

## 인버터구동 선형유도전동기의 특성해석에 관한 연구

임 달호<sup>a</sup>, 김 창업<sup>a,b</sup>, 김 한중<sup>a</sup>

<sup>a</sup>한양 대학교 전기공학과, <sup>b</sup>효성중공업 주식회사

### Finite Element Analysis of Inverter-fed Linear Induction Motors

Dal-Ho Im<sup>a</sup>, Chang-Eob Kim<sup>a,b</sup>, and Han-Jong Kim<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>b</sup>Research & Development Institute, Hyosung Industries Co., Ltd., Seoul 150-045, Korea

#### Abstract

This paper presents the characteristics of linear induction motors fed by a voltage source PWM inverter. In the calculation, 2D finite element method is used considering the movement by moving mesh. Integro-differential approach is adopted for the copper loss calculation considering the skin effect.

#### 1 서론

본 논문은 선형유도 전동기의 비정현파 구동특성의 계산방법을 제시한다. 유도전동기의 비정현파 구동시에는 입력의 시간 고조파 성분의 영향으로 인해 온도상승, 추력리플, 진동, 소음, 손실증가 등의 문제가 발생한다.[1] 이는 모터의 구동 특성에 많은 영향을 미치므로 설계시 주의가 요구된다. 모터의 저속운전시, 추력리플이 가동부의 관성을 이기게 되면 이에 따른 기계적 진동이 제어특성을 저하시키므로, 운전속도의 하한치가 정해져야한다. 한편 높은 주파수의 인버터 구동시에는 표피효과로 1,2차축의 동손이 증가 하며, 이는 전체 손실의 상당량을 차지하게되므로 동손계산을 통해 전체 손실의 양상을 계산할 수 있다. 따라서 본 논문은 선형유도전동기의 추력, 전류, 및 동손을 수치해석적 방법을 통해 계산하는 방법을 제시하였다.

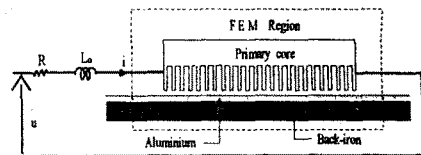
구동전원의 비정현성을 묘사하기 위해 시간 차분 유한요소법을 사용하였고, 동선의 표피효과를 고려하기 위해 Integro-differential formulation [2]을 적용하였다. 고정부와 가동부간의 상대적인 속도에 의한 해석영역의 변화는 공극의 moving band [3]와 가동부 경계에서의 요소 재분할로 처리하였다. 제안된 방법에 의해서 해석모델의 특성을 계산하였으며, 실험을 통해 그 결과를 검토하였다.

#### 2 해석방법

##### 2.1 해석 모델

그림 1은 본 논문에서 사용한 해석모델로 그 제원은 다음과 같다.

상 수	3	1차축 철심 높이	59.6 mm
극 수	4	Aluminium 두께	2.0 mm
1차축 길이	325 mm	Back iron 두께	16.0 mm
1차축 폭	63.0 mm	공 극	3.0 mm
슬롯 피치	11.1 mm	슬롯 깊이	32.6 mm
슬롯 폭	8.0 mm	극 간격	66.6 mm
1차축 질량	10.0 Kg	매극 매상당 슬롯 수	2



R : 1차축 저항 [Ω]

$L_0$  : 1차축 누설 리액턴스[H]

$i$  : 상전류[A]

그림. 1 선형유도전동기 해석모델

##### 2.2 유한요소 정식화

변위 전류를 무시할수 있는 준 정상상태에서, 해석영역의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\text{rot} \frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} = \vec{J}_c - \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

여기서  $\sigma$ 는 횡방향 단부효과를 고려한 재질의 등가도전을

$\vec{v}$ 는 도체의 이동속도

한편 운동좌표계를 사용하면 상대 속도항이 없어지므로 식(1)은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$\text{rot}_{\mu} \text{rot} \vec{A} = \vec{J}_o - \sigma \frac{d\vec{A}}{dt} \quad (2)$$

1차측의 회로 방정식은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$[U] = [R] [I] + [L_o] \frac{d}{dt} [I] + [E] \quad (3)$$

여기서 [E] = 각상의 유기 기전력  
[U] = 각상의 전압

식(2)에 Galerkin법을 적용하고 회로방정식을 결합한 후, 시간 미분항을 후퇴차분법에 의해 정리하면 전체 시스템 방정식은 다음과 같이 된다. [3]

$$\left[ \begin{array}{c} \frac{1}{\mu} S - N \\ R \end{array} \right] + \frac{1}{\Delta t} \left[ \begin{array}{c} T \\ L_{eff} N^T L \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} A \\ I \end{array} \right], \\ = \frac{1}{\Delta t} \left[ \begin{array}{c} T \\ L_{eff} N^T L \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} A \\ I \end{array} \right]_{t-\Delta t} + \left[ \begin{array}{c} 0 \\ U \end{array} \right], \quad (4)$$

### 2.3 추력계산

발생추력을 maxwell stress tensor 법에 의해 계산하면 다음과 같다. [5]

$$F_x = \int_V \frac{w}{2\mu_o} \{ (B_x^2 - B_y^2) n_x + 2n_y B_x B_y \} dl \quad (5)$$

여기서  $n_x, n_y$ 는 각각 x, y방향의 단위 벡터이고, w는 1차측 core의 적층길이이다.

### 2.4 고조파 해석

유한요소해석을 통해 얻어진 한주기당 이산화된 추력 정보의 고조파 해석을 위해 DFT를 이용하였다.

$$F_{xk} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} F_x(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (k=0,1,2,\dots,N-1) \quad (6)$$

$$\text{TDF} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N F_{xk}^2}{F_{x0}^2}} \times 100 (\%) \quad (7)$$

여기서 k : 고조파 차수  
N : 이산화된 정보의 갯수 ( 한주기당 )  
F<sub>xk</sub> : 추력의 k차 고조파

### 2.5 포피효과를 고려한 동손계산

Konrad에 의해 제안된 integro-differential formulation은 다음과 같다.

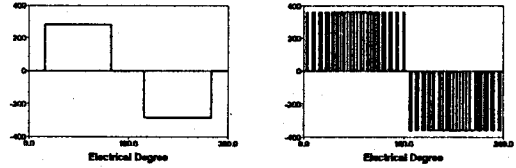
$$\text{rot}_{\mu} \text{rot} \vec{A} = \vec{J}_o - j\omega \sigma \vec{A} + j\omega \frac{\sigma}{a} \iint \vec{A} dS = -\frac{I}{a} \quad (8)$$

포피효과로 인해 주파수 증가에 따라 저항이 달라지므로, 동손은 각 고조파 전류와 이에 따른 저항의 식으로 다음과같이 나타난다.

$$P_{copper} = \sum [ i_{1(k)}^2 \cdot r_{1(k)} ] \quad (9)$$

### 3. 해석결과 및 검토

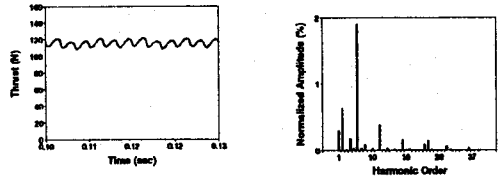
편축식 선형유도전동기가 2.32 [m/s]의 일정한 속도로 움직인다는 가정하에, 그림 2와 같은 파형의 선간전압이 인가되었을 때의 추력 전류 및 이들의 고조파분석을 하였다. (그림. 3~4)



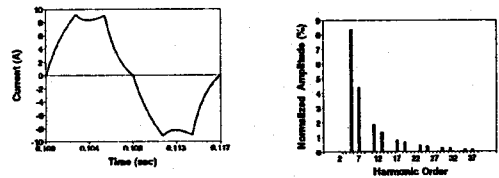
(a) 구형파

(b) PWM 파형

그림. 2 기본파의 크기가 220V<sub>rms</sub>인 파형의 선간전압.

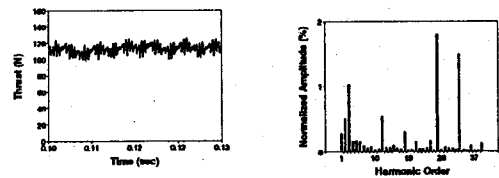


(a)

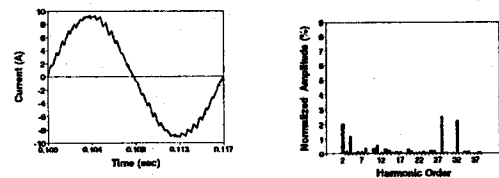


(b)

그림. 3 구형파 전원 구동시의 특성 (a)추력, (b)전류



(a)

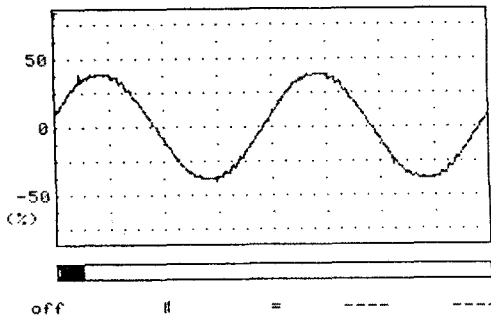


(b)

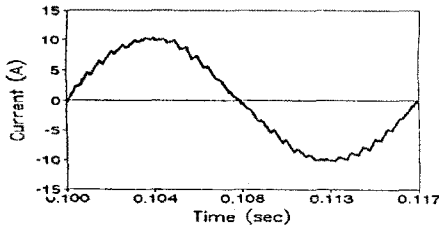
그림. 4 PWM전원 구동시의 특성 (a)추력, (b)전류

그림. 5는 PWM 전압[그림 2.(b)] 인가시, 구속실험을 통해 얻어진 1차측 전류이다. (a)는 실험을 통해 얻어진 값이며, (b)는 유한요소법을 사용해 구한 해석치이다. 실험에는 HIOKI 3195 Power analyzer를 사용하였다.

Storage Wave(S) \*C 1/ 4) PLL(A1) f:60.02 Hz  
 trig:A1 + 10% ↑ pre: 0% csr:0.7 A  
 95-06-20 14:36:10 U1 300V A1 20A  
 1. A1 20.00 A x2 0% T: 64pts/DIV x1/2



(a) 실험결과



(b) 해석치

그림. 5 구속시 전류특성 (a) 실험치 (b) 해석치

주파수 변화에 따른 1차측 슬롯 저항 변화를 2.5절의 방법을 사용해 계산한 결과는 그림. 6 과 같다.

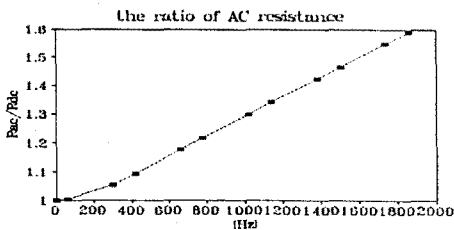


그림. 6 주파수에 따른 저항변화

2.32 [m/s]의 속도에서 각 구동원에서의 추력, 전류의 왜형율은 표. 1 과 같다.

	Square wave		PWM	
	thrust	current	thrust	current
Distortion Factor	2.55 %	10.87 %	2.9 %	3.22 %

표. 1 추력, 전류의 왜형율

위의 조건에서 계산된 각 입력에 대한 동손을 220Vrms의 상용전원시를 기준으로 비교한 결과는 표.2 와 같다.

	Square wave	PWM
The ratio of primary copper loss	103.9 %	101.5 %

표. 2 각 구동원에서의 동손

#### 4 결론

본 논문은 비정현파 구동 선형유도전동기의 추력, 전류 및 동손을 유한요소법으로 계산하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법에 의해 여러가지 비정현파에 대한 추력 및 전류 특성을 계산한 결과, 시간 고조파 성분의 영향으로 해당 고조파에 의한 합성 리플이 발생함을 확인할수있었다. 본논문에서 제안한 방법은 서보용 기기에서와 같이 순시적인 특성의 정확한 계산이 필요한 분야에서 효과적으로 적용될수 있을것이다.

#### 참고문헌

- [1] JMD Murphy, 'Power Electronic Control of AC Motors' 1988.
- [2] A.Konrad "Integrodifferential Finite Element Formulation of Two-Dimensional Steady-State Skin Effect Problem" *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.18, no. 1, pp. 284 - 292, January 1982.
- [3] Dal-Ho Im and Chang-Eob Kim, "Finite element force calculation of a linear induction motor taking account of the movement" *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.30, no. 5, pp.3495 -3498, September 1994.
- [4] R.L.Russell and K.M.Norsworthy, "Eddy current and wall losses in screened rotor induction motors," *Pro. IEE*, vol. 105A, p.163-175, 1958.
- [5] K. Reichert, H. Freundl and W. Vogt, "The calculation of forces and torques within numerical magnetic field calculation method," *COMPUMAG*, 1976.