

A Study on the widthwise thickness uniformity of HTS wire using thickness gradient deposition technology

Gwantae Kim^a, Insung Park^a, Jeongtae Kim^a, Hosup Kim^b
Jaehun Lee^c, and Hongsoo Ha^{*,a}

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

^b Power Cable Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, Korea

^c SuNAM Co. Ltd., Anseong Republic of Korea

(Received 12 December 2023; revised or reviewed 21 December 2023; accepted 22 December 2023)

Abstract

Until now, many research activities have been conducted to commercialize high-temperature superconducting (HTS) wires for electric applications. Most of all researchers have focused on enhancing the piece length, critical current density, mechanical strength, and throughput of HTS wires. Recently, HTS magnet for generating high magnetic field shows degraded performance due to the deformation of HTS wire by high electro-magnetic force. The deformation can be derived from widthwise thickness non-uniformity of HTS wire mainly caused by wet processes such as electro-polishing of metal substrate and electro-plating of copper. Gradient sputtering process is designed to improve the thickness uniformity of HTS wire along the width direction. Copper stabilizing layer is deposited on HTS wire covered with specially designed mask. In order to evaluate the thickness uniformity of HTS wire after gradient sputtering process, the thickness distribution across the width is measured by using the optical microscope. The results show that the gradient deposition process is an effective method for improving the thickness uniformity of HTS wire.

Keywords: HTS wire, superconducting magnet, thickness uniformity, gradient deposition

1. INTRODUCTION

무절연 고온초전도 코일 제작기술은 2세대 고온초전도(High-temperature superconductor, HTS) 코일의 주요 문제 중 하나였던 켄치 현상을 방지하는 기술로 주목받고 있으며[1, 2], 전 세계적으로 다양한 2세대 고온초전도 코일 응용기술의 개발이 활발히 이루어지고 있다[3-6]. 고성능 코일을 제작하기 위해서는 고온초전도 선재의 길이 방향 임계전류 및 형상 균일성이 요구된다. 특히, 고온초전도 선재의 형상 불균일로 인하여 마그넷 제작시 전체 형상 예측이 어려우며 그로 인해 마그넷 운전시 전기 기계적 성능 저하가 일어날 수 있다. 현재 상용화된 2세대 고온초전도 선재의 형상 불균일성은 다음 두가지 이유로 인해 발생한다. 첫째 전해 연마로 인해 금속 기판의 양쪽 모서리가 과다 식각되어 폭 방향으로 두께가 불균일한 형상을 가진다. 둘째 전기적 특성을 향상시키기 위해서 안정화제인 은(Ag)을 증착한 후 최종적으로 구리(Cu)를 도금하는데, 도금공정은 상대적으로 표면적이 넓은 모서리에 전계가 집중되어 중앙부 보다 두꺼운 형상으로 증착이 되어 고온초전도 선재의 형상이 독본(dog-bone) 형태를 가지게 된다.

본 연구에서는 폭 방향 두께 불균일을 해결하기 위하여 먼저 상용화된 초전도 선재의 단면 두께 차이를 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 은과 구리 안정화제를 스퍼터링 방법으로

증착하여 두께를 균일화하는 방법을 적용하고자 하였으며, 이를 위해 증착 영역을 선택적으로 가리는 차폐판을 설계 및 제작하였으며, 차폐판을 통해 선재의 중심부와 양끝단부를 차등증착하여 독본형태를 가지지 않는 고온초전도 선재를 제조하고자 하였다. 차등증착된 선재와 상용화 되고 있는 고온초전도 선재의 단면을 비교 분석하였다.

2. EXPERIMENTAL

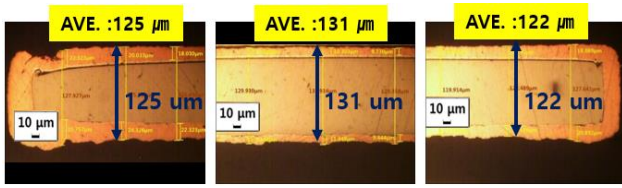
2.1. 고온초전도선재 단면분석

현재 상용화되어 있는 고온초전도 선재의 단면 형상과 두께를 분석하여 Fig.1에 나타내었다. 선재의 중심과 양끝단의 두께 차이가 5~7 μm 로 차이나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 단면 형상을 확인한 결과 구리 도금공정에 의해 선재 양끝단의 형상이 독본형태를 가지는 것을 확인할 수 있다. 상용화 되어있는 고온초전도 선재의 두께 차이는 제조사마다 차이가 있으며 대부분 폭 방향 두께 불균일성을 지니고 있다.

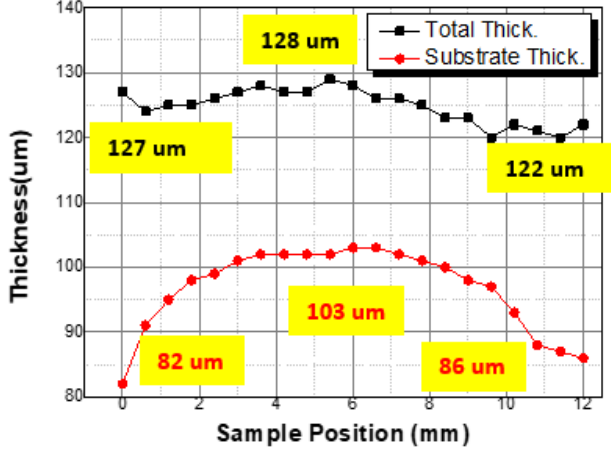
2.2.1. 차등증착 선행 실험

차등증착 조건의 실험조건은 상대적으로 두꺼운 고온초전도 선재의 중심부는 증착이 되지 않게 막아주고 얇은 특성을 가지는 양끝 부분에서 증착이 되는 것을 확인 하기위해 12 mmw. 의 상용화 고온초전도 선재 위에 차폐판 역할을 하는 8 mmw. 금속 테이프를 접어서 설치하였다. 금속 테이프와

* Corresponding author: hsha@keri.re.kr



(a) Cross-section of commercial HTS wire



(b) Thickness distribution of HTS wire

Fig. 1. Cross-section and thickness distribution of commercial HTS wire.

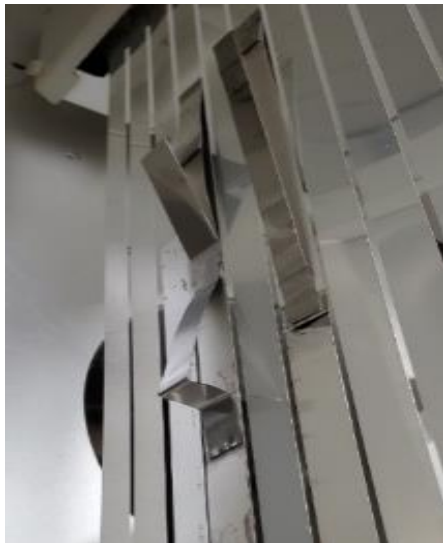


Fig. 2. Photo of simplified thickness gradient deposition shield.

고온초전도 선재 사이의 최적 거리를 확인하기 위해 Fig. 2 와 같이 설치하였다. Table. 1에 상세 실험 조건을 나타내었고, 두께분석 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

TABLE. 1
EXPERIMENTAL CONDITION OF GRADIENT DEPOSITION.

분압 (mTorr)	증착 물질	이온화 가스	초전도 선재 이동속도	DC Power
3	Ag	Ar	정지상태	500 V 3 A

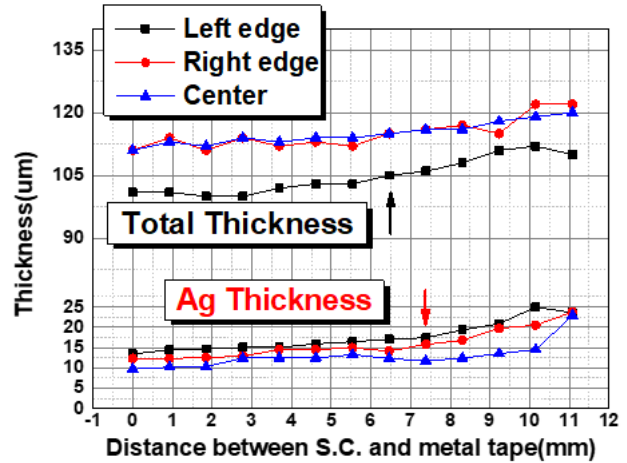


Fig. 3. Thickness distribution of Ag layer on HTS wire using gradient deposition shield.

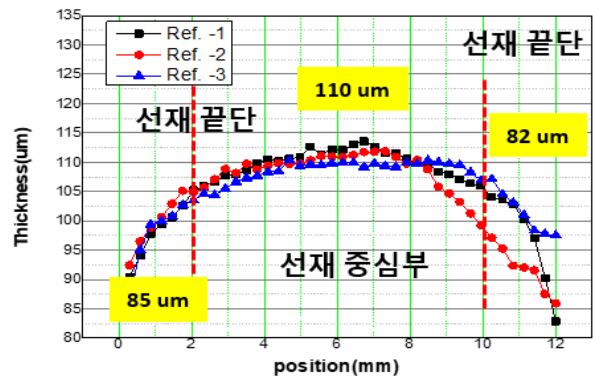


Fig. 4. Widthwise thickness distribution of commercial HTS wires.

차등증착 조건 확립을 위한 선형 실험 결과 고온초전도 선재의 표면을 금속테이프가 가리고 있는 형태지만 고온초전도 선재와 금속테이프 사이의 거리가 먼 부분일수록 Scattering에 의해 두께가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 차등증착 차폐판과 고온초전도 선재 사이의 간격이 최대한 가깝게 설치되어야 선재의 중앙은 증착되지 않고 상대적으로 얇은 양 끝단에서 증착을 할 수 있을 것이라고 판단되었다. 동일한 증착 조건임에도 좌/우측의 두께가 다른 것은 금속테이프의 치우침에 따른 결과라고 추측된다. 치우침에 의한 두께 차이는 차등증착 차폐판의 형상을 일정하게 제작하여 보완할 수 있다고 판단하였다.

2.2.2. 차등증착 실험

차등증착 실험을 위해 은 안정화재만 코팅된 선재를 사용하였으며, 선재의 양끝단과 중심의 두께 차이를 확인하였고, 폭 방향 두께 편차를 분석하여 Fig. 4에 나타내었다.

양 끝단 2.5 mm 영역에서 폭 방향 두께가 25 μm 차이를 확인하였다. 폭 방향 두께 분석 결과를 바탕으로 차등증착 차폐판을 설계하였으며 Fig. 5에 차등증착 차폐판 형상을 나타내었다. 본 실험에서 사용한 스퍼터 증착 영역의 범위는 100 x 200 mm이며, 릴투릴(Reel-To-Reel)조건으로 증착 영역이 총 10턴으로 구성 되어있다. Table. 2에 차등증착에 실험에 적용한 조건을 나타내었다.

TABLE 2
EXPERIMENTAL CONDITIONS OF GRADIENT DEPOSITION.

분압 (mTorr)	증착 물질	이온화 가스	초전도 선재 이동속도	DC Power
	Ag			500 V 3 A
3		Ar	0.1 m/min	
	Cu			500 V 2 A

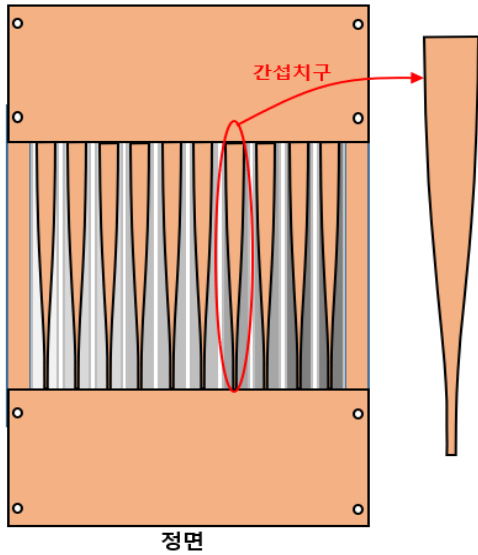


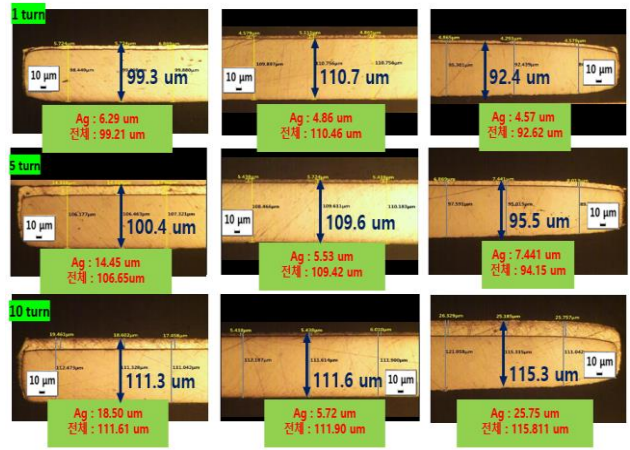
Fig. 5. Schematic diagram of gradient deposition shield.

설계된 차등증착 차폐판을 적용하여 턴수 증가에 따른 두께 증가를 확인하였으며 Fig. 6 (a), (b)에 단면 분석결과를 나타내었다. 차등증착 차폐판의 영향으로 중심부는 증착이 거의 없고 선재의 끝단은 턴수가 증가함에 따라 안정화재 두께가 증가하는 결과를 확인하였다.

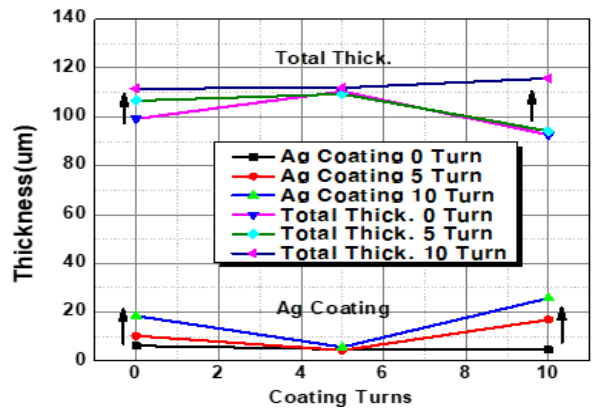
턴수 증가에 따른 안정화재 두께증가 결과를 바탕으로 고온초전도 선재의 앞, 뒷면에 구리 안정화재를 차등증착하여 형상 균일도가 향상된 고온초전도 선재를 제조하고자 하였다. 안정화재 두께 증가 실험과 동일하게 선재의 중심부는 차등증착 차폐판의 영향으로 증착이 거의 없으며 양끝단 부분에서만 증착된 결과를 확인할 수 있었다. 차등증착된 선재의 단면을 확인한 결과 양끝단과 중심의 두께 차이가 최대 6 μm 로 확인되었으며, 이는 릴투릴 공정에서 선재가 좌우로 이동하면서 발생한 것으로 판단된다. 구리도금 공정을 거치는 선재에 비하여, 스퍼터 공정으로 차등증착한 선재는 형상 균일도가 우수한 선재를 제조할 수 있었으며 Fig. 7에 차등증착된 선재의 단면과 두께를 분석하여 나타내었다.

3. RESULT AND DISCUSSION

차등증착 실험을 통해 차폐판의 거리 및 형상에 따라 증착 두께 조절 가능성을 확인하였으며, 은 만 코팅된 고온초전도 선재의 단면 분석결과를 바탕으로 차등증착

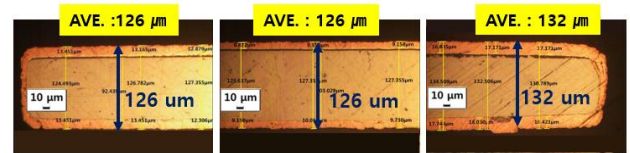


(a) Cross-section of confirming the increase in thickness as the number of turns increases HTS wire

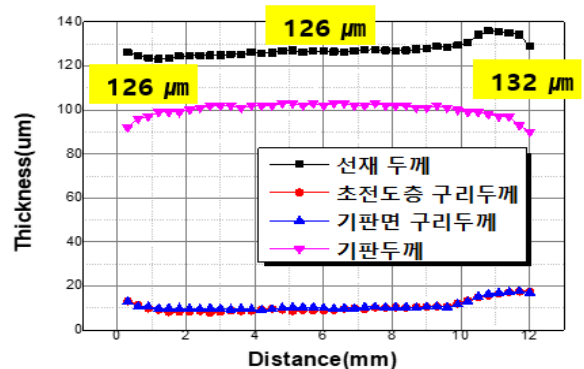


(b) Thickness analysis of gradient deposited HTS wire

Fig. 6. Cross-section and thickness analysis of gradient deposited HTS wire



(a) Cross-section of gradient deposited HTS wire



(b) Thickness analysis of gradient deposited HTS wire

Fig. 7. Cross-section and thickness analysis of gradient deposited HTS wire.

차폐판을 설계하고 적용하였다. 차등증착된 고온초전도 선재의 단면 두께를 분석한결과 증착 턴수 증가에 따라 중앙부는 증착이 미비하였고, 양 끝부분 증착 두께가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 차등증착 차폐판에 의해 고온초전도 선재의 앞, 뒷면의 증착 두께가 모두 동일한 것을 확인하였다. 릴투릴 공정으로 인해 고온초전도 선재의 좌우의 두께가 동일하게 증착되지 않았지만 차등 증착 차폐판의 영향으로 끝단에서의 증착률이 일정하다는 것을 분석결과를 통해 확인할 수 있었다. 또한 전해 연마 공정으로 인해 기판의 두께가 폭 방향으로 다른 고온초전도 선재를 차등증착 하여 폭 방향 두께 편차가 크지 않으며 직사각형 형상에 가까운 고온초전도 선재를 제조할 수 있었다. 하지만 현재 본 논문에서 제시하는 형태보다 전기 기계적 특성을 향상시키기 위해서는 모서리 증착을 최적화할 필요성이 있다.

4. CONCLUSION

본 연구에서는 상용화 고온초전도 선재 단면 분석을 통해 선재의 폭 방향 두께 불균일성을 확인하였고, 선행 실험으로 차폐판을 통한 차등증착 가능성을 확인하였다. 차등증착에 사용한 고온초전도 선재는 은 만 코팅된 선재를 사용하였으며 폭 방향 두께를 단면 분석을 통해 확인하였다. 분석결과를 바탕으로 차등증착 차폐판의 형상을 설계 및 적용하여 실험을 진행하였다. 차등증착 차폐판의 영향과 릴투릴 공정에 의한 두께 증가 확인을 위해 은 안정화제를 증착하여 턴수 증가에 따른 증착 두께증가를 확인하였고, 고온초전도 선재의 앞, 뒷면에 구리 안정화제를 차등증착하여 고온초전도 선재의 폭 방향 형상이 균일한 고온초전도 선재를 제조하고자 하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

차등증착 차폐판의 영향으로 고온초전도 선재의 중심부는 증착이 거의 이뤄지지 않았으며 양 끝단 부분에 증착이 된 것을 확인하였다. 단면 분석결과 두께 편차가 6 μm 로 확인되었다. 또한 구리도금 공정을 거치면서 독본 형태를 가지는 상용화 고온초전도 선재에 비해 양끝부분이 직사각형 형태를 가지는 고온초전도 선재를 제조하였다.

본 연구에서 제시하는 스퍼터 방식의 차등증착 공정은 폭 방향 두께의 균일성이 우수하고 직사각형 형상의 고온초전도 선재를 응용분야에 적용한다면 초전도 특성, 기계적 안정성 및 내구성 향상에 기여하리라고 생각한다.

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] R. L. S. Emergo, et al., "Thickness dependence of superconducting critical current density in vicinal $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thick films," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 4, 2004.
- [2] Kwang Lok Kim, et al., "400-MHz/60-mm All-REBCO nuclear magnetic resonance magnet: Magnet design," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4, 2016.
- [3] Seungyong Hahn, et al., "No-insulation coil under time-varying condition: magnetic coupling with external coil," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, 2013.
- [4] Sangwon Yoon, et al., "Design and fabrication of double pancake coil using 2G wire for conduction cooled superconducting magnet," *Phys. Proc.*, vol. 27, 2012.
- [5] Sukjin Choi, et al., "A study on the no insulation winding method of the HTS coil," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, pp. 4904004, 2012.
- [6] Seungyong Hahn, et al., "No-insulation (NI) HTS inserts for > 1 GHz LTS/HTS NMR magnets," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, pp. 4302405, 2012.
- [7] Seungyong Hahn, et al., "HTS pancake coils without turn-to-turn insulation," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp. 1592-1595, 2011.
- [8] Jungbin Song, et al., "Dynamic response of no-insulation and partial-insulation coils for HTS wind power generator," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, pp. 5202905, 2015.
- [9] Young Jin Hwang, et al., "Electromagnetic design of a 15 MW-class HTS flux switching synchronous generator considering mechanical stress of the rotor core," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 3, 2014.
- [10] Kwang Lok Kim, et al., "Quench behavior of a no insulation coil wound with stainless steel cladding REBCO tape at 4.2 K," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 30, no 7, 2017.
- [11] Kabindra R Bhattarai, et al., "Quench analysis of a multiwidth no-insulation 7-T 78-mm REBCO magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 4, 2017.
- [12] Zhenyu Zhang, et al., "An experimental investigation of the transient response of HTS non insulation coil," *J. Supercond. Novel Magnetism*, vol. 30, pp. 387-393, 2016.
- [13] Takahiro Oki, et al., "Evaluation on quench protection for no-insulation REBCO pancake coil," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4, 2016.
- [14] Y. Wang, et al., "An equivalent circuit grid model for no-insulation HTS pancake coils," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, 2015.
- [15] S. Noguchi, et al., "Current behavior simulation in stacked NI REBCO pancake coils during local normal-state transition," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 4, 2017.