

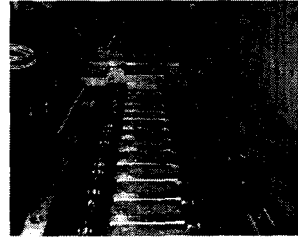
철심형 영구자석 선형동기전동기의 스큐 해석

조성문, 정상용, 정현교, 천장성  
 서울대학교 전기역학연구소, 미래산업(주)

Skew Effect of Core Type Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

Sung-Mun Cho, Sang-Yong Jung, Hyun-Kyo Jung, Jang-Sung Chun  
 Seoul National University, Electromechanics Laboratory, Mirae Corporation

**Abstract** - 본 논문에서는 공간 고조파 개념을 이용하여 철심형 영구자석 선형 동기 전동기의 스큐 효과를 해석하기 위한 해석적 방법을 설명하고자 한다. 제안된 방법을 통하여 고정자 슬롯과 치 구조에 의한 공극의 실제적인 자속밀도를 해석할 수 있으며, 기존의 방법보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 특히, 슬롯과 치 형상 구조를 가진 철심형 영구자석 선형 동기 전동기의 스큐 특성을 나타낸다.



1. 서 론

그림 1. 영구자석 선형동기전동기

그림 1.에서와 같은 영구 자석형 선형동기전동기의 경우 여러 가지 원인, 고정자 슬롯 및 이동자 자극 형상, 철심의 포화 및 제안된 길이, 양단부의 형상 등의 영향으로 공극의 자기 저항이 일정치 않게 된다. 이는 결국, 공극 자속밀도와 역기전력의 맥동을 일으키며, 운전시 디텐트력, 소음 및 진동 등을 유발시키게 된다. 이중 특히, 고정자의 슬롯 개구부 형상과 이동자 자극의 형상에 의한 특성은 전동기 운전 특성과 밀접한 관련이 있는데, 단점을 보완하기 위하여, 슬롯수 증가, 폐슬롯 구조 도입, 스큐 인가, 자극의 형상 최적화 등이 도입되고 있다. [1] 그러나, 지금까지 보고된 결과의 대부분은 근사화된 공극 기하학적 및 슬롯에 의한 릴럭턴스 등을 도입하여 정확한 특성 해석에는 미치지 못한다. 또한 유한요소법을 사용한 이동자 자극의 폭 및 배치 등에 따른 특성 해석은 복잡한 계산과 많은 시간을 요하게 된다.

수치 해석법을 이용한 영구자석 선형 동기 전동기의 설계와 해석은 초기 설계시 설계변수에 따른 특성 변화를 살펴보기 위해 계속적인 모델의 이산화 작업, 시스템 행렬의 계산, 후처리 작업등의 많은 노력과 시간이 필요하다는 단점이 있다. 이에 반해 해석적 방법의 경우, 수치 해석법에 비해 해석시간이 매우 빠르며, 설계변수의 변화에 따른 특성 파악이 매우 용이하다는 장점이 있다.

본 논문에서는 이러한 해석적인 방법중 공간 고조파 개념을 이용하여 철심형 영구자석 선형 동기 전동기의 스큐 효과를 해석하고자 한다. 제안된 방법은 고정자 슬롯과 치 구조에 의한 공극의 실제적인 자속밀도를 해석할 수 있고, 이에 따른 여러 가지 계특성을 살펴볼 수가 있다. 특히, 슬롯과 스큐 구조를 가진 영구자석 선형 동기 전동기의 특성에서 그 타당성을 입증할 수 있으며, 유한요소법의 결과도 함께 제시한다.

2. 공간고조파 해석법

2.1 코어리스 구조의 공극자속 밀도

본 연구에서 적용된 영구자석형 선형동기전동기는 가동 자석형으로 단2차축 구조를 가지게 된다. 이러한 구조에서는 우선, 영구 자석의 양단부 누설 자속에 의한 단부 효과가 나타나는데, 이러한 특성과 함께 슬롯과 치 구조가 없는 영구자석형 선형동기전동기의 공극 자속 밀도를 공간고조파 해석법을 적용하여 계산하며, 이에 대한 타당성을 유한요소법을 통하여 검토한다.

적용된 공간고조파법은 다중중영역에서의 지배방정식의 해를 계산하는 과정에서 푸리에 급수 전개를 적용하여 도출하는 방식으로, 근사화된 결과가 아닌 실제 구조가 인가되어 좀더 정밀한 특성을 기대할 수가 있다. 식 (1)은 각 영역별 지배방정식을 나타낸다.

$$\frac{\partial^2 A(x,y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A(x,y)}{\partial y^2} = -\mu_0 J(x) \quad (1)$$

지배방정식 (1)에서  $J(x)$ 는 영구자석 모델의 경우엔 등가자와 전류 성분,  $J_m(x)$  이 되며 식 (2)에 나타나 있다.

$$J_m(x) = -\frac{n\pi}{\tau_e} (\pm) H_{ch_n} \sum_n a_n \cos \frac{n\pi}{\tau_e} x \quad (2)$$

여기서,  $a_n = \frac{2}{\tau_e} \int_{-\frac{\tau_e}{2}}^{\frac{\tau_e}{2}} (\pm) H_c h_m \sin \frac{n\pi}{\tau_e} x dx$

식 (2)에서  $\tau_e$ 는 변형된 반과장으로서, 주기적인 특징이 있는 푸리에 급수전개에서 자석의 제한 길이를 표현하기 위하여 도입되었으며, 그 크기는 전동기 전체 길이 보다 무척 커야한다. 식 (2)를 이용하여 식 (1)에 대한 해는 다음과 같다.

$$A_m(x) = \mu \sum_n (A_n e^{nK_e y} + B_n e^{-nK_e y} + \frac{j_m}{n^2 K_e^2}) \cos nK_e x \quad (2)$$

여기서,  $K_e = \frac{n\pi}{\tau_e}$ ,  $j_m : J_m(x)$ 의 크기

전기자 모델에서도 위에서와 마찬가지로 전개될 수가 있는데, 여기서 사용된 푸리에 급수전개는 지금까지와는 다소 다른 점이 있는데, 지금까지는 전기자 전류를 등가적인 기하적으로 표현하여 사용하였지만, 본 연구에서는 직접적으로 전기자 전류, 코일 형상 및 배치를 표현할 수 있다. 한 상당 전류 밀도는 아래와 같이 표현할 수가 있으며, 자속 밀도 표현식도 식 (2)와 유사하다.

$$J_a(x) = \sum_n b_n \sin \frac{n\pi}{\tau_e} x \quad (3)$$

$$\text{여기서, } b_n = \frac{2}{\tau_e} \int_{-\frac{\tau_e}{2}}^{\frac{\tau_e}{2}} \left( \frac{NI_a}{S_w S_d} \right) \sin \frac{n\pi}{\tau_e} x$$

$S_w$  : 슬롯 폭,  $S_d$  : 슬롯 깊이

$I_a$  : 상당 최대 전류

공간고조파 해석시 적용된 푸리에 전개는 그 특성상 주기성을 내포하고 있어, 양단부의 단부 효과를 나타내기 위해서는  $\tau_e$ 의 도입이 필수적이다.

식 (2)를 바탕으로 자속 밀도를 구할 수가 있다. 본 해석에서는 공간고조파법을 이용한 자속 밀도와 유한요소법에 의한 결과를 비교하여 해석법의 타당성을 규명할 수가 있다.



그림 2. 자석에 의한 자속밀도(공간고조파법)

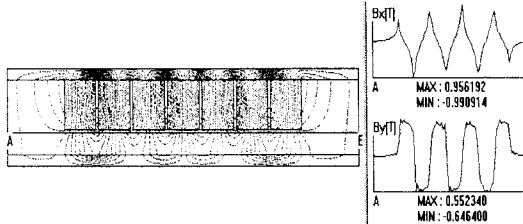


그림 3. 자석에 의한 자속밀도(유한요소법)

그림 2. 과 3.은 7극에 대한 자속밀도 결과를 공간고조파법과 유한요소법에 대하여 각각 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 두 파형은 매우 일치하며, 특히 양단부에서 단부 효과에 의해 자속이 누설이 생겨 왜곡됨을 확인할 수가 있겠다.

그림 4.에서는 맥스웰 용력을 이용한 코어리스형 영구자석 선형동기전동기의 추력 특성을 나타낸 것이다. 아랫부분은 상당 추력을 나타내며, 윗부분은 총 추력에 해당한다. 그림에서 알 수 있듯이 자로의 불균형이 없어 맥동이 그다지 크게 나타나지는 않고 있다.

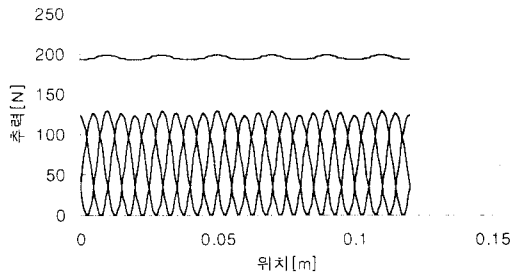


그림 4. 코어리스형 영구자석 선형전동기의 추력 특성

## 2.2 철심형 구조의 공극자속 밀도

실제로, 슬롯과 치구조를 내포한 명확한 해석해를 구현하기는 쉽지 않다. 허나, 본 연구에서는 앞 절에서 언급한 공간고조파 해석법에서 등가 자화 전류법을 적용하여 철심형 구조에서의 특성을 나타내었다. 등가 자화 전류법은 치구조를 가상의 등가 자화 전류원으로 치환하여 해석하는 법으로, 상대적으로 자속이 소멸한 슬롯 구조의 형상 정보를 포함한 해석이 된다.

그림 5.에서는 등가 자화 전류법을 적용한 공간고조파 해석법 순서를 정리하였다. 즉, 코어리스형의 결과를 바

탕으로 슬롯에서의 슬롯 깊이를 고려한 치의 등가자화전류화를 통하여 최종적인 공극 자속 밀도를 구현한 것이다. 그림 6.에서는 이러한 해석법을 바탕으로 구현시 나타나는 자속 파형의 개략도를 순서별로 나타낸 것이다.

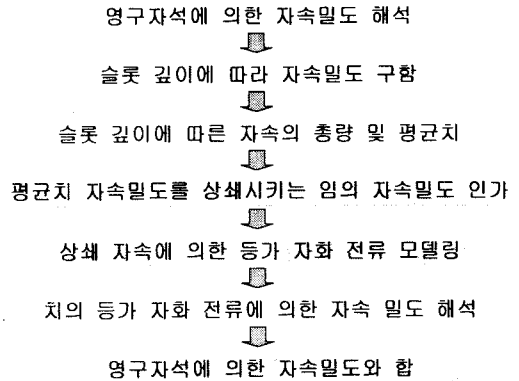


그림 5. 등가자화전류법 해석 순서도

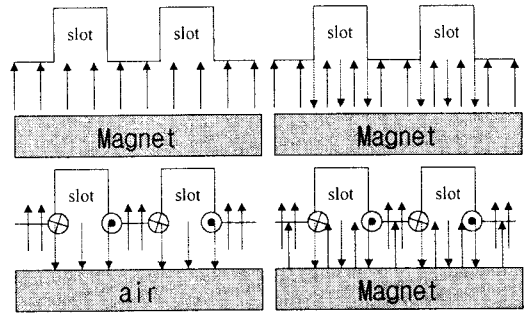
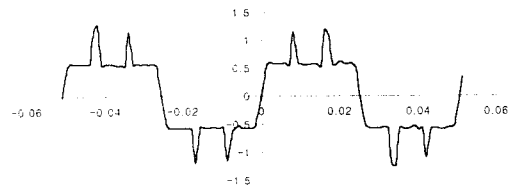
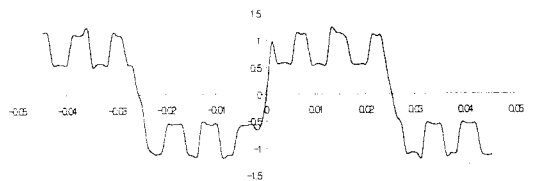


그림 6. 등가자화전류법에 의한 자속파형 개략도

이와 같은 해석법을 바탕으로 두 가지 경우에 대하여 철심형 영구자석 선형동기전동기의 공극자속 밀도를 계산하였다. 이에 대한 결과가 그림 7.에 나타내었다. 그림 7.에서는 같은 구조의 전동기에서 슬롯과 치폭만을 달리하여 공극자속 밀도를 나타내었는데, 그림에서 돌극된 부분은 바로 치가 있는 구조이며, 코어리스형에 비하여 자속 파형의 맥동이 심하게 나타나고 있다.



(a) 슬롯 : 7[mm], 치 : 1.45[mm]



(b) 슬롯 : 4[mm], 치 : 4.45[mm]

그림 6. 슬롯과 치폭에 따른 공극자속 밀도

그림 7.에서는 이와같은 구조에서 발생하는 디텐트력을 나타낸 것이다. 그림 4.에서 나타난 전체 추력에 아래의 추력이 추가로 더해지게 될텐데, 그 경우 최종 추력의 맥동은 그림 7.의 흐름을 따르게 될 것이다.[2]

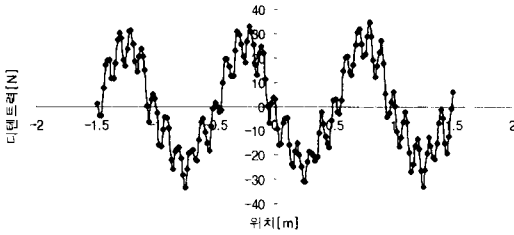


그림 7. 위치에 따른 디텐트력

### 3. 스큐 해석

앞 절에서 규명한 일반적인 공극자속 밀도와 위치별 추력의 맥동 성분 등을 바탕으로, 전동기의 역기전력 및 최종 추력 등을 나타낼 수가 있다. 이는 곧 전동기의 운전 특성과 밀접한 관련을 지니는데, 이와 같은 맥동 성분은 운전시 소음 및 진동 등을 유발할 수가 있다.

또한, 영구자석 선형동기전동기의 경우 짧은 운전 거리 내에서 왕복운전을 필요로 하는 시스템에 대부분 응용되는데, 이때 그 목적에 따른 우수한 제어적 성능을 확보해야 한다. 일반적인 운전방식은 대부분 고추력, 고응답성 및 정밀 추력 등으로 나눌 수가 있는데, 매우 큰 추력 리플은 이러한 제어적인 성능을 나타낼 수가 없게 된다. 결과적으로 이러한 특성은 전동기 운전시 발생하는 저해 요소와 직결되는데, 특히 디텐트력의 저감이 필수적이다. 본 연구에서는 디텐트력을 저감할 수 있는 다양한 방법 가운데, 스큐를 인가하는 방법을 적용하였으며, 이에 대한 맥동 성분의 저감을 나타낸다.

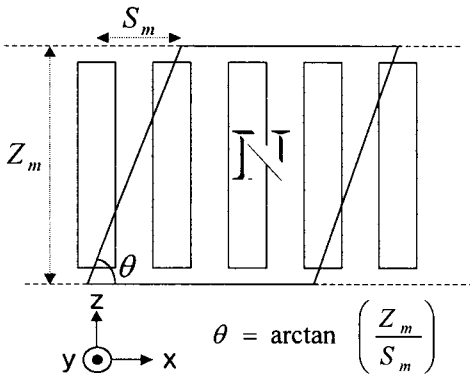


그림 8. 코일 배치와 영구자석의 스큐 전개도

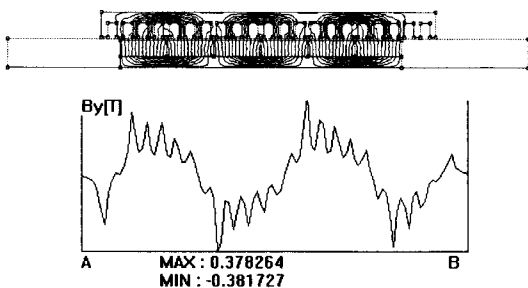


그림 9. Z축 중앙에서의 자속 밀도 파형

스큐 해석 모델은 그림 8.에 나타나듯이 영구자석을 스큐 시키는 형식으로 스큐 정도를 슬롯 피치로 나타내었다. 일반적인 특성상, 스큐된 코일과 스큐된 영구자석의 동작 특성은 일치하며, 오히려 스큐를 이루는 스큐각에 따라 그 특성이 매우 크게 나타나고 있다. 그림 9.에서는 영구자석을 한 슬롯 피치로 스큐한 모델에서의 자속 파형과 자속 밀도를 나타낸 결과이다. 그림 10.에서는 이와 같은 자속 파형을 바탕으로 디텐트력 저감 특성을 나타내었다. 그림 7.에서 나타난 디텐트력은 전체 크기가 스큐를 통하여 상당히 저감되었으며, 맥동 성분의 현저히 감소하였다.

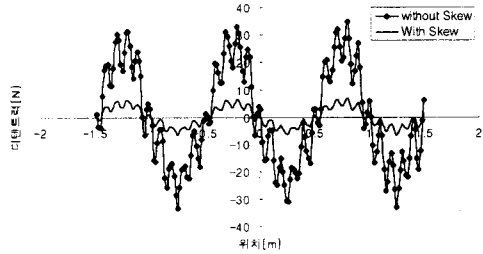


그림 10. 스큐 적용시 자속 및 디텐트력 변화량

그림 10.에서 나타난 맥동은 여러 가지 성분이 합성된 결과인데, 우선, 치구조와 슬롯구조에 의한 맥동, 1, 2차측 철심의 제한 길이에 의한 맥동, 영구자석의 단부와 철심의 작용력에 의한 맥동 등으로 나뉜다. 이러한 맥동 성분들은 그 주기를 달리하며 특성이 나타나는데, 특히, 영구자석의 단부와 철심 상호간의 작용력에 의한 맥동이 크게 나타난다.[3]

### 4. 결 론

본 논문에서는 철심형 영구자석 선형동기전동기의 스큐 해석에 대하여 살펴보았다. 특히, 공간고조파법을 응용한 해석해의 적용을 통하여, 특성 해석 등에서의 실효성을 나타낼 수 있었으며, 유한요소법을 통하여 그 타당성을 규명하였다. 또한, 등가 자화 전류법을 공간고조파법에 적용하여, 공극내 자기 저항의 변화율에 따른 자속 특성을 나타낼 수 있었으며, 위치에 따른 추력 리플 파형을 유도하였다. 이와 같은 결과를 바탕으로, 영구자석에 스큐를 주어 디텐트력을 저감하는 방법을 적용하여, 디텐트력 변화량을 나타내었다.

본 연구를 통하여 향후 고정자 철심과 자극단 사이의 작용력에 의한 맥동 성분과 정밀 제어성능에 요구되는 설계 변수 변화 등도 함께 고려되어야 할 것이다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] R.J.Cruise, C.F.Landy, "Reduction of cogging forces in Linear Synchronous Motors," *IEEE trans on Magnetics* 623-626 1999.
- [2] 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, November, 1995.
- [3] Michel Mazene et al., "Torque Ripple Attenuation in Permanent Magnet Synchronous Motors," *IEEE Conference on Industry Application Systems*, 1989.