

PMLSM의 디텐트력 최소화를 위한 Notch의 적용에 관한 연구

論 文
54B-10-4

A Study on the Detent force Minimization Using Notch in Slotted Pemanent Magnet Linear Synchronous Motor

李 東 燁* · 金 奎 卓†
(Dong-Yeup Lee · Gyu-Tak Kim)

Abstract - In this paper, detent force is minimized using notch and slot-aperture width adjustment in a slotted PMLSM. This time, the moving model node technique has used to reduce the time and the effort for calculation according to changing design parameters. As the result, the detent force of proposed model is decreased from 9.44[N] to 0.97[N] compare with it of basic model greatly. The thrust is decreased 1.3[%] from 342.07[N] to 337.48[N] a little. The notch is applied to PMLSM simply, the detent force is reduced greatly.

Key Words : PMLSM, Detent force minimization, Notch, Moving model node technique

1. 서 론

최근 밀링 머신, 선반과 같은 직선 운동을 요구하는 시스템에서는 회전형 전동기를 대신하여 직접 직선 추력을 발생시키는 직선형 전동기가 각광을 받고 있다. 특히, 영구자석 선형동기전동기(PMLSM)는 선형유도전동기에 비해 개루프 제어성능이 떨어지고 높은 제조 비용이 든다는 단점이 있으나 계자원을 영구자석으로 대체한 간단한 구조를 가지므로 효율, 추력/중량비 및 에너지 밀도가 높고 고속화가 가능한 이점을 가지고 있다[1]. 특히, 최근의 에너지 밀도가 높은 자석 재료의 개발과 전력전자 기술 및 디지털 제어기술의 진보로 인하여 급진적인 발전이 이루어지고 있다[1].

하지만, PMLSM과 같은 영구자석 기기에서 반드시 검토되어야 하는 것이 영구자석과 슬롯의 상대적인 위치 변화에 따라 발생하는 디텐트력(detent force)으로, 이는 전동기 구동시 발생 추력의 맥동으로 작용하여 기기의 소음 및 진동을 유발할 뿐만 아니라 기기의 제어 성능의 저하를 가져오며 특히 정지상태에서의 정밀 위치제어를 어렵게 하는 요인으로 작용한다[2,3].

PMLSM의 디텐트력 저감을 위한 방법으로 영구자석 자극 폭 조절법, 영구자석의 형상을 변화시키는 방법, 영구자석을 비대칭적으로 배치하는 방법, 전기자나 영구자석에 스코틀 주는 방법 및 반폐 슬롯을 이용하는 방법, 노치를 적용하는 방법 등을 들 수 있으며 이러한 방법들을 적용 시 기기의 제반

특성들의 변화에 주의할 필요가 있으며, 노치를 제외한 많은 방법에 대한 연구가 지속되었다[4,5].

따라서, 본 논문에서는 기존의 여러 디텐트 저감 기법 중 반폐 슬롯 및 노치를 동시에 적용하여 기존의 디텐트력 저감 기법의 단점을 보완하였으며 유한 요소법을 통하여 위의 기법들의 타당성을 증명하였다. 또한, 기하학적인 설계변수의 변화에 따른 해석모델들의 전처리 시간의 단축을 위해 초기 모델에 대한 절점이동 기법을 제시하였다.

2. 해석 모델 및 이론

2.1 PMLSM의 구조 및 재원

PMLSM의 디텐트력은 운전시 추력(thrust) 리플로 작용하기 때문에 PMLSM의 위치 정밀도 및 속도제어에 큰 영향을 미친다. 특히, 영구자석부가 고정자가 되는 단 1차형 PM

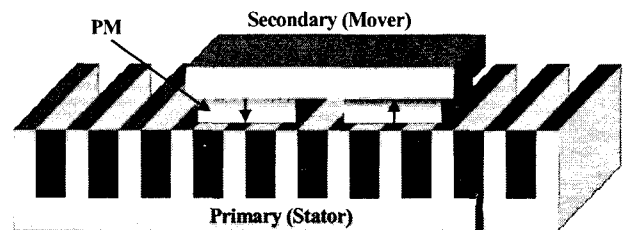


그림 1. 단 2차형 PMLSM의 구조
Fig. 1. Structure of short secondary type PMLSM

† 교신저자, 正 會 員 : 昌原大學校 電氣工學科 教授 · 工博

E-mail : gykim@sarim.changwon.ac.kr

* 正 會 員 : 昌原大學校 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2005年 5月 3日

最終完了 : 2005年 8月 13日

표 1 PMLSM의 제원
Table 1 Specifications of PMLSM

구분	항목	기호	값(단위)
고정자 (1차측)	극간격	τ	69 (mm)
	슬롯퍼치	τ_s	11.5 (mm)
	슬롯폭	w_s	변수
	정격전류	I	3 (A)
	매극매상당	q	2
가동자 (영구자석)	슬롯수		
	높이	h	변수
	폭	w_{PM}	변수
공극	재질		Nd-Fe-B
	잔류자속		
	밀도	B_r	1.12 (T)
기계적 공극	g_m	변수	

PMLSM의 경우 추력의 리플로서 1차측 슬롯과 영구자석에 의한 디텐트력 뿐만 아니라 1차측 단부와 영구자석 사이에 작용하는 디텐트력이 존재한다.

따라서, 본 논문에서는 1차측 슬롯과 영구자석에 의한 디텐트력 저감을 위하여 영구자석 계자를 가동자로, 고정자를 전기자 철심으로 구성된 단 2차형 PMLSM을 기본 해석 모델로 선정하였다. 단 2차형 모델은 영구자석을 가동자에 이용하므로 자계를 형성하기 위한 외부 전원이 필요치 않아 가동자가 간단하며, 가동자의 유한길이에 의한 단부효과가 단 1차형 구조보다 작게 나타나므로 제어 성능이 우수하다. 그림 1에는 단 2차형 기본모델의 구조를 나타내었고 표 1에 해석 모델의 고정자 및 가동자의 치수와 기본 제원을 나타내었다.

2.2 해석 이론

본 논문은 PMLSM의 특성해석을 위해서 복잡한 형상과 재질의 비선형성의 고려가 용이한 유한요소법을 이용하였다. 유한요소법을 이용하여 기기의 설계치수의 변화에 따른 특성을 해석하고자 하는 경우 해석모델의 치수 및 형상 변화에 따른 각각의 모델링 및 재질 정수 입력 및 요소분할 등의 전처리 작업을 필요로 하기 때문에 특성해석에 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 이러한 단점을 보완하기 위해 본 논문에서는 초기 모델에 대한 절점이동 기법(이하, 모델 절점이동 기법)을 도입하였다[5].

요소분할 데이터를 이용한 절점 이동 기법은 간단한 치수의 변화에 대한 모델링에는 매우 효과적이거나 절점의 이동으로 인한 요소의 변형이 발생할 수 있고 다소 복잡한 모델에 대하여 적용이 어렵다는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는

각각의 설계변수 변화에 따른 요소분할 전의 초기 모델링 데이터의 절점을 이동시킨 후 요소분할을 통하여 전처리 데이터를 자동으로 생성하도록 하는 기법을 이용하였다. 그림 2는 모델 절점이동 기법을 이용한 슬롯 형상 변화 및 자석폭 조정의 예를 보여주고 있다.

각각의 설계변수 변화에 따른 초기모델의 형상 변경을 행

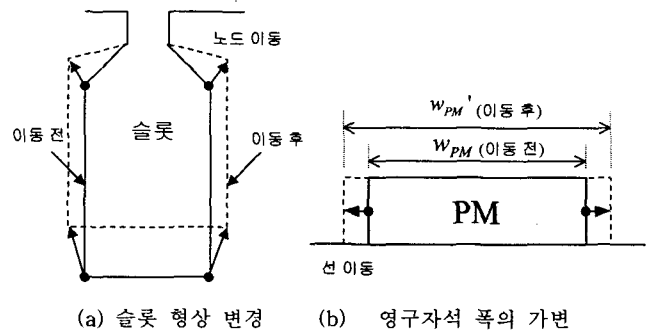


그림 2 모델 절점이동 기법의 기본 개념
Fig. 2 Moving Model node technique

한 후에는 재 요소분할이 요구된다. 또한, 모델 절점이동 기법은 해석모델의 전처리 데이터 중 노드의 위치만을 가변 시킴으로 한 번의 전처리 작업이 요구되며 나머지 가변 치수 모델에 대해서는 배치처리(batch)를 행함으로써 모델링 시간을 크게 감소시킬 수 있다.

그림 3은 본 논문에 적용한 모델절점이동기법의 흐름도이다.

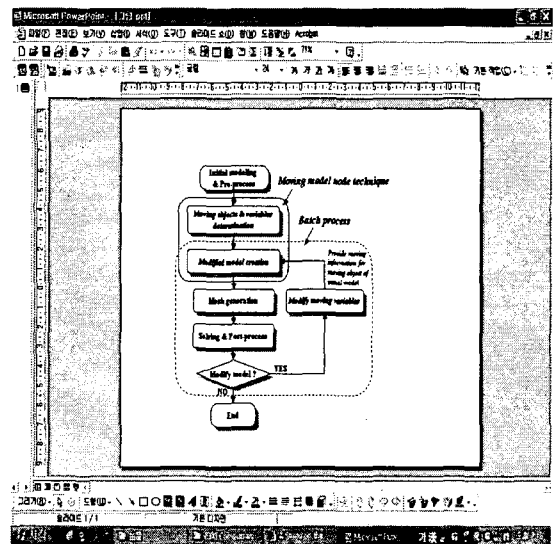


그림 3 모델절점이동기법의 적용한 유한요소법의 흐름도
Fig. 3 Flowchart of FEA with moving model node technique

3. PMLSM의 디텐트력 저감법

디텐트력은 영구자석과 슬롯구조에 기인한 공극 고조파 성분의 증가에 의한 것으로 회전기의 코깅토크와 동일한 특성을 가진다. 따라서, 회전기에서 적용되었던 많은 연구들이 직선기에 그대로 적용할 수 있다.

본 논문에서는 2차측에 대하여 영구자석의 두께 및 폭 변화와 영구자석의 비대칭 배치법에 대하여 검토하고 1차측에 대하여 반폐 슬롯 구조에 의한 디텐트력 특성을 해석하였다.

3.1 영구자석 두께 변화

그림 4는 PMLSM의 영구자석의 두께를 조절하는 경우 디텐트력과 발생 추력의 최대치를 나타내고 있다. 기본 해석모델의 영구자석 높이는 10(mm)로 이때의 자기력은 약 355(N)이나 영구자석의 두께가 작아지는 경우 디텐트력의 감소량에 비하여 자기력의 저하가 뚜렷이 나타나고 있다. 따라서, 전기자 전류에 의한 영구자석의 감자 고려 및 요구 추력을 만족시키기 위해서는 자석의 두께 선정 범위가 극히 제한되며 디텐트력 저감을 위한 적절한 방법이 될 수 없다.

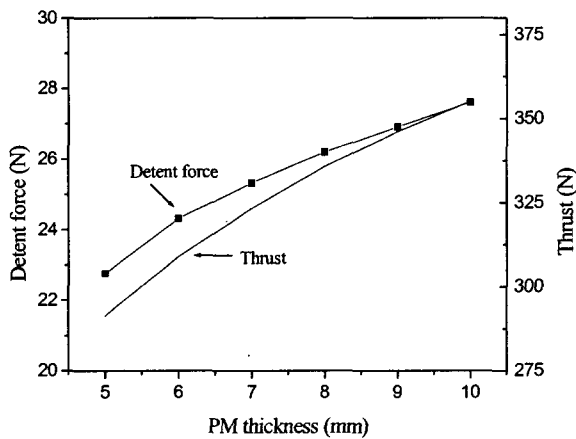


그림 4 영구자석 두께에 따른 디텐트력 및 추력
Fig. 4 Detent force and thrust according to PM thickness

3.2 영구자석 폭 변화

디텐트력의 기본과 성분은 슬롯 피치에 대한 영구자석 폭을 적절히 조절함으로써 효율적으로 제거가 가능하다[3]. 그림 5는 일정 슬롯 피치에 대한 영구자석의 폭을 조절하는 경우 디텐트력과 전자기력의 최대치에 대한 변화를 나타내고 있다. 매극대상당 슬롯수 2이므로 슬롯피치는 τ/mq 로 11.5 (mm)의 슬롯 피치를 가진다. 그림 5에서 알 수 있듯이 영구자석 폭이 증가함에 따라 자기력은 다소 증가하나 누설 자속의 증가로 인해 포화현상을 보이고 있다. 일반적으로 PMLSM의 디텐트력을 최소화하기 위한 일정 슬롯피치 τ_s 에 대한 영구자석 폭은 정수 n 에 대하여 다음 식 $(n + 0.25) \cdot \tau_s$ 을 만족하면 된다[5]. 해석결과에서 제시된 조건과 약간의 오차를 보이는 것은 해석 시 철심 재질의 비선형 특성이 고려되었기 때문이다.

3.3 영구자석의 비대칭 배치

PMLSM의 디텐트력은 슬롯피치에 대하여 주기성을 가지

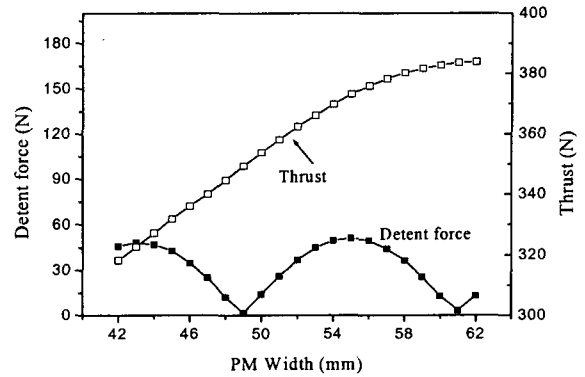


그림 5. 영구자석 폭에 따른 디텐트력 및 자기력
Fig. 5. Detent force and thrust according to PM width

고 있으므로 푸리에 급수에 의하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_d(x) = p \cdot F_{d, pole}(x) = p \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n \frac{2\pi}{\tau_s} x) \quad (1)$$

단, $F_{d, pole}(x)$ 은 1극에 의해 발생하는 디텐트력이다.

식 (1)에서 동일 자속의 통로가 되는 2극에 대하여 서로 디텐트력이 상쇄되도록 영구자석을 배치하면 식 (2)와 같이 디텐트력을 최소화시킬 수 있다.

$$F_d(x) = \frac{p}{2} \cdot \left\{ F_{d, pole}(x) + F_{d, pole}(x + \frac{\tau_s}{2}) \right\} \quad (2)$$

$$= p \cdot \sum_{n=2,4,6}^{\infty} a_n \sin(n \frac{2\pi}{\tau_s} x)$$

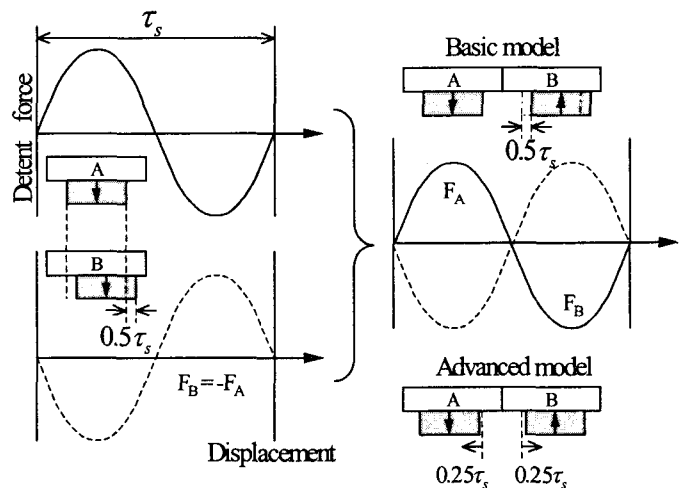


그림 6 영구자석 배치에 의한 디텐트력 저감
Fig. 6 Reduction of detent force according to PM displacement

그림 6은 영구자석의 비대칭 배치에 의한 디텐트력 최소화 기법의 예로써 디텐트력의 저감을 위해 A와 B극에 의한 디텐트력이 180도($0.5\tau_s$)의 위상차를 가지도록 영구자석을 배치한 것으로 B극을 $+0.5\tau_s$ 만큼 이동시킨 간단한 구조(basic model)를 생각할 수 있으며 본 논문에서는 2극의 상호 대칭성 및 슬롯피치에 따른 자석 배치의 한계를 고려하여 A와 B극의 영구자석을 초기 위치에서 $\pm 0.25\tau_s$ 로 배치한 구조(advanced model)를 적용하였으나, 본 논문의 적용모델의 영구자석 폭이 61[mm]이며, $\pm 0.25\tau_s$ 만큼 영구자석을 어긋나게 배치하면 인접한 영구자석과의 거리가 짧아져 누설자속이 크게 증가하여 기기의 특성이 저하되어 본 연구에서는 적용하지 않았다[5].

3.4 반폐 슬롯

1차측 슬롯을 반폐 슬롯으로 설계하는 경우 디텐트력은 슬롯 개구폭 w_{so} 에 의해 크게 의존한다. 이는 w_{so} 의 감소에 의해 공극 자속밀도에 대한 슬롯 고조파 성분의 영향이 줄어들기 때문이다. 그림 7은 반폐 슬롯 모델의 기본 구조 및 각부의 치수를 나타내고 있다.

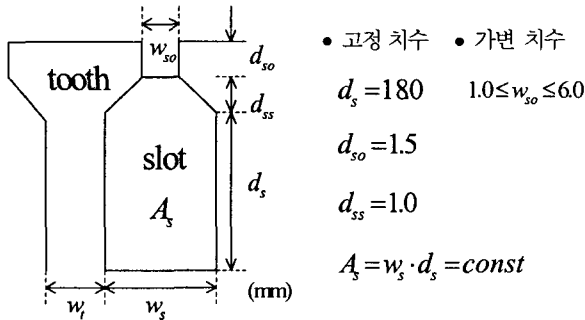


그림 7 반폐 슬롯 모델과 기본 치수
Fig. 7 Semi-closed slot model and size

그림 8과 9는 w_{so} 를 권선 두께를 대하여 1에서 6(mm)로, 공극을 5[mm]에서 2[mm]까지 변화시킨 경우 발생 추력 및 디텐트력의 최대치에 대한 해석결과를 나타낸다.

슬롯 개구폭의 증가는 공극자속에 대한 슬롯 고조파의 영향을 증가시켜 디텐트력이 커지고 실효 공극이 증가하므로 발생 추력은 감소한다. 또한, 슬롯 개구폭이 작아지는 경우 1차측 전류에 의한 누설 자속의 증가로 발생추력이 다소 감소함을 알 수 있다. 그리고, 공극의 감소로 인하여 발생 추력은 증가하나 디텐트력 또한 크게 증가하는 양상을 보여준다.

3.5 스큐

스큐를 시행하게 되면, 회전기에서는 나타나지 않으나 PMLSM에서는 가동자의 단부부분에 모양이 전혀 다른 별도의 자석이 필요하게 되는 물론 기기의 부피도 스큐를 시행하지 않은 모델에 비해 커지게 되는 문제점이 나타난다[4].

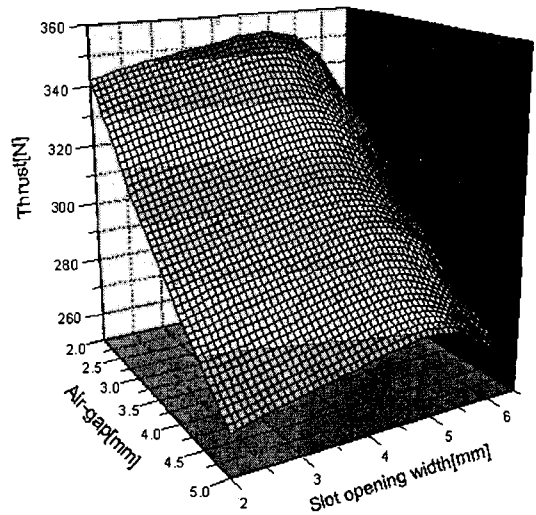


그림 8. 공극과 슬롯 개구폭에 따른 발생 추력
Fig. 8. Thrust according to air-gap and slot opening width

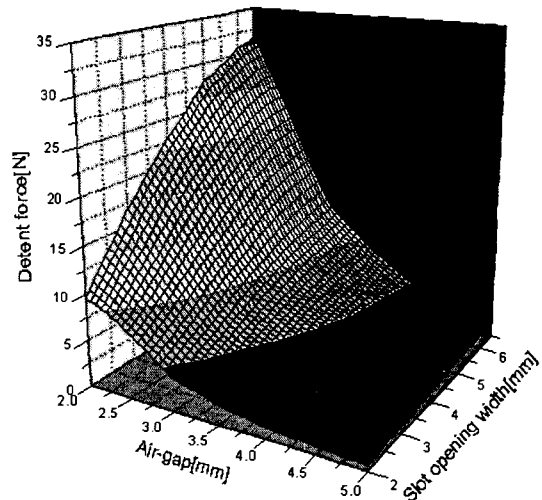


그림 9 공극과 슬롯 개구폭에 따른 디텐트력
Fig. 9 Detent force according to air-gap and slot opening width

4. 모델 선정 및 노치의 적용

앞장의 여러 가지 디텐트력 저감법을 적용한 결과, 디텐트력 저감에 따라 발생 추력도 감소하였다. 따라서 본 논문에서는 notch를 적용하여 디텐트력을 제거하는 기법을 적용하였다. 그림 8에서 발생 추력이 최대가 되는 공극 2[mm], 슬롯 개구폭은 5.5[mm]인 경우를 기본 모델로 하여 notch를 적용하였다.

먼저, 여러 가지 형태의 notch에 따른 특성 변화를 고찰하기 위하여 그림 10과 같이 사각형, 원형, 삼각의 형태로 notch를 적용하였으나 그에 따른 디텐트력의 변화는 notch의 형태와 상관없이 거의 동일하게 나타났다. 따라서 notch의 형상은 디텐트력에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 사료되어, 본 논문에서는 notch의 형상을 정사각형으로 설정하여

notch의 폭과 삽입되는 notch의 개수를 변수로 설정하여 디텐트력을 저감 시켰다.

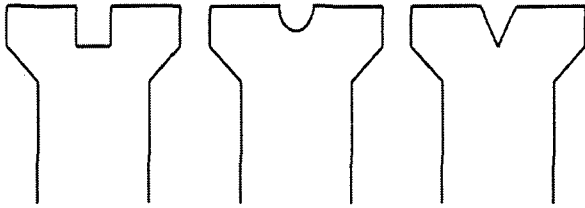
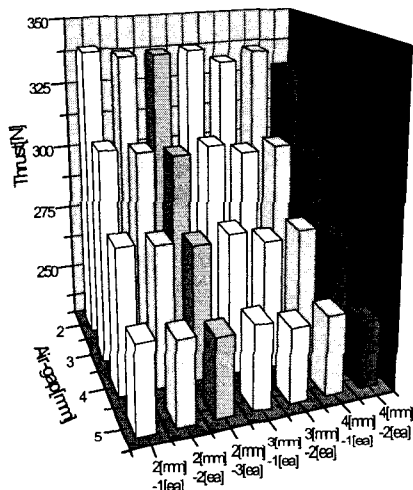
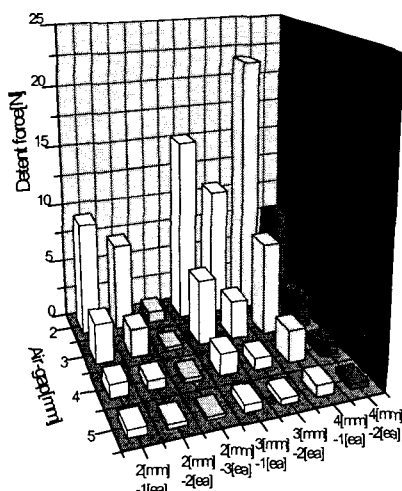


그림 10 여러 가지 형태의 notch 형상
Fig. 10 Several notch shape



(a) Thrust



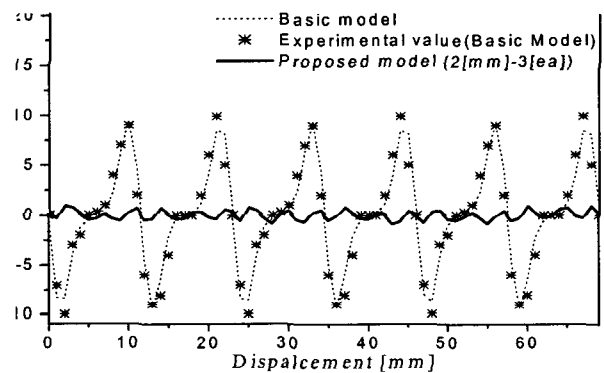
(b) Detent force

그림 11 Notch의 폭과 개수, 공극에 따른 발생 추력 및 디텐트력 특성
Fig. 11 Thrust and detent force according to width and number of notch

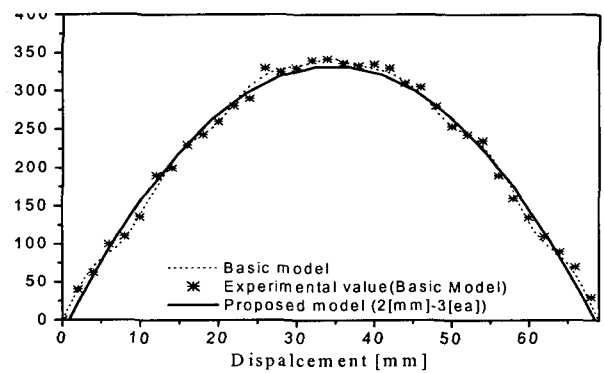
그림 11는 notch의 폭과 개수, 공극에 따른 발생 추력 및 디텐트력 특성을 보여준다. 그림 11에서 알 수 있듯이 notch의 폭과 개수는 공극이 클 경우에는 별다른 영향을 미치지 않으나 공극이 감소에 따라 그 특성이 판이하게 달라지게 된다. notch를 2[mm]의 크기로 3개를 적용한 경우 디텐트력은 거의 공극에 따라 변화가 없으며 발생 추력은 크게 향상되는 결과를 도출 할 수 있었다. Notch를 2[mm]의 크기로 3개를 적용하여 공극을 2[mm]로 한 경우에 대하여 유한요소 해석을 수행하였다.

그림 12는 디텐트력 및 발생 추력을 기본모델(notch를 적용하지 않은 모델)과 비교하여 나타내고 있다.

디텐트력은 기본 모델의 9.44[N]에 비하여 10배나 감소한 0.97[N]로 나타났으며, 이때의 발생 추력은 342.07[N]에서 337.48[N]로 1.3[%]감소하였다. 하지만, 발생 추력의 감소분보다 디텐트력이 크게 저감됨으로서 큰 성능향상이 이루어져 양호한 결과라고 사료된다. 또한, 제안된 모델의 추력의 왜형률은 기본 모델의 7.84[%]에서 0.93[%]로 크게 줄어 고조파의 영향이 대폭 줄어든 거의 정현파에 가까운 결과를 얻었다.



(a) Detent force



(b) Thrust

그림 12 해석 결과
Fig. 12 Analysis results

그림 13은 부하각 60도에서의 정상상태 운전특성을 비교한 그림이다. 초기 모델의 리플율은 5.728[%]로써 정상상태 운전시 추력리플이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 반면, notch

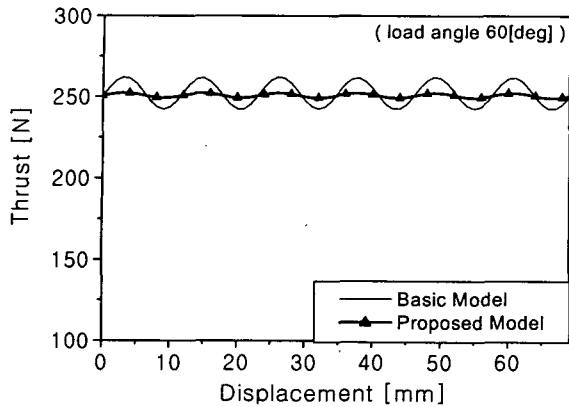


그림 13 정상상태 운전시 추력(부하각 60(deg))
 Fig. 13 Thrust in steady state operation(road angle 60(deg))

를 적용한 제안된 모델의 경우 리플율이 0.523[%]로 리플이 거의 없는 일정한 추력이 발생하고 있다. 따라서 노치를 적용함으로써 디텐트력이 크게 제거되어 정속 운전 시에도 추력 리플이 발생하지 않는 양호한 특성을 얻을 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 PMLSM을 대상으로 한 여러 가지 디텐트력 저감 기법들을 소개하여 그에 따른 양상의 변화를 보여주었다. 기존의 여러 가지 저감 기법의 단점인 발생 추력의 향상에 따른 디텐트력의 증가를 보완하기 위하여 notch를 적용하였으며 notch의 폭과 개수를 변화시키며 특성 해석을 수행하였다.

그 결과, 발생 추력의 증가에 따른 디텐트력 증가를 크게 저감시켰으며, 어느 일정한 notch의 개수와 폭을 적용하며 공극의 변화에 상관없이 크게 디텐트력을 저감할 수 있음을 확인하였다. 또한, 설계변수 변화에 따른 유한요소 해석의 모델링 시간을 절감 하기 위하여 모델 절점이동 기법을 사용하였으며, 전기기기의 형상변화에 따른 전처리, 후처리 등과 같은 과정을 일괄 처리하므로써 최적화 설계시의 계산시간을 크게 단축시킬 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 창원대학교 공작기계기술연구센터 및 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01 -03) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

[1] 山田, “리니어모우터 응용 핸드북”, 도서출판 世和, 1988.
 [2] I. S. Jung, S. B. Yoon, J. H. Shim, D. S. Hyun, “Analysis of Force in a Short Primary Type and a

Short Secondary Type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor”, Conference of IEMDC '97, Milwaukee, pp.MC1-8.1-MC1 -8.3, 1997.

[3] T. Yoshimura, H. J. Kim, Watada, S. Torii, D. Ebihara, “Analysis of the Reduction of Detent Force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor”, IEEE Trans. on Magn., Vol. 31, No.6, pp.3737-3739, 1995.
 [4] 윤강준, 이동엽, 김규탁 “Moving Magnet type PMLSM 추력리플 최소화를 위한 영구자석 형상 최적화”, 대한전기학회 논문지 Vol. 54-B, No.2, pp. 53 ~ 59, 2005. 2.
 [5] 임기채, 우준근, 홍정표, 김규탁, “영구자석 선형 동기 전동기의 디텐트력 저감법” 대한전기학회 논문지 Vol. 49-B, No.11, pp. 749 ~ 756, 2000. 11.

저 자 소 개



이 동 엽(李東燁)

1976년 3월 29일생. 2001년 창원대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정
 Tel : 055-279-7519
 E-mail : dongyeuplee@changwon.ac.kr



김 규 탁(金奎卓)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~2000년 일본 早稻田大 客員研究員. 현재 창원대학교 공대 전기공학과 교수.
 Tel : 055-279-7515, Fax : 055-263-9956
 E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr