

안정화 선재의 YBCO 초전도 접합 특성

A study on the bonding properties of YBCO coated conductors with stabilizer tape

김태형*, 오상수*, 하동우*, 김호섭*, 고락길*, 신형섭**, 박경채***

Tae-Hyung Kim*, Sang-Soo Oh*, Dong-Woo Ha*, Ho Sup Kim*,
Rock-Kil Ko*, Hyung-Seop Shin**, Kyung-Chae Park***

Abstract: For mechanical and electrical stability and environment protection, Cu and stainless steel stabilizers are laminated to a Ag layer to produce a composite neutral-axis(N-A) architecture in which the YBCO layer is centered between the oxide buffered metallic substrate and stabilizer strip lamination. This architecture allows the wire to meet operational requirements including stresses at cryogenic temperature, winding tensions as well as mechanical bending requirements including thermal and electrical stability under fault current conditions. We have experimentally studied mechanical properties of the laminated stainless steel and Cu stabilizers on YBCO coated conductors. We have laminated YBCO coated conductors by continuous dipping soldering process. We have investigated lamination interface between solder and stabilizer of the YBCO coated conductor. We evaluated bonding properties, tensile / shear bonding strength, and peeling strength laminated YBCO coated conductors.

Key Words: YBCO, coated conductor, lamination, stabilizer, Peeling test.

초전도 선재에 접합한 안정화층은 응용분야 적용에서 변형으로 발생하는 응력에 대해 초전도층을 보호하고, 응용기기 사용 중의 발생하는 사고전류에 대한 전기적 안정성을 목적으로 사용하고 있다. 안정화층의 소재로는 구리, 스테인레스 강등이 사용되어지고 있으며, YBCO 초전도층은 neutral-axis 위치에 있어 변형에 대한 손상을 최소화하고 있다[2].

지금까지 초전도 선재와 안정화층간의 연속 접합 공정에 관한 연구 및 안정화층의 접합 특성평가에 대한 연구가 전무한 상황으로 이에 본 연구에서는 연속 접합 공정에 대한 연구와 조건에 따른 고온 초전도 선재와 안정화층간의 접합 특성에 관한 연구를 하고자 하였다.

본 연구에서는 사용한 초전도 선재는 Ni-W합금의 결정이 배향된 금속기판위에 $Y_2O_3/YSZ/CeO_2$ 의 복합 완충층을 증착한 후 초전도 선재인 YBCO를 PLD공정으로 제조한 후 보호층 Ag를 RF sputter한 초전도 선재를 솔더 디핑방식으로 연속 접합 라미네이션을 하였다[3-4]. 본 연구에서는 솔더 디핑방식의 연속 라미네이션 장치를 제작하고 접합 공정에서 발생하는 여러 공정 변수 최적화에 대해 연구하였다. 솔더의 조성, 솔더의 접합두께에 따른 라미네이션 접합에 대한 특성평가를 실시하였다.

1. 서 론

제 2세대 고온 초전도선재는 박막형태로 세계적으로 실용화를 위한 연구가 진행되고 있다. 기존의 PIT공정의 BSCCO복합선재는 flux pinning에 대한 문제점으로 고자장하에서는 임계전류밀도가 급격히 감소하는 특성이 있어 케이블, 변압기 등의 자장이 강하지 않는 전력기에 적용이 제한되고 있다. 이러한 문제점에 대해 자기장에 대한 우수한 특성을 보이는 YBCO 등의 박막 제조공정의 연구가 진행되고 있다[1]. 초전도선재의 구조는 결정이 배향된 금속기판위에 완충층($Y_2O_3/YSZ/CeO_2$)/초전도층(YBCO)/보호층(Ag)의 구조로 되어 있으며, 최종적으로 기계적, 전기적 안정성을 확보하기 위해 안정화층을 라미네이션 접합을 하고 있다.

2. 실험 방법

초전도 선재의 솔더 디핑방식의 연속 접합공정은 결정 배향된 Ni-W합금기판위에 증착된 완충 버퍼층/초전도층/보호층 구조로 이루어진 초전도 선재를 이용하였다. 각각의 증착공정으로는 완충 버퍼층은 DC Reactive Sputtering법을 이용하여 증착한 후 초전도층은 PLD공정으로 YBCO를 증착하였다. 증착한 초전도층위에 보호층으로 Ag RF Sputtering하여 450℃에서 30분간 열처리하여 제조하였다. 이렇게 제조된 초전도 선재를 이용하여 응용분야에 적용시 선재의 기계적, 전기적 안정성을 확보하고자 안정화 선재를 이용하여 라미네이션 접합하였다. 안정화 선재로는 구리와 스테인레스 강을 사용하여 솔더포터에 디핑하여 라미네이션 접합을 하였다. 라미네이션 접합을 하기 전 안정화 선재의 표면에 존재하는 여러 가지 불순물을 제거하기 위해 아세톤과 알콜으로 초음파 세척하였다.

Fig. 1은 연속 라미네이션 접합장치 및 공정을 나타낸 것으로 접합 공정속도는 물의 회전속도를 컴퓨터로 제어하였다. 선재 전체적으로 솔더의 균일한 젖음성과

* 정 회 원 : 한국전기연구원 초전도재료연구그룹

** 정 회 원 : 안동대학교 기계공학과 교수

*** 비 회 원 : 경북대학교 금속신소재공학과 교수

원고접수 : 2006년 9월 4일

심사완료 : 2006년 9월 14일

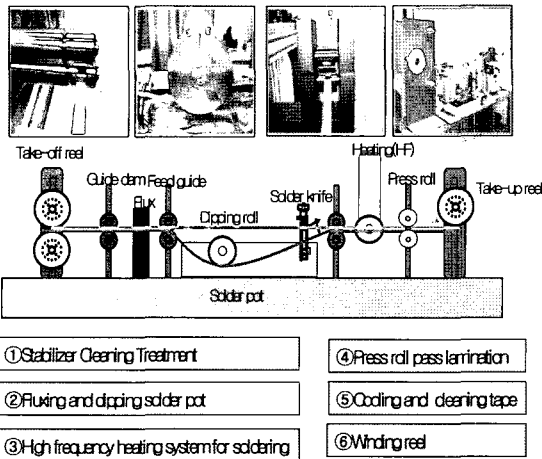


Fig. 1. Schematic diagram of continuous lamination solder dipping method by induction bonding heat.

접합면의 플럭스잔류를 최소로 하기위해 안정화 선재에 일정량을 자동적으로 정량 공급하였으며, 솔더 포터에서는 롤을 선재와 같이 회전시켜 솔더가 균일하게 도포되도록 하였다.

도포한 후, 초전도 선재와 안정화 선재를 그림과 같이 함께 고주파 유도가열하여 압착롤에 의해 접합하였다. 솔더는 초전도 선재의 Ag 코팅층과 젖음성과 접합성이 우수하고 환경 친화적인 납성분이 포함되지 않은 무연 솔더(Sn-3Ag-0.5Cu)를 사용하였으며, 접합성이 우수한 불소/로진을 함유한 플럭스를 사용하였다. 또한, 공정상에 발생하는 흠을 제거하기 위해 집진기를 사용하였다. 접합된 초전도 선재에 대해서는 접합면에 대해 미세구조를 관찰하였고, 접합특성을 분석하기 위하여 SEM 및 XRD분석을 하였다. 기계적 특성을 분석하기 위하여 접합면의 접합 강도 및 박리시험을 실시하였다. Fig. 2는 접합된 YBCO선재의 박리시험 모식도를 나타낸 것으로 시험규격은 KS M 3725를 기준으로 하여 실시하였으며, 박리강도는 박리시험시 최고값으로 정하였다. 파단 시험한 후 파단면에 대해 조직관찰 및 상분석을 실시하였다.

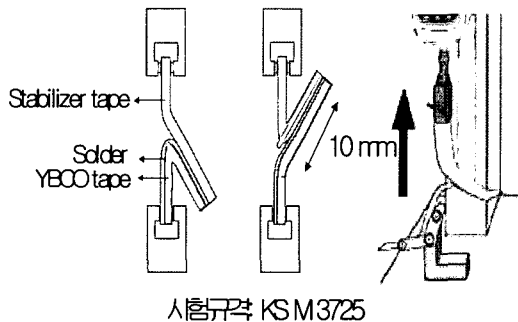
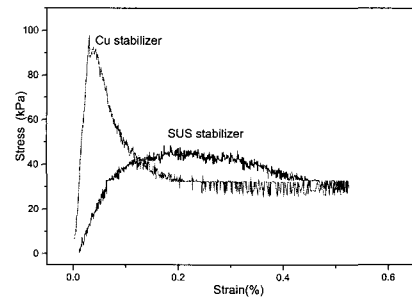


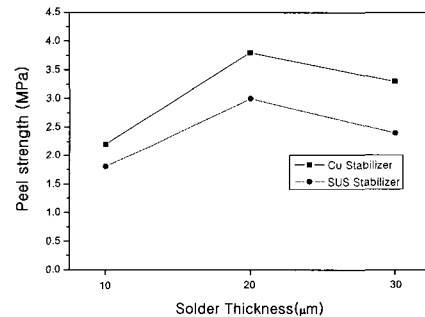
Fig. 2. Schematic diagram of peeling test for laminated YBCO CC tape.

3. 실험 결과 및 고찰

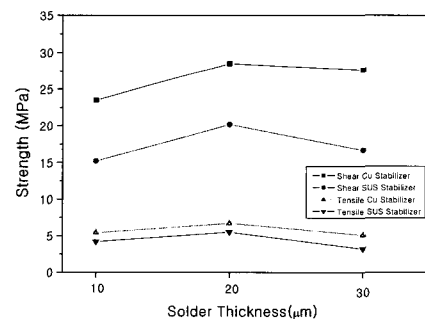
Fig. 3은 안정화 선재로 구리와 스테인레스 강을 접합한 초전도 선재의 박리강도 및 전단, 인장강도를 나타낸 것으로 구리 안정화 선재를 접합한 초전도 선재의 경우 박리강도는 99kPa을 나타내었고, 스테인레스 강의 경우는 49kPa을 나타내었다. 구리 안정화 선재의 경우 초전도 선재와의 접합성이 스테인레스 강을 접합한 경우보다 접합계면에서의 접합성이 우수하여 높은 값을 나타낸 것으로 판단되며, 다른 이유로는 구리 선재에 비해 솔더의 젖음성이 불량하여 균일한 접합성을 나타내지 않은 것으로 판단된다. 구리 선재는 박리초기에 최대강도로 증가하다가 급격히 떨어지는 비슷한 경향을 보였으나, 스테인레스 강을 선재의 접합한 경우는 초기에 완만히 강도가 증가하다가 박리되는 경향을 보였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Mechanical properties of laminated YBCO tape by Cu and SUS stabilizer. (a) peeling strength of stabilizer and solder thickness dependence of (b) peeling and (c) tensile/shear strength.

스테인레스 강의 경우에는 외부에서 가한 응력에 대한 박리계면이 솔더와 스테인레스 강사이에 발생하여 구리에 비해 약한 외부 응력에 의해 박리가 일어나 상대적으로 낮은 박리강도를 나타내었다.

솔더 두께조건에 대한 박리 강도 및 전단, 인장강도에서는 안정화 선재와 초전도 선재사이에 접합한 솔더 두께가 얇은 경우에는 접합부에서 솔더가 균일하게 접합면에 대해 접합이 불균일하게 되었으며, 접합된 부분에서도 접합두께가 얇아 제대로 계면반응층을 형성하지 못해 강도가 저하한 것 판단된다. 또한 솔더의 두께가 두껍게 접합된 경우에는 불균일한 두께로 접합되어 일부 두꺼워서 오히려 접합강도가 저하된 것으로 판단된다.

위의 Fig. 4는 박리시험 후 파면 조직과 파단면에 대해 XRD분석한 것으로 구리 안정화 선재를 접합한 초전도선재는 Ag와 YBCO증착층 계면에서 파단이 주로 일어나고 일부 Ag와 솔더계면에 일어난 것을 알 수 있다. 또한 XRD분석에서는 Ag층과 계면 반응으로 Ag₄Sn과 안정화 선재와 반응하여 Cu₃Sn반응상이 생성된 것으로 안정화 선재와 양호한 접합이 이루어진 것으로 판단된다. 반면 스테인레스 강을 사용한 안정화 선재와 파단면에서는 상대적으로 Ag와 안정화 선재 계면에서 파단이 일어났으며, XRD분석에서도 안정화 선재와 솔더 계면 반응층이 형성되지 않아 비교적 낮은 접합강도를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 2세대 초전도 선재인 coated conductors 선재의 응용을 위해 안정화 선재와의 접합을 위한 연속 라미네이션 접합 장치 제작하였다. 장치로는 안정화 선재를 솔더 디핑방식으로 초전도 선재와 접합에는 고주파 열원을 적용하여 접합하였다.

안정화 선재로는 구리와 스테인레스 강을 사용하였다. 접합된 선재에 대해 접합계면에서의 파단면 조직과 XRD 분석, 접합부에 대한 박리, 인장, 전단강도를 솔더의 두께를 변화시키면서 관찰하였다. 안정화 선재로 사용한 구리는 솔더 접합부에서 초전도 선재의 Ag층, 구리선재 계면의 반응층을 형성하여 우수한 솔더 접합성을 나타내었으나, 스테인레스 강을 접합한 선재에서는 안정화 선재와 솔더사이에 접합계면 반응층이 형성되지 않아 불균일한 접합부를 형성하였다.

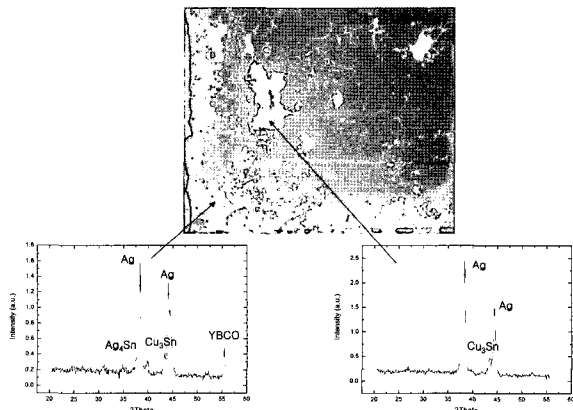
다층 구조의 박판 선재의 중요한 기계적 특성인 박리 강도에서 안정화 선재로 사용한 구리에서는 99kPa을 나타내었고, 스테인레스 강의 경우는 49kPa을 나타내었다. 구리 안정화 선재가 상대적으로 우수한 라미네이션 접합성을 보였다. 이는 안정화 선재가 솔더에 대한 젖음성의 차이로 인해 접합시 구조적으로 균일한 솔더 접합부가 형성되지 못하였고, 접합계면에서의 접합반응층을 형성하지 못하여 강도의 저하를 가지고 왔다. 접합부의 솔더 두께는 접합부에 전체적으로 균일하게 접합부를 형성을 위해 20 μ m내외의 솔더두께로 접합하는 것이 가장 우수한 강도를 보였다. 향후 스테인레스 강을 이용한 라미네이션 접합성을 향상시키기 위해 솔더와의 계면 반응층을 형성할 수 있도록 표면처리(도금, 표면산세 등)를 하여 접합특성을 개선실험을 진행할 예정이다.

감사의 글

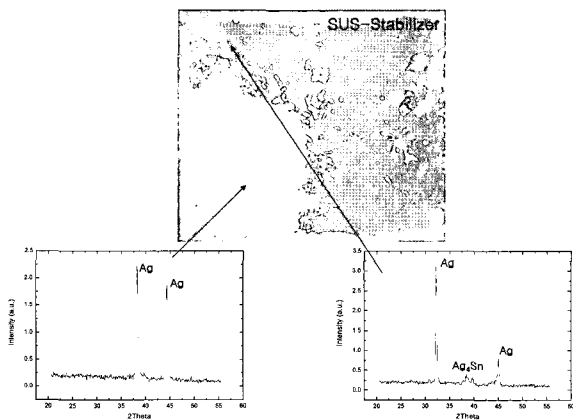
본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] A. Goyal, D. P. Norton, J. D. Budai, M. Paranthaman, E. D. Specht, D. M. Kroeger, D. K. Christen, Q. He, B. Saffian, F. A. List, D. F. Lee, P. M. Martin, C. E. Klabunde, E. Hartfield, and V. K. Sikka, "High critical current density superconducting tapes by epitaxial deposition of YBa₂Cu₃O_x thick films on biaxially textured metals", Appl. Phys. Lett. Vol. 69, No 12, pp. 1795, 1996.
- [2] Verebelyi D.; Harley E.; Scudiere J; Thieme C. "Practical neutral-axis conductor geometries for coated conductor composite wire", Superconductor Science and Technology, vol. 16, no. 10, pp. 1158-1161(4), 2003.
- [3] Howard H. Manko "Solder and Soldering" McGraw-Hill, Vol. 4, pp. 225, 2003.



(a)



(b)

Fig. 4. Microstructure of fracture surface and XRD laminated stabilizer. (a) Cu laminated CC side surfaces and (b) SUS laminated CC side surface.

- [4] B.Salam, N.N. Ekere and J.P. Jung. "A Study on the comparison of Solderability Assessment" Journal of the Korean Institute of Surface Engineering. Vol.35, No2. pp. 129 ~ 137, 2002.

저 자 소 개



김태형(金泰亨)
1969년 4월 20일 생, 1993년 경북대 금속공학과 졸업, 1996년 동 대학원 금속공학과 대학원 졸업 (공학석사), 2001년 동 대학원 금속공학과 박사수료. 현재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 연구원.



오상수(吳詳秀)
1959년 11월 1일생, 1982년 경북대 금속공학과 학사졸업, 1989년 일본 Kyoto대학 재료공학과 졸업 (공학석사), 1992년 일본 Kyoto대 대학원 재료공학과 졸업 (공학박사), 현재 한국전기연구원 책임연구원, 초전도재료연구그룹 그룹장.



하동우(河東雨)
1962년 7월 12일 생, 1985년 경북대 금속공학과 졸업, 1987년 동 대학원 졸업 (공학석사), 2001년 연세대 대학원 금속공학과 졸업 (공학박사), 2004. 7 ~ 2005. 7 미국 NHMFL 방문연구원, 현재 한국전기연구원 초전도재료그룹 책임연구원.



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



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



신형섭(申亨燮)
1959년 3월 27일 생, 1981년 경북대 기계공학과 졸업, 1991년 토오쿠대 대학원 기계공학과 졸업 (공학박사), 현재 안동대학교 기계공학과부 부교수.



박경채(朴景采)
1951년 1월 2일생, 1974년 경북대 공대 금속공학과 학사졸업, 1991년 Osaka 대학원 졸업 (공학박사), 현재 경북대학교 신소재 공학부 교수.