

# 도시형 자기부상열차용 선형유도전동기의 경량화 설계

## Design for Weight Reduction of the Linear induction Motor for MAGLEV

박승찬\*      이원민\*\*      김경민\*\*      김정철\*\*\*      박영호\*\*\*      김국진\*\*\*  
Park, Seung-Chan   Lee, Won Min   Kim, Kyung-Min   Kim, Jung-Cheol   Park, Yeong-Ho   Kim, Kuk-Jin

---

### ABSTRACT

In this paper, the conventional linear induction motor(LIM) used in propelling the MAGLEV in Korea is redesigned in order to reduce its weight. The specifications of the newly designed model for base speed, acceleration, rated thrust and maximum output is respectively 45km/h, 4.0km/h/sec, 5,200[N] and 65 [kW]. Weight reduction effect of the LIM according to the change of pole number from 8 to 6 is shown. Equivalent circuit analysis considering end effect and finite element method are used for the analysis of the redesigned model. Finally the weight reduction ratio of the newly designed LIM to the conventional model, thrust, attraction force, line current, temperature rise, flux density distribution are presented.

---

### 1. 서 론

자기 부상 열차는 부상 마그네트의 부상력 부담 경감과 함께 부상에 필요한 전기에너지 저감을 위하여 경량화 설계가 중요하다. 최근 실용화를 위한 도시형 자기부상열차 차량의 주요 사양으로서 기준 속도는 45km/h, 가속도는 4.0km/h/sec, 선형유도전동기(LIM) 1대의 정격추력은 5,200 [N], 최대출력은 65 [kW]로 상향 조정되었으며, 중량의 대폭 감소가 요구되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 국내에서 개발되어 시험중인 기존의 자기부상열차용 선형유도전동기에 대하여 중량 감소를 위한 재설계를 행하여 도시형 자기부상열차 실용화 모델을 도출한다. 설계한 LIM의 특성 평가를 위하여 단부효과(end effect)를 고려한 등가회로 해석 및 유한요소법을 이용한다[1]-[3]. 최종적으로 기존의 LIM에 대한 중량 감소비와 추력, 수직력, 전류, 온도상승, 자속밀도 분포등의 주요 성능에 관한 해석 결과를 제시한다.

---

\* 동양대학교 철도운전제어학과 부교수, 정회원

E-mail : scpark@dyu.ac.kr

TEL : (054)630-1106 FAX : (054)630-1106

\*\* 동양대학교 철도운전제어학과 전기기기시스템 연구실, 정회원

\*\*\*(주)로템

## 2. 경량화 설계

경량화 설계를 위하여 base 속도를 40km/h에서 45km/h로 하였으며, 1차측 권선의 전류 밀도는 기존의  $5 \text{ A/mm}^2$  에서 약  $7 \text{ A/mm}^2$  로 증가시켜 설계하였다. LIM의 길이를 감소시키기 위하여 극수를 기존의 8극에서 6극으로 변경하였다. 기계적 공극 또한 12 mm에서 11mm로 변경되었다. 추력 일정 제어시의 슬립주파수는 12.4 Hz로 설정하여 base 주파수는 39.2Hz 로 결정하여 설계하였다.

경량화 설계시 고려한 성능개선 목표는 1) 최대 출력 65kW (기존모델 사양 55kW 대비 18% 증가) 2) 정격 추력 5.2kN (기존 모델 사양 4.8kN 대비 8.3% 증가), 3) 중량감소를 30% 이상으로 하였다.

그림 1은 기존 모델과 경량화 설계된 모델의 2차측 단면 구조를 비교한 것이다. 경량화 설계시에는 2차측 도체판 cap의 overhang 길이를 증가시켜 LIM의 transverse edge effect에 의한 등가 2차 저항을 감소시켰다.

또한 그림 2는 경량화 설계시 LIM의 주요 치수를 기존 모델과 비교한 것으로서 LIM의 1차측 길이는 기존의 2,221 [mm]에서 1,595 [mm]로 약 28% 감소하게 되었으며, 1차측의 총중량은 기존모델 173 [kg]에서 92 [kg]으로 되어 약 46.8 % 경량화 되었다.

표 1은 LIM의 주요 설계 파라미터를 나타내었으며, 표 2는 1차측 권선의 온도상승과 부하별 주요 특성을 계산한 것이다. 특성계산은 end effect를 고려한 등가회로 해석법을 이용하였다.

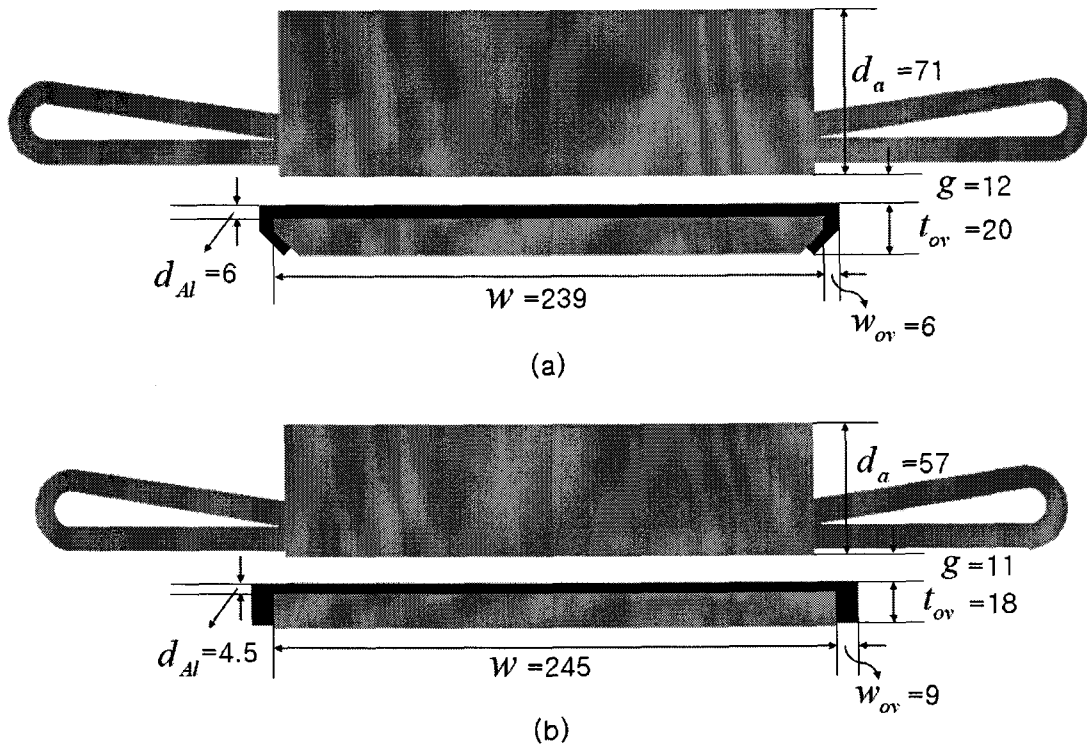


그림 1. LIM의 2차측 구조 비교 (a) 기존 모델 (b) 경량화 모델

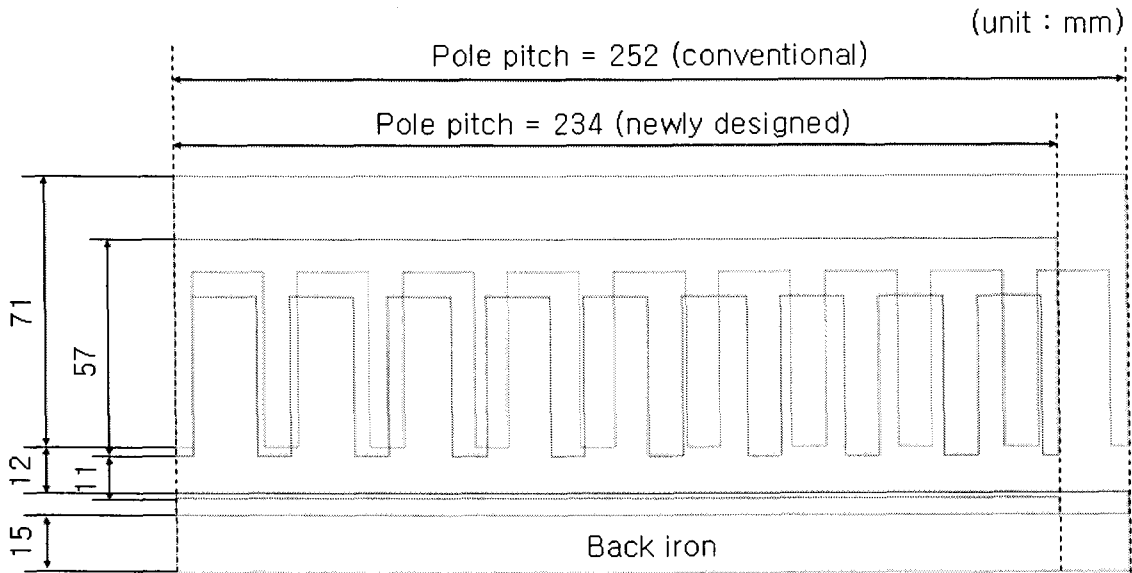


그림 2. 경량화 설계된 LIM의 1,2차측 주요 치수

표 1. LIM 설계 파라미터

구 분	항 목	단 위	기존모델	개선모델	비 고
LIM 정격	출력	kW	50.8	65.3	1시간 정격
	선간전압	V	367	367	
	1차전류	A	290	314	
	용량	kVA	184.4	200	
	주파수	$f_1$ (Hz)	34	39.2	
	슬립주파수	$f_2$ (Hz)	13	12.4	
	정격추력/LIM	N	4,800	5,200	
	동기속도	$V_s$ (km/h)	61.7	66	
	정격속도	$V_r$ (km/h)	38.12	45.17	
1차 철심	모터길이	mm	2,221	1,595	
	철심 적층길이	h (mm)	230	230	
	철심높이	$d_a$ (mm)	71	57	
	극수	P	8	6	
	총슬롯수	$N_{ss}$	79	61	
	매극매상 슬롯수	Q	3	3	
	극간격	$\tau$ (mm)	252	234	
	슬롯 피치	$t_s$ (mm)	28	26	
	슬롯 폭	$W_s$ (mm)	19	17	
	슬롯 깊이	$d_s$ (mm)	46	42	
	치 폭	$Z_t$ (mm)	9	9	
	1차철심 중량	kg	150.2	80	

(표 1 계속)

구 분	항 목	단 위	기존모델	개선모델	비 고
1차권선	단절율	$\beta$	7/9	7/9	
	코일당 턴수	$N_{ct}$	5	5	
	1상의 직렬턴수	$N_{ph}$	120	90	
	코일 저항률	( $\Omega m$ )	$2.75 \times 10^{-8}$	$2.75 \times 10^{-8}$	
	1차권선 저항	$R_1 (\Omega)$	0.0904	0.0741	75°C 에서 skin effect 고려하여 계산
	전류밀도	$J_1 (A/mm^2)$	5.13	6.93	
	1차측 누설리액턴스	$X_1 (\Omega)$	0.3253	0.2470	
	여자리액턴스	$X_m (\Omega)$	1.0419	0.9924	
	1차 권선 중량	kg	22.8	12	
LIM 중량	1차측 총중량 (절연물 중량제외)	kg	173	92	기존대비 46.8% 중량 감소
2차측	Back iron 두께	$d_1 (mm)$	15	15	
	Back iron 폭	$h_1 (mm)$	239	245	
	Reaction plate 두께	$d_2 (mm)$	6	4.5	
	Reaction plate cap 폭	$t_{ov} (mm)$	6	9	
	Reaction plate cap 두께	$w_{ov} (mm)$	20	18	
	2차측 저항	$R'_2 (\Omega)$	0.1946	0.1711	
	2차측 누설 리액턴스	$X'_2 (\Omega)$	0.1572	0.1747	
공극	공극길이	g (mm)	12	11	

표 2. 온도상승 및 부하별 특성

구 분	항 목	단위	기존모델				개선모델				비 고
온도 상승	1차측 권선 온도상승	°C	76				121				1시간 정격
부하별 특성	부하	%	50	75	100	125	50	75	100	125	기존 모델 : 125% 부하운전 불가능
	출력	kW	35.1	47.4	50.8	-	40.6	56.3	65.3	56	
	슬립	%	14.7	23.2	38.2	-	14.9	21.3	31.6	53	
	슬립주파수	Hz	5	7.89	13	-	5.84	8.35	12.4	20.8	
	입력전류	A	197	230	290	-	230	260	314	410	
	효율	%	67.9	62.3	48.4	-	68.3	65.1	55.6	21.5	
	역률	%	41.3	52.1	57.0	-	40.6	52.4	58.8	35.8	
	추력	N	2400	3600	4800	-	2600	3900	5200	6500	
	수직력	N	4684	3606	1463	-	5800	4930	3163	-291	

### 3. 경량화 모델의 특성 계산

기존 모델보다 약 46.8% 경량화 설계된 모델에 대하여 end effect를 고려한 등가회로 해석법을 이용하여 특성해석을 하였으며, 유한 요소법을 이용하여 전자계 해석을 행하였다. 그림 3 ~ 그림 6은 각각 주파수별 추력, 수직력, 전류, 용량대 출력비(kW/kVA)를 나타낸다(base 주파수인 39.2Hz까지는  $\sqrt{3} V_1/f_1 = const.$ ). 그림 7은 LIM이 45km/h 속도로 운전될 경우에 유한요소법을 이용하여 해석한 자속분포도이다. 이동자계가 1차측의 오른쪽 철심을 빠져나가는 출구단부에 있는 2차 도체판 및 back-iron에 end effect로 인하여 와전류가 길게 발생하고 있음을 알 수 있다.

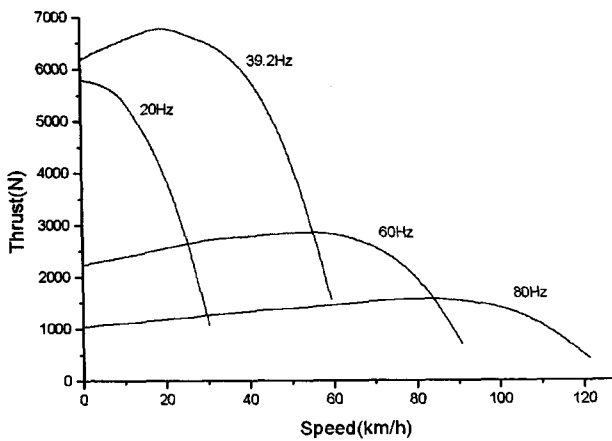


그림 3. 추력 특성

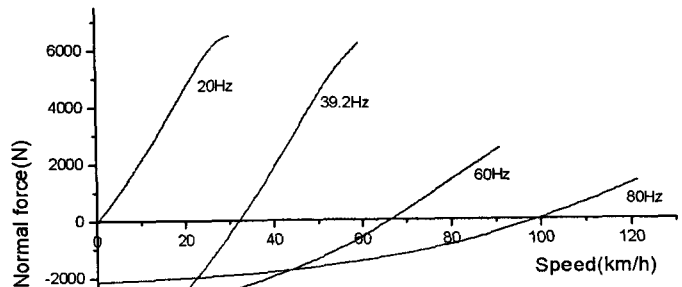


그림 4. 수직력 특성

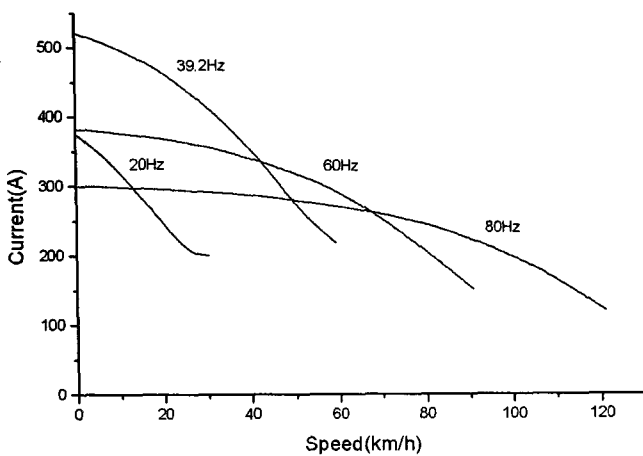


그림 5. 상전류 특성

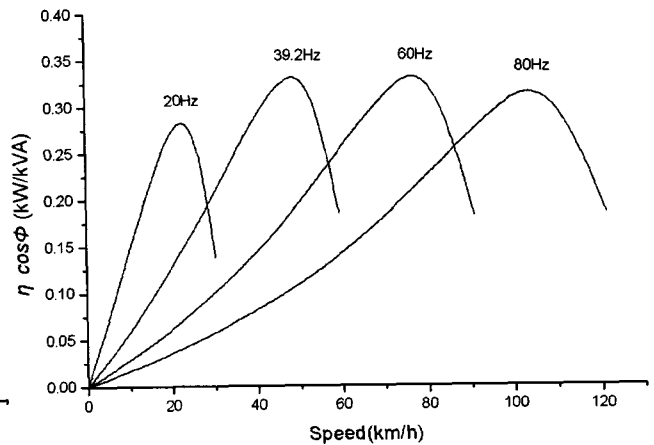


그림 6. 용량대 출력비

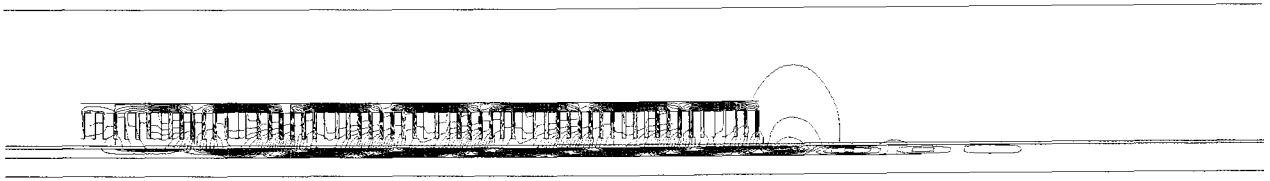


그림 7. 자속분포도(속도 : 45km/h)

#### 4. 결 론

본 논문에서는 우리나라 도시형 자기부상열차 추진용 선형유도전동기의 설계 목표인 최대출력 65 [kW], 정격추력 5,200[N], 최고설계속도 110 [km/h]을 만족하도록 하면서 기존의 선형유도전동기보다 중량을 대폭 감소시키는 경량화 설계를 행하였다. 기존 모델보다 전류밀도와 base 속도를 증가시키고 극수를 8극에서 6극으로 변경하였으며 공극길이와 2차측 도체판의 구조를 변경하였다. 그 결과 기존 모델보다 약 46.8%의 중량을 감소시킨 경량화 설계가 가능하였다. 경량화 설계시의 LIM 특성 계산은 end-effect를 고려한 등가회로 해석법과 유한요소법을 이용하였다.

본 연구는 건설교통부 건설교통기술연구개발사업의 연구비지원  
(과제번호 : T606A1510001-06A0154002211)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고 문헌

1. S. Nonaka and T. Highchi(1982), "Approximate equations for calculation of characteristics of single-sided linear induction motors", Trans. of IEEJ, vol.102-3, pp.565-573.
2. 임달호, 이철직, 박승찬(1993), "등가회로법과 SUMT를 이용한 편측식 선형유도전동기의 설계변수 최적화", 대한전기학회 논문지, 42권 5호, pp.20-28.
3. Seung-Chan Park, Won-min Lee, Kyung-Min Kim, Jung-Chul Kim and Yeong-Ho Park(2007), "Analysis of Linear Induction Motors for MAGLEV According to the Secondary Conductor Structure", Proc. of ICEMS'07, 2007. 10. 16