

보조치를 이용한 가동 코일형 PMLSM의 단부효과에 의한 Detent Force 저감에 관한 연구

論 文

55B-9-4

A Study on the Reduction of Detent Force caused by End-Effect for Moving Coil Type PMLSM Using Auxiliary-teeth

鄭壽權* · 周建配* · 李東燁** · 金奎卓†

(Su-Kwon Jeong · Jianpei Zhou · Dong-Yeup Lee · Gyu-Tak Kim)

Abstract - The detent force by end-effect has an undesired influence on moving coil type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PMLSM). So, the reduction of detent force by end-effect is especially required for the improvement of thrust characteristics. In this paper, in order to reduce detent force by end-effect, the auxiliary-teeth is installed at the end part of mover. It is also analyzed by Finite Element Analysis(FEA) and optimized by using neural network. By comparison, the detent force is reduced about 41.4[%] comparing to that of basic model.

Key Words : Moving Coil Type PMLSM, Auxiliary Teeth, Detent Force, End Effect, Moving Model Node Technique, Neural Network

1. 서 론

최근, PMLSM은 종래의 회전기를 이용하여 직선운동으로 변환하는 시스템보다 높은 효율성과 정밀 제어성 및 높은 에너지 밀도 등의 특성으로 인하여 전기 철도, 반송 시스템, 반도체 제조장비 등과 같은 FA분야는 물론 사무 자동화에 이르기까지 널리 이용되고 있다[1].

그러나, PMLSM은 구조적인 특성으로 인하여 필연적으로 디텐트력이 발생하게 되는데, 이러한 디텐트력은 전동기의 추력 맥동으로 작용하여 제어 성능을 저하시키는 물론 기기의 소음과 진동을 발생시키는 등의 많은 악영향을 끼친다. 따라서 기기의 제반 특성을 향상시키기 위한 디텐트력 감소는 필수적이고 이를 위한 많은 연구가 수행되었다[1-2].

PMLSM의 디텐트력은 영구자석과 전기자의 슬롯-치 구조에 의해 발생하는 디텐트력과 단부효과에 의해 발생하는 디텐트력으로 크게 나눌 수 있으며 이 단부효과에 의한 디텐트력은 기기의 용량이 작을수록 두드러지게 나타난다. 슬롯-치 구조에 의한 디텐트력은 영구자석이나 슬롯에 스류를 주는 방법이나 반폐 슬롯을 사용하는 방법 등으로 제거시킬 수 있다[2]. 그러나, 단부효과에 의한 디텐트력은 가동 영구자석형 PMLSM의 경우 가동자의 단부에 보조극을 설치하여 감소시킬 수 있지만, 가동 코일형 PMLSM의 경우에는 단부효과에 의한

디텐트력이 가동 영구자석형 PMLSM보다 더 크게 발생함에도 불구하고 이를 감소시키기 위한 연구가 아직까지 미비한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 단부효과에 의한 디텐트력을 감소시키기 위하여 가동자의 단부에 보조치를 설치하였으며, 설치되는 보조치의 최적 설계를 위하여 신경회로망을 적용하였다. 신경회로망 학습을 위한 데이터는 2차원 유한요소해석을 통해 구하였으며 설계변수의 변화에 따른 형상 변화를 보다 효과적으로 대처하기 위해 모델 절점이동기법 (moving model node technique)을 이용하여 리모델링 시간을 단축하였다[3-4]. 그리고 신경회로망을 이용한 최적치를 유한요소 해석치 및 실험치와 비교함으로써 본 연구의 타당성을 입증하였다.

2. 해석 모델

2.1 PMLSM의 구조에 따른 특성

PMLSM은 고정자와 가동자의 구조에 따라 가동 코일형 (moving coil type)과 가동 영구자석형(moving magnet type)으로 나누어지며 그림 1과 2에 가동자 구조에 따른 PMLSM의 구조와 FEM을 이용한 자속 분포 해석 결과를 나타내었다. 본 논문에서는 단부효과가 PMLSM에 미치는 영향을 평가하기 위하여 먼저 가동자의 구조에 따른 PMLSM의 자속 분포특성을 검토하였다.

일반적으로 PMLSM의 해석은 계산 시간이나 해석상의 편의를 위해 주기 모델로 해석하는 경우가 대부분이나 본 논문에서는 PMLSM의 가동자의 단부와 고정자 사이에서 발생하는 단부효과를 규명하기 위하여 해석 영역 전체를 모델링하였다.

† 교신저자, 正會員 : 昌原大學校 工大 電氣工學科 教授 · 工博

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

* 學生會員 : 昌原大學校 工大 電氣工學科 碩士課程

** 正會員 : 昌原大學校 工大 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 2006年 6月 24日

最終完了 : 2006年 8月 11日

그림 1과 2에서 알 수 있듯이 PMLSM의 구조에 따라 자속분포는 크게 차이가 난다. 그림 1의 가동 영구자석형에서는 가동자가 영구자석으로 구성되어 있어 점선으로 표시된 가동자의 단부에서 누설자속이 거의 발생하지 않는다.

그러나 그림 2의 가동 코일형에서는 가동자는 코일로 구성되고 고정자가 영구자석이므로 가동자의 단부와 영구자석 사이에 누설자속이 크게 발생하게 된다. 이러한 누설 자속은 단부효과에 의한 디텐트력의 가장 큰 원인이 되며, 이로 인해 소음과 진동이 발생할 뿐만 아니라 기기의 모든 제반 특성이 저하된다.

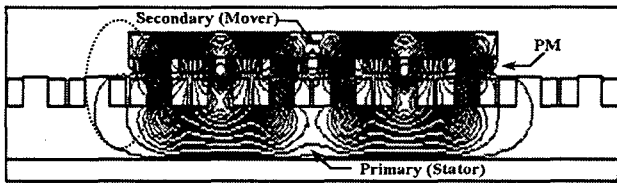


그림 1 가동 영구자석형 PMLSM의 구조와 자속 분포
Fig. 1 The structure and flux distribution in moving magnet type PMLSM

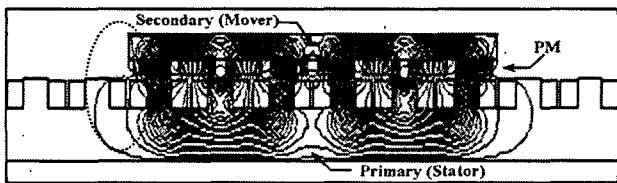


그림 2 가동 코일형 PMLSM의 구조와 자속 분포
Fig. 2 The structure and flux distribution in moving coil type PMLSM

2.2 해석 모델의 선정

본 논문에서는 가동 코일형 PMLSM을 해석 모델로 선정하였다. 표 1에 본 논문의 해석 모델인 가동 코일형 PMLSM의 기본 설계치수와 전기적 사양을 나타내었으며, 시작기는 그림 3에 나타내었다.

표 1 시작기의 사양

Table 1 The specification of prototype machine

	항목	기호	값(단위)
고정자 (영구자석)	극 수		8
	잔류자속밀도	B_r	1.33 (T)
	영구자석 높이	h_{pm}	5.0 (mm)
	영구자석 길이	l_{pm}	49.0 (mm)
	영구자석 폭	w_{pm}	18.0 (mm)
가동자 (1차 측)	극 간격	τ	22.5 (mm)
	코일당 턴수		366
	코일 높이	h_c	24.1 (mm)
	코일 폭	w_c	8.2 (mm)
	슬롯 간격	τ_s	30.0 (mm)
	정격 전류	I	3.2 (A)
	공극 길이	l_g	1.0 (mm)

슬롯-치 구조에 의한 디텐트력의 저감 기법으로는 영구자석의 자극 폭 조절 법, 자극 배치 조정법, 반 폐 슬롯 구조, 영구자석 및 전기자 슬롯의 스큐 시행 등과 같은 방법들이 보고되었다[1-3].

따라서, 본 논문에서는 슬롯-치 구조에 의한 디텐트력을 최소화하기 위해 영구자석에 스큐를 적용하는 방법을 이용하였다. 그림 4에 고정자의 영구자석에 극간격의 1/3만큼 스큐를 시행한 시작기의 고정자 부분을 나타내었다. 그리고 스큐에 따른 디텐트력 특성은 그림 5에 나타내었다. 영구자석에 스큐를 시행한 모델에서는 디텐트력이 대폭 감소하였다.

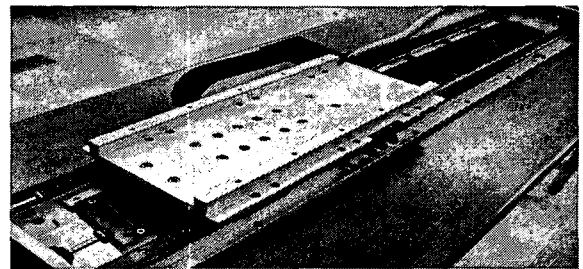


그림 3 가동 코일형 PMLSM의 시작기
Fig. 3 The prototype machine of moving coil type PMLSM

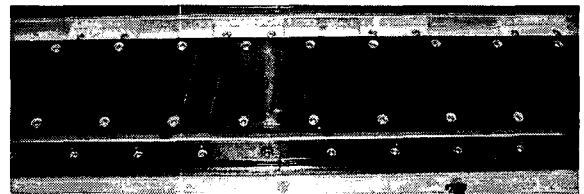


그림 4 영구자석의 skew 적용
Fig. 4 The application of skew at permanent magnet

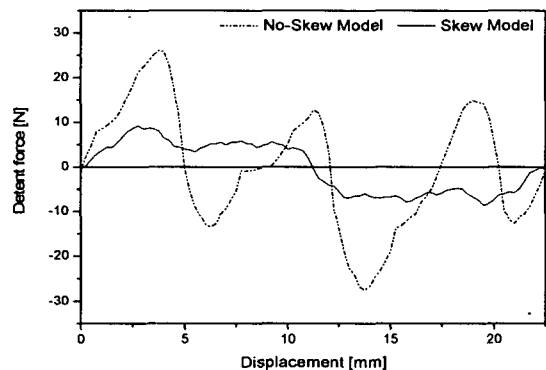


그림 5 디텐트력
Fig. 5 Detent force

그러나, 여전히 디텐트력은 피크값이 약 9[N]정도 존재하고 있다. 이것은 단지 영구자석에 스큐를 적용하는 것만으로는 단부 효과에 의한 디텐트력을 최소화 시킬 수 없다는 것을 입증한다. 그러나 가동 코일형 PMLSM의 경우 이러한 단부효과에 의한 디텐트력을 감소시키기 위한 연구가 아직까지 미비한 수준이다.

따라서, 본 논문에서는 기기의 제반 특성에 악영향을 미치는 단부효과에 의한 디텐트력을 저하시키고 가동자의 코일도 보호할 수 있도록 가동자의 단부에 보조치를 설치하는 새로운 방안을 제안하였으며 보조치의 최적 설계를 수행하였다.

3. 신경회로망에 의한 보조치의 최적 설계

최적 설계는 주어진 설계변수의 개수와 변화에 따라 목적함수와 제약함수 값들을 구하는 과정이 많이 필요하다. 따라서 만일 유한요소법을 이용하여 목적함수와 제약함수를 계산하게 되면 최적 설계변수의 선정에 상당한 시간이 소요된다. 그러나 학습된 신경회로망에 의하여 최적화 과정에서 변화하게 되는 설계변수들에 대한 목적함수와 제약함수 값들을 추정하여 구하면 유한요소법에 비하여 계산 시간을 많이 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 새로운 설계 변수에 의해 결정되는 해석 영역에 대하여 리모델링과 요소 분할을 할 필요가 없는 장점이 있다.

본 논문에서는 이러한 많은 장점을 가지는 신경회로망을 이용하여 설치되는 보조치의 최적 설계를 수행 하였다. 신경회로망을 학습시키기 위한 데이터는 유한요소해석을 통해 구하였고, 그 과정은 그림 6에 나타내었다.

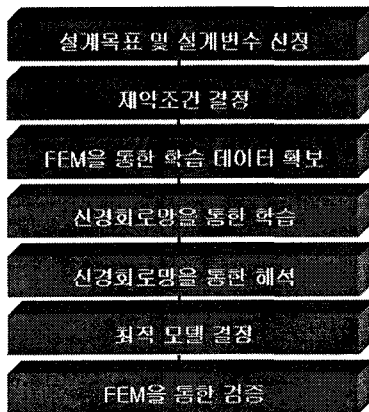


그림 6 신경회로망의 흐름도
Fig. 6 The flow chart of neural network

3.1 설계변수와 목적함수의 선정

가동 코일형 PMLSM의 추력은 전자기력과 가동자의 슬롯과 고정자의 영구자석 사이에 작용하는 디텐트력 뿐만 아니라 가동자 철심 단부와 고정자의 영구자석 사이에 작용하는 힘(단부효과에 의한 디텐트력)으로 나타난다. 영구자석의 자속에 의해 철심단부에 작용하는 단부효과에 의한 디텐트력은 정속 운전 시에는 슬롯과 영구자석에 의한 디텐트력 보다 상대적으로 큰 추력 맥동으로 작용함으로 PMLSM의 위치 정밀도와 속도 제어에 큰 영향을 준다. 따라서, 운전특성에 악영향을 미치는 단부 효과에 의한 디텐트력을 최소화하기 위해 기본모델의 여러 가지 설계 치수들을 고려하여 보조치의 설계 변수를 선정하였다. 선정된 설계 변수는 주치와 보조치 사이의 이격 거리(d),

보조치의 높이(h), 보조치의 폭(w)의 세 가지이며, 그림 7에 도식적으로 나타내었다.

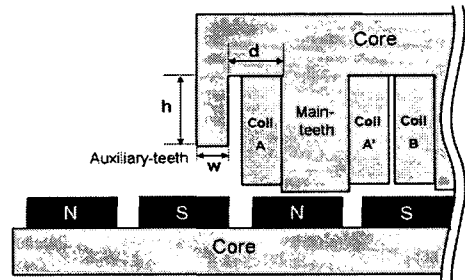


그림 7 보조치의 설계변수
Fig. 7 The design parameters of auxiliary-teeth

표 2는 목적함수에 대한 설계변수의 변화 범위와 제약조건을 나타낸 것이다. 설계변수의 범위는 기본모델 주치의 폭과 높이, 슬롯폭등 여러 가지 변수들을 고려하여 최소의 디텐트력을 가지는 보조치를 설계하기 위해 선정하였으며, 제약 조건은 기본모델 이상의 추력, 즉 400[N] 이상으로 설정하였고, 디텐트력은 발생추력의 1.5[%] 미만으로 설정하였다.

표 2 설계변수와 제약조건

Table 2 The design parameters and constraints

설계 변수	설계 변수 변화 범위
이격 거리 (d)	9[mm] ≤ d ≤ 13[mm]
보조치 높이 (h)	18[mm] ≤ h ≤ 25[mm]
보조치 폭 (w)	1[mm] ≤ w ≤ 6[mm]
제약 조건	추력 ≥ 400[N]
	디텐트력 ≤ 6[N]

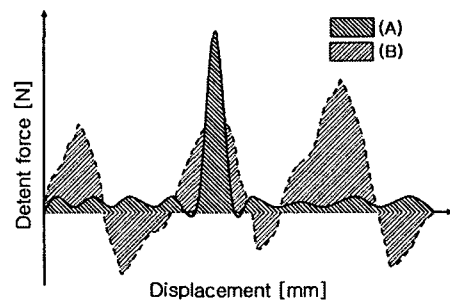


그림 8 목적함수의 선정
Fig. 8 The selection of objective function

그림 8은 신경회로망의 목적함수를 선정하기 위하여 두 가지 형태의 디텐트력 예를 나타낸 것이다. 그림 8에서 (A)의 경우는 특정한 일부분에서 디텐트력의 피크치가 크게 발생하는 형태이며, (B)의 경우는 피크치는 (A)의 경우 보다 작지만 디텐트력이 (+), (-) 값으로 급변하는 경우이다. (B)형태의 디텐트력이 피크치는 작으나 정, 역방향으로 디텐트력이 발생하여 추력 리플이 크게 되어 정밀제어에 악영향은 미치지 않은 물론 진동, 소음도 크게 발생시키게 된다.

따라서, 디텐트력을 근본적으로 최소화하기 위해서는 디텐트력의 피크치는 물론 디텐트력의 적분 값의 절대치도 최소화시켜야 되므로 본 연구에서는 목적함수로 디텐트력의 피크치와 적분값의 절대치를 선정하였다.

3.2 모델 절점 이동기법

유한요소법은 복잡한 형상과 재질의 비선형성을 고려할 수 있고 해석 결과도 신뢰성이 높은 장점이 있다. 그러나 기기의 성능 개선을 위한 형상 및 치수변화와 관련된 설계변수의 변화에 따른 특성해석을 수행하는 경우 각각의 설계변수 변화에 따른 해석 모델의 모델링, 재질정수 입력 및 요소분할 등의 전처리 작업이 요구되기 때문에 특성해석에 많은 시간과 노력이 필요하다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 초기 모델링 데이터(절점, 선, 영역 등)를 이동시킨 후 요소분할을 통하여 각각의 설계변수 변화에 따른 전처리 데이터를 생성하도록 하였으며, 이는 치수의 변화가 빈번한 최적화 과정에 매우 효과적이다.

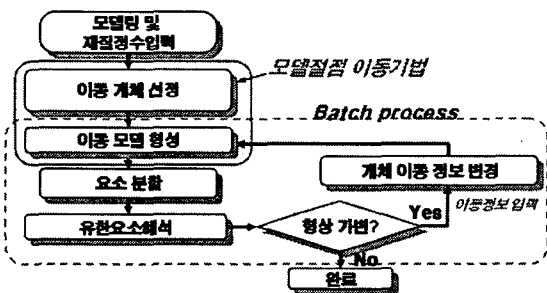


그림 9 모델 절점 이동 기법의 적용과정
Fig. 9 The process of moving model node technique

그림 9는 모델절점이동기법의 적용 과정을 나타낸 것이다. 먼저 치수를 가변하고자 하는 해석 모델의 모델링 및 재질정수 입력이 선행되어야 한다. 그리고 해석 모델에서 이동 하고자 하는 개체(절점, 선, 이동라인 등)에 대한 정보를 스크립트 형태로 작성한다.

이동개체의 생성 시 개체 이동 후 초기 요소분할에 쓰이는 절점 간격의 변화를 방지하기 위하여 고정 절점 간격을 유지 하도록 한다. 이동모델은 개체의 이동정보를 사용하여 초기 모델링 데이터를 형성한 후 미리 입력된 재질정수를 이용하여 자동으로 생성된다. 모델 절점 이동 기법에 의한 생성모델은 요소 분할 후 특성해석에 이용될 수 있으며 개체이동 정보를 변경함으로써 새로운 치수나 형상을 가진 해석모델의 반복적인 생성이 가능하다. 따라서 개체이동 정보의 입력, 요소분할과 특성 해석을 일괄 처리(batch process) 하도록 하여 모델링과 전처리의 번거로움을 줄이고 해석시간을 단축시킬 수 있다.

본 논문에서는 모델절점이동기법을 사용하여 보조치의 형상 변화에 대한 특성해석을 수행하였다. 이러한 방법을 적용함으로써 보조치의 형상 변화에 따른 모델링 및 재질정수 입력의 반복 작업을 피하면서 빠른 해석이 가능할 뿐만 아니라 전·후처리 과정을 일괄 처리하여 해석의 효율을 크게 증가 시킬 수 있다. 그러나 해석모델 생성

후의 요소 분할을 필요로 하며 복잡한 형상에 대한 치수 변경 시 이동개체의 선정에 주의해야 한다.

3.3 신경회로망에 의한 최적 모델 선정

최적 설계를 위한 신경회로망의 학습 데이터는 2D FEM을 이용하여 구하였고, 그림 10에 본 논문에 적용된 신경회로망을 도식적으로 나타내었다. 신경회로망의 구성은 그림 10과 같이 은닉층을 3층, 각 은닉층의 뉴런 수는 60개로 한 MLP(multi-layer perceptron)형 신경회로망을 사용하였다. 즉, 신경회로망은 5층 3-60-60-60-2 으로 구성하였으며 오차역전파 학습법(feed-forward error back-propagation algorithm)에 의하여 반복학습을 하였다.

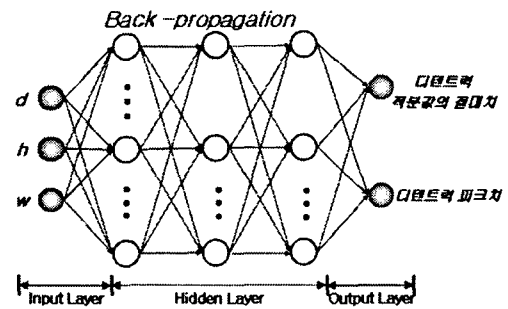


그림 10 신경회로망의 기본 구조
Fig. 10 The construction of neural network

표 3 신경회로망의 출력 예
Table 3 The some output of neural network

No.	입력			출력	
	d	w	h	피크치	적분
1	11	4.9	21.94	5.8021	24.709
2	11	4.91	21.95	5.8087	24.748
3	11	4.9	21.95	5.8025	24.537
4	11	4.91	21.94	5.8169	24.935
5	11	4.89	21.94	5.8326	24.588

여기서, 입력은 3개의 설계변수이고 출력은 앞서 선정된 목적함수인 디텐트력의 피크치와 적분치 절대값이다.

2D FEM을 통한 학습 데이터를 사용하여 평균 학습 오차가 1[%] 이내로 수렴할 때까지 학습된 신경회로망에 임의의 설계변수를 입력하여 구한 출력을 피크치와 적분의 절대치의 순서로 표 3에 나타내었다.

신경회로망을 적용한 결과로 부터 최소의 디텐트력을 가지는 보조치의 설계변수는 실제 제작 오차를 고려하여 이격거리 (d)가 11.0[mm], 보조치의 높이 (h)가 22.0[mm], 보조치의 폭(w)이 4.9[mm]로 선정하였다.

4. FEM을 통한 특성 해석

신경회로망을 통한 최적화 수행결과 선정된 보조치의 최적모델을 2D FEM 을 적용하여 특성해석을 수행하였다.

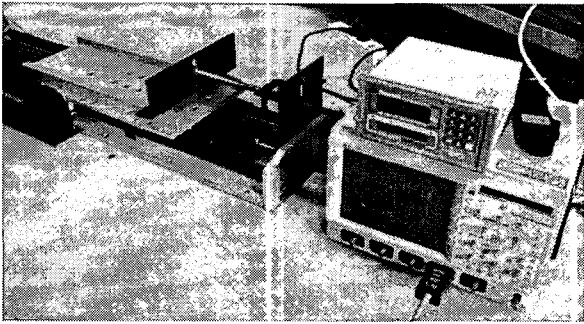


그림 11 디텐트력 및 추력특성 시험
 Fig. 11 The experiment of detent force and thrust

최적모델의 왜형률이 2.55[%]로 기본모델의 4.11[%]보다 크게 감소하였으며 이는 단부효과에 의한 디텐트력의 영향이 감소하였기 때문이다.

그림 14는 기본모델과 최적모델의 디텐트력 특성을 비교한 것이다. 기본 모델의 디텐트력 피크값이 9.18[N]에서 최적화를 수행한 결과 5.38[N]으로 감소하였다. 이는 최적화된 보조치로 인하여 단부효과가 감소하였기 때문이다. 또한 기본 모델에 대한 시험치도 로드셀(model. UU-K010, cap. 10kgf, DACELL Co. Ltd.)을 이용하여 수행하였으며 피크치는 9.1[N]으로 오차가 거의 발생하지 않았으며 그 양상 또한 대동소이하었다. 실험치와 이론치의 오차는 실험 오차이다.

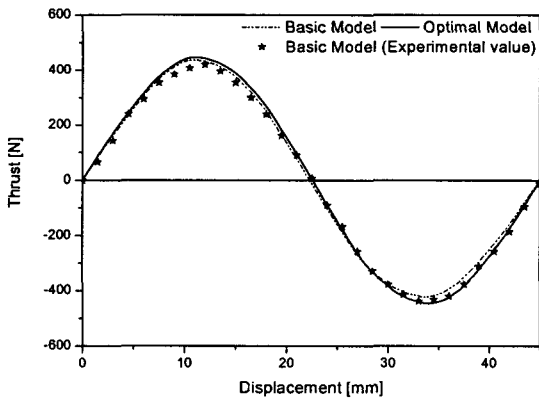


그림 12 정추력 특성
 Fig. 12 The characteristics of static thrust

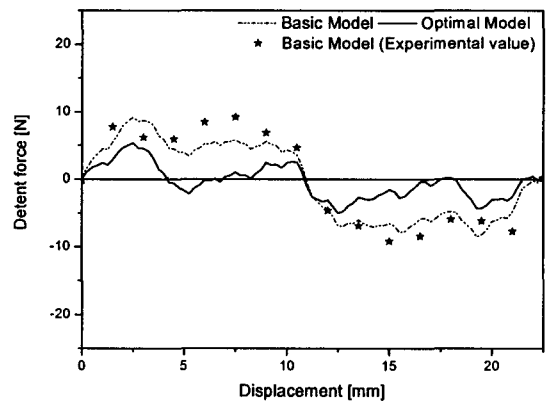


그림 14 디텐트력 특성
 Fig. 14 The characteristic of detent force

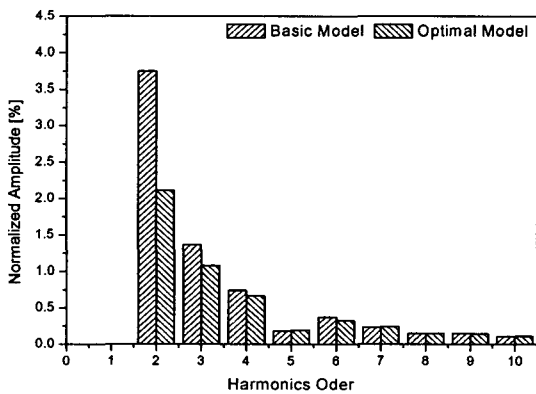


그림 13 추력의 고조파 분석
 Fig. 13 The harmonics components of thrust

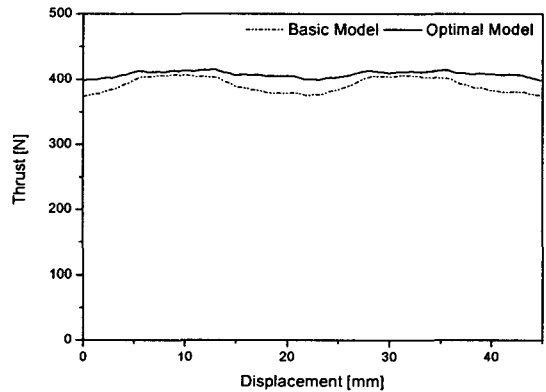


그림 15 정상상태 운전특성
 Fig. 15 The thrust of steady state operating

그림 12는 기본모델(skew만 적용)과 디텐트력 감소를 위해 보조치를 설치한 최적모델의 추력 특성 해석결과와 실험치를 비교한 것이다. 최적 모델의 경우 추력의 피크값이 446.3[N]으로 기본모델의 피크값 436.3[N]보다 10[N] 정도 증가하였고, 로드셀 (model. SBR -200L, cap. 200kgf, CAS Co. Ltd.)을 이용하여 측정한 실제 실험치도 438.0[N]으로 오차가 거의 발생 하지 않았다. 또한, 그림 13에서 보는 바와 같이 추력의 고조파 분석결과

그림 15는 부하 각 90°에서 정상상태 운전 특성을 비교한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯이 기본모델의 경우 리플율이 8.55[%]로 정상상태 운전 시에 추력 리플이 크게 나타나고 있다. 반면에 최적 모델의 경우 리플율이 4.27[%]로 거의 리플이 없는 운전특성을 나타내고 있다. 영구자석의 스쿠 시행과 보조치의 설치로 디텐트력이 크게 제거되어 정속 운전 시에는 리플이 거의 발생하지 않는 운전특성을 도출하였다.

5. 결 론

본 논문에서는 가동 코일형 PMLSM의 운전 특성을 향상시키기 위해 추력의 리플로 작용하는 단부효과에 의한 디텐트력의 새로운 저감법을 제시하였다.

먼저 치-슬롯 구조에 의한 디텐트력은 고정자의 영구자석에 skew를 적용함으로써 최소화 하였고, 가동자의 단부와 영구자석 사이에서 작용하는 단부 효과에 의한 디텐트력은 보조치를 설치하는 새로운 방법으로 효과적으로 저감하였다.

또한 설치되는 보조치의 최적 설계를 위해 신경회로망을 도입하였다. 본 논문에서 적용한 신경회로망을 이용한 최적 설계는 설계변수에 대한 목적함수 및 원하는 출력 값들을 정확히 추정하였으며, 본 논문에서 제시한 방법에 의한 추정 값과 유한요소해석을 통해 구한 값을 비교해 본 결과 오차는 매우 적었다. 그리고 최적모델과 기본모델의 특성을 2D-FEM을 통하여 해석하고 비교함으로써 본 논문에서 제안한 방법의 우수성을 입증하였다. 비교 결과 보조치 최적화 모델의 경우 디텐트력이 영구자석에 단순히 스쿰만 적용한 기본 모델에 비하여 41.5[%]정도 감소한 것으로 나타났다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법을 PMLSM의 최적설계 방법으로 적용한다면 보다 효과적인 설계를 할 수 있을 것으로 사료된다.

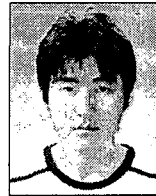
감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 임기채, "수치해석법을 이용한 영구자석 선형 동기전동기의 특성해석 및 제어기 구현, 창원대학교 박사학위 논문 2000. 12.
- [2] Ki-Chae Lim, Joon-Keun Woo, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, "Detent Force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 38, No. 2, pp. 1157-160, 2002.
- [3] Duk-Hyun Kim, Jung-Pyo Hong and Gyu-Tak Kim, "Dynamic Characteristic of Moving Coil-Type LOA for Load Conditions Using FEA Batch Process", *IEEE*, Vol. 39, NO. 3, MAY 2003. pp. 1480-1483.
- [4] 조성호, 김덕현, 김규탁, "신경회로망과 FEM을 이용한 가동 영구자석형 리니어 액츄에이터의 성능 향상에 관한 연구", *전기학회 논문지* vol. 53B, No. 2, pp.63~68, 2004. 2.

저 자 소 개



정수권 (鄭壽權)

1981년 9월 14일생. 2006년 창원대학교 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 055-279-7642

Fax : 055-263-9956

E-mail : sukwony@changwon.ac.kr



주건배 (周建配)

1979년 12월 4일생. 2002년 중국 심양 동북대학교 졸업. 2005년 창원대학교 전기공학과 대학원 입학. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : 055-279-7642

Fax : 055-263-9956

E-mail : zhoujp321@hotmail.com



이동엽 (李東燁)

1976년 3월 29일생. 2001년 창원대학교 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~ 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 055-279-7642

Fax : 055-263-9956

E-mail : dongyeuplee@changwon.ac.kr



김규탁 (金奎卓)

1961년 11월 12일생. 1982년 한양대학교 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996~2000년 일본 早稲田大 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