초전도 선재와 전력기기 응용

DOI: 10.3938/PhiT.20.037

홍 계 원

HTSC Wire Fabrication and Its Large-scale Application

Gye-Won HONG

We are now entering a world facing an energy crisis, and we believe that large-scale electric power devices using applied superconductivity may provide a way to decrease the energy demand necessary to maintain the convenient life style to which we have become accustomed. A 2G HTSC REBCO based coated conductor is now available in the market, and prototype devices using 2G-coated conductors, such as power transmission cables, large-capacity motors, superconducting fault current limiters, and transformers, have been developed, and some are being tested in real electricity grids. The key issues in REBCO conductor fabrication and the status of large-scale application technology in Korea are briefly introduced in this article.

들어가는 글

문명의 발달에 따라 우리 인류가 사용하는 에너지의 양은 계속적으로 증가해 왔으며 대부분의 에너지를 화석연료를 통하여 공급하고 있다. 또한 기술이 발전함에 따라 전기의 형태로 사용하는 에너지의 비율이 더욱 빠르게 증가하고 있다. 전기플러그만 연결하면 사용할 수 있는 전기에너지의 편리성 때문에 기술이 발달할수록, 산업이나 경제가 발달한 지역일수록 전체 에너지 사용량 중에서 전기에너지의 비율이 높다. 또

저자약력

홍계원 교수는 한국과학기술원(KAIST) 재료공학박사(1983)로서 한국원자력연구소(KAERI) 연구원을 거쳐 2001년부터 한국산업기술대학교 지식기반기술 에너지대학원에서 교수로 재직 중이며, 2011년부터 한국초전도학회장을 맡고 있다. (gwhong@kpu.ac.kr)

한 국가에서 가장 중요한 정보통신 네트워크도 안정적인 전력공급이 보장되지 않으면 가능하지 않다. 이에 따라 인류는 계속적으로 증가하는 전력수요를 충족시키기 위해서 원자력이나 여러 대체에너지 기술을 개발하여 사용하고 있으나 앞으로 상당기간 대부분의 전력은 화석연료를 통하여 공급될 수밖에 없는 실정이다. 따라서 에너지위기는 수요에 따라 공급량을 증가시키는 것 외에도 전력계통의 효율을 향상시켜 현대 기술사회 체계를 유지하면서도 필요한 에너지의 총량을 줄일 수 있도록 전력계통에 사용되는 기기의 효율을 높이는 것이 궁극적인 해결책이며 여기에서 초전도 대전력기술이 중요한 의미를 가진다.

전력계통에 사용되는 기기로 전력케이블, 변압기, 사고전류제한기, 전력저장장치와 발전기/전동기 등이 있으며 전력계통 외에도 자기부상열차, NMR/MRI와 같은 분석/의료기기, 가속기, 핵융합 등에 사용되는 고자장 자석 등이 큰 전류를 사용하는 초전도 응용기기들이다. 이러한 대전류 응용기기는 모두 선재형태의 초전도체가 사용되며 따라서 초전도체를 선재로 가공하는 공정기술 발전이 초전도 응용기술 발전의 열쇠를 쥐고 있다고 할 수 있다. 본 원고에서는 REBCO계 초전도 선재의 개발 현황과 이를 사용하는 대전류 초전도 응용기기의 국내 연구개발 현황에 대하여 외국의 사례와 비교하여 소개한다.

선재의 필요조건

대전류 초전도 응용기기는 전력수송용 초전도 케이블을 제외하면 대부분 자기장을 발생시키는 초전도 자석의 형태로 이용된다. 즉 초전도 선재로 코일을 감고 이 코일에서 발생되는 자기장을 이용하여 응용하는 기기이다. 코일이나 케이블을 제작하기 위해서는 도체에 다음과 같은 여러 가지 공학적 특성이 요구된다.

(1) 임계온도가 높을 것: 초전도 전력기기의 전체적인 에너지 효율을 높이기 위해서는 냉각비용을 줄여야 하며 이에 따라 임

계온도가 높아 사용온도를 높이는 것이 효과적이다.

(2) 임계전류밀도가 높을 것: 작은 단면적에 많은 전류를 흘릴 수 있어야 적은 선재로 같은 용량의 전류를 보내거나 같은 세기의 자기장을 발생시킬 수 있으므로 선재 비용이 절감되며, 응용기기의 크기와 무게를 감소시켜 냉각 부하를 줄여서 전체적으로 기기 제작비와 운전비용을 줄일 수 있다.

(3) 기계적 특성이 우수할 것: 응용기기 제작시 가장 중요한 특성으로 강도가 높고 유연성이 있어야 단위세선의 케이블링과 코일 제작에 유리하지만, 산화물계 초전도체에서 가장 구현하기 어려운 특성이다.

(4) 자기장하에서 임계전류밀도의 감소가 적을 것: 자기장 코일에서 자체 발생 자기장에 의해 임계전류밀도의 감소가 적은 것이 절대적으로 유리하며 자석의 최대 발생자기장을 결정하는데 중요한 인자가 된다.

(5) 가공이 용이할 것: NbTi 외의 금속간 화합물이나 산화물계 초전도 재료를 기계적 강도가 높고 유연한 선재로 가공할 때 적은 공정비용과 재료비로 가공할 수 있는 것이 유리하다.

(6) 가격이 저렴할 것: 많은 분야에서 대량으로 응용하기 위해서는 전력기기 제작의 원자재가 되는 초전도 선재의 가격이 저렴해야 최종 응용기기의 가격경쟁력을 확보할 수 있다. 경쟁 기술에 비하여 특성이 우수하더라도 가격이 높은 경우 일부 특수분야 외에는 응용하기 어렵다.

(7) 대규모 응용을 위해서는 자원의 양이 풍부해야 한다. 현재 희토류를 기반으로 하는 REBCO 산화물의 경우 희토류의 공급이 안정화되어야 가격경쟁력을 유지할 수 있고 대규모 응용분야에서 응용이 가능하다.

초전도 선재의 가공기술

1987년 90 K 이상의 임계온도를 보이는 $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO)와 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$ (BSCCO-2223) 산화물이 발견되기 전에 사용되던 NbTi 합금과 Nb_3Sn 금속간화합물 초전도체는 이런 요구조건을 비교적 잘 만족시켰으며 대형 입자가속기나 핵융합용 Tokamak 그리고 MRI 개발에 활용되어 초전도 응용기술개발에 크게 기여하였다. 그러나 새롭게 개발된 산화물계 초전도체는 임계온도와 임계자기장 특성은 우수하지만 기계적으로 부서지기 쉬운 취성이 근본성질이라 대전력분야 응용을 위한 선재형태로의 가공기술 개발에 상대적으로 어려움을 겪었다. 하지만 산화물의 취성을 극복할 수 있는 PIT(Powder In Tube) 공정의 성공적인 적용으로 BSCCO-2223 선재의 양산 제조기술이 개발되어 상용선재가 몇 개 기업에서 생산 판매되고 있으나 액체질소 냉각으로는 외부자기장에 의한 임계전류밀도 감소가 큰 특성상의 단점과 피복재로 은을 사용해야 하는

공정상상의 제약으로 가격경쟁력이 부족하여 본격적인 상업화는 되지 못하고 일부 응용분야에만 제한적으로 사용되고 있다. 1996년 이후 YBCO 박막을 금속기판에 증착하기 위한 많은 시도를 통하여 YBCO 박막을 에피택시얼하게 성장시킬 수 있는 금속기판 가공기술이 개발되어 2010년 8월 Applied Superconductivity Conference를 기점으로 YBCO 박막형 coated conductor(CC)가 상용화에 필요한 선재의 특성을 확보하여 일부 전력기기 개발에 활용되고 있다. 선재의 가격 및 특성에서 Ag/BSCCO에 비해 우수한 것으로 평가되는 CC의 개발이 상용화 직전 단계에 이르러 다양한 전력기기에 응용하기 위한 노력이 심화되는 단계에서 현재까지 개발된 여러 가지 초전도 선재의 특성 및 제조공정의 특징을 알아보는 것이 필요하다. 본 원고에서는 1980년 이전에 개발된 금속계 초전도 선재와 1990년 이후에 개발된 고온 초전도 선재의 제조공정에 관하여 간단한 설명과 함께 기술적인 분석을 통하여 앞으로 본격적인 상업용 선재 개발을 위하여 해결되어야 할 기술적, 경제적 문제점을 소개하고자 한다.

금속계 저온초전도 선재

현재 상용화되어 있는 초전도 도체는 다심의 초전도 필라멘트가 안정화재 matrix에 묻혀있는 복합체로 구성되어 있으며, 필라멘트는 정상 통전시 초전도 전류가 흐르는 통로가 되며, 안정화재는 외적, 내적 교란에 의하여 초전도 필라멘트의 온도가 상승하여 임계전류밀도 이상의 전류가 흐를 때 초과전류를 통과시키고, 필라멘트에서 발생한 열을 주위의 액체헬륨으로 전달시켜 초전도체를 안정화시키는 역할을 한다.

이런 도체는 물리적, 기계적 특성이 다른 여러 재료의 복합체로서 금속용해, 기계가공, 용접, 소성가공, 열처리 등의 공정을 거친다. 소성가공은 선재의 굵기를 점차적으로 줄이면서 길이를 늘리는 공정이다. 통상적으로 초전도 도체는 초전도 선재만을 지칭하거나, 또는 초전도 필라멘트가 안정화재 또는 구조재와 결합한 형태를 의미한다. 일반적으로 동작전류가 작은 초전도 기기에는 단독의 초전도 소선이 사용되며, 이 경우의 초전도 도체를 초전도 선재라고 부르기도 한다. 여러 개의 초전도 소선을 결합한 초전도 도체는 대용량의 전류가 필요한 자석이나 교류용 초전도 기기에 주로 사용된다. 표 1은 대표적인 저온 초전도 도체의 특성과 응용분야를 열거한 것이다. 초전도 기기의 응용범위와 용도는 초전도체의 종류와 가공형태 및 특성에 의하여 결정된다.

이제까지 개발된 초전도체 중에서 NbTi는 임계온도(10.4 K)와 임계자기장(11.5T@4.2K)이 높으며 가공이 쉬워서 가장 많이 사용되고 있다. NbTi는 합금이므로 금속과 비슷한 연성을 가지

Table 1. Properties of low T_c superconducting wires and their applications.

Materials	$T_c(K)$ @0T	H_{c2} @4.2K	$J_c (A/m^2)$	Applications
NbTi	10.4	11.5	$\sim 10^9$ (4.2K@8T)	MRI/NMR, SMES, generator, accelerator, maglev, FCL, TOKAMAK
Nb ₃ Sn	18	22	$\sim 10^9$ (4.2K@12T)	NMR, toroidal coil for nuclear fusion
Nb ₃ Al	18.9	32	$\sim 10^9$ (4.2K@12T)	High field magnet

Fig. 1. Schematic diagram showing multifilament billet process for NbTi superconducting wire.

므로 인발공정으로 필라멘트 형태로 가공할 수 있는 유일한 초전도체이며 변형에 강하다. 그림 1은 NbTi 다심선재의 제조공정을 나타낸 것이다. 그러나 NbTi 합금만으로는 소성가공이 어려워서 무산소동과 결합하여 복합체 구조로 가공하여 사용한다. 합금계 초전도체인 NbTi와 Nb₃Sn과 같은 A15 화합물 초전도체의 차이점은 A15 화합물은 합금이 아니기 때문에 일단 화합물을 형성하면 가공이 어렵다는 점이며 따라서 Nb와 Sn이 가공 중에는 서로 확산 반응없이 단일금속 또는 합금(Cu-Sn bronze)의 형태로 존재하다가 최종 가공 후 유리섬유 등으로 절연하여 권선한 다음 비산화성 분위기에서 열처리하여 Nb₃Sn 화합물을 형성시키는 wind and react 방법을 사용하여 자석을 제작한다.

8 T 이하의 자장 범위에서 운전하는 MRI 및 전력기기 등에는 NbTi 초전도 선재가 많이 사용되며, 고자장이 가능한 Nb₃Sn, Nb₃Al 등의 A15 화합물 도체는 핵융합로용 toroidal coil, 입자가속기, NMR 등의 자석 제조에 사용된다.

미국, 일본, 러시아, 유럽 등에서는 1960년대부터 급속히 초전도 도체의 개발이 시작되어 현재까지 다양한 제품이 생산되었다. 특히 최근에는 국제핵융합 공동연구로(ITER)용 대형 초전도 자석용으로 도체 특성을 향상시키기 위한 연구와 수요가 증가하고 있다.

BSCCO 초전도체

고온 초전도 산화물 초전도체가 개발된 이후 이를 선재형태로 만들기 위한 여러 가지 시도 중에서 최초로 성공한 방법은 BSCCO-2223 산화물을 금속 은 피복관에 채운 다음 인발, 압연 방법에 의해 테이프 형태로 가공하는 Powder in Tube(PIT)법이다.

PIT법에 의한 고온 초전도 복합선재는 다음과 같은 4단계의 과정을 거쳐서 제작된다. 선재 제작의 첫번째 단계는 선재에 사용되는 기초분말을 다양한 화학적 및 기계적인 과정을 거쳐서 합성하는 과정이다. 이 기초분말은 피복관 내에서 반응하여 최종적으로 초전도 코어를 형성하는 성분들을 포함하고 있으며 분말의 입도, 조성, 불순물의 혼입 등을 잘 조절하여야 한다.

선재제작의 두 번째 단계는 준비된 분말을 은 피복관에 채우는 과정이다. 은이나 은 합금을 사용하는 이유는 고온에서의 산소확산이 가능하여 초전도체의 반응 중에 요구되는 산소분압의 미세한 조절이 가능하기 때문이다. 세 번째 단계는 압출이나 인발에 의하여 선으로 가공하는 과정이다. 이 과정은 최종적인 다심선재가 얻어질 때까지 반복된다. 다심선재를 가공하기 위해서는 여러 가닥의 단심선재를 묶어서 관에 채운 후 압연에 의해 판관한 테이프 형태로 가공하며, 이 방법은 급속히 저온 초전도 선재 제조에도 사용되는 방법이다.

선재가공의 최종단계는 800 – 900 °C 범위에서의 반복적인 열처리 과정이다. 열처리 과정 중에 금속피복관 내의 초기분말은 반응하여 초전도 재료가 된다. 이러한 과정을 거쳐서 긴 길이의 고온 초전도 선재를 가공할 수 있게 되었다. 그림 2는 PIT 공정을 그림으로 나타낸 것이다.

BSCCO계의 장점은 선재의 초전도성(임계전류 밀도)을 지배하는 texturing과 입자배열이 최종 열·기계적 공정에 의해 쉽게 이루어질 수 있다는 것이다. 이렇게 제조된 BSCCO 선재들의 임계전류밀도는 절대온도 4.2 K와 고자장하에서 기존의 NbTi와 Nb₃Sn같은 저온 초전도체들보다 높다.

그러나 BSCCO 선재는 고자장이 걸린 상태에서 임계전류 밀도의 감소가 커서 고자장을 이용하는 전력기기 분야에 응용하기 위해서는 자장에서의 임계전류밀도 감소가 적은 40 K 이하에서 운전해야 하는 제한이 있다. 또 피복재로 사용하는 은의 기계적 강도가 약하며 이를 강화하기 위해서 합금화하는 것에도 한계가 있고, 은의 비저항이 낮아서 교류손실에 취약한 단점이 있다. 가격적인 관점에서도 피복재로 사용하는 은이 고가이며, 단면적의 40% 이상으로 원가절감에 한계가 있어서 대부분의 전력기기에서 요구하는 선재가격인 10 \$/kA·m를 맞추기 어려운 단점이 있다. 이에 따라 1990년대 중반부터 2000년대 초반까지 미국의 AMSC, IGC-SuperPower,

Fig. 2. Schematic diagram for BSCCO PIT process.

일본의 SEI, 유럽의 Vacuum Schuvlatz, NKT, 중국의 InnoST 등 여러 회사가 PIT 방법으로 Ag/BSCCO 초전도 선재를 생산하였으나 최근에는 일본의 SEI 외에는 사업을 축소하거나 중단하고 2세대 선재인 coated conductor 공정 개발에 집중하고 있다.

YBCO Coated Conductor 개발현황

YBCO 산화물은 근본적으로 입계약결합(grain boundary weak link)과 짧은 coherence length, 그리고 YBCO perovskite 결정격자의 이방성에 의해 발생하는 초전도 입계전류밀도의 결정방위에 따른 큰 이방성을 보인다. 이러한 결점을 극복하고 높은 입계전류 특성을 얻기 위해서는 결정입계가 없는 단결정을 만들거나, 차선택으로 초전도 박막의 결정립들을 초전도 전자의 이동이 원활한 a-b면의 결정방위가 정렬되도록 해야 한다. Coated conductor는 이런 기본적인 개념을 바탕으로 전자소자 응용을 위해 개발된 박막제조기술을 바탕으로 개발되었다.

YBCO 박막제조 연구는 1990년대 초반부터 시도되었으며, RF sputtering, PLD(pulsed laser deposition), 전자선 증발법, 화학기상 증착법 등의 여러 방법에 의하여 단결정 수준의 YBCO 박막이 개발되었다. 전자소자 응용을 위한 박막제조기술은 SrTiO_3 , MgO , Al_2O_3 등의 단결정을 기판으로 사용하므로 양질의 초전도 박막을 쉽게 얻을 수 있으나 이 기술을 직접 선재 제조공정에 적용하려면 여러 가지 어려움이 있다. 우선 선재로 사용하기 위해서는 유연성이 있어야 하므로 단단한 단결정 기판을 금속으로 대체해야 하고, 긴 길이의 선재를 만들기 위해서는 연속적인 reel to reel process, 즉 이동하는 기판에 균일한 특성의 박막이 증착되어야 한다. 우선 금속 모재 위에 직접 YBCO 박막을 입히는 것은 금속기판의 표면이 산화물 증착 중

Fig. 3. Schematic diagram showing uniaxial and bi-axial texture.

Fig. 4. Schematic diagram showing epitaxial deposition on texture substrate.

의 산소분압 조건에서 산화되지 않아야 하므로 귀금속을 기판으로 사용해야 한다. 고가의 귀금속을 기판으로 사용하는 것은 불가능하지는 않으나 BSCCO 선재의 경우와 마찬가지로 상용화에서 생산비 절감에 한계가 있는 단점이 있으며 사용가능한 귀금속인 은의 강도가 낮아 그리 현실적이지 못하다. 따라서 고강도의 금속기판 표면에 YBCO 결정이 epitaxial하게 성장할 수 있는 산화물 박막을 1차로 증착하는 방법이 제시되었다. 1988년 Lawrence Berkeley National Laboratories에서 이루어진 탐색적인 연구를 시작으로 1990년에는 Oak Ridge National Laboratories(ORNL)에서 Ni 합금 위에 Y-stabilized ZrO_2 (이하 YSZ)와 YBCO를 증착시켜 PLD 방법으로 결정립이 c-축으로 정렬된 초전도 박막층을 제조하였다. 그러나 이 당시 제조된 박막은 in-plane 배향성이 작아서 입계전류밀도(J_c)가 10 kA/cm^2 로 낮았다. Ni 합금 위에 J_c 가 높은 초전도 선재를 증착하려면 c-축뿐 아니라 a나 b축도 동시에 정렬되는 2축 정렬 집합조직(bi-axial texture)이 필요하다고 판단되었다. 그림 3은 일축정렬과 이축정렬의 특징을 도식적으로 나타낸 것이고 그림 4는 이런 2축 정렬조직을 가지는 박막층을 제조하는 epitaxial 박막증착의 원리를 나타낸 것이다.

이 분야에서의 최초의 의미 있는 연구결과는 1992년에 일본 Fujikura사의 Y. Yijima와 Los Alamos National Lab.(LANL)의 Ion beam assisted deposition(IBAD) 방법에 의한 것이다. Yijima 박사의 연구팀은 IBAD 방법으로 Ni 합금 위에 2축 정렬 형태로 YSZ를 증착하였고, 이 금속-YSZ 층 위에 동일한 배

Fig. 5. Metal template preparation process for YBCO epitaxial deposition used in coated conductor fabrication.

향성을 갖는 YBCO 초전도층을 증착한 결과, 77 K에서 J_c 가 600 kA/cm^2 로 비약적인 진전을 보였다. LANL의 연구팀은 IBAD 방법으로 YSZ 대신에 MgO를 증착시켜 짧은 시간에 2축 정렬성이 나타나도록 기술을 더욱 발전시켜 얇은 테이프 형태의 금속모재에 2축 정렬성이 향상된 MgO를 증착시키고, 다시 그 위에 YBCO와 결정학적 특성이 비슷한 CeO_2 층을 추가하는 등의 노력을 통하여 짧은 길이의 시료에서 1.3 MA/cm^2 의 높은 임계전류밀도를 발표하였다.

YBCO층을 증착하기 위한 금속 template를 제조하는 또 다른 방법으로 ORNL의 A. Goyal에 의해 개발된 Rolling Assisted Biaxially Textured Substrates(RABiTS) 방법이 있다. 이 방법은 면심입방결정 구조의 금속이 압연 후 열처리 과정에서 특정방위로 선호하는 재결정현상을 일으키는 점을 이용하여 2축 정렬조직을 가지는 금속기판을 제조하고 여기로부터 여러 산화물층을 에피택시얼하게 증착시켜 YBCO층까지 쌓는 방법으로 긴 길이의 초전도 선재를 제조한다. IBAD 방법은 결정성을 따지지 않고, 평탄한 표면을 가지는 금속기판에 2축 정렬되는 buffer층을 쌓은 다음 YBCO층을 입히는 방법이고, RABiTS 방법은 금속기판이 2축 정렬성을 가지도록 준비한 다음 그 위에 에피택시얼 증착으로 초전도층을 입히는 방법으로 IBAD 법은 금속기판의 선택이 자유로운 반면 RABiTS 법은 금속이 2축 정렬성을 가지고 있으므로 IBAD 공정을 생략할 수 있으므로 buffer층 제조공정의 선택폭이 넓다고 할 수 있다. 그림 5는 이 두 공정의 특징을 도식화하여 나타낸 것이다.

완충층이 증착된 금속기판 복합체(template) 제조 후의 공정은 REBCO 초전도층의 증착공정이 가장 중요한 공정이다. 초전도층의 증착은 MOD, CVD, MOCVD, PLD 등의 여러 가지 방법이 각 회사나 연구기관의 특성과 장점에 따라 시도되고 있다. 현재 가장 앞서는 결과를 보고하는 기관은 미국 Superpower사로서 IBAD-template에 MOCVD-초전도층 방법을 사용하고 있다. 미국의 주요 경쟁사인 AMSC는 RABiTS-template와 MOD-초전도층을, 일본의 Fujikura와 ISTECH은

Fig. 6. Schematic diagram of RCE-DR process developed by SUNAM.

Fig. 7. Architecture of SUNAM 2G wire.

IBAD-template와 PLD-초전도층 공정을 선택하여 양산기술 개발에 노력하고 있다. 최근 국내의 (주)서남에서도 IBAD-template와 RCE-DR 초전도층 공정을 채택하여 CC를 생산하고 있는데 서남에서 채택한 RCE-DR 방법은 초전도층의 증착공정 중에서 가장 생산성이 높은 방법으로 평가되고 있어서 앞으로 기술 최적화가 이루어지면 가장 저렴한 가격으로 선재 생산이 가능할 것으로 기대되고 있다. 그림 6은 (주)서남이 채택한 RCE-DR 공정을 간단하게 나타낸 것이다.

초전도층이 증착된 후에는 이를 외기로부터 보호하고, 전류를 통전시킬 수 있는 도전층 역할을 하는 금속 보호층이 필요한데 현재는 은과 구리를 차례로 입혀서 사용한다. 은의 증착에는 sputtering과 같은 PVD 방법이 주로 사용되고, 구리층은 전기도금법이 주로 사용된다. 완성된 초전도체는 용도에 따라 적절한 폭으로 세단하여 공급되며 응용분야에 따라 기계적 강도를 보강하기 위해 얇은 금속판재를 붙이기도 한다. 그림 7은 (주)서남의 CC 구성을 한 예로 나타낸 것이다.

아직까지 어떤 공정법이 최선인가에 대한 평가가 완료되지 않았으며 현재에도 새로운 많은 방법들이 시도되고 있다.

Table 2. Practical requirements for HTS wire.

Application	Operating Field(T)	Operating Temperature (K)	Additional requirements	Wire needed per device (kA-m)
Cables	0.01-0.1 (ac) 0.1-1 (dc)	70-77	Low ac losses	40,000-2,500,000
Wind generator	1-3	30-65	in-field Ic	2,000-10,000
Transformers	0.1	65-77	Low ac losses	2,000-3,000
Faults Current Limiter	0.1	65-77	recovery	500-10,000
SMES	20-30	4.2-10	in field Ic	36,000-500,000
Magnet/coils	5-30	4.2-40	Long lengths, superconducting joint	200-2,000

선재응용기술

표 2는 각 응용분야에 따라 요구하는 선재의 특성을 정리한 것이다. 직류로 작동하며 자기장의 세기와 정밀도가 요구되는 과학, 의료기기에서 요구하는 초전도 선재의 특성과 일반전력 기기에서 요구하는 선재의 특성이 다르며, 기기의 용도와 경제성에 따라 작동온도도 달라진다. 또 현재 개발된 2G CC는 제조공정과 형태의 특성상 선재를 이어 붙이는 것이 매우 어려우며, 이 접합을 초전도 상태로 유지하는 것은 더욱 어렵다. 따라서 단위기기의 크기와 특성에 따라 이어 붙이지 않아야 할 단위선재의 길이도 다르다. 표에서 나타난 바로는 교류 전력기기의 손실을 줄일 수 있는 저 교류손실 특성을 가지도록 선재를 가공하는 기술이 현재 가장 필요하다. 교류손실에 의한 발열이 초전도 전력기기의 동작에 필요한 냉각부하를 증가시키고 이에 따라 초전도 전력기기의 응용 가능성을 크게 제한한다.

대전력 분야에 초전도 기기를 도입함으로써 얻어지는 최대의 장점은 무저항에 의한 전력손실 감소를 우선적으로 생각하지만 실제 응용에서는 저항열 감소에 의한 높은 전류밀도에 의한 대전류 통전능력과 높은 자기장 발생능력이다. 이 두 가지 특성으로 인하여 동일한 성능의 전력기기를 구리 전도체를 사용하는 기기보다 훨씬 더 작고 가볍게 제작할 수 있는 점이다. 모든 나라에서 도시화에 따라 도시에 거주하는 인구가 증가하고, 이에 따라 좁은 도시 공간에서 큰 전력을 감당할 수 있는 전력기기의 필요성이 증가하는데 이를 해결할 수 있는 유력한 방법이 초전도 전력기기이다. 실제로 도시공간에 거대한 개방형 변전소를 건설하기 어려우며 건축물의 지하공간을 효과적으로 이용하기 위해서는 초전도 전력기기의 적용이 절대적으로 필요한 시점이다. 전 초전도 전력시스템은 변압기, 케이블, 한류기 등으로 구성되어 늘어나는 전력 부하에 효율적으로 대처할 수 있다. 우리나라에서도 초전도 케이블과 한류기의 실증시험이 고창전력시험센터에서 수행되었고, 현재

는 설계통에서의 시험 사업인 이천변전소 초전도 시범사업-GENI(Green Superconducting Electric Power Network at Icheon Substation)이 2009년 12월 3일에 착공되어 2011년 8월부터 초전도 전력시스템의 일부하 계통연계운전 시험이 수행될 예정이다.

현재 에너지 수요를 감당하는 대체 에너지 중에서 가장 가능성이 높은 것으로 주목되고 있는 풍력발전에서 초전도 발전기의 적용이 크게 기대되고 있다. 풍력발전기의 특성상 단위발전기의 대용량화가 유리하나 이에 따른 무게와 크기의 증가로 인해 구리 전도체 코일을 사용하는 1~3 MW급 이상의 기기는 구조적으로 무리가 따르게 되어 5~10 MW급 이상에서는 초전도 발전기가 크게 유리한 것으로 분석되고 있다.

이외에도 현재 개발이 진행되는 초전도 전력기기로 전력계통 안정화를 위한 초전도 에너지 저장장치(SMES), 자기분리장치, 고자장 NMR, 핵융합 등의 여러 분야에서 초전도 기기가 응용되고 있다.

나오는 글

초전도 기술을 우리 생활에 도움이 되는 방향으로 적용시키기 위해서는 높은 온도에서 대용량의 전류를 수송할 수 있는 초전도 선재가 개발되어야 한다. CC 제조기술은 그간 비약적인 발전을 거듭하며 1 km 길이에서 수백 A의 임계전류(Ic)의 선재를 안정적으로 만들 수 있는 수준에 근접해 있다. 따라서 앞으로의 기술 발전 방향은 생산성을 높이는 방향이 한 주류를 이룰 것으로 보인다. 길이 1 km, 수송전류 수백 A의 기술적 목표가 달성되면 모든 초전도 전력기기에 응용 가능한 선재 특성을 달성하기 위한 연구개발 또한 활발해질 것이다. CC 특성을 향상시키는 연구 방향은 우선 자장에서의 Ic 감소를 줄이는 방향으로 전개될 것이며 4 mm 폭의 CC 선재에서 100~300 A의 Ic 달성이 가장 중요한 목표가 될 전망이다. 이를 달성하기 위해서 현재 개발된 미세한 제 2상 입자에 의한 자속고정효과뿐 아니라 희토류 금속 첨가에 따른 원자 수준의 조성 변화 영향 또한 연구의 대상이 될 것이다. 교류손실을 감소시키기 위해서는 CC의 폭을 세분하는 필라멘트화가 가장 유력하지만 한계가 있으므로 현재의 CC 구조를 혁신적으로 변경시킬 수 있는 기술개발을 기대해본다. 우리나라는 한전에서 전력절감을 위해 초전도 기술을 8대 녹색기술 중의 하나로 선정하여 기술개발에 노력하고 있으며 우리나라의 초전도 전력기기 기술이 세계 최고 수준에 접근하는 성과를 보이고 있다. (주)서남에서 개발된 RCE-DR 기술은 이런 전력기기 기술발전을 가속화시킬 수 있는 바탕이 되고 있으며 앞으로 초전도 기술 및 학술 분야에서 더욱 우수한 연구결과를 달성할 수 있을 것을 기대해본다.