

레일방식 초고속열차 추진용 축소 초전도 LSM 설계 연구

Design of a Small-scaled Superconducting LSM for the Very High Speed Railway Vehicle

박 찬 배[†] · 김 재 희* · 이 병 송*
(Chan-Bae Park · Jae-Hee Kim · Byung-Song Lss)

Abstract - This paper deals with the design and property analysis of 7kW-class small-scaled superconducting Linear Synchronous Motor (LSM) and testing equipment for a number of performance pre-tests prior to the development of coreless-type superconducting LSM suitable for 600km/h very high speed train. First, the basic design and property analysis are conducted before developing a small-scaled superconducting LSM model with 2-pole superconducting electromagnets, and additionally the cost-down design of the superconducting electromagnets is conducted to use less high-Tc superconducting wire. Finally, the superconducting magnet coil span is selected at 120mm, and input ground armature current of 670A turns is required to produce 44.7N of thrust based on research findings.

Key Words : Very high speed train, Linear synchronous motor, LSM, Coreless, Wheel-rail Superconductivity

1. 서 론

최근 세계화가 가속화되면서 이에 따른 고속 교통수단에 대한 요구도 증가되고 있다. 교통 측면에서 속도는 경쟁력을 갖추기 위한 중요한 요소 중 하나이며, 가까운 미래에 세계 경제의 중심이 될 동북아시아 지역에서는 더욱 중요하다 [1][2]. 현재 TGV, ICE, 신칸센, KTX 등 기존의 고속열차는 최고속도 300~350km/h로 운영되고 있으며, 속도 증속을 위한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 하지만 이러한 고속열차는 전차선-판토그래프 급전 방식과 회전형 견인전동기 기반의 점착 구동방식 추진시스템을 이용하고 있기 때문에 500km/h 이상의 초고속 운영이 어려운 현실이다[3][4].

이러한 점착 구동방식의 추진시스템을 이용하는 고속열차의 증속 한계를 극복하기 위해 개발된 시스템이 선형전동기 추진시스템을 이용하는 자기부상열차이다. 지금까지 개발된 가장 빠른 고속열차는 일본의 자기부상열차(581km/h)이며, 1960년대부터 연구개발이 이루어진 이래, 독일과 일본의 경우는 실용화 수준에 도달하였으며, 시험선로에서의 대부분의 시험이 이루어졌다[5]. 하지만, 기술적, 경제적 문제를 포함한 다양한 이유를 근거로 500km/h급 이상의 초고속 자기부상열차에 대한 실용화가 늦어지면서 이에 대한 대안으로 기존의 휠-레일 방식과 자기부상 추진방식의 장점을 혼합한 하이브리드 철도시스템에 대한 관심이 커지고 있다. 이러한 하이브리드 철도시스템은 휠-레일 방식에 기초하지만, 추진

시스템으로 기존의 회전형 전동기가 아닌 선형전동기를 이용하기 때문에 비점착구동이 가능하여 기존의 휠-레일 추진 방식에 의한 속도한계를 극복할 수 있다[6]. 그림 1은 휠-레일 지지방식과 선형전동기전동기 추진방식을 가지는 600km/h급 초고속열차의 개념도를 보여주며, 추진시스템으로 초전도 LSM(Linear Synchronous Motor)이 고려되고 있다.

일반적으로 600km/h급 초고속열차용 공심형 초전도 LSM의 개발에 앞서서, 축소형 모델 제작을 통한 다양한 사전 성능 검증이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 2극 초전도 전자석을 포함한 축소형 초전도 LSM 모델의 제작에 앞서 기본 설계를 수행하였으며, 경제적인 초전도 전자석 모델 도출을 위하여 초전도 선재 사용량 저감을 통한 Cost-down 설계를 추가적으로 수행하였다.

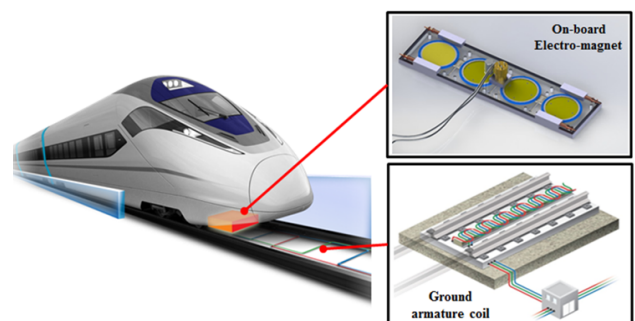


그림 1 600km/h급 초고속열차용 초전도 LSM의 구조 개념 [1]

Fig. 1 Concept of the structure of the superconducting LSM for 600km/h VHST [1]

[†] Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, Korea.

E-mail: cbpark@krii.re.kr

*Korea Railroad Research Institute, Korea

Received : October 14, 2014; Accepted : October 20, 2014

2. 축소형 초전도 LSM 및 시험기의 개념 및 설계 사양 도출

일반적으로 추진시스템에 적용되는 초전도 LSM의 경우, 상전도 방식의 지상 전기자와 초전도 방식의 차상 계자 조합으로 구성이 된다. 국내에서는 큰 외부 자기장이 연속적으로 가해지는 조건 하에서 운영되는 고자장 초전도 전자석의 개발 경험이 아직까지는 부족한 현실이다. 본 연구에서 고려하고 있는 600km/h급 초고속철도용 초전도 LSM의 경우, 차상에 장착되는 초전도 전자석이 위와 같은 조건에서 운영이 되어야 하기 때문에 다양한 사전 연구가 반드시 필요한 상황이다. 본 연구에서 고려하고 있는 초전도 전자석용 코일로 적용이 될 고온초전도 선재는 1세대 타입의 BSCCO 선재로써, 그림 2에서 보는 바와 같이, 고온초전도 선재에 가해지는 외부 자장 및 주변 냉각 온도의 크기 변화에 따라 선재의 허용전류량이 크게 변하는 특성을 가진다 [7]. 따라서 본 논문에서 제시하는 축소형 초전도 LSM을 통하여 큰 교류자장이 외부에서 가해지는 조건에서의 초전도 전자석의 동적 거동 특성 분석이 가능할 것으로 예측된다. 표 1은 축소형 초전도 LSM 시험기 설계 시 제한사항을 보여준다. 표 1에서 보는 바와 같이, 축소형 초전도 LSM의 Stroke는 10m이며, 초전도 전자석을 포함한 대차의 중량은 200kg이하로 설계될 것이다. 이에 따른 10m Stroke에서의 LSM의 최고속도 4km/h를 만족하기 위해 최대요구 추력 및 평균가속도는 41N, 0.15m/s²를 만족하여야 한다. 그림 3은 축소형 초전도 LSM의 운전 속도 패턴을 보여주며, 그림 4

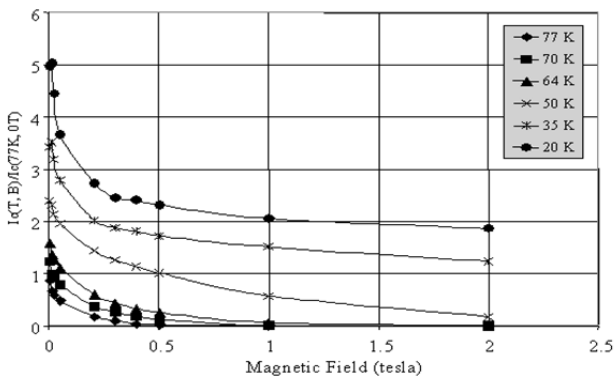


그림 2 BSCCO 타입 고온초전도 선재에 가해지는 외부 자장 및 온도에 따른 허용전류 특성

Fig. 2 Allowable current characteristics for surrounding temperature and magnetic field applied to the BSCCO type high-Tc superconducting wire

표 1 축소형 초전도 LSM 시험기 설계 시 제한사항
Table 1 Design criterion of the small-scaled superconducting LSM and testing equipment

| 항목 | 값 | 단위 |
|----------|------|------------------|
| 대차 중량 | 200 | kg |
| 최고 속도 | 4 | km/h |
| 최대 요구 추력 | 40 | N |
| 평균 가속도 | 0.15 | m/s ² |
| 주행 거리 | 10 | m |

는 축소형 초전도 LSM 시험기의 제작 개념도를 보여준다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 1/5 축소 레도상에 LSM의 3상 공심형 전기자 코일을 설치하고, 축소 대차의 하부에 2극의 초전도 전자석 및 계측장비를 장착하는 구조를 갖는다.

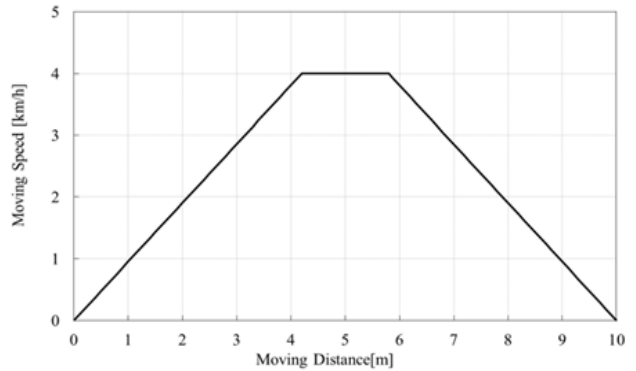


그림 3 축소형 초전도 LSM 시험기의 운전 속도 패턴
Fig. 3 Operating speed pattern of the small-scaled superconducting LSM

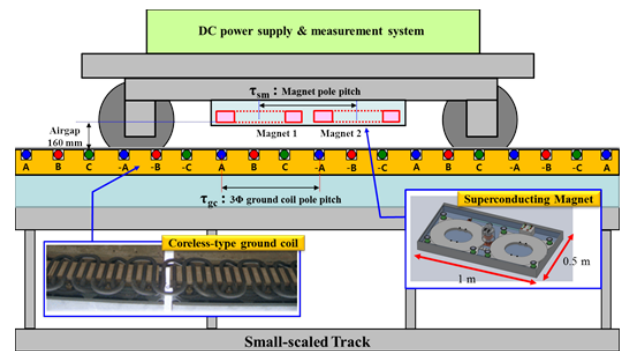


그림 4 축소형 초전도 LSM 시험기의 제작 개념도
Fig. 4 2D-image of the small-scaled superconducting LSM and testing equipment

3. 축소형 초전도 LSM의 초전도 계자 Cost-down 설계

3.1 축소형 초전도 LSM의 기본 설계

본 논문에서는 먼저 2극 초전도 전자석을 포함한 축소형 초전도 LSM 모델의 기본 설계를 수행하였다. 그림 5는 축소형 초전도 LSM 기본 설계 모델의 주요 치수를 보여주며, 그림 6은 축소형 초전도 LSM 기본 설계 모델의 지상 3상 전기자 권선도를 보여준다. 그림 5에서 보는 바와 같이, 본 논문에서 다루고 있는 초전도 LSM의 경우 자기적 공극이 160mm에 달한다. 초전도 마그네틱의 외함은 단열 및 진공 상태를 유지하기 위해 일정 두께 이상으로 두꺼워지기 때문에 LSM의 공극을 충분히 크게 설계하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이, 축소형 초전도 LSM의 지상 3상 전기자 권선은 분포권을 채택하였으며, 공심형 구조이기 때문에 누설자속량을 최소화 하기 위해 2층 정렬권을 적용하였다. 표 2는 축

소형 초전도 LSM 기본 설계 모델의 주요 사양을 보여준다. 표 2에서 보는 바와 같이 기본 설계가 완료된 축소형 초전도 LSM 모델의 극피치는 420mm이며, 지상 전기자 코일의 경우, 총 극쌍수는 12이며, 지상 전기자 코일의 폭은 300mm이다. 그림 7은 축소형 초전도 LSM 기본 설계 모델의 2-D FEM 전류원 해석을 통한 무부하 역기전력 및 발생 Force 특성을 보여준다. 그림 7 (a)는 속도 2km/h에서의 무부하 역기전력 파형을 보여준다. 식 (1)에 의하면 기본 설계된 축소형 초전도 LSM 모델의 역기전력 상수(k_e)는 $0.109V_{peak}/m/s$ 이다. 여기서 e_{ph} 는 상역기전력 피크값이며, v_m 은 계자 이동속도이다. 그림 7 (b)는 전기자 전류의 크기 변화에 따른 발생 추력의 변화를 보여주며, 그림 7(c)에서는 정격속도 2km/h에서 전기자 전류가 550[Aturns]일 때 44.7[N]의 추력이 발생되어 요구 추력을 만족하며, 수직력이 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있다. 식 (2)에 의하면 축소형 초전도 LSM 모델의 추력상수(k_t)는 $0.115N/A$ 이며, 여기서 F 는 발생 추력이며, I_a 는 전기자 상전류이다. 결론적으로 축소형 초전도 LSM 시험기 제한사항을 만족하는 초전도 LSM 기본 모델이 도출되었으나, 공심형 시스템에 공극이 크다보니 역기전력 상수와 추력상수가 작은 시스템임을 확인할 수 있었다.

$$k_e = e_{ph}/v_m [V/m/s] \quad (1)$$

$$k_t = F/I_a [N/A] \quad (2)$$

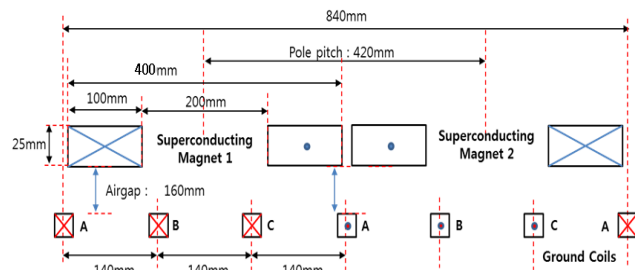


그림 5 축소형 초전도 LSM 기본 설계 모델의 주요 치수
Fig. 5 Main dimensions of the small-scaled superconducting LSM design model

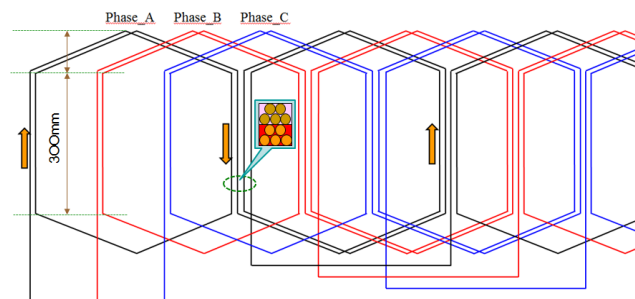
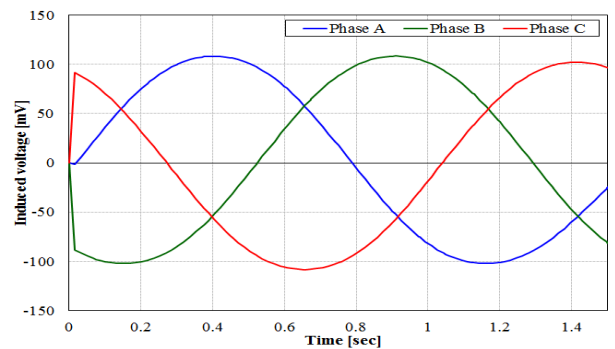


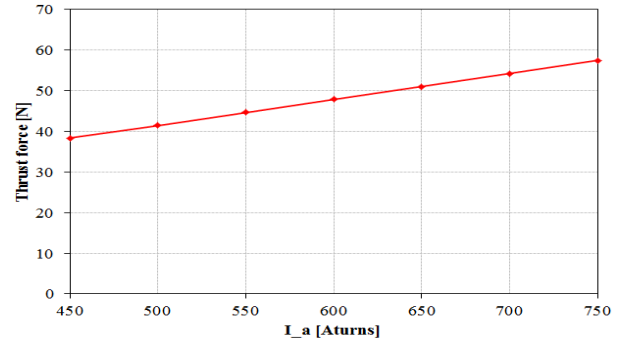
그림 6 축소형 초전도 LSM 기본 설계 모델의 지상 3상 전기자 권선도
Fig. 6 Winding diagram of the 3-phase ground armature on the small-scaled superconducting LSM design model

표 2 축소형 초전도 LSM 기본 설계 모델의 주요 사양
Table 2 Main specifications of the small-scaled superconducting LSM design model

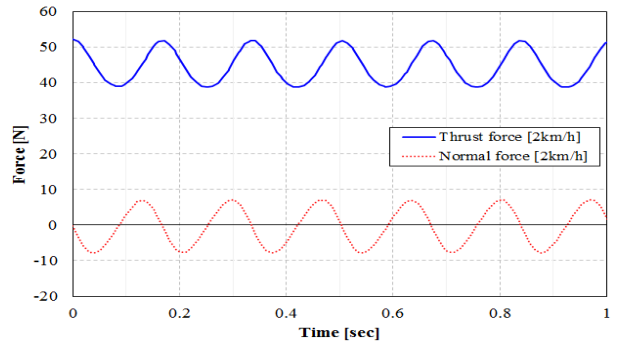
| 항 목 | 값 | 단위 |
|--------------------|-----------|------------|
| 출력/ 최대추력 | 7 / 40 | kW / N |
| 최고 운전 주파수 | 2.8 | Hz |
| 지상 코일 Stroke | 10 | m |
| 지상 코일의 극 쌍수 | 12 | - |
| 지상 코일의 극당 턴수 | 10 | Turns |
| 지상 코일의 도체당 정격 전류 | 55 | A_{peak} |
| 지상 코일의 상저항 | 0.07 | Ω |
| 공극/ 극피치 | 160 / 420 | mm |
| 초전도 마그넷 극수 | 2 | poles |
| 초전도 마그넷 요구 기자력 | 60 | kATurns |
| 초전도 마그넷 코일 내측 Span | 200 | mm |



(a) 무부하 역기전력 파형 (2km/h)



(b) 전기자 전류의 크기에 따른 발생 추력 특성



(c) 추진력/수직력 파형 (2km/h, $I_a=550Aturns$)

그림 7 축소형 초전도 LSM 기본 설계 모델의 무부하 역기전력 및 발생 Force 계산 결과

Fig. 7 No-load induced voltage and force calculation results of the small-scaled superconducting LSM design model

3.2 초전도 계자의 Cost-down 설계 및 특성 분석

본 논문에서 다루고 있는 차상의 초전도 마그넷의 경우, BSCCO 계열의 1세대 고온초전도 선재를 사용한다. 고온초전도 선재는 가격이 비싸기 때문에 최적 설계를 통하여 선재 사용량을 최소화해야 한다. 따라서 본 논문에서는 초전도 마그넷의 선재 사용량을 줄이기 위하여 Cost-down 설계를 추가적으로 수행하였다. 그림 8은 축소형 초전도 계자(2극 모델) 코일 기본 모델의 설계 변수를 보여준다. 그림 8에서 보는 바와 같이, 극 피치(Pole pitch)와 코일 Span을 설계 변수로 설정하였다. 그림 9는 축소형 초전도 계자 코일의 설계 변수에 의한 특성 분석 결과를 보여준다. 그림 9(a)는 초전도 마그넷의 코일 Span 변화에 따른 발생 정격 추력 특성을 보여준다. 그림 9(a)에서 보는 바와 같이, 코일 Span을 200mm에서 100mm까지 줄임에 따라 발생 추력이 약 25%까지 감소되는 것을 확인할 수 있다. 그림 9(b)는 초전도 마그넷의 극피치 변화에 따른 발생 정격 추력 특성을 보여준다. 그림 9(b)에서 보는 바와 같이, 극 피치를 기존의 420mm에서 340mm까지 줄임에 따라 발생 추력이 약 25%까지 감소되는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 9(a)와 그림 9(b)을 통하여 극 피치보다는 코일 Span 변화가 발생 추력의 크기에 더 민감하게 작용함을 확인할 수 있다. 그림 9(c)는 초전도 마그넷의 코일 Span 변화에 따른 추력 보상을 위한 3상 입력전류 특성을 보여준다. 그림 9(c)에서 보는 바와 같이, 기본 모델의 경우 44.7N의 추력 발생을 위해 550Aturns의 지상 전기자 코일 입력전류가 필요하지만, 코일 Span을 줄임에 따라 발생 추력이 줄어들기 때문에 이를 보상하기 위해 지상 전기자 코일의 입력전류 증가가 필요함을 확인할 수 있다. 결론적으로 초전도 마그넷의 코일 Span을 기본 모델 200mm에서 120mm로 줄이면 초전도 선재 사용량을 약 26% 정도 줄일 수 있으나, 발생 추력이 약 20% 정도 감소하게 된다. 하지만, 지상 전기자 전류를 670Aturns으로 증가시킴으로써 추력 보상이 가능할 것으로 기대된다.

그림 10은 초전도 코일에 가해지는 자기장의 방향에 따른 성분 정의를 보여준다. 그림 10에서 보는 바와 같이, 초전도 선재의 넓은 면에 가해지는 자기장 성분을 수직자장(B_{\perp})이라 하며 B_x 로 정의하고, 초전도 선재의 좁은 면에 가해지는 자기장 성분을 수평자장(B_{\parallel})이라 하며 B_y 로 정의하였다[8]. 일반적으로 선재의 넓은 면에 가해지는 수직자장의 크기 변화에 따라 선재의 허용전류량이 크게 변하는 특성을 가지기 때문에 본 연구에서는 고온초전도 선재에 가해지는 자기장의 성분별 분석을 수행하였다. 그림 11은 초전도 코일에 가해지는 자기장의 성분별 특성 분석 결과를 보여준다. 그림 11(a)는 코일 Span이 120mm인 초전도 코일 모델에 가해지는 자기장의 성분별 분포도를 보여주며, 좌측은 Long방향, 우측은 Short방향으로의 자기장 성분별 분포도를 보여준다. 그림 11(a)에서 보는 바와 같이, Long방향으로는 수직자장 성분이 우세하며, Short 방향으로는 수평자장 성분이 우세하고, 각 방향으로의 중간부분에 위치한 선재에 가해지는 자장이 큼을 확인할 수 있다. 그림 11(b)는 코일 Span 변화에 따른 선재에 가해지는 자기장 특성 비교를 보여준다. 그림 11(b)에서 보는 바와 같이, 코일 Span의 변화에

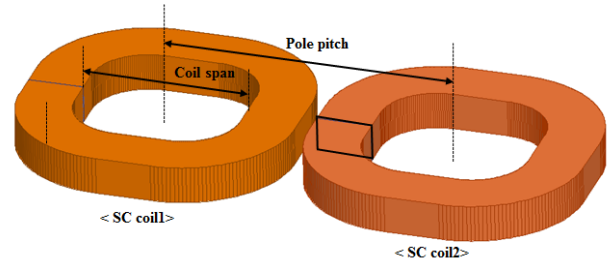
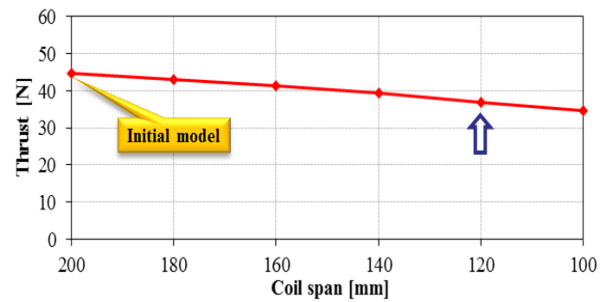
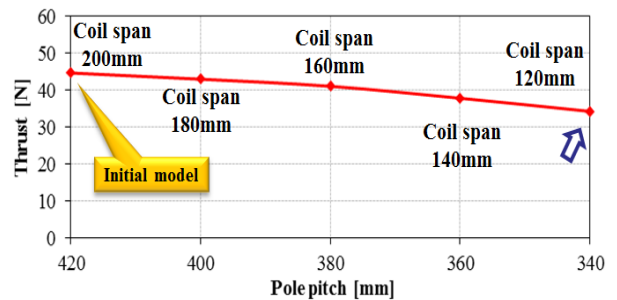


그림 8 축소형 초전도 계자 코일 기본 모델의 설계 변수 (2극 모델)

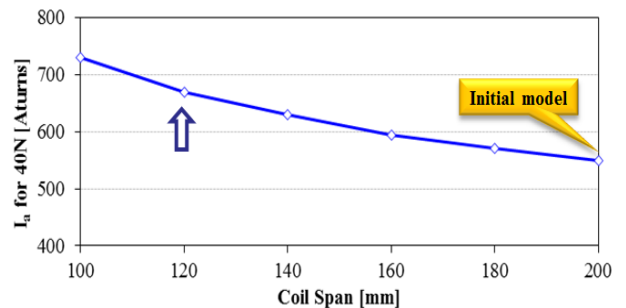
Fig. 8 Design variables of the small-scaled superconducting magnet coil (2 pole model)



(a) Coil span 변화에 따른 발생 정격 추력 특성



(b) Pole pitch 변화에 따른 발생 정격 추력 특성



(c) Coil span 변화에 따른 추력 보상을 위한 3상 입력전류 특성

그림 9 축소형 초전도 계자 코일의 설계 변수에 의한 특성 분석 결과

Fig. 9 Characteristic analysis results by changing of the design variables on the small-scaled superconducting magnet coil

관계없이 선재에 가해지는 자기장은 거의 일정하며, Long

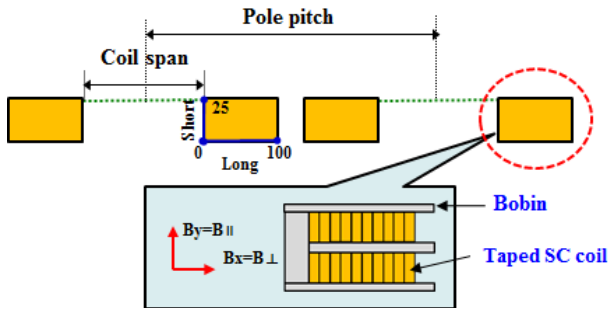


그림 10 초전도 코일에 가해지는 자기장의 방향에 따른 성분 정의

Fig. 10 Component definition according to the direction of the magnetic field applied to the superconducting coil

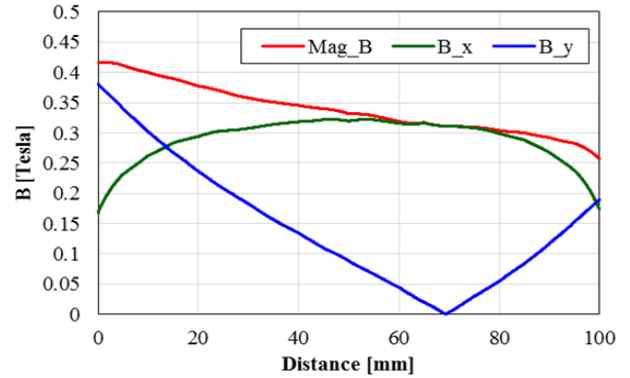
방향으로의 수직자장은 약 0.32T이고 Short 방향으로의 수직자장은 약 0.18T이다. 0.32T의 큰 수직자장으로 인해 초전도 마그넷의 동작온도를 50K 정도로 낮춰야 할 것으로 판단된다. 따라서 Cryocooler를 이용한 전도 냉각시스템의 적용이 가능할 것으로 판단되며, 향후 본 논문에서 제시한 고온초전도 선재에 가해지는 자장 특성 데이터를 초전도 마그넷의 냉각시스템 설계에 활용할 계획이다.

4. 결 론

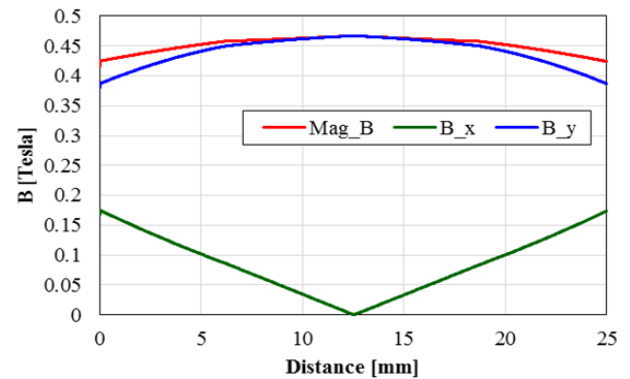
기존의 휠-레일 방식에 기초하지만, 추진시스템으로 기존의 회전형 전동기가 아닌 선형전동기를 이용하는 하이브리드 철도시스템의 경우 비접착구동이 가능하여 기존의 휠-레일 추진방식에 의한 속도한계를 극복할 수 있을 것으로 본다. 따라서 본 논문에서는 휠-레일 지지방식과 선형전동기 추진방식을 가지는 600km/h급 초고속열차용 공심형 초전도 LSM의 개발에 앞서서, 다양한 사전 성능 검증용 7kW급 축소형 초전도 LSM 및 시험기의 설계 및 특성 분석을 다루었다. 먼저 2극의 초전도 전자석을 포함한 축소형 초전도 LSM 모델의 제작에 앞서 기본 설계 및 특성 분석을 수행하고, 초전도 전자석의 고온초전도 선재 사용량 저감을 위하여 초전도 전자석의 Cost-down 설계를 추가적으로 수행하였다. 최종적으로 본 연구를 통하여 초전도 마그넷의 코일 Span을 120mm로 선정하였으며, 이를 기반으로 초전도 마그넷 및 냉각시스템의 최종설계를 진행할 것이다.

References

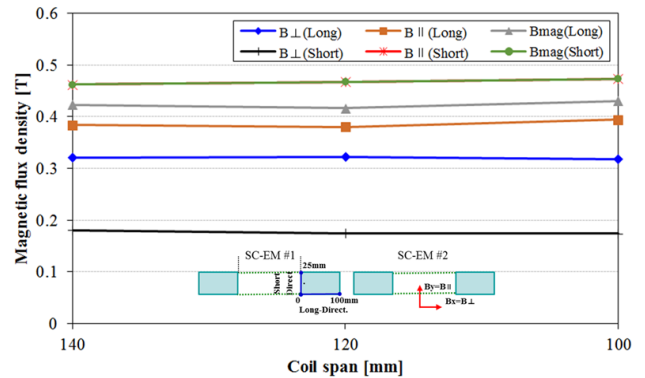
[1] C.B. Park, B.S. Lee, and C.Y. Lee, "Characteristic Analysis of Superconducting LSM for the Wheel-rail-guided Very High Speed Train according to Winding Method of the Ground 3-phase Coils," The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineering, Vol. 63, No. 8, pp. 1164-1169, 2014.



(a) 초전도 코일에 가해지는 자기장의 성분별 분포도(Long방향, Coil span 120mm)



(b) 초전도 코일에 가해지는 자기장의 성분별 분포도(Short방향, Coil span 120mm)



(c) Coil span 변화에 따른 코일에 가해지는 자기장 특성
그림 11 초전도 코일에 가해지는 자기장의 성분별 특성 분석 결과

Fig. 11 Characteristic analysis results of the magnetic field components applied to the superconducting coil

[2] H.W. Lee, C.B. Park, J. Lee, "Improvement of thrust force properties of Linear Synchronous Motor for an ultra-high-speed tube train," IEEE Transaction on Magnetics, Vol.47, No.11, pp.4629-4634, 2011.

[3] T. Fujimoto, M. Aiba, H. Suzuki, T. Umeki and S. Nakamura, "Characteristics of electromagnetic force of ground coil for levitation and guidance at the Yamanashi Maglev test line," QR of RTRI, Vol.41,

No.2, pp. 63-67, June 2000.

- [4] G. Bohn, G. Steinmetz, "The electromagnetic levitation and guidance technology of the 'Transrapid' test facility Emsland," IEEE Transaction on Magnetics, Vol.MAG-20, No.5, pp.1666-1671, 1984.
- [5] C.B. Park, J.H. Lee, B.S. Lee, J.H. Kim, S.K. Lee, S.M. Jung and H.W. Lee, "A Study on the Structure of Linear Synchronous Motor for 600km/h Very High Speed Train," Proceedings-International Symposium on Linear Drives for Industry Applications, July 2013.
- [6] C.B. Park, H.W. Lee, B.S. Lee, N. P. Kim, and H. J. Park, "A study on a design and characteristic analysis of a LSM for a propulsion/levitation of the high-speed tube train," Proceedings-Conference on the Korean Society for Railway, 2010.
- [7] R. H. Patel, A. Nabialek and M. Niewczas, "Characterization of superconducting properties of BSCCO powder prepared by attrition milling," Supercond. Sci. Technol., 2010. Vol.18, pp.317-324, 2005.
- [8] A. Friedman, Y. Wolfus and F. Kopansky, "I-V Curves of BSCCO Tape Carrying DC Current Exposed to Perpendicular and Parallel AC Fields," Report prepared for the Department for Transport, pp. 10-13, 2007.IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, 2005.



이 병 송(Byung-Song Lss)

1991년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~1997년 한국고속철도 건설공단 철도차량 R&D 센터 선임연구원. 1998년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원. 관심분야는 철도차량용 추진시스템 제어.

저 자 소 개



박 찬 배(Chan-Bae Park)

2003년 서울대 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2013년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년~2006년 삼성전자 DA연구소 선임연구원. 2007년 ~ 현재 한국철도기술연구원 선임연구원. 관심분야는 차량 견인용 회전기, 선형기 설계 및 무선급전시스템



김 재 희(Jae-Hee Kim)

2003년 고려대 전기공학과 졸업(학사). 2010년 포항공대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2010년~2012년 삼성전자 선임연구원. 2013년 ~ 현재 한국철도기술연구원 선임연구원. 관심분야는 배열 안테나, 모바일폰 안테나, 메타-재료의 설계 및 분석