

자기부상 및 추진 일체형 리니어 인덕터 모터의 간이형 3차원 유한요소해석

論 文

49B-6-1

Simplified 3D Finite Element Analysis of Linear Inductor Motor for Integrated Magnetic Suspension/Propulsion Applications

鄭相變*·張錫明**

(Sang-Sub Jeong · Seok-Myeong Jang)

Abstract - The 4-pole linear homopolar synchronous motor (LHSM), so called linear inductor motor, is composed of the figure-of-eight shaped 3-phase armature windings, DC field windings, and the segmented secondary with the transverse bar track. To reduce the calculation time, the simplified 3D finite element model with equivalent reluctance and/or permanent magnet is presented. To obtain a clear understanding, propriety and usefulness of the developed model, we compare with the results of simplified 3D FEA, general 3D FEA and test. Consequently, the results of simplified and 3D FEM analysis are nearly identical, but much larger than that of static test at d-axis armature excitation. Therefore the improved FEA model, such as full model with half slot, is needed for the precise analysis.

Key Words : LHSM, linear inductor motor, simplified 3D FEA, equivalent reluctance, equivalent permanent magnet

1. 서 론

자기부상 및 추진 시스템은 영국, 미국, 캐나다, 독일, 일본 등에서 상전도식 전자석으로 부상시키고 편축식 유도형 리니어모터(SLIM)로 추진하는 것이 가장 일반적인 방식으로 평가되어 왔으나 근래에는 동기형 리니어모터(LSM)의 채용을 검토하는 예가 많다[1,2]. 최근에는 리니어 인덕터 모터(Linear Inductor Motor)와 같이 추진력과 부상력을 단일 시스템에서 동시에 발생시키는 모델을 개발하여 응용하고자 하는 것이 추세이다[2-6]. 리니어 인덕터 모터는 이동자계와 추진력을 발생시키는 3상 교류권선과, 부상력 발생을 위한 횡방향으로의 자속을 발생시키는 별도의 직류권선을 설치하는 인덕터와 같은 특수구조를 갖는다. 따라서 전자석 등의 부상시스템과 리니어 모터에 의한 추진시스템이 각각 별도로 구성하는 종래의 방식과는 전혀 다른 방식으로 동기형 리니어 동기모터(Linear Homopolar Synchronous Motor; 이하 LHSM)라고도 불리운다[5,6].

LHSM 자체로는 구조가 복잡하여 설계, 해석 및 제작은 물론 운전제어에서의 어려움 등이 수반되지만, 추진과 부상이 별도로 구성되는 기존 시스템에 비하여, 전체 시스템의 관점에서 부피, 중량 등에서 매우 작아지고, 에너지 효율이 높고 유지보수, 운전제어 등의 종합 시스템의 관점에서 단연 유리한 시스템이 된다[7,8]. 또한 동일 조건에서 LIM에 비해 역률이 크므로 차량에 탑재하는 전력공급장치의 정격과

무게가 감소하여 시스템이 단순화되는 이점이 있다[9]. 그러나, 이러한 점에도 불구하고 그 동안 설계와 제작, 응용 및 제어분야 등에 관한 기반 미성숙으로 개발이 늦어졌으나 최근에는 관련기술의 발전으로 설계 및 제작, 운전 제어가능해졌다.

본 논문에서는 8자형 3상 전기자와 직류 계자 권선을 갖는 1차축과, 돌극형 철심이 단축적으로 놓여지는 2차축으로 구성되는 4극 LHSM의 공극자속밀도 특성을 해석하였다. LHSM은 직류 자속이 횡방향으로 2차축 트랙과 쇄교하여 부상력을, 3상 교류 이동자계가 운전방향으로 2차축 돌극형 철심과 쇄교하여 추진력을 발생시켜서 운전을 하게 되므로 종방향과 횡방향 자계를 모두 고려할 수 있는 3차원 해석이 필요하다. 그러나 상용 3차원 유한요소해석용 패키지를 이용할 경우 가격, 메모리 용량, 전·후처리 및 계산시간에 있어서 2차원 해석법보다 불리하다. 따라서 3차원 유한요소 해석과 비교하여 정확성이 크게 떨어지지 않으면서도 짧은 시간동안에 특성해석이 가능한 간이형 3차원 유한요소해석법이 필요하다. 이에 관한 연구는 1984년 Gilliland, Pearson, Dawson 등이 제안된 간이형 3차원 유한요소 해석방법이 있지만 구체적인 구성방법과 문제점, 그리고 타당성과 유용성을 제시한 바는 없다[9,10].

따라서 LHSM의 3차원 형상을 고려한 등가적인 자기저항과 영구자석을 갖는 간이형 3차원 유한요소 해석모델을 제안하고 이를 통해 공극자속밀도 특성을 해석하였다. 간이형 모델은 LHSM의 정면과 측면 방향에서 각각 설정하였는데, 정면 모델에서는 카터 계수와 그린계수를 통해 1차축의 슬롯과 2차축의 돌극 구조로 인한 공극자속밀도의 감소를 고려하였다. 그리고 측면 모델에서는 직류 계자 권선과 1차축 스택사이의 횡방향 누설자속 등을 고려할 수 없으므로

* 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 8月 26日

最終完了 : 2000年 4月 25日

정면 모델에 의한 해석결과를 통해 부상용 직류 계자 권선의 기자력과 증가적인 영구자석을 갖는 간이형 모델을 설정하였다. 또한 간이형 3차원 유한요소 해석모델을 이용하여 정격 조건시에 공극자속밀도 특성을 해석하였고 이를 3차원 유한요소 해석 및 측정 결과와 서로 비교하고 해석 소요시간 등을 종합적으로 비교·검토함으로써 등가자기저항과 등가영구자석을 갖는 간이형 3차원 유한요소 해석모델의 타당성 및 유용성을 제시하였다.

2. 간이형 3차원 유한요소 해석 모델

일반 전기기기의 경우 자기적인 특성은 수치해법에 의한 유한요소 해석용 패키지를 이용하면 편리하다. 그런데 LHSM은 주자속이 1차축의 양쪽 스택과 2차축 세그먼트 철심을 쇠교하는 자속경로를 갖는 횡방향 자속형 모터이므로 기존의 2차원 해석만으로는 특성 파악이 불가능하므로 3차원 해석이 필수적이다. 그러나 3차원 해석에서는 컴퓨터의 메모리 용량이 매우 커지고, 계산시간이 과다하게 소요되므로 해석이 어렵다. 따라서 3차원 형상이 고려되면서 해석 소요시간도 단축되며, 정확도 면에서는 3차원 해석과 유사한 간이형 3차원 유한요소 해석모델이 필요하다.

2.1 리니어 인덕터 모터

LHSM은 그림 1과 같이 1차축에는 추진력을 발생시키는 3상 전기자 권선과 부상력을 발생시키는 직류 계자 권선이 시행되고, 2차축은 (a)와 같이 돌극형 철심이 단속적으로 놓여진 트랙을 갖는다. 따라서 2차축이 단순한 구조이므로 경제성과 가공성이 좋고, 권선 냉각이 용이하다. 그림 2(a)는 제작된 LHSM의 사진인데, 1차축에 슬롯과 치를 만들기 위해 그림 3과 같은 히스테리시스 특성을 갖는 철심을 적층하고 치 사이에는 베크라이트와 같은 비자성, 비도체의 스페이서를 삽입하였다. 그림 2(b)는 세그먼트형 철심 트랙으로 비자성체 플레이트로 지지를 하며, 이러한 지지대는 콘크리트 등 값싸고 견고한 비자성체라면 종류에 관계없이 사용 가능하다. 전기자 권선도와 제작 및 운전에 관한 사양은 그림 4, 부록에서 각각 제시하였다[11].

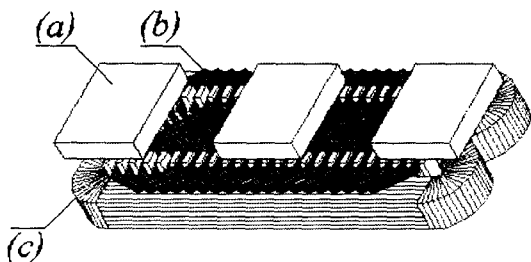
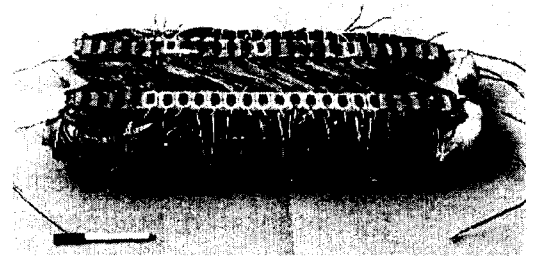


그림 1 동극형 리니어 동기 모터(리니어 인덕터 모터)

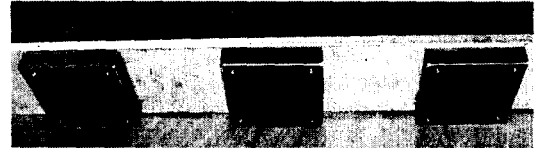
- (a) 횡방향 돌극형 철심을 갖는 2차축 트랙;
- (b) 8자형 3상 전기자 권선; (c) DC 계자 권선

Fig. 1 Linear Homopolar Synchronous Motor

- (a) Segmented secondary with the transverse bar track
- (b) Figure-of-eight shaped 3-phase armature windings
- (c) DC field windings



(a) 1차축



(b) 2차축

그림 2 리니어 인덕터 모터의 제작 사진

Fig. 2 Fabricated LHSM

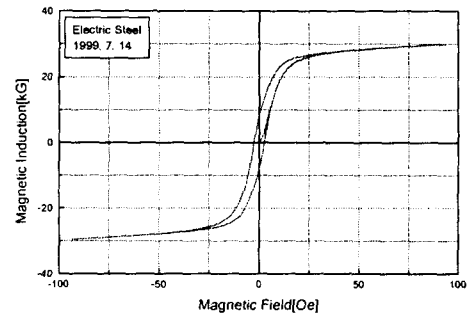


그림 3 1차축 제작에 사용된 성층 철심의 히스테리시스 곡선의 실측치

Fig. 3 Measured value of hysteresis loop of a laminated core

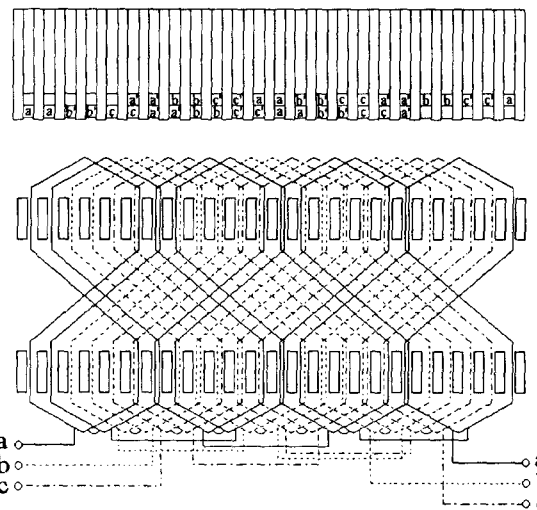


그림 4 1차축 8자형 전기자 코일의 권선도

Fig. 4 Diagram of 3-phase armature windings

2.2 등가자기저항 개념에 의한 간이형 3차원 유한요소 해석모델

그림 5와 같은 LHSM의 3차원 형상을 고려한 특성해석을 위하여 그림 6과 같이 모델의 정면과 측면 방향에서의 간이형 해석모델을 설정한다. 그림 6(a)는 모터의 정면 해석 모델로서 대칭성을 고려하여 해석영역을 1/2로 하였으며 대칭면은 자연경계조건을 취하였다. 또한 공극은 1차측 슬롯구조와 2차측 돌극 구조에 의한 공극자속밀도의 감소를 고려하기 위하여 카터계수와 그린(Green)계수가 고려된 유효공극을 적용한다[12].

그림 6(b)는 측면모델로 모터 폭의 1/2, 길이의 1/2를 해석영역으로 설정하며, 각 영역의 길이와 폭은 그림 5의 자속경로 0~5와 자기저항이 같도록 설정한다. 따라서 이를 등가자기저항 개념이 적용된 간이형 3차원 해석 모델이라 한다. 이 때 철심영역사이에는 횡방향 자속경로가 만들어지도록 손실이 없는 자기분로(magnetic shunt; $\mu_r = 90,000$)와, 횡방향 자속이 공극자속에 영향을 미치지 않고 자속의 집중과 안내를 돕도록 자기절연체(magnetic insulator; $\mu_r = 0.0001$) 개념의 가상물질로 구성하였다. 그리고 외부로의 누설이 없다고 가정하여 전체 프레임에 따라 고정경계조건을 취하였다. 따라서 이러한 두 가지 가상물질과 자기저항이 같도록 철심의 폭과 길이가 결정된 간이형 해석 모델을 구성함으로써 LHSM의 3차원 자체 해석이 가능하게 된다.

2.3 등가영구자석 개념에 의하여 DC 기자력을 고려한 간이형 3차원 유한요소 해석모델

LHSM의 1차측에는 추진을 위한 3상 전기자 권선뿐만 아니라 부상력을 발생시키는 직류 계자권선도 철심의 양 스택에 감긴다. 그런데 그림 6(b)의 측면도 방향 모델에서는 3상 전기자 권선 모델링은 가능하지만 직류 계자권선과 1차측 스택사이에서의 누설자속은 고려할 수가 없다. 따라서 그림 6(a)의 정면모델의 해석 결과를 통하여 그림 7과 같은 등가영구자석 개념에 의한 간이형 해석 모델을 구성하였다. 즉, DC 계자권선에 의한 기자력과 같은 크기를 갖는 영구자석이 놓여진 것으로 가정한 것으로 등가 영구자석의 보자력 H_C 와 잔류자속밀도 B_r 은 식(1)과 (2)에 의해 얻어진다[13].

$$H_C \approx \frac{Ni}{gk_C k_G} \quad (1)$$

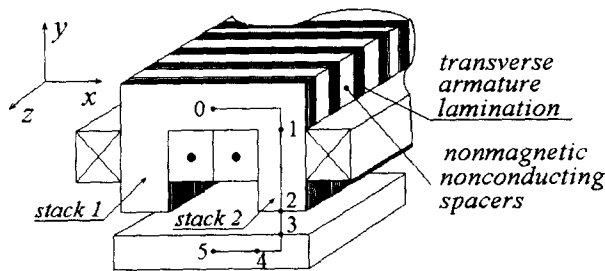


그림 5 LHSM의 3차원 형상
Fig. 5 Three dimensional appearance of LHSM

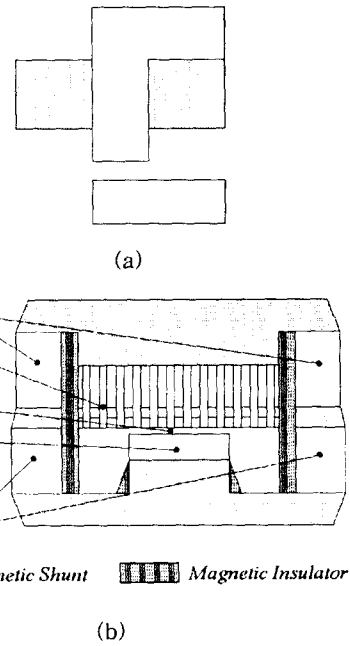


그림 6 등가자기저항 개념에 의한 간이형 2D FEA 모델
(a) 정면도 방향 모델 (b) 측면도 방향 모델
Fig. 6 Simplified 3D FEA model with equivalent reluctance
(a) Front view model; (b) Side view model

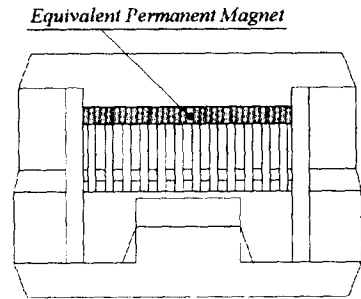


그림 7 등가영구자석 개념에 의한 간이형 3D FEA 모델
Fig. 7 Simplified 3D FEA model with equivalent permanent magnet

$$B_r = B_m \left(1 + \frac{\mu_r g k_C k_G}{l_m} \right) \quad (2)$$

여기서 Ni : DC 기자력, $gk_C k_G$: 유효공극, B_m : 그림 6(a) 모델 해석에 의한 공극자속밀도, l_m : 그림 7의 모델에서 영구자석 두께이다. 결국 이러한 등가영구자석 개념을 적용한 간이형 3차원 해석 모델을 통해 길이방향 직류 계자권선과 횡방향 3상 전기자 권선이 동시에 여자되었을 때의 3차원 자체 및 발생력 특성을 계산할 수 있다.

2.4 간이형 3차원 유한요소 해석 과정

LHSM의 등가자기저항 또는 등가영구자석 개념이 적용된 간이형 3D FEA 모델에 의하여 3차원 자체 및 발생력 특성을 해석하기 위한 알고리즘은 그림 8과 같이 구성된다.

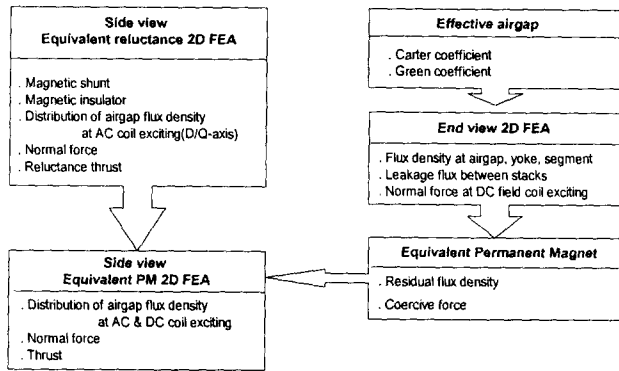


그림 8 간이형 모델에 의한 3차원 자계 특성 해석 과정
 Fig. 8 Flow-chart for 3D magnetic characteristics analysis using simplified model

- ㉠ 1차축의 슬롯-치 효과와 2차축 돌극형 철심의 단속적인 배치 영향을 카터와 그린 계수로 각각 나타낸다. 따라서 카터 및 그린 계수를 고려하여 유효공극을 결정하여 정면모델을 구성한다. 이 모델의 해석결과를 통해 계자 코일이 여자될 때의 공극 및 요크, 돌극형 철심에서 자계 및 수직력, 안내력 특성을 예측할 수 있다. 또한 계산된 공극자속밀도를 통해 등가영구자석을 산정한다.
- ㉡ 횡방향 자속을 자기분로와 자기절연체 개념을 적용하여 측면 모델에 표현될 수 있도록 간이형 3차원 해석모델을 구성한다. 이러한 간이형 해석 모델에 의하여 3상 전기자 권선 여자시의 자계 및 수직력, 추력특성을 계산한다.
- ㉢ 산정된 영구자석과 간이형 측면 해석 모델을 결합하여 등가영구자석을 갖는 간이형 모델을 구성한다. 이 모델을 통해 실제 운전시, 즉 직류 계자권선과 3상 전기자 권선이 동시에 여자되었을 때의 자계 및 수직력, 추력 특성을 계산한다.

3. 공극자속밀도 특성

공극자속밀도 특성을 3차원으로 해석하기 위하여 등가자 기저항 및 등가영구자석을 갖는 간이형 3차원 모델을 이용하여 직류 계자 권선과 3상 전기자 권선이 각각 여자되는 경우와 동시에 여자되는 경우의 공극자속밀도 특성을 해석하였다. 또한 해석 결과를 3차원 유한요소 해석 결과, 그리고 실험값과 비교 검토함으로써 제안된 방법의 타당성을 검토하였다.

3.1 3차원 유한요소 해석모델과 측정방법

3.1.1 3차원 유한요소 해석모델

3차원 유한요소 해석모델도 간이형 모델과 마찬가지로 대칭성을 고려하여 부분 모델을 설정하였다. 즉 자계 특성 및 구조상 좌우 대칭이므로 그림 9(a)와 같이 정면 방향에서는 모터의 1/2 모델로 대칭면에 대해서는 자연경계조건을 취하였고, 그림 9(b)의 측면 방향에서는 2차축 철심 바를 중심으로 2극을 해석영역으로 하였으며 양면은 고정경계조건을 취하였다. 이 때 해석모델의 요소망은 노드 2,680개와 요소 16,000개이다.

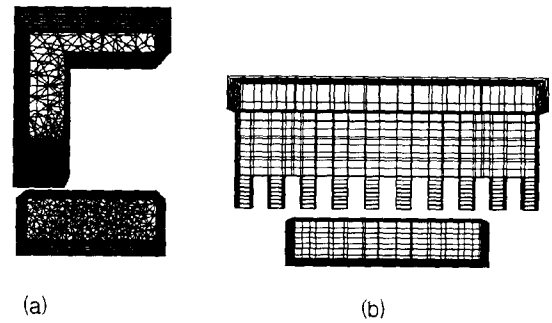


그림 9 LHSM의 3차원 유한요소 해석모델
 (a) 정면도; (b) 측면도
 Fig. 9 3D FEA model for LHSM
 (a) Front view; (b) Side view

3.1.2 공극자속밀도의 측정

실험을 위하여 1, 2차축은 공극 10mm로 유지한 채 각각 고정시키고, 공극자속밀도는 Lakeshore사의 자속밀도계를 이용하여 공극의 중간에서 측정하였다. 직류 계자 권선은 양 스택에 각각 500턴이므로 정격전류 12.8[A], 전기자 권선은 d,q축 여자에 따른 정자계 시험을 위해 3상 권선에 정격전류 AC 7[A]에 해당하는 직류를 각각 공급하였다.

3.2 공극자속밀도 특성

3.2.1 직류 계자권선만을 여자시켰을 경우의 자계 특성

그림 10은 직류 계자권선만을 여자시켰을 때의 자속분포도로 그림 6(a)와 그림 7의 간이형 모델에 의한 해석결과이다. 그림 11은 정격공극 10mm에서 직류 정격 기자력 12800AT을 여자시켰을 때의 공극자속밀도 분포이다. 2차축 트랙의 돌극형 철심위에서 공극자속밀도의 최대치를 비교할 때, 간이형 모델에 의한 해석결과는 0.55[T], 3차원 유한요소 해석결과는 0.54[T] 정도로 비슷한 값을 보이나, 측정치는 0.51[T]로 해석치보다 약간 작은 값을 갖는다.

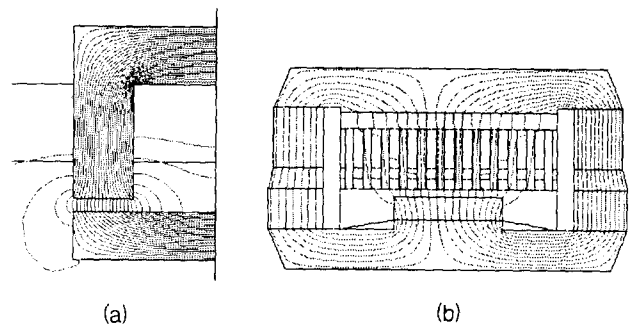
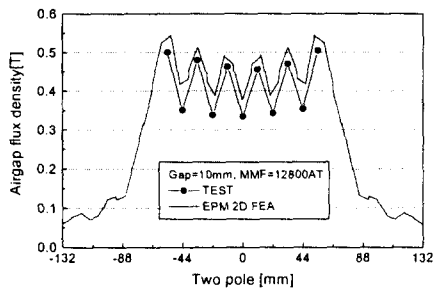
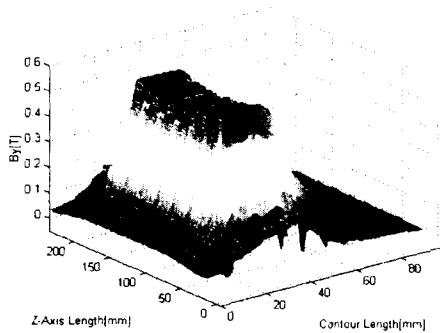


그림 10 직류 계자권선 여자시 자속 분포
 (a) 정면 모델; (b) 측면 모델
 Fig. 10 Flux distribution at DC field excitation
 (a) Front view model (b) Side view model



(a)



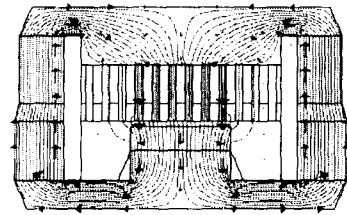
(b)

그림 11 직류 계자권선 여자시 공극자속밀도 분포 (공극=10mm, DC 기자력=12800AT)
(a) 간이형 모델에 의한 해석값과 측정값;
(b) 3차원 유한요소 해석값

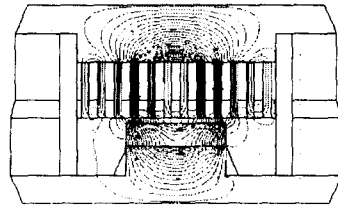
Fig. 11 Distribution of airgap flux density at DC field coil excitation
(a) Results of simplified 2D FEA and test;
(b) 3D FEA results

3.2.2 3상 전기자 권선만 여자시킬 경우의 자계 특성

그림 12는 3상 전기자 권선만을 d,q축으로 각각 여자시켰을 때의 자속분포도로 그림 6(b)의 간이형 모델에 의한 해석 결과이다. d축 여자시에 자속은 요크와 2차축 돌극을 지나서 횡방향 자속이 만들어지고, q축시에는 2차축 돌극에서 순환하는 종방향 자속이 만들어지는 것을 볼 수 있다. 그림 13은 정격공극 10[mm]에서 정격전류 7[A]로 d축 여자시켰을 때 공극자속밀도 분포이다. 공극자속밀도의 최대값을 비교해 볼 때, 간이형 모델에 의한 해석결과는 0.49[T], 3차원 해석결과는 0.44[T] 정도의 값을 갖는다. 그러나 측정치는 0.25[T]로 해석치의 간이형 해석결과 보다 50% 정도의 큰 차이를 보였다. 이는 자기절연체의 누설방지효과와 투자율 설정에서 적절하지 못했기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 동일조건에서 q축 여자시 공극자속밀도 분포는 그림 14와 같이 해석치와 측정치 모두 0.25[T]로 잘 일치하는 특성을 갖는다. 참고문헌 [9,10]에서는 구체적인 방법이나 결과에 대한 설명이 없이 q축 해석결과만을 제시한 바 있다.



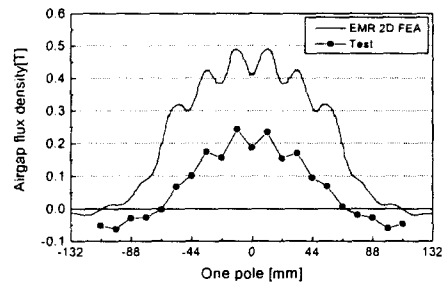
(a)



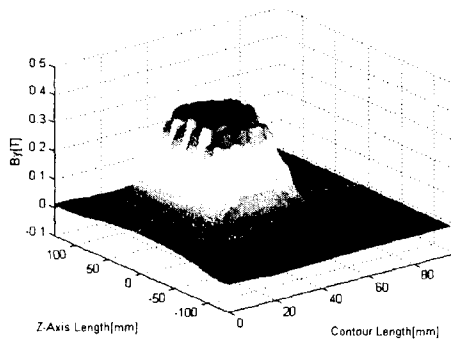
(b)

그림 12 3상 전기자 권선 여자시 자속 분포
(a) d축 여자시; (b) q축 여자시

Fig. 12 Flux distribution at 3-phase AC armature coil excitation
(a) d-axis; (b) q-axis



(a)



(b)

그림 13 d축 여자시 공극자속밀도 분포 (공극=10mm, 전기자 전류=7A)
(a) 간이형 3D FEA 결과치와 측정치;
(b) 3D FEA 결과치

Fig. 13 Distribution of airgap flux density at d-axis excitation
(a) Results of simplified 3D FEA and test;
(b) 3D FEA results

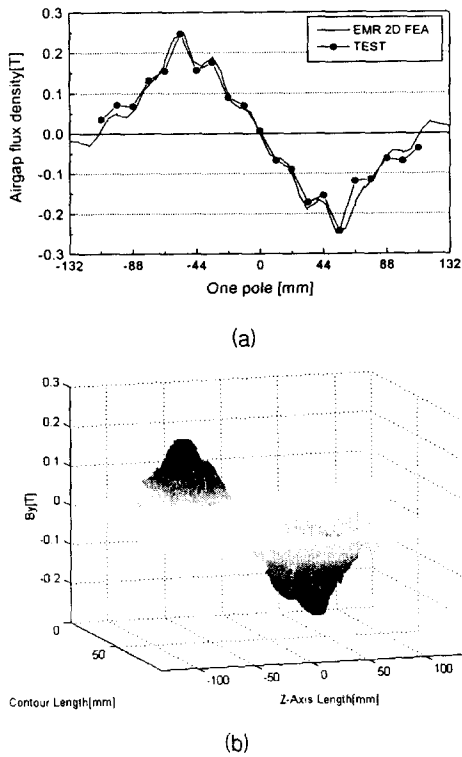


그림 14 q축 여자시 공극자속밀도 분포
(공극=10mm, 전기자 전류=7A)
(a) 간이형 3D FEA 결과치와 측정치;
(b) 3D FEA 결과치

Fig. 14 Distribution of airgap flux density at q-axis excitation
(a) Results of simplified 2D FEA and test;
(b) 3D FEA results

그림 15와 그림 16은 간이형 해석모델을 양끝단의 반슬롯까지 영역을 확장하여 해석한 결과이다. 즉, d축 여자시에 0.35[T]로 그림 13의 해석결과보다는 측정치와 좀 더 근접하였으나 여전히 큰 차이를 보였다. 그러나 q축 여자시는 그림 16에서 보듯이 그림 14의 결과와 마찬가지로 잘 일치하는 특성을 갖는다. 따라서 간이형이나 3차원 유한요소 해석시에는 그림 15와 그림 16과 같이 쏘모델로 확장하여 해석을 해야만 실측치에 접근함을 알 수 있다. 그리고 실제 LHSM의 운전시 최대 추력을 발생시키는 q축의 여자시는 어느 모델에서나 해석값과 실측값이 잘 일치하였다.

3.2.3 직류 계자와 3상 전기자 권선을 동시에 여자시킬 경우의 자계 특성

직류 계자와 3상 전기자 권선을 동시에 여자시킬 때, 전기자 전류에 의한 이동자계는 길이방향으로 2차축 트래크의 단속적인 구조에 따른 맥동 직류 자계와 상호 간섭 효과가 발생한다. 즉, 이동자계는 부하각에 따라 2차축 돌극에서의 직류 자계와 합성되어 부분적으로 증가 또는 감소시킴으로써 공극자속밀도분포를 왜형시킨다. 따라서 왜형에 따른 자기에너지의 불균일 분포로 고정된 2차축이 1차축의 자극

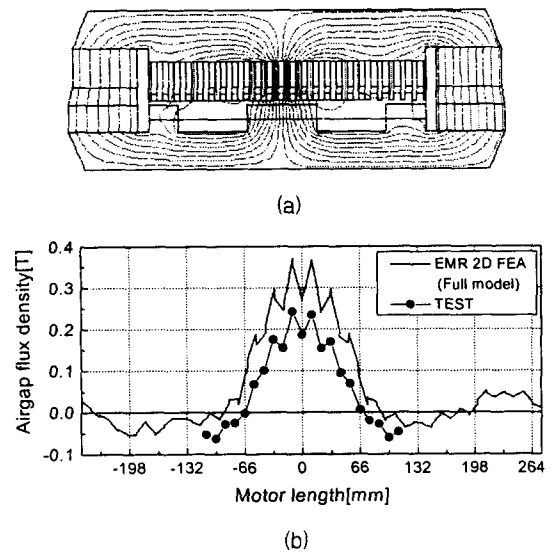


그림 15 쏘모델 간이형 해석모델에 의한 d-축 여자시 자계 특성
(a) 자속분포; (b) 자속밀도분포

Fig. 15 Magnetic field characteristics at d-axis excitation using simplified FEA full model
(a) Flux distribution; (b) Airgap flux density distribution

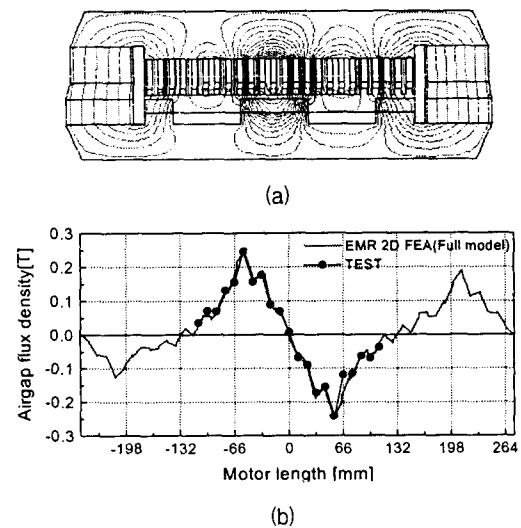


그림 16 간이형 쏘모델에 의한 q-축 여자시 자계 분포
(공극=10mm, 정격 전기자 전류=7A)
(a) 자속분포; (b) 공극자속밀도분포

Fig. 16 Magnetic field characteristics at q-axis excitation using simplified FEA full model
(a) Flux distribution; (b) Airgap flux density distribution

을 흡인하므로써 길이방향으로의 추력이 발생하며, 최대 추력은 3상 이동자계에 의한 공극자속밀도 분포의 왜형이 가장 심한 q축 여자시 발생하게 된다.

그림 17(a)는 직류 계자와 3상 전기자 권선을 동시에 여

자시킬 때의 기자력 분포이며, 그림 17(b)는 DC 계자와 3상 q축을 동시 여자시킬 때의 자속분포이다. DC 자계는 3상 q축 자계에 의해 위치에 따라 부분적으로 증가하거나 감소하여 자속분포가 비대칭이 됨을 볼 수 있다. 그림 18은 간이형 모델에 의해 해석된 공극자속밀도 최대치는 0.7[T], 3차원 유한요소 해석값은 0.65[T]로 약간의 차이를 보인다.

3.3 결과 검토

표 1은 간이형 모델과 3차원 해석 모델, 그리고 측정된 공극자속밀도를 각각 비교한 것이다. 간이형과 3차원 해석 모델에 의한 해석결과는 거의 유사하지만 d축 여자시의 경우에는 약간의 차이가 난다. 그러나 측정치와 비교할 때, 특히 d축 여자시 큰 차이가 발생하였다. 이는 양 단부쪽 반슬롯의 영향과 단부에서의 누설 등을 정확히 고려하지 못하였기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 간이형 모델에 의한 해석방법이 일반적인 3차원 유한요소 해석법을 충분히 대체할 수 있으나 측정치와 약간 다른 결과를 보이며, 좀 더 해석의 정확성을 확보하기 위해서는 간이형 해석방법은 물론 3차원 유한요소 해석도 부분모델보다는 순모델의 해석이 필수적임을 알 수 있다.

표 2는 제작된 LHSM을 간이형과 3차원 유한요소 모델에 의해 해석하는 경우에 소요되는 대략적인 시간을 각각 비교한 것이다. 간이형 모델에 의한 해석에 소요되는 시간은

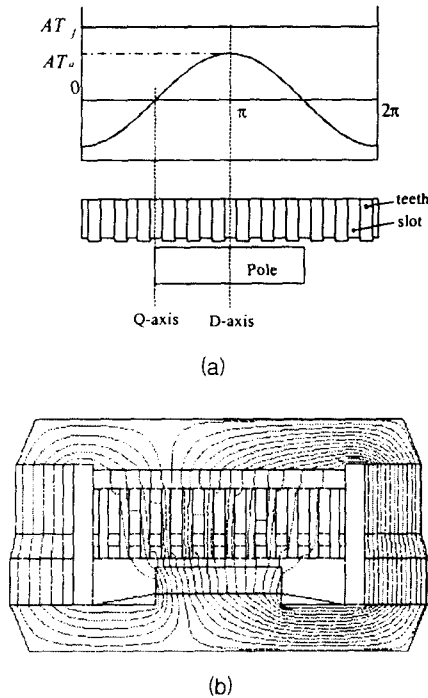


그림 17 DC 계자와 3상 전기자 권선의 동시 여자시 기자력 및 자속 분포
(a) 기자력 분포; (b) 자속분포

Fig. 17 Distribution of mmf and flux at DC field and q-axis excitation
(a) mmf distribution; (b) Flux distribution

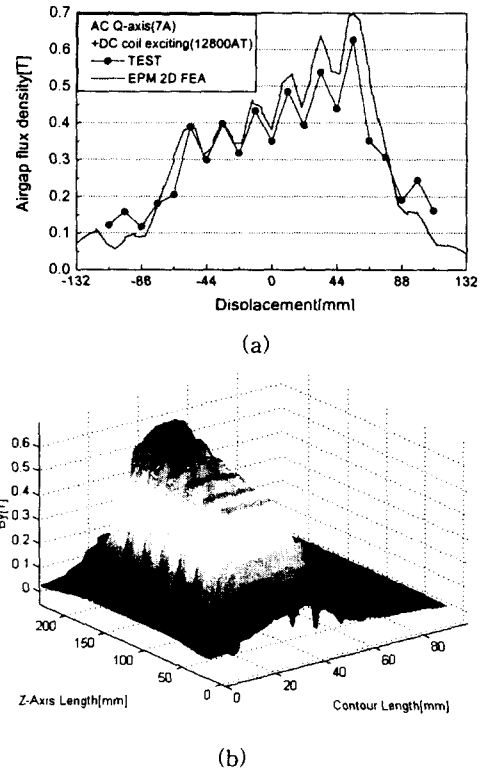


그림 18 직류와 q축의 동시 여자시 공극자속밀도 분포
(a) 간이형 모델에 의한 해석 및 측정값;
(b) 3차원 유한요소 해석값

Fig. 18 Distribution of airgap flux density at DC field and q-axis excitation
(a) Results of simplified 3D FEA and test;
(b) 3D FEA results

표 1 간이형과 3차원 유한요소 해석에 의한 공극자속 밀도의 최대치

Table 1 Comparison of maximum value of airgap flux density for simplified, 3D FEM analysis, and test

해석 모델	간이형 3D FEA	3D FEA	TEST
직류 여자시	0.55	0.54	0.51
3상 여자시	d축 0.49(0.35*)	0.44	0.25
	q축 0.25(0.25*)	0.26	0.25
직류+q축 동시 여자시	0.40~0.70**	0.41~0.62**	0.40~0.62**

* 간이형 순모델에 의한 해석 결과
** 2차측 돌극영역에서의 최소값과 최대값임

약 120분이며, 이에 비해 3차원 유한요소 해석에 소요되는 시간은 약 220분으로 대략 2배 이상의 시간이 더 소요됨을 볼 수가 있다. 이로써 3차원 유한요소 해석 결과에 비하여 비교적 잘 일치되면서도 50% 이상의 계산시간이 절감되는 간이형 3D FEA가 매우 유용한 방법임을 확인할 수 있다.

표 2 간이형과 3차원 유한요소해석의 대략적인 소요시간
Table 2 Analysis time of simplified and 3D FEM analysis

	간이형 2D FEA	3D FEA	비 고
그린/카터 계수 산정	30분	-	
등가영구자석 모델링	30분	-	
전처리	30분	100분	· CAD · 요소분할 · 경계조건, 재질 입력 · 3D FEA: 코일 모델링
계산	20분	60분	
후처리	10분	60분	· 3D FEA : Slice 과정
총 소요시간	120분	220분	

※ 해석 소프트웨어: MagNet 5.2.3, Infolytica Corporation
※ 컴퓨터 사양 : CPU 166MHz, RAM 64M

4. 결 론

본 논문에서는 8자형 3상 전기자 권선과 직류 계자권선을 갖는 1차축과 돌극 세그먼트형태로 단속적인 철심으로 구성되는 2차축으로 구성·제작된 4극 LHSM의 공극자속밀도 특성을 등가자기저항 및 등가영구자석 개념을 도입한 간이형 3차원 유한요소 해석 모델을 구성하여 해석하였다. 또한 그 결과를 일반적인 3차원 유한요소 해석 및 측정 결과와 비교 검토함으로써 간이형 해석법의 타당성과 유용성을 제시하였다. 이를 요약하면 다음과 같다.

- 자기분로와 자기 절연체로 보완된 자기등가회로의 개념을 도입하여 모터의 정면과 측면에서의 간이형 유한요소 해석 모델을 구성하였다. 정면 모델에서는 유효공극을 통해 슬롯과 돌극 구조의 자기형상을 고려하였고, 측면 모델에는 자기분로와 자기절연체의 가상물질을 이용하여 횡방향 자속을 고려하였다. 그러나 측면 모델에서는 직류 계자권선의 기자력과 횡방향 누설자속을 고려할 수 없으므로 정면 모델의 해석결과를 통해 등가영구자석을 갖는 간이형 모델을 고안하였다.
- 직류 계자와 3상 전기자 권선의 여자시, 간이형 모델에 의한 해석결과는 3차원 유한요소 해석 결과와 거의 일치하였다. 그러나 d축 여자시에는 유한요소 해석치와 측정치 사이에는 비교적 큰 차이를 보였다. 이는 단부의 반슬롯과 프린징 자속, 자기절연체 사용에 따른 누설방지 효과 등에 의한 것으로 사료된다. 또한 해석모델을 순모델로 확장하는 경우에는 비교적 측정치와 좀 더 근접하였다. 이러한 사실을 통해 유한요소 해석 모델의 확장 등을 고려해야 할 것으로 사료된다.
- 간이형과 일반적인 3차원 유한요소 해석에 소요되는 시간은 각각 220분, 120분으로 대략 2배 이상의 시간이 3차원 유한요소 해석시 필요하다. 결국 간이형 해석 방법은 3차원 해석 결과에 비하여 비교적 잘 일치하면서도 50% 이상의 계산시간이 절감되므로 매우 유용한 방법임을

을 확인할 수 있다.

이로써 본 연구에서 제안된 간이형 모델에 의한 해석방법의 타당성을 볼 때 3차원 해석이 반드시 필요한 전자기 시스템에서 매우 유용하게 활용될 수 있을 알 수 있다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 장석명, "자기부상열차 추진시스템에의 리니어모터 응용 추이", 대한전기학회지, Vol.42, No.12, Dec 1993
- [2] 장석명, "자기부상열차의 각 국가별 최근의 개발동향", 대한전기학회지, Vol.42, No.9, Sept 1993
- [3] "리니어모터 응용 핸드북", 山田一 편집, 일본 공업조사회, 1985
- [4] K.D.Tieste et al, "A Linear Maglev Guide for Machine Tools", pp.173-178, 1995.11
- [5] S.A. Nasar and I. Boldea, "Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications", pp268, chapter 4, Prentice-Hall, Inc., 1987
- [6] I. Boldea and S.A. Nasar, "Linear Motion Electromagnetic Systems", pp268, chapter 7, John Wiley & sons, Inc., 1985
- [7] T. R. Haller and W. R. Mischler, "A comparison of linear induction and linear synchronous motors, for high speed ground transportation," IEEE Trans. Vol. MAG-14, No. 5, 1978, pp. 924-926.
- [8] J.F. Eastham, "A comparison of some propulsion methods for magnetically-levitated vehicles", Maglev84, C406/84,
- [9] A.R. Eastham, G.E. Dawson, R. Ong, and L.W. Coathup, "The design and operation of the homopolar linear synchronous motor for linear drive and for integrated suspension/propulsion applications", Malev'84, pp95-103, C397/84 © IMechE 1984
- [10] R. G. Gilliland and G.W. Pearson, "A linear synchronous unipolar motor for integrated magnetic propulsion and suspension", Maglv Transport, Maglv-84, pp149-155, 1984
- [11] 장석명, 정상섭, 이성호, 서진호 "자기부상/추진 일체형 차량용 LHSM의 자기형상계수를 고려한 설계와 특성해석", 대한전기학회 추계학술대회, pp.22-24, 1997년 11월 29일, 용인, 명지대
- [12] Philip L. Alger, "The nature of Induction machines," New York, Gordon and Breach, pp184, 1965
- [13] Duane C. Hanselman, "Brushless Permanent-Magnet Motor Design," McGraw-Hill, Inc., 1994

부록 LHSM 제작 사양

Appendix Specification of LHSM

1차측 ; U자형 성층철심			3상 전기자 권선		
스택폭	50	[mm]	코일 간격	100	[mm]
창폭	103	[mm]	극당 코일수	8(9)	
창 높이	53	[mm]	코일당 턴수	58	
정격 공극	10	[mm]	상당 턴수	348	
극수	4		도체 직경	0.7 [mm]	
1차측 총길이	552	[mm]	병렬회로수	3	
슬롯수	24		상당 인덕턴스	31.4(33.9)	[mH]
슬롯간격	22	[mm]	상당 저항	4.20(4.86)	[Ω]
치폭	10	[mm]	DC 계자 권선		
슬롯깊이	26	[mm]	계자코일 중량	17	[kg]
극간격	132	[mm]	턴수	1000	
상당극당 슬롯수	2		도체 직경	1.0 [mm]	
1차측 중량	53.0	[kg]	병렬회로수	3	
2차측 ; 세그먼트형 직선 트랙			일반사양		
폭	153	[mm]	전기자 인가전압	220	[V]
두께	33	[mm]	(60Hz, Y결선시)		
길이	132	[mm]	정격 전기자 전류	7	[A]
2차측 pole 간격	132	[mm]	정격 계자 전류	13.8	[A]

저 자 소 개



정 상 섭 (鄭 相 燮)

1971년 1월 29일생, 1996년 충남대 전기공학과 졸업(학사), 1998년 동 대학원 졸업(석사), 1998년~현재 동 대학원 박사과정
Tel : 042-821-7608

E-mail : sangsub@ee.chungnam.ac.kr



장 식 명 (張 錫 明)

1949년 7월 3일생, 1986년 한양대 대학원 박사과정 졸업(공학), 1989년 미국 Univ. of Kentucky(Post-doc), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 현재 당학회 평의원, 편집이사

Tel : 042-821-5658

E-mail : smjang@ee.chungnam.ac.kr