

자기부상열차용 유도형 리니어모터의 개선설계

장석명, 이성호, 조홍제*, 성호경*, 김봉섭*
 충남대학교 전기공학과, 한국기계연구원*

Improvement of the Characteristics of Linear Induction Motor

S.M. Jang, S.H. Lee, H.J. Cho*, H.K. Sung*, B.S. Kim*
 Chungnam Nat'l Univ. KIMM*

Abstract - This paper review the effects of the primary length, number of pole and stack width on the efficiency and power factor in linear induction motor. The effects of change of the primary current density on the primary weight, loss and temperature rise is investigated. As the criterion of goodness for SLIM's, the motor weight is considered.

1. 서론

자기부상 열차에 사용되는 리니어모터는 구조적으로 수직력이 크게 발생하게 되어, 공극의 길이를 십 수 mm 정도로 취해야만 하기 때문에 회전형 유도기에 비하여 역률특성이 나쁘다. 또한 부상 시스템에 부담을 작게 하기 위하여, 수직력이 거의 뺏이 되는 슬립주파수로 운전을 하므로써, 정격슬립이 커지므로 낮은 효율특성을 보인다. 이로 인해 리니어모터는 회전형 유도기와 비교하여 소비전력이 크게 되어, 리니어모터의 설계에 있어서 효율특성의 개선이 큰 과제로 남아 있다.

또한 자기부상 열차의 추진을 위해 사용되는 리니어모터의 중량은 재료비 및 부상 시스템의 부담과 직결되므로 요구되는 사양을 만족하면서 중량을 최소화하는 설계가 절실히 요구된다.

이러한 점을 감안하여 본 논문에서는 추진체로 사용되는 리니어모터의 중량 최소화를 만족하는, 개선된 리니어모터 설계 파라미터를 구하고자 한다.

2. 개선설계

2.1 설계과정

그림 1은 설계하고자 하는 LIM의 구조를 나타내며, 그림 2는 설계를 위한 흐름선도를 각각 나타낸다. 우선 요구사양을 만족하는 LIM의 초기설계 파라미터를 구한 후, 최적화 알고리즘에 의해 고효율 및 경량화를 만족하는 최적 설계 파라미터를 재 산정한다. 재 산정된 설계 파라미터를 갖는 LIM의 특성은 공간고조파 해석법 및 유한요소해석법 등을 통해 초기 요구사양에 대한 부합성 여부와 실제작 가능성 여부를 판단하여, 최적화된 설계 파라미터의 타당성을 판단하게 된다.

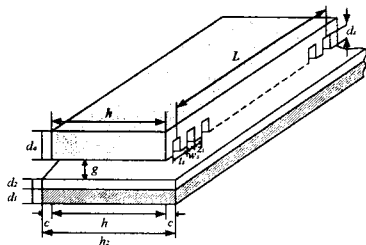


그림. 1 lim의 기하학적 구조

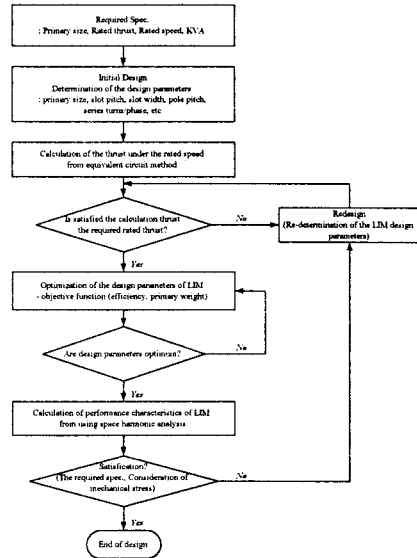


그림. 2 LIM 설계과정

2.2 해석프로그램 검증

가) 사례 1

그림 3은 현재 기계연구원이 보유한 LIM의 슬립주파수에 대한 추력 및 수직력 시험 결과와, 그림 2의 설계과정에서 해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 제작·시험 중인 LIM의 사양을 토대로 해석된 결과를 상호비교한 그림이다.

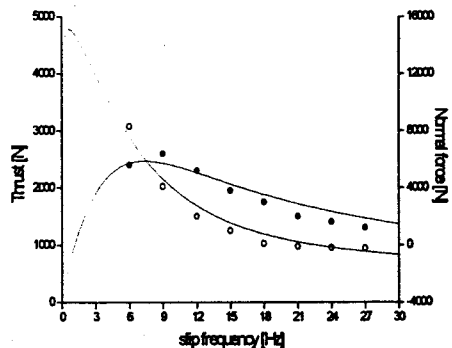


그림. 3 슬립주파수에 대한 추력 및 수직력특성

나) 사례 2

그림 4, 그림 5, 그림 6은 현재 본 연구실이 보유하고 있는 Arch형 LIM의 속도에 따른 1차측 전류, 추력 및 수직력 특성시험 결과와 해석결과를 각각 비교하여 도시한 것이다.

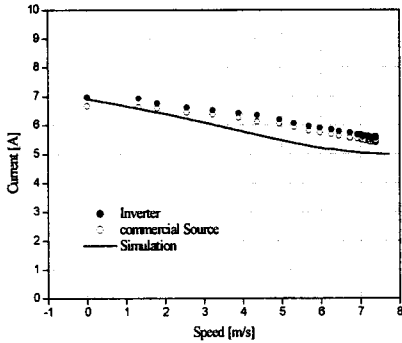


그림. 4 속도에 따른 전류 특성

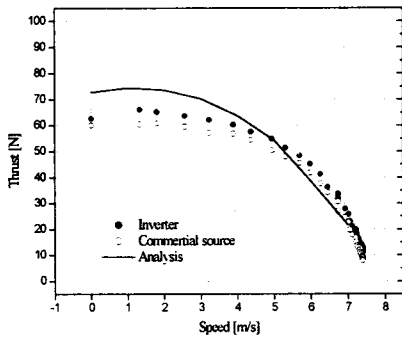


그림. 5 속도에 따른 추력특성

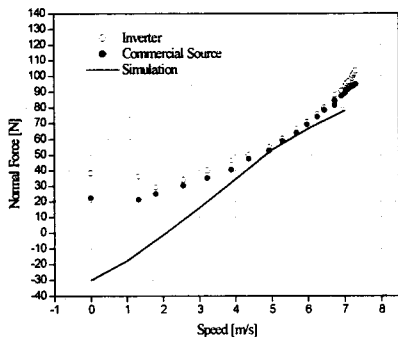


그림. 6 속도에 따른 수직력특성

3. 개선 설계를 위한 검토

비선형 최적화 기법을 도입하여 LIM 설계 파라미터 중, 극수와 적층폭이 효율개선에 미치는 영향을 검토하였다. 즉, 목적함수에 효율 및 중량을 선택하고, 제약조건으로

$KW/KVA \geq 35\%$, 치차속밀도 $B_m \leq 2T$, 온도상승 $\theta \leq 120^\circ$, 모터길이 $L \leq 1.8$ or 2.5 , 철심적층폭 $h \leq 280$ or $300mm$, 정격시의 수직력/정격추력의 비 $F_{zn}/F_{zn} \leq 3$ 를 선택하였다[1][2].

1) 극수의 영향

1차측 길이를 2.5m, 폭을 300mm로 제한 하였을 경우, 극수 p 를 4,6,8,10으로 증가하면 극수의 증가에 따라 폴피치 τ 가 감소하기 때문에, 코일 엔드부에서의 1차저항과 코일단 누설리액턴스가 감소하고, 또한 극수의 증가에 따라 1차측 길이가 증가하기 때문에 단부효과의 영향이 경감되어 효율이 증가하는 방향으로 향한다.

1차측 길이는 극수가 4,6,8 일 경우 상한치 2.5m까지 길어지지 않는데 이는 극수마다 효율을 최대한으로 하는 폴피치 τ 가 존재하기 때문이다.

1차측 자속이 2차측을 쇄교하기 위해 충분한 폴피치 τ 가 필요 ($\tau/g = 20\sim30$ 정도)하다.

극수를 계속 증가시키면 폴피치의 감소에 의해 $\tau/g = 20\sim30$ 를 만족하지 못하게 되며, $v_s = 2\tau f_1$ 에서 주파수 f_1 도 증가하기 때문에 무효전력이 증대되어 역률이 악화된다.

단위용량당 출력(역률×효율)에 제약을 설정하고 있으므로, 설계는 무효전력의 증가를 억누르는 방향을 향한다. 무효전력 Q 는 공극자속밀도 B_m 의 제곱에 비례하므로 pbh 를 변화시키지 않고 무효전력을 줄이기 위해 공극자속밀도가 감소되도록 정격슬립 s_n 이 커지고, 효율이 감소한다.

2) 1차측 폭 h 의 영향

h 가 증가하면 무효전력 Q 가 증가하지만, 설계는 모터길이 pr 와 2차 도체판 두께 d_2 를 변하게 하지 않고 Q 를 일정하게 유지하기 위해 B_m 을 감소하는 방향으로 향한다. 따라서 h 증가시켜도 $B_m^2 h$ 는 거의 일정하게 유지되지만, h 를 증가하면 2차 도체판의 등가체적저항을 ρ_{2e} 가 감소하기 때문에, P_0 를 일정하게 유지하기 위하여 정격슬립 s_n 이 작아지게 되고, 효율이 향상된다. 그런데 h 가 커지면 1차 저항이 증가하여 1차측 동손 증가를 초래함으로써 인해 효율 향상이 크지 않다.

3) 1차측 전류밀도에 따른 중량변화

그림 7과 1차측 전류밀도에 따른 중량변화를 나타낸 그림이다. 그림 7에서 1차측 전류밀도의 증가에 따라 코일의 단면적이 감소하고 이에 따라 슬롯 깊이 또한 감소하므로, 1차측 중량이 감소하게 된다.

4. 설계결과

1) 설계요구사항

- Thrust : 4500 [N]
- RMS Voltage(line to line) : 550 [V]
- Break point speed : 35 [km/h] = 9.7 [m/s]
- Dimension
길이 : Max. 2200 [mm]
적층폭 : 220 [mm]

표 1은 설계요구사항 및 3절에서 검토된 사항을 토대로 설계된 LIM 설계 파라미터이다.

5. 결 론

본 논문에서는 LIM 설계 파라미터 중, 1차측 길이, 극수, 적층폭이 효율 및 역율특성에 미치는 영향과 전류밀도에 따른 1차측 중량변화에 대한 특성 검토를 토대로, 추진체로 사용되는 리니어모터의 낮은 효율특성 향상 및 중량 최소화를 만족하는, 개선된 리니어모터 설계 파라미터를 구하고자 하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] Tsuyoshi Higuchi, Sakutarō Nonaka, Masahiro Ando, "On The Design of High Efficiency Linear Induction Motors for Linear Metro" T. IEE Japan, Vol. 120-D, No. 8/9, 2000
- [2] 임달호, 이철직, 박승찬, "등가회로법과 SUMT를 이용한 편축식 선형 유도전동기의 설계 변수 최적화", 대한전기학회 논문지, 42권 5호, pp.20-28, 1993. 5.

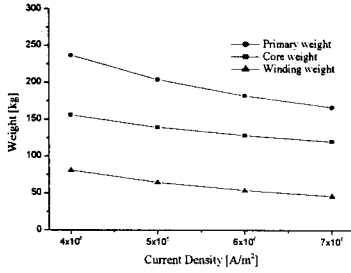


그림. 7 전류밀도에 따른 1차측 중량특성

2) 해석결과

그림 8과 그림 9는 표 1에 제시된 설계 파라미터를 토대로 슬립주파수에 대한 추력, 수직력특성 및 슬립에 따른 1차측 전류특성을 각각 나타내며, 그림 10은 슬립에 대한 역율 및 효율특성에 관한 해석결과이다.

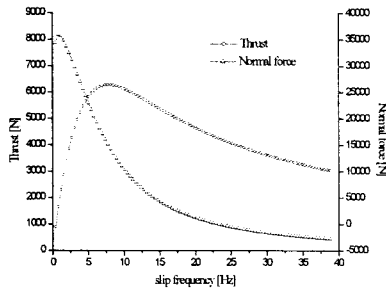


그림. 8 슬립주파수에 대한 추력 및 수직력특성

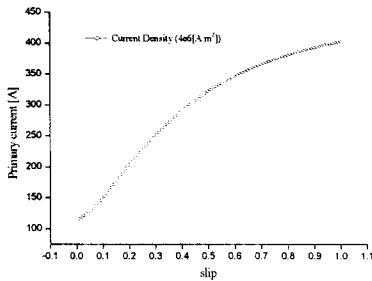


그림. 9 슬립에 따른 1차측 전류특성

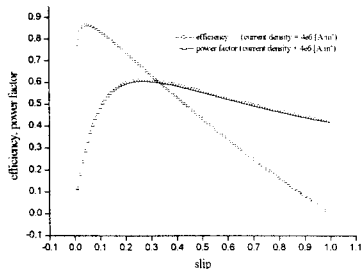


그림. 10 슬립에 따른 역율 및 효율특성

표 1 설계파라미터

Parameter	Symbol	Unit	Value (Al winding)
Primary voltage	$\sqrt{3} V_1$	V	384
Slip Frequency	$s f_1$	Hz	$0.5 \cdot 38.8 = 19.4$
Primary current	I_1	A	322
Thrust	F_x	N	4736
Normal force	F_n	N	1520
Primary length	L	mm	2204.4
Number of phases	m		3
Number of poles	p		8
Pole pitch	τ	mm	250
Stack height	h	mm	225
Primary depth	d_o	mm	114
Slots/pole/phase	q		3
Slot pitch	t_s	mm	28
Slot width	w_s	mm	20
Short pitch factor	β		7/9
Series turns/phase	N_{ph}	turns	120
Primary total weight	G_{total}	kg	237
Mechanical clearance	g	mm	11
Aluminium sheet thickness	d_2	mm	6
width	c_1	mm	250
Back-iron plate thickness	d_1	mm	16
Power factor	$\cos \phi_1$	%	55.75
Efficiency	η	%	43.38
Temperature rise	θ	$^{\circ} C$	112.8