

영구 자석형 선형 동기전동기의 동특성 해석을 위한 이동 메쉬 기법

論 文

50B-2-1

Moving Mesh Technique for Dynamic Characteristics Analysis of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

禹 旻 一* · 權 丙 一**

(Kyung-il Woo · Byung-il Kwon)

Abstract - This paper describes a moving mesh technique for dynamic characteristics analysis of permanent magnet linear synchronous motor with the secondary aluminium sheet. The moving mesh technique applied to the linear induction motor can be used to analyze the linear synchronous motor with the rectangular permanent magnet. But in case of the permanent magnet with taper, the shape of the permanent magnet may be changed after moving mesh. Therefore the moving mesh technique considering the shape of the permanent magnet is presented. The time-stepped finite element method is used for the dynamic characteristics simulation of the permanent magnet linear synchronous motor. The results of application example(hysteresis current controlled inverter fed control) such as thrust, current and flux plots are shown.

Key Words : Dynamic characteristics, linear synchronous motor, moving mesh technique, permanent magnet, time-stepping finite element method.

1. 서 론

선형 동기전동기는 별도의 동력 변환장치 없이 직선 추진력을 얻을 수 있는 장점이 있으므로, 리니어 엘리베이터, 공작기계 등의 서보용으로 이용되고 있다[1-2]. 또한, 최근에 에너지 밀도가 높은 Nd-Fe-B계 재료의 개발로 인하여 고에너지 밀도의 영구자석을 이용한 선형 동기전동기의 관심이 높아지고 있다[3-4]. 일반적으로 영구 자석의 형태는 사각형의 형태이지만 고조파를 없애기 위하여 사각형의 영구자석을 사용하는 대신에 영구 자석에 taper를 내어서 사용하기도 한다[5].

영구 자석형 선형 동기전동기의 제어를 위하여 벡터제어와 직접 추력 제어가 사용되고 있다. 이러한 제어 방법들을 사용하여 영구 자석형 선형 동기전동기의 특성을 해석함에 있어서 동특성 해석은 필수적이다. 특성을 해석하기 위하여 등가회로법과 유한 요소법 등을 사용할 수 있다. 그 중 등가회로법은 계산 시간이 짧고 프로그램 구조가 간단하여 전동기의 파라미터만 알고 있으면 간단하게 전동기의 특성을 해석할 수 있는 장점이 있는 반면, 전동기의 포화나 온도 상승을 고려하기 어려운 단점이 있다. 유한 요소법은 계산 시간이 오래 걸리는 단점이 있지만, 전동기의 구조와 철심의 포화를

고려하여 등가회로법 보다는 좀 더 정확한 특성 해석을 할 수 있다.

유한 요소법을 사용하여 동특성 해석을 위해서는 이동자의 이동을 고려한 이동 메쉬 기법이 필요한데, 회전형 전동기 및 선형 유도 전동기의 동특성 해석에 있어서 필요한 이동 메쉬 기법에 대한 논문은 발표되었다[6-9]. 영구 자석형 선형 전동기에 있어서, 사각형의 형태를 갖는 영구자석에 대한 이동 메쉬 기법은 선형 유도 전동기에 사용한 방법을 사용하면 가능하다. 그러나 영구자석의 형태가 taper를 가지는 형태인 경우에는 사각형의 형태를 갖는 경우에 사용하는 이동 메쉬 기법을 사용하게 되면 영구 자석의 형태가 어긋나는 경우가 발생한다.

따라서 본 논문에서는 영구자석형 선형 동기전동기의 유한 요소법을 이용한 동 특성 해석을 위하여, 영구 자석의 형태에 무관한 이동 메쉬 기법에 대하여 설명한다. 해석 대상은 이차측 영구자석 위에 알루미늄 도체판을 가지는 형태이며 동특성을 해석하기 위하여 시간 차분 유한 요소법을 사용한다. 히스테리시스 전류 제어형 인버터를 사용한 시뮬레이션을 행하여 제안한 이동 메쉬 기법의 타당성을 확인한다.

2. 유한 요소 해석

그림 1은 본 논문에서 채택한 해석 모델이며 표 1은 해석 모델의 제원을 나타낸다. 1차 철심의 적층 방향으로 무한하다고 가정하고 이동 좌표계를 사용하면, 자기벡터 포텐셜 A 와 전류밀도 J_0 , 그리고 잔류 자화량 M_r 을 사용한 식 (1)과 같은 지배방정식을 얻을 수 있다[10].

* 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 工博

** 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2000年 3月 8日

最終完了 : 2001年 1月 17日

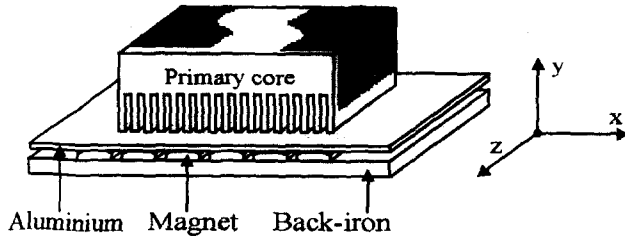


그림 1 해석 모델
Fig. 1 Analysis model

표 1 해석 모델의 재원

Table I Specifications of PMLSM

		재 원	
일차측	극 수	4	
	적층 길이	50	(mm)
	슬롯 수	30	
	슬롯 피치	3.5	(mm)
	슬롯 권선수	80	
	슬롯 깊이	12.2	(mm)
공극	공극 길이	1.0	(mm)
	극 간격	42	(mm)
이차측	알루미늄 높이	1.0	(mm)
	마그네트 높이	3.0	(mm)
	마그네트 넓이	35.7	(mm)

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) = -J_z + \sigma \frac{dA}{dt} - \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial M_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial M_{yx}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서, A 는 z-방향의 자기 벡터 포텐셜, M_{xy}, M_{yx} 는 x-, y-방향의 자화량이며 σ 는 이차 도체판 및 back-iron의 도전율이다. Galerkin 법을 사용하면, 식(2)가 얻어진다.

$$[[S] - [C]] \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial t} [[T] \quad [0]] \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix} = [G] \quad (2)$$

여기서, $[S]$ 는 노드 위치와 투자율에 관계하는 계수 매트릭스, $[C]$ 와 $[T]$ 는 각각 코일의 전류 밀도와 와전류 밀도에 관계하는 계수 매트릭스 그리고 $[G]$ 는 자화 전류 밀도에 해당하는 구동 매트릭스이다.

각 상에 대하여 Kirichhoff의 전압법칙을 적용하면, 식(3)과 같은 전압 방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} [\Psi] + [L_0] \frac{d}{dt} [I] + [R][I] = [V] \quad (3)$$

- 단, $[V]$: 각상의 전압
- $[I]$: 각상의 권선전류
- $[R]$: 각상의 1차측 권선 및 회로저항
- $[L_0]$: 각상의 1차측 누설 인덕턴스
- $[\Psi]$: 각상 권선의 쇄교 자속량

식 (2)와 식 (3)을 결합하고, 시간 미분항을 후퇴 차분법을 이용하여 정리하면 식 (4)와 같은 시스템 방정식이 얻어진다.

$$\begin{bmatrix} [S] + \frac{[T]}{\Delta t} & -[C] \\ -[C]^T & -\frac{[L_0] + \Delta t [R]}{h_{eff}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} \frac{[T]^T}{\Delta t} & [0] \\ -[C]^T & -\frac{[L_0]}{h_{eff}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [I] \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} [G] \\ \frac{\Delta t}{h_{eff}} [V] \end{bmatrix}_{t+\Delta t} \quad (4)$$

여기서, h_{eff} 는 철심의 유효 길이를 나타낸다.

영구 자석형 선형 동기 전동기의 동 특성 해석은 매 순간에서의 자계 해석의 결과로부터 구한다. 추력과 수직력을 구하기 위하여 그림 2와 같이 3층으로 나누어진 공극 부분의 한 부분을 적분 경로로 정한다. 추력과 수직력을 계산함에 있어서, 적분 경로 jk 에 대한 자속 밀도는 다음과 같이 정의한다[11].

$$B_{jk} = \left(\sum B_j^{(e)} / nj + \sum B_k^{(e)} / nk \right) / 2 \quad (5)$$

여기서, nj 와 nk 는 절점 j 와 k 를 포함하는 총 요소 수이다. $B_j^{(e)}$ 와 $B_k^{(e)}$ 는 j 와 k 를 포함하는 요소의 자속 밀도이다.

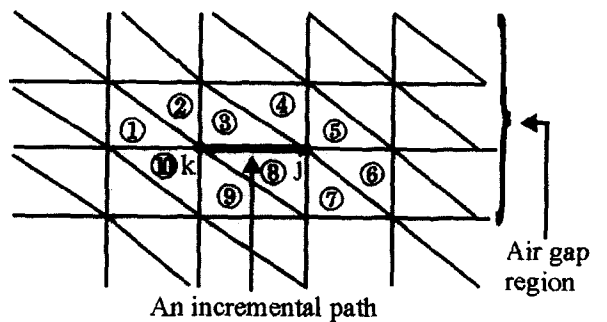
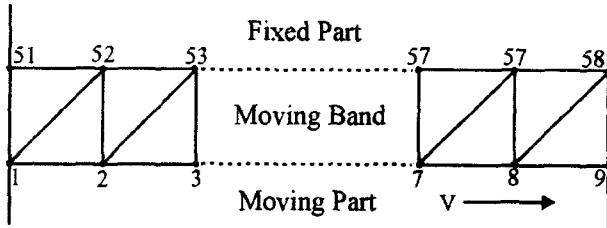


그림 2 공극내의 적분 경로
Fig. 2 Integration path in the air gap

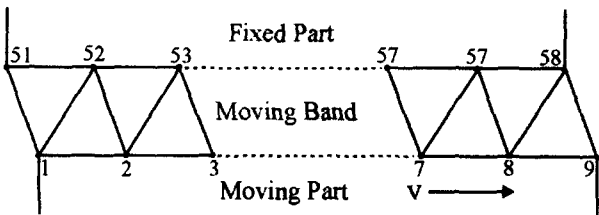
3. 새로운 이동 메쉬 기법의 제안

3.1 기존의 이동 메쉬 기법

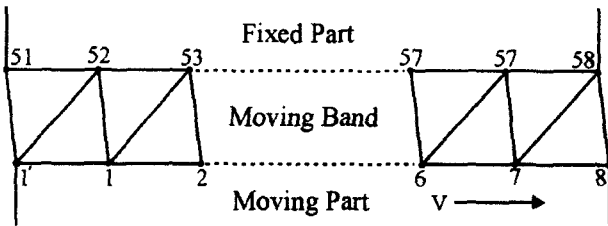
그림 3은 이동자가 이동할 때 공극의 가운데층인 moving band 내에서의 요소 재분할 과정을 나타낸다[9]. 그림 (a)는 이동자가 고정자에 대해서 속도 v 로 움직이는 경우, 초기 상태(시간 = t)에서의 이동자의 절점 위치를 나타내며, 그림 (b)와 같이 이동거리가 한 노드 간격보다 작은 경우(시간 = $t + \Delta t$)에는 Δt 시간 동안 이동자가 움직인 거리만큼 moving band의 이동자측 절점을 포함하여 이동자측의 절점 좌표만을 진행 방향으로 이동시킴으로써 해석 영역 전체를 재분할하지 않고 이동을 고려할 수 있다. 또한 그림 (c)와 같이 이동 거리가 한 노드 간격보다 큰 경우(시간 = $t + 2\Delta t$)에는 이동자의 움직인 거리가 요소 간격보다 커서



(a) 초기상태 (시간 = t)
(a) Initial state (time = t)



(b) 이동거리가 한 노드 간격보다 작은 경우 (시간 = $t + \Delta t$)
(b) When the displacement is smaller than one node (time = $t + \Delta t$)



(c) 이동 거리가 한 노드 간격보다 큰 경우 (시간 = $t + 2\Delta t$)
(c) When the displacement is greater than one node (time = $t + 2\Delta t$)

그림 3 moving band 내에서의 요소 재분할
Fig. 3 Remesh in the moving band

9번 노드를 왼쪽으로 옮긴 후, 요소의 왜형을 줄이기 위해 51번 노드 및 1번 노드 사이의 거리와 52번 노드 및 1'번 노드 사이의 거리를 비교하여 거리가 작은 곳을 삼각형 요소의 한 변으로 처리한다.

3.2 제안한 이동 메쉬 기법

선형 유도 전동기와는 달리 영구 자석형 선형 동기전동기는 이차측에 자석이 부분적으로 존재하므로, 이동 메쉬를 행할 때, 요소의 물질 정보를 주의해서 넣어주어야 한다. 해석의 편의상 일차측이 고정되어 있고, 이차측을 이동하는 것으로 하였다. 그림 4와 같이 공극은 삼층으로 나누고, 알루미늄은 일층, 영구 자석은 삼층, back-iron은 다섯 층으로 나누어서 요소 분할을 하였다. 각 층을 요소 분할 할 때 주의할 점은, 각 요소의 절점은 층과 층 사이가 아닌 층을 나누는 경계면에 존재해야 하는 것이다. 영구 자석형 선형 동기전동기의 이동 메쉬에 있어서, 영구 자석의 형태가 사각형인 경우에는, 각 층에 대하여 앞 절에서 설명한 방법을 사용할 수 있다. 그러나 영구 자석의 형태가 사각형이 아니고 taper를 가진 경우에는 적용하기 곤란하다. 이것은 그림 4(a)에서 화살표로 표시한 층을 3.1절에서 설명한 방법으로 재 메쉬 하는 경우, 이동자의 이동거리가 이 층의 한 노드 간격보다 커서 그림 3(c)와 같이 노드를 왼쪽으로 옮겨서 재 메쉬 할 때, 영구 자석 원래의 형상을 유지하지 못하는 mesh 형태가 발생하기 때문이다.

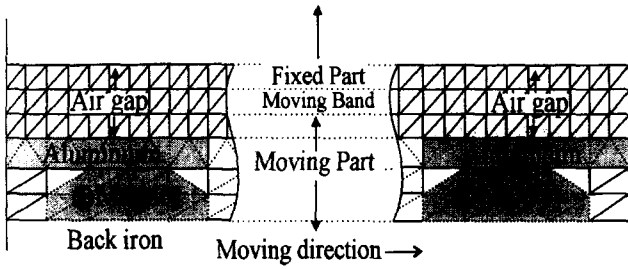
따라서 이러한 문제점을 배제하기 위하여, 본 논문에서는 이차측이 한 극 간격을 지나는 동안에는 형상을 그대로 유지하면서 이동하고, 한 극 간격을 지나갈 경우에는, 이차측의 한 극 간격만큼을 다시 왼쪽으로 붙여서 재 메쉬하는 방법을 취하였다. 이차측의 이동 거리가 한 극 간격보다 작으면, 이동 거리만큼 이차측을 이동시키고 공극의 요소만 재 메쉬를 한다. 그림 4에서 (a)는 초기 상태를 나타내고, (b)는 이차측이 한 극 간격보다 적게 이동한 경우의 모습을 보여주고 있다. 이차측이 이동하면서 새로운 노드가 생기며, 총 노드 수는 늘어나지만 총 요소수는 변하지 않는다. 해석 모델에 대한 경계 조건은 그림 5와 같이 아래와 위는 고정 경계조건을, 양옆은 자연 경계 조건으로 하였고 발생된 노드에 대한 경계 조건은 자연 경계 조건으로 하였다. 그림 (c)는 이차측이 이동한 거리가 한 극 간격보다 커서 5번 자석이 왼쪽으로 이동하여 재 메쉬 한 경우를 나타내고 있다. 이렇게 함으로써 자석의 형태에 의존하지 않고 형상을 그대로 유지하면서 이동을 고려할 수 있다. 그림 5는 해석 대상 모델의 요소 분할도를 나타내며, 총 노드는 1787개이고, 요소는 3475개이다.

영구 자석형 선형 동기전동기의 동작특성은 식 (4)를 풀어서 구한 자계 해석 결과를 이용하여 맥스웰 용력법으로 매 순간마다 힘을 구하고 식 (6)과 같은 운동방정식을 이용하여 이동자의 속도를 매 순간마다 구할 수 있다.

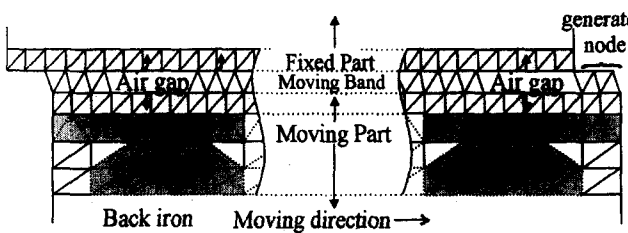
$$F = M \frac{dv}{dt} + F_f \quad (6)$$

여기서, F : 발생 추력, F_f : 부하
 M : 1차측 질량, v : 이동속도

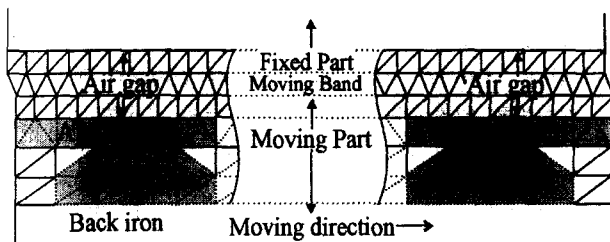
4. 시뮬레이션 결과 및 고찰



(a) 초기상태
(a) Initial state



(b) 이동거리가 한 극간격 보다 작은 경우
(b) Displacement is smaller than the pole pitch



(c) 이동거리가 한 극간격 보다 큰 경우
(c) Displacement is larger than the pole pitch

그림 4 이동 mesh 과정
Fig. 4 The process of moving mesh.

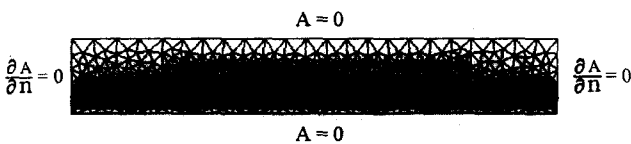


그림 5 요소 분할도
Fig. 5 Mesh shape

제안한 이동 메쉬의 타당성을 알아보기 위하여, 히스테리시스 전류 제어형 전압원 인버터를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 그림 6은 동특성 해석을 위한 순서도를 나타내며, 그림 7과 그림 8은 기준 전류 10[A], 주파수 3[Hz] 그리고 부하 추력을 20[N]을 시뮬레이션 조건으로 하여 특성 해석한 영구 자석형 선형 동기전동기의 추력 및 전류 특성을 나타낸다. 추력이 4[sec] 후에 부하 추력으로 수렴됨을 알 수 있고, 발생 전류의 주파수도 3[Hz]가 됨을 알 수 있다. 그림 9는 속도 특성을 나타내며 기동부터 과도 상태를 거쳐 약 5[sec] 후에 동기속도 0.252[m/sec]로 수렴함을 알 수 있다. 그림 10의 (a)는 초기상태, (b)는 이동자의 이동거리가 10[mm], (c)는 이동자의 이동거리가 30[mm] 그리고 (d)는 이동자의 이동거리가 한 극간격을 초과하였을 때 (47[mm])의 자속 분포도를 나타낸다. 각각의 결과 파형으로부터 제안한 기법의 타당성을 확인 할 수 있다.

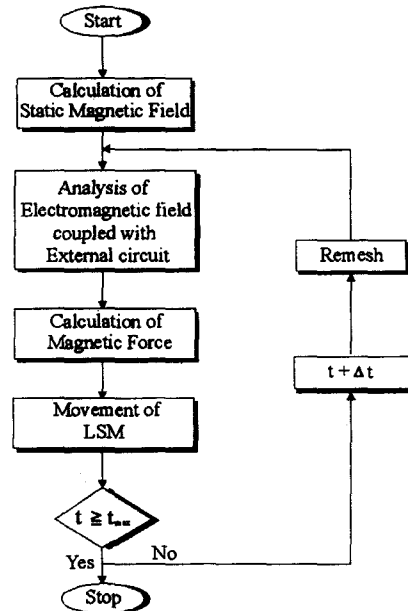


그림 6 동특성 해석 순서도
Fig. 6 Dynamic characteristics analysis flow

5. 결론

본 논문에서는 2차측에 도체판을 가지는 영구자석형 선형 동기전동기의 동 특성 해석을 위하여, 영구 자석의 형태에 무관한 이동 메쉬 기법을 제안하였다. 제안한 이동 메쉬 기법의 타당성을 알아보기 위하여 히스테리시스 전류 제어형 전압원 인버터를 사용하여 시뮬레이션을 하였으며, 추력, 전류, 속도 및 자속 파형들의 시뮬레이션 결과로부터 제안한 기법의 타당성을 확인하였다. 본 논문의 해석 방법은 임의의 형상을 갖는 영구 자석형 회전형 전동기와 직선형 전동기의 동특성 해석을 위하여 이동 메쉬 기법을 적용할 경우 많은 도움이 되리라고 생각한다.

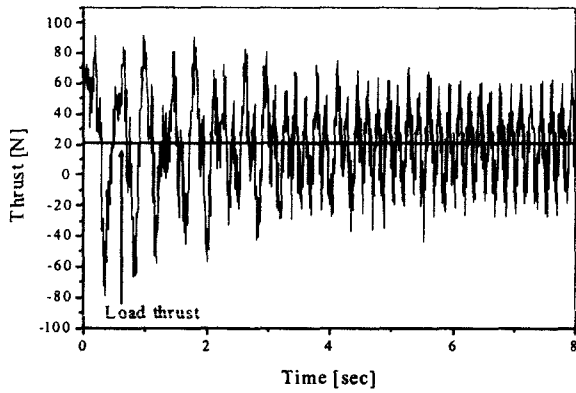


그림 7 추력 특성
Fig. 7 Thrust response

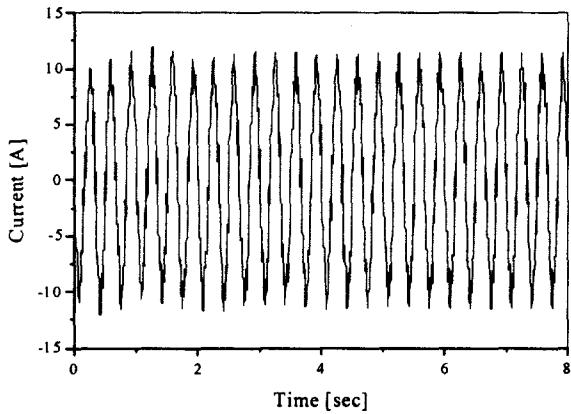


그림 8 상전류 특성
Fig. 8 Phase current

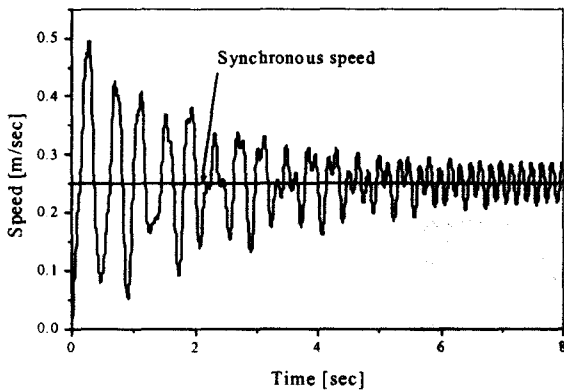
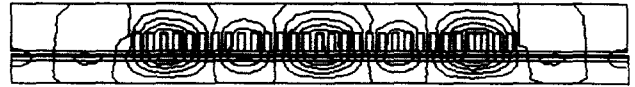
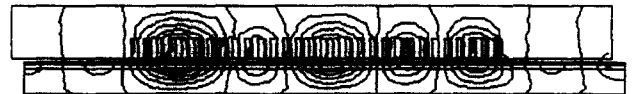


그림 9 속도 특성
Fig. 9 Speed characteristics



(a) 초기 상태
(a) Initial state



(b) 이동 거리가 10(mm) 인 경우
(b) When the displacement is 10(mm)



(c) 이동 거리가 30(mm) 인 경우
(c) When the displacement is 30(mm)



(d) 이동 거리가 한 극간격을 초과한(47(mm)) 경우
(d) When the displacement is larger than the pole pitch(47(mm))

그림 10 자속 분포도
Fig. 10 Flux plot

감사의 글

본 연구는 99년 교내연구비에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Jacek F. Gieras, *Linear Induction Drives*, clarendon Press, 1994.

[2] S. Nasar, I. Boldea, *Linear Motion Electric Machines*, John Willy, 1976.

[3] Tsutomu Mizuno, Hajime Yamada, "Magnetic Circuit of a Linear Synchronous Motor with Permanent Magnets", *IEEE Trans. on Magn.*, pp. 3027-3029, 1992.

[4] Gieras Jacek F., et al., "Analysis of a Linear Synchronous Motors with Buried Permanent Magnets", *Proc. of LDIA*, pp. 323-326, 1995.

[5] T. Mizuno, H. Omata, "Static Thrust Analysis of PM Type LSM", *JIEE*, LD-90-28, pp. 1-11, 1990.

[6] Haruyuki Kometani, Shigekazu Sakabe, "3-D Analysis of Induction Motor with Skewed Slots Using Regular Coupling Mesh", *COMPUMAG, Sapporo, Japan*, pp. 98-99, 1999.

[7] Kenji Miyata, Kohiji Maki, "Air-gap Remeshing Technique for Rotating Machines in 3D Finite Element Modeling", *COMPUMAG, Sapporo, Japan*, pp. 10-11, 1999.

[8] Kazuhiro Muramatsu, Yasuhiro Yokoyama, Norio Takahashi, "Effect of Continuity of Potential in Magnetic Field Analysis Using Nonconforming Mesh on Accuracy", *COMPUMAG, Sapporo, Japan*, pp. 568-569, 1999.

[9] Dal-Ho Im and Chang-Eob Kim, "Finite element force calculation of a linear induction motor taking into account of the movement," *IEEE Trans on Magn.*, Vol. 30, No.5, pp.3495-3498, 1994.

[10] 임 달 호, 전기계의 유한요소법, 동명사, 1992.

[11] S. X. Chen, T. S. Low, Y. A. Mah and M. A. Jabbar, "Super Convergence Theory and Its Application to Precision Force Calculation", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 32, No. 5, pp. 4275-4277, 1996.

저 자 소 개



우 경 일 (禹 炅 一)

1969년 9월 6일 생. 1995년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1997년 한양대학교 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학).

Tel : 031-409-1277, Fax: 031-409-1277
E-mail : cogging@hanmail.net



권 병 일 (權 丙 一)

1956년 2월 1일 생. 1989년 일본 동경대학교 대학원 졸업. 1989년~현재 일본 와세다 대학 이공학 연구소 객원연구원. 1990년 일본 도시바(주) 시스템 소프트웨어 연구소 연구원. 1991년 한국 기계연구소 자

기부상열차 사업단 선임 연구원. 1991년~현재 한양대학교 공학대학 전자,컴퓨터 공학부 교수

Tel : 031-400-5165, Fax : 031-406-5073
E-mail : bikwon@email.hanyang.ac.kr