

짧은 1차측 고정자를 갖는 초고속 선형 동기 전동기의 특성해석

조한욱*, 성호경*, 성소영*, 장석명**, 유대준**, 김형철**

한국기계연구원*, 충남대학교**, 우진산전**

Characteristic Analysis of High-Speed Linear Synchronous Motor with Short-Primary Stator

H.W. Cho*, H.K. Sung*, S.Y. Sung*, S.M. Jang**, D.J. You**, H.C. Kim**

Korea Institute of Machinery & Materials(KIMM)*, Chungnam National University**, Woojin Ind. Systems**

Abstract - This paper presents the characteristic analysis of linear synchronous motor (LSM) with short-primary stator for 550 km/h class high-speed Maglev propulsion system. The analysis results confirm the design and performance of LSM drives.

1. 서 론

독일은 자기부상열차의 기술개발을 시작하면서 기술의 가능성을 타진하는 한편, 여러차례의 시제열차 제작 및 시험을 실시하였고, 1977년 자기부상열차를 긴 1차측 고정자 (Long-Primary Stator)를 갖는 선형 동기전동기(이하 LSM)를 이용한 추진방식과 흡인식 부상 시스템으로 결정하고, 이에 대한 연구 개발을 지속적으로 수행하였다. 독일의 기술에서 채용한 방식과 같이, LSM을 적용한 자기부상열차의 추진시스템을 긴 1차측 고정자로 구현할 경우 짧은 1차측 고정자를 갖는 시스템보다 더 많은 소요경비를 요구한다. 그러나, 차량 내부로의 전원 공급을 위한 전력수급장치가 필요없게 되는 장점이 있어 초고속 추진을 위한 자기부상시스템에서 주로 사용되고 있다 [1].

이와 달리, 짧은 1차측 고정자를 갖는 LSM 추진 시스템은 LIM 추진 시스템에 비하여 실제 구현하기에는 상대적으로 높은 경제적 부담 및 기술적 어려움을 가져오지만, 회전형의 계자를 적용할 경우, LSM의 특성을 운행 거리에 제약을 받지 않고 다양한 속도 및 운전 조건 하에서 파악할 수 있다는 점에서 큰 장점을 갖는다. 따라서, 본 논문에서는 초고속 자기부상열차 시스템 개발에 관한 연구의 일환으로 짧은 1차측 고정자를 갖는 LSM 추진 시스템의 특성해석을 수행한다. 제시된 운행 조건 하에 설계된 전동기의 운전특성 해석을 통하여, 설계의 타당성을 제시하고, 시스템의 제작을 통해 LSM의 가변속 특성과 추진성능의 검토를 수행하였다 [2].

2. 짧은 1차측 형태의 초고속 선형 동기 전동기

2.1 Thrust 프로파일 및 전동기의 성능곡선

그림 1은 초고속 LSM의 Soft Start 구간, 가속운행 구간 등을 갖는 전동기 시스템의 Thrust 프로파일과 요구되는 성능곡선을 각각 나타낸다. 전동기의 최대 목표 속도는 550 km/h이며, 전동기의 요구추력은 300 N, 정격출력은 400 km/h에서 약 33 kW이다. 표 1은 초고속 LSM의 성능 사양을 나타낸다 [3].

2.2 초고속 LSM의 구조 및 전압방정식

그림 2는 짧은 1차측 고정자를 갖는 초고속 LSM의 기본 구조를 나타낸다. 2극 3상 Y-결선된 고정자에 대하여 권선이 대칭이며, 정현파적으로 분포되어 있다고 가정하고 고정자 및 회전자의 전압방정식을 d-q 축 상에서 나타내면 식(1)과 같다.

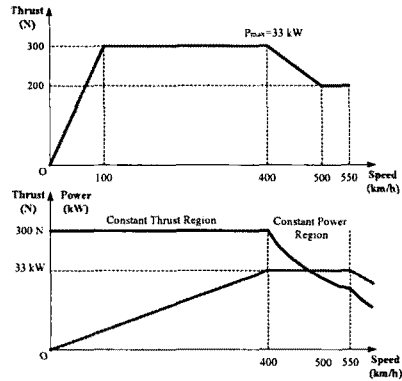


그림 1. 초고속 LSM의 Thrust 프로파일 및 성능곡선

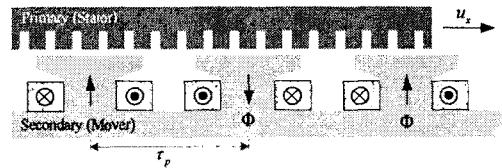


그림 2. 초고속 LSM의 구조

표 1. 초고속 LSM의 성능 사양

항목	사양	비고
정격추력	300 N	@ $i_f, i_q=100$ A
정격속도	400 km/h	-
최대속도	550 km/h	-

$$\begin{aligned} v_d &= R_s i_d - \omega_r L_q i_q \\ v_q &= R_s i_q + \omega_r L_d i_d + E_f \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, v_d, v_q 는 d, q 축 전압을 각각 나타내며, i_d, i_q 는 d, q 축 전류, E_f 는 회전 계자에 인가되는 DC 전류에 의한 고정자에서의 유기전압을 나타낸다. 한편, 전자기 토크의 발생식은 식(2)와 같다.

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = \frac{3P}{2.2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (2)$$

여기서, λ_d 와 λ_q 는 각각 d, q 축 쇄교자속을 나타내며, P 는 극수이다.

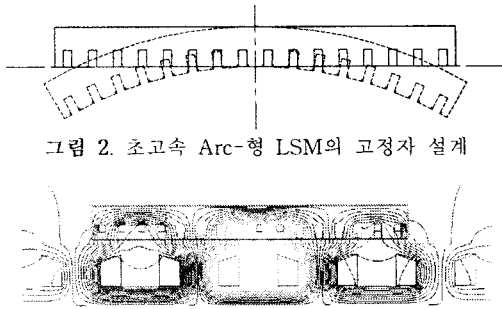
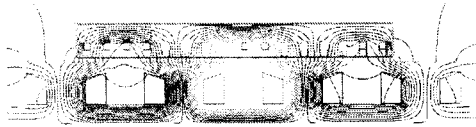
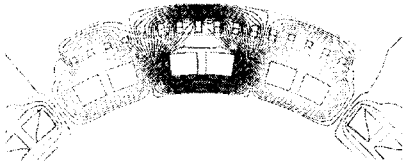


그림 2. 초고속 Arc-형 LSM의 고정자 설계



(a) Linear 해석모델



(b) Arc-형 해석모델

그림 3. 자속 분포도

2.3 무한운전 시험을 위한 Arc-Type LSM의 설계

그림 2는 초고속 LSM의 무한 운전시험을 수행하기 위하여 설계된 Arc-형 LSM의 고정자 형상을 나타낸다. 회전계자의 직경은 1500 mm이며, 공극은 10 mm이다.

3. 초고속 LSM의 특성해석

3.1 무부하 자계특성

그림 3(a)와 (b)는 선형 및 Arc-형 해석모델에 대한 자속 분포도를 각각 나타낸다. 그림 4는 해석모델에 대한 공극자속밀도를 나타낸다. 운행중 회전계자의 모는 극은 DC 전류 100A로 여자되며, 고정자와 회전자에 걸리는 공극에서의 자속밀도는 $0.37 T_{max}$, 고정자와 접하지 않는 자극 표면 5mm 위치에서의 자속밀도는 약 $0.075 T_{max}$ 의 특성을 갖는다.

3.2 쇄교자속 및 역기전력 특성

그림 5는 초고속 LSM의 기저속도인 400 km/h에서 계자전류가 DC 100A로 일정하게 인가되었을 때, 두 해석모델에 대한 역기전력 특성을 나타낸다. 무부하 역기전력은 약 $240 V_{peak}$ 이며, 선형 및 Arc-형 해석모델에서 같은 특성을 보인다. 그림 6은 계자전류가 DC 100A로 일정하게 인가되었을 때, 속도에 따른 두 해석모델에 대한 역기전력 특성을 나타낸다. 전 구간에서 계자전류를 유지한 상태로 무부하 운전시 두 해석모델의 역기전력은 기저속도인 400 km/h에서 약 6.56%의 오차를 보이며, 그림 8의 결과로부터 초고속 선형 LSM의 설계, 해석 및 제작에 의한 특성검토가 Arc-형의 LSM 형태로 수행하여도 특성 검토에 큰 오차가 없음을 확인할 수 있다.

그림 7은 계자전류에 따른 쇄교자속 및 역기전력 특성을 각각 나타내고 있다. 고정자의 쇄교자속은 전동기의 역기전력, 기저속도, 추력 등을 결정하는 가장 중요한 파라미터의 하나이며, 특히 계자를 갖는 동기전동기에서는 계자전류의 양에 따라 쇄교자속이 변화하는 특성을 가지므로, 계자전류에 따른 쇄교자속량의 변화, 역기전력 상수의 변화 등을 검토할 필요가 있다. 그림 8은 100 rpm (약 28.5 km/h) 운전시 역기전력 특성을 나타낸다.

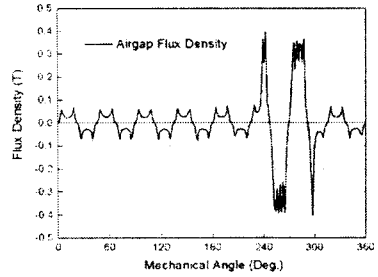


그림 4. 공극자속밀도 특성

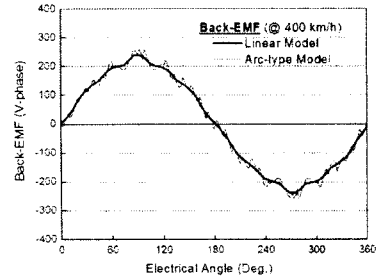


그림 5. 역기전력 특성 (@ 400 km/h)

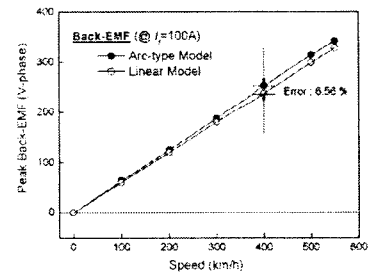
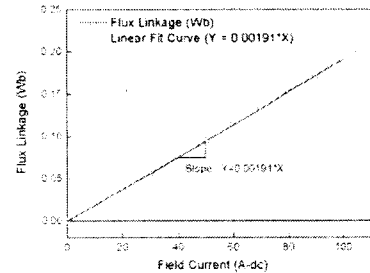
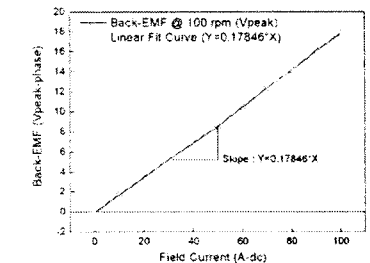


그림 6. Arc-형 해석모델과 Linear 해석모델의 역기전력 특성비교 (Error : 6.56%)



(a) 쇄교자속 특성



(b) 역기전력 특성 (@ 100 rpm)

그림 7. 계자전류에 따른 쇄교자속 및 역기전력 특성

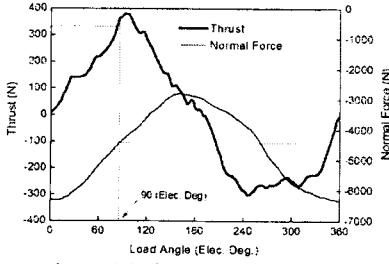


그림 8. 정추력 및 수직력 특성

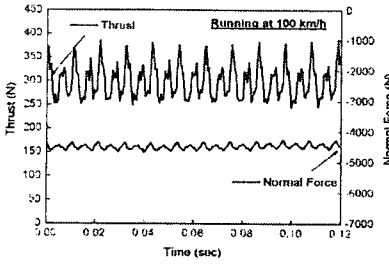


그림 9. 정상상태 추력 및 수직력 특성 (400km/h 이하)

3.3 추력 및 수직력 특성

그림 8은 정특성 해석을 통하여 얻어진 추력 및 수직력의 특성을 나타낸 것이다. 부하각 90°에서 운전시 정격 추력 약 300 N 을 얻을 수 있으며, 이때 발생하는 수직력은 약 4500 N 이다. 그림 10에서는 짧은 1차축 고정자의 단부의 존재로 인하여 추력 및 수직력의 비대칭 특성이 보여진다.

그림 9는 벡터제어 수행시 정상상태에서 LSM 의 추력과 수직력을 나타내고 있다. 벡터제어는 부하각 90°에서 그림 1에 보여진 Thrust 프로파일을 추종하는 $i_q = \max, i_d = 0$ 제어를 통해 이루어진다.

4. 초고속 LSM의 제작 및 실험

4.1 초고속 LSM의 제작

본 연구에서 수행하고자 하는 초고속 LSM 의 성능검토를 위하여 Arc-형 LSM을 그림 10과 같이 제작하였다. 그림 10(a)는 제작된 LSM의 3상 고정자를 나타내며, 그림 10(b)는 DC 전류가 인가되는 회전 계자를 각각 나타낸다. 회전계자는 회전중 전류의 인가를 위한 슬립링과 고속 운전시 비상 제동을 위한 공기제동기, 속도 및 절대 위치 검출용 엔코더가 각각 축에 결합되어 있다.

4.2 초고속 LSM의 벡터제어

그림 11 은 LSM의 벡터제어를 위한 알고리즘 블록 다이어그램을 나타낸다. 벡터제어 인버터는 회전계자의 여자전류 제거기와 Thrust 프로파일을 추종하는 전류제어를 수행하기 위한 Thrust 히스테리시스 제어기, 전류제어기를 포함하며, 전향 보상(feed forward)항은 식(3)과 같다.

$$v_{d_ff} = R_s i_d^* - L_s \omega_r i_q^*$$

$$v_{q_ff} = R_s i_q^* + L_s \omega_r i_d^* + \omega_r \lambda_f \quad (3)$$

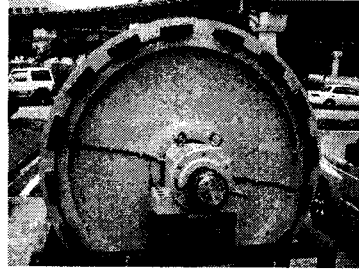
그림 12는 LSM 의 약 140 km/h 까지의 가속시험 결과를 나타낸다.

5. 결 론

본 논문에서는 550 km/h 급 초고속 자기부상열차를



(a) 고정자



(b) 회전 계자

그림 10. 초고속 LSM의 실제 제작 모델

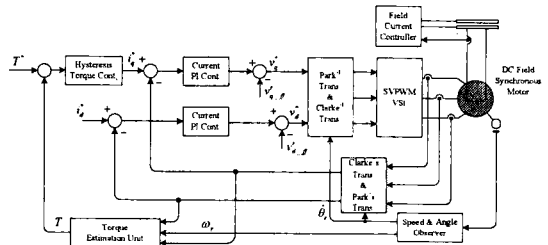


그림 11. 초고속 LSM의 벡터제어 알고리즘 블록도

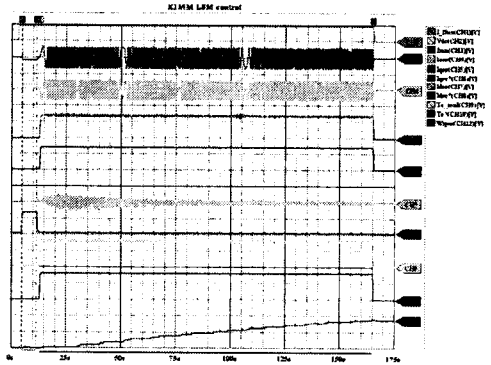


그림 12. 초고속 LSM의 가속 운전시험

위한 추진시스템에 관한 연구의 일부로 추진시스템을 짧은 1차축 고정자를 갖는 LSM으로 적용할 경우 추진시스템의 성능검토를 위한 특성해석 및 제작, 시험등에 관한 연구를 수행하였다. 설계 및 제작된 LSM에 대한 특성해석 및 실험결과는 설정된 Thrust 프로파일을 만족하기 위한 추진시스템으로 적정 설계됨을 확인하였으며, 현재 다양한 특성시험이 추가적으로 수행되고 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Hyung Woo Lee, Ki-Chan Kim, and Ju-Lee, "Review of maglev train technologies," *IEEE Trans. Magn.*, vol.42, no.7, pp.1917- July 2007.
- [2] J.F.Gieras, Z.J.Piech, *Linear Synchronous Motors- Transportation and Automation Systems*, CRC press, 2000.
- [3] 성소영, 성호경, 유대준, 장석명, "고속 LSM의 설계 및 동특성 해석," 2007 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.181-182.