

금속성 MgB₂ 초전도체의 응용 가능성

오상수, 송규정
한국전기연구원 초전도응용연구그룹

1. 서론

금속성 MgB₂ 초전도체가 올해(2001년) 1월에 일본 Sendai 학술대회에서 발표되면서⁽¹⁾ 세계적으로 많은 관심을 모으고 있다. 일본의 Akimitsu 그룹에 의하여 MgB₂ 초전도성이 처음 발견되었지만,⁽²⁾ 미국에서 오히려 연구 열기가 높은 것 같다. 현재 전 세계적으로 활발히 물리적 특성 연구가 지속되고 있으며, 아울러 실질적인 응용 가능성 연구가 또한 급속도로 진행되고 있어 실용 가능성에 서광이 있는 듯하다. 그런데, 금년 3월 경 저자들이 처음 이 물질에 대한 정보를 접하였을 때, 응용 차원에서 과연 이러한 재료를 선재로 만들 수 있을까? 다른 초전도체들에 비하여 어떠한 장점이 있는 것인가? 많은 것이 궁금하였다. 우선 구리산화물계 고온초전도체보다 신-초전도체는 Mg와 B의 두 개의 성분으로만 이루어져, 성분계가 복잡하지 않기 때문에 의외로 제조 방법이 간단해질 수도 있으나, 초기에 나온 연구 논문들은^(3,4,5) 대부분 고온 그리고 고압 조건에서 만든 벌크 시료들에 관한 것들이었기에, 초기에 선재로의 제조 가능성을 가늠하기는 어려움이 있었다. 그러나 시간이 지남에 따라 그의 가능성이 대두되고, 실제 선재 제조 공정을 위해서는 냉간 가공을 적용할 수 있는지의 여부가 중요하다고 할 수 있는데, 이에 대한 잠재성이 커지고 있다.

이와 더불어, 금속성 MgB₂ 초전도체가 선재로서의 응용 이외에 전자 소자로서의 응용 가능성에 대한 관심 또한 활발하게 진행되고 있다. 금속성 신-초전도체 MgB₂의 발견은 임계온도가 40 K 근처이므로, 통상적인 5 K 온도에서의 저온 초전도체 경우와 유사한 특성을 가지는 금속성 초전도체로서, 초전도체 소자의 상용화 온도 영역을 20 ~ 30 K 정도로 약 5 배정도 높아진 온도 영역으로 상용화 실현 가능이라는 사실이 매우

고무적이다. 왜냐하면, 20 ~ 30 K 영역의 온도는 어렵지 않게 일반적인 저온 냉동기를 사용할 수 있고, 아울러 비싼 액체 헬륨을 사용하지 않아도 가능한 온도이기 때문이다. 한 예로, Nb 저온 초전도체 박막 시료로 만든 초전도 디지털 핵심 소자인 RSFQ는 5 K에서 동작하도록 저온으로 냉각해야 하는데, 만일 MgB₂를 이용하여 20 ~ 30 K 영역으로 RSFQ 소자의 동작 온도를 올린다면 저온 냉동기의 문제와 비싼 액체 헬륨의 사용 문제를 해결할 수 있어 고무적이라고 할 수 있다.

2. 연구 현황

2.1 선재 분야

지금까지 세계적으로 여러 연구그룹에 의하여 발표된 MgB₂ 초전도선재의 제조공정과 특성치를 정리하여 표 1에 나타냈다.

세계 최초로 미국 Ames 연구소에서 보론-화이버를 마그네슘 증기에 열처리를 통하여 반응시켜 MgB₂ 초전도선재를 만든 연구 결과도 있으나 Nb₃Sn 선재보다 높은 J_c를 얻지는 못하였다.⁽¹²⁾ 이후 대부분의 연구 그룹들은 비스무스계 고온 초전도선재를 만들 때 많이 사용하는 Powder-In-Tube (PIT) 방법으로서 MgB₂ 초전도선재를 제조하였다. PIT 방법에 의한 MgB₂ 선재 제조공정에 관하여 기술하면 개략적으로 다음과 같다. 먼저 초전도체 분말을 금속성 튜브에 충전하는데, 분말을 충전할 때 Alfa Aesar 회사의 상용화된 MgB₂ 분말을 튜브에 채우는 경우가 대부분이고,^(6,7,8,10,11) Wollongong 대학 연구 그룹처럼⁽⁹⁾ Mg와 B를 2:1 조성비로 혼합하여 튜브에 채워 넣는 경우도 있다. 분말을 충전한 후, 금속 튜브를 인발, 스에징, 그루브 롤링 등의 방법으로 냉간 가공하여 직경을 연속적으로 줄여

표 1. 선재 개발 현황

| 연구자(소속기관명) | 제조 공정 | 특성 결과(최고치 기준) |
|---|--|---|
| M.D. Sumption et al. (Ohio State Univ.) ⁽⁶⁾ | 반응된 MgB ₂ 분말을 Nb 라이닝된 모넬튜브에 채우고 인발 가공→압연→열처리(900°C, Ar) | <ul style="list-style-type: none"> • 통전법에 의한 J_c : 7.5 × 10⁴ A/cm² (4.2 K, SF) • M-H법에 의한 J_c : 4.2 × 10⁴ A/cm² (4.2 K, 1 T) |
| G. Grasso et al. (INFM) ⁽⁷⁾ | 반응된 MgB ₂ 분말을 순 Ag, Cu, Ni 튜브에 채우고 인발가공→압연 | <ul style="list-style-type: none"> • 통전법에 의한 J_c (Ni시스선재) ~10⁵ A/cm² (4.2 K, SF) |
| S.Jin et al. (Bell Lab.) ⁽⁸⁾ | MgB ₂ 분말을 Fe/Cu 튜브에 채우고 냉간 스에징→압연→열처리 (900~1000°C, Ar) | <ul style="list-style-type: none"> • 통전법에 의한 J_c : ~ 10⁵ A/cm² (4.2 K, SF) • M-H법에 의한 J_c : 3 × 10⁵ A/cm² (4.2 K, SF) |
| S.Soltanian et al. (Univ. of Wollongong) ⁽⁹⁾ | Mg 와 B 분말을 혼합하여 Fe 튜브에 채우고 인발 가공→압연→열처리(600~1,000°C, 1~48 h, Ar) | <ul style="list-style-type: none"> • 통전법에 의한 J_c : 1.6×10⁴ A/cm² (29.5 K, 1 T or 33 K, SF) |
| H.Kumakura et al. (NIMS) ⁽¹⁰⁾ | 반응된 MgB ₂ 분말을 SUS와 Cu-Ni 튜브에 채우고 그루브롤링→압연 | <ul style="list-style-type: none"> • 통전법에 의한 J_c : 10,000 A/cm² (4.2 K, 5 T) |
| K.J.Song et al. (KERI) ⁽¹¹⁾ | 반응된 MgB ₂ 분말을 SUS 튜브에 채우고 인발→압연(→열처리 : 900°C, 1 h, Ar) | <ul style="list-style-type: none"> • 통전법에 의한 J_c (냉간가공) : 2.8 × 10⁴ A/cm² (4.2 K, SF) • M-H법에 의한 J_c (Sintering) : 7 × 10⁵ A/cm² (5 K, 0 T) |

나간다. 금속 튜브는 기계 가공시 효과적으로 MgB₂ 결정입자에 압력을 전달하도록 고강도의 금속을 사용하는 것이 유리하다고 할 수 있는데, Bell 연구소의 Dr. Jin 그룹은⁽⁸⁾ 내층이 Fe, 외층이 구리로 된 복합 튜브를 사용하여 가공하였다. 그들은 MgB₂와 의 반응성을 여러 원소를 이용하여 조사한 바, Cu와 Ag는 480°C이하의 공정 온도에서도 고용체와 금속간 화합물을 생성하기 때문에, Mg와 반응하여 화합물을 만들지 않는 원소들인 Fe, Mo, Nb, V, Ta, Hf, W 등이 튜브 금속으로서 사용 가능한 것으로 보고하였다. 분말을 채운 금속 튜브는 최종적으로 압연에 의하여 테이프 형상으로 가공하면서 내부의 MgB₂ 입자가 치밀하게 되도록 만든다. 이러한 PIT 방법의 장점으로는 가공의 편의성도 있지만 열처리시 MgB₂의 중량 손실이 적다는 것이다. MgB₂ 분말을 3000 bar 압력으로 아르곤 가스 분위기에서 프레스하여 만든 시료를 900°C에서 열처

리하면 마그네슘이 쉽게 증발하기 때문에 31%의 중량이 감소하는 것으로 조사 되었으며, PIT선재의 경우는 약 0.8%의 중량 손실만 확인되기 때문에 상대적으로 J_c가 높은 MgB₂ 초전도체를 만들 수 있는 것이다.

냉간 가공시에는 고온 초전도선재의 PIT 공정에서도 유사하게 나타나는 입자들 사이에 미끄러짐이 일어나면서 코아가 시스 튜브의 외경과 비례하여 줄어드나, 저자들이 PIT법으로 직접 선재를 만드는 과정에서 확인한바 선재 단면에서의 코아의 균일성이 가공량이 커지면서 나빠지는 것을 확인하였다. 아마도 이것은 MgB₂ 분말의 입자 형태가 균질하지 않거나 단단하여 잘 부서지지 않기 때문에 일어나는 것으로 생각된다. PIT법으로 만든 MgB₂ 선재의 임계전류밀도를 통전법으로 측정한 결과, 대부분의 그룹에서 자기자장(Self Field), 4.2 K 온도 조건에서 ~10⁴A/cm²의 J_c를 나타내는 것으로 보고하고 있다. 표 1의 Jin 그룹의 결과에서

보듯이 자화법으로 측정된 J_c 도 3×10^5 A/cm² 수준의 값을 보이기 때문에, 의외로 weak-link 문제가 없는 것으로 보인다. 그러나 저자들과 같이 열처리를 하지 않고 냉간 가공만으로 선재를 만들었을 때의 통전법과 열처리후 자화법에 의한 J_c 값의 차이가 큰 것을 볼 수 있다. 따라서 열처리를 통하여 결정 입자간의 결합이 전류의 흐름을 방해하지 않는 미세 구조로 변화되는 것으로 추측이 된다. Kumakura 그룹과 유사한 방법으로, 비슷한 시기에 그러나 서로 독립적으로 저자들도 가공성과 기계적 강도가 우수한 스테인레스 강 튜브를 이용하여 MgB₂ 선재를 만드는데 성공하였다.^(10,11) 사용한 분말 자체가 초전도 특성을 띠는 MgB₂ 분말로 열처리 없이 기계적 가공만으로 초전도 선재를 만들어 4.2 K 온도에서 300 A 이상의 임계 전류를 통전할 수 있었다. 지금까지 열처리 없이 초전도선재를 만드는 공정이 개발된 것은 다른 재료에서는 전혀 없었던 것으로 MgB₂에서 처음 확인되었으며 앞으로 가공 조직과 임계전류 특성이 어떤 관계에 있는지 조사할 필요가 높다고 본다.

2.2 소자 분야

일반적으로 저온 및 고온 초전도체의 소자(device)로서 응용은, 대표적으로 초전도 양자 간섭계(SQUID: Superconducting Quantum Interference Device), 마이크로파(Microwave) 및 무선 통신용 Filter, Metrology, Sensor 및 Detector용 Junction Device들, 그리고 디지털 소자의 핵심 부분인 빠른 단자속 양자(RSFQ: Rapid Single Flux Quantum) 소자 등등 여러 가지를 들 수 있는데, 실제로 현재 상용화된 분야가 많이 있다.

가장 보편적으로 응용된 SQUID 소자는 아주 미세한 자기장의 변화를 감지할 수 있는 소자로서 현존하는 가장 민감한 검출기(Detector)이다. 따라서 저온 초전도체 SQUID 소자를 기반으로 개발된 SQUID Magnetometer는 상업화에 성공하여 현재 일반 실험실에 널리 보급되어 있는 상태이며, 이와 함께 고온 초전도체 SQUID 소자를 기반으로 하는 SQUID Magnetometer의 개발에 상당한 진전을 이루고 있는 상황이다. 그리고, 고온 초전도체를 이용한 마

이크로파 및 무선 통신용 Filter는 기존의 고속성 물질에 비하여 매우 증가된 마이크로파 성능 향상과 더불어 크기와 무게가 현저히 축소되어 소형화가 가능하게 되었다. 또한, 저온 및 고온 초전도체 Junction Device로서 대표적인 것으로 매우 감도가 뛰어난 열 및 온도 측정기(Bolometer) 및 Energy resolved particle/photon 검출기(detector)등을 들 수 있으며, 아울러 적외선 검출기(Infrared Detector) 그리고 광-대역 입자 및 광 검출기(Broad-band particle/individual photon detector) 등의 개발이 가능하다. 한편, 일반적으로 미래형 초전도 소자라는 것은 디지털 소자의 핵심 소자인 RSFQ 소자를 의미한다 해도 당연하다. 따라서, 가장 부가가치가 크면서 기술적으로 개발이 어려운 초전도 디지털 Device의 가장 핵심적인 RSFQ 소자에 관한 연구는 가장 모험적인 분야인 동시에 개발 되어야 할 분야로서, 현재 상당한 진전이 있어 어느 정도 수준의 결과를 이미 보여 주고 있는 듯 하다. 이 시점에서, 초전도 디지털 소자의 시대적 개발의 요청에 관하여 알아보면 다음과 같다.

반도체 회로의 경우 현재까지는 Moore의 법칙에 따라 약 2년을 주기로 트랜지스터 집적도가 약 두 배로 증가하여 왔으며, 현재까지 개발된 0.18 마이크로(micros) 선폭을 사용하여 42 백만(million) 트랜지스터들의 집적도를 가지고 1.7 GHz 속도를 가지는 Pentium 4 프로세서가 개발되어진 상태이다. 그리고 최근 발표된 연구 결과를 보면 기존의 마이크로 기술을 한 단계 뛰어 넘어 나노기술의 도입으로, 계속하여 Moore의 법칙을 벗어남이 없이 발전되고 있는 추세이다. 이러한 반도체 세계의 발전은 필수적으로 극 미세 회로선의 개발에 있는데, 기존의 마이크로 단위의 리소그래피(lithography) 기술을 나노미터 단위의 리소그래피 기술 발전으로 전개되어야 극미세 회로선의 개발이 가능하다.

그런데, 세계최고의 반도체 회사인 인텔사가 최근에 리소그래피에 자외선(ultraviolet) 157 나노미터(nanometer) 파장을 이용해 나노미터 수준의 회로선 개발에 이어서, 극자외선(extreme ultraviolet) 13.4 나노미터 파장을 이용하여 성공적으로

20 나노미터 회로선 공정 기술을 개발하였다. 이는 1000 백만(즉, 1 billion) 트랜지스터들의 집적도를 가지고 20 GHz 속도를 가지는 마이크로 프로세서의 개발이 가능함을 확인한 것이다. 여기에 들어가는 실리콘(이산화규소) 게이트(Gate)는 두께가 0.8 나노미터 수준으로, 소자 핵심 구조의 평균 두께가 원자층 3개 정도에 불과하다.

그러나 현존하는 기술로 볼 때 20 나노미터 선 폭의 기술 개발이 한계인 듯하며, 비록 20 나노미터 이하의 공정 기술이 개발되어진다 해도, 이에 상응하여 고도로 집적한 마이크로 프로세서의 전력 소비와 열 발생의 억제 기술 개발이 있어야 하는데 이를 극복하기란 현실적으로 매우 어려움이 있고, 고가의 초정밀 및 초고진공 기술에 의한 경제성 결여로 한계에 접하게 된다. 따라서, 반도체의 선 폭을 수 나노미터 단위로까지 줄임으로서 발생하는 기술적 어려움과 열 발생의 큰 문제들을, 반도체를 대신하여 초전도체를 소자로서 이용하면 저 전력 공급으로 인하여 열 발생문제를 쉽게 해결할 수 있고, 마이크론 선 폭 기술로서도 나노미터 수준의 반도체보다 수십배 더 좋은 성능의 고속 전자 소자 개발이 가능하다. 객관적으로 미래의 해결방안으로 초전도 디지털 소자는 반도체가 한계에 도달할 때에 이를 대체하거나 반도체와의 혼합(hybrid) 등을 통하여 고속 소자의 요구조건을 만족시켜줄 수 있는 기술이다.

그런데, 초전도 디지털 전자 소자 개발이란 가장 핵심 소자인 “빠른 단자속 양자(Rapid Single Flux Quantum: RSFQ)” 소자의 기술 개발을 의미한다. 이는 초전도체만의 특이한 양자 현상을 이용한 초고속 및 저 소비전력의 전자 소자로서 기존/미래의 반도체 소자의 한계를 극복할 수 있는 미래형 전자 소자이다. 초전도 RSFQ 소자는 기존의 반도체 소자보다 100배 이상의 작동 속도를 가지면서도 1/1000 이하의 전력을 소비하게 되어 기존 반도체의 한계를 극복할 수 있는 기술이다. 그리고 무선 화상통신, 위성통신, 첨단 전자제품, 고성능 레이저 등에 이 소자를 응용 시, 그 파급 효과가 대단히 클 것으로 전망되어 초전도 디지털 소자의 개발이 시대적인 요청으로 대두되고 있다. 그러나 저온 초전도 디지털 소자는 고

가의 액체 헬륨을 사용한다는 점 때문에, 저온 초전도 소자를 이용한 제품의 관리 및 운영비용 등의 경제성 결여성과 액체 헬륨 사용에 따르는 특수 냉동기기의 필요성 등으로, 소자의 안정성 및 고성능의 장점에도 불구하고, 대형컴퓨터 이외의 개인 탁상용 슈퍼컴퓨터의 개발에는 적합하지 않다. 따라서, 현재 상대적으로 저가인 액체 질소를 냉매로서, 비교적 간단하고 소형의 냉동기기의 이용이 가능한 고온 초전도 디지털 소자에 대한 연구가 기술적 난점을 극복하고 진행 중에 있다.

3. 응용 가능성

3.1 선재 분야

MgB₂ 초전도선재의 응용을 생각할 때 우선 초전도체 임계 특성들이 기존에 개발되고 있는 다른 초전도재료들에 비하여 어떠한 수준에 있는지 살펴 볼 필요가 있다. 새로운 초전도재료가 발견되면 우선 임계온도 값이 주요 관심사가 된다. 이것은 임계전류 밀도에 비하여 임계온도 값이 공정 개발에 의하여 크게 변하지 않는 성질이 있기 때문이다. 제조공정에 따라 약간 달라지나 최고 약 40 K 정도의 임계온도는 지금 개발되고 있는 구리산화물계 초전도체들에 비하여 크게 떨어지는 것으로 앞으로 선재 응용 개발 차원에서는 제한요소로 작용할 가능성이 높다. 왜냐하면 임계온도는 결국 그 초전도선재로 만든 초전도기기의 동작 온도를 결정하는 중요한 변수이고, 기기의 동작 온도는 경제성과 밀접한 관계가 있기 때문이다. 또한, 구리산화물계 초전도체의 선재화를 위한 많은 프로세스들이 개발되면서 장기적으로는 액체질소만으로 생각하여 자장 중에서도 사용할 수 있는 고성능의 coated conductor가 상용화될 가능성이 높기 때문이다.

표 2는 현재 고온 초전도선재로 개발 예정의 초전도 전력기기에 대한 주요 요구 특성치들을 나타낸 것으로 MgB₂ 초전도선재의 응용을 생각할 때에도 고려해야 할 사항이다. 송전케이블은 대규모 시스템으로 신뢰성이나 경제성 측면에서 액체질소 냉각이 고려되고 있기 때문에 MgB₂ 초전도선재의 응용은 어렵다고 할 수 있다. 다른 기기 응용

표 2. 초전도 전력기기의 개발 요구조건

| | 동작 온도 T (K) | 경험 자장 H (T) | 임계전류밀도 J _c (A/cm ²) |
|------------|------------------|------------------|--|
| 모터/ 발전기 | 30 | 4 | 100,000 |
| 변압기 | 30 | 2 | 80,000 |
| 한류기 | 30 | 2 | 80,000 |
| 송전 케이블 | 77 | 0.5 | 70,000 |

의 경우 냉동기를 이용해서 온도를 임계온도 이하로 낮추어서 30 K 정도로 운전할 수 있으나 그 온도에서 선재의 임계자장이 코일의 최대 경험자장 보다 높아야 한다. 그리고 Finnemore 등이 저항법 및 자화법으로 측정하여 보고한 바에 의하면⁽¹³⁾ 30 K 온도에서 임계자장은 4 T 이하이고 자속선 격자 구조가 파괴되는 비가역자장, H_{irr}도 2 T 이하이기 때문에 초전도 전력기기의 응용을 위해서는 동작 온도를 더욱 낮추어야 할 필요가 있다.

한편, 초전도선재의 응용에서 성능과 가격은 동시에 고려해야 할 중요 사항이다. DOE 분석에 의하면 구리선을 대체할 수 있는 초전도선재 개발의 목표를 액체질소온도에서 \$ 10/kA·m 로 잡고 있다. 물론 최종적으로 이러한 목표는 시장(market)이 결정하는 것이지만 현재로서는 고가의 Ag를 사용하는 PIT선재로서는 달성하기 어려운 목표이다. MgB₂ 초전도선재의 제조 비용에 대해서는 EPRI의 Dr. Grant 분석을 여기서 인용하기로 한다.⁽¹⁴⁾ 표 3은 여러 종류의 선재들의 성능대비 가격을 나타낸 것으로 여러 동작조건에서 비교하였다. Y계 차세대 도체의 경우는 재료비보다 제조설비의 가격이 훨씬 높기 때문에 가격 결정의 주 요소가 된다. MgB₂의 경우, 재료비는 비교적 산정하기 쉽고 Alfa Aesar 회사의 MgB₂분말을 사용하면 물론 공정에 따라 달라질 수 있으나, NbTi 선재 공정비용 1.13 \$/kA·m를 고려하여 표 3에서와 같이 33.75 \$/kA·m가 나온다는 계산이다. 그러나 만일 앞에서도 언급하였듯이 Mg와 B 분말들을 각각 사서 혼합하여 MgB₂ 화합물 분말을 자체적으

표 3. 각종 초전도선재의 성능대비 가격 (C/P)

| 선 재 | C/P (\$/kA·m) | 가격 결정 주 요소 |
|---------------------------------|------------------|---------------|
| Nb-Ti(4.2K, 2 T) | 0.9 | Nb |
| Nb ₃ Sn(4.2 K, 10 T) | 10 | Nb |
| Bi-2223(25 K, 1 T) | 20 | Ag |
| Y-123(25 K, 1 T) | 4 | 설비 비용 |
| MgB ₂ (25 K, 1 T) | 33.75 | - |

로 제조하면 표 3과 동일한 조건에서 2.64 \$/kA·m까지 가격을 낮출 수 있다는 분석이다.

또한, 초전도기기의 응용을 생각할 때 냉매의 선택이 중요하다. 대기압하에서의 수소의 비등점은 20.13 K이기 때문에 액체수소로 냉각하는 케이블에 MgB₂ 초전도선재를 사용할 수도 있을 것이다. 그러나 다른 기기 응용에 비해서 초전도 송전케이블은 기존 방식으로 지중 케이블을 포설하고자 하는 경우 지하터널의 토목 공사비용이 막대하기 때문에, 초전도선재에 대한 비용은 상대적으로 다소 싸더라도 전체 시스템의 신뢰성이나 안전성이 더 고려될 것으로 보여 지기 때문에, 당장 MgB₂ 초전도선재를 이용한 초전도케이블이 등장할 가능성은 그리 높지 않다. 물론 AC 송전의 경우, 케이블 시스템의 냉각비용에 중요한 요소인 선재의 교류손실도 고려해야 할 것이지만 MgB₂의 경우, 아직 초기 연구단계라서 그에 대한 연구 결과가 보고되고 있지는 않다. 초전도 전력기기 이외의 다른 응용 분야, 예를 들어 MRI나, NMR의 경우에도 MgB₂의 낮은 임계자장은 동작조건 선택의 폭을 아주 좁히기 때문에 양산 체제가 이미 구축된 기존의 NbTi 선재와 경쟁하여 선재 상용화가 가능할 것인가에 대해서는 미지수이다.

3.2 소자 분야

초전도체의 전자소자로서 응용은 고도의 박막 기술 발전과 더불어 고온 초전도 소자에서의 bottle neck인 조셉슨 접합

(Josephson Junction) 기술 발전이 서로 병행하여 진행될 때만이 가능하게 되는 것이다. 비교적 저온 초전도체의 박막 기술은 안정되고 소자의 응용이 이미 실현되고 있는 실정이나 액체 헬륨을 사용한다는 경제성의 결여로 큰 시장개척에는 한계로 남아 있다. 따라서 주로 YBCO 고온 초전도체를 이용한 박막 기술은 급진전 상태이나 아직은 응용된 소자로서는 다소 안정성이 떨어지고 상업화가 어려운 상태이다.

그런데, 최근의 금속성 신-초전도체 MgB₂의 등장은 저온 초전도체와 고온 초전도체의 중간 고리 역할의 매체로서 기대를 받으면서 많은 물리적 특성 및 성능 향상 연구를 통한 실용성의 가능성에 대한 연구가 매우 활발히 진행되고 있다. 지금까지 연구된 결과들을 토대로 소자로서의 응용 가능성을 조사해 보면 다음과 같다. 첫째, 임계온도가 40 K 정도 된다는 사실이 일단은 많은 관심을 주고 있다. 왜냐하면, Nb-박막인 경우 RSFQ 소자의 동작온도가 5 K 인데 비하여, MgB₂의 박막인 경우 RSFQ 소자의 동작온도를 20 ~ 30 K 정도로 올릴 수 있기 때문에, 저온 냉동기 이용에 있어 일반적인 실험실용 냉동기로도 충분하며, 값비싼 액체 헬륨을 사용하지 않더라도 되는 경제적 장점이 있다. 둘째, 소자로서 응용하기 위해서는 양질의 MgB₂-박막 시료를 얻어야 하는데, 이미 많은 그룹에서 여러 방법으로 성공적인 MgB₂-박막 제조를 하였으며, (15,16,17) 특히 포항공대의 초전도 그룹에서 최초로 MgB₂ 단결정을 성장시켰는데, (18) 만일 결정의 크기가 어느 정도 크기로 단결정 성장이 가능하면 단결정을 이용한 최고 양질의 MgB₂-박막 시료가 가능하다. 이는 초전도 소자 개발 시, 매우 고무적인 것이 되는 것이다. 셋째, MgB₂ 초전도체는 300 K에서 낮은 Resistivity를 나타낸다. 이는 MgB₂가 Pb 같은 순수 금속성 물질보다 매우 좋은 금속성 특성을 보여주는 것이다. 넷째, MgB₂의 자기침투거리(magnetic penetration length)는 850 nm 정도로 알려지고 있는데, 이는 Nb 물질과 비교할 만하고 NbN-박막보다는 훨씬 좋은 소자로서 응용 가능성을 내포하고 있다. 다섯째, MgB₂의 상관거리(coherence length)는 5 nm 정도이고, 40 K에서 전자자유행로

(electronic mean free path)가 60 nm 정도로 예측되며, 따라서 MgB₂ 물질은 clean limit 초전도체에 속한다. (12,13) 그러나, MgB₂의 짧은 상관거리 때문에 예측되는 소자 개발의 어려움은 박막 제조 공정을 in-situ process로 개발된다면 SNS (Superconductor Normal Superconductor) 혹은 SIS(Superconductor Insulator Superconductor) Junction들을 제작하는데 있어 큰 방해가 되지 않는다. 여섯째, MgB₂의 grain boundary들의 결합은 일반적인 고온 초전도체의 성질과는 반대로 약한 결합성(weak link)을 갖고 있지 않다는 점이다. (19) 따라서, 고온 초전도체와 다르게 MgB₂-박막은 금속성 초전도체 박막 MgB₂가 기판 위에 완전한 in-plane 정렬이 필요하지 않는 장점이 있다. 일곱째, MgB₂의 열역학적 특성들은 Nb 물질과 비슷하게 BCS 초전도체 특성과 매우 유사하다. 그러나, 임계온도가 Nb에 비하여 4 배정도 높고, 또한 에너지 Gap이 4 배정도 크기 때문에, 디지털 소자로서 응용에 있어 MgB₂ 소자는 Nb 소자보다 4 배정도 속도가 빠른 잠재력을 가지고 있다고 볼 수 있다. 따라서, 위와 같은 여러 물리적 특성으로 볼 때, 신-초전도체 MgB₂는 차세대 RSFQ 소자 개발에 있어 매우 잠재력이 큰 물질로 평가되어 진다.

이와 더불어 매우 최근의 연구 결과를 보면, 재미있는 Tunneling 연구 결과가 있는데 MgB₂는 어느 정도 등방적이고 s-wave 에너지 Gap을 가진다. (20,21,22) 이는 금속성 초전도체 MgB₂를 기반으로 하는 전자 소자의 동작온도가 30 K 근처가 될 수 있음을 의미한다. 그리고, 고온 초전도체와 다르게 MgB₂-박막은 초전도체 MgB₂가 박막 기판 위에 완전한 in-plane 정렬이 필요하지 않는 장점이 있는 반면에, MgB₂의 Grain boundary들의 좋은 Josephson Junction들을 형성하기 어렵다. 그러나, 영국과 한국의 공동 연구 그룹에서 비록 MgB₂ nanobridge들이 Josephson Junction 같은 특성을 보여 주지 않더라도, 성공적으로 nanobridge들을 제작하였으며, 마침내 성공적으로 신-금속성 초전도체 MgB₂를 이용한 SNS (Superconductor Normal Superconductor) Junction을 제작하였음

이 발표 되었다.^(23,24) 이는 MgB₂ 초전도체를 이용한 RSFQ 소자 개발에 신호탄으로 생각된다.

4. 결 론

MgB₂ 초전도체가 세상에 나온 지 얼마 안 되는 시점에서 초전도선재 응용성을 거론하는 것은 시기상조일지 모른다. 그러나 지금까지 보고된 MgB₂ 초전도체의 임계 특성 값들 만으로는 다른 기존의 초전도체에 비하여 선재로서 큰 가능성을 갖기에는 부족한 점이 많은 것 같다. 앞으로 지속적인 연구 개발에 의하여 임계온도나 임계자장이 다소 상승할 것이고 가공열처리 조건이 최적화되면 임계전류밀도 또한 크게 상승할 가능성이 있다. 특히 임계전류밀도는 공정에 크게 의존하기 때문에 저온 초전도선재나 Bi-2223의 경우에서 판단할 수 있듯이 초기의 J_c가 시간이 지나면서 미세 조직을 개선시키는 새로운 프로세스가 도입되면서 J_c가 상승하는 경우처럼 문제점이 되지 않을 수 있다. 그러나 임계온도나, 임계자장의 상승에는 한계가 있기 때문에 이러한 점이 MgB₂ 초전도체의 응용 가능성을 크게 제한하는 요소로 생각된다.

아울러, 계속되는 MgB₂의 성능 향상과 연구 결과의 발전에 발맞추어, MgB₂의 단결정 성장 그리고 MgB₂ 초전도체의 박막 기술 발달로 MgB₂ 박막을 이용한 전자 소자로서의 잠재력은 선재로서의 응용 가능성과는 반대로 매우 크다고 볼 수 있다. 그러나, 액체 헬륨을 사용해야 되는 저온 초전도체 물질에 비해 여러 가지의 장점에도 불구하고, 다층 박막의 제작의 어려움이 있어 소자로의 본격적인 개발은 어느 정도 시간이 필요하다. 그럼에도 불구하고, 성공적으로 연구 개발되는 MgB₂의 단일 박막의 성과로 짧은 시간에 이에 대한 응용 소자가 개발될 가능성이 높다.

참고문헌

(1) J. Akimitsu, Symposium on "Transition Metal Oxides", Sendai

Japan, (Jan. 10, 2001).
 (2) J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, Nature 410, 63 (2001).
 (3) C. U. Jung, Min-Seok Park, W. N. Kang, Mun-Seog Kim, Kijoon H. P. Kim, S. Y. Lee, and Sung-Ik Lee, Appl. Phys. Lett. 78, 4157 (2001).
 (4) Y. Takano, H. Fujii, H. Kumakura, T. Hatano, K. Togano, H. Kito, and H. Ihara, Appl. Phys. Lett. 78, 2914 (2001)
 (5) K. Prassides, Y. Iwasa, T. Ito, D. H. Chi, K. Uehara, E. Nishibori, M. Takata, S. Sakata, Y. Ohishi, O. Shimomura, T. Muranaka, and J. Akimitsu, Preprint cond-mat/0102507 (at xxx.lanl.gov, 2001)
 (6) M. D. Sumption, X. Peng, E. Lee, M. Tomsic, and E. W. Collings, Preprint cond-mat/0102441 (at xxx.lanl.gov, 2001)
 (7) G. Grasso, A. Malagoli, C. Ferdeghini, S. Roncallo, V. Braccini, M. R. Cimberle, and A. S. Siri, Preprint cond-mat/0103563 (at xxx.lanl.gov, 2001)
 (8) S. Jin, H. Mavoori, and R. B. van Dover, Nature 411, 563 (2001)
 (9) S. Soltanian, X. L. Wang, I. Kusevic, E. Babic, A. H. Li, H. K. Liu, E. W. Collings, and S. X. Dou, Preprint cond-mat/0105152 (at xxx.lanl.gov, 2001)
 (10) H. Kumakura, A. Matsumoto, H. Fujii, and K. Togano, Preprint cond-mat/0106002 (at xxx.lanl.gov, 2001)
 (11) K. J. Song, N. J. Lee, H. M. Jang, H. S. Ha, D. W. Ha, S. S. Oh, M. H. Sohn, Y. K. Kwon, and K. S. Ryu, Preprint cond-mat/0106124 (at xxx.lanl.gov, 2001)
 (12) P. C. Canfield, D. K. Finnemore, S. L. Bud'ko, J. E. Ostenson, G. Lapertot, C. E.

- Cunningham, and C. Petrovic, Phys. Rev. Lett., 86, 2423 (2001)
- (13) D. K. Finnemore, J. E. Ostenson, S. L. Bud'ko, G. Lapertot, and P. C. Canfield, Phys. Rev. Lett. 86, 2420 (2001)
- (14) P. M. Grant, '01 APS March Meeting, Seattle USA (2001)
- (15) C. B. Eom, M. K. Lee, J. H. Choi, L. Belenky, X. Song, L. D. Cooley, M. T. Naus, S. Patnaik, J. Jiang, M. Rikel, A. Polyanskii, A. Gurevich, X. Y. Cai, S. D. Bu, S. E. Babcock, E. E. Hellstrom, D. C. Larbalestier, W. Rogado, K. A. Regan, M. A. Hayward, T. He, J. S. Slusky, K. Inumaru, M. K. Haas, and R. J. Cava, Nature 411, 558, (2001)
- (16) W. N. Kang, Hyeong-Jin Kim, Eun-Mi Choi, C. U. Jung, and Sung-Ik Lee, Science 292, 1521 (2001)
- (17) S. H. Moon, J. H. Yun, H. N. Lee, J. I. Kye, H. G. Kim, W. Chung, and B. Oh, Preprint cond-mat/0104230 (at xxx.lanl.gov, 2001)
- (18) Kijoon H. P. Kim, Jae-Hyuk Choi, C. U. Jung, P. Chowdhury, Min-Seok Park, Heon-Jung Kim, J. Y. Kim, Zhonglian Du, Eun-Mi Choi, Mun-Seog Kim, W. N. Kang, Sung-Ik Lee, Gun Yong Sung, and Jeong Yong Lee, Preprint cond-mat/0105330 (at xxx.lanl.gov, 2001)
- (19) D. C. Larbalestier, M. O. Rikel, L. D. Cooley, A. A. Polyanskii, J. Y. Jiang, S. Patnaik, X. Y. Cai, D. M. Feldmann, A. Gurevich, A. A. Squitieri, M. T. Naus, C. B. Eom, E. E. Hellstrom, R. J. Cava, K. A. Regan, N. Rogado, M. A. Hayward, T. He, J. S. Slusky, P. Khalifah, K. Inumaru, and M. Haas, Nature 410, 186 (2001)
- (20) H. Schmidt, J. F. Zasadzinski, K. E. Gray, and D. G. Hinks, Phys. Rev. B 63, 220504 (2001).
- (21) A. Sharoni, I. Felner, and O. Millo, Phys. Rev. B 63, 220508 (2001).
- (22) G. Karapetrov, M. Iavarone, W. K. Kwok, G. W. Crabtree, and D. G. Hinks, Phys. Rev. Lett. 86, 4374 (2001).
- (23) A. Brinkman, D. Veldhuis, D. Mijatovic, G. Rijnders, D. H. A. Blank, H. Hilgenkamp, and H. Rogalla, Preprint cond-mat/0105535 (at xxx.lanl.gov, 2001)
- (24) G. Burnell, D. -J. Kang, H. N. Lee, S. H. Moon, B. Oh, and M. G. Blamire, Preprint cond-mat/0106562 (at xxx.lanl.gov, 2001)

저자이력



오상수 (吳詳秀)

1959년 11월 1일 생, 1982년 경북대 금속공학과 졸업, 1992년 Kyoto대 대학원 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 책임연구원.



송규정 (宋奎丁)

1963년 4월 14일 생, 1986년 고려대학교 물리학과 졸업, 1988년 동대학원 졸업(이학석사), 1999년 미국 테네시주립대학교 대학원 졸업(이학박사), 1989-1993 기초과학지원연구원 연구원, 1995-1999 미국 오크리지국립연구소 위촉연구원 및 테네시주립대학교 연구교수, 1999-2000 미국 메사추세츠주립대학교 박사후 연구원, 현재 한국전기연구원 초전도응용연구그룹 선임연구원.