

초전도 케이블용 고강도 고온초전도 선재 개발

하 동 우, * 김 응 수

한국전기연구원 책임연구원, *넥상스코리아 기술연구소 소장

1. 서 론

저항이 없는 초전도체의 특성을 이용한 초전도 시스템의 실용화를 위해서는 운전 온도의 유지비용에 따라 경제성이 좌우된다. 따라서 액체질소 온도에서도 운전이 가능한 고온초전도체를 응용할 수 있다면 초전도 시스템의 실용화를 더욱 앞당기게 될 것이다. 임계 온도 특성과 아울러 초전도 선의 임계전류밀도, 교류손실과 같은 초전도 특성이 향상되어야 기존 시스템과의 경쟁력을 확보할 수 있으며, 또한 권선 및 시스템의 운전 동안 대전류에 의한 전자기력을 견딜 수 있는 기계적인 강도를 필요로 한다. 여러 가지 고온초전도 물질 가운데 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 산화물(Bi-2223)을 금속 튜브에 넣어 테이프 형태로 가공하는 Powder-In-Tube (PIT) 법으로 제조한 것을 제 1세대 초전도선, $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 산화물(Y-123)을 박막 제조 공정(CC; Coated Conductor)으로 만든 것을 제 2세대 초전도선이라고 부르고 있으며 제조기술 및 특성에 있어서 서로 간 장단점을 갖고 있다. 자장 의존성 및 가격에서 장점을 지닌 Y-계 2세대 초전도선이 차세대 초전도선으로 각광을 받고 있지만 현재로서는 짧은 시료에서만 성공적인 결과를 얻고 있으며, 초전도기에 응용하기 위한 길이가 긴 장선은 연구 단계에 있기 때문에 실제 초전도 시스템에 응용하기에는 시기상조이다. 따라서 고온 초전도체를 이용하여 실제 시스템에 응용하기 위한 선재의 장선화 요구를 충족시킬 수 있는 재료로서 PIT 공정에 의한 Bi-2223/Ag 고온초전도 테이프가 선택되고 있으며 이를 실용화하기 위해 세계적으로 여러 회사에서 많은 노력을 기울이고 있다. 이들 중 미국의 AMSC는 가장 선두주자로서 가장 우수한 PIT선재를 판매하고 있다. 최근에 150 m급의 선재 제조 공정을 최적화하여 액체질소 온도, 자기자장하의 I_c 가 170A를 넘는 세계 최고수준의 Bi-2223 고온

초전도선재를 개발하였으며 일반 제품으로는 200 m 이상에서 120 A 이상의 I_c 를 가지는 제품을 판매하고 있다. 특히 초전도 선재의 기계적 강도를 높이기 위하여 은 시스 테이프의 양 표면에 30 μm 의 얇은 SUS 테이프를 연속적으로 샌드위치 구조로 납땜하여 일반 은 시스 선 보다 3배 이상이 되는 265 MPa의 높은 강도를 나타내는 초전도선 개발에 성공하였다. 일본, 유럽, 독일, 중국의 회사에서 Bi-2223고온초전도선재를 판매하고 있다. 아직 AMSC사의 특성치에는 못 미치고 있지만 거의 근접하는 수준으로 향상하고 있는 추세이다. 미국에서는 1세대 초전도선의 특성 향상을 위하여 위스콘신 대학, 로스알라모스 국립연구소, 아르곤 국립연구소, AMSC 사가 공동으로 DOE로부터 연구비를 지원 받는 WDG (Wire Development Group) 연구그룹을 형성하여 현재도 성과를 보고하고 있다. 일본의 Sumitomo는 Bi-2223 초전도선 개발에 가장 오래된 기업으로서 수년 전까지는 그들의 도체가 AMSC의 것보다는 특성이 떨어지는 것으로 평가되었다. 하지만 최근에 열처리 공정에 over pressure 개념을 도입하여 선재의 특성을 대폭 향상시켰다고 보고하고 있다. 즉 열처리 공정에 초대형 HIP(Hot Isostatic Press)장비를 도입하여 낮은 산소분압을 가진 아르곤 가스를 수백 기압 정도로 가압하여 초전도 필라멘트 내부의 기공과 같은 결함을 대폭 줄이고 초전도 결정입자 간 결합력을 향상시킨 도체를 개발하였으며, 이 도체의 판매량을 증가시키기 위해 지속적인 연구와 투자를 계속하고 있다. 특히 이 회사에서는 CC 선재의 상용화가 가까운 장래에는 이루어지지 않을 것으로 예측하여 초대형 장비에 대한 투자도 계속 이루어지고 있다. 일본의 Furukawa 전선에서 개발한 Bi-2223 초전도선의 I_c 값은 다른 회사에 비해 비교적 낮으나 최근 일본에서 이 회사의 선재를 사용하여 Super-ACE라는 프로젝트를 통해 고온초

전도 케이블을 제작하여 3000 A의 통전 전류에서 1 W/m^2 가 약간 넘는, 세계에서 가장 우수한 교류손실 치를 발표하였다. 독일의 EAS는 VAC으로부터 독립하여 Bi-2223 초전도선을 판매하는 신생기업이다. 모기업인 VAC의 연구진 및 기술을 그대로 보유하고 있어, 초전도선의 특성도 우수한 편이다. 그리고 이미 그전에 독일의 Simmens, Nexans, Merck 등에서 연구자들이 모여 만든 Trithor라는 회사도 활발하게 활동을 하고 있다. 덴마크의 NST에서 Bi-2223 초전도선 개발에 핵심역할을 하였던 중국 청화대의 Z. Han 교수의 자문으로 Bi-2223 초전도선을 판매하는 InnoST사가 있으며, 2000년부터 활발히 영업 활동을 하고 있으며 또한 중국의 초전도 케이블 개발 연구의 핵심적인 역할을 수행하고 있다.

국내에서는 과기부 국책사업과 기관고유 사업을 통하여 전기연구원과 기계연구원, 원자력연구소를 중심으로 PIT법에 의한 Bi-2223 고온초전도선재 연구를 수행하였다. 그리고 국내에서는 지금까지 PIT선재 개발을 위한 산학연 공동 개발 프로그램의 부재와 기업체의 인식 부족으로 업체를 주축으로 한 고온초전도선재 실용화 연구가 본격적으로 이루어지지 못했다. 넥상스코리아가 산자부 생기반 사업을 통하여 급속계 NbTi 초전도 선을 개발한 적이 있으며, 현재 과기부 KSTAR 사업을 통하여 Nb_3Sn 선재를 가공하여 연구소에 일부 납품한 실적이 있다. 이러한 연구 능력을 바탕으로 한국전기연구원과 넥상스코리아가 주축이 되어 PIT법에 의한 Bi-2223 고온초전도 선재를 개발하고자 본 연구를 수행하였다.

일반적으로 Bi-2223 초전도선에 사용되는 급속 피복재는 은(Ag)을 주로 사용하고 있다. 본 과제에서는 초전도 케이블에 사용하기 위한 도체를 개발할 목적으로 우선 Ag 합금 피복재를 사용하여 도체의 기계적 강도를 향상시키고자 하였으며 또한 실용화를 위한 길이가 길면서도 외형과 특성이 우수한 도체를 개발하고자 하였다. 고온초전도의 장선화를 위해서는 단선, 소세징과 같은 가공 결함이 없이 균일한 가공 기술이 확보되어야 하며 또한 열처리에 의해 선재 전체에서 미세조직이 균일하게 이루어진 초전도 필라멘트를 가지도록 하여야 한다. Bi-2223상은 열처리 시 생성속도가 매우 느리고, 좁은 온도

영역에서만 일어나기 때문에 Bi-2223 상의 생성이 용이하지 않지만 높은 분율의 Bi-2223 상을 얻을 수 있도록, 그리고 결정 입계에서의 불순물 상을 줄여 입자간 결합력을 개선하고, 또한 결정립의 배향성을 향상 시킴으로 초전도 선에서의 임계전류 I_c 값을 높일 수가 있다. 본 과제에서는 초전도 시스템에 사용하기 위한 km 급 Bi-2223/Ag 초전도선의 균일한 가공 공정과 소성변형 동안 단선이 발생하지 않는 조건들을 조사하였다. 그리고 정밀 가공 조건을 기초로 고온초전도 상의 생성을 원활히 할 수 있는 열처리 기법도 함께 개발하여 Bi-2223/Ag 초전도 선의 임계전류 특성을 향상시키고자 하였다.

2. 가공공정 개선

가. 인발공정 개선

은(Ag) 튜브에 Bi-2223 조성의 전구체 분말을 충전한 다음 인발하여 육각필라멘트 형상의 단심 선을 제조하였다. 단심 선 55개를 필라멘트로 하여 은 합금 튜브에 적층한 후 다시 인발, 압연하여 선재를 제조하였다. 인발 공정에서 가공의 균일성을 향상시키기 위하여 인발응력 측정 시스템을 구축하였으며 이를 그림 1에 나타내었다. 인발기의 선재를 물리는 지그 부분에 로드셀을 장착하였으며 선재의 가공에 따라 즉 지그가 이동함에 따라 응력 변화를 측정하였으며 이 값들이 컴퓨터를 이용하여 그래프로 나타나도록 제작하였다. 이 장치를 이용하여 급속과 세라믹 분말로 이루어진 복합 초전도선에서의 인발 응력을 측정하였는데, 인발 과정에서의 응력 변화를 분석함으로써 가공의 균일성 및 중간 열처리의 필요성을 결정할 수 있었다.

그림 2에 Bi-2223/Ag 복합체의 인발 가공 동안 길이 방향에 따른 응력의 변화를 나타내었다. 중간 열처리를 하지 않았을 때의 변형력이 중간 열처리를 하였을 때의 값에 비해 크다는 것을 알 수 있다. 초전도 선의 인발 가공 동안 임의의 직경에서 어느 정도의 인발 강도를 가지는 것이 적절한지에 대해 인발 후 단면 분석을 하였으며 이러한 자료를 바탕으로 인발장력이 어느 값 이상 커지지 못하도록 하여야지만 초전도 필라멘트의 가공 균일성을 확보할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 또한 가공공정에서의 이러한 측

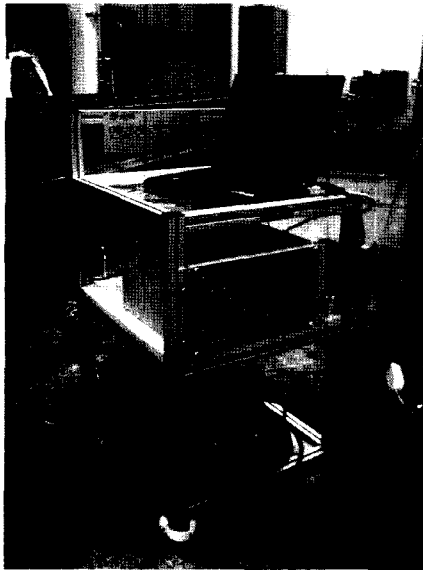


그림 1. 인발장력 측정 시스템

정값은 향후 선재의 가공공정 개선에도 활용할 수 있으므로 인발공정에서는 언제나 인발장력 측정장치를 사용하였다. 인발 및 신선 가공 도중 적절한 시점에서 중간 열처리를 행함으로써 최종 길이 1 km의 초전도 선에서도 단선 없이 초전도선을 가공할 수 있었다.

나. 압연공정 개선

정밀한 마그네트 또는 케이블을 제작하기 위해서는 초전도선의 두께 및 폭의 균일도가 중요하다. 즉 팬케익 형 권선 또는 집합연선을 정밀하게 수행하기 위해서는 시스템 제작자들이 요구하는 수준의 초전도선의 품질검사

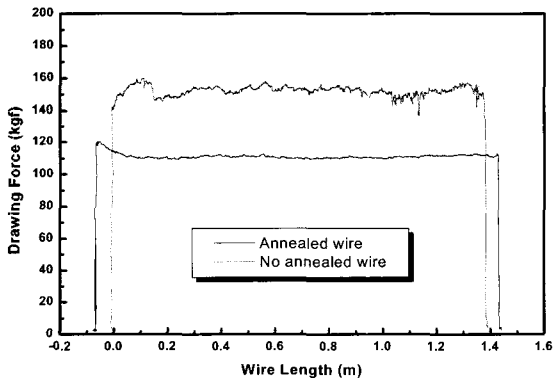


그림 2. 인발공정 동안 중간 열처리 유무에 따른 인발 장력의 변화.

자료를 제공하여야 한다. 따라서 초전도 테이프의 길이에 따른 두께 및 폭의 변화를 측정하기 위해 압연기에 테이프의 두께 및 폭을 측정하는 장치를 부착하였으며 이를 그림 3에서 보이고 있다. 압연 후 테이프의 폭은 레이저를 이용한 비접촉식 마이크로미터기를 사용하였으며, 두께를 측정하기 위해서는 접촉식 마이크로미터기를 사용하였다. 선재가 압연되는 동안 두께 및 폭의 측정 결과는 연속적으로 컴퓨터에 기록되게 하여 작업 도중에 가공 상태를 파악할 수 있도록 제작하였다. 압연 후 장력뿐만 아니라 그림의 반대쪽 즉 pay-off에서도 같은 방식으로 장력을 조절하도록 하여 초전도선을 균일하게 가공할 수 있도록 조절할 수 있었다. km급의 장선을 균일하게 가공하기 위해서뿐만 아니라 제품으로서 Bi-2223/Ag 테이프를 공급하기 위해서도 반드시 이러한 장치를 사용하여 성적서를 발급하여야 하므로 이러한 장치를 구축하여 능숙하게 다룰 수 있어야 한다. 본 과제를 통하여 압연공정에서의 초전도선의 두께 및 폭을 연속으로 측정하고 또한 장력 조절도 할 수 있는 장치를 개발함으로써 균일한 품질의 장선 도체를 제조할 수 있도록 하였다.

그림 4는 압연 공정 동안 장력을 적절히 조절하여 Bi-2223/Ag 테이프의 폭과 두께를 허용범위 내에 가공할 수 있었음을 나타내고 있다. 압연 결과를 토대로 압연 시 장력 조절을 여러 가지로 변화시키면서 적합한 조건을 조사하였는데, 최근에 폭 오차를 $\pm 192 \mu\text{m}$ 에서 $\pm 91 \mu\text{m}$ 수준으로, 두께 오차를 $\pm 19.5 \mu\text{m}$ 으로

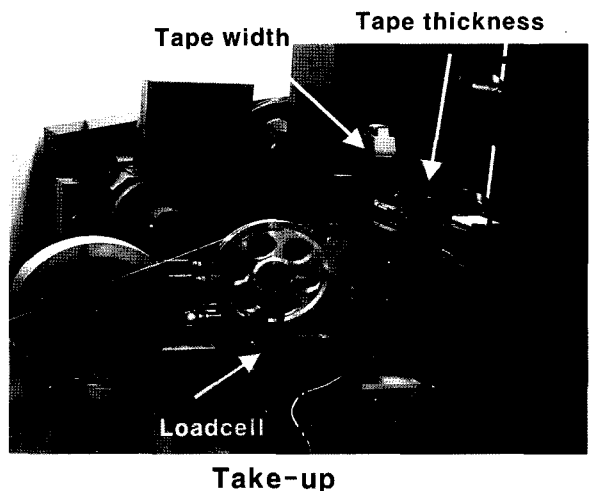


그림 3. 압연기의 압연체의 두께 및 폭 측정 장치.

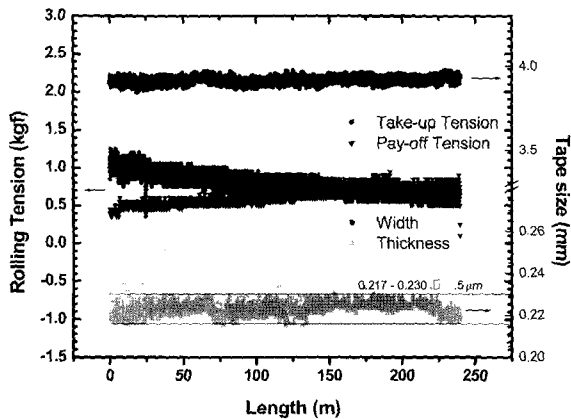


그림 4. Bi-2223/Ag 초전도선의 압연공정 동안 두께 및 폭의 변화.

향상시킬 수 있었다.

다. 열처리 공정 개선

열처리에 의한 Bi-2212 상의 변화를 조사하기 위하여 가공도중 760°C, 저산소 분위기에서 열처리를 한 후 이때의 변화를 XRD로 분석하여 그림 5에 나타내었다. 열처리 전의 시료(CN)에서는 Ca_2PbO_4 상의 피크($2\theta = 17.7^\circ$)가 나타난 것을 볼 수 있었으며, 열처리 후에는 이 피크의 강도가 약해짐을 확인할 수가 있었다. 또한 Bi-2212의 orthorhombic 구조와 관련이 있는 23° , 29° , 35° 부근의 피크의 강도가 다른 것에 비해 상대적으로 증가하였음을 나타내고 있다. 즉 tetragonal 구조에서는 이들 피크가 다른 피크들과의 비교에서 큰 차이가 없지만 orthorhombic 구조에서는 이들 피크의 강도가 다른 피크에 비해 상대적으로 크게 나타나게 된다. 따라서 전열처리에 의해 Bi-2212의 결정구조가 tetragonal에서 orthorhombic 구조로 변화되었음을 나타내고 있다. 또한 Ca_2PbO_4 피크의 감소 외에 다른 제 2상 피크의 감소도 진행되었음을 알 수가 있었다.

전열처리 공정을 통해 Bi-2212 상의 상변태를 확인한 다음 전열처리 유무에 따라 초전도 선재의 임계전류에 영향을 미치는지에 대해서도 조사하였으며, 같은 소결 조건에서 전열처리를 한 선재에서 더 높은 I_c 값을 얻을 수 있었다. 이러한 연구 결과를 기초로 하여 장선재 가공에서도 전열처리를 도입하

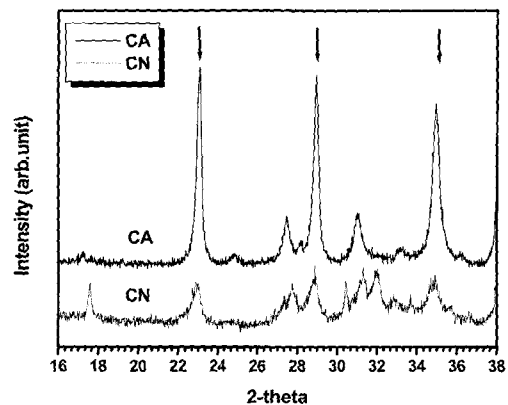


그림 5. 전열처리한 선재(CA)와 하지 않은 선재(CN)에서의 XRD 패턴.

여, 최종 소결 열처리 후 Bi-2223 상의 분율을 증가시키고자 하였다. 압연한 테이프는 8% O_2 분압하, 820 ~ 835°C의 온도 범위에서 소결 열처리를 2 회에 걸쳐 수행하였다.

라. 연속 임계전류 측정 장치 구축

장선의 초전도선의 임계전류를 측정하기 위해서는 연속 임계전류 측정 장치가 필요하다. 고온초전도 선의 경우 길이에 따른 초전도 특성이 아주 균일한 편은 아니기 때문에 임의의 길이를 정하여 반복하여 임계전류를 측정하여 전 구간에 걸쳐 초전도 특성을 평가하는 것이 필요하다. 또한 초전도 선의 상용화를 위해서는 초전도 선의 임계전류 특성을 첨부하여야 하므로 본 장치의 개발은 반드시 필요한 실정이다. 그림 6에 접촉 식에 의한 연속으로 임계전류를 측정하는 장치를 나타내었다. 액체질소 용기 내에 가이드 롤러를 통하여 초전도 선이 지나가도록 하였으며, 이 사이에 전류 및 전압 탭이 위치하도록 하여 4단자 법으로 임계전류를 측정할 수 있도록 하였다. 전압 단자간 거리는 8 cm에서 100 cm로 가변시킬 수 있도록 제작하였는데, 장선의 I_c 측정에서는 주로 1 m로 고정하여 측정하였다. 전류 단자의 접촉 면적을 증가시키기 위하여 고온초전도 테이프의 상하 양면으로 전류단자가 접촉하도록 하여 접촉면적을 늘려, 측정의 정밀성을 높일 수 있었다.

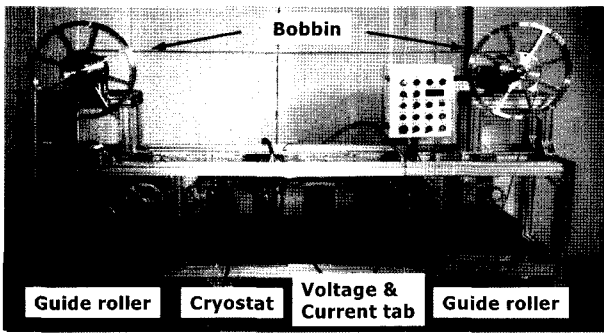


그림 6. 연속 임계전류 측정 장치의 외관.

3. 장선재에서의 임계전류 측정

그림 7은 길이 1 km의 Bi-2223/Ag 초전도선을 열처리 한 후의 상태를 나타내고 있다. 그림 6에서 보이고 있는 연속 I_c 측정 장치를 사용하여 1 m 간격으로 액체질소 온도에서 임계전류를 측정하였다. 비교적 균일한 임계전류 특성을 보였으며 특별히 특성이 저하하는 부분은 발생하지 않았다. 평균 임계전류는 약 50 A로 나타나 km 급 길이의 초전도선을 제조하는 세계적인 회사의 특성과 비슷한 수준을 가지고 있음을 확인하였다. 인발 및 신선 가공 조건과 전기로의 온도 분포를 더 균일하게 개선시킨 다음 270 m 급의 Bi-2223/Ag 초전도선에서는 최대 임계전류 특성이 68 A로 나타났으며, 평균 63.2 A의 임계전류를 얻을 수 있었다. 그리고 공칭임계전류밀도 J_c 는 70 A/mm²을 넘는 값을 기록하였다.

타 연구과제에 선재를 공급하기 위해 개



그림 7. 길이 1 km인 Bi-2223/Ag 초전도선을 열처리 한 후의 모습

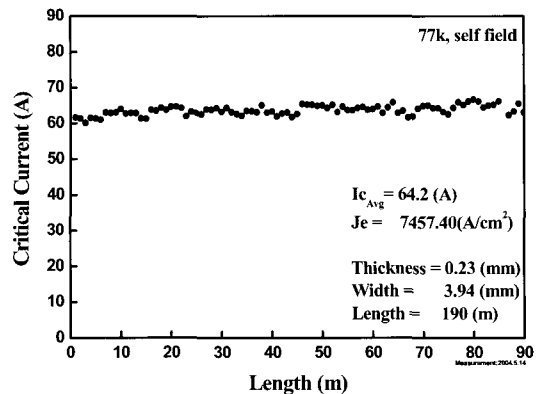


그림 8. 길이 200 m인 Bi-2223/Ag 초전도선의 연속임계전류 특성

선된 제조 공정으로 선재를 제조하였으며, 이 선재의 임계전류 특성을 그림 8에 나타내었다. 길이에 따른 임계전류 값의 편차가 훨씬 작아졌으며, 평균 임계전류밀도(J_c) 값도 64.2 A로 향상되었음을 알 수 있었다. 그리고 공칭임계전류밀도 J_c 는 74 A/mm²을 넘는 값을 기록하였다. 약 200 m 길이에서 이 정도의 특성을 갖는 Bi-2223/Ag 고온초전도선은 재현성 있게 제조할 수 있다는 것을 확인하였으며, 현재 초전도 케이블에 사용되는 수준의 초전도선으로는 상용화가 가능할 것이라고 기대할 수 있다.

4. 결 론

초기의 대형 빌렛에서부터 인발 및 신선 가공 조건의 최적화 기술을 개발하여 과제의 최종 목표인 길이 1 km인 Bi-2223/Ag 고온초전도 장선재를 단선 없이 가공하였다.

길이 1 km급에서 50 A 이상의 임계전류를 가지는 고온초전도 선재의 열처리 기술을 개발하였다.

이러한 기술을 바탕으로 길이 270 m인 Bi-2223/Ag 고온초전도 선재에서 공칭임계전류밀도 J_c 가 70 A/mm² 이상을 얻을 수 있었으며 가공 상태 또한 균일한 것을 확인하였다.

인발가공 도중 중간어닐링을 실시하여 초전도 선재내부의 미세징 및 브릿징 발생을 현격하게 감소시킴으로서 선재길이방향 균일성을 향상시키고 단선을 방지 하였으며, 이

러한 결과는 인발장력을 측정하여 알 수 있었다.

선재 가공성을 향상시킬 수 있는 인발장력 측정 장치를 시제품으로 개발하였으며, 압연 장력 조절 장치 및 두께와 폭 모니터링 장치를 시제품으로 개발하여 압연한 테이프의 가공 균일도를 향상시킬 수 있었다.

연속 임계전류 측정 장치를 시제품으로 개발함으로써 Bi-2223/Ag 장선재의 측정을 가능하게 하였으며 이러한 측정 자료를 토대로 선재의 품질향상을 가능하게 하였다.

5. 향후 연구 방향

고온초전도 선의 세계적인 개발 방향이 1세대 선인 Bi-2223/Ag 선에서 급격하게 2세대 선인 CC 선으로 연구가 진행되고 있다. 이것은 차세대 초전도응용 기술개발 사업을 시작할 당시와는 현격한 연구 환경의 차이를 가져와 Bi-2223/Ag 고온초전도 선 개발 과제의 목표를 달성했을 뿐만 아니라 기업에서의 상용화를 위한 어느 정도 가시적인 성과를 가져왔음에도 불구하고 프론티어 사업에서는 CC 선재 연구 분야에 집중하지 않을 수밖에 없게 되었다. 따라서 프론티어 사업에서는 PIT 공정에 의한 Bi-2223/Ag 고온초전도 선 개발 연구는 중단하게 되었다.

현재 약 250 m 길이에서 J_c 값이 74 A/mm² 이상인 Bi-2223/Ag 고온초전도선을 재현성 있게 제조할 수 있는 능력을 가진 본 연구팀은 프론티어 사업 종료 후 넥상스코리아의 자체 연구비의 지원으로 전기연구원과 함께 Bi-2223/Ag 고온초전도선의 특성 향상 연구를 통해 임계전류 값이 80 A 이상인 도체를 개발할 목적으로 연구를 추진 중에 있다.

세계 일류급 Bi-2223/Ag 고온초전도선을 제조하여 CC 도체의 상용화가 되기 전까지의 틈새시장을 노려 초전도 시스템에 사용할 수 있도록 노력을 계속할 예정이다.

저자이력

하동우(河東雨)

1962년 07월 12일생.

1985년 경북대학교 금속공학과 졸업, 1987년 경북대학교 대학원, 금속공학 졸업(석사), 2001년 연세대학교 대학원 금속공학 졸업(박사), 1987년 한국전기 연구원 입사, 현재 한국전기연구원 책임연구원



김응수(金應壽)

1961년 7월 16일생

1987년 인하대학교 전기공학과 졸업, 1987~1998년 효성 ABB근무, 1998~2002 한국 ABB 근무, 2002~현재 넥상스코리아(주) 기술연구소 소장

