



초전도응용기술의 현황과 전망



전기전자표준팀 공업연구사 이응로
02-509-7295 erlee@mocie.go.kr

1. 머리말

1911년의 헬륨액화 성공과 더불어 그 당시의 온도 측정에 사용된 수은이 저항제로를 나타냄으로써 초전도현상이 발견되었다는 사실은 유명하다. 그 후 많은 금속원소가 초전도를 나타냈는데 당초 계획했던 대전류·고자계를 나타내는 초전도체는 구할 수 없었다. 그 후, 연구개발과 새로운 초전도체가 발견 되었고 상품화된 초전도 응용제품이 탄생되었다.

또한 저항제로 이외에 초전도체, 절연체, 초전도체의 샌드위치구조에서의 터널효과가 발견되어 전압표준 장치, 정밀자속계로 실용화되고 있다.

본 특집에서는 이 주요 응용기술에 관한 기술동향이 상세하게 해설되어 있다.

여기서는 그와 같은 초전도응용기술의 공통적인 사항과 그 응용에 관한 전망을 설명하기로 한다.

2. 초전도체

머리말에서 설명한 바와 같이 1911년에 수은에서 초전도 현상이 발견되었지만 그 가능성 있는 응용으로의 대전류 및 고자계성을 달성되지 못했다. 초전도체는 온도, 주위자계, 전류의 특정범위(그 한계를 각각 임계온도, 임계자계, 임계전류라고 한다)에서 초전도성을 나타낸다는 것, 또한 2종류의 초전도체가 있는 것을 알 수 있었다. 그것을 제1종 초전도체와 제2종 초전도체라고 한다. 제1종 초전도체는 임계자계 이상의 자계에 대하여 즉시 초전도성을 상실하는 것



을 일컫는다. 제2종 초전도체는 특정 자계 이상의 자계(이를 하부임계자계라고 한다)에 대하여 자계의 일부를 초전도체 내에 침투시키면서 초전도성을 유지하여 하부임계자계보다 훨씬 높은 자계에 대하여 초전도성을 상실한다. 이 자계를 상부임계자계라고 한다. 수은 등의 금속원소 대부분은 제1종 초전도체이며 매우 낮은 자계에서 초전도성을 상실하지만, 금속원소 중 Nb와 V는 제2종 초전도체로 비교적 높은 자계에서도 초전도성을 상실하지 않는다. 따라서 대전류 및 고자계응용의 초전도체는 제2종 초전도체라는 것이 필수이다.

액체 헬륨온도(4.2K) ($OK = -273^{\circ}C$)를 이용하는 제2종 초전도체로서 NbTi가 넓게 이용되고 있다. 더 높은 고자계용으로 Nb₃Ge의 개발도 실시되고 있다. 이상과 같은 초전도체를 아래에 설명하는 고온초전도체와 반대되는 개념으로 저온초전도체로 불린다.

한편, 1986년 발견된 산화물 초전도체는 임계온도가 액체 질소의 비점(沸点)(77K)보다 높아 고온초전도체라고도 불리며 그 임계온도가 높기 때문에 폭넓게 응용이 기대되며 아래에서 보여주는 것과 같은 초전도체와 초전도선의 개발이 진행되고 있다. 이들은 모두 초전도성에 이방성이 있어 2차원 초전도체로 불리고 있다. 이 중에서 Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀은 Bi2223으로 불리며 은안에 삽입되어 압연을 통해 직사각형 방향으로 초전도성을 나타낼 수 있으며 Bi계 은시스(Sheath) 선으로 불리며 장척선이 개발되고 있다. 또한 Bi₂Sr₂CaCu₂O₈은 Bi2212로 불리며 Bi2223보다 임계온도는 낮지만 저온에서의 고자계성이 풍부하다는 점, 결정이 비교적 간단하게 만들어져 있기 때문에 선재개발과 그 응용연구가 진행되고 있다. 게다가 YBa₂Cu₃O₈은 Y계라고 불리며 Y를 희토류(예를 들면 Sm)로 치환하여 RE계로 불린다. 이 임계온도는 Bi2223보다 낮지만 자계특성이 좋기 때문에 제2세대 초전도체로 불리며 그 개발이 크게 기대되고 있다. 현재는 아직 길이 200m 정도의 선재이지만 그 장척화

개발이 적극적으로 실시되고 있다. 또한 Y계 초전도체는 벌크(덩어리)로 사용할 수 있고 게다가 영구자석보다 훨씬 높은 자속밀도를 유지할 수 있기 때문에 벌크응용도 이루어지고 있다.

또한 2001년에 청산(靑山)학원의 추광(秋光)교수에 의해 금속계에서 임계온도가 30K를 초과하는 초전도체 MgB₂가 발견되어 금속이라는 점, 간단한 화합물이라는 점, 재료가 싸다는 점 등 때문에 현재 응용연구용으로 개발이 진행되고 있다.

이상은 대전류·고자계 응용에 관한 초전도체·초전도선에 관해 설명했다. 한편, 상술한 바와 같은 샌드위치구조에 있어서 초전도전자의 터널효과(이것을 조셉슨효과라고 한다)에 있어서 접합부에 걸리는 전자파의 주파수 관계 등에서 전압표준으로 사용되고 있다. 또한 접합부의 자계와 터널전류의 위상과의 관계에서 상당히 미세한 자계측정에 이용된다. 또한 조셉슨결합(샌드위치 구조)의 단자를 단락시킨 루프의 자속을 이용하여 논리회로 등 디지털회로가 만들어져 고속연산이 가능하게 되어 조셉슨 컴퓨터 연구개발이 이루어지고 있다.

또한 제1종 초전도체에서는 초전도성을 나타낼 때, 그리고 제2종 초전도체에서는 하부임계자계 이하에서, 초전도체는 완전반자성체(자속을 내부에 침입시키지 않는 투자율0)이며 자기 차폐에도 응용된다.

이상의 사항에서

- 완전 도전성(저항이 0)
- 완전 반자성
- 조셉슨 효과

로 초전도체를 정의하는 경우가 있다. 1986년 이후 차례로 새로운 초전도체가 발견되었을 때 초전도체의 동정에 사용되었다.

3. 저온이용에 관하여

사용되는 초전도체가 고온초전도체라 하더라도 저



온에서 사용된다. 저온에 관하여, 저온에서의 물질의 동작과 저온을 구하는 것에 관해 설명하기로 한다.

저온에서는 물질의 열용량이 거의 온도의 4승에 비례한다고 한다. 따라서 초전도체의 열용량도 상당히 작아진다. 액체헬륨 온도를 사용하는 저온초전도체에서는 그 약간의 이동에 의해 온도가 크게 변하여 초전도성을 상실한다. 게다가 안정화 기술이 발전하여 동(銅) 등의 저 저항에서의 열전도도가 높은 금속(이것을 안정화재료라고 한다)으로 감싸고 있는 초전도선체가 개발되어 현재 수T 정도의 안정된 마그넷(magnet)이 상품으로 제작되고 있다.

고온초전도체에서는 사용 온도가 액체질소(77K)이며 그 자체의 열용량이 크다. 이것은 큰 장점인데 그것이 상전도 전이를 하였을 때 열이 저장되어 소손(燒損)되는 경우가 있다. 이 장점을 이용한 것이 벌크 초전도체이며 이것은 저온 초전도에서 불가능하다.

한편, 저온을 위해 저온제조가 필요하다. 액화기를 이용하여 액체헬륨이나 액체 질소를 만들고 그것으로 냉각하는 방법, 액체헬륨이나 질소와 초전도체를 넣는 용기(이것을 크라이오스탁트라고 한다)에 냉동기의 저온부를 넣고 증발가스를 재응축시키는 방법, 그리고 액체헬륨 등의 한체(寒劑)를 사용하지 않고 전도 냉각으로 냉각하는 방법 등 냉각관계의 진보가 두드러진다.

4. 응용기술

응용기술은 초전도의 특징인 저항이 제로라는 점을 이용하는 것과 조셉슨 효과를 이용하는 것으로 크게 나눌 수 있다.

저항이 제로라는 것을 이용하는 데에도, 대전류가 흐르는 것을 이용하는 것과 저항제로에 의한 공진회로의 높이 Q를 이용하는 것으로 나눌 수 있다. 후자는 일렉트로닉스 분야에서 높은 주파수의 필터나 안테나에 이용되고 있다.

전자의 이용 범위는 매우 넓어 산업응용, 의료응용, 에너지응용으로 나눌 수 있다. 그 대부분이 초전도 마그넷 이용이다.

초전도 마그넷은 무손실이며(초전도 마그넷 자체의 손실은 제로이지만 크라이오스탁트에서의 열침입 등의 손실이 있다) 높은 자계를 공간에 발생시킨다는 점, 또한 마그넷을 여자한 후 단자를 단락하여 영구전류 모드로 만드는 등 장점이 많다. 영구전류 모드는 전류 단자에서 마그넷까지의 리드선(이것을 전류리드나 파워리드라고 한다)으로부터의 열 침입을 없앨 뿐 아니라 제어없이 전류를 일정하게 만드는 장점이 있다.

4.1 산업응용

산업응용에 관하여 본 특집에서 전동기, 리니아모터, 자기분리를 다루고 있다. 이들은 연구개발이 진행되어 리니아모터나 자기분리는 실용화 직전까지 와 있다. 전동기에 관해서는 저온초전도를 이용한 직류단극기의 연구개발이 1960년 후반에 진행되었고 군사용(전기추진선)이라서 실용화되었는지의 여부가 불확실하지만 영국 IRD(International Research and Development)에서 생산 라인이 구축되어 있다.

그 밖의 응용으로, 반도체 결정 인상장치용으로 초전도 마그넷 자체(磁界)를 이용하는 것이 실용화되고 있다.

또한 뒤에서 설명할 의료의 MRI(Magnetic Resonance Imaging)와 같은 원리인 핵자기공명(자기 내 원소의 자기공명을 이용) NMR(Nuclear Magnetic Resonance)이 개발되어 물질 분석에 이용되고 있다. 재미있는 사례로, 수박의 숙성도를 검사하는 장치의 개발이 이루어졌다.

4.2 의료응용

의료용으로 실용화되고 있는 것은 MRI 의료진단 장



치이다. 이것은 자계의 강도에 따라 원소의 재차운동을 일으킬 때의 주파수를 측정하여 그 분포를 알아냄으로써 의료 진단을 하는 장치이다. 초전도 마그네틱 장점과 고자계를 넓은 공간에 발생시킬 수 있다는 것, 영구전류 모드를 이용하여 제어없이 일정전류를 구할 수 있다는 점 등을 잘 이용한 것이다. 저온초전도를 이용한 것으로 재응축을 이용한 냉각을 하고 있는 경우가 많다. 이용자에게 초전도나 저온을 사용하고 있다는 의식 없이 사용되고 있으며 초전도 상품화의 우등생이라 할 수 있다.

그 밖에 조셉슨효과를 이용한 자속계(SQUID)를 이용하여 뇌 등의 자속을 측정하여 진단에 이용하는 시도가 이루어지고 있다.

4.3 에너지응용

에너지응용은 에너지발생에 대한 응용과 발전응용으로 나누어진다.

(1) 에너지 발생

에너지발생에 대한 응용은 자기감금형 핵융합에의 초전도 마그네틱 응용과 MHD 발전용 마그네틱이다. 후자는 고온유체에 자계를 걸어 그 유체에 전력발생을 일으킬 때의 마그네틱으로 응용된다. MHD는 복합발전 토퍼로(고온에서 MHD 발전, 그 아래 온도에서 가스터빈, 그 아래 온도에서 증기터빈) 개발되어 왔는데 고온재료의 과제 등 많은 과제를 가지고 있어 연구기관도 줄어들고는 있지만 개발이 계속 이루어지고 있다.

(2) 핵융합로

핵융합은 미래 에너지로서 연구개발이 진행되고 있다. 이 때 사용하는 고온 플라즈마를 자기를 이용하여 감금하기 위해 상온 마그네틱에서는 그 소비전력이 발생에너지를 상회하기 때문에 초전도 마그네틱이 불가결하다. 자기감금형 핵융합에는 여러 종류의 방법이 있

지만, 무엇보다 초전도 마그네틱이 이용될 것이다. 핵융합 자체가 연구 개발되며 또한 그 커다란 고자계 발생용 마그네틱도 중대한 연구과제이다. 현재, 국제협력에서 ITER 계획이 진행되고 있다.

핵융합로용 초전도 마그네틱은 고자계·자계 정도(精度) 등의 높은 기술을 요구하고 있다. 이 개발단계에서의 초전도 마그네틱기술이 현재의 초전도 마그네틱기술을 지탱해 왔다.

(3) 전력응용

초전도는 전기저항이 제로가 되는 현상이라는 사실 때문에 전력계통에의 응용이 더 직접적이라고 판단된다. 이 응용공통점은 기기의 대용량화, 경량소형화, 고효율화 등이다.

전력계통은 발전기, 변압기, 송전선, 스위치기어, 조상설비, 저장장치와 보호장치로 구성되어 있다. 그 중 발전기와 변압기는 전자기기이며 초전도 마그네틱 응용이 된다. 단, 초전도선에 교류를 흐르게 하면 손실이 발생한다는 점에 주의해야 한다. 이 교류손실은 교류전류에 대한 초전도체 내의 전류분포에 히스테리시스가 있어 이에 의한 히스테리시스손이라고 불리는 것과 초전도 극세선 간에 생기는 자속변화가 초전도선과 안정화재료에 전압을 유도하여 그로 인한 전류에 의한 손실이다. 이것을 결합손이라고 한다. 저온초전도에 관해서는 그 손실을 매우 줄이는 기술이 개발되어 냉각에 관련된 손실을 고려해도 도선보다 훨씬 적은 교류손실을 감소시킬 수 있다고 판단되지만, 그 체도와 관련하여 저온초전도와 동일한 방법이 가능한지, 그 효과에 관해 연구 개발 중이다.

저온초전도를 이용한 초전도 동기발전기의 개발은 일본에서 적극적으로 추진되고 있으며, 그 설계와 제작기술은 거의 완성되었다고 볼 수 있다. 또한 운전방법이나 그 장점에 관한 실험도 이루어졌다. 초전에 발전기는 소형경량고효율의 장점뿐 아니라 안정도 향상, 무효전력 공급능력, 고주파 흡수 능력 등 현재의



전력계통에 부과된 과제의 대부분을 무제어로 해결하는 것이다. 이 고온초전도화도 추진되어 은시스 Bi계 초전도선을 이용한 5MVA 동기조상기가 개발되어 실험에 성공하고 있다. 냉동기 직결 조상기로 운전이 용이하다.

초전도자기에너지 저장(SMES)은 인덕턴스 L의 초전도 마그넷에 전류 I가 흐르고 있을 때 $LI^2/2$ 의 에너지가 저장된다는 것을 이용한 에너지 저장이다. 당초에는 양수발전소와 같은 대규모 저장을 위해 개발이 추진되었지만 최근에는 그 전력 수수(授受)의 응답성의 우수성을 이용한 소형(저장용량 MJ급)의 개발이 이루어져 송전선 용량 증가대책, 중요부하의 순시 전압저하대책으로서 실용화 및 상품화되고 있다. 또한 또한 그 응답성의 우수함이나 전류원적 특성을 이용하여 전력계통의 고유치 측정에 이용하는 연구도 이루어지고 있다.

프라이휠에 의한 전력저장은 응답성의 우수성 때문에 사용되어 왔는데, 그 기계적 손실이 과제이다. 그 손실의 베어링손(損)을 줄이기 위해 벌크 초전도체와 영구자석에 의한 부상력을 이용한 비접촉 베어링 개발도 진행되고 있다.

초전도의 고전류밀도·대전류·저손실성은 송전케이블 응용에 매우 잘 맞는다. 저온 초전도 송전케이블 개발은 옛날부터 이루어져 왔지만 코스트이븐용량이 실제적이며 현용 케이블과 치환함으로써 배수의 송전이 가능해지므로 그 연구개발이 폭넓게 이루어지고 있다. 저임피던스 특성과 상기 이외의 특징을 가지고 있어 전력수요 신장과 전력설비 갱신에 있어서 그 매력이 기대되고 있다.

초전도 변압기는 현용 변압기의 코일을 초전도화한 것이다. 그 때문에 소형경량 고효율이 기대된다. 저온 초전도 응용 연구도 이루어졌는데, Bi계 은시스 고온 초전도를 이용한 개발이 진행되었다. 고온 초전도체는 열용량이 크기 때문에 돌입전류나 과도현상에도

안정적으로 동작한다. 단, 현용 변압기도 매우 높은 효율을 가지고 있어 초전도 변압기의 특징을 살려 적용에 관한 논리를 추진시켜 나갈 필요가 있다.

전력계통 설계에 있어서 계통 안정도와 단락전류의 과제 해결은 중요하다. 이 과제는 저 임피던스계에서는 ‘안정도는 좋지만 단락 전류가 크다’는 등과 같이 상반되는 과제이다. 해결책은 매우 단순화하여 생각하면, 그 중 하나는 단락전류를 증대시키지 않는 계통 구성에 있어서 안정도는 제어에 의해 확보하는 방법이다. 여기서 사고가 발생하지 않을 때에는 저 임피던스이며 사고전류가 흐를 때 고 임피던스가 되는 기기가 있다면 그 상반하는 과제를 한번에 해결할 수 있다. 이를 위하여 초전도체의 초전도·상전도상 전이를 이용하는 것이 초전도한류기이다. 저온 초전도체 이용도 고려되었는데, 고온초전도체를 이용한 배전계통에서의 실용화 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다. 게다가 사고 시의 주변 순저대책, 정전구간의 감소 등 그 효과는 크다. 교류손실의 과제, 정확한 동작, 사고제거 후의 신속한 초전도로의 전이, 손실, 크기, 비용, 신뢰성 등 과제가 많지만 이 우수한 효과를 기대하고자 한다.

4.4 기타

상기의 분류 상 기타 장르가 되겠지만, 초전도 응용의 주력 중 하나가 고에너지 물리에서의 입자 가속기의 초전도 마그넷이다. 매우 긴 마그넷에 정도(精度)가 아주 높은 고자계를 발생시켜야 하며 높은 초전도 마그넷 기술이 요구된다. 현재, 유럽의 CERN에서 LHC라고 하는 가속기가 건설 중이다. 핵융합용과 함께 초전도 기술의 진보에도 큰 공헌을 하고 있다.

초전도나 초전도 디바이스는 그 밖의 다양한 응용이 고려되고 있다. 예를 들면, SQUID를 이용한 광물탐색 등의 연구도 이루어지고 있으며, 그 이용법의 연구도



활발하여 새로운 응용이 나올 것을 기대하고 있다.

5. 맺음말

이상, 초전도 응용기술을 역사적인 부분을 포함하여 개관해 보았다. 극소손실, 대전류 · 고자계, 초전도 · 상전도상 전이, 조셉슨효과 등 초전도성의 이용도 다양하다. 향후로도 다양한 이용이 연구될 것을 기대해본다.

전압표준, 자속계, MRI 의료 진단장치, 반도체결정 성장장치, SMES 등 실용화 · 상품화되고 있는 것도 적지 않다. 이들은 앞에서 설명한 초전도의 특징에서 파생된 유용한 특징을 가지고 있다는 점에 주목해야 한다.

여기서 설명한 바와 같이 실용화 · 상품화를 목적으로 한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다. 각각 독자적으로 유용한 특성이 있으며 향후의 실용화 · 상품화를 목적으로 한 연구 개발이 활발히 이루어지고 있다. 각각 독자적으로 유용한 특성이 있으며 향후의 실

용화 · 상품화에 기대된다. 이를 위해서는 신뢰성과 유용성뿐 아니라 편리성 등 해결해야 할 문제도 많다. 초전도재료에서 응용시스템, 이용자를 포함한 연구 개발이 필수라고 할 수 있다.

※ 저자 : 도쿄대학 니타탄조

출저 : 전기평론 2005. 12.

참고문헌

- 1) 전기학회 기술보고 : 836 ; HTS 초전도 응용기술의 범위와 LTS 초전도 응용기술의 동향(2001), 946 ; 초전도 전력기기의 사양과 특성(2003)
- 2) 오츠카(大塚), 이시지키(石崎) 감수, '저온생성과 응용 초전도' 沼南 테크니컬센터(2003)
- 3) 전기공업핸드북(2001)
- 4) 하라(原), '양자전자계측' 전자정보통신학회(1991)
- 5) IEEE Transaction "Applied Superconductivity" 