

SLIM의 End Effect 분석 및 저감대책

임달호*, 윤상백*, 김태형*, 장석명**, 신홍교***
 * 한양대학교 전기공학과 ** 충남대학교 전기공학과 *** 경상대학교 전기공학과

A Study on Reducing End Effect of SLIM

Dal-Ho Im*, Sang-Baek Yoon*, Tae-Hyeong Kim*, Seok-Myeong Jang**, Heung-Gyo Sin**
 *HanYang Univ. **Chungnam Nat'l Univ. ***Kyungsang Nat'l Univ. Electrical Eng.

Abstract :

In Linear Induction Motor(LIM), the end effect is caused by the abrupt change in the airgap magnetic reluctance at both ends of the machine. Especially, in high speed, it has an adverse effect on various characteristics of LIM such as thrust, efficiency, power factor, etc.

In this paper, we analyze the end effect, and describes the method to reduce end effect essentially and decrease the secondary material cost.

1. 서론

선형 유도전동기(LIM : Linear Induction Motor)는 직접 직선 추력을 발생하므로 직선 운동이 필요한 곳에서는 매우 능률적이어서, 공장내 반송장치 및 공장 자동화기기등의 액츄에이터등과 자기부상열차등의 고속교통수단용에 적용되어 각광을 받고있다. 그러나, 회전기와는 달리 그 기계적 구조에 기인하는 단부가 존재하게 되어 이로인해 단부효과(End Effect)의 영향이 발생하게되고 특히 고속 및 초고속용 선형 유도전동기에 있어서는 그 영향이 상당히 심각하므로 이에 대한 세밀한 분석과 그 결과로부터 적절한 보상 및 저감 대책이 필요하다.

본문에서는 편축식 선형 유도전동기(SLIM)을 대상으로 모터의 각 변수가 단부효과에 미치는 영향을 1차원 해석법과[1], 2차원 해석에 의한 근사특성 계산식으로[2] 분석하여 단부효과를 근본적으로 저감 시킬 수 있는 대책에 대해 알아보고, 이를 시뮬레이션을 통해 보다 세밀하게 분석하여 단부효과를 최소화 시키기위한 모터 설계시 도움이 될 수 있는 설계 데이터를 제시하였다.

2. 단부효과의 분석

SLIM에 있어서의 단부효과는 자기회로의 불연속에 의한 공간 불평등에 기인하는 정적 단부효과와 모터의 양 끝단에서 자속의 공간적 급변에 의해 2차도체판에 와전류가 발생하여 모터의 전반적인 특성을 저하 시키는 동적 단부효과로 나눌 수 있는데 일반적으로 고속 선형전동기에서는 정적 단부효과에 비해 동적 단부효과의 영향이 지배적이다.

단부효과의 분석을 위해 그림. 1과 같이 모든 전류성분은 z축으로만 흐르고, 2차축의 운동방향은 x축으로만 존재하며, 1차축 코어의 투자율은 무한하다는 가정을 두고 공극에서의 계 방정식을 구하면 식 (1)로 표현 할 수 있다[1].

$$\frac{\mu_0}{\mu_0} \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} - \frac{v_s}{\rho_s} \frac{\partial b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial b}{\partial t} = \frac{\partial j_1}{\partial x} \quad (1)$$

여기서 g 는 공극 길이, v_s 는 2차도체판의 운동속도, ρ_s 는 2차도체판의 표면저항률을 의미하며 각 영역사이의 경계조건을 적용하여 위 식 (1)의 계 방정식의 해를 구하게 되면 식 (2)를 유도할수 있다.

$$b(x,t) = B_{ms} \exp(j\omega t - \frac{\pi}{\tau} x + \delta_s) + B_{me1} \exp(-\frac{x}{T_{e1}}) \exp(j\omega t - \frac{\pi}{\tau_e} x + \delta_1) + B_{me2} \exp(\frac{x}{T_{e2}}) \exp(j\omega t + \frac{\pi}{\tau_e} x + \delta_2) \quad (2)$$

식 (2)에서 우변 첫항은 여자전류 j_1 과 δ_s 의 위상차를 가지며, 동기속도($V_s = 2\tau f$)로 진행되는 정상자계성분이고, 둘째, 세 항은 입구단과 출구단에서 자속의 공간적 급변에 의해 발생하는 단부효과성분(입사파와 반사파)이다. 여기서 $\tau_e = \tau(1-s)$ 는 단부효과파의 극간격음, T_{e1} 과 T_{e2} 는 감쇄시정수를 의미한다.

일반적으로 출구단쪽의 단부효과파(반사파)의 감쇄시정수 T_{e2} 는 속도가 클수록 아주 작은 값이되고 따라서 이 파의 모터 내부로의 침투 깊이는 무시 가능하므로 식 (2)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$b(x,t) = B_{ms} \exp(j\omega t - \frac{\pi}{\tau} x + \delta_s) + B_{me1} \exp(-\frac{x}{T_{e1}}) \exp(j\omega t - \frac{\pi}{\tau_{e1}} x + \delta_1) \quad (3)$$

위 식 (3)에서 알수 있는바와 같이 공극에서의 자속은 여자전류에 의해 x방향으로 진행되는 정상자계성분(우변 첫항)과 이 자속과 $\delta = \delta_1 - \delta_s$ 의 위상차를 가지며 모터내부를 따라 시정수 T_{e1} 로 감쇄하며 진행되는 단부효과성분(입구단에서 발생하는 입사파)의 합성분으로 구성된다. 그림. 2는 이 두파의 각각의 성분과 그 합성분을 나타내는데 그림에서 알수 있듯이 모터내부의 공극 자속밀도 분포는 입구단과 출구단사이가 비대칭이 된다.

이처럼 선형 유도전동기에서는 회전기와는 달리 위와같은 단부효과의 존재로 인해 모터의 전반적인 특성(추력, 효율, 역률 등)이 악화되며, 그외에 수직력의 불균형으로 나타나는 dolphin effect, 공극에서의 누설증가, tranverse edge effect 등의 악영향도 존재한다. 그림. 3, 4는 SLIM의 근사특성 계산식을[2] 이용하여 단부효과가 없는 경우와 존재하는 경우에 대해 단부효과의 영향을 각각 추력과 효율면에서 살펴 본것인데, 그림에서 알수 있는바와 같이 저 슬립 구간에서 그 영향은 심각하다.

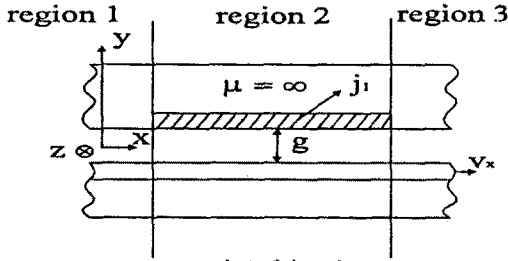


그림. 1 해석 모델

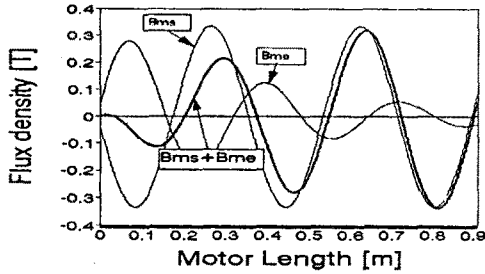


그림. 2 공극에서의 자속밀도 분포

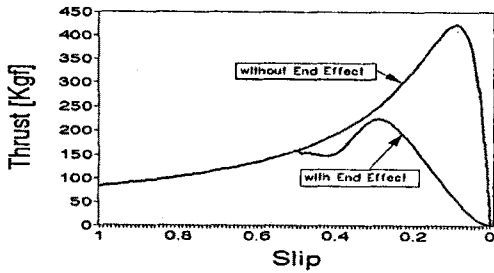


그림. 3 추력특성

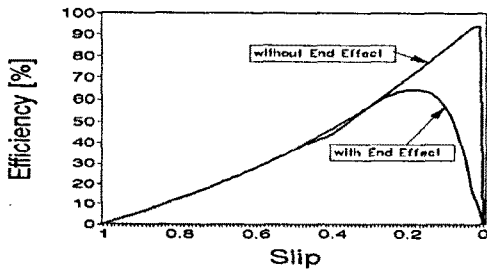


그림. 4 효율특성

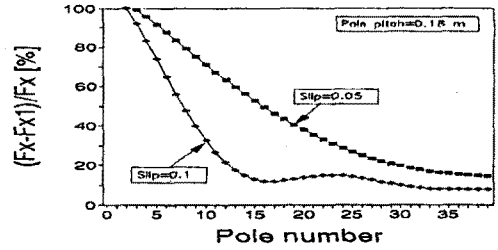
3. 단부효과와 저감대책

그림. 5a, 5b는 속도 300Km/h, 철심 적층폭이 175mm로 일정하고 극간격이 각각 180mm, 230mm의 경우에 극수(모터길이)를 변화시켰을때 단부효과와 영향을 나타낸것으로, y축은 단부효과에 의해 감소하는 추력성분(Fx-Fx1)을 단부효과가 없는 경우의 추력성분(Fx)에 대해 백분율로 표현한것이다. 이것으로부터 극수의 증가, 즉 모터의 길이가 길어질수록 단부효과와 영향이 감소해간다는 것을 알수 있고 또한 일정극수와 길이 이상에서는 변화가 없다는 것도 알수 있다[2].

그림. 6a, 6b와 그림. 7a, 7b는 알루미늄 두께, 오버행의 변화에 대한 추력과 전류의 관계를 나타낸것으로 각각이 작아질수록, 즉 2차등기 저항률이 증가할수록 입력전류는 감소하는 반면 추력은 증가되는 것을 볼수가 있는데 이는 입구단 단부효과와 전

압이 2차도체의 구조, 재질에 따라 결정되는 단부효과와 전류를 흐르게 하고 이것은 2차도체의 시정수에 따라 영향을 받기 때문에 단부효과와 영향이 감소함을 의미한다. 따라서 같은 단부효과와 전압이 발생하는 경우에는 2차축의 임피던스(특히 저항)가 클 때에 덜 영향을 받는다는 것을 알수 있다[3].

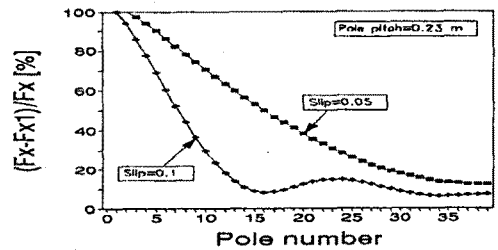
선형 유도전동기는 그 기계적 구조상 단부효과와 근본적인 제거는 불가능하지만 모터설계시 적절한 모터길이와 극수, 2차도체(알루미늄)의 오버행, 두께, 재질을 선택한다면 어느 정도 단부효과를 최소화시킬 수 있을것이다. 즉, 1차축으로는 가늘고 긴 모터, 2차축으로는 2차전류밀도(와전류밀도)의 허용치 범위에서 가능한한 저항을 크게 하는 것이 효과적인 저감대책이라 하겠다.



Fx = 단부효과가 없는 경우의 추력

Fx1 = 단부효과 존재시의 추력

그림. 5a 극수변화시의 단부효과 영향



Fx = 단부효과가 없는 경우의 추력

Fx1 = 단부효과 존재시의 추력

그림. 5b 극수변화시의 단부효과 영향

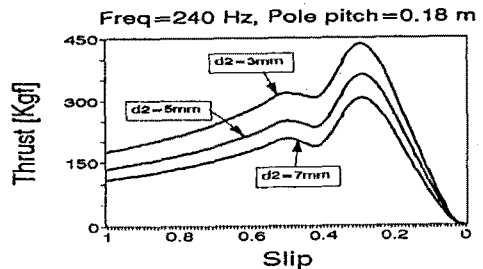


그림. 6a 알루미늄 두께변화시의 추력특성

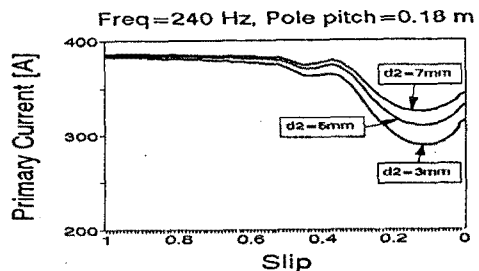


그림. 6b 알루미늄 두께변화시의 전류특성

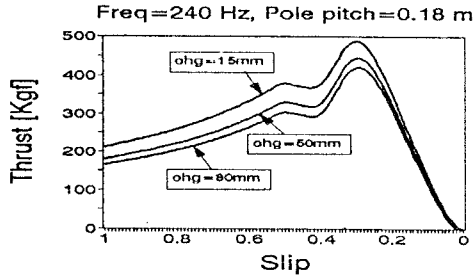


그림. 7a 오버행 변화시의 추력특성

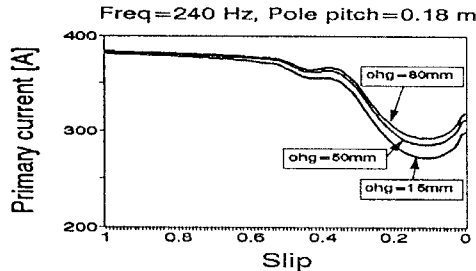


그림. 7b 오버행 변화시의 전류특성

4. 시뮬레이션 및 분석

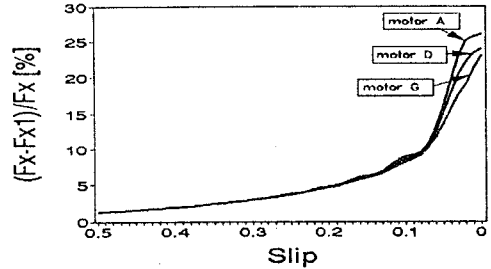
아래의 표. 1은 기존의 설계된 정격속도 300 Km/h, 극 간격 300 mm, 알루미늄 저항률 $3.3 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 의 모터에 대하여 1차 철심 적층폭, 알루미늄 두께, 오버행을 각각 변화시켰을때, 정격치에 타당한 경우를 선택하여 모터의 전반적인 특성을 나타낸 것이다. 각 파라미터의 기호와 단위는 표. 2에 제시하였다.

표. 1과 그림. 8에서 보는 것과 같이, 모터 A에서 H로 갈수록 단부효과의 영향(α)이 줄어들고 있는 것을 볼 수가 있는데 이는 2차 등가저항률의 증가로 인해 단부효과파의 시정수가 작아져 이 파의 모터내부로의 침투깊이가 감소함에 기인하는 것으로 사료된다. 하지만 모터 B이하에서는 단부효과의 영향은 줄어드는 반면 공극 자속밀도와 치 자속밀도 그리고 수직력은 오히려 증가하고 있는데, 이는 철심 적층폭의 감소에 따른 것으로 분석할

표. 1 1차 적층폭, 알루미늄 두께, 오버행 변화시의 모터 특성.

모터	d_2	h	c	추력(Kgf)	효율(%)	KVA
A	3	250	17	1762.01	88.71	1618.7
B	3	240	16	1761.80	88.72	1618.3
C	3	230	15	1758.22	88.73	1614.8
D	3	220	15	1764.54	88.74	1620.6
E	3	215	14.5	1759.90	88.74	1616.3
F	3	210	14	1754.12	88.75	1610.9
G	3	200	14	1755.08	88.75	1611.7
H	3	190	14	1753.40	88.74	1610.2

모터	Bm	Bt	수직력(Kgf)	α	β	γ
A	0.22	1.28	1354.59	8.92	0.77e-07	94.7
B	0.23	1.35	1505.17	8.79	0.81e-07	90.7
C	0.24	1.42	1676.73	8.64	0.85e-07	86.7
D	0.25	1.49	1858.24	8.54	0.89e-07	83.3
E	0.26	1.57	1966.17	8.45	0.92e-07	81.3
F	0.26	1.58	2081.33	8.37	0.95e-07	79.3
G	0.28	1.70	2322.30	8.25	0.99e-07	76.0
H	0.29	1.80	2600.20	8.11	0.11e-06	72.7



F_x = 단부효과가 없는 경우의 추력

F_{x1} = 단부효과 존재시의 추력

그림. 8 각모터의 slip에 따른 단부효과 영향

수 있다. 이로부터 2차 등가저항률의 증가는 단부효과의 감소에 상당한 영향을 미침을 확인할 수 있고, 또한 알루미늄폭의 감소로 인한 재료비의 절감을 가져올 수 있음을 볼 수 있지만, 적절한 범위를 벗어나는 경우에 있어서는 단부효과는 감소하는 반면에 오히려 모터의 특성이 바뀔지라도 않을 수도 있다는 것을 알 수 있다.

따라서 고속 선형 유도전동기의 설계시, 모터의 전반적인 특성을 만족하는 범위에서 이에 대한 고려가 충분히 이루어진다면 단부효과에 의한 악영향은 줄일 수 있으리라 본다.

표. 1에서 γ 로 주어친 값은 $(h+2c)/d_2$ 의 비로써, 2차도체 저항에 대한 제한을 두고자 일반적인 저항표현식으로 부터 유도된 것이다. 사실 이 비는 어떠한 전기적, 물리적인 의미는 가지고 있지 않지만, 시뮬레이션에 의한 결과 정격 추력 1700-1800 Kgf, 정격 속도 200-300 Km/h급의 모터에서는 대략 80 근방의 값이 어느정도 타당함을 알 수 있었다. 따라서 이를 모터 설계시 고려사항으로서 이용한다면 다소 유용하리라 사료된다.

표. 2 표. 1에서 사용된 각 파라미터의 기호와 단위.

symbol	parameter	unit
d_2	알루미늄 두께	mm
h	1차 철심 적층폭	mm
c	오버행	mm
Bm	최대 공극자속밀도	T
Bt	최대 치 자속밀도	T
α	단부효과 영향	%
β	2차 등가 저항률	$\Omega \cdot m$
γ	$(h+2c)/d_2$	

5. 결론

본 논문에서는 선형 유도전동기에 있어서의 단부효과에 대한 분석과 그 저감 대책에 대해서 살펴 보았다.

단부효과를 본질적으로 감소시키기 위해서는 모터 길이는 가능한 길게 하여야 하며, 알루미늄의 두께와 오버행은 2차도체 전류의 허용치 범위에서 작게 하여야 함을 알 수 있었다. 따라서, 고속 선형 유도전동기의 설계시 이를 충분히 고려한다면 단부효과의 영향을 감소시킬 수 있는 것은 물론, 2차도체의 재료비도 절감시킬 수 있음을 확인 하였다.

참고문헌

- [1] Sakae Yamamura, Theory of Linear Induction Motors, University of Tokyo Press, 1978.
- [2] S. Nonaka, "片側式 リニア インダクション モータ의 近似特性 計算式について", Trans. IEE Japan, vol. 102-B, pp.565 - 572, 1982.
- [3] S. Nonaka and T. Higuchi, "On the design of single-sided linear induction motors for propulsion of maglev vehicles" in Proceedings of International Conference on Maglev '85, pp.45 - 52, 1985.

* 이 연구는 한국과학재단 연구비 지원에 의한 일부 결과임.
(과제번호 92-47-00-02)