

초전도 발전기 기술개발 동향

한국전기연구소
초전도응용연구팀
선임연구원 권영길

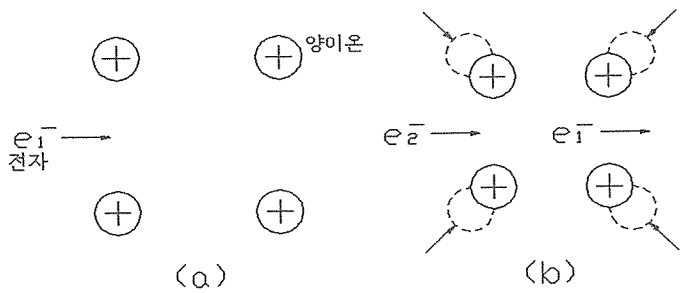
1. 초전도의 역사와 현상

가. 초전도의 역사

Leiden대학의 Onnes가 1908년에 1기압에서 비등점이 -269°C (절대온도 4.2K)인 헬륨의 액화에 성공한 후, 액체헬륨을 사용하여 극저온하에서의 각종 물질의 물성에 관한 실험을 행하던 중 수은이 4.2K에서 급격하게 전기저항이 영으로 되었다고 하는 초전도현상이 발견되어진 이래 다른 물

질이나 원소에 관해서도 많은 실험이 행하여졌다. 1913년에는 납(Pb)이, 1933년에는 니오븀(Nb) 등이 발견되어져 현재에는 20여종이상의 초전도원소가 확인되어져 있다.

1958년에 이르러 니오븀과 주석의 합금이 매우 높은 임계자장을 가지고 있다는 것이 발견되었는데, 이와 같은 종류의 재료를 제2종 초전도재료라고 부른다. 제2종 초전도체에는 금속원소 초전도재료의 일부, 니오븀-티탄, 납-비스무스 등의 합금계 초전도재료, Nb₃Sn, Nb₃Ge 등의 금속간 화



(그림 1) 양이온사이를 전자가 통과할 때, 양이온이 끌어 당겨지는 현상

합물계 초전도재료가 포함된다. 이것에 대해 제2종 초전도재료이외의 임계자장이 낮은 제1종 초전도 재료에는 니오븀, 납, 주석등의 금속원소 초전도재료의 대부분이 포함된다.

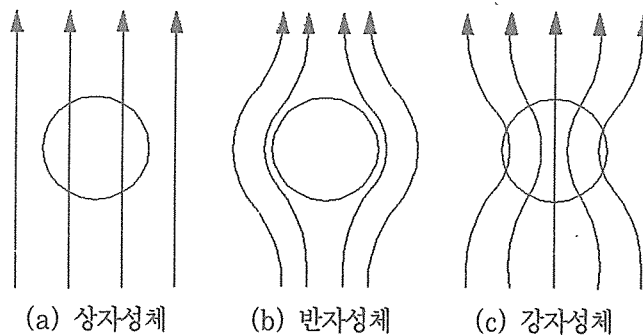
1973년에 현재의 금속계 초전도 재료 중에서 가장 임계온도가 높은 Nb₃Ge(23.2K)가 발견된 이래 거의 10년 이상 경과해도 이 임계온도를 초월하는 재료가 발견되지 못하다가 1986년 9월, IBM 쥐리히 연구소의 Bednorz와 Muller박사가 30K부근에서 초전도성을 나타내는 산화물 초전도 물질을 발견하였고, 현재에는 Y-Ba-Cu-O(90K), Bi-Sr-Ca-Cu-O(110K), Tl-Ba-Ca-Cu-O(125K) 등의 새로운 초전도물질이 발견되었다.

나. 초전도 현상

초전도 현상은 지금까지 BCS 이론에 의하여 설명되어 오고 있는데, BCS는 이 이론의 완성자인 J. Bardeen, L. Cooper, J.R. Schrieffer의 이름의 첫글자에서 따온 것이다. BCS 이론에 의하면 초전도 현상의 발현기구는 (그림 1)에 표시한

것과 같이 결정내부를 전자가 통과 할 때, 보통의 온도에서는 양이온으로 구성된 격자의 운동(진동)은 온도에 의한 진동과 비교하면 완전히 무시할 수 있을 정도로 작아 표면에 나타나지 않으나, 극저온에서는 격자의 운동이 없기 때문에 전자의 통과에 의해 양이온이 끌려 당겨져 서로 붙게되어 격자가 변형된다. 이 변형이 그 주위에 있는 전자에 작용하여 끌려 당겨 붙게되어(phonon작용이라고 함) 전자대(Copper pair)를 형성한다. 그래서 이 전자대의 운동량이 영이되고, 전자대의 수가 많게 되면 전 전자에너지가 최저의 상태로 되는 에너지갭이 생기게 되어 초전도상태로 된다고 하는 것이다.

BCS이론은 초전도 현상이 발견된 뒤 46년 후인 1957년에 완성을 보았으나, 1970년부터 1980년대의 전반에 걸쳐 그 때까지의 금속계 초전도재료의 연구로부터 무기화합물 또는 유기화합물 등으로 범위가 확대되었다. 이에 반해 BCS이론에 관해서도 연구할 만한 과제가 제기되어왔을 뿐만 아니라 1986년에 새로운 산화물 초전도체가 발견되어, 산화물 초전도체의 발현구조를 설명할 수



(그림 2) Meissner 효과((b), 완전반자성체)

있는 새로운 이론의 구축이 필요하게 되었다.

침투하지 못하는데 이것을 Meissner효과라고 한다(그림 2참조).

다. 초전도 현상의 특징

초전도 현상의 응용이라는 관점에서 그 특징을 간단히 살펴보기로 하자.

1) 전기저항이 영으로 된다.

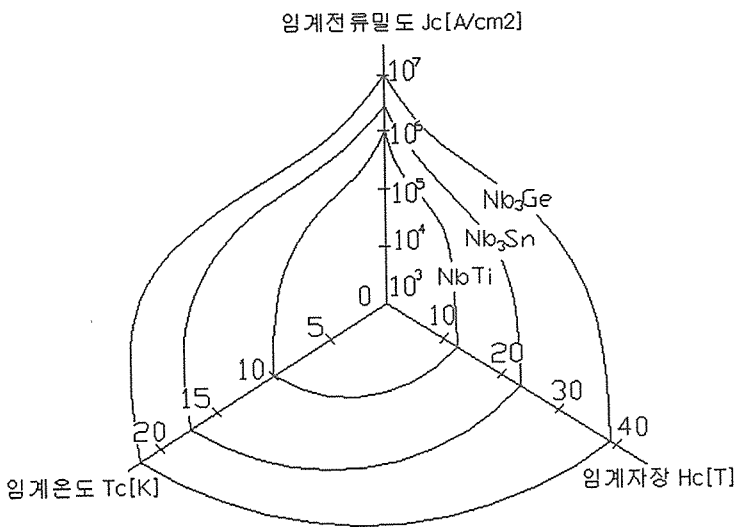
첫 번째의 특징은 어떤 임계온도 이하에서는 전기저항이 완전히 영으로 된다는 것이다. 따라서 저항이 영이기 때문에 전류를 흘려도 열이 발생되지 않고, 대전류에 의한 강자장을 발생시킬 수 있다.

2) 자력선을 배제하는 것

보통 어떤 금속을 자장중에 놓으면, 그 재료의 내부에 자력선이 통과하게 되나 초전도상태에서는 어떤 임계자장 이하에서는 재료내부에 자력선이

3) 임계온도뿐만 아니라 전류밀도 및 자계밀도의 임계치가 존재

전기저항이 영으로 되고 자력선이 침투하지 못한다고 하는 초전도 고유의 특징은 초전도재료의 고유의 임계온도 이하가 아니면 나타나지 않으나, 전류밀도 및 자계밀도에 관해서도 어떤 임계치를 초월하면 초전도성이 깨어지는 임계전류밀도 및 임계자계밀도가 있다(그림 3참조). 또한 초전도체에 자장을 인가할 때, 임계자장을 초월하면 자속이 한꺼번에 침투하여 초전도가 파괴되는 제1종 초전도체와 하부 임계자장에서 자속의 일부가 침입하기 시작하여 상부 임계자장에서 초전도가 파괴되는 제2종 초전도체의 2종류가 있다. 강자장의 발생에는 상부 임계자장이 큰 제2종 초전도체가 사용되어진다.



(그림 3) 각종 초전도체의 특성비교

위에서 기술한 초전도의 물리적 현상을 이용하면 타기술에서는 실용 불가능한 고자계의 실현이 가능하고, 종래의 도선에 비해 10배 이상의 전류를 고밀도화하여 초저손실로 흘리는 것이 가능하게 되며, 또한 완전반자성을 이용하면 자장이 우리가 원하고자 하는 영역에만 작용하도록 하는 자기실크(Magnetic Shield)의 구현이 가능하다. 이러한 장점들을 실용화하려는 연구들이 계속되다가, 1960년대에는 대전류와 강자계에서도 초전도성을 유지할 수 있는 실용적인 선재가 개발되어 강자계를 필요로 하는 고에너지 물리학 연구, 핵융합의 연구등에 이용이 되어졌다. 특히 최근에는 초전도·극저온기술의 진보가 두드러져 급속히 그 이용분야가 확대되어졌다. 이러한 응용기술과 극저온기술의 발전에 힘입어 전력 및 에너지분야에서도 초전도기술을 응용하게 되었으며, 이에 따라 발생하는 종합적인 효과들은 아래와 같이 서술할 수 있다.

- (1) 고효율화(저손실화)
- (2) 소형경량화
- (3) 대용량화(제한계용량의 확대)
- (4) 기기성능의 향상(발전기의 리액턴스 대폭 감소 등)
- (5) 신기술의 도입(핵융합, MHD발전, SMES등)

이러한 특징들을 이용하여, 종래기술의 한계를 극복하는 기술로서 발전, 에너지저장, 송전과 기타 전력응용(한류기, 변압기등)의 연구개발이 국내에서 현재 추진 중에 있다.

2. 초전도발전기 연구개발의 필요성

산업문명의 고도화와 에너지사용에 따른 환경오

염문제로 인하여 전체 사용에너지 중 전기에너지가 차지하는 비율이 크게 신장하고 있으며, 2030년 경에는 전체 사용 에너지중 전기에너지의 비중이 50%로 육박할 것으로 예상된다. 그리고, 그 수요 또한 폭발적인 증가가 예측됨에 따라(2010년에는 현재의 3.3배로 증가 예상) 가까운 장래에는 다음과 같은 전력 수급상의 문제점이 대두될 것으로 보여 이 문제를 해결할 수 있는 기술의 확보여부가 향후 국가적인 에너지문제 해결의 열쇠가 될 것으로 예상된다.

● 전원설비 용량의 대용량화 문제

전기에너지의 안정적인 공급을 위해 원자력을 중심으로 한 대용량 발전소의 확충과 전력설비의 대용량화로 기존 발전기의 한계를 극복할 수 있는 기술이 필요하며, 현재 기술로는 1,500MW가 제작 한계이나 향후에는 발전기 1기당 용량이 2,000MW이상까지도 필요할 것으로 예상된다.

● 전원 및 송전입지의 확보 문제

전원설비의 대용량화, 지역적인 편재화, 전력수송의 장거리화·대용량화에 따른 부지확보문제가 대두될 것으로 보여, 전원설비의 소형·경량화를 위한 신기술을 필요로 한다.

● 전기의 품질저하 문제

전원설비의 대용량화, 지역적인 편재화, 전력수송의 장거리화·대용량화에 따른 전력계통의 안정도와 수요지에서의 전압안정성 저하가 예상되는데 비해 미래에는 컴퓨터, 통신, 정밀 제조업 등과 같은 고품질의 전기를 요구하는 부하가 더욱 급증할 것으로 보여, 전력계통의 안정도향상을 위한 신기술을 필요로 한다.

● 지구환경의 오염문제

현재의 원자력을 제외한 화석에너지를 사용하는 전기에너지의 생성에 있어서는 반드시 CO₂가스가 배출되는데, 전기에너지의 사용의 증가는 더 많은 CO₂가스의 배출을 의미하며, 지구환경 보전을 위한 Green Round 협정에서 전산업분야에서 환경을 오염시키는 생산기술은 배제될 것으로 예상하고 있으므로 전기에너지 공급계의 효율향상을 위한 기술이 필요하고, 효율향상은 자원의 보존, 에너지소비의 억제 및 CO₂가스의 배출억제에 기여할 것으로 기대된다.

● 발전 원가상승으로 인한 전기요금 상승 문제

전원설비확충 및 용량 증대와 고가의 전원입지 확보등으로 인해 전기요금이 상승할 것으로 예상되며, 이것은 국민생활에 직접적인 영향을 줄 뿐만 아니라 제조업의 제조단가 상승으로 국제 경쟁력 저하를 초래하므로 전원 설비의 Cost절감을 위한 신기술을 필요로 한다.

이상과 같은 당면문제를 해결하기 위한 방법으로 발전기분야에 초전도기술을 도입할 수 있다.

3. 연구개발의 효과와 가능성

기존의 전기기술은 전기저항으로 인한 손실을 어떻게 하면 최적화시킬 수 있는가로부터 출발하는 기술이나 초전도기술은 어떤 종류의 재료를 저온으로 냉각하면 전기저항이 없어진다는 초전도현상을 이용한 것이기 때문에, 이 기술은 기존기술의 향상을 위한 연장선상의 기술이 아니고 새로운 차원의 혁신적 기술로 분류되고 이 기술을 전력기기에 적용하면 다음과 같은 잇점을 얻을 수 있다.

● 에너지 절약 효과

현재 발전기, 변압기, 송전선 등과 같은 전력설비에서의 7% 정도의 손실이 초전도로 인한 극저온 냉각시스템을 포함하여 1/2정도인 3.5% 정도까지 감소시킬 수 있다.

● 자원의 절약 효과

기기의 소형·경량화에 의한 재료자원, 가공에너지, 설치면적 등의 자원면에서 대폭적인 절약이 기대되며 초전도기술을 도입하면 동일 용량에서 중량 및 크기가 현재 설비의 1/2이하이며 이로 인해 제작비용도 저감될 수 있다.

● 고에너지밀도 효과

현재의 전력기기의 대용량화는 가공기술, 운반수송등의 면에서 대략 Scale merit의 최적화를 도모하고 있으나 미래의 전력계통의 확충을 위해서는 더욱더 설비의 대용량화가 요구되고 있는데 초전도기술은 고에너지밀도화가 가능하여 현재 설비와 동일한 크기에서 2배 이상의 용량확대가 가능하다.

● 고성능화 효과

미래의 전기에너지 시스템의 확대에서 기존 기술은 수만에서 백만볼트의 초고압화에 의한 방법 밖에 없으나 초전도기술은 수만볼트이하의 저전압에서도 대전류화가 가능하여 초고압에서 저압으로 전압을 내리기 위한 변전설비가 생략가능할 뿐만 아니라, 전력계통의 안정도 저하에 직접적인 영향을 주는 발전기의 리액턴스도 줄어들어 전력의 품질향상도 기대되는 등 전기에너지시스템에서 새로운 기능의 부여가 가능하다. 예를 들어, 초전도기술에서는 도심부의 초고압케이블 계통에서

154kV→345kV→765kV의 전압단계를 생략 22kV로 통일이 가능하다.

● 초전도발전기의 개발 효과

초전도기술은 세계 각국에서 향후 초전도기술의 도입에 따른 미래의 국가경쟁력 제고와 세계시장의 선점을 위해 그 나라의 특성에 적절한 고유의 개발 프로그램을 수립하여 국가가 집중적으로 지원, 관리하고 있다.

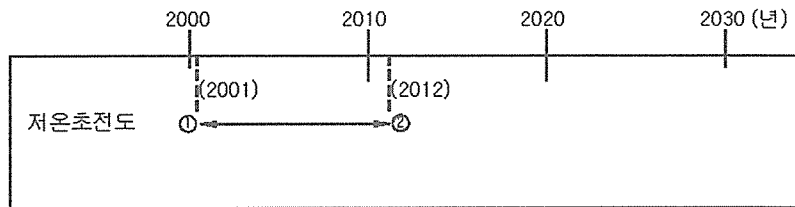
미국의 경우, 초전도기술의 국가경쟁력 향상을 위한 레이건 및 클린턴 특별법을 제정하였고, 일본은 중·참의원 약 130명으로 구성된 초전도산업의원연맹에 의하여 초전도 기술개발전략 수립 및 예산지원의 방향을 결정하였다.

이러한 초전도의 전기에너지분야로의 응용에 있어서 선도적인 역할을 담당하는 것이 발전기분야로의 응용으로 다른 어떤 분야보다도 기술의 파급효과가 지대할 뿐만 아니라, 상용운전 개시시기도 2010년 전후로 비교적 빠르고 그 도입규모도 커 세계 각국에서는 국가 전략적인 대형과제로 선정하여 장기적인 개발전략을 수립하여 연구개발에 정진하고 있다.

일본 통산성의 초전도기술응용분야 조사보고서에 따르면, 초전도발전기의 실용화 시기 및 도입 규모는 (그림 4)와 같다. 또한, 대표적인 국가과제의 예로서 일본의 통산성 주관 New Sunshine계획의 일환으로 시행되고 있는 “초전도발전기개발을 위한 초전도전력응용기술개발”을 들 수 있다.

초전도발전기는 다음과 같은 파급효과를 기대할 수 있다. 먼저, 손실절감효과로 도입량을 2030년까지 약 6만 8000MW로 예상할 경우에 2020년에는 240만kW(원자력 Unit 2기분)가 되고, 2030년에는 480만kW(원자력 Unit 4기분)가 된다. 또한 효율향상에 따른 연료절감 및 CO2배출가스 억제 효과를 기대할 수 있는데, 100만kW급 화력발전의 경우에 석탄 및 LNG를 연 8,000~16,000ton 절감할 수 있게 된다. 그리고 부지 및 송전선 건설비용 절감으로 연 평균 1,600억원 정도를 절약할 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 발전기 제조비용의 절감으로 기존발전기보다 경제성 우위 확보가 가능하다(표 1 참조).

일본의 초전도발전기 관련기기, 재료기술의 가능성 조사연구 보고서에 따르면 1980년대 말에 분석된 자료에서는 발전기용량이 600MVA에서나



※ ①은 기술적 실용화 시기, ②는 완전 상용화 운전개시 시기

※ 상용운전 예상 총규모 : 2~6 x 10⁴MW

(그림 4) 초전도발전기의 실용화 및 도입 규모

<표 1>

초전도발전기의 실용화 및 도입 규모

발전기용량 (MVA)	현재의 발전기 비용 추정치 (억원)	초전도발전기 비용 추정치 (억원)	비용비교 (초전도발전기/ 기존발전기)
300	160	176-224	1.1-1.4
600	240	224-264	0.93-1.1
1000	400	336-400	0.84-1.0

기존발전기와 비교하여 경제성을 가진 것으로 분석되었으나, 초전도발전기의 상용화가 개시되는 2010년 전후에는 100MVA에서도 경제성을 갖는 cost 저감기술이 개발될 것으로 예상된다. 또한 소형, 경량화, 대용량화 효과를 기대할 수 있어서 현재 발전기에 비해 중량 50%, 크기 60%로 소형화가 가능하고 제작용량의 한계가 없다. 그리고 신기술 도입효과로 인하여 핵융합, MHD발전, 초전도에너지저장, 기타 전력기기 등에 간접적인 기술 적용이 가능하다.

현재 우리나라도 전기기기 및 에너지, 의료, 과학 등 여러 분야에서의 초전도기술개발을 수행한 결과 MRI, NMR 등과 같은 일부분야에서 거의 기술적인 상용화 수준까지는 도달하고 있으며, 초전도발전기개발을 위해 필요한 기술 중 요소기술 개발을 목표로 한 실험적 규모인 20kW 급 초전도발전기를 개발한 경험이 있고, 현재 1MVA급 초전도발전기의 연구·개발이 진행되고 있다. 우리나라의 현재 전기에너지 수요증가 형태를 보면 초전도발전기의 상용화시기가 2010년에서 2015년 전후로 예상되고, 실제로 기술의 발전속도는 항상 예측보다 빨라 상용화시기도 앞당겨 질 수 있을 것으로 기대된다. 우리나라에서의 초전도발전기의 도입규모는 도입후 10년간 최소 약 2~3만

MW로 예측되고, 현재 국내에서도 초전도에너지 저장, 초전도케이블, 변압기, 초전도핵융합장치 개발 등의 연구가 수행되고 있는데, 향후 이들이 서로 연계되어 초전도 전력시스템으로 구축될 때는 계통연계특성에 따라 기존의 발전기도 초전도발전기로 대체되어야 하는데 이 때를 대비하여 타분야의 연구와 병행하여 초전도발전기 개발, 연구가 더욱 필요하다.

4. 국내외 기술개발 현황

가. 국외 기술개발 현황

초전도의 전기에너지 분야로의 응용에 있어서 선도적인 역할을 담당하는 것이 발전분야로의 응용으로 이는 다른 어떤 분야보다도 기술의 파급효과가 지대하여 세계 각국에서는 국가전략적인 대형과제로 선정, 장기적인 개발전략을 수립, 연구개발에 정진하고 있다. 이러한 초전도발전기는 전력계통에 도입될 최초의 초전도기기로서 예측되고 있고, 1970년대부터 미국, 일본, 프랑스, 독일, 러시아에서 활발한 연구 개발이 진행되고 있다. 현재 독일에서는 출력 120MVA급의 연구개발이 진행되고 있으며, 러시아에서는 20MVA급의 개발

에 성공한 후 300MVA급을 제작하여 1989년에 액체질소로써 냉각시험을 행하였으나 축실(seal) 부에서의 열침입이켜서 현재 대책중에 있다. 또한 미국에서는 EPRI와 Westing House가 공동으로 300MVA급의 개발에 성공하였고, 아울러 MIT에서 10MVA급의 개발을 진행하여 1991년 극저온 정격 회전시험에 성공하였으며 다음 단계로 발전기시험을 준비중에 있다. 그리고 프랑스에서는 20kVA 전초전도발전기의 극저온 정격회전속도의 시험이 1989년에 완료되어, 현재 이것과 초전도 변압기, 초전도 에너지 저장장치와 조합된 초전도

발전시스템의 구조를 설계 중에 있다.

일본에서는 Super-GM(초전도발전관련기기·재료기술연구조합)이 1988년도부터 통상산업성공업기술원 New Sunshine 계획의 일환으로서, 신에너지·산업기술종합개발기구(NEDO)에서의 위탁을 받아 20만kW급 초전도발전기(파이롯드기)를 목표로 한 7만kW급 모델기의 연구개발을 진행하고 있으며, 계자전류 제어방법이 다른 2기종(저속응여자형과 초속응여자형)의 모델기를 시험기로서 개발하여 실부하운전시험과 사고를 상정한 과도시험을 포함한 현지실증시험을 1996년경에

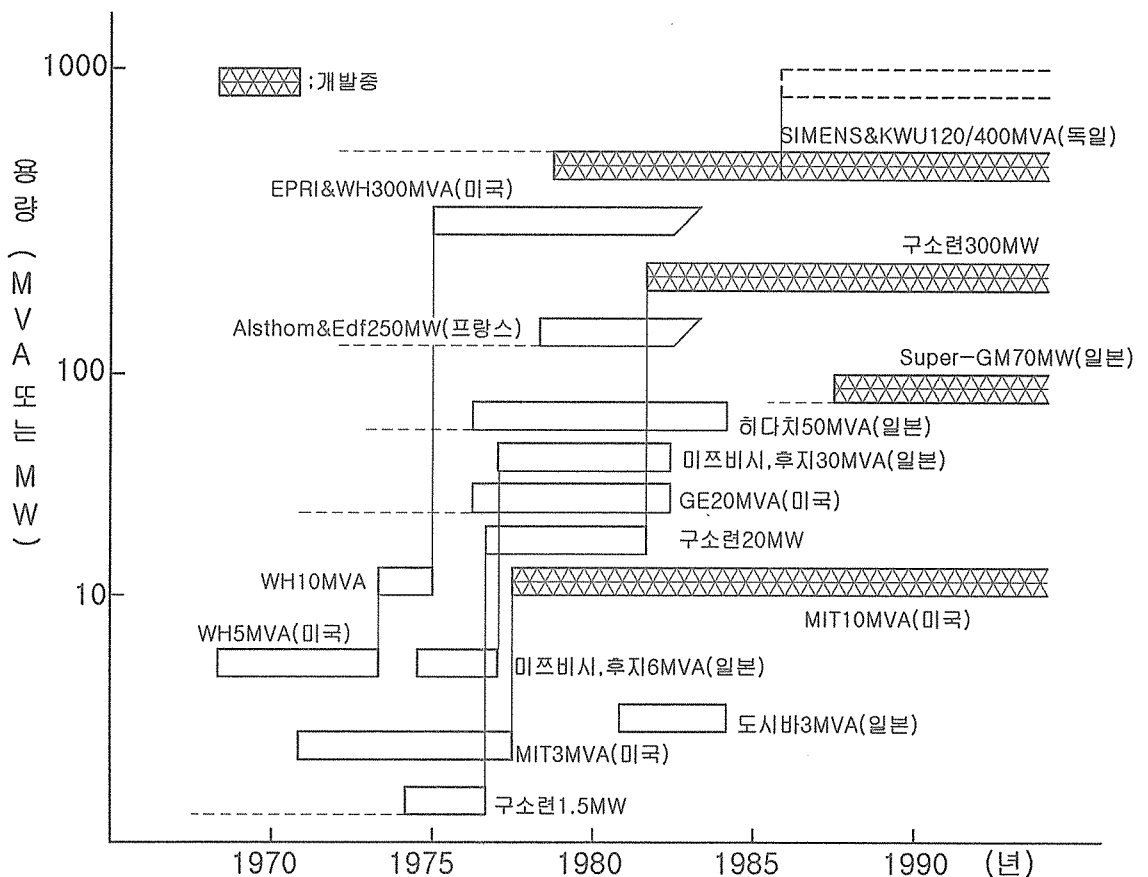


그림 5 . 초전도발전기의 국외 개발 현황

오사카의 간서전력 발전소에서 행하였다. 현재 장 기부하운전시험이 성공적으로 끝난 것으로 알려져 있으며, 향후 실계통에 투입될 300MW, 600MW, 1000MW급을 설계하고 있다. 그림 5에 초전도발전기의 세계적인 개발현황을 정리하여 나타내었다.

나. 국내의 기술개발 현황

국내에서는 기초전력공학공동연구소에서 20kVA급의 시작연구를 목적으로 초전도발전기의 특성연구, 개념설계, 해석기법연구 등의 기초연구가 수행된 것이 전부였으나, 1996년부터 한국전기연구소를 중심으로 1MVA급 초전도발전기 개발을 시작하여 이번에 30kVA급의 시제품 개발에 성공한 것을 큰 성과로 들 수 있다.

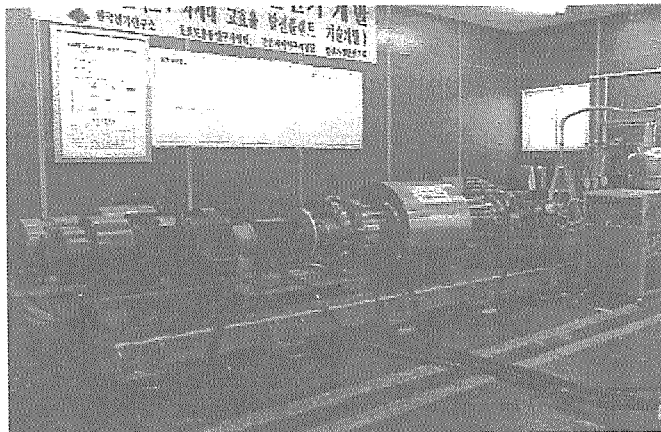
● 20kVA급 초전도발전기의 개발

1988년부터 한국전력공사 기술연구원의 수탁과제로 기초전력공학공동연구소에서 제 1단계 연구가 시작되었다. 1991년까지 4년에 걸쳐 수행된

이 단계에서는 초전도발전기의 특성해석 및 요소설계기법과 제작 및 특성시험을 다루었다. 그리고 1991년부터 1994년에 걸친 제 2단계에서는 상세설계, 제작 및 특성시험을 실시하여 초전도발전기 개발 기반을 구축하였다.

● 30kVA 초전도발전기의 개발

최종 연구목표인 1MVA급 초전도 발전플랜트를 개발하기 위하여 과학기술부의 Star-Project의 일환으로 1996년 11월 1일부터 한국전기연구소에서 연구를 수행중에 있다. 97년 10월 31일까지의 1차년도 과제 수행 중에는 1MVA급의 초전도 발전플랜트의 개발에 앞서 1차 시제품으로 제작하고자 하는 30kVA기의 설계가 진행되었고, 2차년도에 상세설계와 제작이 완료되어 현재 발전기의 기본특성 시험이 성공적으로 완료된 상태에 있다. 또한 이 기간중에 차기 3차년도와 4차년도에 개발·제작될 1MVA기의 개념설계가 진행되었다. 시제품으로 제작된 발전기의 사양을 <표 2>에 정리하였고, (그림 6)은 개발된 발전기 구동부와 제어부 및 발전기의 전체 조립된 형태를 보여주고



(그림 6) 개발된 초전도발전기와 그 구동부

있다.

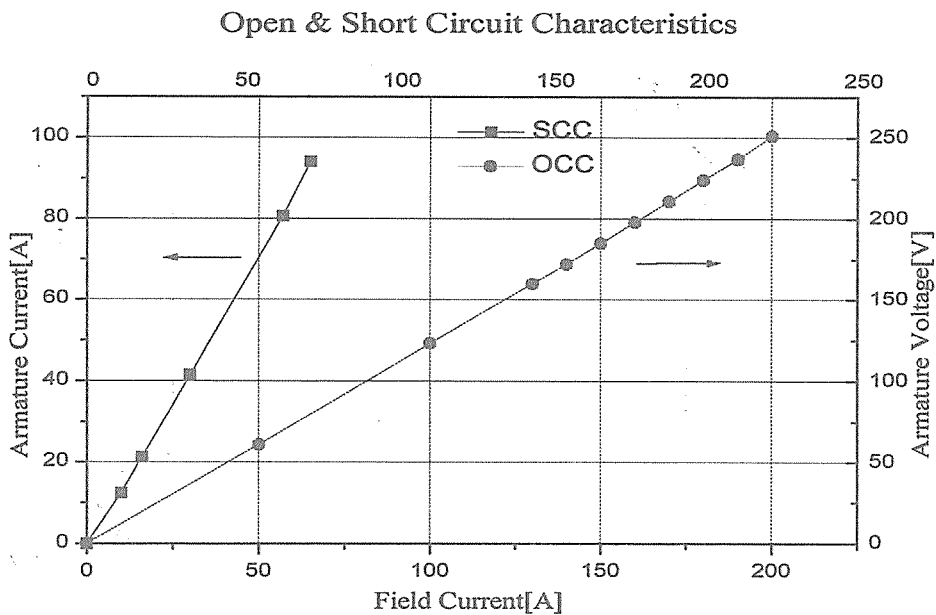
이번에 개발된 30kVA기는 초전도화되는 계자코일이 Race-track 형상을 띄고 있어서 직선부에서 코일 간의 진동으로 인한 켄치가 발생할 우려가 있기 때문에, 발전기의 특성에 거의 영향을 주지 않는 범위에서 이 직선부를 곡면화하여 제작하였다. 이러한 직선부 변형효과는 실험으로 입증되었다.

발전기의 구동을 위해서는 37kW의 유도전동기와 이 전동기의 속도제어를 위하여 VVVF 제어장치가 설치되었다. 또한 액체 질소와 헬륨냉각시의 계자코일의 냉각을 원활히 하기 위하여 15rpm으로 계속해서 회전자를 회전시킬 수 있도록 저속모터가 벨트로 구동축과 연결이 되었다. (그림 6)에서와 같은 수평형의 초전도발전시스템의 경우, 수직형의 초전도 발전시스템과는 달리 1차로 액체질

〈표 2〉

시제품 발전기의 사양

출 력	30[kVA]
전 압	220[V]
극 수	4극
주 파 수	60[Hz]
역 률	0.9[lagging]



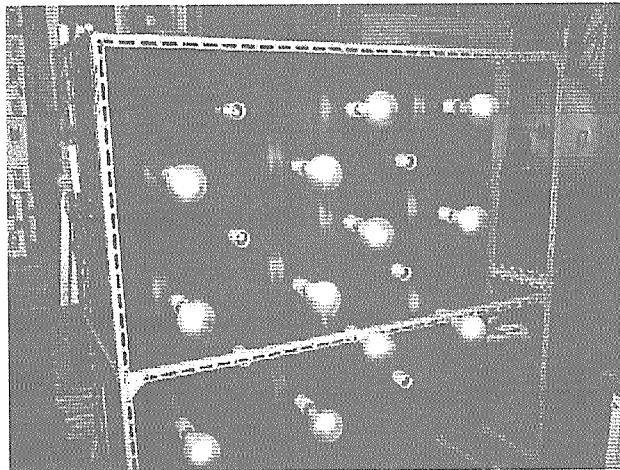
(그림 7) 시제품발전기의 전기적 특성 곡선

소 냉각후 냉매를 곧바로 빼내는 것이 불가능하기 때문에 냉매가 완전히 증발할 때까지 따뜻한 헬륨 기체로 극저온 용기내의 온도가 약 200K가 될 때까지 가열한 후에 다시 액체헬륨으로 냉각시켜 주어야 한다. 실험을 통한 발전기의 기본적인 전기적 특성인 개방과 단락시험의 결과 곡선을 (그림 7)에 보인다.

현재의 상태로 내부의 냉각시스템이나 전기적인 시스템에는 여러차례의 실험을 통하여 별다른 문

제가 없는 것으로 보여진다. 앞에서 설명한 것과 같이 지금까지 정상상태에서의 개방시험과 단락시험은 완전히 끝난 상태이고, 단자전압의 파형분석 결과 기존의 발전기보다 훨씬더 정현파에 가까운 파형을 얻을 수 있었다. 부하는 현재 9kW의 전등 부하를 연결하여 실험을 완료한 상태이며 (그림 8)에 500W의 백열전등 12개를 단자전압 220V에서 점등시킨 것을 보여주고 있다.

현재 지금까지의 이러한 연구결과를 토대로하여



(그림 8) 부하시험 중 사용된 6kW의 전등부하

발전기의 파라메들을 구할 수 있는 시험을 계속할 계획이며, 본 프로젝트의 최종목표인 1MVA급 초전도발전기의 상세설계와 제작 및 특성시험을 준비 중에 있다.

5. 초전도발전기의 기술 분석

가. 초전도발전기의 기본 개념

초전도 발전플랜트는 크게 초전도발전기와 발전

기 제어, 보호, 감시용 계전 시스템과 차단기, 변압기 등의 계통연계용 부대장비를 총괄하는 개념으로 초전도발전기가 도입됨으로써 현용 발전기가 설치된 기존의 발전플랜트와는 상이한 새로운 핵심기술의 개발을 필요로 한다. 초전도 발전플랜트의 핵심부인 초전도발전기는 기존 발전기의 계자코일을 초전도화한 것으로서 원리적으로는 기존의 발전기와 동일하나 초전도선에 대전류를 손실없이 통전함으로써 강자계를 발생시켜 저 동기리액턴스화, 대용량화, 소형화, 고효율화를 추구할 수 있는

반면에 구조적으로 초전도 계자코일을 냉각하기 위한 복잡한 냉각시스템 및 단열구조가 필요하다.

〈표 3〉 초전도발전기와 현용 발전기의비교

			초 전 도 발 전 기	현 용 발 전 기
회 전 자	계 자 권 선	종 류	초 전 도 선	상 전 도 선
		냉 각 매 체	액체헬륨 (-269℃)	수소가스 (45~110℃)
	회 전 자 축	재 료	비 자 성 강	자 성 강
		구 조	다중원통진공단열구조	단 일 축 구 조
고 정 자	전 기 자 권 선	종 류	상 전 도 선	상 전 도 선
		구 성	세 선 이 중 전 위	평각 동선 레벨 전위
		냉 각 매 체	물	물
		권 선 방식	空 隙 권 선	철 심 슬롯트내 권 선
	전 기 자 권 선 외 주		자 기 실 드	철 심

초전도발전기의 구성은 기본적으로 기존 발전기와 같으나 계자코일에 기존의 Cu도체 대신에 초전도도체를 사용하기 때문에 발전기의 구조가 매우 상이하다(표 3 참조).

발전소의 동기발전기는 일반적으로 계자코일로 이루어진 회전자와 전기자코일로 이루어진 고정자로 구성되어 있고, 그 출력은 출력계수(k) x 회전수(rpm) x 발전기체적에 비례하고 출력계수는 공극자속밀도(Bo)와 고정자내 Ampere도체수(Ac)에 비례하며 동일체적 및 회전속도에서 출력을 향상시키기 위해서는 k값 즉 Bo 또는 Ac를 크게 하여야 한다.

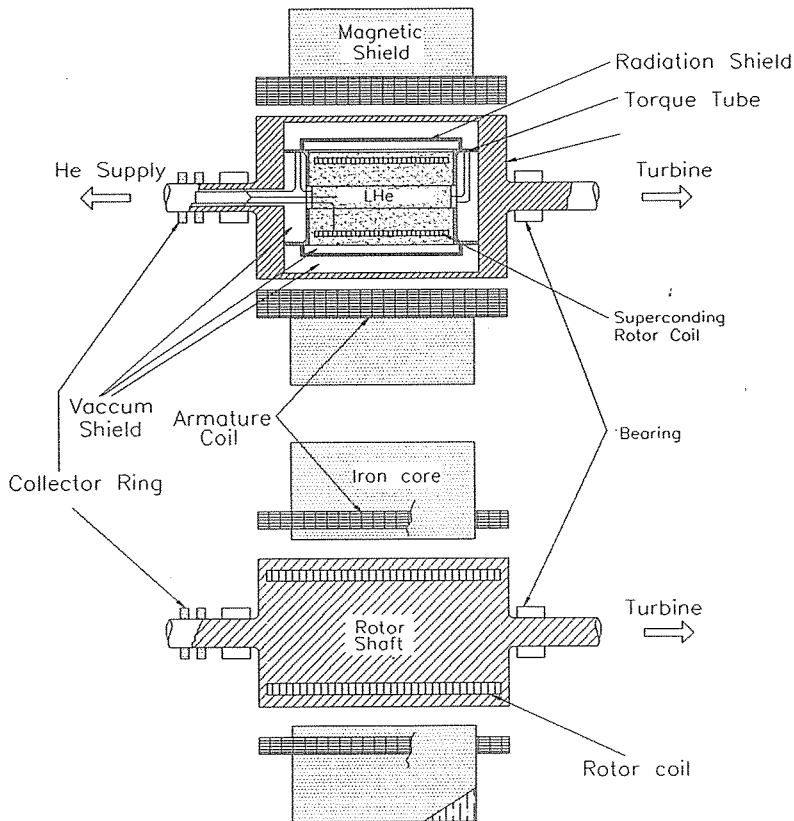
기존의 발전기는 철심을 사용하므로 철심의 포화 자속밀도 때문에 Bo를 1Tesla(10000Gauss) 이상 크게 못해 Ac를 높이는 방향으로 연구하고 있는데, 근래 도체의 허용전류밀도를 최대한 이용하기 위한 냉각기술로 수소가스 냉각방식을 채용하고 있다. 그러나 초전도발전기는 철심이 없는 초전도코일을 이용하는 관계로 Bo만으로도 현재기술로 20Tesla까지도 발생시킬 수 있을 뿐만 아니라 계자에서 발생된 자속의 영향을 받는 전기자코일에서도 철심을 사용하지 않아 그만큼 도체수를 증가시켜 Ac를 크게 할 수 있다.

〈표 4〉 초전도발전기와 현용 발전기의 출력계수 비교

발 전 기 의 형 태	출 력 계 수
기존발전기(회전자 수소냉각, 고정자 물냉각)	6
초전도발전기	10-14

〈표 5〉 초전도발전기와 현용 발전기의 크기 및 중량 비교(1000MW의 발전기 제원 비교)

		기 존 기	초 전 도	비 고
크 기	회 전 자 길 이	12-13m	6-8m	약 1/2
	고 정 자 길 이	≈8m	≈5m	약 40%
	축 수 길 이	13-15m	8-10m	약 40%
중 량	회 전 자	60-100ton	30-50ton	약 1/2
	고 정 자	500-600ton	250-300ton	약 1/2
	총 중 량	560-700ton	280-350ton	약 1/2



(그림 9) 기존발전기와 초전도발전기의 구조비교

(상: 초전도발전기 하: 기존 발전기)

〈표 4〉는 발전기의 형태에 따른 출력계수를 비교한 것으로 초전도발전기가 기존 발전기와 비교해서 동일체적에서도 2배 이상의 출력을 낼 수 있음을 뜻하고 동일 출력에서는 크기를 반으로 줄일 수 있음을 의미한다(표 5 참조).

(그림 9)에서는 초전도발전기와 현용 발전기의 기본 구조를 비교하여 나타낸 것으로서 앞서도 언급한 것처럼 계자코일을 초전도화함으로 계자코일의 냉각을 위한 액체헬륨 공급계를 특징적인

상이점으로 들 수 있다.

나. 주요 핵심기술

표 6에 초전도발전기 개발을 위한 주요 핵심기술을 요약하여 나타내었으며, 주요기술 내용별로 각종 첨단 요소기술을 우선적으로 개발하여야만 초전도발전기를 성공적으로 개발할 수 있는 첨단, 복합, 대형 기술이라는 것을 알 수 있다.

〈표 6〉

초전도발전기 개발을 위한 주요 핵심기술 분석

주요기술내용	연구 개발 내용	중요도	난이도
발전기용 대용량 초전도선재 개발	<ul style="list-style-type: none"> 저손실안정화도체의 설계, 제작기술연구 대용량도체의 구조 및 제조기술연구 교류손실평가기술 퀵치보호기술 	대 대 대 대	B B B C
초전도계자권선 개발	<ul style="list-style-type: none"> 회전장에서의 여자특성유지기술 (냉각법, 전기절연법, 지지법의 개발) 도체권선법과 절연 지지법연구 계자권선의 냉각 및 안정성연구 	대 대 대	A B B
Torque Tube개발	<ul style="list-style-type: none"> 축방향 열수축 해석 및 해결책개발 다중원통 회전자의 진동특성 해석 정밀가공 및 조립기술 개발 	대 중 중	B C B
Damper개발	<ul style="list-style-type: none"> 과도특성해석 및 개선책 마련 고강도 Damper재의 개발 Damper의 제작기술개발 	중 대 중	B A B
냉각시스템 및 헬륨공급장치개발	<ul style="list-style-type: none"> 계자권선의 유효냉각기술개발 회전자의 최적냉각기술 개발 자성유체에 의한 헬륨 Shield기술개발 액체헬륨의 열침입해석 및 감소기술개발 헬륨공급장치의 신뢰성 확보기술개발 	대 중 대 중 중	B C C C B
여자장치개발	<ul style="list-style-type: none"> 최적 여자방식 연구 계자전류제어법 개발(초속응여자법) 전류도입선 개발 	중 중 대	C B B
공극전자자코일 개발	<ul style="list-style-type: none"> 고전류밀화기술개발 과대전자력의 지지기술 개발 정밀제작 및 조립기술개발 	중 대 중	B B C

6. 앞으로의 전망

가. 실용화를 위한 중요 기술문제 및 해결방안

초전도계자권선을 이용하는데 있어서는 반드시 계자권선이 수납된 회전하는 회전 원통내에 냉각을 위한 액체헬륨(LHe) 등과 같은 저온냉매를 사용하기 때문에 단열된 저온냉매용기가 필요하게 되고, 이 용기내로 상온의 외부로부터 LHe이 주입되는 주입관이 연결되는 관계로 300K의 상온과 4.2K의 극저온 사이에서의 기계적인 열수축 및 열절연문제를 해결한 특수한 헬륨급배장치를 개발하는 것이 관건이다. 선진국에서는 이 헬륨급배장치를 개발하여 2000시간 이상의 연속 초전도발전기 운전시험(실용화기술의 95%수준)을 성공한 관계로 우리나라도 본격적인 연구에 의해 해결될 수 있을 것으로 생각된다. 헬륨급배장치를 통해 회전자 원통내부(더 자세하게는 계자코일로 둘러 쌓인 원통의 공간내)로 주입된 LHe이 회전자의 원심력과 자연대류에 의해 원통내부에서 계자코일 쪽으로 유입되도록 하고(이때 원통내 중심부에는 LHe이 기화되어 발생하는 기체헬륨(GHe)이 존재), 계자코일의 운전에 따라 발생하는 GHe은 다시 헬륨급배장치를 통해 회전자내부로 순환되는 방법으로 운전한다.

현상에서 실용화를 위해 앞으로 해결해야 될 수 많은 기술 중 상기와 같은 냉각 방법의 장기운전시의 신뢰성문제가 중요하며, 이외에도 발전기 용 대용량 초전도선재, Torque Tube, Damper

등의 연구개발이 필요하다.

나. 향후의 전망

미래의 발전소의 입지, 전력계통의 운용 등을 고려하면, 도시근교의 발전기는 계통 전압의 유지 기능이 중요하고, 복합 발전플랜트 등의 경제성에 중점을 둘 것으로 예측됨에 따라 저속응형의 중소용량기(20~60만kW)의 초전도 발전플랜트가 도입될 것으로 예측된다.

원격지에 설치된 화력, 원자력발전소 등에서는 급격한 전압변동에 대응할 수 있고, 전력계통의 안정도 향상 등의 전력시스템의 신뢰성 향상, 송전비용의 저감 등을 도모하는 대용량기(60만kW 이상)의 초전도 발전플랜트가 도입될 것으로 예측된다.

선진국에서의 분석에 의하면 2005년 이후부터 순차적으로 초전도발전기가 도입될 것으로 전망되고 있으며, 발전기로서 뿐만아니고 우수한 전압유지특성을 이용하여 계통전압제어용의 동조기로서도 실용화 될 것으로 전망하고 있다.

〈표 7〉에 초전도발전기의 단계적 실용화 전망을 나타내었으며, 초전도발전기의 실용화 전망에 비추어 국내에서도 관련 연구기관 및 산업계와 유기적인 연구체계를 구성하고 국가적인 연구개발 계획을 수립하여 효율적이고 체계적인 연구개발을 수행하여 실용화에 착실히 대비해야 할 것으로 판단된다.

<표 7>

단계별 실용화 전망

