

coated conductor 의 접합 및 특성 평가방법

김재근, 김병주, 박진아, 임선원, 홍계원, 이희균, 김호진, 최경달, 김우석, 이승욱, 고태국*
한국산업기술대학교, *연세대학교

A study on the joining of coated conductor and its evaluation.

JaeKun Kim, ByeongJoo Kim, JinA Park, SunWon Im, GyeWon Hong, HeeGyoun Lee, KyeongDal Choi, WooSeok Kim, SeungWook Lee, TaiKuk Ko*, Korea Polytechnic University, *Yonsei University

Abstract – 고온초전도 선재 중에서 YBCO 박막을 금속 테이프에 증착하여 제조되는 coated conductor는 높은 자기장에서도 임계전류밀도의 감소가 크지 않아 고자장용 초전도 자석을 제조하는데 많이 활용될 것으로 기대되고 있다.

coated conductor를 고자장용 초전도 자석제작에 활용하기 위해서는 긴 길이의 도체를 제조하는 것과 함께, 도체의 접합기술이 필요하다. 이는 초전도 자석을 영구전류모드로 운전하기 위해서는 도체의 접촉저항이 충분히 적어야 하기 때문이다. 그러나 박막형 coated conductor는 아직 긴 길이의 선재제조기술이 확립되어 있지 않고, 또 박막형 coated conductor의 형태와 사용되는 제조기술이 본질적으로 초전도 접합을 형성시키기에 매우 어려워서 아직 까지 초전도 접합에 대한 연구결과가 발표되지 않고 있으며, 접합 특성을 측정하는 기술도 개발되지 않았다. 본 연구에서는 coated conductor의 접합특성을 측정하기 위한 기본적인 시험방법을 제안하고, 전도성 금속접합재를 이용한 접합시료를 제작하여 그 특성을 평가한 결과를 발표한다.

1. 서 론

고온초전도체의 발견이후 많은 연구자들이 이를 이용하여 저항손실이 없는 초전도 전력기를 개발하고자 노력하여 왔다. 초전도 재료를 이용한 전력기기의 특징 중에서 가장 초전도재료의 특성을 잘 활용한 것으로 영구전류모드로 운전하는 초전도 자석을 생각할 수 있다. 특히 MRI 나 실험실에서 사용하는 고자장 발생용 자석은 원하는 자기장을 안정되게 발생하는 것이 중요한데 영구전류 모드로 운전하면 전력공급원의 전력변동과 관계없이 일정한 자기장을 거의 영구적으로 유지하여 MRI 영상신호나 자기장하에서의 측정신호를 안정되게 얻을 수 있기 때문이다. 일단 초전도 자석에 전력을 공급하여 원하는 자기장을 발생하게 되면 초전도 영구전류 스위치를 연결하여 초전도 폐회로에 전류가 흐르게 하며 이 상태는 초전도 코일의 온도를 임계온도 이하로 유지하는 한 영구히 지속된다.

영구전류모드로 초전도 자석을 유지하기 위해서는 초전도 권선의 양끝 부분이 초전도 선재로 연결되어야 한다. 금속계 초전도 선재를 사용하는 자석의 경우에는 구리 matrix를 부식시켜 선재를 구성하는 NbTi 초전도 filament를 노출시킨 다음 이 필라멘트를 서로 NbTi 판내에서 겹친 다음 압력을 가하여 변형시켜 초전도 필라멘트인 NbTi 간에 물리적인 접합이 이루어 지도록 하여 초전도 전류가 흐르게 한다.

이런 방식을 이용하여 금속계 저온 초전도 자석의 영구전류모드 switch 가 개발되어 현재 MRI 용 자석이나 실험실용 고자장용 초전도 자석에 사용되고 있다.

그러나 산화물계 고온 초전도 선재의 경우에는 초전도 소재가 brittle 하여 기계적인 압력만으로는 초전도 접합

이 이루어지지 않으며 새로운 방법이 개발되어야 이를 이용한 영구전류형 초전도 자석의 실용화가 가능하다. 현재 개발된 Ag/BSCCO PIT 선재의 경우에는 피복재인 은을 에칭한 다음 BSCCO 초전도 심재를 노출시키고, 이를 겹쳐서 열처리 하는 방법으로 부분적으로 초전도 접합을 만드는 기술이 여러 가지로 연구되어 90 % 이상의 임계전류를 통전할 수 있는 접합기술이 개발되었다 [1-7]. 또한 접합부의 특성 평가 및 이를 이용한 고자장 자석에의 응용에 대하여도 연구가 수행되었다[8-9]. 그러나 BSCCO-2223 선재는 고자장에서 임계전류밀도의 감소가 커서 고자장 발생용 자석의 선재로는 사용이 제한 될 것으로 생각되고 현재 고자장 발생용 자석용 선재는 coated conductor가 주로 사용될 것으로 예상되어 이에 대한 접합특성 연구 및 영구전류 방식의 초전도 권선제조방법 및 이의 특성 평가방법이 개발되어야 한다. 본 연구에서는 I_c 가 약 20A를 갖는 은 보호층이 도포된 coated conductor를 은이 서로 접하도록 위치시킨 후 하중을 이용한 은 보호층이 서로 접합되도록 폐회로를 제작한 후 폐회로의 연구전류 감쇠 특성을 측정하여 접합부의 특성을 측정하여 하중을 이용한 초전도 접합 가능성에 대해 연구한다. 또한 coated conductor를 도체로 사용하여 초전도 자석을 제작할 때 영구전류 모드를 달성하기 위한 새로운 기술을 소개한다.

2. 본 론

2.1 고온초전도 선재의 접합기술

초전도 접합의 특성을 평가하기 위해서는 접합된 부분을 통과하는 임계전류를 측정하여 이를 접합에 사용된 선재의 임계전류와 비교하여 나타낸다. 주진호 등의 연구결과에 의하면 Ag/BSCCO-2223 선재의 피복을 부식액으로 벗긴 다음 lap joint 방식으로 접촉시킨 다음 접촉부분 만을 가압하고 부분적인 열처리를 통하여 초전도 접합을 제조하고, 이때 접촉방법, 부식액의 선정, 접촉부의 형상, 가압압력 등의 체계적인 실험을 통하여 전기 통전율과 기계적접합 강도 및 내변형률 등을 측정하였다. 약 1,600 MPa의 압력에서 90%의 통전율을 얻었고, 기계적인 접합강도는 비 접합시료의 60%정도를 보였다. 내변형 특성은 비접합선재의 0.3%에 비하여 0.1%로 상당히 감소하는 결과를 보였다. 그럼 1.1-4는 이제 까지 PIT Ag/BSCCO 선재에서 적용되었던 여러 가지 접합방법을 나타낸 것이다. 그럼 1.1은 Ag 피복재를 부분적으로 제거하고 노출된 BSCCO 초전도체를 pressing 으로 접합시키는 것을 보여주는 방법이다. 그럼 1.2는 선재를 접합하는 대표적인 두가지 방법으로 scarf joint는 BSCCO 초전도체를 단면끼리 연결하는 방법이고, lap joint 는 넓게 노출된 BSCCO 초전도체를 다른 초전도체를 이용하여 연결시키는 방법으로 이 방법이

더 넓은 초전도 접합면적을 제공한다. 그림 1.3은 BSCCO 초전도 filament 가 규칙적인 배열을 가지도록 특별하게 제작한 초전도 선재를 기계적으로 가공하고 피복재를 화학적으로 부식시켜 초전도 필라멘트간의 완전히 접합시키는 방법이나 filament 수가 많은 경우 현실적으로 적용하기 어렵다. 그림 1.4는 노출된 다심 filament를 BSCCO 단심재로 보완하여 접합시키는 방법이다. 이와 같이 여러 가지 방법으로 Ag/BSCCO 선재를 접합시키는 방법이 개발되어 사용될 수 있을 것으로 보이며 이에 대한 측정방법도 연구결과가 발표된 바 있다.

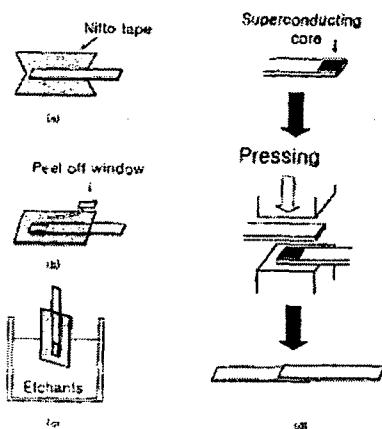


그림 1.1 Ag/BSCCO 다심선재의 etching 과 pressing 에 의한 접합과정.

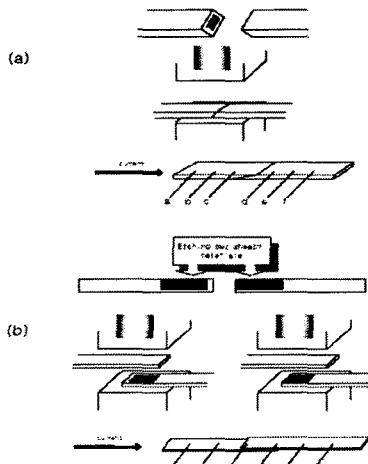


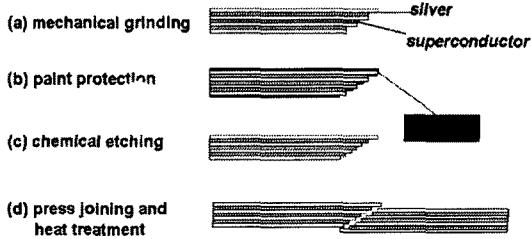
그림 1.2 Bi-2223 초전도 선재의 (a) scarf-joint와 (b) lap-joint에 의한 접합 공정 개략도.

2.2 coated conductor 접합

coated conductor 의 경우 초전도 전류를 흘리는 실재부분이 아주 적으며, 기계적인 접합만으로는 초전도 접합이 이루어지지 않으므로 새로운 접합방법이 필요한데 아직 적절한 접합기술이 제안되지 않았고 이를 측정하는 방법도 개발되지 않았다. 본 연구에서는 coated conductor 의 접합특성을 전류를 통전시키지 않고 coated conductor로 이루어진 폐회로에 자기장을 인가하고 외부자기장을 제거한 다음 폐회로에 형성된 자기장의

감쇄를 hall sensor로 측정하여 영구전류 특성을 평가하고자 하였다. 그림 2는 이를 개략적으로 나타낸 것이다.

3cm 길이의 4개의 coated conductor를 은 보호층이 서로 마주하면서 정사각형 loop를 형성하도록 배열하였다. Coated conductor 폐회로는 coated conductor 표면의 cap layer인 은을 제거하지 않고 접쳐진 부분에 20 gram의 압력을 가하면서 800 ℃에서 1000 ppm O₂/Ar 분위기에서 열처리하여 준비하였다. 접합 열처리를 행한 온도 및 분위기는 coated conductor를 제작할 때의 조건



Schematic drawing of Joining Process for multifilament tape

그림 1.3 기계적 연마 및 화학에칭에 의한 다심선재 접합방법 개략도.

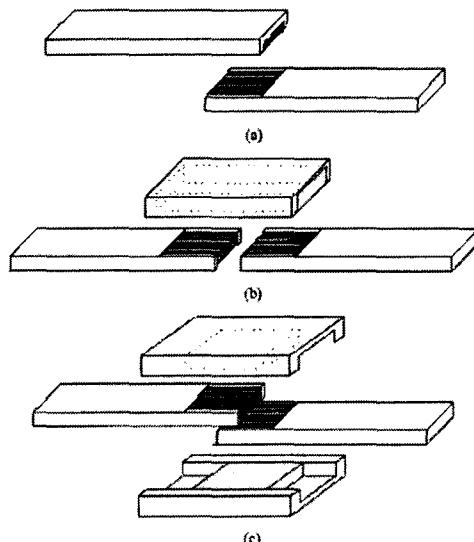


그림 1.4 완충제를 이용하는 다심선재 접합방법.

과 유사하게 하여 접합 열처리 중에 초전도체의 미세구조 및 상(phase)의 변화가 없도록 설정하였다. 접합한 시료는 500 ℃에서 산소분위기로 2시간 열처리함으로써 접합 열처리 중에 잊어버린 초전도 특성을 회복될 수 있도록 하였다. 접합한 시료의 초전도 전이 온도는 접합 전과 비교해 거의 변화가 없었다. 접합된 coated conductor는 기계적으로 잘 결합되었으며 감쇄전류 측정을 위해 용기에 넣어 자장을 가할 때도 분리되지 않았다. 초전도 쌍의 두께가 크지 않기 때문에 넓은 면적의 은 접합만으로 저항이 적은 접합이 가능할 것으로 기대하였다. 제작된 coated conductor 폐회로의 자기장감쇄를 측정한 결과 영구전류가 흐르지 않아 매우 빠르게 자기장이 감쇄하는 것으로 측정되었으며 이에 따라 한(삭)

제) 은을 통과하는 접합으로는 영구전류 스위치의 제작은 가능하지 않은 것으로 판단되며 새로운 방식의 접합기술이 필요한 것으로 판단된다.

이에 따라 영구전류모드 스위치를 위해서는 새로운 coated conductor 폐회로 제작법을 개발하여 실험 중이며 이에 대한 실험결과를 발표할 예정이다.

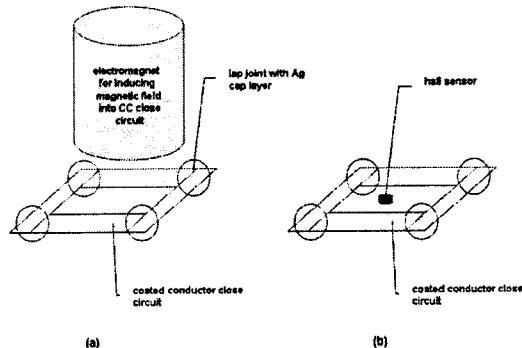


Fig. 2 Experimental setup for (a) for trap magnetic field, (b) measure field decay.

본 연구는 한국과학재단에서 지원하는 특정기초연구사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Jung Ho Kim and JinHo Joo, "Superconducting Joint between Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O multifilamentary tapes", Superconductor Science and Technology, 15, 1-6, 2002
- [2] Hee Gyoun Lee et al., "A Study of Joining Ag/BSCCO superconducting tapes", Physica C 242, 81-84, 1995
- [3] Hee Gyoun Lee et al., "Filament-to-filament joining of multifilamentary Ag/Bi-2223 superconducting tapes", Physica C 259, 69-74, 1996
- [4] J. Sha et al., "A new method for joining of Bi(2223)/Ag tapes", Physica C 297, 91-94, 1998
- [5] J.Y. Huang et al., "Fabricating superconducting Joints between Ag-clad BSCCO conductors", Applied Superconductivity, 3(4), 207-214, 1995
- [6] Jung Ho Kim et al., "Properties of resistive and superconducting joints in Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O tape", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 11(1) 3010-3013, 2001
- [7] KyuTae Kim et al., "Superconducting Joint of multifilamentary Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O Tapes", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 13(2) 2996-2999, 2003
- [8] Jung Ho Kim et al., "Measurement of Joint properties of Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O (2223) Tapes by Field Decay Technique", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 13(2) 2992-2995, 2003
- [9] H. Hashizume et al., "Proposal of mechanically jointed superconducting magnet using high critical temperature superconductors", Fusion Eng. & Design 63-64, 449-454, 2002