

12 kVA급 BSCCO 한류소자 제작 및 특성 실험

Fabrication and fault test of 12 kVA class BSCCO SFCL element

오성용¹, 임성우², 김혜림², 현옥배², 장건익^{1*}

S. Y. Oh¹, S. W. Yim², H. R. Kim², O. B. Hyun², G. E. Jang^{1*}

Abstract: For the development of superconducting fault current limiters (SFCLs) having large current capacity, we fabricated an SFCL element that consists of Bi-2212 superconductor and Cu-Ni alloy tubes. First, Ag was plated on the surface of the Bi-2212 for the enhancement of soldering process. On the Ag-plated Bi-2212 tube, a Cu-Ni alloy tube was soldered using optimized solders and soldering conditions. The BSCCO/Cu-Ni composite was processed mechanically to have a helical shape for the improvement of the SFCL characteristics. The total current path of the SFCL element was 1330 mm long with 12 turns, and had critical current of 340 A at 77 K. Finally, we carried out the fault test using the fabricated SFCL element. It showed successful current limiting performance under the fault condition of 50 V_{rms} and 5.5 kA. From the results, the rated voltage of the SFCL element was decided to be 0.4 V/cm, and the power capacity was 12 kVA at 77 K. The fabrication process of the SFCL and the fault test results will be presented.

Key Words: Bi-2212, SFCL, In-Bi soldering, Cu-Ni alloy.

1. 서 론

초전도 한류기는 전력계통에서 낙뢰, 지락, 단락 등의 사고 시 발생하는 사고전류 (fault current)를 차단 시간 내에 정상전류로 전환하여 계통상의 기기를 보호하는데 사용되고 있다. 고온 초전도체는 초전도 한류기 소자로서 다양한 형태로 개발 이용된다. 다양한 초전도 벌크는 수동소자와 능동소자로서 응용기기가 개발되고 있다[1]. 그 중 전력기기 보호용 저항 스위치 소자로, 용융 공정이 가능하며 열처리 공정만으로 우수한 집합조작을 생성할 수 있는 BSCCO 2212 초전도체가 사용된다. 그러나 고온 초전도체는 임계전류 밀도(J_c)의 불균일 때문에 국부적 켄치에 의해 열이 집중되며, 저항이 발생하면 다른 부분은 켄치를 중단하여 켄치(Quench)된 것과 켄치되지 않은 것이 확연히 구별된다.

그것으로 인해 도체 일부분이 전체 전압을 감당해야 하며, 그 부분은 열 발생이 계속되어 과도한 온도 상승의 위험에 처한다. 그러므로 한류소자로 BSCCO 2212 초전도체가 사용되기 위해서 가장 효율적인 경우는 도체 전체가 균등 하게 전압을 분담 하도록 하는 것이다. 즉 도체 전체가 동시에 켄치 되도록 하는 것이다. 동시 켄치를 발생시키는 한 가지 방법으로 초전도체에 안정화재로 금속을 접합시켜 hot spot 발생시 전류를 우회하도록 한다[2-3]. 그러면 hot spot에서의 열 발생이 제한되어 온도상승은 억제되며, 그 동안 전류는 더욱 상승하여 다른 부분에도 켄치가 진행된다. 이렇게 해서 도체 전체에 동시 켄치가 진행되도록 조절할 수 있다. 그러므로 초전도체-금속 복합체의 제조 기술은 단위소자 제작 시 대단히 중요한 기술의 하나이다. 금속과 초전도체의 접합에는 초전도체의 특성이 변하지 않는 낮은 온도 범위에서 접합할 수 있는 솔더링 기술을 사용한다. 특히 저융점 솔더인 인듐 솔더를 사용함으로써 초전도체의 특성변화를 방지하며, 다른 고용점 솔더에 비해서 작업이 용이한 장점을 가지고 있다[4-5].

따라서 본 연구에서는 금속 선트(Cu-Ni, 백동)와 BSCCO 2212 초전도체를 저온 솔더링 기술로 접합한 후 보강재를 부착하여 최종 BSCCO 2212 한류소자를 제작하여, 접합특성 및 단락시험을 실시하였다.

Table 1. Physical properties of solders

Solder	Melting Point (°C)	Density (g/cm ³)
Sn-3.0wt%Ag-0.7wt%Cu	217	7.39
In-33.7wt%Bi	72	7.99

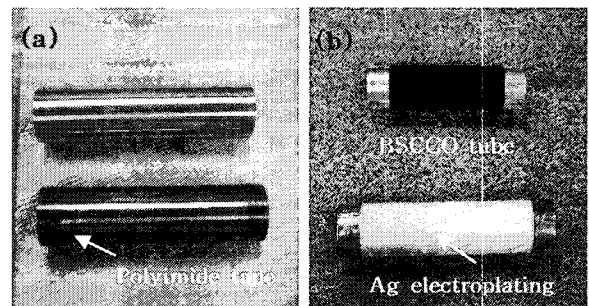


Fig. 1. Soldering samples- Cu/Ni tubes (a), a bare BSCCO tube and a Ag-electroplated (b).

¹정 회 원 : 충북대학교 신소재공학과

²정 회 원 : 한전전력연구원 초전도그룹

*교신저자 : gejang@trut.chungbuk.

원고접수 : 2008년 01월 10일

심사완료 : 2008년 03월 07일

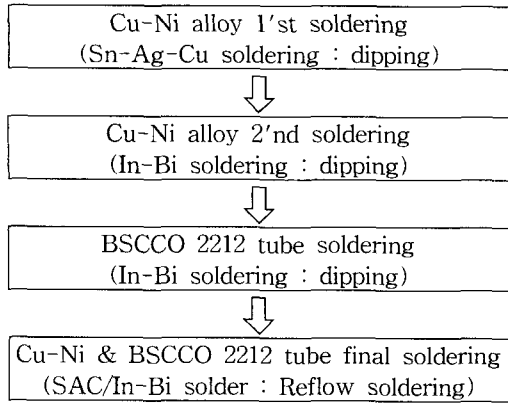


Fig. 2. Flowchart of soldering.

2. 실험 방법

2.1. 저온 솔더링

본 실험에서는 Fig. 1. (a)의 Cu-Ni 튜브와 Fig. 1. (b)의 BSCCO 2212 튜브를 저온 솔더링 하였다. Cu-Ni 튜브는 외부의 솔더링 방식을 위해 바깥쪽에 폴리미드 테이프를 감았으며, BSCCO 2212 초전도 튜브는 솔더링성(solderability)을 향상 시키기 위해서 BSCCO 2212 튜브 외부를 Ag 전기도금 하였다. Table 1은 초전도-금속복합체의 접합에 사용된 솔더로, Sn-Ag-Cu(SAC) 솔더와 In-Bi 솔더를 사용하였다. 1차 솔더링에 사용된 Sn-Ag-Cu 솔더는 2차 솔더링 재료인 In-Bi 솔더의 젖음성(wettability) 및 퍼짐성(spreadability) 향상을 목적으로 1차 솔더링 시에 사용되었다. 솔더링 공정은 Fig. 2와 같은 순서로 백동 튜브 내부에 인듐 솔더의 솔더링성 향상을 목적으로 1차 SAC 디핑 솔더링 후, In-Bi 솔더를 이용 2차 디핑 솔더링을 실시하였다. 그리고 백동 튜브는 인듐 솔더링 된 BSCCO 2212 튜브와 최종적으로 리플로우 솔더링(Reflow Soldering, 솔더가 시료에 놓여진 상태에서 온도 프로파일에 따른 솔더링의 한 방법) 하였다.

2.2. FRP 접합 및 가공

초전도 한류기는 기본적으로 사고 발생 초기에 매우 큰 고장전류가 인가되므로 이로 인해 발생하는 전자기력 및 초전도체의 켄치 시 발생하는 진동 등에 대한 대비를 해야 한다. BSCCO 2212 소자는 세라믹이므로 충격에 비교적 취약한 편이다. 따라서 Bi-2212 초전도 튜브 내부에 FRP를 접합하여 강도 보강을 하였

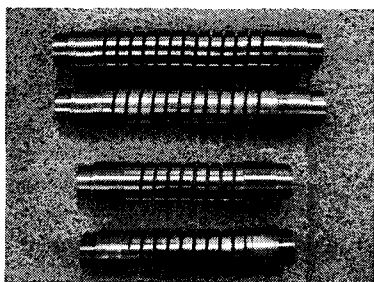


Fig. 3. BSCCO 2212 monofilar coil with metallic shunt.

Table 2. Specification of a Bi-2212 SFCL element

튜브 디자인	monofilar coil
BSCCO tube의 길이	250 mm
BSCCO tube 두께	3.5 mm
BSCCO tube 외경	36 mm
가공 턴수	12 턴
가공 길이	132 cm
가공 선폭	9 mm
I _c (77K)	340 A

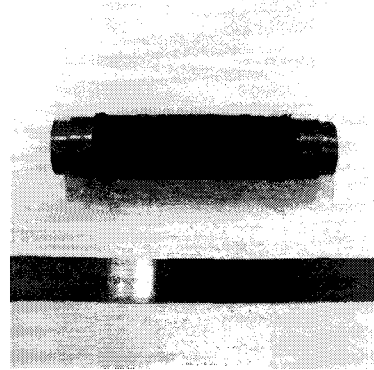


Fig. 4. BSCCO 2212 SFCL elements.

다. FRP 접합은 에폭시 수지를 사용하여 접합하였다. 여기서 사용된 에폭시 수지로는 ECCOBOND 24를 사용하였으며, 경화제는 Catalyst 23 LV를 사용하였다. 이 경화제는 다른 경화제에 비하여 낮은 온도에서도 에폭시의 특성이 유지되며, 배합 후 경화 전까지의 작업시간이 다른 경화제에 비해 매우 길다. 또한 점도가 낮아서 작업성이 우수하다. 초전도 한류소자의 절삭작업은 머시닝 센터에서 Cu-Ni 합금을 초경공구로 1차 가공 후 BSCCO 2212 벌크 튜브를 다이아몬드 휠을 사용하여 절삭하였다. Table 2에 BSCCO 2212 한류소자의 사양을 나타냈으며 Fig. 3은 monofilar coil 형태로 가공된 BSCCO 2212 초전도-금속 복합체이다. 그리고 최종적으로 절삭선 및 외부에 에폭시로 피복 하여 Fig. 4와 같은 BSCCO 2212 초전도 한류 소자를 제작하였다.

2.3. 접합부의 특성 평가

리플로우 솔더링 직후 계면 반응층 분석은 단면 SEM, EDX 관찰을 통해 주로 이루어졌다. 시편은 수직 절단한 시료를 diamond powder로 0.25 μm까지 연마한 후 2% HCl + 98% Ethyl Alcohol 용액에서 2분간 에칭하여 준비했다. 또한 솔더 접합부의 건전성 평가를 위해 Cu-Ni 전극과 초전도체 사이의 접촉저항을 측정하였다. 접촉 저항은 본 연구에서와 동일한 솔더링 조건으로 Fig. 5와 같은 시료를 제작하여 측정하였다. 측정 방법은 직류 전류원 및 나노멀티미터를 이용 4단자법으로 측정하였다.

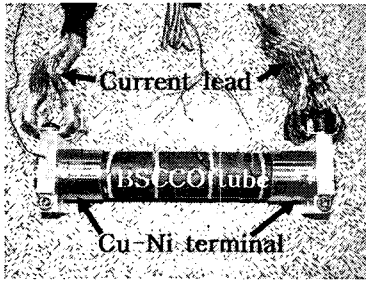
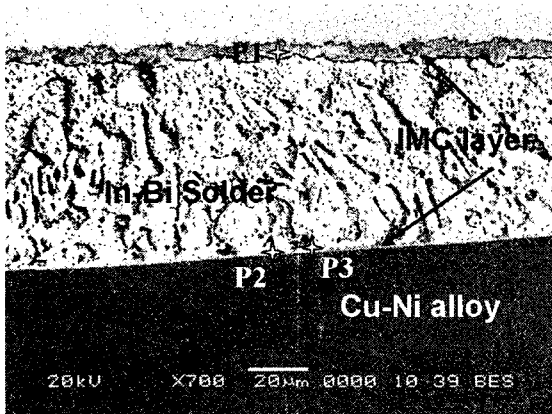


Fig. 5. A contact resistance test sample.



(All results in atomic %)

	Ni	Cu	Ag	In	Sn	Bi
P1		1.11	40.52	57		1.37
P2	18.34	32.50		0.57	47.71	1.17
P3	1.48	4.26	29.00	63.32		1.94

Fig. 6. An SEM micrograph and EDX analysis result for SAC/In-Bi soldering.

3. 결과 및 고찰

3.1. 솔더링 후 미세조직

초전도체와 Cu-Ni 튜브의 접합공정에서 1차 솔더링에는 SAC 솔더가 사용되었으며, 2차 솔더링에는 In-Bi 솔더를 사용하였다. 이로 인해 솔더와 백동의 계면 반응은 Fig. 6의 EDX 분석 결과와 같이 금속간 화합물(Intermetallic Compound, IMC)층이 Cu_xSn_y , Ni_xSn_y , Ag_xIn_y 와 같은 세 종류의 금속간 화합물로 구성되었다. 또한 BSCCO 2212 튜브와 솔더 측 계면에서의 반응은 주로 Ag_xIn_y 계의 금속간 화합물로 구성된 IMC 층을 형성 되었다. 그리고 접합 계면에 나타난 IMC 층의 구분이 좀 더 뚜렷하였다. 이것은 BSCCO 2212 튜브에 수십 μm 두께로 도금된 Ag 층과 보다 많은 반응이 이루어진 것으로 보인다.

3.2. 접촉 저항

SAC/In-Bi 솔더의 접합특성을 평가하기 위해서 4 단자법을 이용하여 Cu-Ni 전극과 초전도체 사이의 접촉 저항을 동일한 조건(접합거리, 접촉면적, 도체크기, 77 K)하에서 측정하였다. 그리고 비교 데이터로서 SAC 솔더를 사용하지 않고, In-Bi 솔더만을 사용 솔더링하였다. In-Bi 솔더링의 경우 양 단자부의 저항이

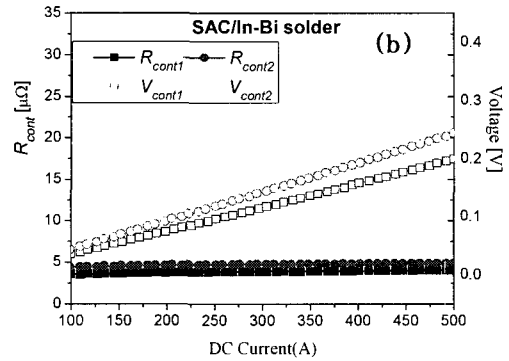
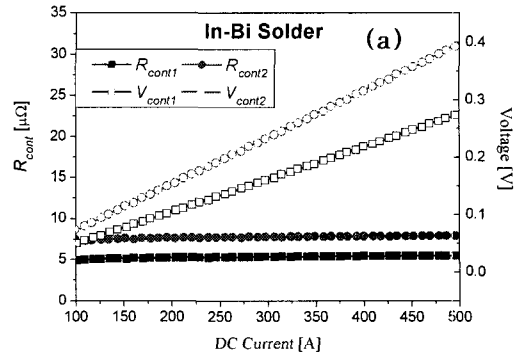


Fig. 7. Contact resistance curves for Cu-Ni/In-Bi soldering (a), and Cu-Ni/SAC/In-Bi soldering (b).

Fig. 7. (a)와 같이 각각 $5.38 \mu\Omega$, $7.76 \mu\Omega$ ($1.47 \mu\Omega/cm^2$, $2.11 \mu\Omega/cm^2$)였으며, SAC/In-Bi 솔더링의 경우는 각각 $4.02 \mu\Omega$, $4.7 \mu\Omega$ ($1.09 \mu\Omega/cm^2$, $1.28 \mu\Omega/cm^2$)으로 측정되었다(Fig. 7. (b)). 즉 In-Bi 솔더링에 비해 SAC/In-Bi 솔더링의 경우 접촉 저항이 좀 더 우수한 특성을 나타냈다. 이는 2차의 솔더링으로 인해서 반응 시간이 길어졌기 때문에 접합부 내부로의 확산 거동 시간이 확보되었으며, 금속간 화합물의 안정적인 성장에 의한 것으로 사료된다.

3.3. 단락 시험

77 K에서 임계전류 340 A인 BSCCO 2212 초전도 한류 소자의 단락 시험 결과 Fig. 8에서와 같이 입력 전압 50 V_{rms}, 5.5 kA_{rms}의 사고전류를 인가하여

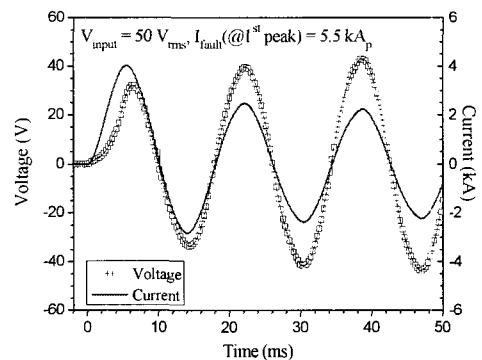


Fig. 8. Characteristics of BSCCO SFCL element during fault.

안정적인 한류 특성을 보였으며, 이로부터 가용 전기장이 0.4 V/cm 이며, 77 K에서 12 kVA 전력용량을 나타내었다.

4. 결 론

BSCCO 2212 초전 한류소자 제작을 위해 SAC 솔더와 In-Bi 솔더를 사용 2차 이중 솔더링을 실시하여 BSCCO 튜브와 Cu-Ni 튜브를 접합하였다.

제작된 BSCCO 2212 한류 소자의 특성 시험 결과 첫번째, 계면 반응은 Cu-Ni 측 접합 계면에서 Cu_xSn_y , Ni_xSn_y , Ag_xIn_y 금속간 화합물이 생성되었으며, BSCCO 측 계면에서는 Ag_xIn_y 의 IMC 층이 생성되었다. 두번째, 접촉 저항은 In-Bi 솔더링에 비해 SAC/In-Bi 솔더링을 실시했을 경우 접촉 저항이 좀 더 우수한 특성을 나타냈다. 마지막으로 단락 시험 결과 50 V_{rms}, 5.5 kA_{rms}의 사고전류를 인가하여 안정적인 한류 특성을 보였으며, 이로부터 가용 전기장이 0.4 V/cm 이며, 77 K에서 12 kVA 전력용량을 나타내었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] 유상임, "고온초전도 벌크재료의 기술개발 현황 및 전망", 초전도 저온공학, 4권 2호, 2002.
- [2] Steffen Elschner, Frank Breuer, Thomas Rettelbach, Heribert walter, and Joachim Bock, "Manufacturing and Testing of MCP 2212 Bifilar Coils for a 10 MVA Fault current Limiter", IEEE Trans. Applied. Superconductivity, 13, 1051-8223, 2003
- [3] S. Elschner, F. Breuer, M. Noe, A. Wolf, J. Bock, "Qualification of MCP BSCCO 2212 bulk material for use in resistive current limiters", Physica C, 372-376, 2002
- [4] Dae-Gon Kim, Seung-Boo Jung, "Interfacial reactions and growth kinetics for intermetallic compound layer between In-48Sn solder and bare cu substrate", Journal of Alloys and Compounds, 386, 151-156, 2005
- [5] I. Shohji, S. Fujiwara, S. Kiyono and K. F. Kobayashi, "Intermetallic compound layer formation between Au and In-48Sn solder", Scripta Materialia, 40, 7, 815-820, 1999

저 자 소 개



오성용(吳承龍)

1973년 8월 22일생, 2000년 한밭대학교 금속공학과 졸업, 2004년 동 대학원 응용소재공학과 졸업(공학석사), 현재 충북대학교 신소재공학과 연구원



임성우(任星禹)

1973년 02월 28일생, 1997년 전북대 공대 전기공학과 졸업, 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 현재 한전 전력연구원 일반 연구원



김혜림(金蕙林)

1957년 3월 15일생. 1979년 서울대 물리학과 졸업, 1981년 미 아이오와 주립대 대학원 물리학과 졸업(석사), 1991년 미 코넬대 대학원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한전 전력연구원 책임연구원



현옥배(玄錫培)

1953년 02월 11일생, 1976년 연세대 물리학과 졸업, 1987년 미 아이오와 주립대 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한전 전력연구원 수석연구원



장건익(張建翼)

1956년 5월 8일생, 1982년 한양대 무기재료공학과 졸업, 1987년 미국 유타대 재료과 졸업(공학석사), 1992년 미국 미시간주립대 재료과 졸업(공학박사), 1994-1995년 원자력 연구소 초전도 응용기술팀 선임연구원, 현재 충북대학교 신소재 공학과 교수.