

자기부상열차용 편측식 선형 유도전동기의 설계특성 검토

Investigation of Design Parameters of Single Sided

Linear Induction Motor for MAGLEV

박영호*
Park, Yeong-Ho

최열준**
Choi, Yeol-Jun

김정철***
Kim, Jeong-chul

최종목****
Choi, Jong-Mook

ABSTRACT

Linear metro with single sided linear induction motor is applied to the urban transit system because of non adhesion drive. But linear induction motor is required to reduce the energy consumption to maximize efficiency of LIM.

In this paper, design requirements such as pole pitch, motor length, air gap, overhang length and the material of secondary sheet are investigated as major parameter of SLIM. It is effective for increasing the efficiency to adopt the copper reaction plate and decrease the mechanical air gap as small as possible.

1. 서론

선형 유도전동기(LIM)를 적용한 열차는 차량 높이 즉, 터널 단면적을 작게 할 수 있기 때문에 건설비를 줄일 수 있고, 특히 비 점착 구동이 가능하므로 급 구배, 급 곡선 주행이 가능하므로 노선 길이의 단축뿐만 아니라 승차감 향상, 소음 저감 등의 이점이 있기 때문에 자기부상열차 및 철제 차량 지지의 경량 전철 등에 실용화 되어 신도시 교통 수단에서의 중요성이 높아지고 있다. 그러나 LIM을 적용한 차량은 회전형 모터로 구동되는 종래의 지하철과 비교하여 소비 전력이 크므로 LIM의 설계에 있어서 특성이 양호한 LIM을 어떻게 설계하여 제작하는가가 중요한 과제가 되었으며 이를 위한 설계 조건의 정립이 중요한 부분을 차지하고 있다. 본 논문에서는 효율을 향상과 관련된 설계 파라메타 및 조건에 대해서 검토한다.

* (주)로템 기술연구소 선임연구원, 비회원

** (주)로템 기술연구소 주임연구원, 비회원

*** (주)로템 기술연구소 연구원, 비회원

**** (주)로템 기술연구소 수석연구원, 비회원

2. 도시형 자기부상 열차용 LIM

다음 그림 1은 국책 과제로 개발되고 있는 도시형 자기부상열차를 나타내고 있으며, 차량은 2량 1 UNIT로 편성되어 있다. 자기부상열차의 추진용 선형 유도전동기(LIM)은 1 UNIT에 총 12대가 장착되어 있으며 1대의 추진제어 인버터에는 6대의 LIM이 연결되어 있다. 그림 2는 LIM의 외형을 나타내고 있으며, 3대의 LIM이 직렬 연결되어 최종 Y 결선 처리되며 1대의 LIM은 1시간 정력으로 45kW급이다.



그림 1. 도시 통근형 자기부상 열차

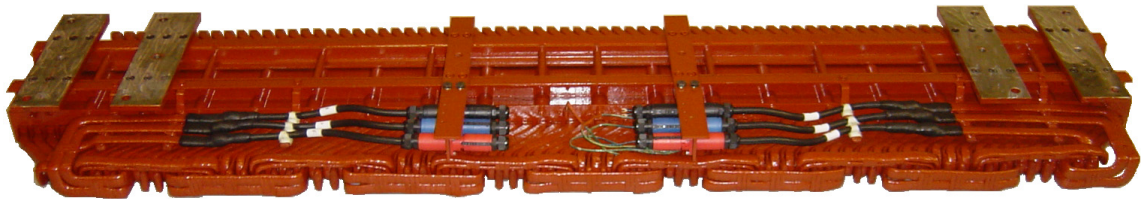


그림 2. 자기부상열차용 선형 유도전동기(LIM)

3. 편측식 LIM의 구조 및 설계 사례

다음 그림 3에 단 1차형 편측식 LIM의 구조를 나타내며, 표1에는 편측식 선형 유도전동기(LIM)를 적용하고 있는 대표적인 차량인 자기부상열차와 철제 차량 선형 모터 적용 전동차에 사용된 LIM의 주요 제원, 사용 기호와 함께 설계 파라미터를 비교하였다.

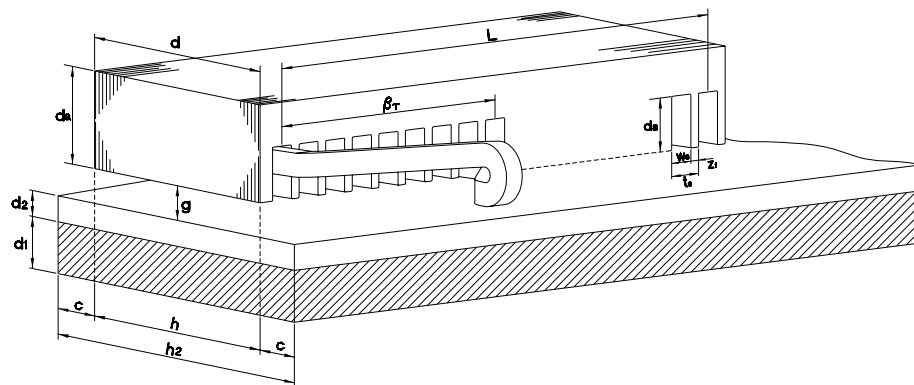


그림 3. 편측식 LIM의 구조 개념도

자기부상열차용 LIM의 고정 파라메타로 출력 45kW, 기계적 공극 $g=12\text{mm}$, 상수 $m=3$, 병렬회로수 $a=1$, 1코일의 권수 $N=5$, Back Iron 철판의 두께 $d_1=36\text{mm}$, 2차 도체인 알루미늄 판 $d_2=6\text{mm}$ 를 적용하였다. 철제 차륜 Linear Motor Car용 LIM의 설계 조건은 출력 120kW, 기계적 공극 $g=12\text{mm}$, 상수 $m=3$, 병렬회로수 $a=1$, 1코일의 권수 $N=9$, Back Iron 철판의 두께 $d_1=22\text{mm}$ 를 적용하였으며, 출력 및 성능 향상을 위해 2차 도체로는 역행 및 제동 구간에는 동판 $d_2=5\text{mm}$ 를 적용하고 있다.

2차 도체로 알루미늄 판을 적용하고 있는 자기부상열차용 LIM의 경우 동판을 사용하고 있는 철제 차륜 전동차의 LIM과 비교하여 상대적으로 모터의 슬립이 크고, 효율이 떨어지는 특징을 갖고 있다. 또한 선형 모터는 회전형 모터와 비교할 때 상대적으로 큰 공극 및 단부 효과로 인해 어느 정도의 특성 저하는 피할 수 없으며 주어진 조건에서 어떻게 최대의 성능을 갖도록 설계하는가가 중요 관심 사항이다. 따라서 주어진 조건에서 최대의 성능을 나타낼 수 있는 LIM의 설계 조건에 대해서 검토한다.

4. 성능 향상을 위한 설계 특성 검토

x_m 의 대소는 LIM의 양부를 결정하는 주요 요소이며 다음 (1)식 또는 (2)식은 LIM의 특성을 좌우하는 가장 중요한 관계를 나타낸다.

$$x_m = K_a \coth \frac{\pi}{\tau} (g_e + d_2) \text{ ----- (1)}$$

$$= K_a / \tanh \frac{\pi}{\tau} (g_e + d_2) \text{ ----- (2)}$$

여기서 편측식 LIM에서는

$$K_a = \frac{8mhf_1\mu_0(k_w N_{ph})^2}{p} \text{ ----- (3)}$$

윗 식에서 알 수 있는 바와 같이 g'/τ 가 작은 만큼 x_m 가 크게 되고, 여자 전류가 작게 되어 역율이 좋게 된다.

알루미늄 또는 동의 비자성 도체 판($\mu_2 = \mu_0$)의 경우, 그 두께 d_2 는 공극에 합산된다. 따라서 이를 포함한 등가 공극을 g' 이라고 하면,

$$g' = g_e + d_2 \text{ ----- (4)}$$

LIM에서는 단부 효과 대책으로 가능한 한 모터의 길이를 길게 하여 SLIM을 제작하도록 제안하고, GAP 길이가 큰 LIM에서는 여자 리액턴스가 크게 되도록 Pole Pitch를 가능한 한 크게 설계하도록 제안되어 왔다.

표 1. 주요 설계 파라메타

구분	항 목	단위	MAGLEV	Linear Motor Car	비 고
차량 조건	차량편성	-	2M	6M	
	가속도	m/s ²	1.0		
	편성당 모터수량	Set	12	12	
LIM 정격	출 력	kW	45	120	
	선간 전압	V	370	1100	
	1차 전류	A	195	170	
	용 량	kVA	125	396	
	주파수	F ₁ (Hz)	33	21	
	슬 릫	s(%)	36.4	14.3	
	슬립주파수	F ₂ (Hz)	12	3	
	기동추력/LIM	(N)	4,800	14,630	
	동기속도	V _s (km/h)	59.9	42.5	$V_s = 2\tau f$
	정격속도	V _r (km/h)	38.1	36.4	$V_r = V_s(1 - s)$
	최대속도	(km/h)	110	70	
1차 철심	모터 길이	L(mm)	2221	2476	
	극수	p	8	8	
	Pole Pitch	τ (mm)	252	280.8	$\tau = t_s \times 9$
	철심 적층길이	h (mm)	220	300	
	철심 높이	d_a (mm)	71	124	
	매극매상 슬롯수	q	3	3	
	슬롯 Pitch	t_s (mm)	28	31.2	
	슬롯 폭	w_s (mm)	19	20	
	슬롯 깊이	d_s (mm)	46	79.5	
	치폭	z_t (mm)	9	11.2	
	총 슬롯수	N_{ss}	79(72)	79(72)	
1차 권선	상 수	m	3	3	
	단절율	β	7/9	7/9	
	코일당 턴수	N_{ct}	5	9	
	1상당 직렬 턴수	N_{st}	120	216	
2차측	Back Iron 두께	D ₁ (mm)	36	22	
	Reaction Plate 두께	D ₂ (mm)	6(알루미늄)	5(동판)	
	2차 도체판 폭	H ₂ (mm)	250	360	h+2c
	Overhang	C(mm)	15	30	

LIM은 1차와 2차의 지지 구조와 안전성 확보를 위해 회전형 유도전동기와 비교하여 공극 g 가 일반적으로 크게 된다. g 를 작게 할 수 없다면 Pole Pitch τ 를 크게 선정하면 좋다. 즉 거시적으로 볼 때 g 가 τ 에 대해서 상대적으로 작게 보일 수 있도록 설계하는 것이 바람직하다. 그렇지만, τ 의 크기도 아래와 같이 제약을 받는다.

- (a) 모터 길이 $L \cong p\tau$ 가 제한될 때, 극수 p 는 적어도 4극 이상이 바람직하다. 2극에서는 1차 권선 각 상의 상호 인덕턴스의 불평형이 크게 되고 각 상의 1차 전류 불평형을 일으켜 특성도 나쁘게 된다.
- (b) τ 는 모터의 폭(1차 철심의 적층 두께) h 에 대해서 그다지 크게 할 수 없다. h/τ 는 1정도가 바람직하다. 이유로 h 는 전자적으로 추력 및 역기전력의 발생에 유효하게 작용하지만, τ 가 크게 되면 1차 권선의 코일 엔드부가 길게 되어 1차 저항 r_1 , 1차 누설 리액턴스 x_1 이 커지는 것과 더불어 2차 도체 판의 Over hang c 도 크게 하지 않으면 등가 2차 도전을 σ_{2e} 가 작게 되고, 등가 2차 저항 r_{2e} 가 크게 되므로 결과적으로는 2차 도체 판 폭 h_2 도 크게 해야 된다.

또한, τ 가 크게 되면 자기회로의 Yoke 부를 지나는 자속량도 크게 되고, 1차 철심의 높이 d_a , 2차 Bark Iron의 높이 d_1 도 크게 해야 하므로 1차측 중량, 2차측 재료비도 높아지게 된다.

이상의 제약 조건이 있더라도 그림 4 (b)로부터 판단하여 $g'/\tau \leq 0.05$, 즉 $\tau/g' > 20$ 이 바람직하다. $g' = k_c g + d_2$ 를 놓고 보면 τ 는 g 의 적어도 25배 이상으로 설계하는 것이 바람직하다.

반대로 $g'/\tau = 1$ 에서는 $\tanh 3.142 = 0.996 \cong 1$, $\coth 3.142 = 1.004 \cong 1$ 로 되고, x_m 은 거의 최소로 된다. 이것은 $g' > \tau$ 되면 LIM의 자속은 2차 도체에 도달하기 전에 1차 철심의 옆극으로 거의 누설되어, LIM으로써의 기능은 없어지고 m 상 리액터가 되고 만다.

LIM은 일반적으로 기계적 공극 g 가 크기 때문에 x_m 가 작고, 아주 적은 경우에는 1차 누설 리액턴스 x_1 과 같은 정도로 되어 특성이 매우 좋지 않다고 여겨져 왔다.

5. 효율 개선을 위한 조건

모터의 효율 향상을 위해서는 회전기에서와 같이 LIM의 경우에도 가능한한 공극을 작게 설계하여야 한다. 그러나 최소 기계적 공극은 1차와 2차의 지지 기구와 주행상의 안정성으로부터 규제된다. 특히, 편측식 LIM의 수직력은 일반적으로 슬립이 큰 영역에서는 반발력, 슬립이 작은 영역에서는 흡인력으로 변화한다. V/f 일정으로 슬립주파수 제어를 하면, 수직력도 어느 값으로 설정될 수 있지만, MAGLEV(자기부상) 방식에서는 추력 특성과의 관계도 있어서 어려운 문제이다. 또한 저속 LIM에서 GAP이 적고, 자속밀도를 높게 설정하고 있는 경우에는 강한 흡인력을

발생하므로 지지 기구의 구성, 기계적 마찰손에 주의하여야 한다.

효율에 중요 영향을 미치는 또다른 요소인 2차 동손을 줄이기 위해 저항율이 적은 소재를 적용하면 비례추이에 따라 정격 슬립 s_n 이 작게 되고 효율이 증가한다.

2차 동손은 2차 도체 판에 발생하는 와전류에 의해 발생하고, 1차 동손에 비하여 상당히 크기 때문에 효율의 좋고 나쁨을 결정하는 중요한 요소이다. 2차 동손은 2차 도체 판의 재질, 두께, Overhang 뿐만 아니라 1차 측의 모터 길이, 모터 폭(철심 적층 두께), Pole pitch 및 슬립, 주파수 등에 따라 결정된다. 또한 SLIM의 자속밀도는 보통 0.5 ~ 0.6T로 작게 설계하기 때문에 철손은 회전형 유도전동기와 비교하여 작게 된다.

6. 결론

지하철을 포함한 도시 교통용 LIM의 설계에서 공극 길이가 큰 차량용 LIM의 단위 용량당의 출력을 크게 하기 위한 조건으로 Pole Pitch를 기계적 공극의 20 ~ 30배 정도로 설계할 것, 단부 효과의 영향을 줄이고 또한 2차 측 지상 설비 자재비를 저감하기 위해 모터 길이를 2 ~ 2.5m 정도까지 늘리며, 2차측 재질의 선정에 따른 특성에 미치는 영향을 검토한 결과 LIM의 소형화 및 효율 향상을 위해서는 역행 및 제동 구간에는 동 플레이트를 적용하는 것이 효율적임을 검토하였다.

참고문헌

1. 野中作太郎(平7), “都市交通用リニア誘導モータの等価回路 定數と特性計算式の検討, 電學論D, 115, 223~232
2. 野中作太郎(2000), “地下鐵用リニア誘導モータの高效率化について, 電學論D, 120, 1008~1014