

제작성을 고려한 철심형 선형 전동기의 디텐트력 저감

최호용, 정현교
서울대학교 전기역학연구소

Reduction of Detent Force in Permanent Magnet Linear Synchronous Motor under the consideration of Manufacturing Feasibility

Ho-Yong Choi, Hyun-Kyo Jung
Electromechanics Laboratory, Seoul National University

Abstract - 선형동기전동기는 고추력, 고정밀 운동을 요하는 시스템에 많이 사용되고 있는데, 추력 증가에 따른 추력 리플의 증가는 고정밀 위치제어에 어려움을 주기도 한다. 철심형 선형동기전동기에서는 자석 배열과 철심 치형상의 상호 관계에 의해 발생하는 디텐트력의 영향이 매우 크므로 이를 저감하기 위한 철심 구조의 설계가 필요하다. 본 논문에서는 실제 제작성을 고려하여 치와 철심부의 챔퍼링, 길이 변경, 자석 배열의 스쿠 적용 등을 통해 선형동기전동기의 디텐트력을 저감하기 위한 설계법을 제시하고 그 효과를 시험기의 제작 및 실험을 통해 증명하였다.

1. 서론

철심형 영구자석 선형동기전동기는 고추력, 고정밀 제어에 필요한 분야에 많이 사용되고 있다. 그러나 추력이 증가하면 추력 리플 역시 함께 증가하여 고정밀 위치제어에 어려움을 주며 운동 특성에 악영향을 주기도 한다. [1]

일반적으로 철심형 영구자석 선형동기전동기의 추력 리플의 원인으로는 두 가지가 있는데, 한 가지는 1차축의 전류분포와 역기전력의 전자기적 상호작용에 의한 힘이다. 이는 보통 인버터의 여자 회로에서 발생하는 정류 리플에 의한 것으로 설명할 수 있는데, 그 크기는 두 번째 원인인 디텐트력에 비하면 매우 작다. 디텐트력은 추력 리플과 동적 특성에 상당한 영향을 미치므로 이를 저감하기 위한 효율적인 방법이 요구되고 있다. 본 논문에서는 두 가지 원인에 의한 추력 리플 분석을 실험 결과와 함께 검토할 것이며, 이를 통해 선형 전동기의 동작 특성 개선이 기대된다.

본 논문에서는 디텐트력을 저감하기 위한 방법으로 치와 철심부의 챔퍼링, 철심의 길이 조절, 자석 배열의 스쿠 등을 제시하고 이들의 효과를 분석하였다. 적용된 설계법에 의거하여 디텐트력 최소화를 구현한 전동기를 시험 제작하였으며, 실험 결과를 통해 특성을 검증하였다.

2. 철심형 영구자석 선형동기전동기의 추력 리플

앞서 보았듯 일반적으로 철심형 영구자석 선형동기전동기의 추력 리플은 두 가지 원인에 의해 발생한다. 첫째는 전기자 전류 분포와 역기전력의 상호작용에 의한 것으로, 인버터에 의해 공급되는 여자 전류의 정류 리플이 원인이 된다. [2] 두 번째는 영구자석과 강자성체 사이에 작용하는 힘인 디텐트력이다.

그림 1은 입력 전류 3.6(A)일 때 순수 추력을 포함한 추력 리플을 나타낸 그래프이다. 그림에서 보듯 디텐트력은 정류 리플에 의한 추력 리플에 비해 매우 커서 순수 추력의 10(%)정도의 리플이 발생하기도 한다. 따라서 추력 리플의 감소를 위해서는 디텐트력 감소에 관한 중점적인 연구가 필요하다.

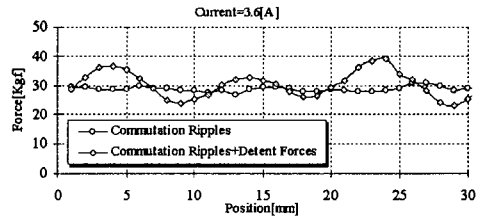


그림 1. 추력 리플 분포 (실험 결과)

3. 디텐트력

이론적으로 디텐트력의 원인으로는 두가지가 있는데 철심에 의한 디텐트력과 치에 의한 디텐트력이 그것이다. 철심 디텐트력은 영구자석과 주철심 사이에 작용하는 힘으로서 자석의 극피치 (τ_p)와 동일한 주기를 가진다. 이를 저감하는 방법으로는 철심의 길이를 주기만큼 조절하거나, 철심의 끝단에 챔퍼링을 주는 방법 등이 있다. 치 디텐트력은 영구자석과 치 사이에 작용하는 힘으로서 철심 디텐트력에 비해 짧은 주기를 가진다. 즉, 극피치 (τ_p)와 치피치 (τ_t)의 최대공약수를 주기로 가지게 되는데 이를 저감하기 위한 방법은 자석이나 치에 스쿠를 주는 것이다. 그림 2는 전술한 각 디텐트력의 특성을 나타낸 그래프이다.

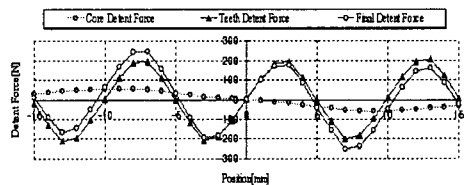


그림 2. 디텐트력의 구성 (τ_p :30(mm), τ_t :40(mm), GCD=10(mm))

3.1 철심 디텐트력 저감

3.1.1 철심 길이의 조절

그림 3에서 보듯 이론적으로 철심 길이를 식 (7)의 위상차에 따라 적절히 조절하면 철심 디텐트력을 상쇄할 수 있다. [3]

$$\theta = (2n-1)\pi, \quad k \text{는 정수} \quad (7)$$

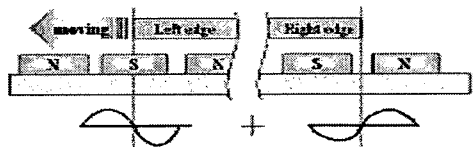


그림 3. 철심 길이의 조절

식 (7)은 철심 양단의 디텐트력의 위상차가 180(도)가 되도록 하는 것이다. 그러나 이는 형상의 복잡성으로 인해 이론적 최적값이 되지는 않는다. 그림 4는 철심 길이에 따른 디텐트력 변화를 나타낸 그래프인데, 길이가 극피치의 절반이 늘어난 375[mm]인 경우에는 그 감소량이 50%이상이다. 그러나 375[mm]인 경우나 378[mm]인 경우에 대해 정확히 어느 것이 최적값이라고 결정할 수는 없다.

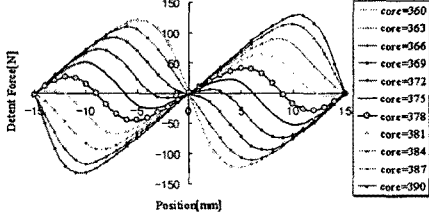


그림 4. 철심길이에 따른 철심 디텐트력 (core:철심 길이, 기준 길이=360[mm])

따라서 최적화 알고리즘의 결과로 디텐트력을 저감하는 다양한 해가 나올 수 있는데, 제작 편의성에 따라 최적해를 결정하게 된다.

3.1.2 철심 양단 형상의 변화

이동자가 이동시 자석이 가까워지고 멀어질 때 릴럭턴스 변화가 급격하지 않도록 하는 것이 디텐트력 저감에 유리하다. 따라서 그림 5처럼 철심 양단에 챔퍼링을 두어 형상을 변화하면 디텐트력 저감을 기대할 수 있다.

그림 6는 챔퍼링 높이에 따른 디텐트력 변화를 나타낸 그래프이다. 챔퍼링의 높이가 높으면 높을 수록 디텐트력은 저감되지만, 저감량은 높이 4[mm]정도면 포화된다.

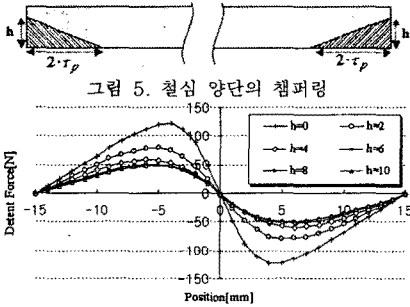


그림 6. 챔퍼링 높이에 따른 디텐트력 변화

이론적으로는 치 양단 형상이 원형으로 변하는 것이 디텐트력 저감에 최적이지만, 실질적으로 전동기 제작 비용 및 편의성에 있어서 챔퍼링이 유리하며 그 만으로도 목표로 하는 충분한 효과를 얻을 수 있다.

3.2 치 디텐트력 저감

디텐트력 저감의 주요 목표인 치 디텐트력은 전체 디텐트력의 80%이상을 차지하고 전동기 동작시 더 짧은 주기로 자주 발생한다. 그림 2를 보면 철심 디텐트력의 주기는 30[mm]인데 반해, 치 디텐트력의 주기는 극피치 30[mm]일 때 60(도)인 10[mm]이다. 치 디텐트력을 저감하는 실용적인 방법은 치 양단에 챔퍼링을 주거나 자석 배열에 스류를 주는 방법이 있다.

3.2.1 치 양단의 챔퍼링

치의 챔퍼링은 철심의 경우와 같이 치 양단의 형태를 조절하여 릴럭턴스 변화를 최소화하여 치 디텐트력을 저감하는 방법이다. 이 때 권선과 치의 안정적인 집합을 위해 절연체의 부가적인 코팅이 필요하여 전동기 제작

단가가 늘어나거나, EMF와 자기 리액턴스의 감소가 발생할 수 있지만, 챔퍼링은 철심형 선형 전동기에서 널리 쓰이는 방법이다.[4]

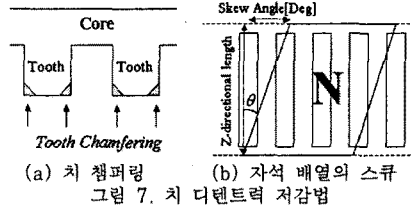


그림 7. 치 디텐트력 저감법

그림 8은 치너비 10[mm], 높이 8[mm]인 경우 챔퍼링의 효과를 나타낸 것인데 디텐트력이 50%이상 감소했다. 챔퍼링을 더 넓고 깊게 하면 디텐트력의 감소는 더 효과를 볼 수 있지만, 인덕턴스와 역기전력 상수의 감소가 문제가 된다. 실제로 역기전력 상수의 최대 감소치는 10%정도이지만, 그 영향은 매우 커서 추력에서 $1.5 \times I_s$ 배만큼 차이가 나기도 한다.

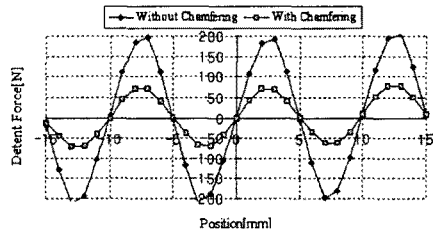


그림 8. 챔퍼링의 디텐트력 저감 효과 (양단 챔퍼링 너비:3[mm], 높이:1[mm])

3.2.2 자석 배열의 스류 적용

디텐트력 저감법으로 스류 적용이 가능한데, 전기자 철심부의 스류는 적층 제작시 어려움이 있으므로 자석부의 스류 적용이 제작 편의성 면에서 유용하다. 자석 스류시 그림 7의 (b)처럼 평행한 형상으로 제작하려면 영구자석의 추가 가공이 필요하므로, 고정자부에 사각 자석을 스류각만큼 그대로 돌려서 부착하는 것이 제작이 용이하다. 스류각은 이는 극피치와 치피치에 따라 결정해야 하는데 자석이 넓은 회전기의 경우 일반적으로 1-슬롯 피치만큼이 된다. 본 모델에서는 스류각은 극피치와 치피치의 최대공약수인 30(도), 5[mm]가 된다.

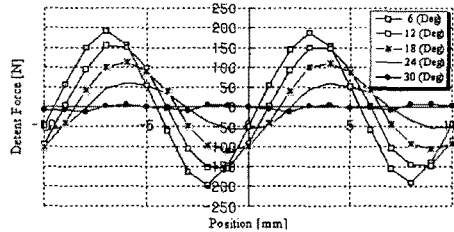


그림 9. 스류각에 대한 디텐트력 (180(도)=극피치, $r_p=40$ [mm])

그림 9는 분할된 z-방향 길이를 고려한 2차원 해석의 스류각의 변화에 따른 디텐트력을 나타낸 그래프이다. 디텐트력은 매우 정현적인 특성을 나타내므로 스류각 30(도)일 때 이론적으로 디텐트력은 0이 된다. 자석 배열의 스류 적용은 추력의 감소를 가져올 수 있는데 분포가 정현적일 경우 그 양은 대략 $(1 - \cos 15) \times 100$ (%) (=3.4(%))정도이다. 스류각 30(도)는 극피치에 비해 매우 작으므로 자석 스류에 의한 추력 감소는 무시할만한 수준임을 알 수 있다. 제안된 방법 외에도 디텐트력을 최소화 할 수 있는 방법으로, 스류와 같은 방향으로 치 표면에 작은 구멍들을 만들거나, 자석의 표면을

곡선으로 처리하는 방법 등이 있으나, 실제 전동기의 대량 생산에서의 제작 적합성은 낮다.[5]

4. 제작 및 실험

4.1 영구자석 선형동기전동기의 설계와 제작

디텐트력에 관한 특성과 제안된 디텐트력 저감법의 효과는 시험기를 실제 제작, 실험하여 증명하였다. 시험 제작한 전동기는 위치 정밀도 0.5(μm)의 이송 장치용이다. 연속 추력은 500(N), 최대 추력은 2500(N)이고 최대 가속도는 4g, 왕복 거리 840(mm) 이내에서 50[kg]의 부하하에서 이동 속도는 2[m/sec]이다. 자세한 사양은 표1에 나타났다. 제작된 전동기는 홀센서 신호에 의한 피드백 제어를 하며, 0.1(μm)의 리니어 스케일을 사용한다. 이동자는 LM 가이드에 의해 지지되어 큰 수직력의 영향을 제거한다.

표1. 제작된 시험기의 사양

	사양	치수
일반	공극 길이	1[mm]
	적층 길이	100[mm]
	전압	220[V]
챔퍼링	철심 챔퍼링	4°60[mm]
	치 챔퍼링	3°1[mm]
고정자	자석 높이	5[mm]
	자석 폭	27[mm]
	자석 종류	NdFeB
	에너지적	44H
이동자	슬롯 폭	14[mm]
	치 높이	8[mm]
	치 폭	10[mm]
	턴 수	코일 당 285회
	권선 연결	3 병렬
	권선 치수	12*100*375[mm]

4.2 실험 결과

전동기의 전기회로상수는 챔퍼링을 한 경우와 챔퍼링 없는 경우를 표2에 비교하였다. 최대 추력시 챔퍼링이 없는 경우 29.17[A]가 필요한 반면 챔퍼링을 한 경우 32.08[A]가 필요하여 약 9[%]의 차이가 나지만 일반적인 경우에는 큰 차이를 보이지 않는다.

표2. 회로 상수 비교

상수	챔퍼링 한 경우	챔퍼링 안 한 경우
인덕턴스	11.62[mH]	11.11[mH]
역기전력 상수	55.13[V/(m/sec)]	53.1[V/(m/sec)]
추력 상수	82.7[N/A]	77.93[N/A]

그림 10은 해석적 방법에 의한 해석 결과와 측정한 디텐트력을 비교한 그래프이다. 매 1[mm]마다 이동자의 위치를 바꾸어 로드셀을 이용해 디텐트력을 측정하였으며 두 결과는 서로 거의 일치한다.

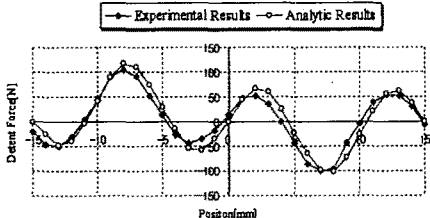


그림 10. 챔퍼링을 한 경우의 디텐트력 비교

기존 모델과 최적화된 모델의 디텐트력 비교 결과를 그림 11에 나타내었다. 스류를 적용하지 않고도 디텐트력은 50%이상 감소했으며, 입력 전류 3.6[A]시 추력은 298.8(N)에서 284.9(N)으로 약 4.65[%]감소하였

을 뿐이다. 그림 12에서 보듯 스류까지 적용하면 디텐트력은 거의 완벽하게 제거할 수 있다. 챔퍼링만으로도 충분한 디텐트력 저감이 가능하지만 30[도] 스류를 적용하면 90[%]이상 저감할 수 있다. 따라서 제안된 디텐트력 저감법을 적용하여 디텐트력은 충분히 제거하면서 전동기의 목표 성능을 만족할 수 있음을 알 수 있다.

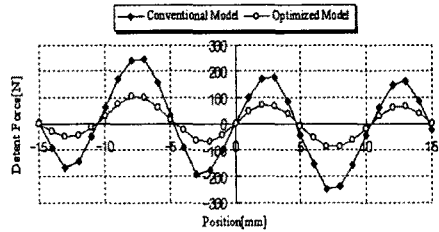


그림 11. 스류가 없는 경우 디텐트력 저감

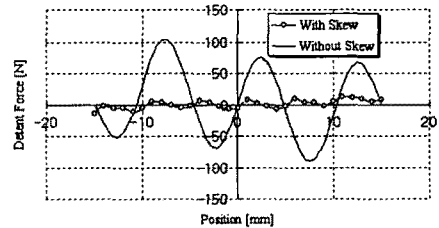


그림 12. 스류에 의한 저감 효과

5. 결론

본 논문에서는 전동기에 구조적으로 존재하는 디텐트력에 관한 상세한 이론적인 분석을 수행하였다. 해석에 적용된 공간고조파법은 유한요소법과의 비교를 통해 적합성을 검증하였다. 디텐트력은 영구자석과 주철심, 치와의 상호작용에 의해 큰 추력 리플을 야기한다. 본 논문에서는 기기의 제작성을 고려하여 철심의 챔퍼링, 적절한 철심 길이의 설정을 통해 철심 디텐트력을, 치의 챔퍼링, 자석 배열의 스류 적용을 통해 치 디텐트력 저감법을 제시했으며, 모든 특성은 사자기를 제작, 실험을 통해 검증하였다. 이러한 연구를 통해 고정밀, 고추력의 철심형 영구자석 선형동기전동기의 경제적인 제작이 가능하다.

(참고 문헌)

- [1] David L, Trumpher, Won-Jong Kim, Mark E. Williams, "Design and analysis framework for linear permanent-magnet machines," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No. 2, pp371-379, 1996.
- [2] Tomy Sebastian, Vineeta Gangla, "Analysis of Induced EMF Waveforms and Torque Ripple in a Brushless Permanent Magnet Machine," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No. 1, pp.195-200, January/February 1996.
- [3] Masaya Inoue, Kenji Sato, "An Approach to a Suitable Stator Length for Minimizing the Detent Force of Permanent Magnet Linear Synchronous Motors," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 36, No. 4, pp.1890-1893, July 2000.
- [4] T. Yoshimura, H.J. Kim, M. Watada, S. Torii, D. Ebihara, "Analysis of the Reduction of Detent Force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 31, No. 6, pp.3728-3730, November 1995.
- [5] Takeo Ishikawa, Gordon R. Slemon, "A Method of Reducing Ripples Torque in Permanent Magnet Motors without skewing," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 1, 29, No. 2, pp.2028-2031, March 1993.