

# 초전도 기술의 산업응용 및 연구현황

권영길·조영식

(한국전기연구원 초전도응용연구그룹)

초전도응용 기술은 극저온에서 전기저항이 제로가 되는 초전도체를 전기·자기적으로 이용하는 기술로 환경친화적이며 산업적 응용범위가 매우 넓은 특징을 가지고 있다. 초전도체가 1911년에 발견된 초기에는 선진국을 중심으로 많은 과학자들에 의해서 연구가 진행되다가 1980년대 말부터 구리 산화물계에서 높은 온도에서도 초전도체가 되는 물질이 발견되기 시작하면서 우리나라에서도 초전도응용 기술에 대한 연구가 시작되었고, 최근에는 산업분야에 상용화가 가능한 초전도 응용분야들이 활발히 연구되고 있다 [1]-[2]. 초전도 기술의 산업응용은 매우 다양한 분야에서 진행되고 있으며 특히, 전기분야에 폭 넓게 연구되고 있고, 최근에는 초전도 한류기, 초전도 케이블, 초전도 변압기, 초전도 자기 에너지 저장장치(SMES), 초전도 디지털 소자, 초전도 전동기 등의 상용화를 목전에 두고 있고 MRI 등의 몇가지 초전도 응용기기는 제품화에 성공한 것도 있다. 일반인들에게는 초전도응용 기술이 먼 장래에나 실현가능한 미래기술로 생각될지 모르나 현재 우리의 일상생활에서 가장 밀접하게 접하고 있는 반도체의 경우도 발견 이후 30년이 지난 후에야 겨우 트랜지스트가 개발된 것에 비교하면 초전도체는 아주 빠른 속도로 발전하고 있어 이를 이용한 응용기술의 개발이 폭넓게 이루어져 반도체와 같이 일반인들이 손쉽게 이용할 수 있는 기술이 될 것으로 기대된다.

본 논문에서는 먼저 초전도체의 일반적인 특징 및 종류를 설명한 뒤에 몇 가지 산업응용 기기에 대한 연구현황을 다루도록 하겠다.

## 1. 초전도체란 무엇인가?

### 1.1 초전도체의 일반적인 특징

초전도체의 첫 번째의 특징은 임계온도( $T_c$ ) 이하가 되면 갑자기 전기저항이 영이 된다는 것으로 1911년 Kammerlingh Onnes에 의해서 발견되었다. 이 현상은 일반

적인 도체나 완전도체와 완전히 다른 현상으로 그림 1에 나타나듯이 일반적인 도체의 저항은 온도가 하강함에 따라 부드럽게 감소하지만 초전도체의 저항은 급격히 영이 됨을 알 수 있다 [3]. 이러한 초전도체의 온도특성이 발견된 후에 임계자속밀도( $B_c$ )와 임계전류밀도( $J_c$ )특성이 발견되었다. 초전도체의 세가지 특성은 서로 밀접한 관계가 있으며 그림 2와 같이 도식화 할 수 있고 여기서 임계변수에 의해 만들어지는 임계표면으로 그 초전도체의 특성을 알 수 있다. 그림 2는 NbTi(Niobium-titanium) 초전도체의 임계표면을 나타낸 것으로 임계표면 아래에서는 초전도특성을 가진다. 여기서 N은 초전도체가 임계표면 위에 있어서 일반적인 상태를 표시하고 S는 초전도체가 임계표면 아래에 있어서 초전도 상태를 나타낸다. 만약 NbTi 초전도체를 4K의 온도로 유지시키고 있다면 검은색으로 표시된 면의 아래에서 초전도 상태가 되는데, 예를 들어 8T의 자속밀도가 가해지면  $1 \times 10^9 \text{A/m}^2$ , 1T의 자속밀도가 가해지면  $6 \times 10^9 \text{A/m}^2$  정도의 임계전류밀도 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

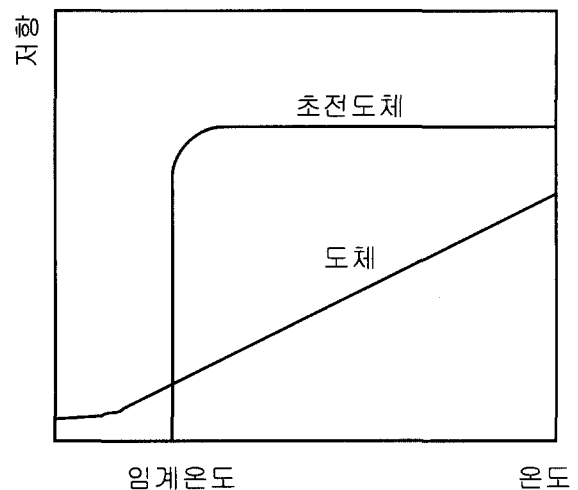


그림 1. 온도에 따른 저항 변화

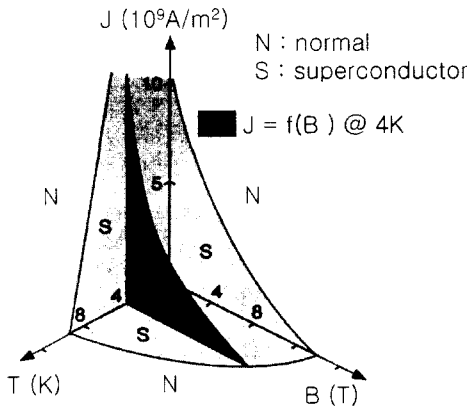


그림 2. NbTi 초전도체의 임계표면

임계자속밀도는 1933년에 발견된 마이스너 효과 (Meissner effect)에 관계된 것으로 초전도체 내부의 자속밀도 ( $B_i$ )는 다음과 같은 식(1)로 표현된다.

$$B_i = \mu_0(H_a + M) = 0 \quad (1)$$

여기서  $\mu_0$ 는 자유공간에서의 투자율,  $H_a$ 는 가해진 자장의 세기이고, 그리고  $M$ 은 초전도체의 자화도이다.

즉 초전도체는 초전도상태에서 외부자속의 침투를 배제한다는 것을 말하며 초전도체의 일반적인 특징 중의 하나로 초

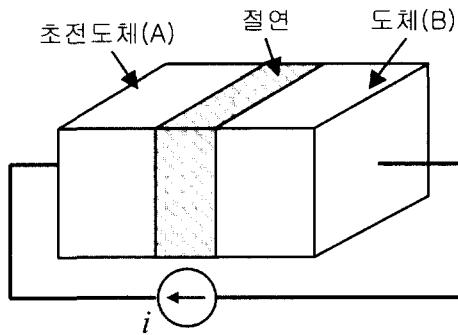


그림 3. 초전도체-절연-도체 접합도

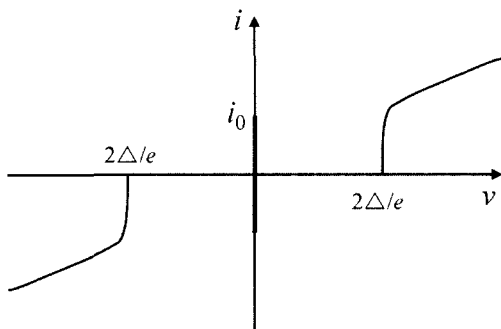


그림 4. 조셉슨 접합에서의 i-v 곡선

전도체의 표면전류에 의해 내부로부터 자기장을 밀어내는 완전한 반자성체 성질을 나타낸다. 따라서 초전도체의 임계자속밀도라는 것은 임계온도 이하의 어떤 온도에서 초전도체에 침투하는 자속을 배제할 수 있는 한계값이 되는 것이다.

마지막으로 1962년 Josephson에 의해 예측되고 다음해인 1963년에 Anderson과 Rowell에 의해 실험적으로 관측된 초전도체의 특징은, 바이어스가 걸리지 않은 상태임에도 불구하고 두 개의 초전도띠들 사이의 절연층을 통과하는 전류의 흐름이 가능(조셉슨 전류)한데 이것을 조셉슨 효과라고 한다. 그림 3은 초전도체-절연-도체 접합을 도식적으로 나타낸 것이다. 여기서 절연층은 매우 크게 나타나 있지만 실제로는 매우 얇은 층이며 A나 B 어떤 것이 초전도체라도 조셉슨효과는 발생한다. 그림 4는 조셉슨 접합에서의 전류-전압 특성곡선을 나타낸다. 여기서  $e$ 는 전하이고,  $\Delta$ 는 결합 에너지이다. 전압이 영임에도 불구하고 조셉슨 전류( $i_0$ )가 나타난다.

### 1.2 초전도체의 종류

일반적으로 초전도체는 혼합상태의 유무에 따라 두 종류로 나눈다 [4].

#### - 1종 초전도체

초전도체 내부로 자속침투를 철저하게 배제하는 것을 말하며 대부분 순수한 물질과 매우 낮은 농도로 다른 원소가 첨가된 합금이며 표 1에 나타내었다. 여기에 속한 초전도체는 거리가 매우 낮은 임계자속밀도를 가지기 때문에 초전도 응용기술에 사용하지 못한다. 그림 5의 (a)는 1종 초전도체의 자속침투 및 자화도에 대한 그림이다.

#### - 2종 초전도체

1종 초전도체에 비해 좀 더 복잡한 현상을 가지고 있는 것으로,  $H_{c1}$ 과  $H_{c2}$ 라는 두 개의 임계자장을 가지며 그림 5의 (b)에 도식화하였다.

- $0 < H < H_{c1}$ 의 경우, 초전도체 내부로 자속의 침투는 없으며 제반 물리적 현상은 1종 초전도체와 같다.
- $H_{c1} < H < H_{c2}$ 의 경우, 초전도체 내부로 국부적인 자속의 침투가 있으며 이것을 혼합상태(mixed state)라고 한다.
- $H_{c2} < H$ 의 경우, 초전도체의 초전도 현상은 나타나지 않는다.

표 1. 1종 초전도체

물질	$T_c$ (K)	$B_{c2} @ 4.2K(T)$
Al	1.2	0.01
Sn	3.7	0.03
Pb	7.2	0.08
Hg	4.1	0.04

표 2. 2종 초전도체

물질	$T_c$ (K)	$B_{c2} @ 4.2K(T)$
NbTi	9.5	11
Nb <sub>3</sub> Sn	18	23
Nb <sub>3</sub> Al	19	30
Nb <sub>3</sub> Ge	23	35

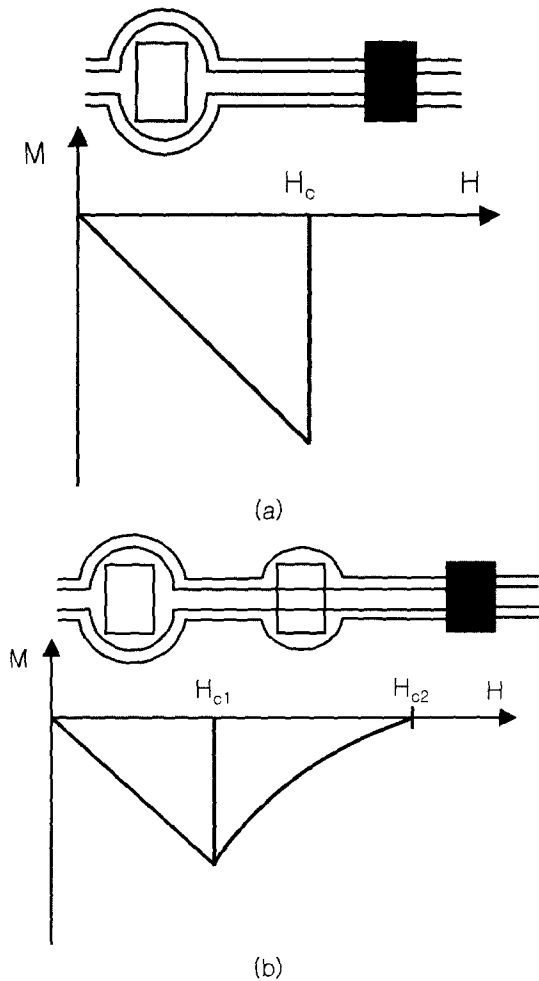


그림 5. 1종 (a)과 2종 (b) 초전도체의 자화도와 자속침투

혼합상태에서는 초전도체 내부에 자속이 침투하고 초전류의 소용돌이에 의해서 튜브형태의 정상상태가 만들어지므로 마이스너 효과는 부분적으로 발생한다. 2종 초전도체는 높은 자속밀도에서 매우 큰 전류밀도가 가능하기 때문에 초전도 응용기술에 사용되는 모든 초전도체는 여기에 속한다. 표 2에 2종 초전도체 중에서 액체헬륨을 사용하는 대표적인 초전도체를 나타내었다.

한편, 일반적으로 액체질소의 사용이 가능한 YBCO, BICCO, MgB<sub>2</sub> 등의 초전도체를 통칭해서 고온초전도체(High Temperature Superconductor), 액체헬륨을 사용해야 하는 금속계 초전도체를 저온초전도체(Low Temperature Superconductor)라고 부르고 있다 [5]. 고온초전도체는 1986년 Bednorz와 Muller에 의해서 발견된 구리계의 산화물 초전도체가 30K 부근에서 초전도 현상이 나타내고 있음을 발견한 뒤 지속적으로 임계온도가 높은 초전도체가 발견되면서 명명된 것이다. 최근에는 PIT(powder in tube) 공법으로 제조된 Bi-2223 초전도체와 YBCO가 초전도 응용에 널리 사용되고 있다. 그림 6은 Bi-2223 37심 초전도체의 단면을 나타내며, 그림 7은 영구자석을 이용하여 YBCO 벌크 초전도체를 띄운 사진을 보여준다.

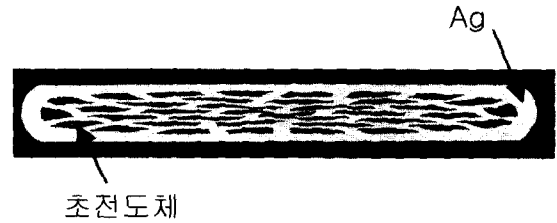


그림 6. Bi-2223 초전도체의 단면



그림 7. 초전도체가 부상한 사진

## 2. 초전도 기술의 산업응용 및 연구현황

산업기술의 발달과 더불어 기존 기술로는 기술적 한계에 부딪히거나, 새로운 수요에 대한 신기능을 갖는 산업기기의 개발·보급이 불가피해짐에 따라 초전도기술을 응용한 각종 산업기기의 개발연구가 전세계적으로 활발히 진행되고 있다. 특히 선진국은 지식정보화사회에서 기술패권을 장악하기 위해 초전도 응용기술에 집중투자하고 있으며 기업에서도 산업화를 위한 기술개발에 박차를 가하고 있다. 그림 8은 초전도 산업응용 분야 중에 몇 가지를 간단하게 도식화한 것으로, 다른 어떤 분야보다 기술 파급의 효과가 크고 기존에 없는 새로운 개념의 기기를 만들어 신 산업 창출에 크게 이바지 할 수 있다.

### 2.1 초전도 전동기

산업문명의 고도화와 에너지의 사용량 증가에 따라 CO<sub>2</sub> 가스의 발생이 날이 증가함으로 환경오염의 문제 및 지구온난화현상이 발생하고 있다. 미국의 경우 전체 전기에너지의 사용량 중 64% 정도를 전동기가 소모하고 있으며, 이 중에서 절반정도를 1000 마력 이상의 전동기들이 차지하고 있다. 기존의 대용량 전동기의 효율을 약 2% 정도 향상시킬 경우, 미국은 연간 약 20억 달러의 에너지절약효과를 기대할 수 있고, 전기에너지 생산의 66%를 LNG, 석유, 석탄 등 화석연료가 차지하고 있기 때문에 지구온난화의 주원인인 CO<sub>2</sub>의 배출량을 줄일 수 있어서 고효율이 가능한 전동기 개발에 주력하고 있다 [6].

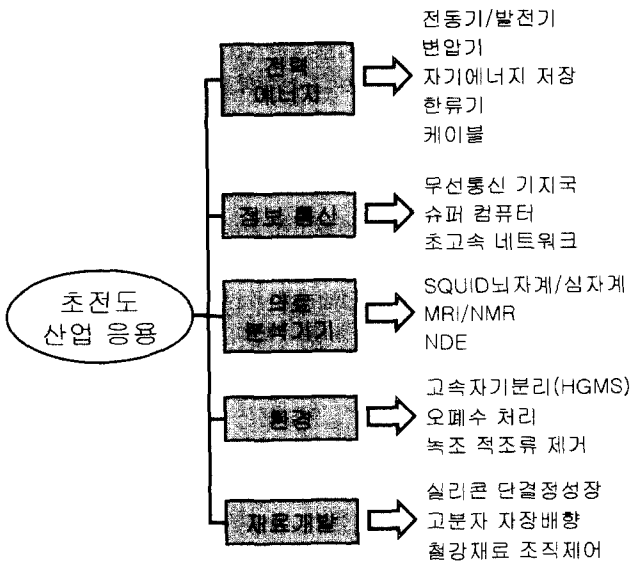


그림 8. 초전도 산업응용 분야

초전도 전동기의 기본적인 원리는 기존의 전동기와 같으나 계자코일이나 전기자 코일을 초전도체를 사용하여 발생 자장을 크게 높임으로서, 기기의 효율과 출력을 높이고, 소형화 및 경량화, 안정도 향상 등의 많은 장점을 가지고 있다. 동급의 경우에 무게와 부피를 1/2이하로 줄일 수 있고 같은 크기에서는 출력을 2배 이상 증가시킬 수 있다.

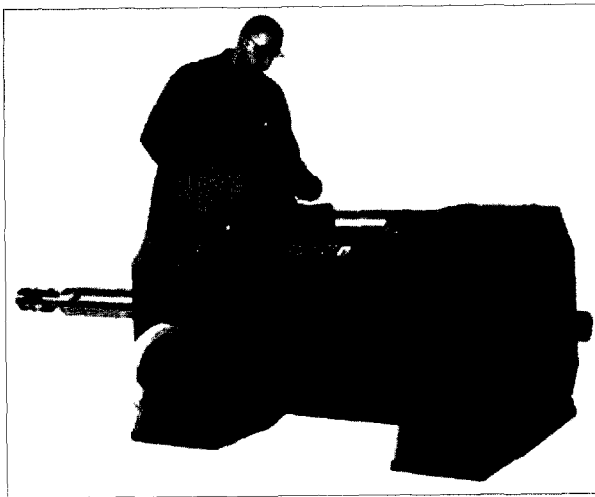


그림 9. 750kW 초전도 전동기

미국은 1980년 미해군에서 NbTi 초전도체를 사용하여 선박추진용으로 300kW 단극 전동기를 개발하여 NSWC JUPITER II에 장착하여 시운전을 하였으며 2000년에는 고온초전도체를 사용한 750kW 전동기를 개발하여 시험에 성공하였다. 최근에는 25MW 전동기를 개발 중에 있다. 그림 9는 미국 Alstom에서 개발한 750kW 전동기이고, 그림 10은 ASC (American Superconductor Corporation)에서 제작한 25MW 전동기의 모형을 보여준다 [7].

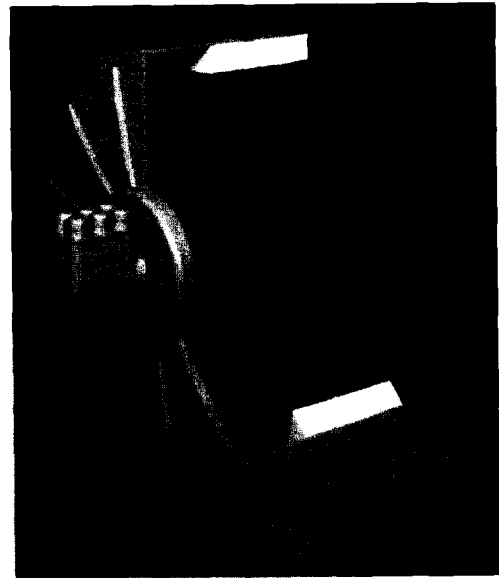


그림 10. 25MW 초전도 전동기

국내에서는 연세대학교에서 1998년 1kW급의 고온초전도 동기전동기를 개발하였고, 한국전기연구원에서는 30kW급의 초전도발전기를 개발하여 초전도 전동기 개발에 필요한 핵심기술들을 확보하고 있다 [8]-[9].

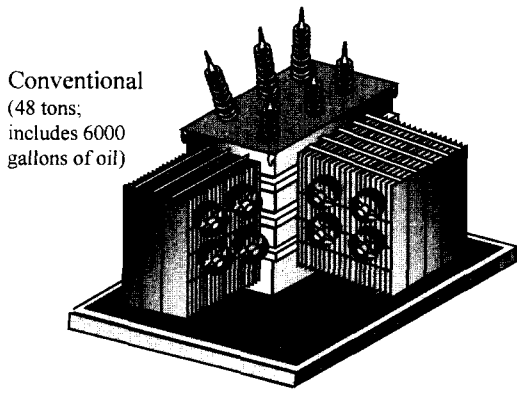
### 2.2 초전도 변압기

초전도 변압기는 기존 변압기의 권선을 초전도체로 대체하여 동손이 없으므로 효율이 향상되고, 전류용량이 큰 초전도체를 사용함으로써 소형화가 가능할 뿐만 아니라 기존 변압기에서 사용하는 절연유를 사용하지 않아 화재나 폭발의 위험이 없고 환경오염을 감소시킬 수 있다. 그림 11은 기존의 변압기와 동급의 초전도 변압기의 부피와 무게를 비교한 것으로 (b)는 고온초전도 변압기로 액체질소를 사용한 경우이다.

초기에는 저온 초전도체를 사용하여 철심형과 공심형으로 나누어서 개발하였다. 철심형으로는 프랑스 Alatom사가 220kVA, 4000V/600V, 단상 초전도변압기를 개발하였으나 실제 운전은 70kVA 통전을 했다. 일본에서는 나고야 대학과 도시바에서 50kVA급 저온 초전도변압기의 시제품을 제작하였고, 규슈대학에서는 72kVA, 1057V/218V 저온초전도 변압기를 제작하여 연구하였다. 공심형으로는 일본의 성계대학과 석식대학에서 2.5kVA, 300V/150V, 단상 저온초전도 변압기를 제작하여 특성 실험을 수행하였다. 하지만 저온초전도 변압기는 액체헬륨을 사용하기 때문에 냉각비용의 부담이 커서 상용화에 어려움이 있다.

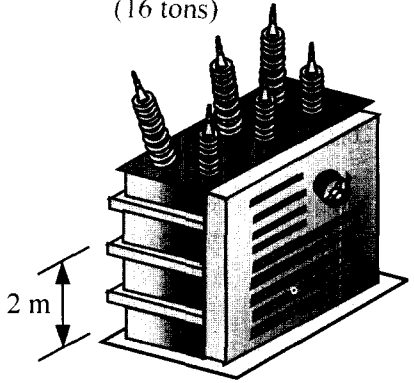
최근에는 교류손실이 적은 고온초전도체가 개발되면서 가격이 저렴한 액체질소를 사용할 수 있는 고온초전도 변압기 개발이 활발히 진행되고 있다.

1996년에 일본의 규슈대학, 후지전기, 스미토모가 공동으로 세계 최초의 500kVA, 6.6kV/3.3kV, 단상 고온초전도 변압기를 개발하였으며, 실계통에 연결되어 시험한 고온초전



(a)

Open-cycle LN<sub>2</sub>  
(16 tons)



(b)

그림 11. 기존의 변압기 (a)와 초전도 변압기 (b)

도 변압기로는 스위스와 미국이 공동으로 개발한 630kVA, 3상 변압기로서 1997년 3월 제네바 시의 계통에 연결해서 6개월간의 실부하 시험을 수행하였고, 2001년에 10MVA, 69kV/13kV, 3상 변압기를 목표로 개발 중이다. 미국에서는 SPI Project의 일환으로 Waukesha Electric Systems의 주도로 IGC(Intermagnetics General Corp), Rochester Gas & Electric Corp., Rensselaer Polytechnic Institute, ORNL(Oak Ridge National Laboratory) 등이 1MVA 단상 고온초전도 변압기를 개발하였고, 이어서 5/10MVA의 prototype 고온초전도 변압기 개발을 계획하고 있다 [10].

국내에서는 1992년에 서울대에서 5kVA, 220V/110V 단상 저온초전도 변압기 개발하여 최대 8kVA 용량의 부하에 전력을 공급할 수 있었다. 1993년에는 한국전기연구원에서 5kVA급 단상 저온초전도 변압기를 개발하였고, 1998년에는 대학, 연구소, 기업이 공동으로 100kVA, 220V/110V, 3상 저온초전도 변압기를 개발하였고, 2000년에는 10kVA, 440V/220V, 단상 고온초전도 변압기를 개발하였으며, 현재는 10kVA, 3상 고온초전도 변압기 개발에 주력하고 있다 [11].

전문가들은 2005년 이내에 경제성이 있는 것으로 평가되는 30MVA 고온초전도 변압기가 개발될 것으로 예상하고 있다.

### 2.3 초전도 케이블

우리나라의 전력수요는 지속적인 경제성장에 따라 지속적으로 증가하고 있으며, 특히 도심부에서는 빌딩의 집중, 도시기능의 고도화에 따라 전력수요가 대량으로 집중되는 현상이 발생되고 있지만 케이블 증설을 위한 부지확보가 힘들고 기존의 케이블 기술로는 송전용량의 증대가 힘들다. 따라서, 송전에너지의 손실이 현저하게 적고 단위면적 당 송전에너지밀도가 비약적으로 큰 케이블이 절실한 실정이다.

고온초전도 케이블은 저전압으로 대용량 송전이 가능하며 교류손실이 기존 케이블에 비해 매우 작다. 또한 충전전류가 적어서 장거리 송전이 가능하며 지중계통 전압등급의 균일화가 가능하여 송전비용이 절감되고 1회선 당 송전용량이 매우 크기 때문에 기존 케이블에 비해 소요 회선수가 대폭 감소하기 때문에 소형화가 가능하다. 그림 12는 1GW급 기존의 케이블과 초전도 케이블의 크기를 비교한 것이고 그림 13은 HTS 케이블의 구조를 나타낸다.

저온초전도 케이블은 미국의 Brookhaven 국립연구소에서 1982년 138kV/4100A의 통전시험과 1979년 오스트리아의 Gratz연구소에서 60kV/1000A급 초전도케이블을 실계통에서 통전시험을 실시하는 등 세계 각국에서 연구가 진행되었으며, 일본에서도 전자기술종합연구소(7000A 통전), 나고야대학, 도요하시 기술과학대학(20kV/2000A) 등에서 저온초전도체(Nb, Nb<sub>3</sub>Sn)을 이용한 초전도케이블을 시제작하여 평가까지 마친 상태로 상당한 기술수준에 있다. 하지만 저온초전도 케이블은 액체헬륨을 사용하는 냉각시스템에 의한 고가의 시스템비용 때문에 경제성확보가 어려우며, 액체헬륨에서의 전기절연과 제조기술 및 포설공법, 고장대책 등을 포함한 신뢰성확보 등 여러 과제가 남아있는 상태이다. 이에 반해, 고온초전도체 케이블은 실용화 가능성이 확실하여 냉각시스템의 효율향상(액체헬륨냉각에 비해 30배이상) 및 케이블시스템의 소형화 등으로 인한 경제성이 충분히 있기 때문에 일본, 미국, 유럽 등에서 활발하게 개발 중에 있다.

미국은 DOE에서 진행 중인 SPI 프로젝트라는 국가적인 사업으로 케이블업체에서의 제작하고 개발될 케이블을 사용할 전력회사가 참여하여서 유기적인 상호 협력체계를 구성하여 효율적인 연구개발을 진행하고 있으며 일본은 통산성의 New Sunshine 계획의 일환으로 초전도케이블 개발하여서 2010년부터 실계통에 설치를 시작하여 2050년까지 700~1000km의 케이블 포설을 계획하고 있다. 그리고 유럽은 BRITE/EURAM (Basic Research in Industrial Technologies for Europe/ European Research on Advanced Materials) 프로젝트에 의해 저손실, 대용량 케이블개발을 진행하고 있다.

국내에서는 1986년부터 한국전기연구원에서 초전도케이블 개발에 필요한 요소기술을 개발하여 왔으며 특히 1991년 고온초전도 케이블 사용온도인 액체질소에서 운전되는 "154kV 800MVA급 극저온저항케이블" 개발을 완료하고, 케이블 코어의 개념설계와 700A급 고온초전도 케이블코어 제작 및 평가, 계통특용 검토 등의 기반기술을 확보하였다 [12].

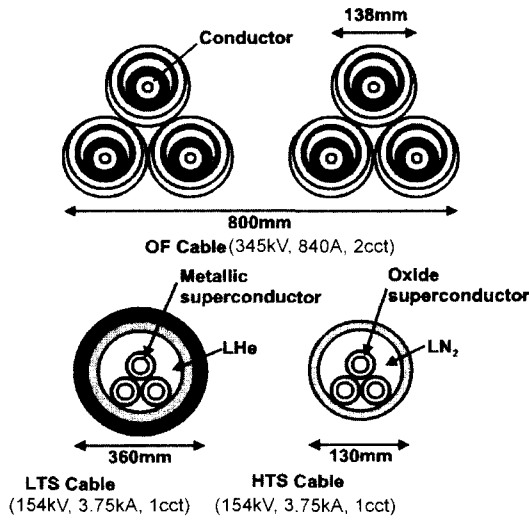


그림 12. 1GW급 케이블의 크기 비교

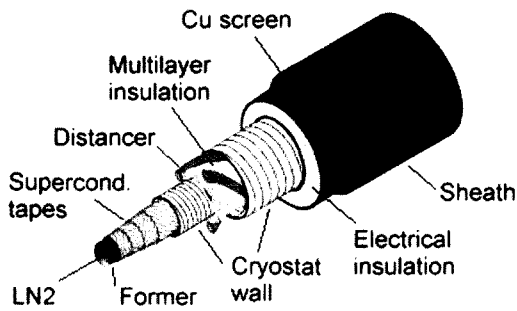


그림 13. HTS 케이블의 구조

## 2.4 초전도 한류기

초전도 한류기는 전력계통에서 단락 및 지락사고로 인해 발생하는 고장전류를 제거하거나 줄이기 위해 초전도기술을 접목시킨 전력기기로 정상상태에는 전력손실 및 전압강하 발생이 없고, 사고상태에는 스스로 사고를 감지해서 자동으로 계통의 임피던스를 증가시켜, 사고전류를 허용치 이하로 제한함으로써 전력계통의 기기를 보호하여 기존 차단기의 용량문제나 전력계통의 안정도 문제를 해결할 수 있는 환경 친화적인 새로운 사고전류 대책 기술이다. 그림 14는 초전도 한류기를 나타낸다.

한류기는 냉매와 사용된 초전도 재료에 따라 저온초전도 한류기와 고온초전도 한류기로 나눌 수 있다. 저온초전도 한류기의 경우 1970년대에 들어 대전력용으로 연구가 시작되었으나 고가의 액체헬륨을 사용한다는 점 때문에 기기 운전비용의 경제성이 결여되어, 선제의 안정성 및 고성능의 장점에도 불구하고, 현재는 상대적으로 저가인 액체질소를 냉매로 사용하는 고온초전도 한류기에 대한 연구로 방향이 전환되고 있다.

고온초전도 한류기는 동작 방식에 따라 크게 유도형과 저항형으로 구분되며, 미국의 경우에는 DOE의 SPI 프로그램을 통해 유도형의 일종인 modified bridge DC reactor

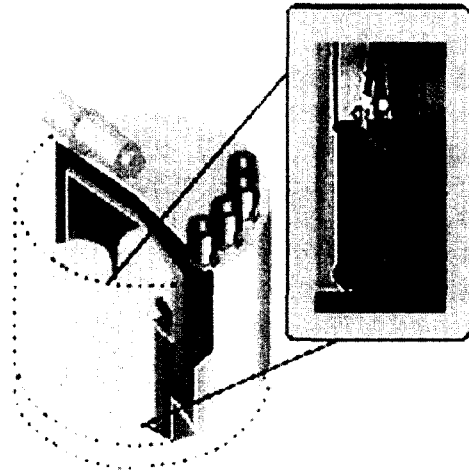


그림 14. 초전도 한류기

type 고온초전도 한류기가 개발되어 계통시험을 완료하였으며, 유럽에서는 초전도 연구팀의 공동연구망인 SCENET와 유럽기업의 컨소시엄인 CONECTUS를 중심으로 유도형의 일종인 자기차폐형 고온초전도 한류기와 저항형 고온초전도 한류기가 함께 개발되고 있다. 또한, 일본의 경우에는 94년부터 전력기기 제조회사들을 중심으로 초전도 한류기에 대한 연구가 진행되고 있으며, 현재는 세계 최대 용량의 자기차폐형 고온초전도 한류기를 목표로 개발 중에 있다. 이 밖에도 이스라엘과 캐나다 등에서 초전도응용기기 중 초전도 한류기가 가장 시장진입 빠를 것이라고 판단하고 고온초전도 한류기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

국내의 초전도한류기 개발은 1993년부터 시작되어 현재 연세대학교와 한국전력연구원에서 주로 연구되고 있다 [13]. 두 기관 모두 고온초전도 한류기를 개발하고 있으며, 연세대학교는 자기차폐형, 한국전력연구원은 YBCO 박막 저항형 고온초전도 한류기 개발에 주력하고 있다. 연세대에서는 1997년에 440V급 차폐형 고온초전도 한류기를 개발하였고, 1998년에 이를 개량한 modified bridge DC reactor type 고온초전도 한류기를 개발하여 250V까지 실험에 성공하였다.

## 2.5 초전도 디지털 소자

초전도 디지털 전자소자인 단자속 양자(SFQ) 소자는 초전도체만의 특이한 양자 현상을 이용한 초고속, 저 소비전력의 전자 소자로서 기존의 반도체 소자의 한계를 극복할 수 있는 미래형 전자소자이다. SFQ 소자는 기존의 반도체 소자보다 100배 이상의 작동 속도를 가지면서도 1/1000 이하의 전력을 소비하게 되어 반도체가 한계에 도달할 때에 이를 대체하거나 반도체와의 hybrid를 통하여 고속소자의 요구조건을 만족시켜줄 수 있는 기술이다. 그리고 무선 화상통신, 위성통신, 첨단 전자제품, 고성능 레이저 등에 이 소자를 응용하면 파급효과가 대단히 클 것으로 전망되고 있다. 그림 15은 SFQ 소자가 포함된 초전도 디지털 전자소자를 나타낸다.

미국이 저온초전도 디지털 회로 개발에 집중하는 반면, 일본은 기술적 난제에도 불구하고 실용화 될 경우 훨씬 많은 장점을 지닌 고온초전도 디지털 소자 개발에 연구력을 집중하고 있다. ISTEC(International Superconductivity Technology Center)에 참여하고 있는 NEC, Toshiba, Hitachi, Fujitsu, Mitsubishi 등의 기업에서 특히 활발한 연구가 이루어지고 있으며, 2000년 10월 고온초전도 디지털 소자를 활용한 응용 시스템인 40 Gbps급 샘플러 시스템의 개발을 세계 최초로 성공하여 발표하였다.

유럽의 경우에는 Forschungszentrum Juelich, PTB, Univ. of Twente, Univ. of Cambridge, Univ. of Karlsruhe, Chalmers Univ., Moscow State Univ 등에서 고온초전도 조셉슨 접합 제작 연구가 활발히 이루어지고 있으며, Univ. of Ilmenau, Univ. of Savoie, DERA 등에서는 고온초전도 디지털 회로 설계 기술을 연구하고 있다.

국내에서는 1995년 중점국가연구개발 사업으로 KIST, 인천대, 전자통신연구원 등에서 YBCO bicrystal junction 및 ramp-edge junction을 사용한 RS flip-flop, 4-stage shift register 등 고온초전도체를 중심으로 핵심 디지털소자를 개발하였고, 한국표준연구원에서는 20,000개의 Nb접합 어레이,  $4 \times 4 \mu\text{m}^2$  크기의 SQUID,  $1 \mu\text{m}^2$  크기 접합을 이용한 100 GHz mixer 제작 등의 조셉슨 접합 제작기술을 확보하고 있다. 또한, 고려대 물리학과에서는 조셉슨 접합 및 SQUID 제작에 관한 연구를 수행 중에 있고, 영남대 물리학과는 고온초전도 조셉슨 접합의 전도기구 해석연구를 수행 중이다.

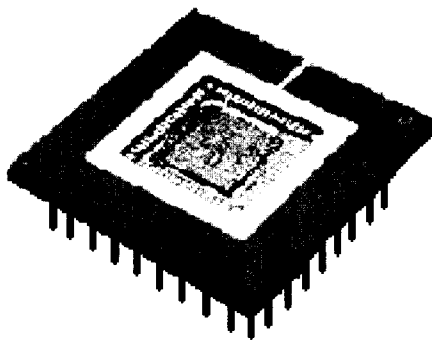


그림 15. 초전도 디지털소자

### 3. 결 론

21세기에는 국가간의 기술 개발 경쟁이 더욱 치열해 질 것이며 WTO와 APEC등에 의하여 국가간 관세장벽이 완전히 철폐되기 때문에 산업기술력을 바탕으로 국가간 경쟁에 이기지 못하면 국가의 경제적 생존권이 위협받는 상황이 전개될 것이다. 따라서, 그 나라의 기술력이 국가의 경쟁력을 결정하는 시기에 직면하여 지식기반사회에 적합한 고부가가치의 첨단기술 산업을 육성해야하는 필요성이 그 어느 때보

다 요구된다. 많은 과학자들은 대전류 통전(구리의 100배), 고자장 자석(수십 테슬라), 초고속 디지털 소자 등을 가능케 하는 초전도 기술이 기존 기술의 한계를 극복할 수 있어서 국가발전의 원동력인 에너지, 환경오염 방지 등의 산업전반에 파급효과가 매우 크므로 21세기 강대국으로 도약하기 위해서 확보해야 할 필수 기술로 인정하고 있다. 고온초전도체의 성능이 지금과 같은 추세로 지속적으로 향상되고 초전도체의 산업응用に 필요한 극저온 기술 등의 제반 연구가 지속적으로 발전된다면 2010년 이전에 앞서 언급한 분야 뿐만아니라 산업전반에 걸쳐서 초전도체를 이용한 산업응용이 확산되고 상용화 될 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- [1] B. B. Gamble, et. al., "Prospects for HTS Applications", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 32, No.4, pp. 2714-2719, 1996
- [2] Paul M. Grant, "Superconductivity and Electric Power: Promises, Promises...Past, Present and Future", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, No.2, pp. 112-133, 1997
- [3] J. G. Weisend II, Handbook of Cryogenic Engineering, Taylor & Francis, 1998
- [4] Michel Cyrot, Davor Pavuna, Introduction to Superconductivity and High-Tc Materials, World Scientific, 1992
- [5] Terry P. Orlando, Kevin A. Delin, Foundations of Applied Superconductivity, Addison-Wesley, 1991
- [6] R. D. Blaugher, "Low-calorie, high-energy generators and motors", IEEE Spectrum, pp. 36-42, July, 1997
- [7] <http://itri.loyola.edu/scpa>
- [8] Young-sik Jo, et. al., "An Approach to the Shape Optimum Design of Superconducting Synchronous Generator", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 10, No.1, pp. 939-942, 2000
- [9] 차세대 고효율 발전플랜트 개발, 과학기술부, 1999
- [10] Sam P. Mehta, et. al., "Transforming Transformer." IEEE Spectrum, pp. 43-49, July, 1997
- [11] 최경달 외, "고온초전도 전력용변압기 개발", 대한전기학회 학회지, 제 47권, 6호, 1998
- [12] 조전욱, 성기철, "고온초전도 전력케이블의 기술동향", 대한전기학회 학회지, 제 47권, 6호, 1998
- [13] Minseok Joo, et. al., "Novel Design and Operational Characteristics of an Inductive High-Tc Superconducting Fault Current Limiter", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 7, No.2, pp. 1005-1008, 1997