

## 영구자석형 선형동기전동기의 단부효과에 의한 문제점 연구

(A Study on the Problem of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor According to End Effect)

김덕현\*

(Duk-Hyun Kim)

### Abstract

A discontinuity of magnetic circuits according to the end effect is generated in PMLSM. And magnetic state of the 3 phase coils becomes unbalanced. Due to the unbalanced magnetic state, the unbalanced flux linkage, back electro-magnetic force and inductance of the 3 phase coils appear. In result, the circulating current is generated by unbalanced inductance even if the input voltages are in balanced state. Then the thrust and efficiency are decreased because of the circulating current. Therefore, in this paper, the unbalanced inductance and the thrust reduction according to discontinuity of magnetic circuits are analyzed by FEA(2D). To demonstrate the validity of the analysis results, the experiment results are compared with analysis results.

Key Words : PMLSM, End Effect, Discontinuity of Magnetic Circuit, FEA

### 1. 서 론

현대의 직선 추력(thrust)이 요구되는 산업 기기 및 자동화 장비는 대부분 회전형 전동기와 동력변환장치를 이용하여 직선 추력을 얻는 방식을 채택하고 있다. 그러나 이러한 동력전달 메커니즘은 구조의 복잡성은 물론 기계적인 소음, 마찰, 진동, 손실 등으로 인해 정밀 위치제어 및 시스템 효율이 저하되는 단점을 가진다.

한편 선형 전동기는 회전형 전동기에 비해 전동기 자체의 효율이 낮은 단점을 가지지만, 직접 직선 추력(thrust)을 발생시키므로 동력변환 시스템에서 발생하는 문제점을 근본적으로 제거할 수 있어 리니어 시스템의 전체적인 효율 및 성능 향상을 기대할 수 있다. 그 중 특히 영구자석형 선형동기전동기(PMLSM : Permanent Magnet Linear Synchronous Motor)는 효율 및 추력 밀도(추력/중량비)가 높고 제어성능이 우수한 장점이 있어 FA, OA 기기에 널리 사용되고 있다 [1-2].

PMLSM의 경우 회전기와 달리 단부가 존재하므로 자기회로가 불연속이 되어 각 상의 자기저항의 차이가 발생하여 각 상 전기자 권선과 쇄교하는 자속 및 상 인덕턴스가 불평형이 된다. 쇄교자속의 불평형은

\* 주저자 : 건동대학교 신재생에너지공학과 교수  
Tel : 054-820-8133, Fax : 054-820-8131  
E-mail : anna93@hanmir.com  
접수일자 : 2009년 10월 27일  
1차심사 : 2009년 10월 29일  
2차심사 : 2010년 10월 7일  
심사완료 : 2010년 10월 19일

역기전력의 불평형을 발생시키고, 자기저항 차이에 따른 인덕턴스의 불평형은 3상 전류를 불평형으로 만들어 가동자 권선 내부에 순환전류를 흐르게 한다. 이와 같은 이유로 PMLSM의 경우, 내부 순환전류에 의한 추력 감소로 인하여 기기의 출력특성이 저하된다.

본 논문에서는 유한요소해석 및 실험을 통하여 단부 효과에 의한 상 불평형에 따른 각 파라미터의 변화 및 출력특성의 변화를 고찰하였고, Matlab을 이용하여 동특성 해석을 수행하였다.

## 2. 적용모델 사양

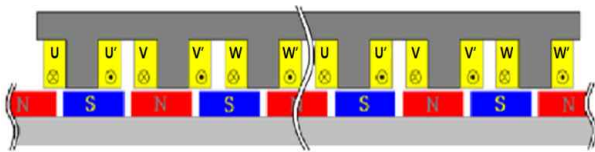


그림 1. PMLSM 구조  
Fig. 1. Structure of PMLSM

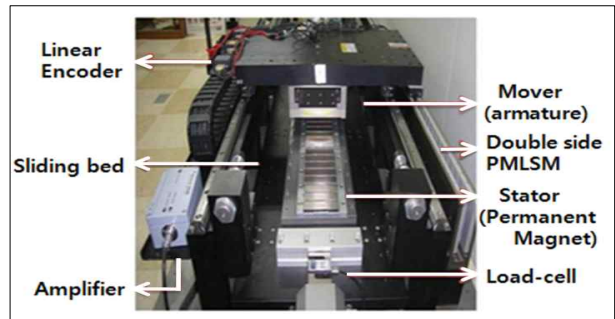
표 1. 해석모델의 사양  
Table 1. Specification of analysis model

	Item	Value
고정자 (Secondary)	영구자석 폭	26.5[mm]
	영구자석 길이	101[mm]
	영구자석 두께	30[mm]
	극 간격	30[mm]
	스큐(skew) 길이	10[mm]
	잔류자속밀도	1.37[T]
가동자 (Primary)	치 폭	14[mm]
	치 높이	17[mm]
	치 길이	95[mm]
	슬롯 간격	40[mm]
코일 당 턴 수		304[턴]
기계적 공극		1.4[mm]
정격 전류		6.53[A]
상결선방식		Y결선

본 논문에서 적용한 모델은 가동코일형태의 PMLSM이다. PMLSM의 경우, 전기자의 치-슬롯 구조에 의하여 필연적으로 디텐트력(detent force)이 발생하지만, 추력(thrust)밀도가 상대적으로 높다. 그

림 1에 가동 코일형태의 철심형 PMLSM의 기본 구조를 나타내었다. 그림 1에서 보는 바와 같이 전기자 권선의 U상과 W상이 가동자의 단부에 위치한다. 또한 본 논문에서는 단부효과에 의하여 나타나는 각 상 임피던스의 불평형으로 인한 추력 감소 현상만을 고찰하기 위하여 전기자의 치-슬롯 구조에 의해 발생하는 디텐트력을 최소화 시켰다. 즉 영구자석에 10[mm]의 skew를 시행하였으며, skew시행에 의한 추력의 감소분을 보상하기 위해 영구자석에 4[mm]의 오버행을 실시하였다. 표 1에 해석모델의 기본 사양을 나타내었다.

## 3. 실험방법



(a) 동특성 실험장비



(b) 가변저항

그림 2. 실험장비 및 가변저항  
Fig. 2. Experimental equipment and variable resistance

그림 2 (a)는 PMLSM의 특성실험 장비의 각 부분을 나타내고 있다. PMLSM의 고정자, 즉 영구자석은 슬라이딩베드 위에 고정되어 있다. 슬라이딩 베드는

Linear Motion 가이드 위에 장착되어 있어 마찰력을 최소화시킴은 물론 이동이 가능하도록 하였다. 그림 2 (a)와 같이 로드 셀(model : SBA -200L CAS)로 슬라이딩 베드를 고정시킴으로써 PMLSM의 가동자가 이동할 때 작용-반작용에 의하여 PMLSM의 고정자에 가해지는 추력을 측정할 수 있도록 하였다. 또한 로드 셀에 실시간 증폭기를 연결하여 로드 셀에서 측정된 추력을 오실로스코프를 통하여 실측할 수 있도록 하였다. 그리고 가변부하를 인가하거나 역기전력을 측정하기 위해 양측식 리니어 모터가 우측에 장착되어 있다. 위치 및 속도 측정을 위해서 리니어 스케일 1.0 [mm]를 장착하였다. 그림 2 (b)는 전류 및 추력 실험 시 3상 입력전압을 평형으로 조절하기 위한 가변저항을 각 상에 직렬로 설치하였다.

### 3.1 역기전력

역기전력의 측정은 다음과 같은 방법을 사용하였다. 실험장비의 우측에 있는 양측식 PMLSM을 1[m/s]의 속도로 구동시켜 해석모델인 PMLSM를 이동시켰으며, 발생하는 각 상의 유기전력을 측정하였다. PMLSM의 중성점이 외부로 나와 있지 않기 때문에 PMLSM의 가동자 저항보다 100배 이상 아주 큰 저항으로 외부에 Y결선을 만들어 PMLSM의 가동자의 각 상과 연결하였다. 전압분배법칙에 의하여 발생한 역기전력은 큰 저항에 인가되므로 외부 큰 저항 회로의 중성점과 각 상의 전압을 오실로스코프를 이용하여 측정하였다.

### 3.2 불평형전류

단부효과에 의한 3상 불평형 전류의 실측은 다음과 같은 방법을 이용하였다. 먼저 3상 슬라이더를 이용해 3상 가변전압을 PMLSM에 인가하였다. 이 때 슬라이더 내부 임피던스 차이로 인해 각 상에 인가되는 전압은 완전한 평형 상태를 이루지 못한다. 따라서 3상 입력전압이 평형을 이루기 위하여 그림 2 (b)와 같이 가변저항을 각 상에 연결하여 PMLSM에 인가되는 전압이 평형이 되게 각 상의 가변저항을 조절하였

다. 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 가동자 코일군 중 가운데에 위치한 V상에 정격전류 6.53[A]가 흐르도록 V상 가변저항값을 조정하고, 이때의 상전압을 실측하였다. 그런 다음 U, W상의 가변저항을 조절하여 V상의 전압과 동일한 값으로 전압을 설정하였다. 이와 같이 3상평형 전압을 인가한 후 각 상에 흐르는 전류를 측정하였다.

### 3.3 추력

본 논문에서는 단부효과에 의한 상 불평형에 따른 추력의 변화를 확인하기 위하여 평형전류가 흐르는 상태의 추력과 불평형 전류가 흐르는 상태의 추력을 각각 실험하였다. 먼저 가동자의 3상 코일에 평형의 전류가 흐르는 경우의 추력을 측정하기 위하여 한 상을 (+)단자에, 나머지 두 상을 (-)단자에 연결하고 직류전류를 인가하여 이 때 발생하는 추력을 측정하였다. 직류전압을 인가할 경우 인덕턴스에 의한 영향이 없으므로 3상 평형상태의 전류를 확보할 수 있고, 평형상태의 추력을 측정할 수 있다. 부하각 변화에 따른 추력 측정은 리니어 스케일을 이용하여 가동자를 1[mm]씩 이동시키면서 로드 셀에 작용하는 힘을 측정하였다.

한편 불평형 전류가 흐르는 경우의 추력 실험은 위에서 설명한 바와 같이 슬라이더스와 가변저항을 이용하여 3상 평형전압을 각 상 코일에 인가하였다. 전기자 권선에 직류를 공급할 경우에는, 직접 가동자를 이동시키면서 부하각에 따른 발생 추력을 측정하였으나, 전기자에 교류전원을 인가할 경우에는 전기자인 가동자를 고정시킨 상태에서 실험을 수행하였다.

추력측정은 가동자에 흐르는 교류전류에 의해 이동자계가 발생하므로 고정된 계자의 경우, 영구자석간에는 부하각이 지속적으로 변화하게 되며, 발생 추력도 정현적인 변화를 하게 된다. 따라서 로드 셀에 작용하는 힘 측, 로드 셀의 출력전압을 실시간 증폭기를 이용 증폭시킨 후 오실로스코프를 이용하여 실측하였다.

3상 평형교류전압을 인가할 경우 가동자 각 상 인덕턴스의 차이로 인하여 내부순환전류가 흐르게 되어 3상전류의 불평형이 생기게 된다. 이때의 추력은 불평

형 전류가 흐르는 상태의 추력으로 평형상태의 추력과 비교함으로써 내부순환전류에 의한 추력의 감소를 확인할 수 있었다.

### 4. 결과검토 및 분석

#### 4.1 쇄교자속

그림 3은 2차원 FEA(Finite Element Analysis)를 이용하여 각상에 쇄교하는 자속을 계산한 것이다. 전기자 권선과 쇄교하는 자속은 각각 0.35723, 0.35831, 0.35629[Wb]로 나타났으며 그 차의 최대치는 0.00108 [Wb]이다. 그림 1에서 가동자의 좌측에 위치한 U상과 가동자의 우측에 위치한 W상이 공기와 직접 맞닿기 때문에 자기회로의 불연속이 발생한다. 이와 같은 자기회로의 불연속으로 인하여 각 상의 자기저항이 평형을 이루지 않기 때문에 각 상에 쇄교하는 자속 또한 평형을 이루지 않게 되는 것을 확인할 수 있다. 쇄교 자속이 불평형이므로 역기전력 또한 불평형이 됨을 예상할 수 있다.

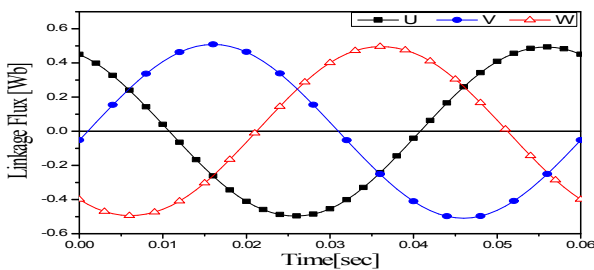


그림 3. 쇄교자속  
Fig. 3. Flux linkage

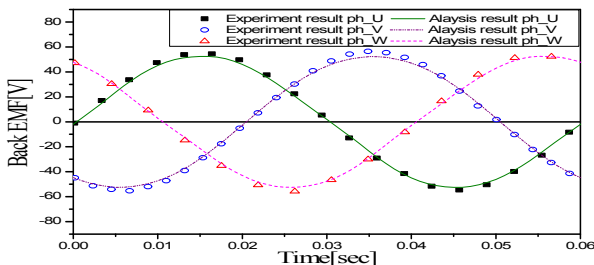


그림 4. 역기전력  
Fig. 4. Back EMF

표 2. 역기전력 상수

Table 2. Constant Back EMF

		U	V	W
역기전력 [V]	해석값	37.21	37.83	37.20
	실험값	38.40	39.16	37.96

#### 4.2 역기전력

그림 4와 표 2는 각각 역기전력의 해석 및 실험결과와 역기전력 상수를 나타내었다. 단부효과에 의한 자기저항의 차이로 인하여 가운데 위치한 V상에 가장 많은 자속이 쇄교하게 되고 V상의 양 옆에 위치한 U, W상에 쇄교하는 자속은 V상에 쇄교하는 자속의 양보다 적으므로 V상의 역기전력이 U, W상보다 크게 나타나고 있다. 역기전력이 가장 크게 발생한 V상을 기준으로 할 때 U, W상의 역기전력 상수는 1.7[%] 작게 계산되었다. 실험결과 역기전력 상수는 최대 3.1[%] 차이가 남을 알 수 있으며, 이 역기전력의 차이가 내부순환전류의 주원인이 된다. 실험치가 이론치보다 그 차이가 더 크게 나타난 것은 PMLSM의 가동자 코일의 몰딩 시 발생하는 수축현상에 의한 공극의 변형에 의한 것이라 사료된다.

#### 4.3 인덕턴스 및 전류

PMLSM의 각 상에 3상 평형전압을 인가하는 경우, 단부효과에 의한 자기회로의 불연속으로 인하여 각 상 인덕턴스가 불평형이 되어 각 상전류는 그 크기가 차이가 나게 되며 이는 순환전류로 흐르게 된다. 이 순환전류에 의하여 각 상 전류는 불평형이 되고 추력이 감소하게 된다. 각 상 전류의 FEA 해석치 및 실험치를 그림 5에 비교하여 나타내었다. 또한 표 3에 인덕턴스 및 전류의 해석치와 실험치를 비교하여 나타내었다. 인덕턴스 계산은 다음 식과 같이 인가전압과 전압원 FEA로 계산한 전류 및 이들의 위상차를 이용하여 계산하였다.

$$I = \frac{V}{Z} = \frac{V}{R + j\omega L} \tag{1}$$

해석결과와 실험결과에서 V상의 인덕턴스가 가장 크게 나타났다. 인덕턴스의 크기는 자기저항의 크기와 반비례 관계이므로 V상의 자기저항이 U, W상의 자기저항 보다 작기 때문에 V상의 인덕턴스가 U, W상의 인덕턴스보다 큰 값을 가지게 된다.

이와 같은 결과로 자기회로의 불연속에 의한 자기저항의 차이가 인덕턴스의 차이를 발생시키고, 그 결과 전류의 불평형이 생겨 코일 내부에 순환전류가 흐르는 것을 알 수 있다.

표 3. 인덕턴스와 전류  
Table 3. Inductance and current

인덕턴스 [mH]	해석값	U	V	W
	실험값	14.591	15.718	14.638
전류 [A]	해석값	6.53	6.06	6.51
	실험값	6.53	5.97	6.56

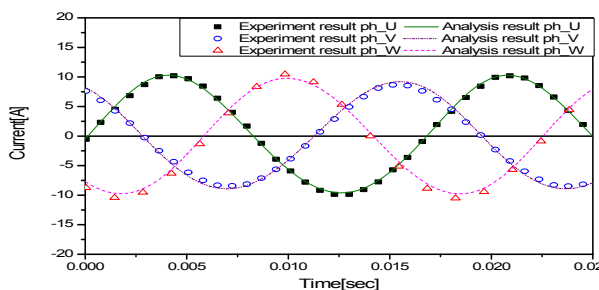


그림 5. 전류  
Fig. 5. Current

전기자 권선에 평형전압을 인가한 경우 발생하는 순환전류(Ic)의 해석치와 실험치는 각각 0.23[A], 0.28[A]로 계산되었다. 실험치의 순환전류가 다소 크게 나타난 것은 역기전력의 결과와 동일하게 실제 모델에서 가동자의 제작 시 발생하는 수축현상으로 인하여 공극의 변형이 생겨 불평형의 영향이 더 크게 나타난 결과라 사료된다.

#### 4.4 추 력

PMLSM에서 발생하는 추력은 FEA를 이용하여 계산할 수 있다. 전류원 해석 및 추력 실험 시 PMLSM

에 직류 전류를 인가하여 부하각에 따른 평형전류에 의한 추력특성을 구할 수 있다[3]. 직류를 인가할 경우 L성분을 제외한 R성분만 남게 되므로 인덕턴스 차이에 의한 추력 감소는 나타나지 않게 된다. 즉 평형 전류가 흐를 경우의 추력이 된다.

한편 PMLSM의 전압원 해석 및 실험에서 3상평형 전압을 인가할 경우 불평형 전류가 흐르는 경우의 추력을 계산할 수 있다. 3상 평형 교류전압을 인가할 경우 가동자의 인덕턴스 차이로 인하여 내부순환전류가 흐르게 되어 3상전류의 불평형이 생기게 된다.

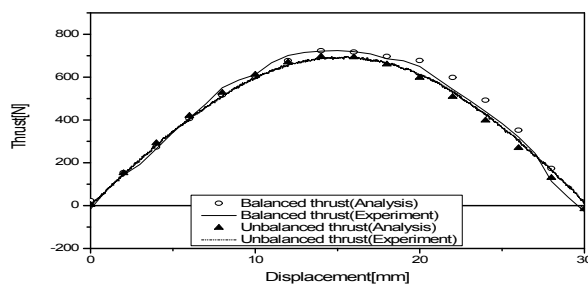


그림 6. 추력  
Fig. 6. Thrust

표 4. 인덕턴스와 전류  
Table 4. Inductance and current

	평형[N]	불평형[N]	추력감소[N]
해석값	726.66	698.64	28.02
실험값	723.68	691.88	31.54

이때의 추력은 불평형 상태의 추력으로 평형상태의 추력과 비교함으로써 내부순환전류에 의한 추력의 변화를 확인할 수 있다.

그림 6은 평형상태와 불평형상태의 추력에 대해 해석값과 실험값을 나타낸 것이다.

표 4에 각 상태의 추력과 내부순환전류에 의한 추력의 감소분을 나타내었다. 한편 평형상태의 추력 실험치가 완전한 정현파가 되지 않는 것은 실험 시 발생하는 가동자 이동에 따른 위치 오차와 디텐트력이 포함되었기 때문이다. 이론치와 실험치가 거의 일치하는 양호한 결과를 얻었다.

본 연구에서 적용한 모델의 추력상수는 110.8[N/A]이므로 순환전류에 의한 추력 감소분은 31.0[N]로 계

산된다. 따라서 표 4에서 알 수 있는바와 같이 평형상태와 불평형 상태의 추력차가 31.54[N]로 나타나 만족스러운 결과를 얻었다.

#### 4.5 디텐트력

단부효과에 의한 디텐트력은 해석 대상을 전체모델과 주기모델에 대해 각각 디텐트력을 구하고 그 차이로 계산하였다[4].

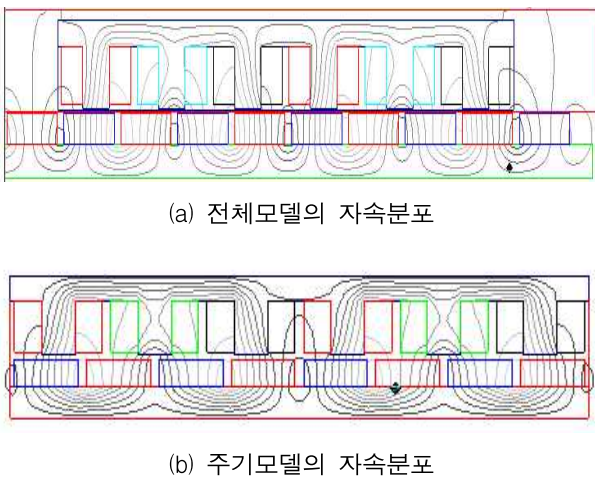


그림 7. 자속분포  
Fig. 7. Flux distribution

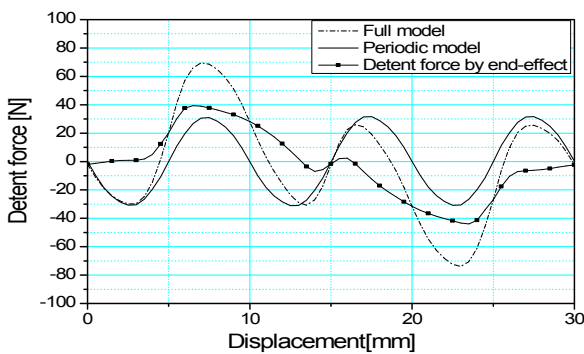


그림 8. 디텐트력  
Fig. 8. Detent force

그림 7은 전체모델과 주기모델의 자속분포를 나타낸 것이다. 전체모델에서는 단부효과가 고려되고 주

기모델에서는 고려되지 않는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 FEA를 통해 얻은 전체모델과 주기모델 그리고 두 디텐트력의 차이인 단부효과에 의한 디텐트력을 나타낸 것이다.

### 5. Matlab Simulink를 이용한 시뮬레이션

단부효과에 의한 파라미터 변화에 따른 PMLSM의 운전특성 변화를 해석하기 위하여 전압방정식과 운동방정식을 결합시켜 Matlab Simulink를 통하여 상불평형에 따른 PMLSM의 운전특성을 해석하였다. 본 논문에서는 PMLSM의 상 불평형을 고려하기 위하여 Physical modeling을 수행하였다. Physical modeling을 이용할 경우, 각 상의 인덕턴스, 역기전력의 값을 3상에 각각 입력할 수 있으므로 상 불평형에 의한 특성을 고찰할 수 있다.

식 (2)는 PMLSM의 전압방정식을 나타내며 식 (3)은 운동방정식을 나타낸다[5].

$$V = RI(t) + L \frac{dI(t)}{dt} + K_e \cdot v(t) \quad (2)$$

$$F = F_m - F_l - Dv \quad (3)$$

식 (3)은 식 (4)와 같이 가속도와 무게에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$M \frac{dv}{dt} = F_m - F_l - Dv \quad (4)$$

식 (4)를 가속도 항으로 정리하면 식 (5)와 같다.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_m - F_l - Dv}{M} \quad (5)$$

전압방정식과 운동방정식을 이용하여 Matlab Simulink로 모델링하였고 오차신호에 의해 동작하는 연속치계 PI제어 블록을 구성하였다. 평형상태 모델의 경우 각 상의 인덕턴스로 동일한 값을 입력하고, 불평형상태 모델의 경우 각 상 인덕턴스는 다르게 입력하였다.

그림 9는 PMLSM이 가감속 운전을 할 때의 추력 특성을 나타낸 것이다. PMLSM은 2G의 가속도로 가감속 하며 2[m/s]로 등속운전을 하는 상태이다. 단부효과에 의한 영향을 확인하기 위하여 가속, 등속, 감속 구간의 발생추력을 확대하여 그림 10에 나타내었다. 단부효과에 의한 디텐트력의 영향으로 인하여 불평형 상태의 운전에서 추력의 리플이 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

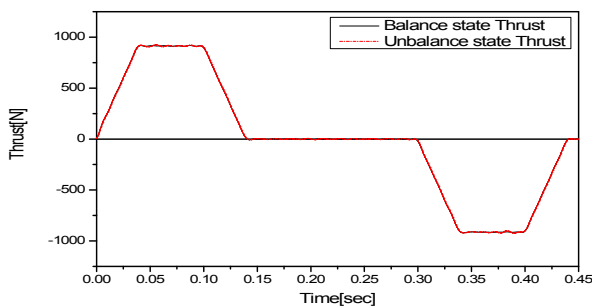


그림 9. 운전추력  
Fig. 9. Operating thrust

## 6. 결 론

본 논문에서는 유한요소해석 및 실험을 통하여 자기 회로의 불연속에 따른 역기전력과 인덕턴스의 불평형 특성에 대하여 고찰하였다. 진기자 권선의 인덕턴스 불평형으로 인하여 순환전류가 실험치 기준 0.28[A] 발생하였으며 이로 인하여 발생 추력이 4.4[%]감소하였다. 또한, Matlab Simulink를 통하여 동특성을 해석하였으며, 그 결과 불평형 전류로 인한 추력리플이 크게 발생함을 확인할 수 있었다.

## References

[1] Ki-Chae Lim, Joon-Keun Woo, Gyu-Tak Kim, Jung-Pto Hong, Gyu-Tak Kim, "Detent Force Minimization Techniques in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol 38, No. 2, pp. 1157-1160, 2002.  
 [2] Lee Dong-yeup, Kim Gyu-Tak, Choi Jung-Keying, "The design for high power density in the slotless type permanent magnet linear synchronous motor", INTERMAG 2, 4-8 April 2005, pp. 653-654.  
 [3] Martinez G., Atencia J., Martinez-Iturralde M., "Garcia

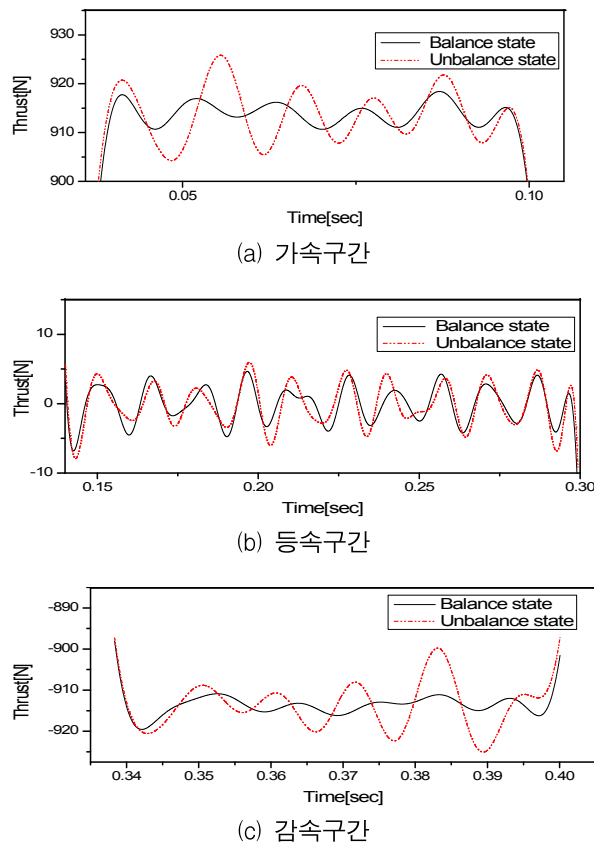


그림 10. 운전구간별 추력  
Fig. 10. Thrust of Operating section

Rico A., Florez J. : "Reduction of detent force in flat PMLSMs by means of three different methods", Proceedings of Electric Machines and Drives Conference, 2003, Vol. 2, 1-4, June 2003, pp. 1105-1110.  
 [4] S. A. NASAR, I. BOLDEA, "LINEAR MOTION ELECTRIC MACHINES", John Wiley & Sons, pp 63-78.  
 [5] Kim Duk-Hyun, "A Study on the Design and Characteristic Analysis of Moving Coil Type LOA taking accounting of Magnetic Circuit Configuration", 2001. Ph. D degree paper, pp. 19-29.

## ◆ 저자소개 ◆



### 김덕현 (金德顯)

1966년 7월 10일생. 1992년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 창원대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991~1996년 (주)한화기계 자동화사업부. 1997년~현재 건동대학교 신재생에너지공학과 교수.