거의 일치하나, 2차원과 3차원 해석 결과를 비교해보면, 10%이상의 오차를 가진다. 이에 대한 원인은 다음의 3가지 경우로 나누어 볼 수 있다.

첫째로, 2차원 해석에 의해서는 충분한 요소를 나누어 줄 수 있는 반면에, 3차원 해석에서는 양질의 요소를 나누는데 한계가 있다. 따라서 3차원 FEM에 의한 해석시, 2차 보간 함수를 이용하나 이는 동일한 모델 영역에 대해 2차원 해석 모델에서 요소를 나누는 효과에 크게 미치지 못한다. 따라서, 3차원 해석 모델에 대해 충분한 요소를 나누어 줄 수 있다면, 각각의 해석 결과의 오차는 줄어들 것으로 본다.

또 다른 오차의 원인으로는 2차원 스칼라 해석에서의 유효적층길이의 산정이다. 그림 4와 5에서 볼 수 있듯이 정렬된 상태에서 비정렬로 이동하면서 오차가 더 증가하게 되는데, 이는 2차원에서의 유효적층길이를 계산함에 있어서 그 계산값이 정렬된 상태를 고려해 주는 것이기 때문이다. 정렬 상태에서 비정렬 상태로 이동하는 경우, 정렬 상태에 비해 유효 적층길이가 증가하는 것이 고려되지 않았다.

마지막으로 2차원 해석시, 등가길이에 의한 간이화된 해석 모델을 사용함으로써 3차원 형상에서 발생하는 국부적인 포화 및 비포화 현상을 충분히 반영하지 못한다 그 원인이 있다. 3차원 모델에서 발생하는 자속 흐름과는 달리 2차원에서는 평균 자로를 고려함으로써 추력이 보다 높게 산정되었다.

3.2 수직력과 자기수반에너지 비교

가. 수직력 비교

이동자의 이동에 따른 수직력 비교는 그림 6에서 나타내었고, 수직력의 평균 값은 표 3에서 비교하였다. 수직력 또한 3차원 해석에 의한 결과보다 2차원 해석에 의한 값이 더 높은 값을 가진다.

나. 자기수반 에너지 비교

그림 7은 자기수반에너지를 비교한 것이다. 추력, 수직력과는 달리 3차원 해석에 의한 자기수반 에너지가 2차원에 의한 값 보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 3차원 해석에 의한 자기수반 에너지의 변화 값이 보다 적으므로, 추력은 2차원 해석에 의한 값보다 적게 나타나는 것을 알 수 있다.

표 4에서는 자기수반에너지의 평균값을 서로 비교하였다. 추력과 수직력에 비해 자기수반에너지에 대한 오차는 약 10% 임을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 릴럭턴스형 횡자속 선형전동기의 특성 해석을 위해 2차원과 3차원 FEM을 이용하였다. 간이화된 모델을 이용한 2차원 스칼라 포텐셜, 2차원 벡터 포텐셜에 의한 해석결과와 3차원 스칼라 포텐셜에 의한 해석 결과로서, 추력과 수직력, 자기수반에너지를 각각 비교하였다.

자기수반 에너지를 제외하면, 2차원 해석 결과가 3차원 해석 결과에 비해 10% 이상 높게 나타나고 있으나 전체적인 양상은 거의 유사한 것을 알 수 있었다. 특히 벡터 포텐셜에 의한 값보다 스칼라 포텐셜에 의한 2차원 해석이 보다 적은 오차를 가지고 3차원 해석의 양상과 거의 유사하게 나타나는 것을 확인하였다. 따라서, 2차원 해석 결과로부터 정량적인 값을 유추하기 위해서는 오차를 가지고 있으나, 3차원 해석에 비해 해석시간이 짧고 모델링이 간단하며 충분한 요소수를 줄 수가 있으므로 전체적인 양상을 예측하는 데는 유용할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 강도현, 방덕재, 김종무, 정연호, 김문환, "Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기 설계에 관한 연구", 대한전기학회논문지, Vol. 49B-3-3, 2000.
- [2] 강도현, 김문환, "자기부상 열차용 부상 및 안내 결합형 횡자속 선형 전동기 설계에 관한 연구", 대한전기학회논문지, Vol. 49B-2-4, 2000
- [3] TJE Miller "Switched Reluctance Motors and Their Control", Magna Physics publishing and Clarendon Press • Oxford 1993
- [4] 任達鎬, "電氣系の有限要素法", 東明社, 1995
- [5] Sheppard J. Salon "Finite Element Analysis of Electrical Machines." Kluwer Academic, 1995.

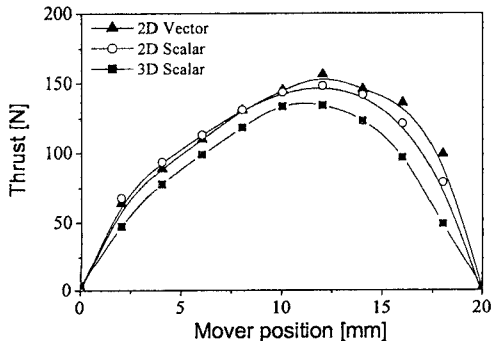


그림 5. 이동자의 이동에 따른 추력비교

표 2. 평균추력과 오차비교

	평균 수직력 (N)	오차 (%)
2차원 벡터 포텐셜	97.91	21.76
2차원 스칼라 포텐셜	94.22	17.17
3차원 스칼라 포텐셜	80.41	-

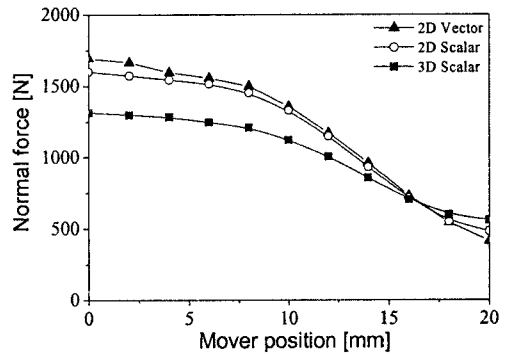


그림 6. 이동자의 이동에 따른 수직력 비교

표 3. 평균 수직력과 오차 비교

	평균 수직력 (N)	오차 (%)
2차원 벡터 포텐셜	1198.68	17.79
2차원 스칼라 포텐셜	1167.05	14.68
3차원 스칼라 포텐셜	1017.62	-

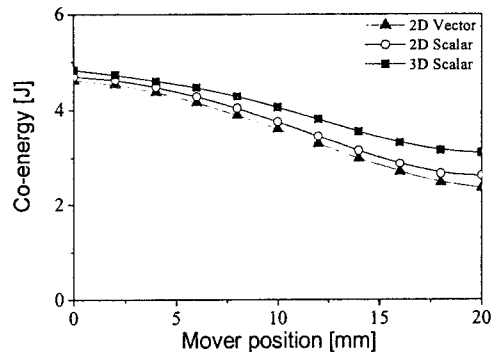


그림 7. 이동자의 이동에 따른 자기수반 에너지 비교

표 4. 평균 자기수반 에너지와 오차비교

	평균 자기수반 에너지 (J)	오차 (%)
2차원 벡터 포텐셜	3.54	11.28
2차원 스칼라 포텐셜	3.69	7.51
3차원 스칼라 포텐셜	3.99	-