

| 제 2세대 초전도 선재의 개발 현황과 응용 전망

1. Coated Conductor란 무엇인가?

조 율령 교수
(이화여대 물리학과/나노과학부)

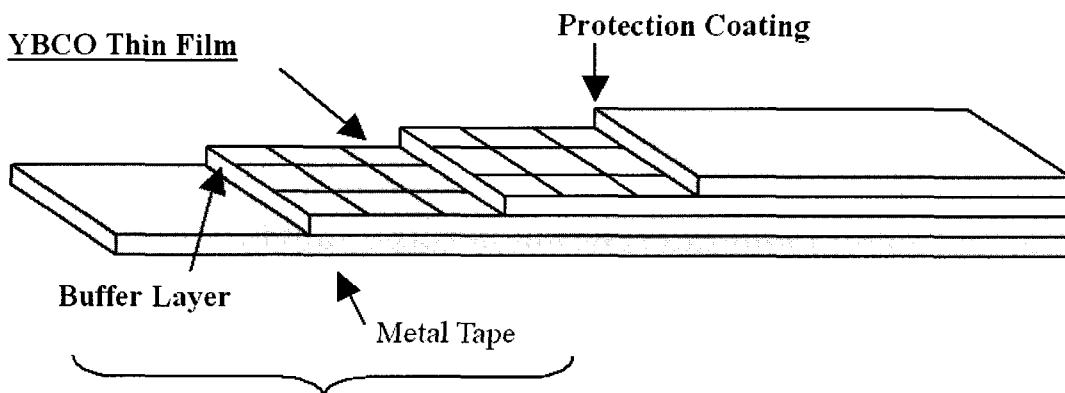
그 동안 방송과 신문을 통해 초전도(Superconductivity)와 관련된 소식이 많이 알려져서 이제는 초전도란 말이 일반인들에게도 그다지 생소한 말은 아닐 것이다. 초전도란 어떤 현상을 이야기 할까? ‘초강력’이라는 말에서 ‘초’자가 갖는 의미와 마찬가지로 초전도란 말은 어떤 도선에서 전류가 아주 많이 흐른다는 의미를 포함하고 있다. 실제로 어떤 온도 이하에서 전기 저항(Electrical Resistivity)이 0이 되는 물질을 가리키는 말이다. 이 세상의 재료 중에서 초전도체(Superconductor)보다 많은 전류를 흘릴 수 있는 재료는 없다. 그러면 초전도는 어디에 쓰일까? 전기가 많이 흐르는 재료이므로 도체와 같이 전기에 관련된 분야에 활용하면 된다. 초전도를 응용해서 만들 수 있는 장비 중에 일반인에게 가장 널리 알려진 것이 자기부상열차이다. 공중에서 떠서 가는 초고속 자기부상열차가 바로 초전도체의 완전반자성효과(Perfect Diamagnetism Effect)를 이용해서 만든 장치이다. 기차가 레일 위에서 떠서 이동하기 때문에 진동도 없고, 마찰도 없어서 안락하게 초고속으로 운행을 할 수 있다.

이 자기부상 열차에 초전도 현상을 활용하려면 초전도체를 가느다란 도선으로 만들어야 한다. 초전도체를 선으로 만들려면 어떻게 해야 할까? 구리를 전선으로 만들 때처럼 선을 만드는 기계에 초전도체를 넣어서 뽑아내면 된다. 그러나 아쉽게도 현재까지 발견된 초전도체들은 구리처럼 가공하기 쉬운 재료가 아니다. 현재 우리가 이용하고자 하는 산화물 계열의 초전도체는 벽돌처럼 잘 깨지는 재료라서 일반적인 전선 만드는 방법으로 선을 만들 수 없다. 사람들은 벽돌과 같이 딱딱한 재료를 어떻게 선으로 만들까 고민을 많이 했다. 어떤 연구자들은 초전도 가루를 풀과 같은 접착제와 섞어서 선으로 만들어 보았고, 또 어떤 연구자들은 금속관에 초전도 가루를 넣어서 전선을 만드는 방법으로 뽑아 보기도 했다. 많은 방법들이 시도되었으나 좋은 효과를 얻지는 못했다. 현재까지 알려진 방법 중에서 가장 대량 생산될 수 있는 방법은 일명 Powder In Tube (PIT) 선재라 불리는 제 1세대 초전도 선재 가공방법으로서 귀금속인 은

관에 초전도분말을 넣고, 가공해서 초전도선을 만드는 방법이다. 이 방법을 이용해서 초전도선을 아주 길게 뽑을 수 있었고, 특성도 좋아서 여러 분야에 곧 사용될 것으로 예상되었다. 그러나 이 초전도선을 사용하려고 하니 결정적인 문제가 있었다. 귀금속인 값 비싼 은으로 감싸서 초전도선을 만들다 보니 선의 가격이 너무 비싸다는 것이었다. 아무리 성능이 좋은 초전도선이라고 해도 값이 비싸면 경제성이 없다. 그래서 사람들은 다시 귀금속인 은을 쓰지 않고 선을 만드는 법을 연구했다. 많은 연구자들이 노력과 노력을 거듭한 후에 일명 Coated Conductor (CC)라 불리는 제2세대 초전도 선재를 개발하게 되었다.

Coated Conductor란 이름이 조금 생소할지 모른다. 이 이름은 금속 위에 초전도 물질을 코팅한다고 해서 붙여진 이름이다. 코팅은 아주 잘 알려진 기술로 반도체를 만들 때 많이 사용된다. Coated란 말 뒤에 붙어 있는 Conductor란 뜻은 전기가 잘 흘러가는 도체란 뜻이다(그림1). 이 말은 '초전도체' 이라는 단어에서 '전도체'에 해당하는 말이다. 요약하자면 Coated Conductor란 코팅기술로 만들어진 초전도체를 말하는 것이다. Coated Conductor 초전도 연

구는 10여년 전에 미국의 국립연구소와 일본의 한 회사에서 시작되었다. 우리나라에서는 3년 전에 21세기프론티어 차세대초전도응용기술개발사업(DAPAS)이라는 국가과제로 본격적인 연구가 시작되었다. 물질을 코팅하는 방법은 다양하다. 코팅할 물질을 붓에 칠해서 코팅할 수도 있고, 자동차 도색을 할 때처럼 페인트를 분사시켜서 코팅할 수도 있다. 코팅하는 방법에 따라 물리적 방법과 화학적 방법으로 나눌 수 있다. 물리적 방법은 코팅층의 성질이 아주 균일하다는 장점이 있고, 화학적 방법은 대량생산에 용이하다는 장점이 있다. 우리나라는 코팅하는 방법 중에서 레이저를 이용한 물리적 방법(예를 들어, E-beam Co-evaporation, Pulsed Laser Deposition)과 물질 간의 반응을 이용한 화학적 방법(Metal Organic Deposition)으로 Coated Conductor를 만들고 있다. 많은 연구자들이 어떻게 하면 좋은 성질을 갖는 Coated Conductor를 값싸게 만들 수 있을지 노력 중이며, 이러한 연구자들의 성과가 미래의 에너지 혁명을 앞당길 수 있을 것이다.



Artificially Textured Metal Tapes

RABiTS: $CeO_2/YSZ/CeO_2/Ni$ textured

IBAD: $(MgO \text{ or } YSZ)$ textured /Metal alloy

그림 1. Coated Conductor의 구조.

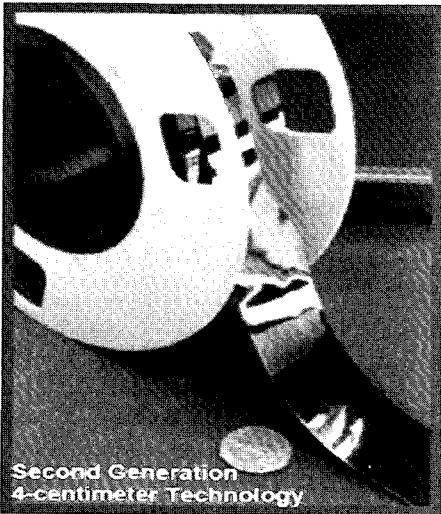


그림 2. 미국 AMSC社에서 개발된 Coated Conductor.

2. Coated Conductor의 국제개발동향

1980년대에 개발된 고온초전도재료를 이용한 선재 개발은 Bi-2223/Ag 복합선재가 높은 전기적 성질과 장선 가공 상의 이점으로 많이 연구되었으며 국내외에서 케이블을 이용한 실증시험이 많이 이루어지고 있다. 그러나 Bi계 선재는 강한 자기장 하에서 통전능력이 현저하게 저하되는 성질 때문에 높은 자기장 하에서 사용하기에는 많은 제약이 있다. 이에 비하여 YBCO를 이용한 박막형 복합선재는 높은 전기적 특성 이외에 높은 자기장에서도 통전능력의 저하가 적어 제한 없이 전력기기의 모든 분야에 응용할 수 있는 장점이 있는 것으로 알려져 있어서 미국·일본을 비롯한 많은 나라에서 연구개발에 박차를 가하고 있다.

박막형 선재를 개발하기 위해서는 이축배향성이 우수한 금속모재의 개발과 함께 넓은 면적에 연속적으로 초전도 박막을 증착시킬 수 있는 기술이 필요하며 이러한 기술은 고자장에서 핵자기 공명 단층촬영기, 에너지 저장 장치, 변압기, 전동기, 발전기, 한류기 등의 개발에 필수적인 역할을 할 뿐 아니라 일

반 산업체에도 다양하게 응용할 수 있을 것으로 예상되어 21세기 3만불 시대를 열 주역이라고 판단된다.

현재, DAPAS 사업에서 가장 역점을 두고 개발하고 있는 제2세대 초전도 선재의 국제개발 동향에 대하여 간략히 살펴보도록 하겠다. 2006년 말에 100 m급 250 A의 목표를 달성하고자 하는 DAPAS 사업으로는 외국의 주요 연구 그룹 중에서 가장 우수한 결과를 보이는 주요 기업들의 현재 연구개발 현황을 예의 주시하여 연구개발의 방향과 향후 국내 기업의 적극적인 참여를 유도할 수 있는 방안이 마련되기를 기대해 본다. 본 절에서는 가장 앞선 결과를 보이고 있는 미국의 American Superconductor社(AMSC)와 SuperPower社 그리고 일본의 Fujikura社 등 상업적 개발을 추진하는 기업을 중심으로 최근 연구결과와 함께 앞으로의 전망을 제시하도록 하겠다.

YBCO계 초전도 박막선재는 일본의 Fujikura와 미국의 Los Alamos National Laboratory에서 IBAD(Ion Beam Assisted Deposition)방법에 의하여 Hastelloy 모재를 사용하는 기술을 개발하였으며 미국의 Oak Ridge National Laboratory이 RABiTS(Rolling Assisted Biaxial Textured Substrates)방법으로 집합조직을 갖는 금속모재 제조공정을 개발한 후 연구가 활성화 되었다.

미국의 AMSC社는 이번 여름에 미국 워싱턴에서 개최된 DOE Peer Review에서 4 cm × 100 m급 선재의 제조기술 보유를 발표하였다. 아래 그림은 AMSC사가 제작한 4 cm급의 CC를 보여주고 있다. 기관은 RABiTS를 사용하였고 초전도층의 증착은 Metal Organic Deposition(MOD)을 이용하여 제작하였다. 장선재에서도 MOD공정으로 우수한 성능을 가질 수 있다는 사실을 입증하였으며 작은 시료에서는 500 A/cm를 구현할 수 있다고 주장하고 있다. 2007년까지 Pilot 라인으로서 4 cm × 1 km급 선재를 연간 300 km정도 제작할 수 있는 시설을 갖추도록 준비 중에 있다. Superpower社에서는 Ion Beam Assisted Deposition(IBAD) MgO 완충층 장비를 100 m급으로 Scale-up 하였다. 현재 초전도층에 대한 공정은 Pulsed Laser Deposition(PLD)을 완전

히 중단한 채 Metal organic chemical vapor deposition(MOCVD)에 만 집중하고 있다. PLD는 초고성능 군사용 등의 Wire로 사용될 가능성이 있어서 연구를 지속하고 있으므로 DAPAS의 PLD 프로그램도 이에 대한 대책을 마련하는 것이 필요하다고 판단된다. 현재 MOCVD 결과는 200 m급 선재에서 100 A 이상의 결과를 보임으로써 성능 측면에서 가장 우수한 결과를 보이고 있으나 고가의 MOCVD 전구체로 인해 가격 경쟁력은 아직 확신할 수 없는 상태이다. 현재 양산 장비는 구축하고 있지 않으나 생산능력은 4 mm × 180 m급 선재를 시간당 180 m씩 생산하여 연간 약 1000 km를 생산할 수 있을 것으로 예상하고 있다.

일본의 선두주자인 Fujikura社에서는 IBAD-GZO($Gd_2Zr_2O_7$)를 중심으로 초전도층은 PLD를 사용하고 있다. 성능 측면에서는 100 m급 130 A의 가장 우수한 결과를 보고하고 있으나 PLD의 가격경쟁력이 낮아서 일본에서도 다른 연구 활동이 많이 진행 중이다. 예를 들어, 일본의 초전도 프로그램 책임 기관인 ISTEC에서는 완충층과 초전도층을 모두 화학적인 방법으로 사용한 경우 CC의 단가를 3볼 이내로 줄일 수 있다는 보고를 EUCAS에서 발표한 바 있다. Fujikura에서는 PLD의 공정속도가 20 m/h인 경우에 가격경쟁력이 있을 것으로 판단하고 있다. IBAD 신규장비에 약 5백만불을 투자하여 2006년까지 500 m에서 1000 m을 생산할 계획이다. 아래 그림은 기존에 사용하고 있는 IBAD장비의 모식도이다. 이러한 장비를 개량 및 Scale-up하여서 2006년 중에는 1 km급 선재를 제조할 수 있을 것으로 예상된다.

3. Coated Conductor의 국내 개발 전략

Coated Conductor는 제 1세대 Bi계 선재에 비하여 성능대비가격(\$/kAm)이 훨씬 쌀 것으로 많은 전문가들이 예상하고 있다. 현재 제 1세대 HTS 선재는 판매량에 따라 달라지지만 AMSC社에서 만든 액체 질소온도, 자기자장 하에서 120 A 임계전류 선재의

경우 약 160~200\$/kAm에 팔리고 있다. 이러한 가격은 기존의 금속계 NbTi 초전도선에 비하여 훨씬 고가이기 때문에 고온초전도기기의 실용화를 늦추게 하는 큰 장애 요인이 되고 있다. 최근에 일본, 미국, 유럽, 한국을 중심으로 집중적으로 연구개발하고 있는 제 2세대 HTS 선재는 임계전류를 초전도체만의 단면적으로 나눈 임계전류밀도 J_c 값이 제 1세대 HTS 선재에 비하여 약 100배 정도로 높고, 제 1세대 HTS 선재의 안정화 재료인 은 대신 Ni합금이나 Cu를 기판이나 안정화 재료로 사용하기 때문에 성능대비 가격을 크게 낮출 수 있다.

초전도기기를 설계하는 입장에서 보면 임계전류밀도 값보다 임계전류를 선재의 전체 단면적으로 나눈 공학적 전류밀도(J_e , Engineering Current Density)가 더 중요한 설계 매개변수가 된다. 제 2세대는 J_c 값은 엄청나게 높으나 초전도전류가 흐르는 초전도층의 두께가 1~3 μ m로 아주 얇고, 기판층과 안정화 층이 각각 50 μ m로 두껍기 때문에 J_e 값이 크게 증가하지는 않는다. 2004년에 AMSC社에서 발표한 자료에 의하면 J_e 가 제 1세대 선재에서는 8,700~15,300 A/cm², 제 2세대 선재에서는 15,900 A/cm²으로 약간 높게 나타나고 있어서 길이 문제만 해결되면 앞으로 제 2세대 HTS 선재를 사용하는 데에는 큰 문제가 없을 것으로 보인다. 그러나 초전도기기를 개발하는 관점에서 보면 가격 구성에서 냉각시스템과 함께 큰 비중을 차지하는 초전도선재의 가격이 상용화의 가장 큰 고려 요소가 되고 있다.

제 2세대 선재는 다단계의 복잡한 공정으로 여러 개의 산화물층을 쌓아 올리는 방법으로 제조한다. 개략적으로 보면 금속기판이 있고, 그 위에 3~4층의 산화물막이 완충층으로 입혀진다. 미국 Oak Ridge연구소에서 개발한 Rolling Assisted Biaxially Textured (RABiTS®) 템플릿의 경우는 Ni-W 2축 배향기판 위에 Y_2O_3 /YSZ/ CeO_2 층을 단계적으로 증착하게 되는데 Ni기판의 Cube Texture(002) 조직을 초전도층까지 잘 이어질 수 있도록 중간에 완충층을 epitaxial하게 증착해야 한다. 일본의 Fujikura社와 미국 Stanford대학에서 개발된 Ion Beam Assisted Deposition에 의한 템플릿의 경우도 매우 우수한 초

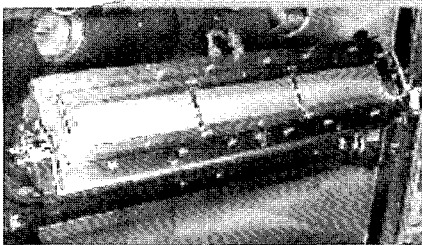
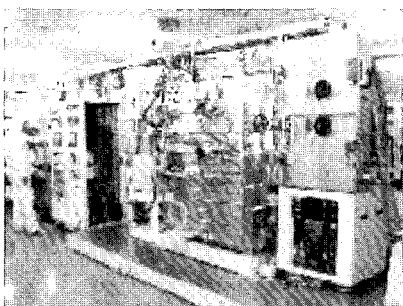
전도층을 얻을 수 있는 것으로 보고되고 있다(그림 3).

Ni기판과 초전도층인 YBCO 물질의 격자상수 차이가 9.38%로 크기 때문에 이러한 Lattice Misfit를 줄이기 위하여 주로 Y_2O_3 , YSZ, CeO_2 가 선택되며 CeO_2 층은 YBCO층과 Lattice Misfit가 0.52%로 가장 작기 때문에 최상층에 입혀진다. 완충층 구조에서도 하나의 중요한 요소는 Ni합금 기판으로부터 금속 원자의 확산을 방지하는 성질이 큰 산화물질을 선택하는 것으로 YSZ물질이 대표적으로 3층 구조에서 중간에 위치한다. 제 2세대 HTS 선재의 제조비용의 관점에서 보면 3층을 단일 층으로 하면 공정단계가 줄어들어서 제조 원가를 낮출 수 있다. 그리고

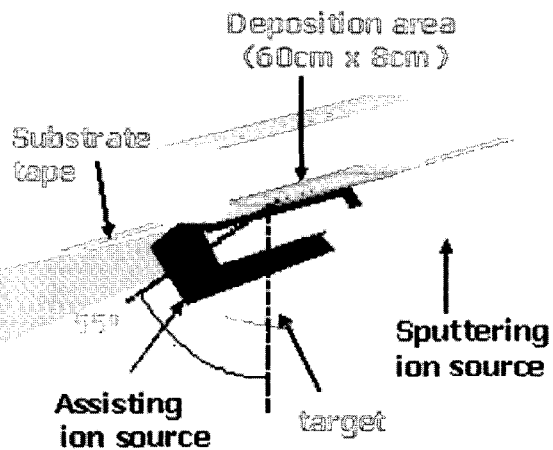
완충층 제조시, 산화물 타겟을 쓰는 rf Sputtering 증착 공정보다 Reactive Sputtering법으로 가격이 싼 금속 타겟을 사용하면 증착율도 높아지고 제조비용도 줄어드는 효과가 있다. 실제 AMSC社와 KERI는 Dc Reactive Sputtering법으로 완충층을 증착하는 기술을 사용하고 있다. 초전도층을 입히는 공정은 PLD, MOCVD, MOD, Co-evaporation 등 다양한 방법들이 시도되고 있는데 reel-to-reel과 Batch Type 방법이 있다. Reel-to-reel 방법을 채택하는 공정 중에서는 MOD(40 m/h) > MOCVD(30 m/h) > PLD(4 m/h) 순으로 제조 속도가 빠르다. MOD가 빠른 이유는 10 cm 정도의 금속기판에서 시작하여 광폭으로 모든 제조공정을 거친 후에 슬리팅을 하여 폭을

Reel-to-reel IBAD system

non-interval operation ~500h even with oxygen gas flow



6 x 66cm RF discharged linear ion source
<developed in 1999 >



length: ~ 100m
tape speed: ~ 1m/h

그림 3. 일본 Fujikura社의 IBAD증착시스템.

4~4.4 mm로 절단하기 때문에 슬리팅에서 나누어지는 최종 선재의 개수만큼 제조 속도가 향상된다. KERI에서 앞으로 시도하려고 하는 장선화 방법은 Bath Type EDDC 공정으로 Sm, Ba, Cu 원자를 Co-evaporation 방법으로 회전하는 드럼 상에 감긴 기관위에 증착하기 때문에 제조 속도가 Reel-to-reel 방법보다 훨씬 빠르다고 할 수 있다. 500 m 선재 기준으로 약 70 m/h의 빠른 제조 속도는 제조비용 면에서 경쟁력이 있다고 할 수 있다. 또한, EDDC 공정은 값싼 금속 타겟을 가열하여 증착된 Sm-Ba-Cu 물질과 반응챔버 내에서 산소와 고온에서 반응시켜서 Sm-123 초전도상을 생성시키는 방법으로 만들기 때문에 재료비가 적게 든다. 저자의 원가 계산에 의하면 압연만 된 Ni합금 기관을 이용하여 기관의 Texturing 열처리, YYC 완충층과 SmBCO 초전도층 증착을 모두 EDDC 챔버에서 처리하는 혁신적인 방법으로, 연 생산량 6,000 km, Ic 600 A/cm-w 조건에서 약 9 \$/kAm의 가격이 도출되었다. 이 가격은 제조원가의 20% 영업이익을 포함한 것이다.

우리는 외국보다 뒤늦게 제 2세대 HTS 선재연구를 시작하였다. 미국, 일본은 이미 200 m급의 제 2세대 HTS 선재를 개발하여 최근에 앞 다투어 발표를 하고 있으나, 우리는 아직 10 m 이상의 결과도 확보되지 않은 상태이다. 그러나 초전도기기 개발자를 만족시킬 수 있는 제 2세대 HTS 선재의 가격 목표는 어느 누구도 달성하지 못하였다. 성능과 가격을 만족시키면서 외국과 차별화된 혁신적인 Coated Conductor 제조 공정을 DAPAS 사업에서 집중하여 개발한다면 몇 년 후에는 얼마든지 미국, 일본보다 앞서 나갈 수 있다고 생각한다.

4. 초전도 전력기기의 경제성과 CC 개발

초전도 전력기술은 초전도체라는 새로운 도체를 써서 현재 사용되고 있는 구리 등의 상전도 도체의 한계를 극복하는 새로운 기술을 뜻한다. 시스템의 혁신에는 도체로부터의 변혁, 디자인의 전환, 운용 방법의 획기적 개선 등이 있다. 초전도 기술은 여기

서 새로운 도체가 출현함으로써 가능해진 기술이며, 이를 전력산업에 응용한 것이 초전도 전력기술이 된다. 이러한 초전도 기술이 민간에서 활용되기 위해서는 경제성 문제가 해결되어야 하며 동시에 도체의 성능도 혁신적으로 개선되어야 한다. 초전도체 개발에서 다시 한 번 성능 혁신을 기대한다.

현재 세계적인 초전도 전력기술은 전력기기의 개발에 대한 핵심기술 개발 단계를 넘어 시스템을 제작하고 현장 시험하는 단계에 있다. 1996년부터 ABB의 유도형(자기차폐형) 고온초전도 한류기 개발전소 내 전원 보호용으로 현장 시험을 거쳤고, 1997년에는 ABB의 630 kVA급 고온초전도 변압기가 연구소 전원 공급용으로 현장시험을, 1999년에는 Super-GM의 70 MVA 발전기가 관서전력에서 운용 시험을 거쳤다. 더하여, GA는 1999년 15 kV급 고온초전도 한류기(서지 보호기)를 Southern California Edison社의 계통에 연결하여 계통시험을, 2001년부터는 NKT가 변전소 내 모선연계용으로 고온초전도 케이블을 설치 운용 중에 있다. 이 외에도 여러 곳에서 시작품들이 개발되고 있다. 위의 현장시험에 사용된 전력기기들은 실용화 규모는 아니지만, 시험을 거침으로써 동 전력기기의 효용을 증명하였으므로 실용화까지 남은 과제는 Scale-Up일 것으로 보인다.

초전도 전력기기가 연구용 혹은 우주 및 국방용으로 사용되는 경우, 그래서 경제성과 관계 없거나 특수목적으로 한시적으로 사용되는 한 초전도 기술의 매력은 확실하다. 그러나 초전도 전력기술이 일반 민수용 및 상업적 운용에 맞추어 있는 한, 이러한 새로운 기술의 활용을 가늠케 하는 두 가지 요소를 충족시켜야 한다. 그 하나가 동 전력기기의 경제성 문제이고, 다른 하나는 장기 운용에 따른 신뢰성 문제이다. 후자인 신뢰성은 짧게는 20년, 길게는 30년간 전력기기를 사용하는 동안 일정정비(Maintenance)로 무리 없이 믿고 사용할 수 있느냐와 관련된다. 신뢰성의 문제는 특히 초전도 전력기기의 필수 장비인 저온장치의 장기운용 여부에 기인한다. 아직 누구도 저온장치를 20년 연속운전 한 적이 없기에, 장기운전에 안전하다는 확신을 주기 위해서도 추가적 연구개발이 있어야 할 것이다. 한편, 기술개

발의 단계상, 신뢰성은 활용 시점에 부각되게 된다. 개발된 시점에서 현장 활용자들로 하여금 신기술의 이점과 문제점을 모두 이해하게 하고, 현장 투입의 결정을 내릴 수 있도록 하는데 신뢰성은 결정적 요소이다. 그러나 이에 앞서, Scale-up된 초전도 기기가 개발 자체를 위해서 특히 산업체 및 전력사의 경영자를 설득해야 하는 것이 동 기기의 경제성문제이다. 수요자로 하여금 초전도 전력기기 시장이 형성되며 사용시 이득이 됨을 납득시키는 일이다. 실제로, 기 개발된 저온초전도 전력케이블이 아직 실용화 되지 못했고, 고온초전도 변압기 개발을 진행하던 ABB/EdF/AMSC 컨소시엄이 개발을 중단한 이면에는 동 기기 활용 관련 수요자를 설득하지 못함에 그 이유가 있다.

전력기기의 변혁을 도체의 혁신과 새로운 디자인에서 찾는다면 초전도 전력기술의 혁신은 새로운 도체, 초전도체라는 재료가 가져 온 것이다. 현재 응용되는 전력기기는 주로 구리(銅)를 도체로 하여 제작되었다. 구리를 도체로 하는 전력기기, 즉 상전도 기기는 그 효율 향상이 거의 한계에 도달하고 있다. 현재의 전력기술 연구가 주로 운용기술에 치우쳐 있다는 것도 구리라는 도체의 한계를 극복하지 못하는 현실을 반영하고 있다. 이를 타개하는 방안이며, 위에 언급한 많은 장점을 갖고 있음에도 불구하고 고온초전도 전력기술의 활용은 가까이 있지 않다. 이는 초전도 기술의 근간을 이루는 도체, 즉 고온초전도체의 재료공정 개발에서 진전이 더디기 때문이다.

현재 확보가 가능한 고온초전도 선재는 Ag 피복 Bi-선재로서 조건에 따라 160 ~ 200 $\$/(\text{kA} \cdot \text{m})$ (77 K 운용)이다. 참고로 저온초전도 선재인 NbTi/Cu는 10 $\$/(\text{kA} \cdot \text{m})$ (4 K 운용) 이하이다. 그리고 낙관적인 견해로는 상기 선재의 가격을 현재의 1/10 수준인 30 $\$/(\text{kA} \cdot \text{m})$ 로 낮출 수 있을 것으로 기대하고 있기도 하다. 그러나 이 가격으로는 주변기술이 적절하게 협조하더라도 설치비가 너무 높아 경제성을 맞출 수 없다. 예를 들어, 소규모 전력케이블을 보더라도 정상전류 2 kA이면 안전을 고려한 2배의 마진과 교류로 인한 1.4배의 소요를 고려해 적어도 임계전류 5 kA의 선재가 필요하다. 그러므로 3상 케이블

코아 1 km를 제작하는데 필요한 선재 경비는 현재의 가격으로 4.5 M $\$$ (=약54억원) 이상이다. 저온절연 방식이면 자기장 차폐를 위하여 초전도체가 더 필요하다. 더하여, 초전도 케이블은 관로의 문제로 77 K 보다는 80 ~ 83 K에서 운용되므로 임계전류밀도 값이 한층 낮아져 상기 경비는 더욱 늘어난다(혹은 선재가격을 낮추기 위해 임계전류 값이 높아지도록 77 K이하를 유지하게 되면 추가 냉각경비가 따른다). 이러한 선재 가격으로는 초전도 기술의 장점을 충분히 살릴 수 없다. 그러면서도 아직 교류손실을 충분히 고려하고 있지 않다. 교류손실을 충분히 줄이면서도 값이 1/10로 낮아지도록 기술혁신이 반드시 이루어져야 함은 물론이다. 여기에 Coated Conductor에 희망을 두는 이유가 있다.

위에서 본 바와 같이 현재의 도체 가격으로는 상전도 전력기기를 대체하기 어렵다. 현재 수행되고 있는 고온초전도 케이블, 한류기 등의 개발도 도체 분야에서 교류손실을 저감시키면서도 가격을 낮출 수 있을 것이라는 기대를 전제로 하여 진행되고 있다. ABB가 고온 초전도 변압기 개발을 연기한 것도 초기 투자비 과다였고, 그 중심에 도체문제가 있었다. 초전도 기술의 미래가 국제적 공조로 이루어지듯이 도체의 개발도 국내 문제만은 아니다. 국제적으로 적절한 선재가 개발되면 국내에의 파급효과는 대단히 클 것이다. 어느 한 나라에서 좋은 도체가 개발된다면 국내에서도 개발될 수 있는 것이고, 그렇지 않더라도 선재를 수입해서 경제성 있는 기기를 제작할 수도 있는 것이다. 그러나 원천 기술의 선점은 해당 분야 기술의 선점을 의미한다. 특히 도체의 경우는 더욱 그렇다. 선진국의 경우 경쟁적으로 초전도 도체, 특히 Coated Conductor 개발에 힘을 쓰고 있다. 미국은 DOE(에너지성)의 지원과 함께 일찍부터 Coated Conductor를 시작하여 LANL, ORNL 등의 연구소와 AMSC社, SuperPower社 등 산업체가 함께 실용화 가능한 도체개발에 앞장 서고 있다. 일본의 경우 NEDO의 지원 하에 ISTEK과 Furukawa 등 산업체를 중심으로 IBAD는 물론 RABiTS, ISD 등 다양한 방식으로 Coated Conductor 개발에 힘쓰고 있고, 장선화 분야에서는 가장 앞서

고 있다. 독일 또한 버금가는 투자를 하고 있는 바, 2002년에 발표된 한류기용 Coated Conductor Tube는 선재뿐만 아니라 다양한 형태의 도체도 개발될 수 있음을 보여주었다. 미국 DOE는 도체 가격을 양산 시 5 $\$/(\text{kA} \cdot \text{m})$ 를 목표로 연구개발을 지원하고 있거니와, 이 정도면 (장선화될 경우) 제조공정상의 비용을 고려하고서도 저온초전도 선재보다 경제적이 될 수 있어 제작되는 기기의 경제성을 충분히 맞출 수 있을 것이다. 더하여 벌크 초전도체에서도 임계전류밀도 향상 및 교류손실 저감을 위한 부가적 노력이 투입되어야 한다. Bi2223/Ag 선재의 임계전류밀도를 높이는 것이든, 장선화된 Coated Conductor이든, 아니면 다른 새로운 도체이든 고온초전도 응용과 관련 세계는 고온초전도 도체 부문에서 또 한번의 Breakthrough를 기대하고 있다.

저|자|약|력



성 명 : 조 율 렴

◆ 학 력

- 1990년 서울대 물리학과 이학사
- 1995년 서울대 대학원 물리학과 이학박사

◆ 경 력

- 1995년 - 1999년 LG전자기술원 선임연구원
- 1999년 - 2003년 Stanford Univ. 연구원
- 2003년 - 현 재 이화여대 물리학과/나노과학부 교수

