

경량전철 추진시스템용 Linear Induction Motor의 경량화

김기찬*, 이갑재, 이정일, 박정태, 권중록, 김중구
현대중공업 (주)

Light-Weight Linear Induction Motor for Light Railway Train

K.C. Kim*, K.J. Lee, J.I. Lee, J.T. Park, J.L. Kwon, J.K. Kim
Hyundai Heavy Industries. Co., Ltd

Abstract - In this paper, light-weight system of linear induction motor(LIM) for light railway train is presented, and is compared with former type of LIM. For the light-weight system without modification of motor size, the material of primary core(silicon steel) is changed with iron-cobalt alloy and the material of primary winding(copper) is changed with aluminium. The characteristics of LIM are analyzed. Specially, the air gap magnetic flux density distribution due to end effect is showed with motor velocity. we will present papers continuously through designing and testing a trial product.

1. 서 론

기존 지하철의 도심 접근시 과도 우회지역이나 지하철 취약지역 및 노선밀도가 낮은 도심지역에서는 노선이 짧고 수용용량이 적은 경전철을 배치하여 연계시키는 것이 대형 지하철을 지속적으로 건설하는 것보다 경제적이다. 경량전철용 추진시스템은 바퀴와 회전형모터에 동력 전달장치가 연결되어 직선운동을 발생하고 바퀴와 레일 간의 점착력을 이용하는 방식과 바퀴는 단순 지지용이고 추진을 리니어모터로 직접 직선운동을 발생하는 방식이 있다. 리니어모터 추진방식은 회전형모터 추진방식에 비해 건설비 절감, 우수한 가속 성능, 경량화, 효율화, 환경친화성 및 용이한 선로설계 측면에서 유리하나 국내의 설계, 제작기술 경험 부족으로 아직 상용화에 도달하지 못하고 있다(1),(2).

경량전철용 추진시스템으로는 제작, 비용, 성능면으로 차상 1차 편측식 LIM이 적당하다. 또한 LIM 1차측 무게는 차량의 하중, 즉 부하와 관계없이 모터에서 발생하는 추력능력이 동일하다면 무게가 가벼울수록 차량 가속 성능이 커지고 운전비용은 적어진다. 따라서 LIM 뿐만 아니라 차량시스템 전체의 경량화가 필수적이다.

본 논문에서는 LIM 1차측 전기강판과 권선 재질의 변경에 의한 경량화 방법을 제시하고, 해석을 통해 종래형과 속도에 따른 추력/질량 비를 산출하여 비교하였다. 또한 단부효과로 인해 공극의 자속밀도 분포가 왜곡되는 현상을 속도에 따라 규명하고, Transverse Edge Effect 및 단부효과를 고려한 본 모델의 특성곡선을 나타내었다(3),(4).

2. LIM 1차측 경량화 방법

2.1 비교 전제 조건

경량화 정도를 비교하기 위해서는 1차측 외형 치수 및 추력이 종래형과 경량형이 동일하다는 전제조건하에 1차측 무게 감소 정도를 보여주는 것이 효과적이다. 종래형과 동일한 추력특성을 가지려면 종래형과 경량형이 공극 자속밀도값 Bg와 슬롯내의 암페어턴 AT가 동일하

여야 한다. 이러한 이유로 권선을 동바에서 비중이 낮은 알루미늄으로 대체하여 경량화를 시킨다면, 알루미늄바의 저항률이 동바보다 높기 때문에 암페어턴 AT를 같게 하기 위하여 약 1.57배 정도의 슬롯면적이 더 필요하게 된다. 따라서 자속통로인 전기강판 면적이 줄어들게 되고 포화특성으로 공극자속밀도 Bg를 동일하게 유지할 수 없어 추력성능이 나빠지게 된다. 결국, 전기강판의 재질변경이 요구된다. 그러나 일반적으로 사용되는 규소강판 Series 특징은 손실이 적은 고급강판일수록 포화 자속밀도값은 오히려 낮아지는 현상이 발생하고, 포화자속밀도 변화폭도 1[T] 이하로 재질변경 효과를 기대할 수 없다.

그림 1에 일본 KAWASAKI사의 규소강판 Series 특성을 나타내었다. 50RM600 제품번호의 50은 0.5mm 강판 두께를 나타내며, 600은 50Hz, 1.5T의 조건에서 6.00W/kg의 철손이 발생된다는 것을 의미한다.

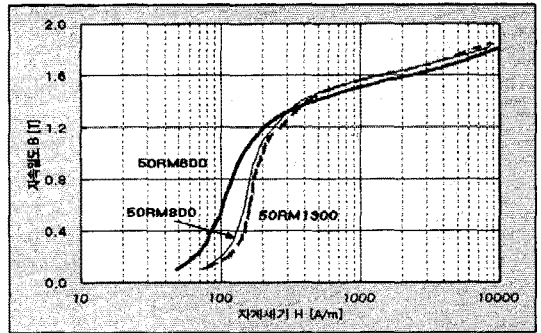


그림 1. 규소강판 Sere의 B-H 특성

2.2 전기강판 재질 선정

규소강판보다 우수한 포화자속밀도와 투자율 특성을 가진 재질은 주로 코발트강(iron-cobalt, Fe₂Co) 합금에서 얻어질 수 있다(5). 코발트강의 특징은 철에 함유되어 있는 코발트 비율에 따라 각각의 전자기적 특성이 그림 2와 같이 달라지게 됨을 알 수 있다. 그림 2에서 알 수 있듯이 코발트 함유율이 50% 부근에서 자체의 강도에 따라 일반적으로 높은 자속밀도 값을 가짐을 알 수 있으며 포화자속밀도 값도 2.4[T] 이상으로 규소강판보다 약 20% 증가된다. 또한 그림 3에는 50% 코발트강과 2종류의 규소강판에 대해 자속밀도에 따른 비투자율 특성 곡선을 나타내었다. 여기에서 50% 코발트강의 철손은 규소강판 시리즈 범위내에 포함되어 있고, 특히 높은 자속밀도 범위에서 큰 비투자율을 가짐을 알 수 있다.

표 1에는 각각 규소강판과 50%코발트강의 특성값을 나타내었는데 50%코발트강이 비중은 크나, 우수한 특성으로 철심량을 더 줄일 수 있으므로 경량화 요구에 만족된다. 결론적으로 규소강판을 50% 코발트강으로 대체하면 권선으로 인해 줄어드는 철심면적으로도 충분히 공극자속밀도를 유지할 수 있다.

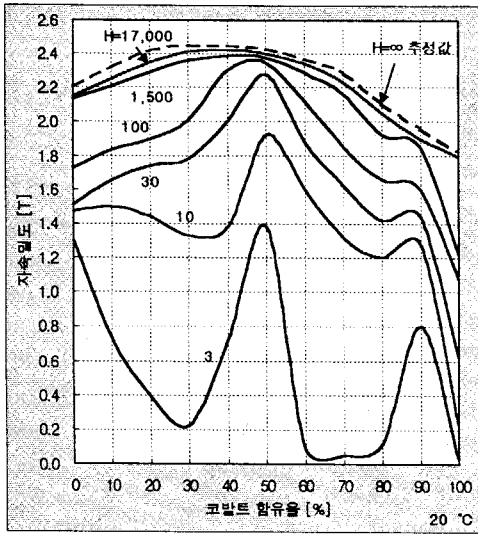


그림 2. 코발트강의 코발트 함유량에 따른 B-H 특성

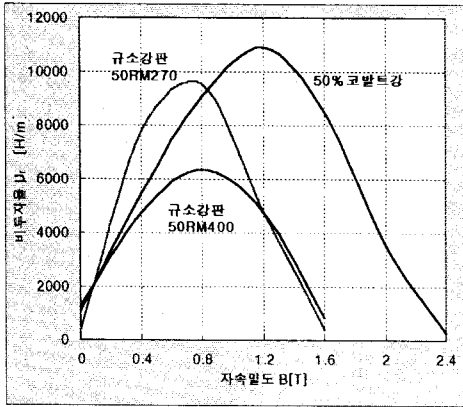


그림 3. 50% 코발트강과 규소강판의 μ_r -B 특성곡선

표 1. 규소강판과 50% 코발트강의 물성비교

물성	포화자속밀도 B [T]	비투자율(최대) μ_r [H/m]	비중 [kg/m ³]
규소강판	2.0	7000~9500	7650
50% 코발트강	2.4	11000	8150

2.3 권선 선정

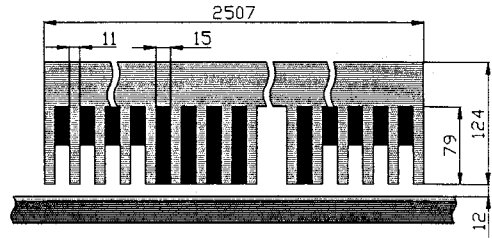
전제조건에 따라 기자력을 동일하게 유지하기 위하여 1차권선 저항값과 권선 turn수를 종래형과 같게 한다. 일반적으로 사용하는 동바는 전기전도도가 우수한 반면 비중은 크고, 알루미늄바는 동바와 반대 특성을 가지나 비중의 변화율이 더 높다. 이러한 특성값을 표 2에 나타내었다. 따라서 전기강판의 변경으로 넓어진 슬롯에 알루미늄 바의 단면적을 크게하여 저항값 및 권선 turn수를 유지할 수 있고, 상대적으로 무게도 줄일 수 있다.

표 2. 동과 알루미늄의 물성비교

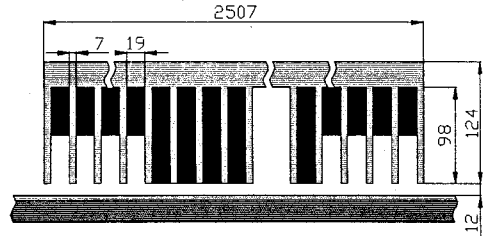
물성	체적저항률 ρ [$\Omega \cdot m$]	비중 [kg/m ³]
동 (Cu)	1.69×10^{-8}	8930
알루미늄 (Al)	2.83×10^{-8}	2690

3. 특성 비교

3.1 비교 모델



(a) 종래형 LIM Spec.



(b) 경량형 LIM Spec.

그림 4. 경전철용 종래형 및 경량형 LIM 모델 Spec.

동바와 규소강판을 사용한 종래형 모델 Spec.과 알루미늄바와 50% 코발트강을 사용한 경량형 모델 Spec.을 각각 그림 2에 표시하였다. 표 3에는 두 모델에 동일하게 적용된 설계 Spec.을 첨부하였다. 또한 특성 해석을 통하여 이들 모델의 특성이 서로 일치함을 알 수 있었다.

표 3. 일반적 설계 Spec.

분 류		설계 Spec.	
정격	극수	8	
	상수	3	
	출력	kW	90
	전압	V	1100
	주파수	Hz	21
	동기속도	km/h	42.5
	기타	도체수/슬롯	32
슬롯수/상/극		4	
점적률		0.64	
코일 슬롯		#1~#10	
결선방식		Y	

3.2 해석 결과

표 4에는 종래형과 경량형의 경량화 결과를 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이 총 41.7%의 경량 효과를 얻을 수 있고 차량 1량에 2대의 LIM이 취부되므로 약 650kg 정도가 감소될 수 있다. 즉, 차량 부하가 줄어드는 효과로 승객 정원을 올릴 수 있고, 같은 승객수가 탑승하였을 때는 가속 성능을 더 올릴 수 있다. 그림 5에 차량 속도에 따른 추력/질량 특성을 비교하였고, 그림 6에는 이들 모델의 슬롯에 따른 특성을 나타내었다.

권선을 변경하였을 때는 전기강판 변경시 보다 더 큰 경량효과를 얻을 수 있고 비용상도 유리하므로 현재 상

용화된 제품은 대부분 이 경우에 해당된다. 그러나 대차에 필요한 모터 설치 공간이 한정되어 있고 경량효과를 얻고자 하는 경우는 전기강판 변경이 필요하게 된다.

마지막으로 차량 추진시스템용 LIM에서 나타나는 단부효과로 인하여 공극자속밀도 파형이 왜곡되는 현상을 차량 이동속도에 따라 그림 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 속도가 증가함에 따라 단부효과 영향으로 정현파 공극자속밀도 파형의 왜곡현상이 커지므로 최대한 이러한 영향을 줄여 설계를 하여야 한다(6).

표 4. 경량화 결과

구분		무게 [kg]	비고
전기강판	종래형	407	100%
	경량형	290	71.25%
권선	종래형	370	100%
	경량형	163	44.05%
1차측	종래형	777	100%
	경량형	453	58.3%

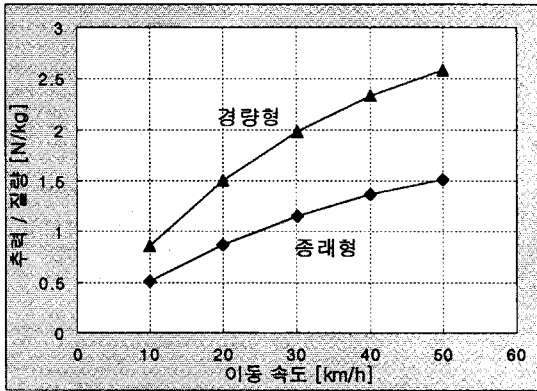


그림 5. 이동속도에 따른 추력/질량 특성 비교

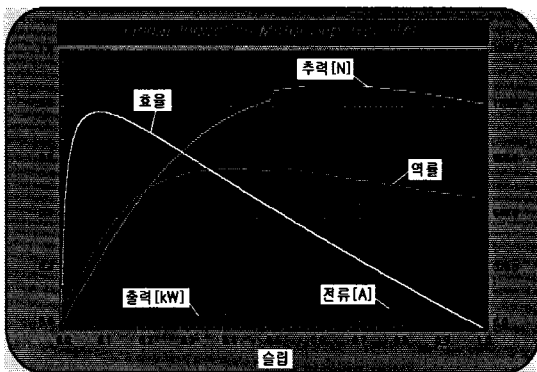
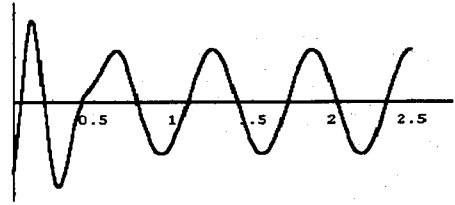


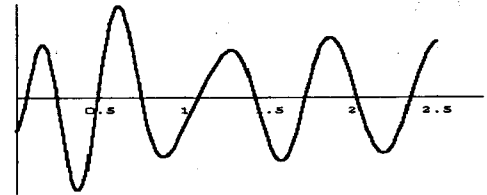
그림 6. 슬립에 따른 특성곡선

4. 결 론

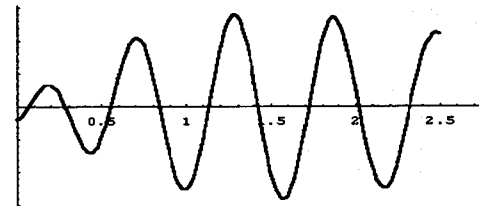
경전철 차량 부하로 작용하는 LIM 1차측 무게를 경량화하는 방법으로 보통 1차 권선 재질을 알루미늄으로 선택하여 사용하고 있으나, 1차측 외형 치수가 커지는 단점이 있다. 대차 취부면에서 외형 치수가 제한되어 있으며 경량화, 고추력화 관점에서 설계를 할 경우에는 본 논문에서 제시한 방법이 타당하다. 이 방법은 차량 시스템 뿐만 아니라 반송시스템 및 소형 경량화가 필요되는



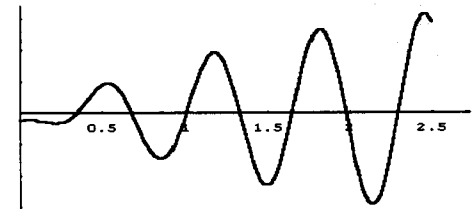
(a) 차량 이동속도 v=20 km/h



(b) 차량 이동속도 v=30 km/h



(c) 차량 이동속도 v=40 km/h



(d) 차량 이동속도 v=50 km/h

그림 7. 단부효과로 인한 공극자속밀도 파형 (x축-공극 0:입구단 2.5:출구단, y축-자속밀도)

시스템에 적용 가능하다. 또한 차량시스템에서는 단부효과를 고려하여, 단부효과를 감소시킬 수 있는 시스템 설계가 필수적이다.

향후 당사의 LIM 제작 및 시험을 통한 연구 및 결과를 지속적으로 제시하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 장석명, 이은용, 정상섭, 정락교, 목진형, 박찬일, "경전철 리니어모터카의 우수성과 상용화 현황(I)", 전기학회지, 47권 10호, pp.32-41, 1999
- [2] 장석명, 이은용, 정상섭, 정락교, 목진형, 박찬일, "경전철 리니어모터카의 우수성과 상용화 현황(II)", 전기학회지, 48권 1호, pp.15-23, 1999
- [3] 野中 作太郎, "片側式リニアインダクションモータの近似特性計算式について", 전기학회지, 57-B69, pp.565-572, 1982
- [4] 임달호, 이철직, "편측식 선형유도전동기의 등가회로 정수 산정 및 특성고찰", 전기학회 논문지, 42권 1호, 페이지, 1993
- [5] Richard M. Bozorth, "Ferromagnetism", IEEE PRESS, 1991
- [6] Sakae Yamamura, "Theory of Induction Motors", University of Tokyo Press, 1977