

## 국내 자기부상 열차용 초전도 자석 개발 현황

김석호<sup>1</sup>, 이창영<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>창원대학교 기계공학부  
<sup>2</sup>철도기술연구원

### 1. 서 론

자기 부상열차는 기존의 바퀴식 열차와는 달리 열차를 부상함으로써, 마찰에 의한 에너지 손실을 줄이고 바퀴식 열차와 비교하여 더 빠른 속도를 구현할 수 있는 것으로 알려져 있다.

초고속 자기부상열차와 관련하여 독일은 전자석과 선형동기전동기 (LSM)을 이용하여 상전도 기반의 Transrapid를 1960년대 후반에 개발하여 2004년 상하이에서 상업운전을 시작하였다[1].

일본은 1970년대부터 초고속형 자기부상열차를 개발해왔으며, 독일과는 다르게 부상과 추진을 동시에 수행하는 초전도 자석을 사용하는 방식으로 1997년 야마나시 시험선로에서 581 km/h를 달성하고 2045년까지 438 km의 도쿄 오사카 구간을 연결하기 위한 준비를 진행하고 있다[2].

일본의 초전도 자기부상열차는 저온 초전도 (LTS) 자석을 사용하여 시험 운전을 성공하였으나, 최근에는 운전 온도가 높은 고온초전도 (HTS) 자석으로 대체하여 액체 헬륨을 사용하지 않고 냉각 효율을 높이기 위한 연구가 진행 중이다[3~6].

1세대 고온 초전도 선재를 이용한 고온 초

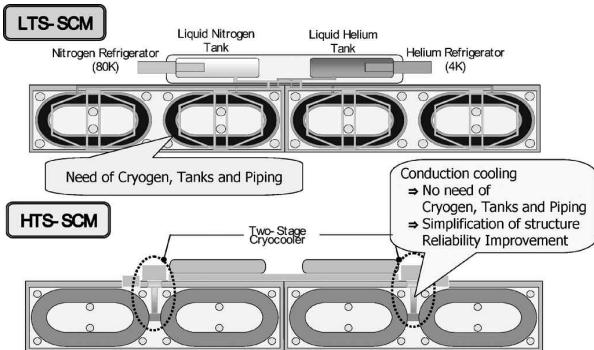


Fig. 1 Structures of the LTS and HTS magnets for Maglev [7]



Fig.2 Assembled REBCO coil for Maglev [8]

전도 자석의 경우 기존의 저온 초전도 자석을 대체하여 운전에 성공하였으며, 최근에는 기계적 강성 및 전자기적 성능이 우수한 2세대 고온 초전도 자석을 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다[9-10].

그러나, 자기부상방식을 적용하더라도 공기와의 마찰 저항 때문에 속도를 1000 km/h 이상으로 증가시키기에는 한계가 있으며, 이를 해결할 수 있는 방법으로 열차 혹은 차량을 아진공 터널 안에서 운전하는 방법이 제안되었다. 특히, 2012년 미국에서 하이퍼 루프 개념이 제안되면서 1000 km/h 이상의 속도를 갖는 운송수단 개발에 대한 연구가 확대되고 있으며, 최근에는 개념의 구현 및 기초 연구가 증대되고 있다[11].

국내에서도 철도기술연구원을 중심으로 차세대 운송수단으로서 초고속 열차에 대한 기

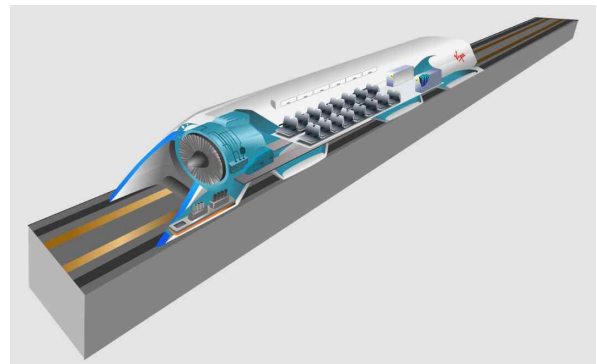


Fig. 3 Conceptual image for hyperloop[12]

초 연구를 시작하였으며, 철도기술연구원과 창원대는 초고속 열차에 적용하기 위한 고온 초전도 자석 개발을 진행하였다.

초고속 열차용 초전도 자석 개발과 관련하여 국내에서 2014년부터 최근까지 개발 현황 및 향후 연구 방향에 대하여 기술 하고자 한다.

## 2. 바퀴식 열차의 선형 모터용 고온초전도자석

초전도 자석을 적용한 고속 열차의 개발과 관련하여 초기 연구는 자기 부상식에 앞서, 더미 바퀴와 초전도 선형 모터를 적용하기 위한 연구를 시작하였다.

전도 냉각형 고온 초전도 자석과 관련하여 국내에 전기연구원, 서남(주), 두산중공업 등에서 많은 경험을 갖고 있으며, 이러한 자석들의 기본 구조를 적용하여 선형 모터용 초전도 자석 개발을 진행하였다.

본 연구의 목적은 선형 전동기로서의 전도 냉각형 고온 초전도 자석 적용 가능성을 검토하기 위한 것으로서, 실제 열차용보다 작은 모델기 형태의 전도 냉각형 고온 초전도 자석을 개발하였다 [13-14].

고온 초전도 선재로는 서남사의 폭 4.0 mm 두께 0.12 mm인 REBCO wire를 사용하였으며 자석의 기계적 안정성을 증대시키기 위하여 최근 많이 사용되는 무절연

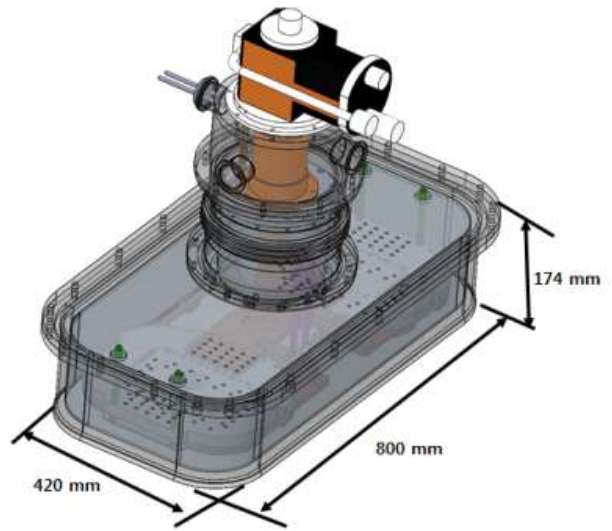


Fig. 4 3D drawing of the 1st prototype REBCO magnet

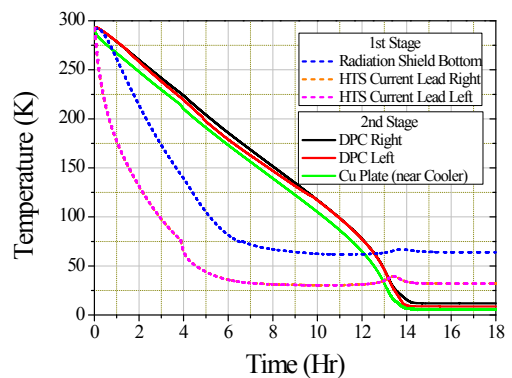


Fig. 5 Initial cool down results of the 1st prototype magnet

(no-insulation) 권선 방식을 채택하였다. [15-17] 자석의 사양은 표 1과 같으며, 제작 형상은 그림 1과 같다.

LSM용 고온 초전도 자석은 일반적인 초전도 자석의 전자기적 열적 설계 이외에 추진력에 대한 구조 설계를 필요로 하며, 지상의 상전도 코일과의 이격 거리를 최소화하기 구조

Table 1 Specifications of the 1<sup>st</sup> prototype REBCO magnet for LSM

Parameter	Value
Wire critical current (@77 K, SF)	200 A
Magnet structure	1 DPC x 2 pole 300 turn/SPC
Operating Current (I <sub>op</sub> )	100 A
Total Ampere x Turn	60 kAt
Length per DPC	462 m
Total CC Length	924 m
Maximum field magnitude @I <sub>op</sub>	1.28 T
Maximum perpendicular field on wire @I <sub>op</sub>	0.72 T
Operating temperature	20 K



Fig. 6 Running test .

## 초고속 자기부상열차

설계를 필요로 한다.

그림 5와 같이 초전도 자석의 초기 냉각은 10 K 까지 14 시간이 걸렸으며, 120 A까지 자석 통전을 실시하였다.

본 연구에서 개발한 초전도 자석을 이용하여 그림 2와 같이 시험 선로에서 실 주행 시험을 실시함으로써 고온 초전도 자석의 고속 철도용 LSM 적용 가능성을 확인하였다.

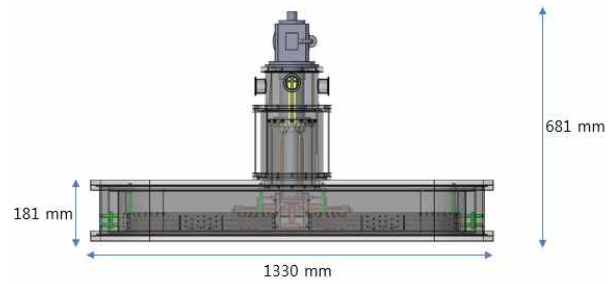


Fig 7 3D drawing of the 2nd REBCO magnet for Maglev.

## 2. 캡슐 트레인용 고온초전도자석 개발

1차년도 LSM용 고온초전도 자석 개발에 이어서 2차년도에는 본격적인 하이퍼 루프 개념의 초전도 자기 부상열차의 적용하기 위한 고온 초전도 자석 개발을 진행하였다. 일본의 초전도 자기부상 열차와 유사한 구조로서, 초전도 자석으로 부상과 추진을 동시에 추진하는 개념이다. 특히, 이러한 방식은 향후 아진공상태의 터널 안에서 캡슐트레인에 적용하는 것을 목표로 하고 있다.

1차시작품과 유사하게 고온 초전도 선재로는 서남사의 폭 4.1 mm 두께 0.25 mm인 Brass laminated REBCO wire를 사용하였으며, 자석 사용은 표 2와 같다. 2차 시작품은 실제 캡슐트레인에 사용될 고온 초전도 자석의 1/2 스케일로 개발하였다.

초전도 자석의 초기 냉각은 약 10 K 까지 80 시간이 걸렸으며, 그림 8과 같이 설계 전

류까지 자석의 충전 실험을 성공적으로 실시하였다.

본 연구에서 개발한 자석에 대해서는 실제 운전이 아닌 정지 상태에서 4 kN 추력 실험

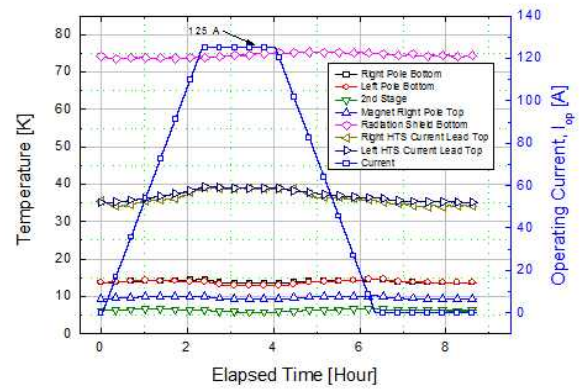


Fig. 8 Current charging experiment.

을 성공적으로 수행하였으며, 연속적인 충전 전을 통하여 무절연 초전도 자석에의 충전 딜레이, 자화손실 및 와전류 손실에 대한 기초 연구를 함께 진행하였다[18-19].

Table 2. Specifications of the 2<sup>nd</sup> prototype REBCO magnet for Maglev.

Parameter	Value
Wire critical current(@77 K, SF)	150 A
Magnet structure	1 DPC x 3 EA 435 turn/SPC
Operating Current( $I_{op}$ )	136 A
Total Ampere x Turn	355 kAt
Length per DPC	1.09 km
Total CC Length	3.28 km
Maximum field magnitude @ $I_{op}$	2.65 T
Maximum perpendicular field on wire @ $I_{op}$	1.54 T
Operating temperature of Coil	20 K
Thrust force	4 kN

## 3. 고화질소 냉각 고온초전도자석 개발

1차 시작품과 2차 시작품 개발을 통하여 2세대 고온 초전도 선재를 적용한 고온 초전도 자석의 자기부상 열차에 대한 가능성을 확인하였으며, 3차년도에는 실제 자기 부상 열차 적용을 위한 냉각 기술 및 영구 전류 운전 기술에 대한 연구를 수행하였다.

아진공에서 운전되는 초고속 캡슐 트레인의 경우 열차의 중량이 매우 중요할 뿐만 아니라, 고속 운전에 따른 비접촉식 전력 공급 문제도 함께 발생하게 된다.

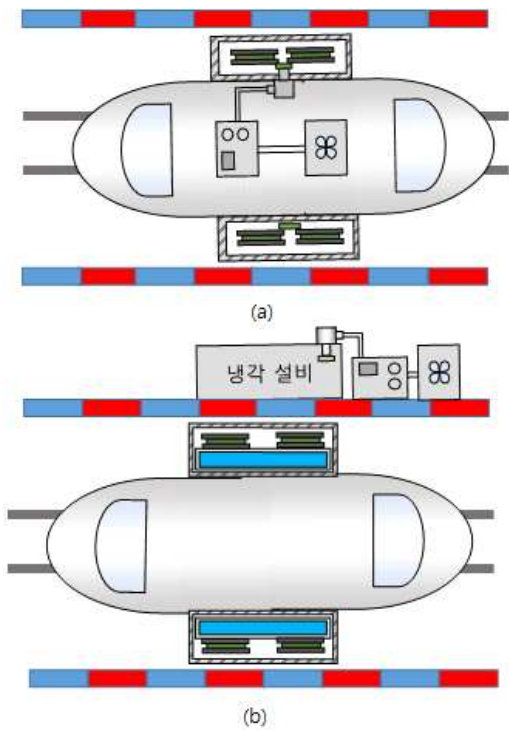


Fig. 9 REBCO magnet with (a) on-board cryocooler and (b) thermal battery and external refrigeration system.

1차 2차 시작품은 극저온 냉동기가 함께 탑재된 상태에서 실험을 수행하였지만, 이 경우 냉동기, 압축기 및 칠러를 캡슐 트레인에 탑재하고 동시에 냉동기 운전을 위한 전원 공급을 필요로 한다. 따라서, 실제 1000 km/h 이상의 초고속 열차의 운전 속도와 운전 시간을 고려하면, 운전중에만 냉각 온도를 유지할 수 있도록 하려면 된다. 이를 위해서 그림 9와 같이 자석의 운전 온도 유지를 위하여 운행 중에는 고화질소를 열배터리(thermal battery)로 사용함으로써, 별도의 냉각을 수행하지 않더라도 운전 목표 시간 동안 초전도 자석을 작동 이하로 유지되도록 할 수 있다. 외부로부터의 열침입에 의하여 온도가 증가된 고화질소는 기차의 도착역에서 기체 헬륨 등을 이용하여 재냉각을 수행하게 된다.

또한, 기존의 고온 초전도 자석은 외부의 전원으로부터 전력을 지속적으로 공급받아 자기장을 유지하지만, 초고속 자기부상열차의 경우 열차의 운전 시간이 매우 짧기 때문에 저온 초전도 자석에서 사용되는 영구전류 모드와 유사한 준 영구 전류 모드를 사용할 수 있게 된다. 특히, 고화질소가 고체상태에서 결정 구조 변화인  $\alpha$ - $\beta$  상변화에 따른 추가적인

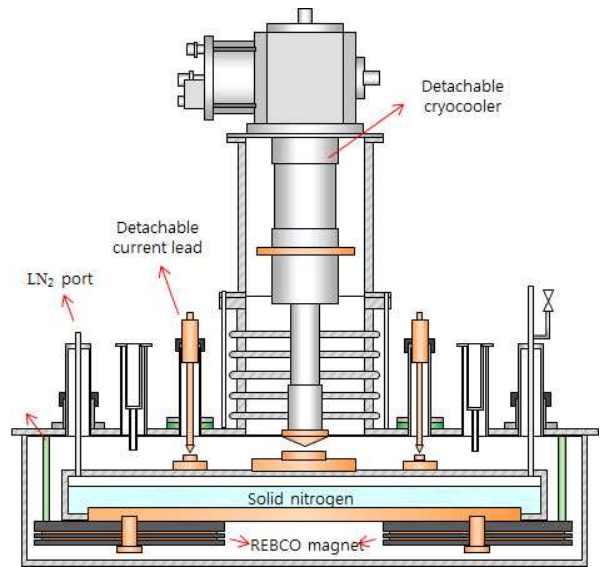


Fig. 10 Modified 1<sup>st</sup> prototype REBCO magnet with a solid nitrogen bath, detachable current leads and a cryocooler.

잠열을 가지기 때문에 고온 초전도 자석의 냉각 온도 유지에 유리한 장점을 갖고 있다 [20-21].

3차년도에서는 고화질소를 이용한 열배터리를 적용하고 준 영구 전류 모드 운전에 대한 연구를 진행하기 위하여 1차 시작품에 고화질소조를 추가하고 탈 부착식 전류리드를 재설계하여 성능 시험을 진행하였다.[22-23] 고온 초전도 자석 자체를 고화질소 용기 안에 일체형으로 제작할 경우 고화질소의 열 수축에 의한 계면에서의 dry-out 문제나 구조 설계의 복잡성 문제가 발생하기 때문에 이를 피하기 위하여 고온 초전도 자석의 보빈 표면과 열적으로 접촉하는 별도의 고화질소 용기를 설계하였다. 고화질소조, 분리형 전류리드 및 극저온 냉동기를 포함한 전체 개념도는 그림 10과 같다.

기존 1차 시작품과 달라진 점은 전류리드의 탈착을 위하여 극저온 용기 내의 복사 차폐막을 제거하고 다층박판단열재 (MLI)만으로 복사 열침입을 차단하는 구조를 채택하였다.

고화질소에 의한 냉각 유지 성능 평가를 위하여 고화질소가 없을 경우와 고화질소가 있을 경우의 냉각 유지 시간을 비교하였다.

실험 방법은 먼저 액체질소를 이용하여 고화질소 용기 및 자석을 80 K 부근까지 냉각한 후 고화질소 용기에 3.5 liter의 액체질소 충전 확인 후 냉동기를 가동하여 액체질소를

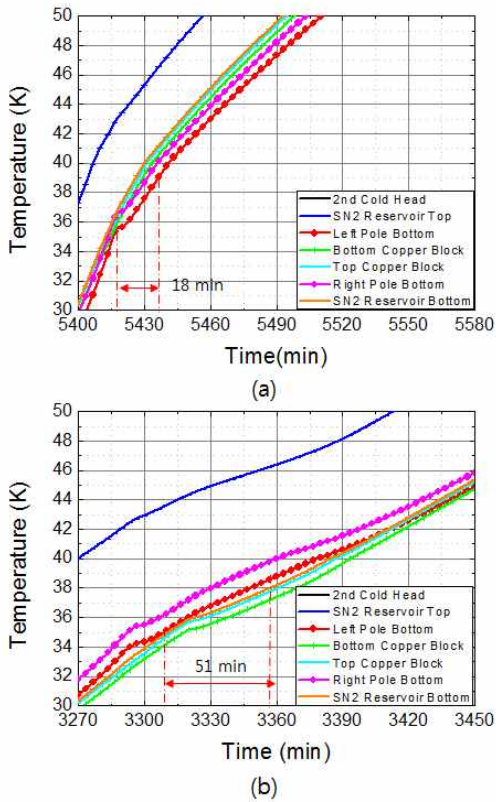


Fig. 11 Warm up experiment (a) without solid nitrogen and (b) with solid nitrogen.

고화시키고 추가로 35.6 K에서 상변화 후 최종 20 K까지 냉각을 진행하였다. 충분한 냉각 후 냉동기 탈착을 하였으며 냉동기 분리에 따른 온도 변화를 측정하였다. 그림 11과 같이 자석 온도 기준으로 35 K에서 38.8 K까지 온도 상승에 걸리는 시간은

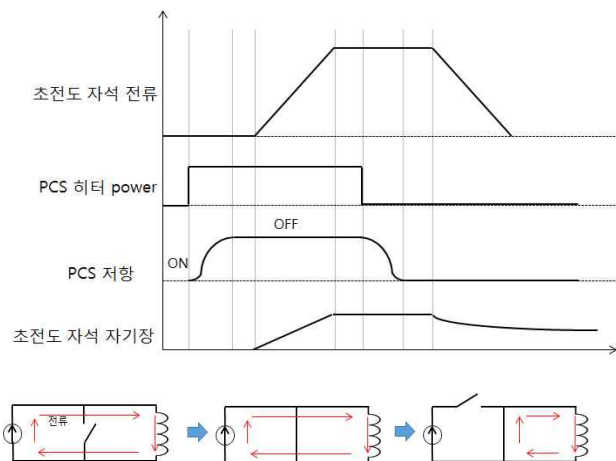


Fig. 12 PCS switch sequence for quasi-persistent current mode operation.

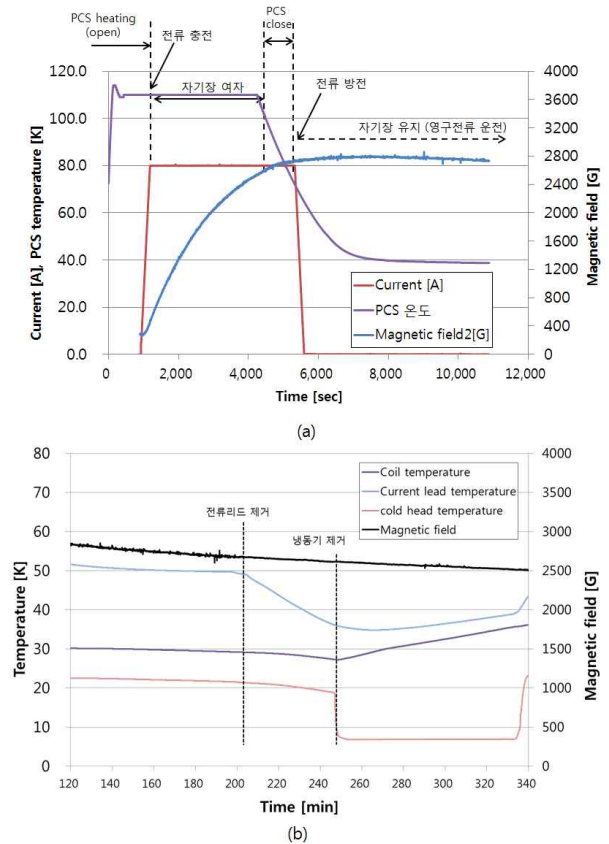


Fig. 13 (a) Operation of PCS switch (b) quasi-persistent current mode after detaching current leads and cryocooler.

고화질소가 없을 경우 18 분으로 측정되었으며, 고화질소가 있을 경우는 51분으로 증가됨을 확인할 수 있었다. 이는 자석으로의 열 침입과 고화질소 및 자석 구조물의 열용량을 고려한 해석 결과와 잘 일치하였다.

또한, 고화질소에 의한 냉각 유지 시간 중에 준 영구 전류 모드 관련한 실험을 진행하였다. 그림 12와 같은 순서에 의하여 먼저 영구 전류 스위치를 히터를 이용하여 OFF 시킨 후에 자석을 외부 전원장치로 전류 충전을 진행하였다. 이후 영구 전류 스위치의 히터 발열을 제거한 후에 외부 전원장치의 전류를 서서히 감소시켜서 자석의 준영구전류 모드를 구현하였다. 그림 13은 준 영구 전류 모드에 대한 실험 결과이며 초기 충전시 2850 G에서 준영구 전류 모드 도입후 90 G/h의 자장 감쇄를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

실제 초고속 열차의 운전 시간을 고려할 때, 완전 영구 전류 모드가 아니더라도 실험에서 얻은 준 영구 전류 모드로 충분히 사용될 수 있을 것으로 확인되었다.

#### 4. 향후 연구 방향

현재까지 1차, 2차 시작품 및 고화질소 냉각 초전도 자석을 개발함으로써 향후 초전도 자석의 캡슐트레인 적용에 대한 연구를 수행해왔으며, 결론적으로 고화질소 및 준영구전류 모드가 적용된 고온 초전도 자석의 적용 가능성을 확인하였다. 향후 실차에 적용할 고온 초전도 자석의 개발을 위해서는 냉각시스템 및 구조 설계에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

실차에서는 앞서의 극저온 냉동기 대신에 집중식 냉각 시스템과 기체 헬륨 순환 냉각을 적용할 계획이다. 이를 위하여 저온의 기체 헬륨을 생성하고 순화시킬 수 있는 별도의 냉각 시스템 개발을 진행하고 있으며, 향후 실차 운전시에는 고화질소를 재냉각할 수 있는 대용량 기체 헬륨 냉각 장치가 필요할 것으로 생각된다.

또한, 자기부상열차에 적용되는 초전도 자석은 자석의 추진 및 부상에 의한 모든 힘을 코일 자체가 감당해야 하기에 기계적으로 보다 견고한 코일 개발이 필요하다. 그러나, 견고한 코일은 반드시 자석으로의 과도한 열침입을 발생시키며, 자석의 하중뿐만 아니라 열침입 특성을 고려한 재료의 선정 및 구조 설계가 수반되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

[1] Peter Becker et al., "Transrapid - Proven Solution Meeting Current and Future Transport Needs", Proceedings of Maglev, (2014)  
 [2] Hiroyuki Ohsaki., "Japanese Superconducting Maglev - Development and Commercial Service Plan", Proceedings of Maglev, (2014)  
 [3] Kaoru Nemoto et al., "HTS Magnet for Maglev Applications (2)-Magnet Structure and Performance", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, No. 2, 1104-1107 (2006)  
 [4] T. Tosaka et al., "Development of a

persistent current switch for HTS magnet", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 14, No. 2, 1218-1221 (2004)  
 [5] S.Kudada et al., "Persistent current mode HTS magnet cooled by cryocooler(2)", presented at the Applied Superconductivity Conf., (2004)  
 [6] K. Tasaki et al., "HTS magnet for maglev application (1)-coil characteristics", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 16, No. 2, 1100-1103 (2004)  
 [7] Shigehisa Kasada et al., "The Project Overview of the Magnet for Superconducting Maglev", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17, No. 2, 2111-2116 (2007)  
 [8] Katsutoshi Mizuno et al., "Experimental Production of a Real-Scale REBCO Magnet Aimed at Its Application to Maglev", IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 27, No. 4, (2017)  
 [9] Katsutoshi Mizuno et al., "Experimental Production and Evaluation of Racetrack Coils for REBCO On-board Magnet", QR of RTRI, Vol. 57, No. 3, (2016)  
 [10] K. Mizuno et al., "Manufacturing of a REBCO racetrack coil using thermoplastic resin aiming at maglev application", Physica C, Vol. 518, 101-105 (2015)  
 [11] Elo Musk., "Hyperloop Alpha", SpaceX. Retrieved, (2013)  
 [12] Rob lloyd., "hyperloop-one", <http://www.hyperloop-one.com>  
 [13] Kyubong Lee et al., "Estimation of the critical current of race-track HTS magnet considering angular dependency", Progress in Superconductivity and Cryogenics, Vol. 17, No. 3, 47-50 (2015)  
 [14] 이규봉, "선형 동기 모터용 비 절연 고온 초전도 코일의 열적, 전자기적 특성에 관

한 연구”, 창원대학교 석사 학위 논문, (2016)

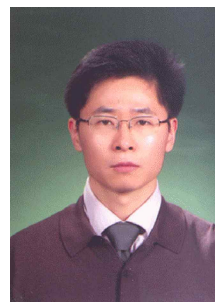
- [15]Seungyong Hahn et al. , “HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 21, No. 3, 1592-1595 (2011)
- [16]Seungyong Hahn et al. , “No-Insulation (NI) HTS Inserts for >1 GHz LTS/HTS NMR Magnets”, IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 22, No. 3, (2012)
- [17]Y. Wang et al. , “Ramping turn-to-turn loss and magnetization loss of a No-Insulation (RE)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> high temperature superconductor pancake coil”, J. Appl. Phyc., (2017)
- [18]Jeongmin Mun et al., “Electromagnetic and thermal characteristics of prototype HTS magnet system for high-speed LSM propulsion train”, 2017 Summer KIASC, yongpyong, Korea (2017)
- [19]Jeongmin Mun et al., “Thermal characteristics of HTS magnet for high-speed Maglev train”, 2017 ACASC, Jeju, Korea (2017)
- [20]Yukikazu Iwasa, “Case studies in Superconducting Magnets—design and Operational Issues”, 2nd edition, Springer
- [21] 김광록 외., “고체질소를 이용한 이동형 초전도 에너지 저장장치용 냉각 시스템 설계”, 한국초전도저온공학회논문지, 10 권 3호, 27-31 (2008)
- [22]Jeongmin Mun et al., “Design of cryogenic cooling system for HTS MAGLEV train using solid-nitrogen”, 2017 Winter KIASC , gyeongju, Korea (2017)
- [23]문정민, “초고속 자기부상 열차의 고화질소 냉각형 고온초전도 자석에 대한 연구” 창원대학교 석사 학위 논문, (2018)

저자이력



**김석호 (金錫鎬)**

1993년 한국과학기술원 기계공학과, 1997년 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사), 1999년 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사), 2005년 한국전기연구원 선임연구원, 2010년 국립 창원대학교 기계공학과 조교수, 2014년 국립 창원대학교 기계공학과 부교수



**이창영 (李昌榮)**

1993년 부산대학교 전기공학과, 1995년 부산대학교 대학원 전기공학과 (공학석사), 2012년 연세대학교 대학원 전기전자공학과 (공학박사), 1994-2005년 LS전선 전력연구소 선임연구원, 2006-현재 한국철도기술연구원 책임연구원