R2R Hall sensor 측정 장치를 이용한 비접촉식 성능평가

The quality evaluation of SmBCO CC by non-contact R2R Hall sensor array system

오재근[1], 오상수[1], 하동우[1], 하홍수[1,*], 고락길[1], 김호섭[1], 송규정[2], 이남진[3], 문승현[4]

Jae-Geun Oh[1], Sang-Soo Oh[1], Dong-Woo Ha[1], Hong-Soo Ha[1,*], Rock-Kil Ko[1], Ho-Sub Kim[1], Kyu-Jeong Song[2], Nam-Jin Lee[3], Seong-Hyun Moon[4]

Abstract: For the effective evaluation of superconducting properties of a coated conductor, with a long length, a non destructive characterization technique including a reel-to-reel (R2R) Hall measuring system have been developed. A non-contact R2R Hall sensor array system was particularly designed to measure the superconducting property of coated conductors. The superconducting properties of long length coated conductors were measured by using this device. It was demonstrated that this system was convenient to measure the intensity and distribution of the magnet field applied perpendicular to the surfaces of the coated conductors. Using this device, the defect and low critical current density(*Jc*) area of coated conductors could be detected in real-time measurement.

Key Words: Hall sensor, reel-to-reel, coated conductor.

1. 서 론

초전도 현상이 1911년 K. Onnes[1]에 의해 발견된 후, 여러 종류의 저온초전도체 및 고온초전도체의 발견으로 이어져 왔으며 현재까지 응용을 위한 기술개발이 거듭되고 있다[2-4]. 고온초전도체 발견과 함께 연구되기 시작한 2세대 고온초전도 선재인 박막선재(coated conductor)[5-6]는 최근 연구용으로 판매되기 시작하였다.

2세대 초전도 선재의 상용화를 위해 임계전류(*Ic*)가 균일한 수백 미터 이상 길이의 선재를 개발할 필요가 있다. 하지만 긴 길이의 선재에서 임계전류의 불균일 분포가 나타나기 쉬우며 그것은 기판, 완충층 및 초전도층의 불균일이 기인한다. 한편 이러한 불균일성은 임계전류 측정을 통하여 확인할 수 있으며 전체길이에 대해 손상 없이 정확하고 빠른 측정이 요구된다.

[1]정 회 원 : 한국전기연구원 초전도재료연구그룹
[2]정 회 원 : 전북대학교 과학교육학부 물리교육
[3]정 회 원 : KAIST 물리학과
[4]정 회 원 : (주)서남
*교신저자 : hsha@keri.re.kr
원고접수 : 2008년 08월 21일
심사완료 : 2008년 09월 02일
게재확정 : 2008년 09월 02일

임계전류 측정방법에는 직접 선재에 전류를 통전시키는 4-단자법, Hall sensor를 이용하여 간접적으로 임계전류를 측정하는 방법[7]이 있다.

4-단자법은 박막선재의 정확한 임계전류 값을 측정할 수 있지만 soldering 등에 의해 물리적으로 선재가 손상을 받는 단점이 있으며 측정 시간 또한 길다.

Hall sensor를 이용한 측정법은 초전도 선재에 자장을 인가하였을 때 발생하는 자장을 측정하는 기술이다. 초전도체에 외부에서 자장을 인가하면 Meissner 효과에 의해 선재 표면에 차폐전류가 형성되고 이 차폐전류에 의해 자기장이 만들어 지는데 이 자기장 profile을 측정하면 초전도체의 임계전류를 예측할 수 있다. Hall sensor법은 비접촉식이므로 선재에 손상을 주지 않으며 실시간으로 자장 분포를 통해 임계전류 예측이 가능하다.

본 논문에서는 연구실 자체 제작한 Hall sensor 특성평가 장치를 이용하여 박막선재의 자장 분포를 측정하였으며 결함부의 정확한 위치 및 자장특성을 측정하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 선재는 EDDC(evaporation using drum in dual chamber)[8] 시스템을 이용하여 IBAD-MgO 기판에 SmBCO층을 증착한 박막선재이다. 장선의 박막선재의 초전도 특성을 측정하기 위하여 7개의 Hall sensor array를 구입하여 측정에 이용하였다. 한편, 자장인가를 위하여 표면자장이 2000 Gauss인 Nd-Fe-B 영구자석을 사용하였으며 액체질소가 담긴 용기내부로 박막선재를 이송할 수 있는 R2R 시스템을 갖춘 R2R Hall sensor 측정 장치를 구성하였다. 각 Hall sensor에서 측정된 신호는 컴퓨터를 통하여 저장되었으며 실시간으로 위치 및 자장의 세기를 모니터링 하였다. 그림 1(a)에 본 연구에서 제작한 시스템의 모식도를 나타내었다. 준비된 박막선재를 Hall sensor 측정 장치의 reel에 권선 후, 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 encoder 및 가이드롤러 아래로 내려 액체 질소에 잠기게 하였다. 액체 질소가 채워진 용기에 선재를 담가 냉각 후 좌우 가이드롤러가 충분히 냉각이 되면 측정을 시작하였다. Reel의 크기에 따라 선재 권선 가능 길이가 달라지지만 본 장치의 경우 Hall sensor 측정 step(1~10mm간격)에 따라 20~200m 까지 측정 가능하였다. 선재이동시 각각의 Hall sensor는 1초 동안 최대 50,000개의 데이터를 획득할 수 있어서 보다 정확한 정보를 얻을 수 있다.

비접촉식 Hall sensor 평가 측정 장치에 사용된 Hall

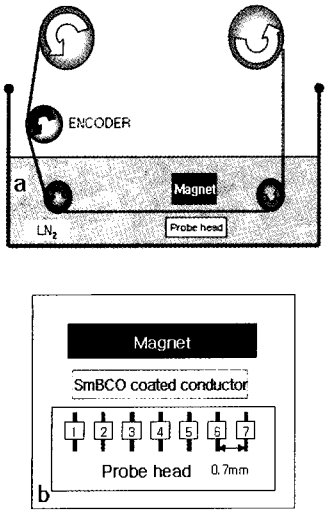

Fig. 1. Schematic set-up of the non-contact R2R Hall sensor array system. (a) main R2R system (b) arrangement of Hall sensor and permanent magnet.

sensor는 그림 1(b)처럼 7개의 Hall sensor들이 내장된 multi-Hall sensor 장치를 사용하였으며 각각의 Hall sensor 위치는 4번 sensor를 중심으로 측정선재의 너비 방향으로 0.7mm 간격으로 좌우 각각 3개씩 총 7개의 Hall sensor로 구성되었다. 박막 선재 표면에 균일한 수직자기장을 인가하기 위하여 multi-Hall sensor에서 15mm 상부에 영구자석을 위치하였으며, Hall sensor 표면 위를 통과하는 박막선재의 표면에 약 390 Gauss의 자기장이 인가되는 것을 확인하였다.

고온초전도 박막 선재의 앞부분에 스테인리스 dummy tape를 1.5m 정도 연결하여 고온초전도 박막 선재를 측정하기 전에 영점 조절을 하였다. 이는 박막선재 통과시 자장을 측정하였을 경우 초전도층 이외의 영향에 따른 노이즈를 제거하기 위함이다. 측정된 자장값과 4-단자법으로 측정된 임계전류 측정치와 비교하여 상관관계를 식으로 나타내고자 하였다. 아울러 자장값의 차이가 큰 부분에 대해 상대적인 비교 분석을 행하였다.

3. 실험결과 및 논의

3.1. 비 접촉식 R2R Hall sensor 측정장치 특성평가

제작된 R2R Hall sensor 측정장치를 이용하여 R2R 방식으로 박막선재를 액체온도에서 Hall sensor와 영구자석 사이를 이동시키며 실시간으로 박막선재의 표면자기장 변화를 측정하였다. 그림 2는 스테인리스 dummy tape와 SmBCO 박막선재의 표면자기장을 multi-Hall sensor로 측정하여 나타낸 것이다.

스테인리스 dummy tape이 Hall sensor를 통과할 때는 영구자석의 자속선이 그대로 통과되어 Hall sensor에 측정되므로 인해 자기장의 변화가 전혀 없음을 알 수 있다. SmBCO 박막선재는 영구자석에서 발생시키는 자장 영역을 통과할 때 표면자기장의 변화가 나타나게 되고 이것은 Hall sensor를 통해 그림 2와 같이 나타남을 알 수 있었다.

한편, 그림 3은 박막선재가 R2R 방식으로 이동할 때, 박막 선재의 길이방향 표면자기장 최소치 분포를 실시간으로 나타낸 것이다.

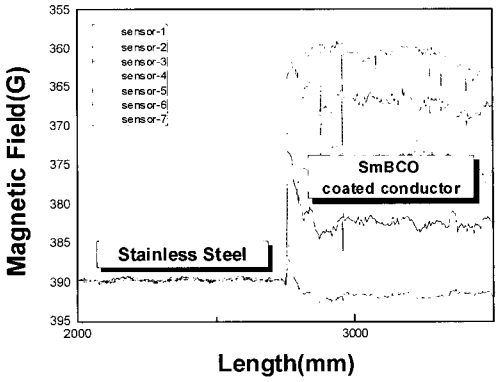

Fig. 2. Magnetic field distributions of stainless steel tape and SmBCO coated conductor.

Hall sensor에서 측정된 7개 자장값의 최대치에 최소치를 뺀 결과의 분포를 그림 3에 나타내었다. 명암차이로 구분하여 표기함으로서 보다 명확히 결함 부분을 시각적으로 나타낼 수 있다. 흰색 부분은 약 367~375 Gauss의 자기장 값을 나타내며 흰부분 사이의 어두운 부분은 약 390 Gauss로 영구자석의 자기장과 같은 값을 나타내었다.

이러한 어두운 부분은 초전도 특성을 거의 나타내지 못함을 알 수 있다. Hall sensor를 이용한 자장 측정값을 이용하여 박막선재의 길이 방향 초전도 특성의 균일성을 측정할 수 있다. 즉, 긴 박막선재에 존재할 수 있는 미세 결함 및 상전도 영역을 선재 절단 및 파손 없이 관측이 가능하다.

본 장치의 경우 Hall sensor로 자장 측정 시 실시간으로 박막선재 측정 길이를 엔코더로 측정할 수 있어서 결함 발견 시 정확한 위치를 찾아 낼 수 있다. 단속적인 기존의 4-단자법에 의한 구간별 임계전류 측정을 통해 결함을 찾아내는 방법에 비해 보다 정확하고 효율적이다. R2R방식의 비접촉식 Hall sensor 측정은 고온초전도 SmBCO 박막 선재의 물리적 손실을 최소화할 수 있었고, 이를 통하여 보다 객관적이고 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있다.

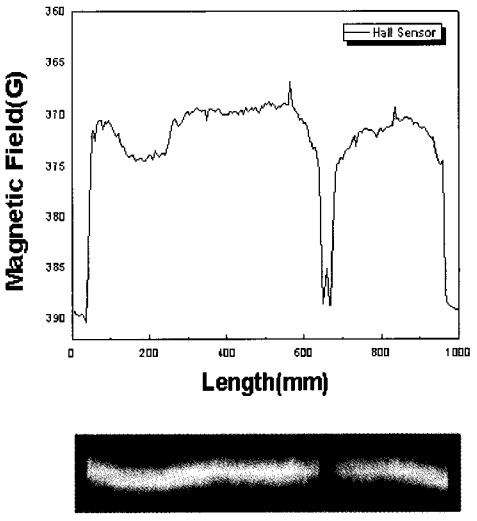

Fig. 3. Magnet field evaluation of a 10m long SmBCO coated conductor.

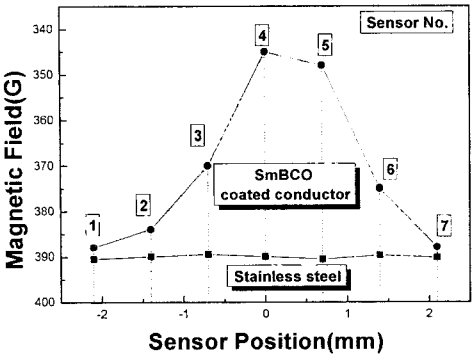

Fig. 4. Representative transverse magnetic field distributions of superconducting coated conductor and stainless steel dummy tape.

3.2. Hall sensor 특성평가 장치를 이용한 I_c 예측

SmBCO 박막선재를 R2R방식으로 비접촉식 Hall sensor 측정 장치 내로 이동 시 Hall sensor들의 위치에 따른 자기장 값을 그림 4에 나타내었다. 초전도 특성(혹은 임계전류)이 우수하면, Meissner 효과로 인한 선재 폭 방향으로의 자기장의 기울기가 크게 나타나며, 이때 주로 중간에 위치한 4번 Hall sensor와 1번 또는 7번 Hall sensor와의 측정값차이로 기울기를 알 수 있다. 비교를 위해 나타낸 스테인리스 dummy tape의 경우 7개의 Hall sensor에서 측정된 자기장 값은 거의 같다.

한편, 박막선재를 영구자석과 Hall sensor 사이를 통과시키며 측정된 자장값은 임계전류와 직접적인 연관이 있으므로 자장 분포를 측정한 샘플을 다시 4-단자법으로 임계전류를 측정하여 비교함으로써 임계전류 특성을 예측할 수 있다. 따라서 다수의 박막선재를 이용하여 Hall sensor 자기장 측정값과 4-단자법 임계전류 측정 결과를 비교하여 아래의 경험식을 도출하였다.

$$I \fallingdotseq 2.6 \times X \qquad (1)$$

여기서, I는 임계전류(I_C), X는 7개의 Hall sensor중 최대 최소 자기장 값의 차이며 절대치이다. 이 결과들은 임계전류가 약 40~50 A인 4 mm폭의 박막선재를 사용한 경우의 결과들이다.

식(1)을 통하여 최종적으로 측정된 박막 선재의 자기장 변화량에 따른 임계전류를 얻을 수 있었고, 향후 장선의 박막선재의 임계전류 측정 시 비접촉식으로 측정된 자장분포로부터 간접적인 임계전류 측정방식을 제시할 수 있었다.

3.3. Hall sensor 특성평가의 임계전류(I_c) 비교분석

일반적으로 장선의 SmBCO 박막 선재 제조에서 자주 발생하는 부분적인 결함문제 등을 보다 효과적으로 분석하기 위해서는, 먼저 제조된 장선의 박막 선재들의 결함부분을 정확하게 찾아야 한다. 25m 길이의 SmBCO 박막 선재에 인위적인 방법으로 결함을 유도하고 Hall sensor 특성평가 장치를 이용하여 측정하였다. 4-단자법의 경우 여러 번의 측정으로 미세 결함

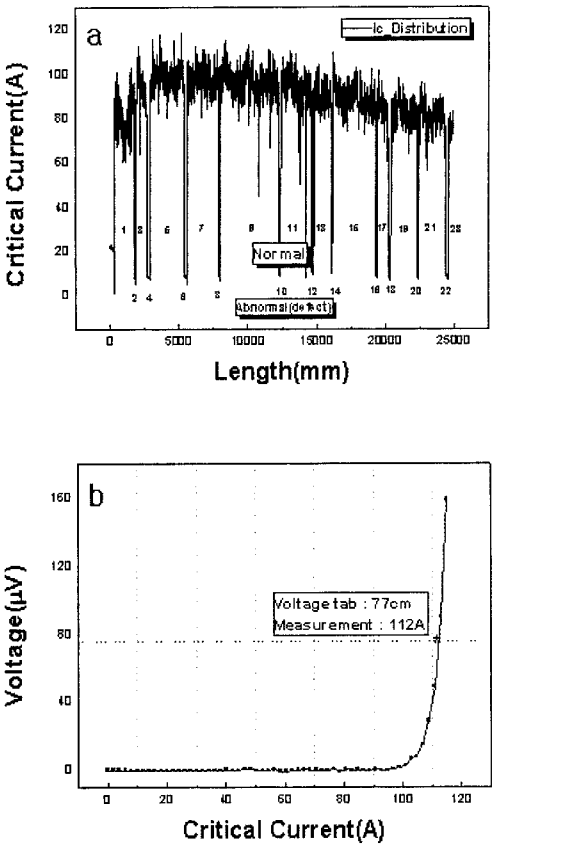

Fig. 5. Prediction of critical current of a 25 m long sample. (a) predict critical current (b) real critical current(4-probe method) of section 5.

부위를 찾을 수 있으나 Hall sensor를 이용한 자장 측정을 통해 정확히 한 번의 측정으로 11개의 결함 부분을 찾을 수 있었다. 이와 관련된 실험 결과로서 확인된 결함 부분을 그림 5(a)와 같이 나타내었는데, 정상적인 부분과 결함 부분으로 구분하였다.

정상적인 부분의 임계전류가 Hall sensor 측정을 통해 약 104 ~ 130 A 정도로 예측되었으며 아울러 결함부의 경우 임계전류가 0 A로 예측되었다. 비교를 위하여 4-단자법으로 임계전류를 측정한 결과, 결함부는 0 A, '정상부의 경우 5번 구간에서 그림 5(b)와 같이 1m 길이에서 112A가 측정되었다. 따라서 본 경험식의 경우 Hall sensor를 이용한 장선 측정 결과를 신뢰할 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

자체 제작한 R2R 방식의 Hall sensor 특성평가 장치의 Hall sensor를 사용하여 초전도 박막선재의 표면자기장을 측정하여 초전도 특성을 성공적으로 측정하였다. 사용된 선재는 SmBCO 박막 선재였으며 비접촉식 방법으로 장선의 전류특성 분포를 정확히 측정 할 수 있었다. 4-단자법에 의한 통전 임계전류 측정값과 비교한 결과 비접촉 측정 결과로부터 얻어진 경험식은 전류특성 값이 거의 일치함을 알 수 있었다. 이 결과는 본 연구에서 개발된 비접촉 및 비파괴 연속 특성평가 장치가 초전도 장선 박막선재의 전류 특성 평가 장치로 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도 응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

[1] H. Kamerlingh Onnes, "Electrical resistance of pure metals at liquid helium temperature", *Electrican.* Vol. 6, No.7,, 57 1911.
[2] J. G. Bednort and K. A. Muller, "Possible High-Tc Superconductivity in the Ba-La-Cu-O system", *Phys.*, B64, 189-193, 1986.
[3] M. K. Wu, J. R. Ashburn, C.J. Torng, P. H. Hur, R. L. Meng, L. Lao, Z.J. Huang, Y. Q. Wang, C. W. Whu, "Superconductivity at 93K in a new mixed-phase y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure", *Phys.* Rev. Lett. 58, 908-910, 1987.
[4] H. Takahashi, K. Igawa, K. Arii, Y. Kamihara, M. Hirano, and H. Hosono, "Superconductivity at 43K in an iron-based layered compound LaO1-xFxFeAs", *Nature* Vol.453,375-378, 2008.
[5] Namjin Lee, Sangsoo Oh. Kyujeong Song, "The physical properties of several HTS coated conductors", *KIASC*, Vol. 9, No. 4., pp. 19-23, 2007.
[6] D. P. Norton, "Science and technology of high-temperature superconducting fils", *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 28, 299-347, 1998.
[7] S. Furtner, R. Nemetschek, R. Semerad, G. Sigl and W. Preusseit, "Reel-to-reel critical current measurement of coated conductors", *Supercond. Sci. & Technol.*, 17 S281-S284, 2004.
[8] Hongsoo Ha, Hosub Kim, Joosaeng Yang, "Critical current density of SmBCO coated conductor on IBAD-MgO substrate fabricated by co-evaporation", *Physica C*, 463-465, 493-496, 2007.

저 자 소 개

오재근(吳在根)
1979년 7월 15일생, 2005년 안동대 금속공학과 졸업, 2008년 동 대학원 금속공학과 대학원 졸업(공학석사), 현재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 연구원.

오상수(吳詳秀)
1959년 11월 1일생, 1983년 경북대 금속공학과 졸업, 1992년 Kyoto대 대학원 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 책임연구원.

하동우(河東雨)
1962년 7월 12일생, 1985년 경북대 금속공학과 졸업, 동 대학원 졸업(공학석사), 2001년 연세대 대학원 금속공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도재료그룹 책임연구원.

하홍수(河洪秀)
1969년 5월 21일생, 1995년 성균관대 공대 금속공학과 졸업, 1997년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 2007년 동 대학원 신소재공학부 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 선임연구원.

고락길(高樂吉)
1972년 5월 1일생, 1995년 배재대 물리학과 졸업, 1997년 동 대학원 졸업(이학석사), 현재 한국전기연구원 선임연구원.

김호섭(金昊燮)
1972년 3월 4일생, 1995년 연세대 물리학과 졸업, 2003년 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 선임연구원.

송규정(宋奎丁)
1963년 4월 14일생, 1986년 고려대학교 물리학과 졸업, 1988년 동대학원 졸업(이학석사), 1999년 미국 테네시주립대 대학원졸업(이학박사), 1999~2000년 미국 메샤추세트주립대 Post Doc., 2000~2008년 한국전기연구원 책임연구원, 현재 전북대학교 과학교육학부 조교수.

이남진(李南振)
1970년 6월 20일생, 1996년 경상대 공대 무기재료공학과 졸업, 1998년 동 대학원 2006년 일본 가고시마대학 이공학연구과 졸업(공학박사), 현재 한국과학기술원 물리학과 박사 후 과정.

문승현(文勝鉉)
1964년 9월 23일생, 1987년 서울대학교 물리학과 졸업, 1994년 동대학원 졸업(이학박사), 1994~2002년 LG전자기술원 책임연구원, 2002~2006년 서울대학교 재료공학부 계약 초빙교수, 2004~현재 주식회사 서남 대표이사.