

등가 자기저항 2D와 3D 유한요소해석에 의한 LHSM의 자계 특성 비교

장석명, 정상섭, 양현섭, 류동완, 윤인기, 성소영
충남대학교

Comparison of Magnetic Field Using Equivalent Reluctance 2D and 3D FEA for Linear Homopolar Synchronous Motor

S.M Jang, S.S Jeong, H.S Yang, D.W Ryu, I.K Yoon, S.Y. Sung
Chungnam National University

Abstract - The 4-pole LHSM was composed of the figure-of-eight shaped 3-phase armature windings, DC field windings, and the segmented secondary with the transverse bar track. Three dimensional model of LHSM provided the equivalent reluctance and PM model for 2D FEA. From these 2D FEA models, when the motor was fed by DC and 3-phase currents, the magnetic field were calculated and compared with the results of 3D FEA.

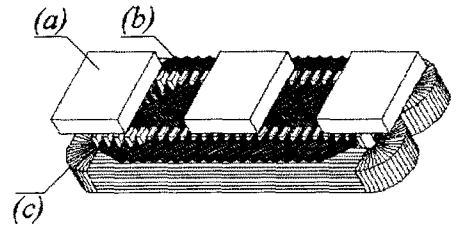


그림 1 횡방향 자속형 LHSM
(a) 횡방향 바를 갖는 세그먼트 트랙; (b) 8자형 3상 전기자 권선; (c) DC 계자 권선

1. 서 론

LHSM은 이동자계와 추진력을 발생시키는 3상 교류 권선과, 횡방향으로의 자속을 발생시키는 별도의 직류 권선을 설치하는 인덕터와 같은 특수구조로, 추진력과 흡인 부상력이 단일체에서 동시에 발생하는 전자기시스템이다. 따라서 LHSM 자체로는 구조가 복잡하여 설계, 해석 및 제작은 물론 운전제어의 어려움 등의 문제가 수반되지만, 추진용 LIM과 부상용 전자석을 개별적으로 구성하는 시스템과 비교하여 전자석이 배제되는 등 전체 시스템이 간결해지는 등의 특징을 갖게 되어 중량당, 체적당의 출력이 커진다. 또한 동일 조건에서 LIM에 비해 역률이 크므로 차량에 탑재하는 전력공급장치의 정격과 무게가 감소하는 등으로 컴팩트화되는 잇점이 있다.

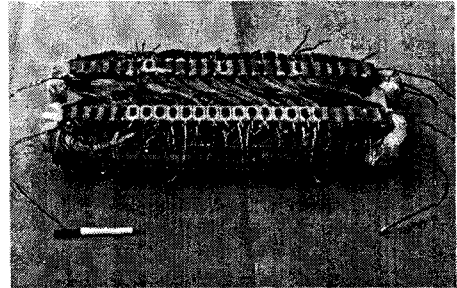


그림 2 제작된 LHSM의 1차측 모습

LHSM은 구조적 복잡성으로 인하여 설계와 해석이 어렵다. 즉, LHSM은 1차측은 슬롯-치과 "U"형의 스택구조를 가지며 2차측은 세그먼트 구조를 가진다. 그리고 DC 코일에 의하여 수직력을 발생시키는 횡자속과, 3상 전기자 코일의 전류에 의해 추진력을 발생하는 종방향 자속을 발생하는 모터이다. 따라서 단순한 2D FEM 해석으로는 종방향으로의 이동자계분포는 계산이 가능하나 횡방향자속의 특성 파악은 불가능하므로 3차원의 해석이 필수적이다. 그러나 3차원 FEM 해석에는 컴퓨터의 메모리 용량이 매우 커지며, 계산시간이 과다하게 소요되므로 해석이 용이하지가 않다. 따라서 3차원 형상을 고려한 2D FEM 해석이 필요하다.

선이 감기며 양 스택의 길이방향으로는 직류 계자권선이 감긴다. 2차측은 횡방향 세그먼트 트랙을 갖는데, 이러한 2차측의 단순한 형태는 경제성과 가공성이 좋다. 특히 1차측의 슬롯과 치를 만들기 위해 적층 철심군 사이에는 스페이서로 베크라이트가 삽입되었다. 또한 공극 자계 특성을 얻기 위해 치마다 서치코일을 감았다.

본 논문에서는 근사적으로 3차원 형상을 고려한 등가 자기저항 2D FEM을 제안하고 DC 계자권선의 여자를 고려한 등가 영구자석 2D FEM 모델을 제안하여 이를 3D FEM 해석과 자계 특성을 비교 검토하였다. 따라서 이를 통해 제안된 2D FEM 모델의 문제점과 개선안을 도출할 기본 자료를 얻을 수 있었다.

2.2 등가 자기저항 2D FEM 모델

등가 자기저항을 구하기 위한 LHSM의 3차원 모델은 그림 3과 같다. 주자속은 철심의 중심을 지나고 양쪽 스택사이에서는 누설자속이 존재한다. 그림 3을 바탕으로 그림 4와 같은 모터 정면과 측면에서의 등가 자기저항회로 2D FEM 모델로 보완하여 설정하였다. 그림 4(a)는 정면에서 본 모델인데, 대칭성을 고려하여 캐터영역을 1/2모델로 하였으며, 공극은 그린계수와 하계영역을 고려한 유효공극으로 하였다. 그림 4(b)의 측면모델은 횡자속 자기회로를 자기분로(magnetic shunt), 자기절연체의 개념을 도입하여 종자속 2차원회로에 반영한 것이다. 그림 3의 해석모델에서 대칭성을 고려하여 폭의 1/2, 길이의 1/2의 모델을 해석영역으로 하였으며, 각 영역의 길이와 폭은 그림 16의 자속경로 0으로부터 5까지의 자기저항의 크기와 등가적으로 같도록 설정하였다. 이때 x-y평면인 횡방향으로의 횡자속경로

2. FEM 해석을 위한 모델링

2.1 LHSM 모델과 제작

그림 1과 그림 2는 각각 횡방향 자속형 LHSM의 모델과 그 제작된 모습을 보인다. 1차측은 "U"자형 철심이 길이방향으로 성층되었으며 8자형 3상 아마추어 권

와 y-z방향으로의 종방향 자속경로 간에는, 비투자율이 $\mu_r = 90,000$ 정도인 무손실 자성체의 자기분리로 연결되어 있는 것으로 가정하여 그림 4(b)와 같이 동일자기회로 모델내에 설치하면 2D FEM에 의한 3차원형상 모델의 특성해석이 가능해진다. 이때 횡방향 자속이 공극자속에 영향을 미치지 않고 자속의 안내와 집중을 돕도록 $\mu_r = 0.0001$ 인 가상물질로 자기절연체를 구성하였다.

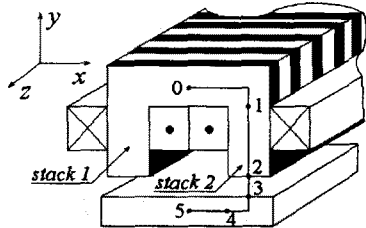


그림 3 LHSM의 3차원 모델

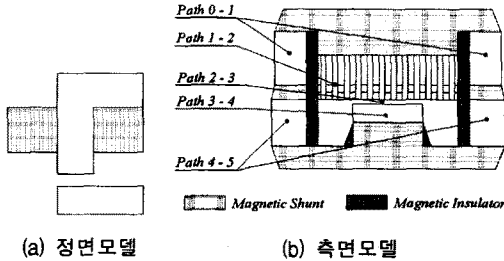


그림 4 등가 자기저항 2D FEM 모델

그림 5의 LHSM 측면 FEM 모델에서는 DC 기자력과, 그림 4(b)에서 1차측 스택사이에서의 누설자속이 고려되지 않았으므로 이를 해결하기 위하여 그림 18과 같은 등가 영구자석이 있는 것으로 대체하여 모델을 설정한다. 이 때 영구자석의 보자력과 잔류자속밀도는 각각 공극기자력과 그림 4(a)의 해석 결과인 공극자속밀도와 같도록 한다.

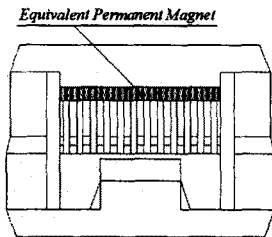


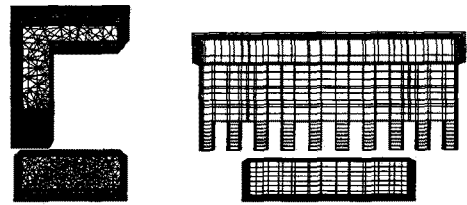
그림 5 영구자석을 갖는 등가 자기저항 2D FEM 모델

2.3 3D FEM 모델

LHSM은 그림 1에서와 같이 4극 24슬롯을 갖는 구조이고, 2차측은 순철 세그먼트로 구성되어 있다. 그러나 3D FEM 해석도 2D FEM 해석과 마찬가지로 대칭성을 고려하여 부분 모델을 설정한다. 즉 자계 특성 및 구조상 좌우 대칭이므로 그림 6과 같은 1/2 모델을 해석 영역으로 하였다. 해석모델의 요소망은 노드 2,680개와 요소 16,000로 분할하였다.

LHSM의 권선은 부상용 DC 코일, 추진용 AC코일로

구성되어 있는데, 이 모델을 해석하기 위하여 DC코일과 AC코일 여자시를 각각 나누어서 해석을 수행하였다. 또한 두 코일을 모두 여자시켰을 때의 공극자속밀도를 계산하여 자계 특성을 파악하였다. 그런데 3상 AC코일 여자시의 경우에는 정자계 해석을 하였다.



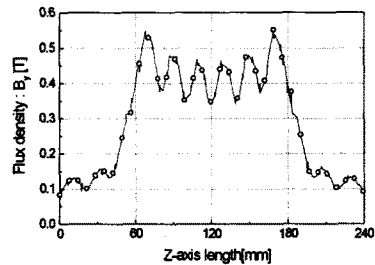
(a) 정면도 (b) 측면도

그림 6 3차원 FEM 모델

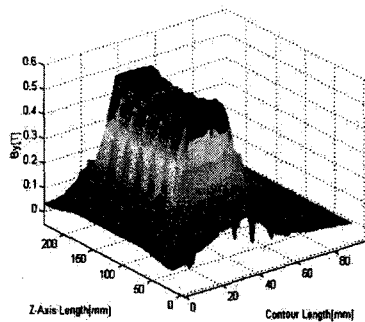
3. 자계 밀도 분포 특성 및 계산 시간 비교

3.1 DC 계자코일만을 여자시킬 경우

그림 7은 그림 4와 그림 6의 FEM 모델에서 DC코일만 여자시킬 경우의 해석을 수행한 결과이다. 그림에서 수직방향의 자속밀도 B_z 는 2차측 세그먼트 위에서 최대값 0.54(T)정도의 비슷한 값을 갖는다.



(a) 2-D FEA

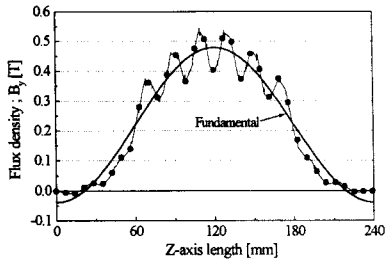


(b) 3-D FEA

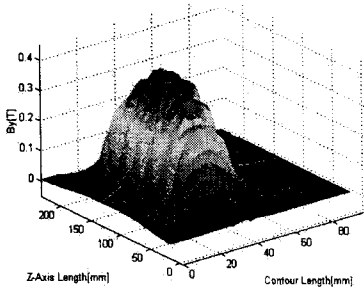
그림 7 DC 계자코일 여자시 공극자속밀도 분포

3.2 3상 AC 코일 여자시

그림 8은 3상 AC 코일을 D축 여자시의 FEM 해석 결과이다. 2D 해석 결과에서 B_z 의 최대값은 0.51T, 3D 해석 결과는 0.43(T)정도로 큰 차이를 보였다. 이는 자기절연체에 의한 누설방지효과에 의해 2D 해석시가 큰 값을 계산된 것으로 생각된다.



(a) 2D FEA



(b) 2D FEA

그림 8 D축 여자시 공극자속밀도 분포

3.3 DC & 3상 AC 코일 동시 여자시

DC 코일과 3상 AC 코일 동시 여자시에 이를 해석할 때, 전기자 전류에 의한 이동자계는 트랙의 길이방향에 따라 맥동하는 DC 자계와 상호작용을 일으킨다. 즉, 2D FEM 해석 결과인 그림 9(a)에서 보듯이 이동자계는 전류부하각에 따라 2차측 돌극 아래에서의 공극자속 밀도를 증가시키거나 감소시킬 뿐만 아니라 부분적인 자속밀도 차이를 만든다. 이러한 부분적인 차이는 고정된 돌극이 1차측의 자극을 끌어 당기므로써 추력을 발생시킨다. 그림에서 공극에서 분포하는 B_z 의 최대치가 2D 해석의 경우 0.7(T), 3D 해석인 경우 0.65(T)로 2D 해석시가 큰 값을 가졌다. 이는 3.2절에서 설명한 이유때문인 것을 사료된다.

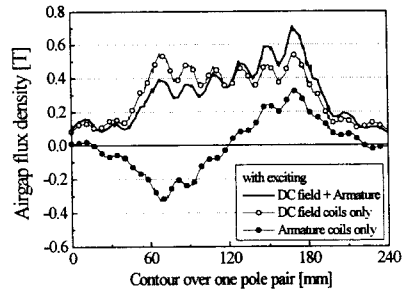
3.4 등가 자기저항 2D와 3D FEM 해석 비교

표 1은 2D와 3D FEM 해석을 통해 계산된 공극자속밀도의 최대치와 계산소요 시간을 비교한 결과이다. 대체로 2D 해석의 결과가 3D 해석보다 큰 계산 결과를 가져왔다. 이는 전기자의 누설자속인 것으로 추정되는데, 등가 자기저항 2D 모델에서 자기절연체는 누설자속을 차단하는 역할을 한다. 결과적으로 등가 자기저항 2D 모델이 계산시간은 상당히 줄이는 효과를 가져오나 AC 여자시의 해석에서 상당한 오차를 가져왔다.

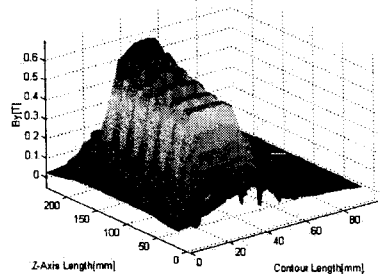
4. 결 론

LHSM은 기하학적 형상과 회전속과 종방향 자속이 존재하므로 단순한 2D FEM 해석으로는 종방향으로의 이동자계분포는 계산이 가능하나 횡방향자속의 특성파악은 불가능하므로 3차원의 해석이 필수적이다. 그러나 3D FEM 해석에는 컴퓨터의 메모리 용량이 매우 커지며, 계산시간이 과다하게 소요되므로 해석이 용이하지가 않으므로 3차원 형상을 고려한 등가 자기저항 2D FEM 해석 모델을 제안하였다.

따라서 등가 자기저항 2D FEM 모델의 정확성을 검증하고자 3D FEM 해석과 비교하였는데, 그 결과 3D



(a) 2-D FEA



(b) 3-D FEA

그림 9 DC 계자와 3상 AC 코일(Q축)을 동시 여자시 공극자속밀도 분포

표 1 등가 자기저항 2-D와 3-D FEA에 의한 공극자속 밀도의 최대치 비교 결과

여자	2-D FEA	3-D FEA
DC 계자 코일 여자시	0.55	0.54
AC 전기자 D-axis 코일 여자시 Q-axis	0.51	0.43
	0.30	0.35
DC 계자 + AC 전기자 동시 여자시	0.70	0.65
계산 시간	≈ T	≈ 3T

해석보다 큰 계산 결과를 가져왔다. 결과적으로 등가 자기저항 2D 모델을 보완할 모델이 필요하며 정지시험을 통해 공극자속 분포와 발생력 특성을 통해 두 가지 FEM 해석 결과와의 비교 검증이 필요하다.

[참 고 문 헌]

- (1) R. G. Gilliland and G.W. Pearson, "A linear synchronous unipolar motor for integrated magnetic propulsion and suspension", Maglv-84
- (2) Seok-Myeong Jang, Sang-Sub Jeong, Sung-Ho Lee "Design and Analysis on the characteristics of the Linear Homopolar Synchronous Motor for Integrated Suspension/Propulsion System" MT15, Part One, pp.606-pp.609, 1998, Beijing, China

본 연구는 한국과학재단 핵심연구과제 971-0910 -060-2로 지원되어 수행된 연구결과의 일부입니다.