



초전도를 이용한 전력용용기술이 가속화됨에 따라 전력관련 기기(초전도 모터, 대용량 자석, 발전기, 가속기용 자석 등)에 사용되는 초전도 선의 개발이 필요하다. 특히 가속기나 핵융합로 등 차세대 에너지원에 사용되는 초전도 자석에 사용되는 고자장용 초전도 선의 개발이 요구되고 있다. 현재 개발 중인 고온 초전도 선은 입계의 약결합, 이방성 전류흐름 등의 여러 단점으로 인해 초전도 선재의 상업적인 개발하기까지는 많은 노력이 필요하다. 특히 박막선재는 금속기판의 제조부터 완충층의 증착, 초전도체의 증착등 증착공정이 복잡하기 때문에 공정의 재현성을 확보하기 어렵다.

반면 최근에 개발된 MgB₂는 고온초전도체가 아닌 화합물 초전도체의 특성을 갖는 초전도체로서 고온 초전도체가 갖는 이방성 전류흐름이나 입계 약결합 같은 단점이 없다. 또한 박막선재와 비교해서 초전도 선을 만드는 공정이 대단히 단순하므로 경제성 확보가 용이하다. MgB₂는 높은 자기장에서 전류특성이 우수하기 때문에 상업적으로 활용되고 있는 Nb₃Sn 선재를 대체할 선재로 각광을 받고 있다. 전력산업에는 20 K에서 가동하는 초전도 변압기, 모터, 발전기 등을 만드는데 사용될 수 있으며 일반 사업에는 의료용 MRI나 고자장 초전도 자석분야에 활용될 수 있다. MgB₂는 초전도체로 확인되기 이전에 다른 용도로 개발되어 일반 산업에 활용되고 있었기 때문에 초전도 물질에 대한 특허활용에도 제약

요건이 없다. 또한 아직 이 분야 연구가 많이 진행되지 않았기 때문에 국내 연구진이 노력여하에 따라 원천기술을 확보할 가능성이 높다. 따라서 국내 초전도 연구분야에서도 차세대 전력사업의 중심이 될 고전류특성 MgB₂ 초전도 선을 개발할 필요성이 대두되고 있다.

MgB₂는 화학회사에서 순수한 Boron을 만들기 위해 1950년대 초에 개발되어 지난 40여 년이 넘도록 원료재료로 사용되어 왔으며 2001년 초에 처음으로 일본 Akimitsu 교수팀에 의해 초전도 특성이 발견된 재료이다.

초전도특성을 나타내는 임계전이온도는 Nb₃Sn과 같은 금속간 화합물 초전도체에 비해 초전도 전이온도가 2배나 높은 39K의 값을 갖고 있다.

MgB₂ 초전도체는 산화물계 고온 초전도체 보다는 초

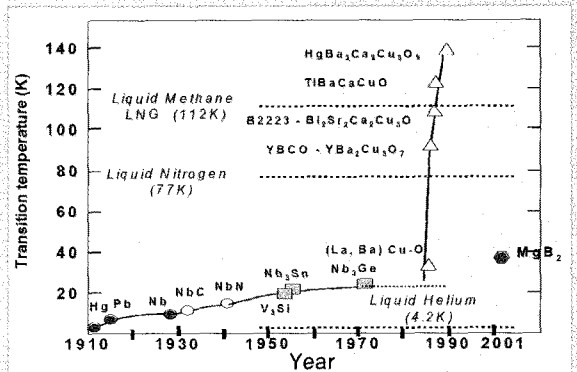


그림 초전도체의 임계온도 변천 과정

전도 전이온도가 낮지만 일반냉동기로도 쉽게 초전도 특성의 구현이 가능하고, 원료가격이 낮고, 고가의 은 피복재가 아닌 저가의 Fe계 피복재 사용이 가능하기 때문에 이를 이용한 많은 실용화 연구가 진행되고 있다. 표1에 DC 또는 AC 응용분야에 따른 사용되어질 수 있는 금속 피복재를 나타내었다. 아직까지는 상부임계자장(Hc2)이 낮은 편이지만 비약적으로 향상되어지고 있어서 자기장이나 사용 온도 면에서 기존의 금속계 저온 초전도체를 대체할 가능성이 높아지고 있다.

MgB₂ 선재 가격이 저렴하고 액체 헬륨을 사용하지 않으므로 의료기기인 MRI의 가격 및 유지비를 크게 낮출 수 있고 이에 따라 의료기기인 MRI의 보급을 확대할 수 있어서 일반 서민들도 양질의 의료혜택을 누릴 수 있을 것으로 예상된다.

MgB₂ 대한 연구는 일본에서는 NIMS(물질재료연구기구)를 중심으로 선재특성향상을 위한 연구가 진행 중이며 호주, 유럽 등지에서도 기본물성 향상을 위한 연구가 진행 중에 있다. 미국에서는 MIT를 중심으로 전력응용기기에로의 적용을 위한 연구가 진행 중에 있다.

MgB₂ 초전도 선재는 일반적으로 분말충진법(Powder-in-tube)중 in-situ 또는 ex-situ 법에 의해 제조

표 1 MgB₂ 초전도체의 피복재료로 선택에 따른 교류 및 직류 응용분야 (ref. from G. Grasso, ICMC 2004, WO 2.2)

| | |
|--|---|
| DC applications (low-field MRI): low-cost & multi wire & tape | Ex-situ Ni and Ni-alloy sheathed |
| | In-situ Cu-sheathed |
| AC application: Multifilamentary wire & tape | Ex-situ Ni-alloy sheathed |
| | In-situ Cu-sheathed |
| SFCL application: High resistance multifilamentary tape | Ex-situ very high resistance Ni-alloy with outer Stainless Steel |

되고 있다. MgB₂ 초전도 선재는 기존의 고온 초전도 선재와 달리 피복재의 선택의 폭이 넓고, 선재 제작이 비교적 용이하고, 원료의 가격이 낮은 것 등 많은 이점들을 보유하고 있어서 자장 하에서의 특성 향상만 이루어진다면 실용화에 큰 기대를 갖게 하는 재료로 해외 MgB₂ 초전도 선재 분야 연구도 이 분야에 집중적으로 이루어지고 있다. Mg 분말 대신 나노 Mg 분말을 사용하여 MgB₂ 선재의 자장 하에서의 특성을 실용화가 가능한 수준까지 근접시켰음을 알 수 있다. 일본에서는 MgB₂ 선재를 자기 부상열차에 사용하기 위한 연구 및 검토가 진행되고 있다.

MgB₂ 선재를 이용한 전력응용기기 개발 현황을 정리하였다. 우주에서 사용하기 위한 MgB₂ 전류인입선 개발 프로그램이 진행 중에 있으며, 미국 MIT와 미국 보건원을 중심으로 저개발국가, 대도시가 아닌 중소 도시 등에서 사용할 목적으로, MgB₂ 선재를 이용하여 저렴한 MRI를 제조하는 project가 진행 중이며, 20-30K, 0.2T정도의 낮은 자장 하에서 운전할 목적으로 MgB₂ 선재를 이용한 변압기를 개발하고자 하는 프로그램, 20K 1T에서 4T범위에서 사용할 목적으로 MRI, FCL개발프로그램이 진행 중에 있다. 지난 2002년 3월에 개최된 미국 물리학회에서 Paul Grant가 발표한 각각의 Cu를 포함한 초전도재료로 변압기를 제조하였을 때 드는 제조원가를 비교한 표 3을 보면 MgB₂가 비교우위에 있음을 알 수 있다.

고자장에서 전류특성을 유지하려면 자장에 대한 내자장 전류특성이 우수해야 한다. 플럭스 피닝을 증가시키기 위해서는 초전도체 내에 비 초전도 나노분말을 미세분산해야 한다. 강력한 초전도 특성을 발휘하는 비초전도 물질을 찾는 연구가 중요하다. 플럭스 피닝 역할을 하는 나노 물질을 찾아 초전도-나노 복합체를 만들 수 있다면 원천기술의 확보에 유리하다.

MgB₂ 초전도 선재의 경우 주요 핵심기술로는 고품성 MgB₂ 분말 제조 기술, 장산화 공정 기술, 교류 손실 및 자장 열화 방지

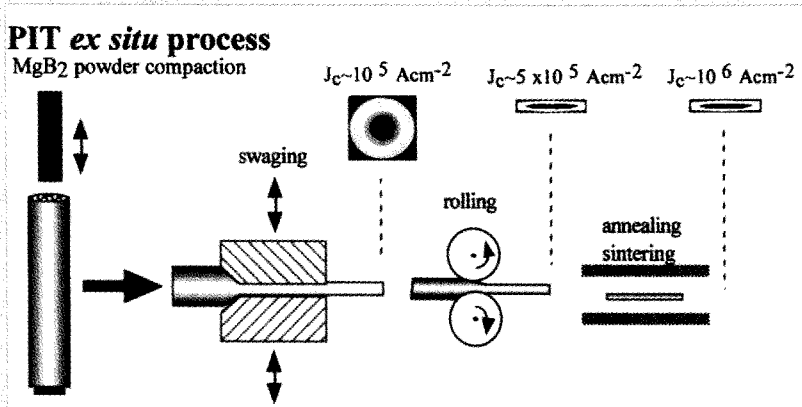


그림 2 MgB₂ 초전도 선재제조 공정도 (ex situ).

● 기획 시리즈

기술 등인데, 일본, 미국, 유럽을 중심으로 이에 대한 많은 연구들이 활발히 진행되고 있다. ISS 2003 과 ICMC 2004 학회에서의 최근 연구동향을 보면 MgB₂ 초전도 선재의 자장하에서의 특성향상이 꾸준히 이루어지고 있어서 MgB₂ 초전도 선재의 개발이 고 자장 영역에서의 응용으로 일보 진행된 모습을 볼 수 있으며 미국 MIT를 중심으로 한 MgB₂ 초전도 선재를 이용한 MRI, 변압기, 모터 등의 proto type 형태의 연구 개발이 진행 중이다. MgB₂ 초전도 선은 차세대 성장 동력 산업의 하나인 차세대 반도체 분야의 대규모 웨이퍼 단결정 성장용 초전도 마그네트와 바이오 신약 분야의 단백질 분석용 고해상도 NMR등에서 도체재료로 사용되어질 것으로 기대되어 지고 있다.

향후 전력 및 에너지, 전자, 정보통신, 교통, 생명, 의료, 거대과학, 환경 등 산업 전 분야에 걸쳐 응용되어져 반도체 이후 제 3의 산업혁명을 이끌 것으로 예상되는 초전도기술은 그 막대한 시장규모만큼이나 인류의 생활에 많은 영향을 미칠 것으로 보이며 실용화 시기도 향후 10년 내외로 바로 목전에 와 있다. 유럽초전도산업 공동체(CONECTUS)의 전망에 의하면 초전도 관련분야 별 현재 및 미래시장 점유율과 세계 시장 규모는 현재로는 세계 시장 규모가 30억 달러 이나 2010년경에는 60억 달러 까지 신장할 것으로 예측하고 있다(그림). 향후 지속적인 특성향상으로 급속히 저온 초전도체를 대체하고 선재화 공정 및 경제성에서 Bi계 고온 초전도 선재

표 2 초전도 선재재료별 변압기 제조 단가(ref. from P. Grant, APS 2002.3 U14.011).

| Item | Units | Q ₁ | BS200 | BS200 | YBCO CC | MgB ₂ |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------|-------|-------|---------|------------------|
| Operating Temperature | K | 300 | 77 | 77 | 68 | 25 |
| Operating Field | T | 2 | 0 | 2 | 2 | 2 |
| Electrical Losses | W/kA·m | 60 | 0.25 | 0.25 | 0.25 | 0.125 |
| 'Effective' Carnot Factor | W ₁ /W ₂ | 1 | 20 | 20 | 23.6 | 76 |
| Cryo-unit Electrical Load | W/kA·m | 0 | 5 | 5 | 5.9 | 9.5 |
| Total Cost of Losses @1 \$/W | \$/kA·m | 60 | 25 | 25 | 29.5 | 47.5 |
| Cryo-unit Cost @5 \$/W Rating | \$/kA·m | 0 | 25 | 25 | 29.5 | 47.5 |
| Wire Cost (T, I) | \$/kA·m | 5 | 50 | 150 | 50 | 2 |
| Total Cost of Ownership | \$/kA·m | 65 | 80 | 180 | 85 | 59 |

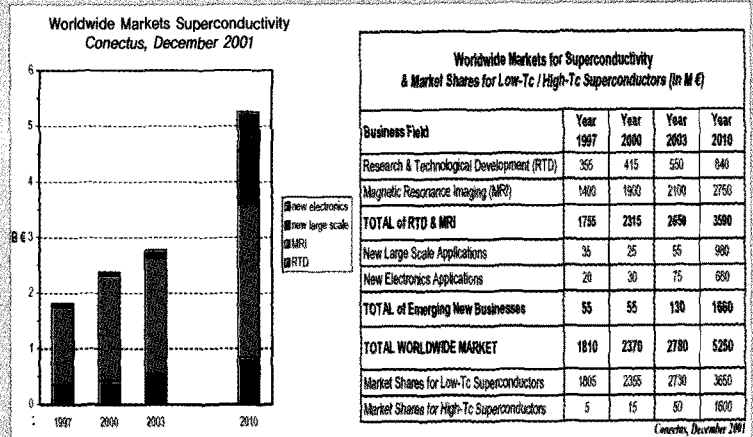


그림 2 초전도응용기기의 세계시장

에 비해 비교우위를 가지기 때문에 급격히 늘어나는 초전도 전력 응용기기들의 기본재료로 사용되어져 에너지 사용량의 상당부분을 차지하는 산업체용 motor (>1,000 hp), 변압기, 발전기, 한류기, 자기분리용 자석 분야에 응용이 확대되어질 것으로 전망된다.