

경전철용 LIM 설계 및 해석 연구

최병원*, 허익구*, 이인우*, 박창순**, 권태근**
*(주)효성, **한국기술교육대학교 정보기술공학부

A Study of Design and Analysis of LIM for Light rail vehicle

Byoung-Won Choi*, Ik-Ku Hur*, In-Woo Lee*, Chang-Soon Park**, Tæe-Keun Kwon**
*Hyosung Co Ltd, **Korea University of Technology and Education

Abstract - In the future light rail vehicle is more attractive than subway, because of construction time and cost. For light rail vehicle are two types of traction motors, one is traditional rotating type and the other is linear motor. Linear motor is not better in consideration of efficiency and power factor than rotating type. But the motor needs no translation equipment for linear motion and with them can be constructed low floor vehicle. In this paper will be designed a linear induction motor with consideration of operational condition and analysed operating characteristics using FEM program and equivalent circuit.

- 구배 기동 추진 운전조건
- 60%의 고장차를 만차 조건으로 완전차로 구원 가능 조건
- 유니트 개방운전
- 4M2T 시는 차량 교환까지
- 2M2T시는 역까지 운행
- 3) 차량제원
 - 차체길이 1600 m
 - 대차 중심거리 1100 m
 - 자중 26ton
 - 정원 92인
- 4) 대차
 - 차체장가방식 :다이렉트 마운트방식
 - 리니어 모터 장가방식 : 대차레장가방식
 - 고정축거리 1900 m
 - 차륜경 신계작시 660-610 mm
 - 사용한다 570 mm
- 5) 리니어모터
 - 냉각방식 : 자연냉각방식

1. 서 론

도시의 교통난을 해소하기 위하여 지하철을 많이 건설하고 있지만 지하철은 공사비가 많이 들고 공사기간도 길기 때문에 도시의 교통난 해소에는 중량전철 보다 공사비와 운행 유지면에서 경제적인 경전철이 많이 도입될 것으로 예측된다. 경전철에 사용되는 견인전동기는 회전형 전동기와 직선형 전동기가 있다. 직선형 전동기는 회전형 전동기에 비하여 견인전동기만을 비교할 때는 역률과 효율면에서 좋지 않지만 동력전달장치가 필요 없기 때문에 시스템 전체로는 경쟁력이 있을 것으로 생각되며 저상화가 가능하기 때문에 경전철을 지하에 건설할 경우에는 터널의 단면적을 작게 할 수가 있어 공사기간의 단축은 물론 건설비가 낮아 경제성이 있다.

본 논문에서는 경전철용 Linear Induction Motor를 실제 노선조건과 차량성능 등의 제약조건을 고려하여 설계하고 특성해석을 위하여 유한요소법과 등가회로를 이용하여 특성을 파악하였다.

2. 본 론

2.1 리니어 모터 경량 전철 기본 사양

리니어 모터 개발 사양으로 개발 환경과 시스템 성능을 고려하여 다음과 같이 선정하였다.

- 1) 노선조건
 - 평균 역간 거리 800 - 1400 m
 - 초급 구배 60%
- 2) 차량성능
 - 전기방식
 - 집전방식 DC 1500V 가공전차선 방식
 - 열차편성은 최소 2량 편성
 - 최대 운전속도 90Km/h
 - 표정속도 33 km/h
 - 기동가속도 3.5 Km/h/s
 - 상용최대 감속도 3.5km/h/s
 - 비상시 감속도 4.5 Km/h/s

2.2 LIM 설계

LIM의 용량은 상기 조건을 고려하여 정격출력을 120 Kw로 결정하였다.

(1) 극절(pole pitch)은 동기속도가 $V_s = 2\pi f r$ 로 주파수와 함께 밀접한 관계가 있다. 주파수 $f = 21$ Hz break speed = 9.722 m/s로 부터 280 mm로 결정.

(2) 공극은 작게 하는 것이 역률과 효율면에서 유리하나 취부오차에 의한 공극의 감소, 지지계 및 만차 하중에 의한 휨, 차륜경의 마모, Reaction plate 취부 오차에 의한 공극감소, 레일 침하, 이음매 부분 이탈 침하, 레일 마모 등과 공극여유를 고려하여 12 mm로 결정.

(3) 극수는 회전형 전동기와 달리 동기속도에 영향을 미치지 않는다. 극수는 이미 정해진 극절로 부터 출력을 내는데 필요한 체적을 만드는 역할을 한다.

(4) Reaction plate 두께
Reaction plate 두께는 두껍게 하는 것이 효율이 좋으나 두껍게 하면 전기적 공극의 길이가 늘어나 역률이 낮아지며 운행 구간을 모두 건설해야 하기 때문에 공사비가 증가한다.

(5) back iron 두께
Back iron의 두께 역시 자기적인 문제점과 공사비를 고려하여 결정하여야 한다. 일반 전동기의 back iron 두께는 0.22 r_p 가 되어야 하나 공사비를 고려하여 1/4로 낮추어 설계하였다.

(6) Overhang

2차측 back iron과 reaction plate는 커브에서 문제없이 성능을 발휘하기 위하여 1차측 적층폭 보다 넓어야 한다.

(7) slot은 같은 크기에서 최대 견인력을 증가시키기 위하여 slot의 누설 reactance를 작게 하고 formed winding을 삽입할 수 있는 형태를 선택하여 open type으로 하였다.

(8) slot 절연

정격전압 1100V로서 인버터 써지전압을 고려하여 내압 3150 및 200도 온도에 견딜 수 있는 절연물을 선정하였다.

절연두께

1) 소선절연

사용재질 0.037 mm Kapton tape(Kapton 0.025 + Teflon 0.012)

작업방법 1/2 Over-lap 1회

2) 주절연

사용재질 0.13 mm Mylar tape

작업방법 : 1/2 Over-lap 2회

3) 외장절연

사용재질 : 0.13 mm Glass Tape

작업방법 : No-Lap 1회

4) 층간절연

0.13 Nomex

5) Wedge: 1.0 mm Epoxy Glass Laminates

2.3 설계 결과

설계 변수	설계 값	단위
선간전압	1100	V
주파수	22	Hz
용량	120	Kw
정격속도	12.355	m/s
극수	8	
극간격	280.8	mm
1차 철심 적층폭	300	mm
overhang length	30	mm
slot 폭	16.1	mm
slot 깊이	66	mm
치폭	15.1	mm
1상의 직렬 턴수	432	
공극	12	mm
reaction plate 두께	5	mm
Bach iron 두께	16	mm
1차측 길이	2476	mm
slot 수	79	
Yoke 높이	124	mm
병렬회로수	2	
평균도체길이	645	mm

표 1 설계 결과

2.4 Lim 특성해석

설계된 LIM의 특성해석은 상용 해석 program을 이용하였다.

1) 정상상태 해석

slip에 따른 특성을 보면 추력은 기동시 최대이고 slip이 증가하면서 감소하고 있다. 추력의 크기는 해석결과 원하였던 추력이 발생하지 않고 전류 또한 매우 크게 나타났다. 이것은 권선 Head부의 누설reactance계산이 정확하지 않아 해석이 정확히 이루어지지 않은 것으로

생각되며 정확한 해석을 위하여 누설 reactance의 계산과 입력에 많은 경험이 필요할 것으로 생각된다.

slip	추력(N)	수직력(N)	전류(A)	역율	효율
1.0	21,916	23,502	835	0.39	0.0
0.8	18,819	25,901	808	0.37	0.095
0.6	14,463	28,386	785	0.32	0.15
0.4	10,329	29,996	765	0.29	0.16
0.2	4,956	31,278	753	0.24	0.11
0.1	2,208	31,630	750	0.22	0.54

표 2 slip에 따른 LIM의 특성

2) 동특성 해석

동특성 해석은 전동차가 정지한 상태에서 기동할 때 시간에 따른 속도의 변화, 위치변화, 추력과 수직력의 변화를 말한다. 동특성 해석을 정확히 수행하기 위하여 LIM 전체를 해석범위로 하고 LIM이 움직이는 거리를 1600 mm로 하였다. 이동거리는 이보다 길게 하는 것이 가능하나 계산시간이 길어지기 때문에 그 이상으로 하는 것은 계산에 어려움이 있다.

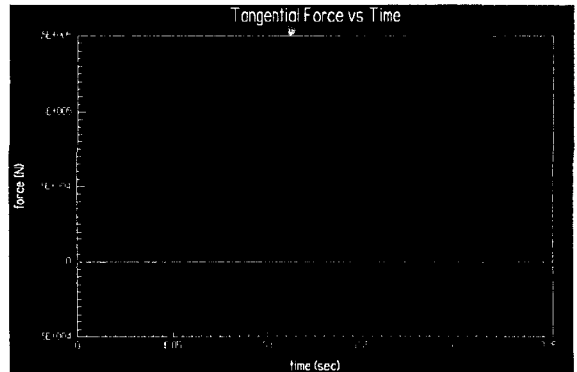


그림 1 시간에 따른 추력 특성

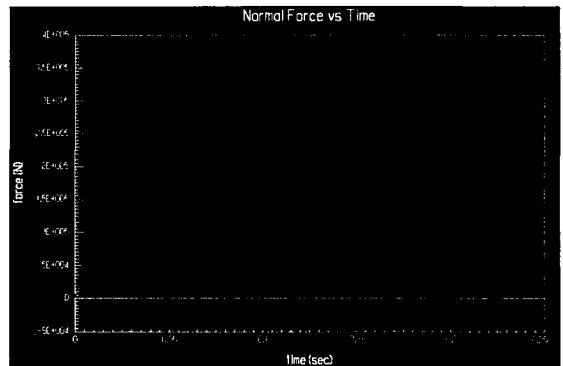


그림 2 시간에 따른 수직력 특성

시간에 따른 수직력 특성은 그림 2에서 보는 바와 같이 기동시 가장크게 나타나며 시간이 흐를수록 차츰 작아지는 것을 알 수가 있다. 시간이 0.15초 후에는 수직력이 감소하는 것이 둔해지고 있다. 최대 수직력의 크기는 36,000N이며 동기속도 근처에서는 100,000N으로 낮아지고 있다.



그림 4 해석모델 (기동후 0.223초가 지난 상태로 좌측에서 우측으로 이동하였음)

는 것을 알 수가 있다. 시간이 0.15초 후에는 수직력이 감소하는 것이 뚜렷하고 있다. 최대 수직력의 크기는 360,000N이며 동기속도 근처에서는 100,000N으로 낮아지고 있다.

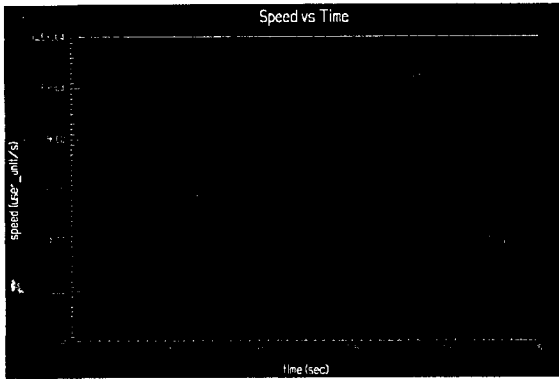


그림 5 시간에 따른 속도 특성

시간에 따른 속도 특성을 보면 기동 후 0.4초까지는 속도 증가가 높다. 차츰 시간이 경과할수록 속도증가가 감소하며 0.21초 후에는 동기속도에 도달하여 속도가 더 이상 증가하지 않는 것을 알 수가 있다.

2.5 등가회로에 의한 특성해석

등가회로에 의한 해석은 이미 많은 논문에서 연구결과가 발표되었으므로 문헌에 발표된 공식을 이용하여 계산하였다.

slip	추력	전류	역율	효율
1.0	12,450	237	0.39	0
0.9	13,280	233	0.42	0.083
0.8	14,170	227	0.45	0.17
0.7	15,080	219	0.49	0.25
0.6	15,920	209	0.53	0.35
0.5	16,530	195	0.58	0.44
0.4	16,610	176	0.64	0.55
0.3	15,630	150	0.69	0.65
0.2	12,820	114	0.73	0.76
0.1	7,526	72	0.69	0.87
0	0	45	0	0

표 3 등가회로를 이용한 특성

등가회로를 이용한 특성은 표 3과 그림에서 보는 바와 같이 slip 0.2에서 추력 12,820N을 나타내고 출력 120.95Kw를 나타내고 있어 설계시 예측한 값을 보이고 있다. 전류는 예측값 보다 낮게 계산되었다.

이것은 정확한 2차측 저항과 누설 리액턴스의 값을 계산하는 방법이 회전형 전동기와 다르므로 좀더 정확한 방법이 연구 되어야 할 것으로 생각된다.

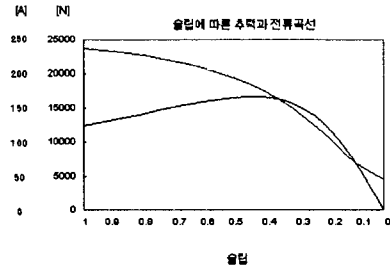


그림 6 slip에 따른 추력,전류 특성곡선

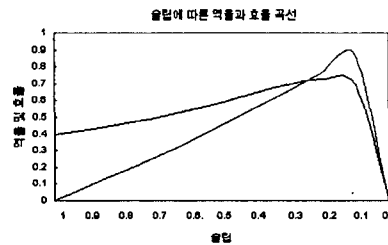


그림 7 slip에 따른 역율, 효율 특성

3. 결 론

논문에서는 경전철의 기본사양을 고려한 전인용 LIM을 설계하고 FEM 프로그램을 이용한 해석과 등가회로를 통하여 특성을 분석하였다.

상용 프로그램을 이용한 특성해석에는 프로그램을 사용하는데 필요한 누설Inductance의 계산과 2차측 저항계산이 정확하지 않아 예측하였던 특성과는 전류가 크고 역율과 효율이 낮아 추력 대단히 낮게 나타나고 있다. 등가회로를 이용한 특성해석은 추력과 출력이 예상값과 거의 일치하는 것을 확인할 수가 있었으며 역율과 효율은 예상보다 높게 나타났다.

(참 고 문 헌)

- [1] 임달호, 이철직, "편측식 선형유도전동기의 등가회로정수 산정 및 특성고찰", 대한전기학회논문지 42, 1호, 페이지, 1993
- [2] 임달호, 조운현, 구대현, "차량 추진용 SLIM의 추력산정 및 수직력 경감에 대하여", 대한전기학회 1990 하계 학술대회 논문집
- [3] 조운현, "유한요소법에 의한 자기부상열차 추진용 SLIMdml 설계, 제작 및 3차원 특성해석", 한양대학교 대학원 박사학위 논문, 1991
- [4] 임달호, 김학련, 김규탁, 권오문, "선형유도전동기의 고효율 정추력 제어" 대한전기학회 논문지 Vol 42, No 9 1993
- [5] Michel Poloujadoff 'The theory of linear induction machinery', clarendon press oxford, 1980