

고온 초전도 선재 제조 및 전력 응용 기술 개발 현황



유재무

(KIMM 재료공정연구부)

- '83 - '87 연세대학교 금속공학과(학사)
- '87 - '90 미국 미시건주립대 재료공학과(석사)
- '90 - '94 미국 미시건주립대 재료공학과(박사)
- '94 미국 미시건주립대 재료공학과 Research Associate
- '96 일본 금속재료 기술연구소(NRIM) STA Fellow
- '94 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



고재웅

(KIMM 재료기술연구부)

- '83 - '87 연세대학교 요업공학과(학사)
- '87 - '89 서울대학교 무기재료공학과(석사)
- '89 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



정형식

(KIMM 창원 분원장)

- '70 서울대학교 금속공학과(학사)
- '77 미국 Drexel대학교 금속공학과(박사)
- '78 - '80 미국 Pizer Inc. 선임연구원
- '80 - '85 미국 United Technologies 선임연구원
- '85 - 현재 한국기계연구원 책임연구원

1. 서론

고온 초전도체가 실용적으로 가지고 있는 가장 중요한 의미는 액체 질소 온도 이상에서 전기저항이 없이 큰 전류를 흘릴 수 있다는 사실이다. 비근한 예로 1cm^2 의 단면적을 갖는 고온 초전도체로 된 도선을 이상적으로 제작할 수 있다면 그것은 직류 전류에 대하여 전기 저항이 전혀 없이 약 2,000,000A를 흘릴 수 있다. 이것을 이용하면 에너지 소모가 없는 전력장치를 만들 수 있을 뿐만 아니라 작은 부피로 훨씬 큰 전력을 운용하는 전기기계를 만들 수 있다. 현재 상용되고 있는 구리선은 자체의 고유전기저항에 의한 열발생으로 인하여 흘릴 수 있는 최대전류가 제한을 받는다. 냉각수가 흐르는 튜브형으로 생긴 구리선을 사용할 경우 적정전류는 1cm^2 의 단위면적당 고작 수백 암페어이다. 이러한 이유로 과거에 구리전선을 사용하여서는 만들 수 없었던 여러 가지 전력기계를 고온 초전도 선재를 이용하면 실용화 할 수 있다.

초전도체는 1911년 4.2K 온도에서 고체 수은에서 처음으로 발견 되었다. 그 후 1986년 산화물계 고온 초전도체가 발견되기 전까지 알려져 있던 많은 초전도물질들은 값이 매우 비싼 액체 헬륨을 이용해서 온도를 20K이하로 낮추어야만 초전도 상태를 얻을 수 있었다. 따라서 당시까지는 초전도체의 대량적 상용화를 기대할 수 없었다. 그러나 1986년 이후 현재까지 La-Ba-Cu-O^[1], Y-Ba-Cu-O^[2], Bi-Sr-Ca-Cu-O^[3], Tl-Ba-

역점을 두고 많은 연구들이 수행되고 있다.

본문에서는 각종 전력 응용 기기 분야에서 고온초전도체 응용을 위해 최근 연구되어지고 있는 BSCCO 등의 고온초전도 선재의 세계적 연구 현황을 그간에 소개된 문헌과 자료등을 통하여 살펴보고 현재 개발중인 고온초전도 선재를 이용한 전력응용기술개발 현황과 실용화에 따른 고온초전도 선재의 문제점 및 향후 전망 등에 관해 언급하고자 한다.

2. 연구 동향

2.1 고온 초전도 선재 연구 현황

1990년대에 들어와서 고온 초전도체 선재를 전력 응용 기기 분야인 송전선(Power cable), 모타, 다용도 Pancake coil, 발전기, 자석 등에 이용하기 위해 선재의 임계전류밀도의 향상과 함께 선재의 장선화에 대한 연구 그리고 교류 손실을

최소화 하기위한 연구가 집중적으로 시작되었다. 또한 임계의 weak link와 flux creep같은 문제들을 어떻게 최소화 하느냐와 같은 재료적인 측면과 균일하고 재현성 가능한 성질들을 갖춘 1km 가 넘는 장선들을 어떻게 제조하느냐와 같은 공정적 측면들도 심도있게 연구되고 있다. 표 1.에 고온 초전도 선재 제조기술들을 임계 전류특성, 장선화 공정가능성, 선진국의 응용기기 연계 개발 계획등에 따라 비교 분석하였다.

2.1.1. 국외개발현황

BSCCO 2223 선재의 최근 개발 현황을 표 2.에 정리하였는데 고임계 전류값을 갖는 선재의 장선화가 주된 연구 방향임을 알수있다. 미국의 American Superconductor Corp.(ASC)의 최근 결과를 보면 1,100m가 넘는 19심 BSCCO 다심선재가 임계전류(I_c) 및 임계전류밀도(J_c)가 각각 15.5A와 $12,700A/cm^2$ 를 나타내고 있고, 1995년 10월 일본에서 개최된 고온초전도 미국-일본 위

표 1. 고온 초전도 선재 제조기술의 비교

	BSCCO 2223 선재	YBCO 박막선재	Tl-1223상 선재
임계전류 특성	<ul style="list-style-type: none"> 길이 수 cm : 우수 $J_c \sim 6.9 \times 10^4 A/cm^2$ 장선재 : 우수 길이 1,200m, $J_c \sim 1.77 \times 10^4 A/cm^2$ 자장열화의 단점이 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 길이 수 cm에서 가장 우수 LANL : $J_c \sim 1.3 \times 10^6 A/cm^2$ 길이가 길어질수록 임계전류 특성 급격히 감소 	<ul style="list-style-type: none"> 길이 수 cm에서 $< 1.5 \times 10^4 A/cm^2$ 길이 24m에서 $1.46 \times 10^4 A/cm^2$ 임계전류특성이 다른 system에 비해 떨어짐
장선화 공정	<ul style="list-style-type: none"> 압연공정 사용하여 대량생산 용이 일본의 Sumitomo electric 길이 1,200m, $J_c > 17,000 A/cm^2$ 	<ul style="list-style-type: none"> Dual IBAD process를 거쳐야 하므로 장선화 공정이 어렵고 장시간을 요함 LANL 등에서 연속 공정법 연구중 	<ul style="list-style-type: none"> 압연공정을 사용하여 장선화가 가능하나 texturing과 조밀화가 떨어져 임계전류특성이 좋지않음. 현재 길이 24m급 제조
응용기기 연계 개발계획	<ul style="list-style-type: none"> 미국의 ASC, IGC, 일본의 Sumitomo electric, 프랑스의 Alcatel group, 독일의 Siemens사 등이 송전선, 모터, 발전기 등의 전력응용 분야의 기본재료로 개발중 	<ul style="list-style-type: none"> 장선화 공정의 어려움으로 현재까지는 없으나 향후 가능성이 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 소형 pancake coil 개발중 임계전류특성이 미미하여 응용기기 개발로는 확장이 안된 상태임
환경 및 기타	<ul style="list-style-type: none"> 공기중에서 화학적으로 안정 	<ul style="list-style-type: none"> 공기중에서 장시간 보관시 특성 저하 	<ul style="list-style-type: none"> Tl의 독성이 강함. 특수 취급시설 필요함.

표 2. Present State of the Art for HTS BSCCO Tapes

Organization	IC(A)	Jc(kA/cm ²)	Condition	Length(m)	Material
Sumitomo Electric Corp. (Japan)	70	42.5	77K, 0T	0.05	BSCCO 2223/Ag
	-	27.8	77K, 0T	114	BSCCO 2223/Ag
	-	17.7	77K, 0T	1200	BSCCO 2223/Ag
Vacuum-Schmelze/ Siemens(Germany)	-	30~33	77K, 0T	0.05	BSCCO 2223/Ag
	-	15~20	77K, 0T	110	BSCCO 2223/Ag
American Superconductor Corp.(U.S.A)	-	44	77K, 0T	1	BSCCO 2223/Ag
	34	17.8	77K, 0T	280	BSCCO 2223/Ag
	15.5	12.7	77K, 0T	1160	BSCCO 2223/Ag
Intermagnetic General Corp.(U.S.A)	20	-	77K, 0T	114	BSCCO 2223/Ag
	42	21	77K, 0T	>100	BSCCO 2223/Ag
	18	12.5	77K, 0T	1260	BSCCO 2223/Ag

크에서는 단선의 압연된 다심선재의 임계전류밀도값이 77K에서 44,000A/cm²에 이르는 높은 임계전류밀도값을 발표하였으며 이는 종전의 Sumitomo electric사의 최고 임계전류밀도값인 42,000A/cm²보다 높은값이다. 미국의 Intermagnetic General Corp.(IGC)의 결과를 보면 길이 1,260m에서 임계전류 (I_c) 및 임계전류밀도(J_c)가 각각 18A, 12,500A/cm²을 갖는 37심 BSCCO 다심선재를 개발했고 단심선재의 경우에는 길이 114m에서 임계전류 및 임계전류밀도값이 각각 20A와 12,000 A/cm²를 갖는 단심선재를 개발하였다. 이상의 미국의 ASC와 IGC의 최근 연구결과를 보면 React&Wind법으로 응용 기기 개발이 쉽고 기계적 변형성능이 우수한 장선의 다심선재 개발에 주력하고 있음을 알수있다.

또한 1995년 10월 고온초전도 미국-일본 워크에서 발표된 일본의 Sumitomo electric Corp.는 임계전류밀도값이 77K, 0T에서 17,700A/cm²인 길이 1,200m급의 고전류도체(High amperage conductor)를 개발하였으며 이를 이용하여 전류인입선(Current lead), Busbar, 전력케이블, 그리고 자석개발에 주력하고 있다.

2.1.2. 국내개발현황

국내의 고온 초전도 선재 연구현황을 살펴보면, 당 연구원에서는 BSCCO 2223상 선재제조를

위한 전구체 분말제조 연구, BSCCO 2223 선재 제조를 위한 기계적 가공공정연구, 반복적인 열 기계적 가공에 의한 임계전류밀도 향상연구 및 BSCCO계에서의 가장 심각한 문제인 flux creep으로 인한 자장 하에서의 특성열화를 줄이고자 1993년부터 초미립 MgO첨가에 의한 Extrinsic Pinning 연구 등을 수행하고 있다. BSCCO 전구체 분말 제조 기술은 최종적으로 초전도특성을 좌우하기 때문에 매우 중요하며 특히 수 백미터 또는 수 km급의 장선재 제조시에는 피복재 튜브에 장입되는 BSCCO 전구체 분말이 수 백그램에서 수 킬로그램까지 들어가므로 전구체 분말의 순도 및 조성의 균일성이 매우 중요하다. 당 연구원에서는 최근 분무건조법으로 1회 1kg batch를 제조할 수 있는 설비와 제조기술을 보유하고 있으며 최적 분말의 조성, 입자크기, 상변환 등을 제어하는 연구를 수행중이다. 또한 1991년부터 BSCCO계 초전도체를 처음 발견한 일본 금속재료연구소 Maeda 그룹과 공동으로 BSCCO 2212/Ag 복합 판재를 분말충진법에 의해 제조하였고 이에 부분용융 및 서냉 공정을 도입해 4.2K, 10T에서 82A를 갖는 선재(tape dimension ; 두께 105μm, 폭 2.6mm)를 제조하였다. 현재 당연구원에서는 임계변형압힘율이 높아 기계적 변형성능이 우수한 다심선재 개발을 하고 있으며 선재의 용도에 따른 세분화 된 피복

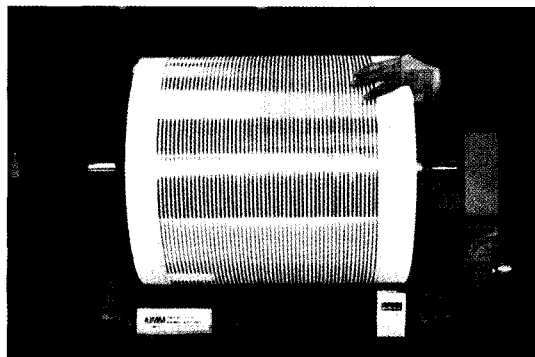


그림 2. 한국기계연구원에서 개발된 100m급 BSCCO-2223 선재

재 은합금 튜브를 개발하고 있는데, 기존의 순수 은에 비해 경도 및 비저항값이 각각 5배, 10배 높고 가공성도 좋아 기존의 분말충진법에 접목시키고 있다. 최근 당연구원에서는 임계전류 (I_c) 11A, 임계전류밀도 (J_c) $> 12,000 A/cm^2$ 인 100m급의 BSCCO 2223 선재를 이미 개발하였고 (그림 2), 길이 20m급의 다심선재에서는 임계전류 (I_c) $\sim 24A$, 임계전류밀도 (J_c) $\sim 24,000 A/cm^2$ 인 고틈성 선재를 개발하였다. 현재 BSCCO 분말제조능력, 길이 100m 급의 장선재 제조설비 및 고임계전류 선재개발 경험에 의해 초전도분야에서는 국내 최초로 저온초전도 선재 및 MRI용 자석 제조업체로 유명한 미국의 Oxford Instrument 사로부터 수탁연구자금을 지원받아 공동연구중이다.

2.2. 고온 초전도 전력 응용 기기 개발 현황(국외)

무손실 전력 저장 장치, 무손실 전력 수송장치 등이 초전도에 의해 실현될 수 있을 뿐 아니라 발전기, 변압기를 비롯한 각종 전력 기기들도 초전도화 함으로써 막대한 이득을 볼 수 있게 된다. 고온 초전도 선재의 전력분야 응용은 최근 BSCCO-2223 장선재를 이용하여 고온 초전도 모터, 변압기(그림 3), 발전기 등과 고자장을 발생

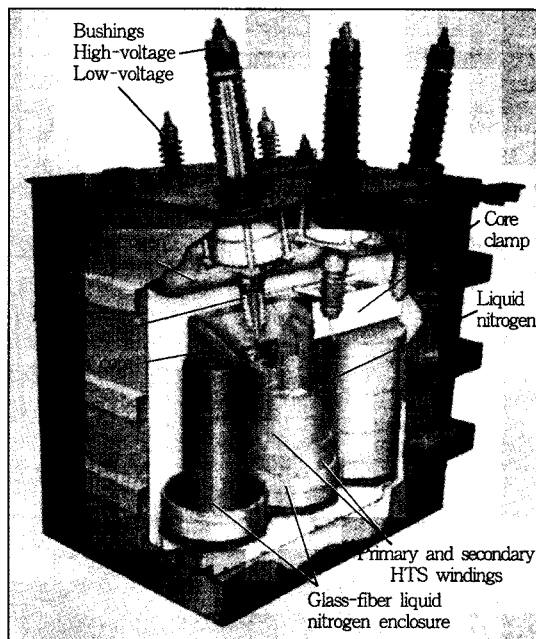


그림 3. The conception of a superconducting transformer

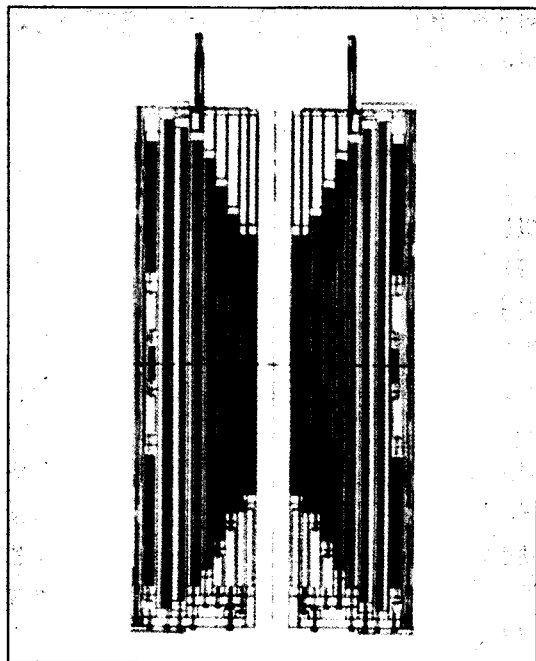


그림 4. National High Magnetic Field Lab. (NHMFL) s 1.066GHz(25T)NMR design
 Blue:copper/NbTi composite conductor
 Red:copper/Nb₃Sn conductor
 Pink:Ag/BSCCO-2212 conductor

표 3. BSCCO 2223 장선재를 이용한 선진국의 전력 응용 기기 개발 현황

응용기기	특 성	개발회사	개발연도
Transformer	500kVA at 77K	Sumitomo & Fuji	1996
	630kVA at 77K	EdF/ABB/ASC	1997
	10MVA(개발중)	EdF/ABB/ASC	
Magnet	7T at 20K	Sumitomo Electric	1997
	2.16T at 27K	ASC	1994
Motor	200hp at 27K	ASC & Reliance	1996
	1000hp(개발중)	ASC & Reliance	
Power Cable	50m dc 3000A at 77K	Pirelli & ASC	1996
	50m dc 2900A at 77K	TEPCO & Sumitomo	1996
	100m, 3 phase(개발중)		
Current Limiter	2.4kV, 2.2kA	IGC, Lockheed & SCE	1996
	15kV, 3 phase(개발중)	IGC, Lockheed & SCE	
Generator	1.5MVA at 20K	GE & IGC	1996
	70MVA(개발중)	Super GM & Kansai	

시킬수 있는 자석 및 이를 이용한 NMR(그림 4.)등의 각종 전력 응용 기기를 만들수 있는 정도로 발전되었다. 표 3.에 BSCCO 2223 장선재를 이용한 선진국의 전력 응용 기기 개발 현황을 나타내었다.

2.2.1 고온 초전도 케이블

고온초전도 전력케이블은 초전도체가 가지고 있는 전기저항이 제로로 인한 전기적손실이 없다는 우수한 특성과 저전압 대전류방식에 의한 대용량 송전이 가능하여 차세대 고효율 송전선 분야에의 적용으로 실용화가 될것으로 기대된다. 기술적 측면에서, 초전도 송전은 종래의 154kV →345kV(현재)→765kV(한계용량) 등의 고전압화에 의한 송전용량의 한계를 저전압 대전류화에 의해서 극복하려 하는 것으로, 종래 방식을 대신하는 획기적인 고효율, 고밀도, 대용량 송전을 실현할수 있을 뿐만아니라 저 손실에 의한 고전류 송전이 가능하여 변전소의 생략, 케이블 절연비를 감소시킬수 있다.(그림 5.) 또한 종래의 고전압 송전방식에 의해 야기되는 대도시 주변에서의 전자기파 발생문제, 전파장애문제 등을 해결할 수 있다. 그림 6.에 고온 초전도 케이블

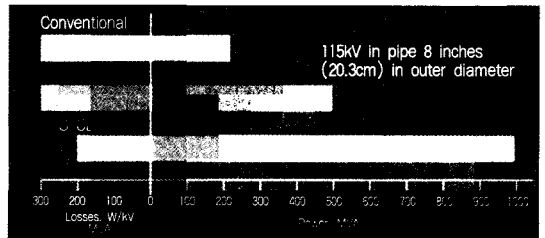


그림 5. 상용케이블과 고온초전도 케이블(상온유전체(RTD) 또는 극저온유전체(CD))의 비교

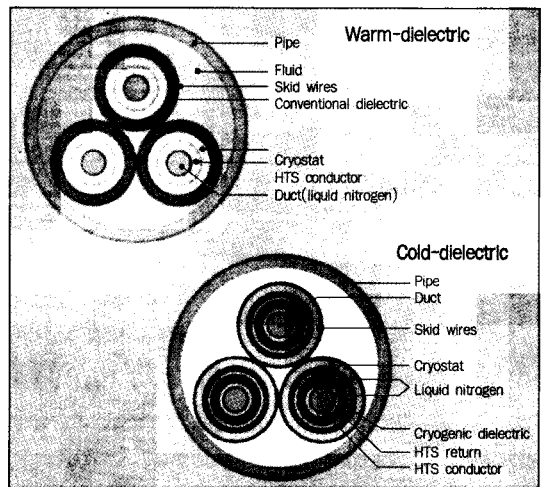


그림 6. High temperature superconducting(HTS) cable of the warm-dielectric design(above) and the cryogenic-dielectric design(below)

의 단면 개념도를 나타내었다. 저온초전도체를 사용한 저온초전도 전력케이블을 미국 Brook Heaven National Lab 등에서 개발하였으나 시설 투자비가 높고, 값비싼 액체 헬륨에 의한 냉각방식으로 설비의 제작이 복잡하고 운영경비가 높아 경제성이 없는 것으로 판명되었다.

반면에 고온초전도 전력케이블의 경우는 값싼 액체질소를 냉각제로 사용하여 냉동설비의 제작 및 운용이 간단하고, 저렴하며, 신뢰성확보가 용이하여 용량이 1GVA 이상에서 경제적으로 예측되며 향후 고품성 BSCCO 선재가 개발되면 고온초전도 전력케이블의 시장성은 더욱 밝아질 것이다. 특히, 동경전력(TEPCO)의 향후 전력수급 계획을 보면 동경 등의 대도시 전력수요증대에 부응한 신규 전력케이블의 증설대신, 기존 지하관로에 용량이 배가된 고온초전도 케이블을 사용함으로써 관로증설을 생략할수 있어 훨씬 경제적이다.

고온초전도 송전케이블 시제품개발은 현재 송전선 제조회사인 이태리의 Pirelli와 미국의 ASC, EPRI 등이 에너지성의 SPI 프로그램으로 공동으로 연구하고 있으며, 개발진척 속도는 계획보다 빠른 속도로 진행되고 있다. 1996년 3월 Pirelli사가 남 캐롤라이나 공장에서 산업체급 케이블 권선 기계를 이용하여 ASC사에서 제조된 수 km의 BSCCO 다심선재로 부터 길이 50 m의 유연성이 좋은 전력케이블을 성공적으로 제작하였다고 발표하였다. 그림 7. a)는 ASC사와 Pirelli사가 공동으로 개발한 길이 50m, dc 3,000A급 3상 전력케이블의 시제품 사진이고, 그림 7. b)는 BSCCO 다심선재를 사용하여 만든 전력케이블용 다층 multistrand conductor의 샘플사진이다.

EPRI에 의하면 Pirelli사의 최근 개발된 50 m 시제품 케이블은 고온초전도 케이블 제조업의 산업화의 시작을 상징하며, 고온초전도 케이블의 길이는 개개의 케이블들을 joint를 이용하여 연결

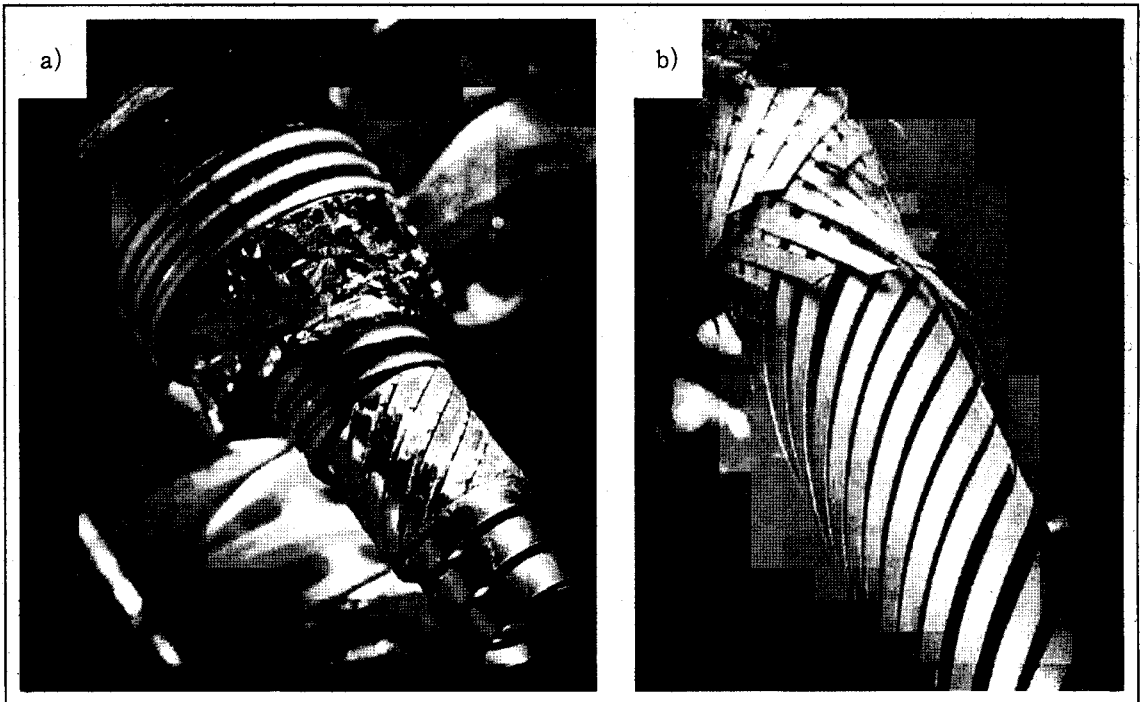


그림 7. a) 미국의 ASC사와 이태리 Pirelli 케이블사가 공동으로 개발한 길이 50m, dc 3,000A급 3상 전력케이블 시제품, b) BSCCO 다심선재를 사용하여 만든 다층 multistrand conductor 샘플

될 것이며 냉동기와 냉매펌프들은 송전시스템의 양단 끝부분과 중간 joint부에 설치될 것이라고 한다. Pirelli사는 시제품 교류용 30m 송전선 시스템의 실적용 성능시험목표를 115kV로 전압을 올렸을 때 ac 2000A 전류를 송전하는데 두고 향후 계획은 pilot link로서 설치전의 장기간 시험을 할 100m 급 3상 케이블을 에너지성과 EPRI 지원 아래 1997년까지 개발하고 1999년안에 전력송전 시험운전을 할 예정이다. Pirelli사와 ASC사는 상업적인 고온초전도 송전선을 1998~1999년 사이에 시험운전할 것이며 2000년경에 전력시장에 실용화하기 시작할 것으로 두 회사는 기대하고 있다. Pirelli 와 EPRI는 개개의 전력회사들과 함께 고온초전도 송전시스템의 운용과 효과들을 평가하기 위한 독자적인 연구들을 이미 시작해왔다.

일본의 경우를 보면, Sumitomo Electric사와 Furukawa Electric사가 공동으로 최근 1996년에 길이 50 m급의 시제품 송전선을 개발하고 성공적으로 시험운전을 마쳤는데, 1995년 초에 TEPCO 와 Furukawa가 공동으로 길이 5m, termination 연결부가 장착된 단상의 고온초전도 케이블을 15분간 지속적으로 2000A, 69kV 에서 load test를 하였으며, 1996년에 개발된 시제품 송전선 경우에는 길이 50 m 케이블, 온도 77K에서 dc 2900A, rms 2200A 를 송전하는데 성공하여 길이와 용량면에서 빠른 개발진척속도를 보이고 있다. 표 4.에 고온 초전도 BSCCO 전력케이블 제조 현황을 나타내었다.

2.2.2 고온 초전도 변압기

대규모 전력응용기기중에 에너지 절약성, 시장

성 및 환경친화성 측면에서 최근 각광 받고 있는 것이 고온 초전도 변압기이다. 참고로 현재 30 MVA급 변압기의 세계시장규모는 연간 30억불 정도이다. 기존의 변압기에 비해 고온 초전도 선재를 사용한 차세대 변압기의 장점은 (1) 송변전 시 전기에너지 손실감소로 계통운전 효율향상 및 비용절감효과, (2) 과부하시 고장전류 제한효과로 계통보호, 신뢰도 향상 및 기기제작비 인하 효과, (3) 철심의 크기와 무게를 줄일 수 있어서, 100MVA급의 경우 무게는 50% 감소하여 소형화, 경량화 및 공간절약이 가능하다. (4) 절연유 대신 액체질소를 사용하여 화재, 절연 누류(oil leakage) 등 환경저해 문제가 최소화되어 인구 밀집지역에 건설이 용이하다. 그림 8.에 일반변압기와 순환 방식, 비순환 방식의 고온 초전도 변압기의 크기를 비교하였다. 3가지 형태의 변압기 모두 138kV/13.8kV, 30MVA 용량이다. 그림에 나와 있듯이 고온 초전도 변압기의 중량은 순환 방식의 경우에는 일반변압기의 1/2, 비순환 방식의 경

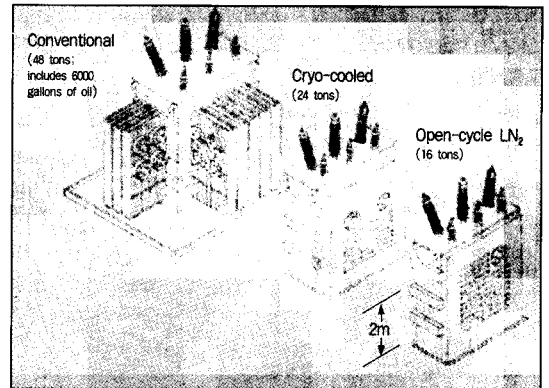


그림 8. 상용변압기와 고온 초전도 선재를 사용한 변압기의 규모면에서의 비교

표 4. Present state of the art for HTS power transmission cables

개발국	회 사	고온 초전도 BSCCO 송전선 제원	개발연도
이태리 & 미국	• Pirelli & ASC, EPRI	길이 50m, dc 3000Amp cable at 77K	1996
일 본	• TEPCO & Sumitomo(동경전기)	길이 50m, dc 2900Amp at 77K	1996
미국	• South wire, ORNL & IGC	길이 1m, dc 2000Amp at 77K	1996
유럽	• BICC cable & CEAT CAVI & IGC	길이 1m, dc 11,000Amp at 20K	1995

우에는 일반변압기의 1/3로 감소함을 알 수 있다. 최근 1998년 1월 프랑스 전력공사(EdF), 미국의 고온 초전도 BSCCO장선재 제조회사인 ASC사, 그리고 스위스의 ABB사는 차세대 변압기용 고온 초전도 BSCCO선재 권선 개발에 공동참여하여 10MVA급 고온 초전도 변압기를 2000년까지 개발한다고 발표하였으며 그것에 의하면 ABB사는 ASC사에서 제조한 고온 초전도 BSCCO 2223 선재를 사용하여 10MVA급 변압기 시제품을 제작한 후 EdF의 변전소에 늦어도 2000년까지 현장 시험을 마친다는 계획이다. 그 결과에 따라 경제성이 검증된 고온 초전도 30 MVA급 변압기의 상용화 여부가 결정된다. 그 계획의 일환으로 1997년 3월 제네바 시에 연결

되는 전력 계통 3사가 공동 개발한 고온 초전도 630kVA 3상 변압기를 6개월간의 실부하 시험을 수행하였다. 그림 9.는 ABB사에서 개발한 BSCCO-2223를 사용한 630 kVA, 3상 고온 초전도 변압기이다.

일본 Kyushu대학교에서는 1996년 8월 Fuji 전기, Sumitomo사와 공동으로 500kVA, 단상 고온 초전도 변압기의 개발에 성공하였다. 고온 초전도 선재로는 역시 BSCCO-2223 테이프를 사용하였고 1차 전압 6.6kV, 2차 전압 3.3kV의 정격 전압을 가지며, 단일 선재로 정격 전류를 흘릴 수 없어 1차 셋, 2차 여섯 가닥의 선재를 병렬로 연결하여 전류 용량을 증가시켰다.

미국에서는 Waukesha Electric Systems의 주도로 Intermagnetics General Corp., Rochester Gas & Electric Corp., Rensselaer Polytechnic Institute, Oak Ridge National Laboratory 등이 참여하여 1MVA 단상 고온초전도변압기를 개발 중이다. 선재로는 BSCCO-2212를 사용하며 순환방식(Cryo-cooled)에 1차 13.8kV 2차 6.9kV의 용량을 갖는다. 이 변압기는 20~35K의 온도에서 동작하고 30MVA 일반 변압기와 특성을 비교하기 위해 정격 전류의 최대 12배 크기의 사고 전류에도 견딜 수 있도록 설계되었다.

표 5.에 고온 초전도 BSCCO 선재를 사용한 변압기의 최근 개발 현황을 정리 하였다.

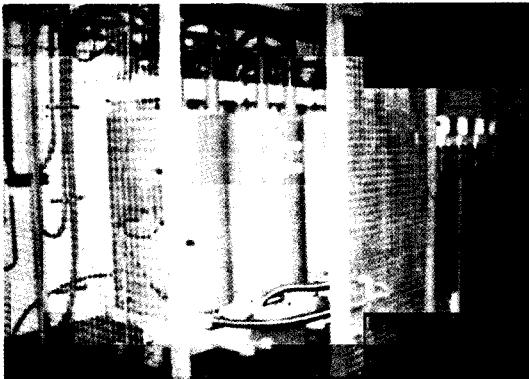


그림 9. ABB's 632kVA demonstration transformer using BSCCO-2223 cables

표 5. Present State of the Art for HTS Transformer

개발국	개발 회사	용량 및 특성	도 체	개발연도
일본	Fuji/Sumitomo	500kVA, 단상 6.6kV/3.3kV	BSCCO 2223 (77K)	1996
미국	Waukesha/IGC	1MVA, 단상 13.8kV/6.9kV	BSCCO 2212 (20K~35K)	1996
	Waukesha/IGC	5MVA(개발중) 30MVA design	BSCCO 2223	
유럽 & 미국	EdF/ABB/ASC	630kVA, 3상 18.7kV/0.42kV	BSCCO 2223	1997 (개발중) 2000년 개발예정
	EdF/ABB/ASC	10MVA 30MVA	BSCCO 2223 BSCCO 2223	

표 6. Superconducting rotating machinery including motors and generators

Country	Organization	Device Type	Specification	Status
Japan	Super-GM	LTS field winding, Generator	3-3.2 kA, 200/400/125V (70MW class)	Experimental Machine
United Kingdom	Cambridge U.	synchronous-HTS field wd.	1hp motor	Prototype
United States	General Electric	HTS generator (field winding)	100MVA class	Prototype
United States	Naval Surface Warfare Center	HTS homopolar motor	400hp-class motor	Demonstration Prototype
United States	Roackwell Automation/ Reliance Electric	ac synchronous-HTS field wd.	1000 & 5000hp motor	Prototype

2.2.3 고온 초전도 회전응용기기

고온 초전도 선재의 전력용 회전 응용기기에 대한 현황을 살펴보면 표 6.과 같다. 회전 응용기기의 대표적인 예로는 발전기와 모터를 들 수 있으며 그림 10.에 발전기의 원리를 간단히 나타내었다. 영구자석(회전자)을 회전하게 되면 패러데이원리에 의해 고정자 코일에 전류가 발생하게 된다. 따라서 영구 자석의 강도를 바꾸면 발전량이 변하게 된다. 실제의 발전기에서는 발전기의 발전량을 조절하기 위해 영구자석이 아닌 전자석을 사용한다. 그리고 될 수 있는 한 작은 크기로 발전량을 크게 하려면 회전 전자석의 자기장을 될 수 있는 한 강하게 할 필요가 있으며, 회전 전자석을 초전도 코일로 사용할 경우 같은 용량일 경우 그 크기는 약 1/10로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 손실도 많이 감소되어 효율이 향상된다.(그림 11.) 그림 12.에 Reliance Electric 사

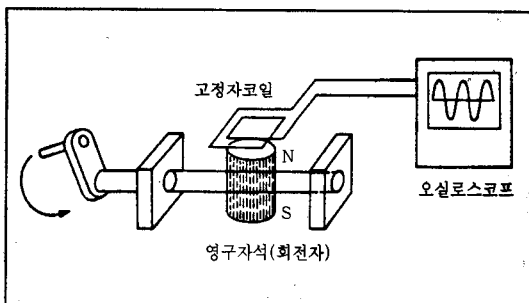


그림 10. 발전기의 원리

의 초전도 synchronous 모터의 개념도를 나타내었다.

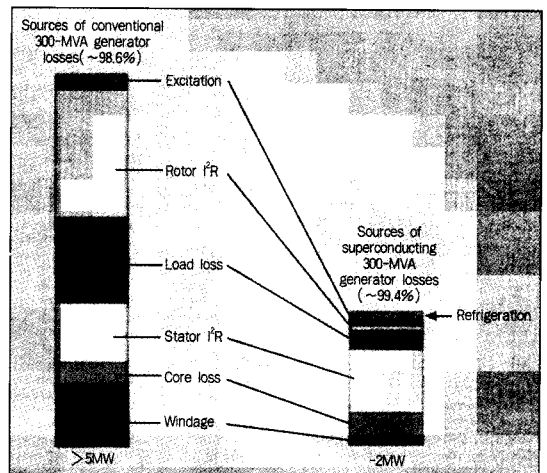


그림 11. 상용발전기와 초전도 발전기의 비교

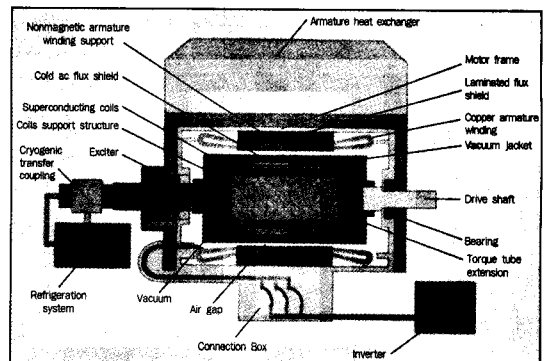


그림 12. The conceptual design of the superconducting synchronous motor

3. 문제점 및 향후 전망

3.1 문제점

고온 초전도체의 응용기기 적용시 발생되는 주요 문제점들로는 첫째, 전력기기응용이 대부분 교류(ac)조건하에서 이루어지며, 고온초전도체에 교류(ac)가 흐르거나 자장이 증가하게되면 초전도체에 에너지 손실을 가져오게 한다. 이러한 에너지손실들은 이른바 열을 발생하게 하여 선재의 통전성을 저하하게 하고 상업화와 공학적 응용가능성에 중대한 영향을 미칠 수 있다. 이러한 교류(ac)손실들을 줄이기 위하여, 초전도 선재의 다심선재화, 비틀림 변형법 및 와류전류 손실을 줄이기 위해 비저항이 높은 은합금 피복재 등의 상호접목 되어진 연구가 활발히 이루어져야 할 것이다.

둘째, 산화물 초전도체에서 현재 보고된 임계전류밀도값($J_c > 30,000 A/cm^2$)들은 많은 분야에 걸쳐 응용이 가능한 수준이지만 이러한 데이터들은 대부분 수 cm의 시편들에 대한 값 들이다. 실용화를 위해서는 장선화 및 재연성과 같은 선재 공정상의 문제들을 해결해야만 한다.

셋째, 자장하에서 열적으로 활성화된 flux creep과 약한 flux pinning으로 인해 초전도 특성이 쉽게 열화된다. 이러한 flux creep을 줄이기 위한 고착중심을 초전도체에 도입하고자 하는 노력이 활발히 진행되고 있지만 아직 만족할만한 단계는 아니다. 효과적인 자속 고착을 위해서는 논란의 대상이 되고 있는 고착기구가 구체적으로 이해되어야 하고 아울러 자속 고착 특성을 향상시킬 수 있는 연구가 필요하다.

넷째, 산화물 고온초전도체는 금속계 저온 초전도체와 달리 취성이 문제가 되어 실용화에 장애 요인이 되고 있기 때문에 초전도 선재가 기계적 성질이 우수하여 산화물 초전도 선재로 케이블 제조시 생기는 급립 변형율과 사용시 발생하는 Lorentz force에 상당한 공차를 가져야만

된다. 그러므로 각각의 선재의 응용 조건에 따라 기계적 성질, 내구성과 임계전류 등을 극대화하기 위하여 선재의 적합 설계 및 형상등에 대한 연구가 필요하다.

3.2 향후전망.

국제 초전도 산업 정상회담(ISLS)의 전망에 의하면 초전도 관련분야별 현재 및 미래시장 점유율과 세계 시장 규모는 현재로는 세계 시장 규모가 15억 달러이나, 2010년경에는 약 .900억 달러로 급신장할 것으로 예측하고 있다. 따라서 급격히 늘어나는 초전도 전력 응용기기에 필수적인 고온 초전도 선재는 송전선 뿐만아니라 에너지효율을 극대화할 수 있는 대규모 전력 응용 기기의 기본재료로 사용되어져 에너지 사용량의 상당부분을 차지하는 산업체용 motor(>1,000hp), 변압기, 발전기, 한류기, 자기분리용 자석 등에서 막대한 에너지절감을 가져올 것으로 예측된다. 향후 이와 같은 전력 응용 기기 뿐만아니라, BSCCO 선재는 고기능성 재료로 무한한 잠재적인 가능성을 가져 차세대 전기, 기계분야, 의료 및 수송분야 등의 각종분야에 그 응용이 확대 되어질 것으로 전망된다.(그림 13)

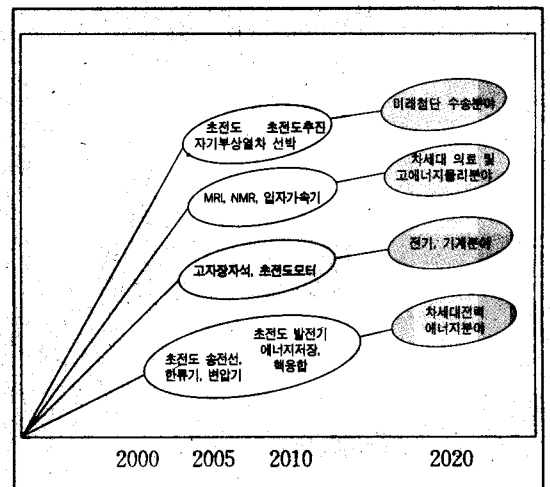


그림 13. 향후 BSCCO 선재의 응용가능분야

참고문헌

- [1] J.G. Bednorz and K. A. Muller, Z. Phys. B64, p.189, 1986.
- [2] M.K. Wu, J. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, U. Q. Wang and C.W. Chu, Phs. Rev. Lett. 58, p.908, 1987.
- [3] H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano, Jpn. J. Appl. Phys. 27, L209, 1988.
- [4] Z. Z. Sheng and A. M. Herman, Nature, 332, p.138, 1988.
- [5] S. N. Putilin et al., Nature, 362, p.226, 1993.
- [6] X. D. Wu et al., Appl. Phys. Lett. 65, p.1961, 1994.
- [7] A. Goyal et al., ibid. 69, p.1795, 1996.