

SmBCO 고온 초전도 선재의 안정화제 특성

A study on the properties of SmBCO coated conductors with stabilizer tape

김태형^{1,3}, 오상수¹, 하동우^{1,*}, 김호섭¹, 고락길¹, 송규정¹, 하홍수¹, 이남진², 박경채³

Tae-Hyung Kim^{1,3}, Sang-Soo Oh¹, Dong-Woo Ha^{1,*}, Ho-Sup Kim¹, Rock-Kil Ko¹,
Kyu-Jeong Song¹, Hong-Soo Ha¹, Nam-Jin Lee², Kyung-Chae Park³

Abstract: In this study, we searched for the mechanical and electrical properties of laminated coated conductors with stabilizer tape. Stabilizer tape plays a role for mechanical and electrical stability and environmental protection. Cu material stabilizer was laminated to Ag capping layer on SmBCO conductor layer. This architecture allows the wire to meet operational requirements including the stressless at cryogenic temperature and winding tension as well as mechanical bending requirements including thermal and electrical stability under fault current conditions. First, we have experimentally studied mechanical bonding properties of the laminated Cu stabilizers on SmBCO coated conductors. We have laminated SmBCO coated conductors by continuous dipping soldering process. Second, we have investigated electrical properties of the SmBCO coated conductors with stabilizer lamination. We evaluated bonding properties, peeling strength and critical current for laminated SmBCO coated conductors with Cu stabilizers.

Key Words: SmBCO, lamination, coated conductor, stabilizer.

1. 서 론

고온 초전도 선재는 산화물 박막으로 증착된 tape 형태로 실용화를 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있는 상황이다. 다른 초전도 선재인 PIT(power-in-tube) 공정의 BSCCO(Bi-22230)복합선재는 flux pinning을 위한 효과적인 방법이 개발되지 않아 77K에서 자기장 하에서 임계전류밀도가 급격히 감소하는 문제점이 있다. 이는 고자장용 초전도 선재의 응용분야에서 기기의 사용온도를 20K 정도로 설정해야 하는데 제약이 있다. 피복재로 Ag를 대체할 수 있는 금속재가 개발되지 않는 경우 대량생산에서 Ag의 가격탄력성이 적어서 현실적으로 적용하는 케이블, 변압기 등의 자장이 강하지 않는 전력기기에 적용이 제한되고 있다.

이러한 문제점에 대해 우수한 특성을 보이는 ReBCO계의 고온 초전도 선재의 박막 제조공정을 이용한 coated conductors에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1].

고온 초전도선재의 구조는 금속기판위에 완충층/초전도층/보호층/안정화제의 구조로 되어 있으며, 최종적으로 전기적, 기계적인 안정성을 확보하기 위해 안정화선재를 적층(lamination)공정을 통한 접합을 실시한다.

초전도 선재에 접합한 안정화 선재는 응용분야 적용에서 변형으로 발생하는 응력에 대해 초전도 박막층을 보호하고, 응용기기 사용 중의 발생하는 사고전류에 대한 전기적 안정성을 목적으로 사용되어지고 있다. 안정화 선재의 소재로는 구리, 스테인레스강 등이 사용되어지고 있으며, 초전도층은 neutral-axis위치에 있어 변형에 대한 손상이 최소화된다[2].

지금까지 초전도 선재와 안정화선재간의 연속 접합 공정에 관한 연구가 전무한 상황으로 이에 본 연구에서는 연속 적층접합 공정에 대한 연구와 적층 접합된 고온 초전도 선재의 특성에 관한 연구를 하고자 하였다.

본 연구에서는 사용한 초전도 선재는 Hastelloy합금 금속기판위에 $Al_2O_3/Y_2O_3/IBAD-MgO/Epi-MgO$ 의 복합 완충층을 증착한 후 EDDC(Evaporation using Drum in Dual Chambers)공정으로 증착한 SmBCO 초전도 선재를 사용하였다. 그 위에 보호층 Ag를 RF sputter한 후 연속 솔더 디핑방식으로 연속 적층접합을 하였다[3-4]. 디핑방식으로 연속 적층 장치를 제작하고 접합 공정에서 여러 공정 변수를 최적화하여 솔더의 조성, 접합두께의 영향을 조사하고 적층 접합을 한 SmBCO 선재의 특성평가를 실시하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용한 초전도 선재는 완충층을 IBAD 법으로 결정 배향성을 가지는 template를 제작한 후 초전도층은 EDDC공정으로 SmBCO를 증착한 선재를 이용하여 솔더 디핑방식의 연속 적층접합을 하였다. 적층 접합을 하기 전에 보호층으로 Ag를 RF Sputtering하여 증착한 후 450°C에서 30분간 열처리하여 제조하였다. 이렇게 제조된 초전도선재를 이용하여 응용분야에 적용 시 선재의 기계적, 전기적 안정성을 확보하고자 안정화 선재와 적층 접합을 실시하였다. 안정화 선재로는 구리를 사용하여 솔더 포터에 디핑하여 초전도선재와 인덕션 히팅방식의 열원을 이용하여 적층 접합을 하였다. 접합을 하기 전 안정화 선재의 표면에 존재하는 여러 가지 불순물을 제거하기 위해 금속세척제를 이용하여

¹정 회 원 : 한국전기연구원 초전도재료그룹

²정 회 원 : 한국과학기술원 물리학과

³비 회 원 : 경북대학교 금속신소재공학과

*교신저자 : dwha@keri.re.kr

원고접수 : 2007년 9월 14일

심사완료 : 2007년 9월 20일

선재표면을 세척한 후, 접합시 솔더 젖음성(wet-ability) 향상을 위해 플럭스를 안정화 선재표면에 도포한 후 예열 히터를 이용하여 휘발시켜 접합면을 활성화하였다.

Fig. 1은 연속 적층 접합 장치 및 공정을 나타낸 것으로 접합 공정속도는 물의 회전속도로 제어하였다. 선재는 전체적으로 솔더의 균일한 젖음성과 접합면의 플럭스잔류를 최소로 하기위해 안정화 선재에 일정량을 자동적으로 정량 공급하였으며, 솔더 포트에서는 물을 선재와 같이 회전시켜 솔더가 균일하게 도포되도록 하였다.

도포한 후, 초전도 선재와 안정화 선재를 예열 히터를 이용하여 안정화 선재에 도포한 플럭스를 휘발시켜 잔류 플럭스를 최소화하였고, 적층 접합시 최소의 열원으로 초전도 선재의 특성을 저하시키지 않으며, 양호한 접합이 이루어지도록 하였다. 예열 히터를 거친 후 그림과 같이 함께 고주파 유도가열을 안정화 선재를 아래로 하여 가열한 후 압착물에 의해 접합하였다. 솔더는 초전도 선재의 Ag 코팅층과 젖음성과 접합성이 우수하고 환경 친화적인 납성분이 포함되지 않은 용점이 138.3℃인 무연 솔더(58Bi-42Sn)를 사용하였으며, 접합성이 우수한 불소를 함유한 플럭스를 사용하였다. 또한, 공정상에 발생하는 흠을 제거하기 위해 집진기를 사용하였다. 적층 접합된 초전도 선재에 대해서는 접합계면에 대해 미세구조 및 EDS 분석을 하였다. 기계적 특성을 분석하기 위하여 접합면의 접합 강도 및 박리시험을 실시하였다. Fig. 2는 적층 접합한 SmBCO 선재의 기계적 특성평가 시험 모식도를 나타낸 것이다. 또한, 적층 전, 후 SmBCO 선재의 임계전류를 측정하여 적층 공정에서의 특성평가를 하였다.



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

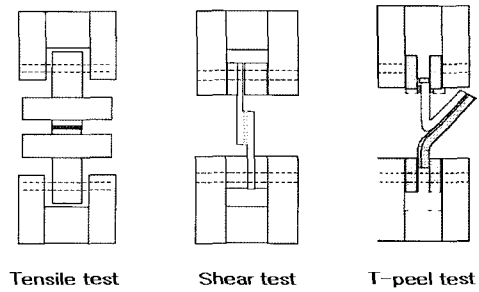


Fig. 2. Schematic diagram of mechanical properties test for laminated SmBCO coated conductors.

3. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3은 안정화 선재로 Cu를 적층 접합한 SmBCO 초전도 선재의 박리강도 및 전단, 인장강도를 나타내었다. 구리 안정화 선재를 접합한 초전도 선재의 경우 박리강도는 약 100kPa를 나타내었고, 초전도 선재와의 접합성은 비교적 우수한 높은 값을 나타낸 것으로 접합면에 대해 솔더의 젖음성이 양호한 것으로 판단된다. 박리강도는 초기에 최대강도로 증가하다가 급격히 떨어지는 경향을 보였다. 솔더 두께에 따른 인장/전단강도에서는 안정화 선재와 초전도 선재사이에 접합한 솔더 두께가 상대적으로 얇은 경우에 접합부에서 솔더가 접합면에 대해 접합이 불균일하게 되었으며, 접합된 부분에서도 접합두께가 얇아 제대로 접합 반응을 형성하지 못해 강도가 저하한 것으로 판단된다. 또한 솔더의 두께가 두껍게 접합된 경우에는 충분한 두께로 접합되어 40 μ m 일때 최대값을 보이다 60 μ m 일때는 일부 두꺼워서 오히려 접합강도가 저하된 것으로 판단된다.

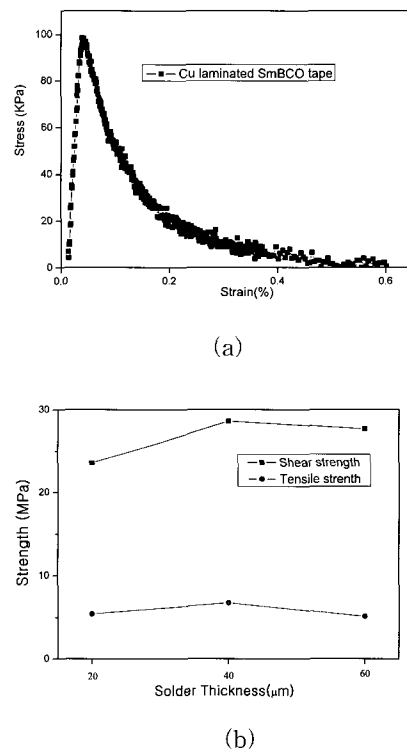


Fig. 3. Mechanical properties of laminated SmBCO coated conductors by Cu stabilizer. (a) peeling strength and (b) tensile/shear strength dependence on the solder thickness.

Fig. 4는 적층 선재의 단면의 미세조직을 관찰한 것으로 솔더와 Ag 보호층 사이에 합금층을 형성한 것으로 판단되어 양호한 접합이 이루어진 것을 EDS 분석을 통해 확인할 수 있었다. Fig. 5는 적층 전, 후 선재에 대한 임계전류를 측정하여 초전도 선재의 특성을 비교평가하였다. 이는 적층 접합에 필요한 열원이 안정화선재와 함께 초전도선재에도 접합열원이 가해지므로 특성 저하를 초래 하는지 비교 측정하였다. 적층 접합시 선재에 접촉 열전대를 부착하여 측정한 온도는 150°로 이는 초전도 특성에는 영향을 미치지 않은 것을 적층 전, 후 임계전류측정결과 동일한 것으로 확인할 수 있었다.

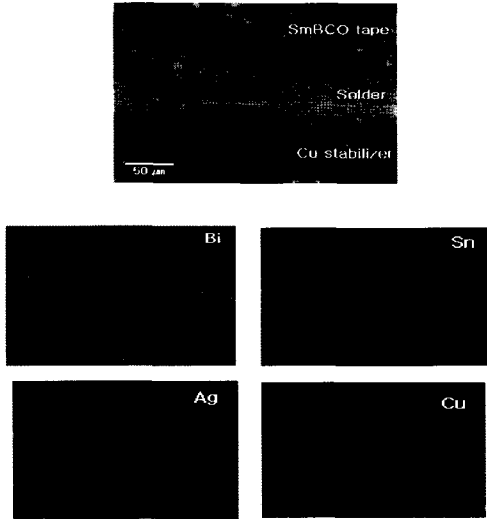


Fig. 4. Microstructure and EDS analysis of cross section in SmBCO coated conductors laminated with Cu stabilizer.

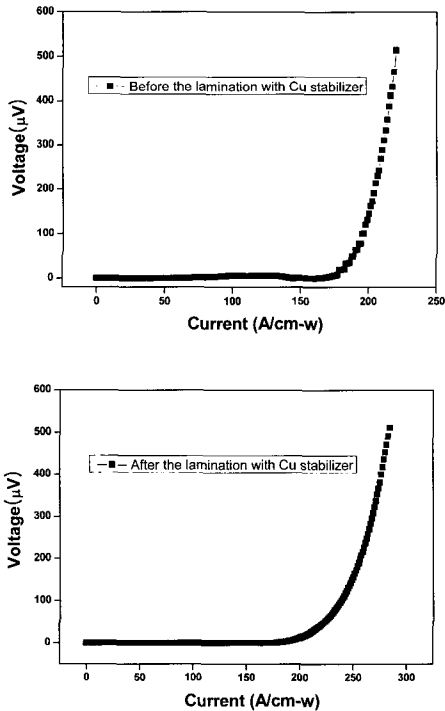


Fig. 5. The critical current of SmBCO coated conductors before and after lamination with Cu stabilizer.

4. 결 론

본 연구에서 고온 초전도 선재의 응용을 위해 Cu 안정화 선재와의 접합을 위한 연속 적층 장치를 제작하였다. 안정화 선재를 솔더 디핑방식으로 고주파 열원으로 적층 접합하였다.

안정화 선재로는 구리를 사용하여 접합된 선재에 대해 접합계면에서의 단면 조직과 EDS 분석, 접합부에 대한 박리, 인장, 전단강도를 솔더의 두께를 변화시키면서 관찰하였다. 안정화 선재로 사용한 구리는 솔더 접합부에서 초전도 선재의 Ag층과 구리 안정화제 계면의 반응층을 형성하고 균일한 두께로 우수한 솔더접합성을 나타내었다. 다층 구조의 박판 선재의 중요한 기계적 특성인 박리강도는 약 100kPa를 나타냈으며, 우수한 적층 접합성을 보였다. 접합부의 솔더 두께는 접합부에 전체적으로 균일하게 접합부를 형성을 위해 최소한 40μm이상의 솔더두께로 접합하는 것이 우수한 강도를 보였다. 적층 접합공정에서의 접합열원에 대한 영향으로 접합공정에서 초전도 특성을 그대로 유지하며 적층 접합이 이루어지는 것을 확인하였다. 향후 보다 긴 장선의 적층 접합실험을 통해 실제 적용에 적합한 연속 적층 공정에 대한 연구와 다른 안정화제로 스테인레스 강을 이용한 적층 접합성과 솔더와의 접합 특성에 관한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] Y. Yoshida et. al., "J_c Characteristics in high magnetic field and microstructure of RE_{1+x}Ba_{2-x}Cu₃O_{6+y} films," Physica C 426.431, pp. 1043, 2005.
- [2] 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, No.2. pp. 129-137, 2002.
- [3] Howard H. Manko "Solder and Soldering," McGraw-Hill, Vol. 4, pp. 225, 2003.
- [4] 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.

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 1일 생. 1983년 경북대 금속공학과 졸업, 1992년 Kyoto대 대학원 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 그룹장.



하동우(河東雨)

1962년 7월 12일 생, 1985년 경북대 금속공학과 졸업, 동 대학원 졸업(공학석사), 2001년 연세대 대학원 금속공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 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 동대학원 졸업(이학석사), 현재 한국전기연구원 선임연구원.



송규정(宋奎丁)

1963년 4월 14일 생, 1986년 고려대학교 물리학과 졸업, 1988년 동대학원 졸업(이학석사), 1999년 미국 테네시주립대 대학원 졸업(이학박사), 현재 한국전기연구원 초전도재료연구그룹 책임연구원.



하홍수(河洪秀)

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



이남진(李南振)

1970년 6월 20일 생, 1996년 경상대 공대 무기재료공학과 졸업, 1998년 동 대학원 2006년 일본 가고시마대학 이공학 연구과 졸업(공학박사), 현재 한국과학기술원 물리학과 박사 후 과정.



박경채(朴景采)

1951년 1월 2일 생, 1974년 경북대 공대 금속공학과 졸업, 1991년 Osaka대 대학원 졸업(공학박사), 현재 경북대학교 신소재 공학부 교수.