

The fabrication of bulk magnet stacked with HTS tapes for the magnetic levitation

Insung Park^a, Gwantaek Kim^a, Kyeongdeok Kim^b, Kideok Sim^b, and Hongsoo Ha^{a,*}

^a Cryogenic Apparatus Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, Korea

^b R&D center, SuperGenics Co., Ltd, Changwon, Korea

(Received 29 August 2022; revised or reviewed 8 September 2022; accepted 9 September 2022)

Abstract

With the innovative development of bio, pharmaceutical, and semiconductor technologies, it is essential to demand a next-generation transfer system that minimizes dust and vibrations generated during the manufacturing process. In order to develop dust-free and non-contact transfer systems, the high temperature superconductor (HTS) bulks have been applied as a magnet for levitation. However, sintered HTS bulk magnets are limited in their applications due to their relatively low critical current density (J_c) of several kA/cm² and low mechanical properties as a ceramic material. In addition, during cooling to cryogenic temperatures repeatedly, cracks and damage may occur by thermal shock.

On the other hand, the bulk magnets made by stacked HTS tapes have various advantages, such as relatively high mechanical properties by alternate stacking of the metal and ceramic layer, high magnetic levitation performance by using coated conductors with high J_c of several MA/cm², consistent superconducting properties, miniaturization, light-weight, etc.

In this study, we tried to fabricate HTS tapes stacked bulk magnets with 60 mm × 60 mm area and various numbers of HTS tape stacked layers for magnetic levitation. In order to examine the levitation forces of bulk magnets stacked with HTS tapes from 1 to 16 layers, specialized force measurement apparatus was made and adapted to measure the levitation force. By increasing the number of HTS tapes stacked layers, the levitation force of bulk magnet become larger. 16 HTS tapes stacked bulk magnets show promising levitation force of about 23.5 N, 6.538 kPa at 10 mm of levitated distance from NdFeB permanent magnet.

Keywords: HTS tapes, stack technology, levitation

1. 서 론

고온초전도체(RE₁Ba₂Cu₃O_{7-δ}, RE: 희토류 원소, 이하 REBCO)가 발견된 이후로 고유한 구조 및 특성에 의해서 테이프 형태의 선재로 개발되었으며 이후 임계전류 향상 및 장선화를 위한 연구가 집중적으로 이루어져 왔다. 이와 동시에 REBCO 세라믹 소결체인 벌크형태의 초전도체 또한 꾸준히 연구되어 왔으며, 벌크형 고온초전도체의 경우 자화(Magnetization)가 되면, 반영구적인 자석으로써 작은 부피에도 상대적으로 큰 자기장을 발생시킬 수 있다.[1]

한편, 바이오, 제약, 반도체 등의 엄격한 청결 표준을 요구하는 산업이 발전됨에 따라 약품, 화학품 및 전자부품 이송 시 진동과 분진이 일어나지 않는 Fig. 1과 같은 차세대 이송 시스템이 요구되고 있는데, 마이스너 효과를 통하여 무진동 무분진 차세대 이송시스템에 적용하고자, 벌크형 고온초전도체가 영구자석형태로 사용되는 연구가 이루어지고 있다. 최근, 세계적인 공장자동화 전문회사인 독일의 FESTO 사에서 “Supra Motion”이라는 자회사를 통해 “Supra Cube”라는 세라믹 소결 벌크 초전도체를 이용한 초전도 부상기술로 무접촉 이송장치를 개발하여 상용화 중에 있다. [2]

하지만, 일반적으로 제조되는 세라믹 소결 고온초전도 벌크 자석은 임계전류 밀도(J_c)가 상대적으로 테이프형 선재보다 낮고, 세라믹 재료의 특성상 낮은 기계적 강도, 그리고

반복적인 냉각에 의한 열충격(Thermal shock)으로 균열발생과 같은 손상을 입을 수 있으며, 대면적화 및 복잡한 형상을 제조하는데 제약이 있어 응용분야가 상당히 제한되어 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해 최근에는 REBCO 선재를 적층하여 벌크형태의 자석으로 제조하여 17 T 이상의 중심자기장을 발생시키는 연구도 진행되었다. [3-4] REBCO 선재를 적층하여 만든 벌크형태 자석의 경우에는 금속기판과 세라믹층이 교대로 적층되어 있어 상대적으로 높은 기계적 강도를 나타내고, 아울러 높은 J_c 로 인하여 고성능화가 가능하다. 또한, 비교적 균일한 초전도 특성을 지닌 REBCO 선재를 사용하므로 대량 생산에 유리하며, REBCO 선재를 원하는 모양으로 적층하여 제조할 수 있으므로 형상의 자유화,

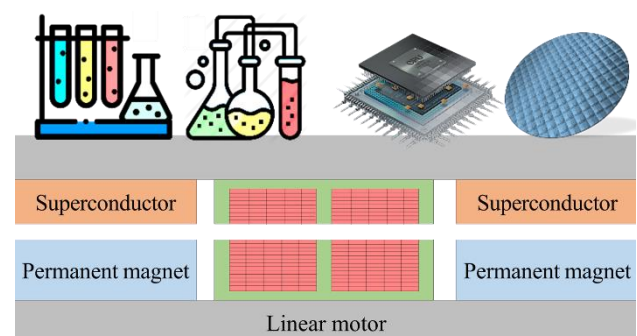


Fig. 1. Schematic drawing of next-generation transfer.

* Corresponding author: hsha@keri.re.kr

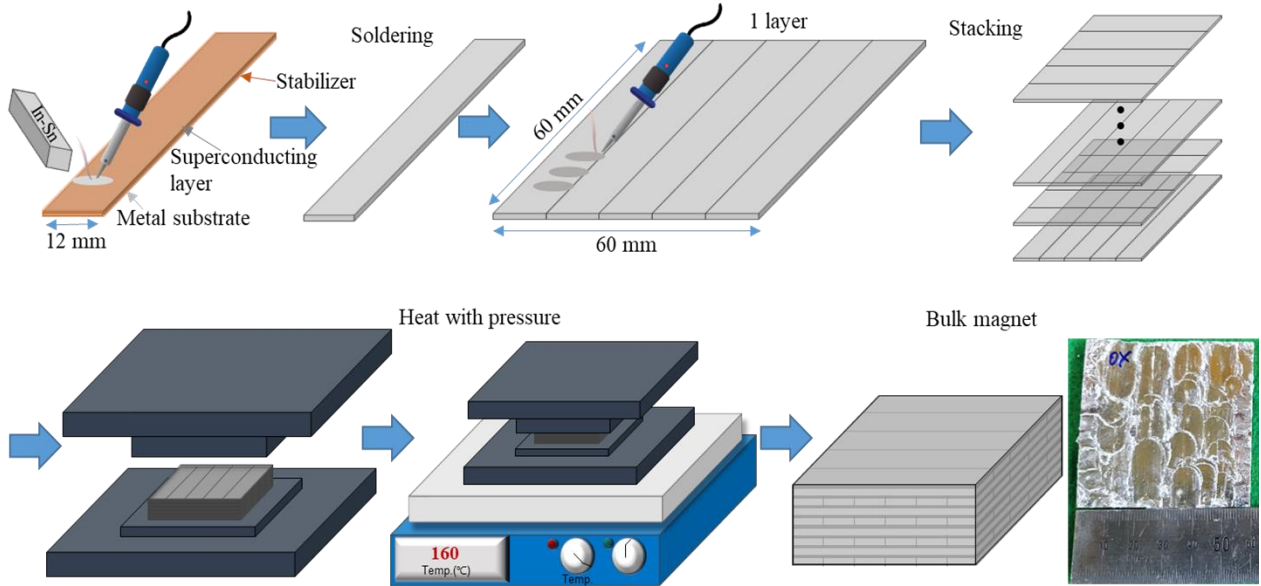


Fig. 2. Fabrication process of bulk magnet stacked with HTS tapes.

소형화가 가능한 것이 큰 장점이다.

본 연구에서는 무진동, 무부진 차세대 이송 시스템에 적용될 수 있는 고온초전도 자석을 선재 적층 방법을 통하여 제조하고자 하였다. 이를 위해 REBCO 선재를 제조사 (SuNAM, SuperOX, SuperPower)별로 구입하여 60 mm × 60 mm 면적의 적층 벌크제조에 이용하였으며, 적층되는 REBCO 선재 개수에 따른 부상력을 확인하고자 1, 4, 8, 16층을 적층하였다. 자체적으로 부상력 측정 장치를 제작하여 부상높이에 따른 부상력을 측정하여 비교하였다.

2. 제조방법

본 연구에서 제조하고자 하는 선재 적층형 고온초전도 벌크에 사용될 REBCO 선재는 벌크형 자석을 제조한 후 특성을 비교하고자 각기 다른 제조방법으로 (SuNAM-동시증발 증착법, SuperOX-펄스레이저 증착법, SuperPower -금속 유기화학 기상 증착법) 만들어진 상용 선재를 구입하여 사용하였다. 사용된 선재의 사양은 아래의 Table 1. 에 정리하였다.

REBCO 선재 적층 벌크형 자석제조 방법은 Fig.2와 같다.

- 1) 폭이 12 mm인 REBCO선재의 특징을 고려하여 길이 60 mm로 절단한 선재 5개를 나란히 배치하여 60 mm × 60 mm 면적이 되도록 한다.

TABLE I
SPECIFICATION OF HTS CCs FOR BULK MAGNET

Manufacturer	Stabilizer	Thickness	$I_c, 77K, s.f$	Stacked layers
SuNAM	Ag	110 μm	~ 700	4
	Cu	130 μm	~ 700	16
Super OX	Cu	60 μm	~ 350	1, 4, 8, 16
SuperPower	Cu	100 μm	~ 400	1, 4, 8, 16

- 2) 고온의 인두기를 이용하여 REBCO 선재 표면에 In-Sn(50:50, 녹는점: ~120 °C)솔더를 묻힌다.
- 3) 폭 12 mm 선재 5개를 나란히 배치한 후 이웃 선재와 함께 모서리를 솔더링하여 한 개 층(60 mm × 60 mm)으로 만든다.
- 4) 여러 개의 층을 제조한 후 두께방향으로 쌓는다. 이때 기계적 강도를 높이기 위해 각 층마다 선재의 방향이 직교하도록 쌓는다.
- 5) 가압치구(3 kgf)에 적층된 선재를 놓고 핫 플레이트를 이용하여 솔더가 녹아서 선재간 접합이 일어나도록 충분히 가열한다. (160 °C × 5분) 이때, 적층된 선재의 상부에 약 3 kgf의 가압치구를 얹어놓아 접합이 용이하도록 하였다.

최종완성된 벌크형 자석은 16층 적층기준으로 60 mm(l) × 60

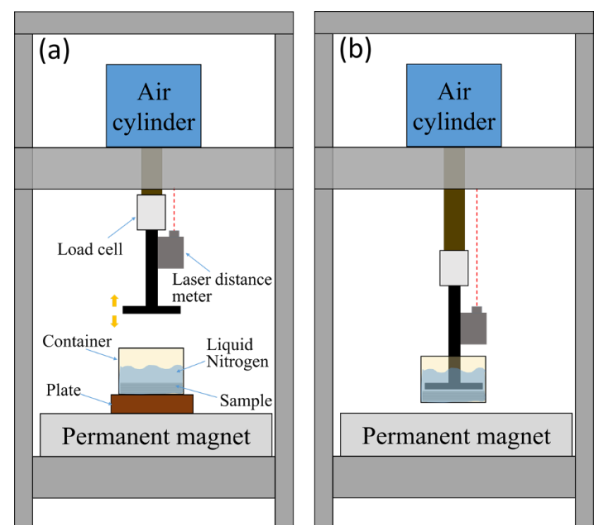


Fig. 3. Schematic diagram of specialized levitation force measurement apparatus (LFMA) (a) set-up and (b) in operation.

mm(w) × 약 3 mm(h) 로 직육면체형태이다.

3. 부상력 측정장치

부상력 측정 방법은 냉각방법에 따라 두가지로 나뉠 수 있다. 상온에서 자력선을 초전도체 내부에 통과시킨 상태에서 냉각하여 자기 볼텍스(vortex)들에 의해 위치가 고정되는 field cooling과 초전도체를 먼저 냉각시킨 후 자력선을 밀어내는 반자성 특성을 측정하는 zero-field cooling이 있다.

본 연구에서는 무진동, 무분진 차세대 이송장치에 적용하기 위해 field cooling 방법으로 부상력을 측정하였으며, 부상력 측정장치는 Fig. 2와 같이 로드셀을 이용하여 특별히 제작되었으며 측정방법은 다음과 같다.

- 1) 초전도 적층 벌크를 하부에 고정한 액체질소 용기를 영구자석(NdFeB, 중심자기장 약 0.5 T)과 10, 20 mm 간격을 유지하도록 위치시킨 상태에서 액체질소(77 K)로 냉각(field cooling)
- 2) 충분히 냉각되었을 때, 간격 유지용 판을 제거하고 공압장치와 연결된 로드셀이 달린 치구를 이용하여 초전도 적층 벌크를 영구자석 방향으로 균일하게 가압하여 반발력을 측정
- 3) 장착된 레이저 거리측정기를 이용하여 초전도 적층 벌크와 영구자석 간의 거리를 환산하여 거리에 따른 부상력 측정

4. 결과 및 토의

4.1. 초기위치 10 mm에서의 거리에 따른 부상력 측정

SuperOX, SuperPower사의 1, 4, 8, 16 층 및 SuNAM의 4, 16층을 적층하여 제조된 초전도 적층 벌크의 영구자석과의 거리에 따른 부상력 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

SuperOX 선재를 이용하여 제조된 초전도 적층 벌크의 경우, 1 mm 위치를 최대 부상력으로 볼 때, 1, 4, 8, 16 층 순으로 각각 7.8, 26.5, 55.9, 98.0 N으로 나타났다. SuperPower 선재를 이용한 초전도 적층 벌크는 1, 4, 8, 16층 순으로 13.7, 28.4, 53.9, 74.5, 103.9 N으로 측정되었고, SuNAM 선재를 이용한 초전도 적층 벌크의 경우 4, 16층에서 30.4, 100.0 N의 값을 보였다. 이를 기반으로 16층 초전도 적층 벌크의 경우 SuperPower(103.9 N), SuNAM(100.0 N), SuperOX(98 N), 순으로 약간의 차이를 보였으며, 4층 초전도 적층 벌크는 SuNAM(30.4 N), SuperPower (28.4 N), SuperOX(26.5 N) 순으로 나타났다.

REBCO 선재의 적층 수에 따라 부상력은 증가하였으며 각 제조사별 linear fitting을 진행하였을 때, 전체적으로 기울기가 0.6으로 linear하게 증가하는 것이 확인되었다. 추가적인 data 분석이 필요하지만, 이를 이용한다면 층 수에 따른 최대 부상력을 예측이 가능 할 것으로 판단된다.

4.2. 초기위치 20 mm에서의 거리에 따른 부상력 측정

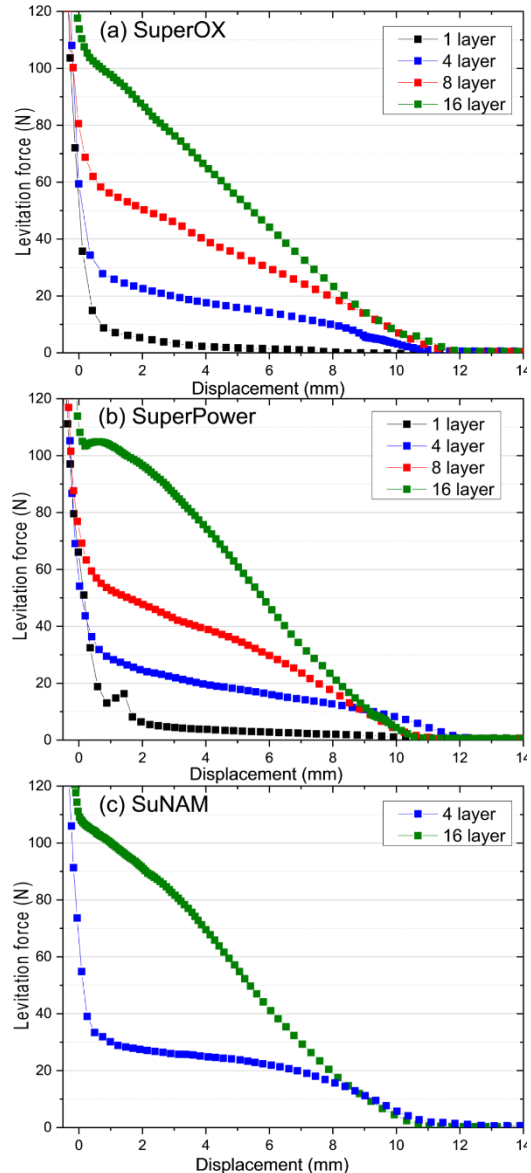


Fig. 4. Levitation force for the samples with HTS CCs made by (a) SuperOX, (b) SuperPower, (c) SuNAM.

실제로 무분진, 무진동 차세대 이송장치에 적용하기 위해서 벌크형 초전도자석을 위한 냉동기 및 패키지를 고려할 때, 약 10 mm 정도의 부상간격이 필요하다고 판단하여 초전도 적층 벌크를 20 mm에서 field cooling 한 후, 이전과 같은 방법으로 8, 16층 초전도 적층 벌크를 측정하여 10 mm 위치에서의 부상력을 확인하고자 하였으며, 측정 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5 (a)에 나타난 SuperOX의 선재를 이용한 16층 초전도 적층 벌크의 경우, 10 mm의 위치에서 23.5, 27.4 N으로 측정에 따라 약간의 오차가 있었으며, 평균 25.5 N의 값을 나타낸다. SuperPower 선재를 이용한 초전도 적층 벌크의 경우 Fig. 5(b)에서와 같이 나타났으며, 측정에 따라 다소 큰 편차를 보였다. 10 mm 위치에서 26.5, 27.4, 31.4 N 값을 보였으며, 평균 28.4N으로 계산되었다. Fig. 5(c)의 경우, SuNAM 선재를 이용한 초전도 적층 벌크의 data 이며, 10 mm에서의 25.5, 28.4, 28.4 N 값을 보이며, 이는 평균 27.4 N이다. 영구자석과 가까워질수록 약간의 오차가 발생하였으며, 이에

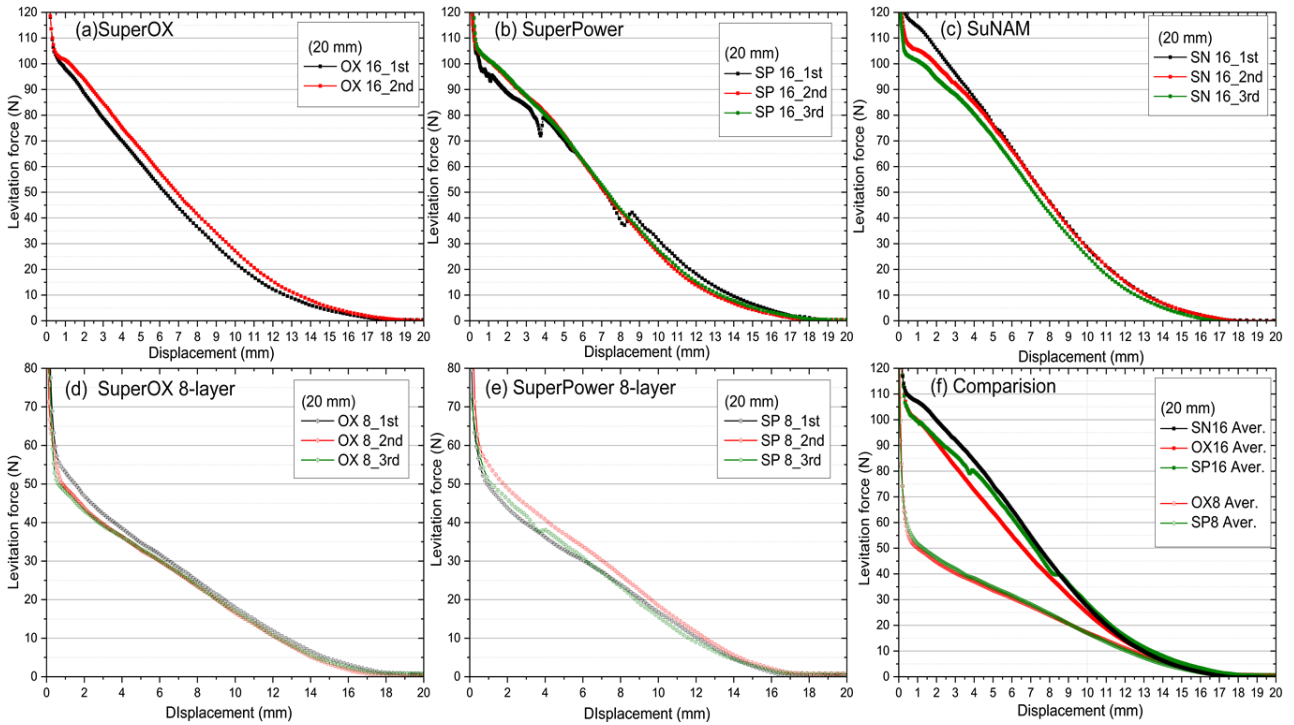


Fig. 5. Levitation force at initial position of 10 and 20 mm for the 16-layer samples with HTS CCs of (a) SuperOX, (b) SuperPower, (c) SuNAM, for the 8-layer samples with HTS CCs of (d) SuperOX, (e) SuperPower, and average data of each sample for the comparison.

대해서 확인 중에 있다.

추가적으로 8층 초전도 적층 벌크의 10 mm 위치에서의 부상력을 확인하였으며, SuperOX 초전도 적층 벌크는 Fig. 5(d)에서와 같이 평균 17.0 N의 값을 보였으며, SuperPower 선재를 이용한 초전도 적층 벌크는 Fig. 5(e)에서 나타난 바와 같이 평균 16.7 N의 값을 나타내었다.

제조사별 REBCO 선재 적층 벌크의 특성비교를 위하여 Fig. 5(f)에 8층, 16층 초전도 적층 벌크의 부상력 평균값을 나타내었다. 최대부상력 1 mm 기준, 16층 초전도 적층 벌크의 경우, SuNAM(106.8 N), SuperPower(99.7 N), 그리고 SuperOX(99.3 N) 순이며, 8층 초전도 적층 벌크의 경우 SuperPower(51.9 N), SuperOX(50.0 N) 순으로 나타났다. 10 mm 위치에서의 16층 초전도 적층 벌크 부상력은 SuperPower (28.4 N), SuNAM(27.4 N), SuperOX(24.8 N) 순이며, 8층 초전도 적층 벌크의 경우 위에서 언급한 바와 같이 거의 비슷한 값을 보였다.

또한, 선재의 사양 중 $I_{c,77K,sf}$ 값이 SuNAM 선재가 다른 제조사에 비해 1.7~2배 가량 높아 더 높은 부상력을 기대하였지만, 부상력에서는 큰 차이가 없는 것으로 볼 때, 영구자석에 의한 자기장 하에서 임계전류 값이 큰 차이가 없는 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 무진동, 무분진 차세대 이송장치에 적용하기 위한 기초연구로서 REBCO 선재 적층 벌크형 자석제조를 하였다. 벌크형 자석은 60 mm × 60 mm 크기로 1, 4, 8, 16층을 적층하여 성공적으로 제조하였으며, 16층 적층 벌크형 자석의 경우 10 mm 위치에서 REBCO 선재 제조사와

상관없이 부상력이 최소 2.4 kgf, 23.5 N, 이상이며, 면적을 고려한다면 6.538 kPa 이상으로 나타나는 것이 확인되었다. 이는 16층 적층 벌크형 자석 부피가 60 mm × 60 mm × 3.0 mm 라는 것을 감안한다면, 세라믹 소결방식의 벌크형 자석에 비해 훨씬 뛰어난 부상력을 나타낸다고 볼 수 있다.

추가적으로 반복측정을 통하여 부상력 측정 및 초전도 적층 벌크의 신뢰성 분석이 필요하며, 공학적 전류밀도(J_c)가 월등히 높은 하나의 기판에 초전도층이 다층 적층된 선재[5-6]를 통해 선재 적층 벌크형 자석을 제조 및 적층 수를 늘려 얇으면서 가볍고, 월등히 높은 부상력을 가지는 초전도 적층 벌크를 제조할 예정이다. 또한, 기존의 다른 연구그룹의 부상력 측정 방식[7-9]을 참고하여 zero-field cooling data 측정 및 field cooling 시 반발력(Repulsive force) 뿐만 아니라 인력(Attraction force)을 측정할 수 있도록 부상력 측정 장치를 개조하여 측정할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by National R&D Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (2022M3I9A1076881)

REFERENCES

- [1] J. H. Durrell, M. D. Ainslie, D. Zhou, P. Vanderbemden, T. Bradshaw, S. Speller, F. Mykhaylo, D. A. Cardwell, "Bulk superconductors: a roadmap to applications," *Superconductor science and technology*, 31(10), 103501, 2018.

- [2] https://www.festo.com/us/en/e/about-festo/research-and-development/supramotion-id_9881/
- [3] A. Patel, A. Baskys, T. Mitchell-Williams, A. McCaul, W. Coniglio, J. Hänisch L. Mayraluna, B. A. Glowacki, "A trapped field of 17.7 T in a stack of high temperature superconducting tape," *Superconductor Science and Technology*, 31(9), 09LT01, 2018.
- [4] M. Suyama, S. Pyon, Y. Iijima, S. Awaji, & T. Tamegai, "Trapping a magnetic field of 17.89 T in stacked coated conductors by suppression of flux jumps," *Superconductor Science and Technology*, 35(2), 02LT01, 2022.
- [5] H. Ha, G. Kim, H. Noh, J. Lee, S. Moon, & S. S. Oh, "Fabrication of 1 m long multi layered superconducting coated conductor with high engineering critical current density," *Superconductor Science and Technology*, 33(4), 044007, 2020.
- [6] G. Kim, H. Ha, H. Kim, S. Oh, J. Lee, & S. Moon, "Fabrication of 6-superconducting layered HTS wire for high engineering critical current density," *Progress in Superconductivity and Cryogenics*, 23(4), 10-13, 2021.
- [7] M. Murakami, T. Oyama, H. Fujimoto, T. Taguchi, S. Gotoh, Y. Shiohara, K. Naoki & S. Tanaka, "Large levitation force due to flux pinning in YBaCuO superconductors fabricated by melt-powder-melt-growth process," *Japanese Journal of applied physics*, 29(11A), L1991, 1990.
- [8] J. S. Wang & S. Y. Wang, "High temperature superconducting magnetic levitation," De Gruyter, 2017.
- [9] Kim, C. J. "Superconductor Levitation," Springer, Singapore, 2019.