

초고속 자기부상열차용 LSM 설계 및 추력 측정 시험

Design and Thrust Force Measurement of LSM for High-Speed Maglev Train

오 세 영* · 이 창 영** · 이 주[†]
(Se-Young Oh · Chang-Young Lee · Ju Lee)

Abstract - This paper deals with design and thrust force measurement of EMS type LSM for propulsion of the high-speed maglev train. The load of maglev train is calculated, and the design equations of the LSM are presented, and the LSM which is suitable for the operation of short-distance test track is designed. In addition, the finite element analysis is performed to confirm the back-EMF and thrust force characteristics of the LSM designed model. A short length LSM prototype model is manufactured. Finally, the thrust force of the LSM is measured by the method applying dc current to the stator winding instead of three-phase ac current. And the validity of the design and analysis is verified by this measurement.

Key Words : High-speed maglev train, LSM, EMS, Thrust force, Lift magnet

1. 서 론

인구의 증가와 생활영역의 확대, 고유가 등에 따라 대중 교통의 혁신적인 수단에 대한 요구가 증가하고 있다. 따라서 차세대 교통 시스템은 고속, 내구성, 안전성 등의 특정 요건을 만족해야 한다. 또한 편리하고 친환경적이어야 하며 유지보수가 간단하고 경량화 되어야 한다. 자기부상열차는 이러한 요구조건을 만족하는 가장 적합한 시스템 중 하나로 부각되고 있다[1].

자기부상열차는 전자기력에 의해 부상하고 가이드웨이 상에서 자기장에 의해 일정한 공극을 유지하면서 선형전동기로 추진하는 교통수단이며, 추진용으로 사용되는 선형전동기는 선형유도전동기(LIM; Linear Induction Motor)와 선형동기전동기(LSM; Linear Synchronous Motor)가 대표적이다. LIM은 일반적으로 중저속용 자기부상열차에 사용되고, 초고속용으로는 LSM이 주로 사용된다. 따라서 본 논문에서 다루고자 하는 초고속 자기부상열차의 추진 방식은 LSM을 채택하였으며, 부상 방식은 전자석의 흡인력을 이용한 EMS(Electromagnetic Suspension) 방식을 적용하였다. EMS 방식은 저속에서 자체적으로 부상이 가능하고 별도의 냉각장치를 필요로 하지 않으므로 초전도를 이용하는 EDS(Electrodynamic Suspension) 방식에 비해 경제적이다. 그러나 이러한 EMS 방식도 가이드웨이를 구성하는 고정자 철심, 권선, 콘크리트 구조물 및 차량 등의 제작에 천문학적 비용이 요구된다. 따라서 선로 및 차량 제작 전에 LSM 설계 모델에 대한 전자계 특성 해석과 아주 짧은 길이의

LSM 시제품의 성능 시험을 통해 설계의 타당성을 검증하여 설계 오류를 최소화할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 초고속 자기부상열차 추진용 LSM을 설계하고, 설계 모델의 역기전력 및 추력 특성을 유한요소해석을 통해 확인하였으며, 3.84m 길이의 LSM 시제품 제작 후 추력 측정 시험을 수행함으로써 설계의 타당성을 검증하였다.

2. LSM의 설계

2.1 설계조건 및 요구 추력 산정

자기부상열차가 500km/h 이상의 속도에 도달하기 위해서는 가속거리와 감속거리를 고려했을 경우 약 40km 이상의 선로가 필요하다. 그러나 40km의 선로를 LSM으로 제작하려면 천문학적 비용이 소요되므로, 본 연구에서는 150m의 단거리 노선으로 대체하고, 차량의 최대속도를 28.8km/h로 제한하여 LSM 설계를 진행하였다.

표 1 자기부상열차의 사양

Table 1 Specification of Maglev train

항목	사양
시험선 길이	150 m
차량 무게	28 톤
부상전자석 모듈 수	6 개
최대 속도	28.8 km/h
최대 가속도	1.1 m/s ²
LSM 극 피치	240 mm
LSM 공극 길이	10 mm
LSM 적층 길이	220 mm

[†] Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

E-mail: julee@hanyang.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea.

** Korea Railroad Research Institute, Korea.

Received : August 22, 2014; Accepted : September 11, 2014

자기부상열차의 사양은 표 1에 나타났다. 이 차량은 6개의 부상전자석 모듈로 구성되며, 요구되는 최대 가속도는 1.1m/s^2 이다. 이 차량이 최대 가속도를 달성하기 위해 필요한 LSM의 추력을 산정하기 위해서는 자기부상열차의 주행 저항을 계산해야 한다. 자기부상열차의 주행 저항은 공기역학 저항 F_A , 자기 저항 F_M , 선형발전에 의한 저항 F_B , 이렇게 세 가지로 구성된다[2]. 선형발전은 20km/h 이상의 고속에서만 가능하므로, 단거리 시험선에서는 선형발전 시스템을 생략하고, 접촉 시스템을 통하여 차량에 전원을 공급한다. 따라서 단거리 시험선 차량의 부하저항은 다음 두 식을 통해서 구할 수 있다[2].

$$F_A = 2.8 \cdot v^2 \cdot (0.265 \cdot N + 0.30) \cdot 10^{-3} \text{ [kN]} \quad (1)$$

$$F_M = N \cdot (0.1 \cdot v^{0.5} + 0.02 \cdot v^{0.7}) \text{ [kN]} \quad (2)$$

여기서, v 는 열차의 속도(m/s), N 은 열차의 차량 수를 각각 나타낸다.

단거리 시험선에서 차량의 최대 속도가 28.8km/h 이므로 이때의 주행저항은 식 (1), (2)에 의해 약 0.47kN 이 된다. 주행저항이 0.47kN 일 때, 28톤 의 차량이 가속도 1.1m/s^2 을 내기 위해서는 다음 식 (3)에 의해 31.27kN 이상의 추력이 필요하다.

$$F_{Thrust} = M \cdot a + F_A + F_M \text{ [kN]} \quad (3)$$

여기서, M 은 차량의 만차 중량(톤), a 는 가속도(m/s^2)를 각각 나타낸다.

따라서 부상전자석은 총 6개의 모듈을 가지므로 한 모듈당 5.21kN 이상의 추력이 필요하다.

한편, LSM의 요구 부상력은 차량의 중량이 28톤 이므로 중력가속도 9.8m/s^2 을 곱해서 274.4kN 이 되며, 6개의 부상전자석 모듈이 부상력을 분담하므로, 한 모듈당 45.73kN 의 부상력이 요구된다.

2.3 LSM 부상전자석 설계

EMS 방식의 자기부상열차는 정지 상태에서 차량을 부상시킨다. 즉, 고정자 전류가 인가되지 않은 상태에서 부상전자석에 의해서만 차량을 부상시켜야 한다. 따라서 자기부상열차용 LSM은 요구 부상력을 만족하는 부상전자석을 우선 설계하고, 그 다음으로 고정자를 설계하는 순으로 진행해야 한다. 부상전자석의 설계 순서는 그림 1에 나타났다.

부상전자석 설계를 시작하기에 앞서 공극자속밀도 B_F , 극 피치 τ , 극 폭 τ_{p2} , 적층길이 L_{stk} , 계자 슬롯 점적률 K_{f2} , 계자 전류밀도 J_2 를 미리 결정해야 한다. 공극자속밀도 B_F 는 일반적으로 $0.5 \sim 0.8\text{T}$ 수준에서 결정하며, 여기서는 0.7T 로 정하였다. 극 피치 τ 는 전력변환장치의 스위칭 주파수와 차량의 최대속도를 고려하여 결정해야 한다[3]. 여기서는 240mm 로 정하였다. 극 폭 τ_{p2} 는 계자의 극이 슈(shoe) 구조를 가지면, 극 피치의 0.5배 이상 가져갈 수 있으나, 여기서는 제작의 편의상 슈가 없는 개방 슬롯의 형태로 결정하였다. 결국, 극 폭 τ_{p2} 는 극 피치의 약 0.4배인 100mm 로 설계

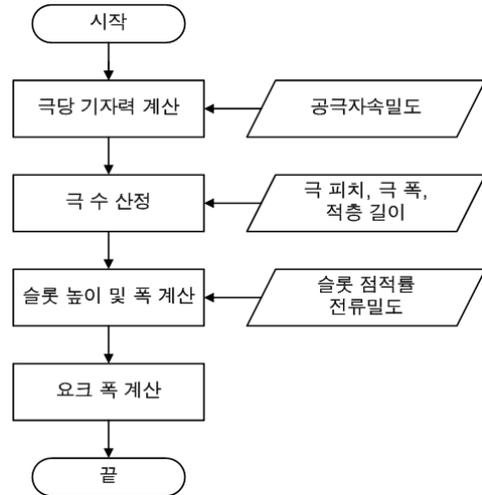


그림 1 LSM 부상전자석 설계 순서도
Fig. 1 LSM lift magnet design flowchart

하였다. 적층길이 L_{stk} 는 가이드웨이 폭과 고정자 권선의 엔드 턴(end turn) 공간을 고려하여 결정해야 한다. 여기서는 220mm 로 정하였다. 계자 슬롯 점적률 K_{f2} 와 계자 전류밀도 J_2 는 경험치를 바탕으로 결정하며, 여기서는 각각 0.45 , 2A/mm^2 으로 정하고 설계를 시작하였다.

EMS형 LSM은 영구자석형과 달리 기자력을 통해 계자에 의한 공극자속밀도를 결정할 수 있다. 반대로 생각하면, 공극자속밀도를 결정하면, 그에 맞는 기자력을 구할 수 있다. 따라서 극당 기자력은 계자에 의한 공극자속밀도 B_F 를 결정하면, 다음 식 (4)를 통해 계산할 수 있다.

$$N_f I_f = \frac{k_c \cdot g \cdot B_F}{\mu_0 k_s} \quad (4)$$

여기서, N_f 계자 권선 턴 수, I_f 계자 전류, k_c 는 카터계수[4], g 는 공극길이, B_F 는 계자 전류에 의한 공극자속밀도, μ_0 는 공기의 투자율, k_s 는 누설계수(0~1)를 나타낸다. 한편, 계자 권선의 턴 수 N_f 를 결정하면, 계자 전류 I_f 는 식 (4)의 기자력 값을 통해 쉽게 구할 수 있다. 최종적으로 N_f 는 400 턴, I_f 는 17A 로 설계하였다.

공극자속밀도가 B_F 일 때, 부상력 F_y 는 다음과 같다.

$$F_y = \frac{B_F^2}{2\mu_0} \tau_{p2} L_{stk} N_{poles} \quad (5)$$

따라서 부상전자석의 극 수 N_{poles} 는

$$N_{poles} = \frac{2\mu_0 F_y}{B_F^2 \tau_{p2} L_{stk}} \quad (6)$$

계자의 슬롯 면적은 다음 식을 통해 계산한다.

$$A_{slot2} = \frac{2N_f I_f}{K_{f2} J_2} \quad (7)$$

부상전자석의 슬롯 폭 w_{slot2} , 슬롯 높이 h_{slot2} , 요크 폭 w_{y2} 는 다음 식 (8), (9), (10)을 통해 계산한다.

$$w_{slot2} = \tau - \tau_{p2} \tag{8}$$

$$h_{slot2} = A_{slot2} / w_{slot2} \tag{9}$$

$$w_{y2} = \tau_{p2} / 2 \tag{10}$$

28톤의 자기부상열차를 부상시키기 위해서는 식 (6)에 의해 약 64개의 극이 필요하다. 따라서 부상전자석 모듈이 총 6개가 들어가므로 1모듈당 11극(회전기와 다르게 선형기는 홀수 극이 가능)을 갖는다면 무난히 차량을 부상시킬 것이다. 한편, 부상전자석의 슬롯 폭은 140mm, 슬롯 높이는 103mm, 요크 폭은 50mm로 설계하였다.

2.3 LSM 고정자 설계

초고속 자기부상열차의 LSM 고정자는 선로 전체에 설치되므로 제작비와 권선 작업의 편의성을 고려하여, 완전 개방 슬롯으로 가지며, 극당 상당 슬롯 수 Q 를 1로 설계한다. 즉, 3상 권선에서 1극당 3개의 슬롯을 갖는다.

초고속 자기부상열차용 LSM의 고정자는 차량의 고속 운전 시 발생하는 역기전력이 크기 때문에 치당 턴수가 적고 대전류를 인가한다. 독일의 Transrapid의 경우, 고정자 권선은 치당 1턴이며 고속에서 약 1,200A의 대전류가 인가된다 [5]. 그러나 단거리 시험선에서는 저속운행만 하므로 고정자 권선 턴 수를 늘리고 전류를 낮춰서 설계하는 것이 전력변환 시스템 측면에서 유리하다. 본 연구에서는 자기부상열차의 최대속도 28.8km/h에서 LSM 한 열의 역기전력이 100V(RMS)가 되도록 고정자 권선을 설계하였으며, 설계 순서는 그림 2와 같다.

LSM 고정자의 상당 턴 수는 다음 식 (11)로 구한다[3].

$$N_{ph} = \frac{\pi E_0}{2\sqrt{6} v L_{stk} B_F} \tag{11}$$

여기서, E_0 는 LSM 한 열에 대한 무부하 역기전력, v 는 차량의 이동속도(m/s)를 나타낸다.

슬롯당 도체수는 식 (12)와 같이 상당 턴 수를 LSM 한 열의 부상전자석 모듈 수 $N_{modules}$ 와 극쌍수 p 로 나눠서 구할 수 있으며, 상전류는 출력식을 식 (13)과 같이 변환하여 계산할 수 있다.

$$Z_c = \frac{N_{ph}}{N_{modules} p} \tag{12}$$

$$I_a = \frac{F_x v}{3E_0} \tag{13}$$

여기서, F_x 는 LSM 한 열에 대한 추력을 의미한다.

고정자의 슬롯 면적은 슬롯 점적률 K_{f1} 과 전류밀도 J_1 를 가지고 다음 식 (14)와 같이 구할 수 있다. 여기서 K_{f1} 과 J_1 은 각각 0.25, 4A/mm²으로 정하고 설계하였다.

$$A_{slot1} = \frac{Z_c I_a}{K_{f1} J_1} \tag{14}$$

Q 가 1일 때, 3상 권선에서 1극당 3개의 슬롯을 가지므로 고정자 슬롯 피치는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_{slot1} = \tau / 3 \tag{15}$$

고정자 치 폭은 다음 식 (16)을 통해 구할 수 있다.

$$w_{t1} = \frac{\phi_g}{3B_{tm} L_{stk}} \tag{16}$$

여기서 ϕ_g 는 극당 공극자속량으로 공극자속밀도 B_F 에 공극단면적 $\tau_{p2} L_{stk}$ 를 곱하여 얻을 수 있으며, B_{tm} 은 치 포화자속밀도(1.0~1.3T)를 나타낸다.

LSM 고정자의 슬롯 폭 w_{slot1} , 슬롯 높이 h_{slot1} , 요크 폭 w_{y1} 은 다음 식 (17), (18), (19)를 통해 계산한다.

$$w_{slot1} = \tau_{slot1} - w_{t1} \tag{17}$$

$$h_{slot1} = A_{slot1} / w_{slot1} \tag{18}$$

$$w_{y1} = \frac{3}{2} w_{t1} \tag{19}$$

본 연구의 자기부상열차는 총 6개의 부상전자석 모듈을 가지며, LSM 한 열당 부상전자석 모듈 3개씩 배치된다. 따라서 식 (11)에서 E_0 는 부상전자석 모듈 3개에 의해 발생하는 무부하 역기전력이다. E_0 를 100V(RMS)로 정하였으므로 부상전자석 1모듈에서 발생하는 역기전력은 약 33V(RMS)가 될 것이다. 식 (11)과 (12)에 의해 슬롯당 도체수는 약 3.15개로 계산되는데, 정수가 되어야 하므로 4개로 결정하였

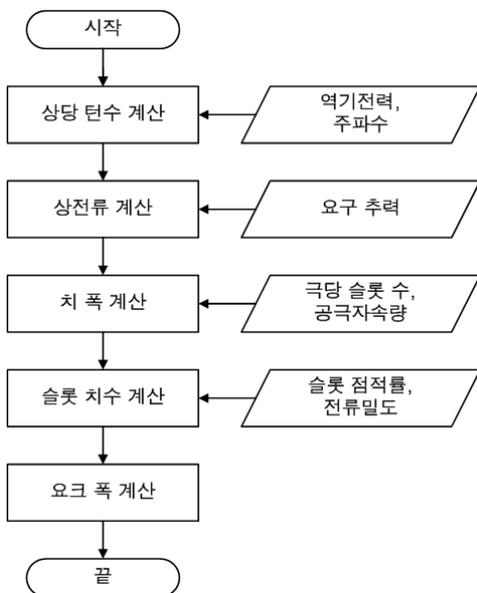


그림 2 LSM 고정자 설계 순서도
Fig. 2 LSM stator desing flow chart

다. 식 (13)에서 F_x 는 LSM 한 열의 추력이므로 전체 요구 추력 31.27kN의 절반에 해당하는 15.64kN을 대입하였으며, 그 결과 상전류 450A(RMS)를 구했다. 고정자의 치 폭과 슬롯 폭은 각각 40mm로 설계하였고, 슬롯 높이는 계산상으로는 42mm가 적당하지만, 슬롯 쐐기(Wedge) 공간을 고려하여 50mm로 설계하였으며, 요크 폭도 계산상으로는 60mm가 적당하지만, 고정자의 가이드웨이 취부를 위한 Fix hanger 장착을 위한 공간을 고려하여 80mm로 설계하였다. 고정자 권선으로 사용할 케이블은 40mm 폭의 슬롯에 장착할 수 있도록 외경이 20mm 이하여야 한다.

그림 3은 LSM 설계 모델을 나타낸다. 그림에서 공극 위쪽이 고정자, 아래쪽이 부상전자석을 나타내며, 11극의 부상전자석은 2극까지만 보인다. 그림 상에 권선 레이아웃을 표기하였으며, 3상 교류 전류 인가 시 부상전자석은 그림의 오른쪽 방향으로 이동한다.

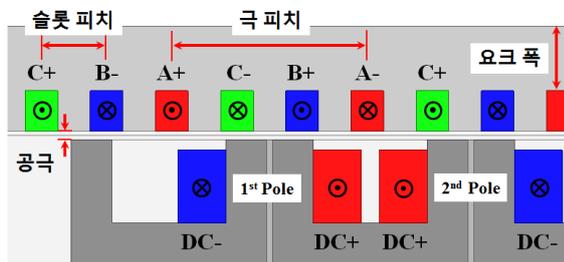


그림 3 LSM 설계 모델
Fig. 3 LSM design model

3. LSM 특성 해석

설계된 LSM의 무부하 역기전력의 크기를 확인하기 위해, 해석모델에서 계자 권선에만 17A의 직류 전류를 인가하고, 부상전자석의 이동속도를 28.8km/h로 설정하여 유한요소해석을 수행하였으며, 그림 4와 같은 역기전력 파형을 얻었다.

그림 4에서 역기전력의 최대값은 50.6V이고, 실효값은 33.1V이다. 이것은 부상전자석 1모듈에 대한 결과로 LSM 한 열에 부상전자석 3모듈로 구성되므로 전체 역기전력은 99.3V(RMS)가 된다. 앞서 2.3절의 설계 과정에서 결정했던 E_0 100V(RMS)와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

설계된 LSM의 추력 특성을 확인하기 위해, 해석모델에서 고정자 권선에 16.67Hz, 450A(RMS)의 3상 전류를, 계자 권선에 17A의 직류 전류를 인가하고, 부상전자석의 이동속도를 28.8km/h(동기속도)로 설정하여 유한요소해석을 수행하였으며, 그림 5와 같은 추력 파형을 얻었다. 그림 5에서 유한요소해석 결과 평균추력은 약 5.44kN이며, 요구 추력 5.21kN 이상을 만족하는 것을 알 수 있다.

4. LSM 추력 측정 시험

자기부상열차 운행을 위한 150m의 단거리 시험선을 건설하기 전에 LSM 설계 모델의 설계 및 해석의 타당성을 입증하기 위해서 그림 6, 7과 같이 부상전자석 1모듈과 3.84m

의 고정자를 제작하고, 추력 측정을 실시하였다.

추력 측정을 위해 그림 7과 같이 시험 장치를 구성하였다. 지그(Jig) 상단에 LSM 고정자를 장착하고, 지그 하단에는 LM Guide를 장착하여 부상전자석이 10mm 공극을 유지하면서 가로 방향으로만 움직일 수 있도록 하였다. 지그 우측에 로드 셀(Load Cell)을 장착하여 전류 인가 시 부상전자석이 이 로드 셀을 누르는 압력을 측정하도록 하였으며, 측정값은 인디케이터를 통해 나타나도록 하였다.

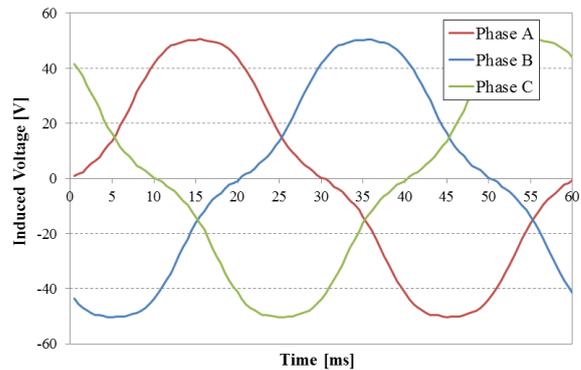


그림 4 LSM의 무부하 역기전력 파형
Fig. 4 Back-EMF waveform of the LSM

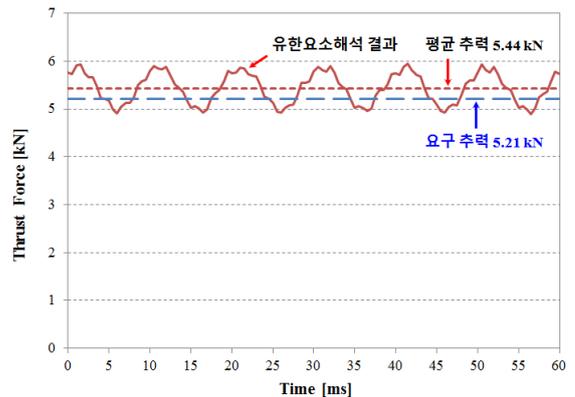


그림 5 LSM의 추력 파형 (FEM 해석치)
Fig. 5 Thrust force waveform of the LSM (FEM results)

LSM의 고정자 권선에는 그림 8과 같은 3상 교류 전류가 인가되며 각 상의 전류는 식 (20), (21), (22)로 나타낼 수 있다.

$$I_A = \sqrt{2} I_a \sin(\omega t) \text{ [A]} \quad (20)$$

$$I_B = \sqrt{2} I_a \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ [A]} \quad (21)$$

$$I_C = \sqrt{2} I_a \sin(\omega t - 240^\circ) \text{ [A]} \quad (22)$$

이렇게 고정자 권선에 흐르는 3상 전류는 이동 자계를 만들며, 이동 자계의 위치는 시간에 따라 변한다. 이러한 이동 자계는 어느 특정 시간에서 정지해 있다고 볼 수 있다. 그림 8에서 ①번 시간에 해당하는 전류는 A상 $I_a/\sqrt{2}$, B상 $-\sqrt{2}I_a$, C상 $I_a\sqrt{2}$ 가 되며, 이것은 ①번 시간에서는 이러한 크기의 직류 전류가 흐르고 있다고 생각할 수 있다. ①번

시간에서 흐르는 전류가 만드는 고정자 기자력 축과 부상전자석의 기자력 축은 서로 정렬하려고 할 것이다. 이때 발생하는 힘이 LSM의 추력이 된다. 따라서 고정자 권선에 3상 교류 전류 대신 직류 전류를 인가하여 LSM의 추력을 측정하였다.

직류 전원 1개를 가지고 고정자 기자력을 만드는 방법은 크게 2가지가 있다. 첫 번째는 A, B, C상을 Y결선하고 A상 단자와 C상 단자를 직류 전원의 (+)극에 연결하고, B상 단자를 (-)극에 연결하는 방법이다. 그림 8의 ①번, ③번 시간에 해당한다. 두 번째는 A상과 B상을 결선하고 A상 단자를 직류 전원의 (+)극에 연결하고, B상 단자를 (-)극에 연결하는 방법이다. 그림 8의 ②번, ④번 시간에 해당한다. 첫 번째 방법은 두 번째 방법에 비해 더 높은 전류가 필요하고 3상 권선 모두를 연결해야하는 불편함이 있다. 따라서 두 번째 방법을 추력 측정 시험에 적용하였다.

추력 측정 시험에서는 그림 8의 ④번 시간에 해당하는 전류 A상 0A, B상 $\sqrt{3}/2I_L$, C상 $-\sqrt{3}/2I_L$ 를 선택하였으며, 그림 9와 같이 고정자 권선과 직류 전원을 연결하였다. B상



그림 6 LSM 부상전자석
Fig. 6 LSM lift magnet

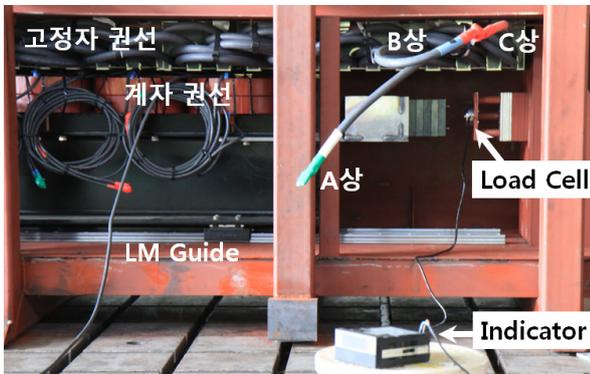


그림 7 LSM 추력 측정 장치
Fig. 7 Apparatus for LSM thrust force measurement

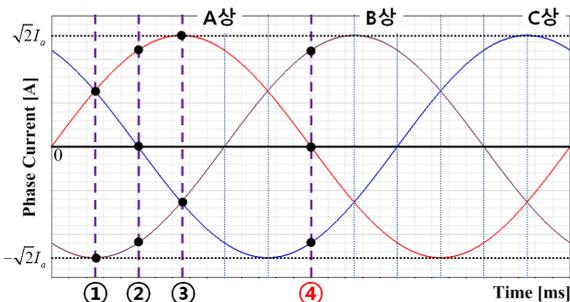


그림 8 3상 교류 전류 파형
Fig. 8 3-phase alternating current waveform

단자와 직류 전원의 (+)단자, C상 단자와 직류 전원의 (-)단자를 연결하고, LSM 고정자 끝부분의 B상과 C상 단자를 서로 이어주었다.

그림 10과 같이 부상전자석을 고정자 끝에서부터 480mm 지점에 위치시키고, 계자 전류를 17A로 유지한 상태로, 직류 전원의 전류를 122.5A부터 551.1A까지 바꿔가면서 로드셀을 통해 추력을 측정하였다. 여기서 122.5A는 3상 교류 전류의 실효치 100A에 해당하며, 마찬가지로 551.1A는 실효치 450A에 해당한다.

LSM 고정자 권선에 직류 전류를 인가하여 기자력 축을 고정시킨 상태에서는 부상전자석의 위치에 따라 추력 크기가 달라진다. 따라서 부상전자석의 위치를 480mm에서 460mm, 440mm, 420mm, 340mm, 320mm으로 변경하면서 각각의 추력을 측정하였다. 고정자 지그에 장착된 로드셀과 만나는 부상전자석 끝 부분에 20mm 두께의 블록들을 하

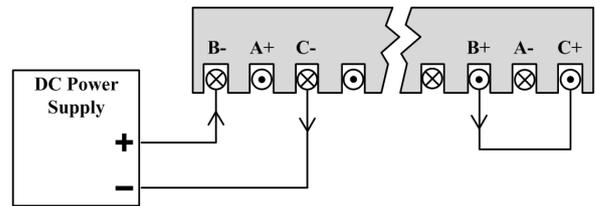


그림 9 LSM 고정자 권선 결선도
Fig. 9 LSM stator winding connection diagram

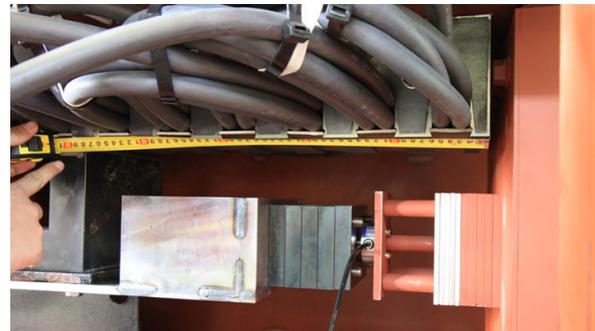


그림 10 LSM 부상전자석의 위치
Fig. 10 Location of the LSM lift magnet

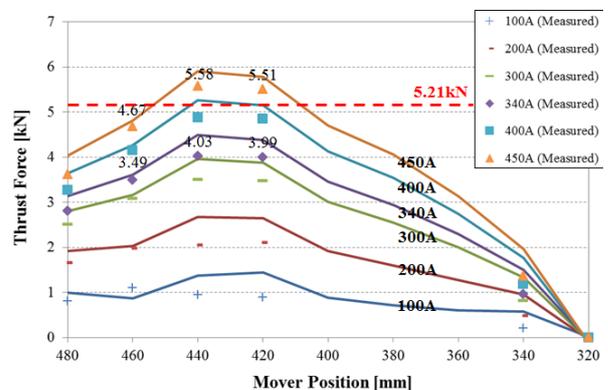


그림 11 LSM 추력 측정 및 해석 결과
Fig. 11 LSM thrust force experimental and analysis results

나씩 제거하면서 측정 위치를 조정하였다. 또한, 추력 측정 시험과 동일한 조건으로 유한요소해석을 실시하였다.

그림 11은 입력 전류 및 부상전자석 위치에 따른 LSM의 추력 해석 결과와 측정 결과를 보여주고 있다. 실선으로 나타낸 그래프는 해석 결과를, 점으로 나타낸 그래프는 측정 결과를 각각 나타낸다. 전류 450A(RMS)일 때, 부상전자석 위치 440mm와 420mm에서 해석 결과와 측정 결과가 요구 추력 5.21kN을 만족하는 것을 알 수 있다. 그래프에서 100A(RMS)와 200A(RMS) 인가 시 해석 결과와 측정 결과의 오차가 크게 발생하였으며, 고정자 전류의 크기가 증가할수록 오차가 줄어드는 경향을 보인다. 최대추력이 발생하는 지점인 전류 450A(RMS), 부상전자석 위치 440mm에서 해석 결과와 측정 결과를 비교하면, 각각 5.90kN, 5.58kN으로 약 5.8% 오차가 발생하였다. 이러한 오차는 부상전자석에 장착된 LM Guide의 마찰에 의한 손실이 주된 원인으로 볼 수 있으며, 이러한 손실을 포함하더라도 제작 모델은 요구 추력을 만족하였다. 이를 통해 LSM 설계 모델에 대한 설계 및 해석의 타당성을 검증할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 초고속 자기부상열차의 부상과 추진을 동시에 담당하는 LSM의 설계 및 추력 측정 방법에 관하여 다루었다. LSM 설계를 위해 자기부상열차의 부하를 산정하고 LSM 설계식을 제시하였으며, 150m의 단거리 시험선 운행에 적합한 LSM을 설계하였다. 또한, LSM 설계 모델의 유한요소해석을 통하여 역기전력 및 추력 특성을 확인함으로써 설계의 타당성을 검증하였고, LSM 시제품 제작 후 추력 측정 시험을 통하여 해석의 타당성을 검증하였다. LSM 추력 측정 시험을 위해 부상전자석과 고정자 사이의 공극이 일정하게 유지하면서 움직일 수 있도록 부상전자석 하단에 LM Guide를 장착하였으며, 고정자 권선에 3상 교류 전류 대신 직류 전류를 인가하는 방식을 제안하였다. 로드 셀을 이용하여 부상전자석의 위치별로 추력을 측정하였으며, 해석 결과와 측정 결과 모두 요구 추력을 만족하였다. 본 연구에서는 추력 측정만 진행하였으나, 차 후 부상력 측정 시험을 통해 LSM의 부상 성능 검증을 진행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부에서 시행하는 “초고속 자기 부상철도 핵심기술개발” 과제로부터 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다.(11PRTD-B061485)

References

- [1] Hyung-Woo Lee, Ki-Chan Kim, Ju Lee, “Review of Maglev Train Technologies”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.42, No.7, pp.1917-1925, Jul. 2006.
- [2] R. Kemp and R Smith, “Technical issues raised by

the proposal to introduce a 500 km/h magnetically levitated transport system in the UK,” Report on Imperial College London and Lancaster University, pp.12, 2007.

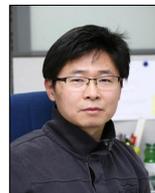
- [3] Ion Boldea, Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook: CRC Press, 2013.
- [4] Z. Q. Zhu and D. Howe, “Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, part III: Effect of stator slotting,” IEEE Trans. Magn., vol. 29, no. 1, pp. 143 - 151, Jan. 1993.
- [5] W.J.Mayer, J.Meins and L.Miller, “The high-speed Maglev transportation system Transrapid”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.24, No.2, pp.808-811, Mar. 1988.

저 자 소 개



오 세 영(Se-Young Oh)

1980년 11월 4일생. 2006년 한양대 전기전자컴퓨터공학부 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008~2011년 (주)비즈로시스 연구원. 2011년~현재 한양대 대학원 박사과정.



이 창 영(Chang-Young Lee)

1970년 12월 01일생. 1993년 부산대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2012년 연세대학교 전기전자공학과 졸업(박사). 1995~2005년 LS전선(주) 전력연구소 선임연구원. 2006년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원.



이 주(Ju Lee)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기생체공학부 교수.