

MgB<sub>2</sub> PIT 선재 제조 및 성능향상송규정<sup>1</sup>, 고락길<sup>2</sup>, 김호섭<sup>2</sup>, 하홍수<sup>2</sup>, 하동우<sup>2</sup>, 오상수<sup>2</sup><sup>1</sup>전북대학교 과학교육학부, <sup>2</sup>한국전기연구원 초전도연구센터

## 1. 서 론

2001년 1월 일본 J. Akimitsu 연구그룹에서 간단한 2-성분계 중간금속성 성질의 MgB<sub>2</sub> 물질에 대하여 처음으로 초전도성을 확인한 이후[1], MgB<sub>2</sub> 초전도성 관련 연구가 올해로 10년째 접어들고 있다. 지난 9년 동안 MgB<sub>2</sub> 물질의 물리적 특성과 관련된 학문적인 분야와 MgB<sub>2</sub> 초전도 성질의 산업적 응용을 위한 공학적인 분야 등 많은 관심과 폭발적인 관련 연구 결과들이 봇물처럼 쏟아져 나왔다. MgB<sub>2</sub>라는 물질은 이미 1950년대에 알려진 무기화학 물질이었지만, 임계전이온도 T<sub>c</sub>가 39 K인 초전도성 물질임이 거의 50년이 지난 후에 밝혀진 아이러니는 재미있다. 만일 1950년대 MgB<sub>2</sub> 물질이 초전도체로 확인되었다면, 1950년대 후반에 발표된 BCS 초전도 이론은 빛을 보지 못했을 것이다. 왜냐하면, BCS 이론에 의하면 30 K 이상인 초전도체는 존재할 수 없기 때문이다.

어쨌든 MgB<sub>2</sub> 초전도체는 2001년 벽두에 세상에 나왔고, 간단한 육각형 구조로 보론(B) 층과 마그네슘(Mg) 층들이 교대로 적층되어 있는 구조를 가지고 있다. 그리고 중간금속성 A15 초전도체들과 유사한 초전도 특성들을 보여주고, BCS 이론에서 예측하는 전체 동위원소 효과로 인한 임계전이온도 T<sub>c</sub> 이동(shift)보다는 현저하게 적을지라도, 보론(B) 동위원소로 치환하여 얻은 T<sub>c</sub> 이동은 마그네슘(Mg) 동위원소로 치환한 경우보다 10배 정도 큼이 밝혀졌으며[2], 이로 인하여 MgB<sub>2</sub> 초전도 임계전이온도 T<sub>c</sub> 메커니즘에 포논결합(Phonon coupling) 기여와, MgB<sub>2</sub> 초전도 메커니즘에 보론(B)의 진동과 연관된 포논들이 중요한 역할을 함이 밝혀졌다. 한편, 강한 전자-포논 결합과 연관된 2D  $\sigma$ -밴드(band)와 약한 전자-포논 결합과 연관된 3D  $\pi$ -밴드로 구분되는 2개의 초전도 에너지 밴드 갭(Superconducting energy band gap) 등이 존

재함이 밝혀지고[3,4], 그레인(grain) 사이의 강-결합(strong-coupling) 초전도전류 특성[5]과 상부임계자기장 H<sub>c2</sub>는 15 ~ 20 T 정도이나, MgB<sub>2</sub> 초전도체 내에 불순물을 첨가하여 불순물산란(impurity scattering)들을 증가시키면, H<sub>c2</sub> 한계가 60 ~ 70 T 까지 증가될 수 있음이 발표되었다[6,7].

한편, 이와 같은 MgB<sub>2</sub> 초전도체의 재미있는 물리적 특성들이 속속히 알려짐과 동시에, 2-성분계인 MgB<sub>2</sub> 초전도체의 합성이 4-성분계인 고온초전도체(HTS)의 합성에 비하여 현저하게 용이하고, 지구상에 풍부하게 존재하는 마그네슘(Mg)과 보론(B)으로 인하여 가격이 비교적 싸며, MgB<sub>2</sub> 분말 자체가 열처리 및 소결과정 없이도 초전도성을 가지기 때문에 초전도 선재 제조에 경제적인 장점이 많이 있다. 그리고 기존의 고온초전도 Bi-계 PIT 선재 제조 방법으로 쉽게 MgB<sub>2</sub> PIT 선재를 제조할 수 있다는 장점에다, PIT 피복 재료로서 Bi-계 PIT 피복 재료로 사용하는 비싼 은(Ag) 대신에 값싼 구리(Cu)나 철(Fe) 등으로 MgB<sub>2</sub> PIT 선재 제조가 가능하며, MgB<sub>2</sub> PIT 초전도 선재의 많은 산업적 응용 등이 기대되기 때문에 관련 연구가 활발히 수행되어 왔으며, 현재 어느 정도 산업적 응용이 가시화 되고 있는 실정이다.

따라서 고온초전도체(HTS)와 저온초전도체(LTS)의 사이를 연결하는 중간 고리 역할과 MgB<sub>2</sub> 초전도체의 산업적 응용제품 개발 및 시장 개척, 즉 HTS와 LTS의 틈새에서 MgB<sub>2</sub> 초전도체만이 가지는 특수영역 창조가 활발하게 이루어지고 있는 시점에서, 그동안 어떻게 우리나라에서 MgB<sub>2</sub> PIT 선재 제조가 이루어지고 발전되어 왔는지를 기술함에 있어, 2001년 당시에 저자가 소속되어 있었던 한국전기연구원 초전도연구그룹 연구원들과 함께 각고의 노력 끝에 얻은 산물인 2001년 5월에 국내 최초로 MgB<sub>2</sub> PIT 선재 제조에 성공한 결과를[8] 시작으로, 초창기 다년

간 MgB<sub>2</sub> PIT 선재 제조 및 특성향상 등의 관련 연구 결과들을[9-19] 국내에서 독보적으로 양산하였던 한국전기연구원 초전도연구그룹 결과들을 중심으로 리뷰(review) 형식을 임차해 기술하고자 한다.

## 2. MgB<sub>2</sub> PIT 선재 제조

기존의 보편적인 PIT(Powder In Tube) 기술을 1990년대 Bi-계 고온초전도 선재 개발에 응용하여, 2000년대 초에 미국 AMSC 및 일본 Sumitomo 등에서 상용화에 성공하고, 현재 Bi-계 고온초전도 PIT 선재들을 시판 중이다. 이와 같은 PIT 제조 기술들을 MgB<sub>2</sub> 초전도체에 적용하여, 2001년 초에 MgB<sub>2</sub> 물질의 초전도 특성이 발표된 이후, 거의 같은 시기에 MgB<sub>2</sub> PIT 선재 개발에 성공하였고, 현재 미국 HyperTech 및 유럽 Columbus Superconductors SpA 등에서 MgB<sub>2</sub> PIT 선재들을 시판 중에 있다. 이처럼 매우 빠르게 MgB<sub>2</sub> PIT 선재의 상용화가 이루어진 이유는 이미 기술적으로 정점에 도달한 기존의 PIT 기술을 이용하는 것이고, 2-성분계인 MgB<sub>2</sub>는 4-성분계인 Bi-계 고온초전도체에 비하여 혼합 분말 제조가 쉽고, 반응열처리 과정도 매우 간단하거나 생략할 수 있다는 장점이 있기 때문이다. 일반적인 MgB<sub>2</sub> PIT 선재 제조 과정들을 그림 1에 나타내었다. 그림 1처럼, MgB<sub>2</sub> PIT 선재제조 방법에는 보론(B) 분말과 마그네슘(Mg) 분말들의 혼합에서 시작하여 최종적인 반응열처리 과정을 거치는 in-situ 방법과 MgB<sub>2</sub> 분말 자체부터 시작하여 반응열처리과정을 생략하거나 혹은 단순 열처리 과정만 거치는 ex-situ 방법 등이 있다.

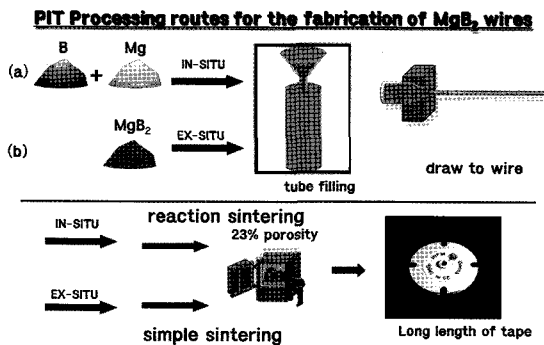


그림 1. MgB<sub>2</sub> PIT 선재 제조 과정.

또한, 미국 HyperTech 회사는 기존의 MgB<sub>2</sub> PIT 제조 방법과 다소 차별화되는 CTFF(Continuous Tube Forming and Filling) 제조 과정을 개발하였는데[20], CTFF 제조 과정은 연속라인 공정의 개념으로 구리(Cu)와 같은 금속관이 먼저 공급되고, 금속관을 튜브 형태로 가공하는 단계에서 연속적으로 MgB<sub>2</sub> 분말을 투입함으로써, MgB<sub>2</sub> 분말이 삽입된 튜브가 제조되고, 최종적으로 드로잉(drawing)을 통하여 원하는 직경의 MgB<sub>2</sub> PIT 선재를 제조하는 방법이다. 이와 같은 CTFF 방법은 경제적으로 1 km 이상의 장선을 제조하는데 이상적이나, 튜브 내에 투입되는 MgB<sub>2</sub> 분말들의 치밀도가 떨어지기 때문에 상대적으로 그레인(grain)들의 연결성이 양호하지 않아 선재의 통전 전류능력이 다소 떨어지는 단점이 있다. 그러나 이에 대한 보완을 HyperTech에서 진행하여 현재는 어느 정도 우수한 선재들을 제조 및 공급하고 있는 중이다.

한편, 국내에서 MgB<sub>2</sub> PIT 선재 제조는 2001년 5월 최초로 한국전기연구원 초전도연구그룹에서 성공하였는데, 이는 한국전기연구원 초전도연구그룹 내에 Bi-계 고온초전도 PIT 선재 제조 기술들과 PIT 선재 제조 관련 인프라 장비들이 이미 확보되어 있었기 때문에, 다소 시행착오는 있었으나 비교적 용이하게 국내 최초로 스테인리스스틸(Stainless Steel; SS) 피복 재료를 사용한 MgB<sub>2</sub> PIT 선재 제조 개발에 성공하였다[8]. 그림 2의 윗부분은 국내 최초 개발된 MgB<sub>2</sub> PIT 선재의 단면 확대 사진들을 보여주고 있는데, (a)는 열처리하지 않은 MgB<sub>2</sub> PIT 선재의 단면 사진이고, (b)는 Ar-가스 분위기에서 900°C 온도를 유지하고 2시간 단순 열처리를 시행한 선재의 단면이다. 그리고 그림 2의 아랫부분은 윗부분에서 (a)와 (b)로 표시된 선을 따라 스캔한 EPMA 측정 데이터인데, 피복 재료인 SS 부분과 MgB<sub>2</sub> 코어(core) 부분이 확연히 구분됨을 알 수 있다. 그런데, Ar-가스 분위기에서 900°C 온도로 2시간 동안 열처리한 MgB<sub>2</sub> PIT 선재의 경우에는 SS 부분과 MgB<sub>2</sub> 코어 부분의 경계면에서 반응층, 즉 사층(dead layer)의 너비가, 열처리과정을 생략한 MgB<sub>2</sub> PIT 선재의 경우에 비하여, 상대적으로 2~3배정도 광범위하게 존재하고 있음을 알 수 있다.

layer)의 존재로 인하여, MgB<sub>2</sub> PIT 선재의 전체적인 통전 특성이 현저히 떨어질 수 있음을 알 수 있다[9].

### 3. MgB<sub>2</sub> PIT 선재 특성향상: 이상적인 기하학적 구조

MgB<sub>2</sub> PIT 선재는 MgB<sub>2</sub>의 초전도성이 발표되자마자 매우 빠르게 개발되어졌는데, 이와 같이 개발된 MgB<sub>2</sub> PIT 선재의 산업적 응용을 위해 통전 특성을 향상시키는 방안의 하나는 이상적인 기하학적 구조들로 제조하는 것이다. 일반적으로 MgB<sub>2</sub> 분말을 튜브 안에 넣고, 드로잉(drawing) 혹은 스웨이징(swaging) 그리고 롤링(rolling) 등을 통하여 최종적인 MgB<sub>2</sub> PIT 선재(혹은 테이프)가 되는데, 이때 초전도 선재의 통전 특성은 MgB<sub>2</sub> PIT 초전도 선재를 가공하는 과정에서(특히, 스웨이징 과정) 튜브내의 일정한 내부 압력들이 MgB<sub>2</sub> 분말에 전달되어 분말이 튜브 내에 치밀하게 다져짐으로써 MgB<sub>2</sub> 그레인(grain)들 사이의 연결성이 좋아지는 것과 관련이 있다. 따라서 제조 과정에서 내부 압력에 전달에 의한 MgB<sub>2</sub> PIT 선재의 특성 향상에 관한 영향을 알아보기 위해, 국내에서 최초로 SS 단일-필라멘트 구조, SS 멀티-필라멘트 구조, SS-SS 동-축심 필라멘트 구조, 그리고 SS-Cu 동-축심 필라멘트 구조들의 MgB<sub>2</sub> PIT 선재들을 한국전기연구원에서 개발하여 열처리과정을 생략한 선재들과 Ar-가스 분위기에서 900°C로 2시간 열처리한 선재들의 각각의 초전도 특성들을 비교 분석하였다[11]. 그림 4는 각각 기하학적 구조들을 가지고 열처리과정을 거친 MgB<sub>2</sub> PIT 선재들의 단면 모습을 보여주고 있다.

그림 5-(a)는 그림 4에서 보여주고 있는 구조들을 가지는 각각 선재들에 대하여 자화도의 자기장 의존성을 보여주고 있는데, Bean의  $J \propto \Delta M$  모델을 이용하면[21], 각각 MgB<sub>2</sub> PIT 선재들의 통전 전류밀도 특성 결과 등을 쉽게 예측할 수 있다. 여기서 열처리 과정을 생략한 선재의 경우에 제조 과정에서 MgB<sub>2</sub> 분말에 비교적 균일한 내부 압력을 전달할 수 있는 구조인 SS-SS 동-축심 필라멘트 구조 선재가 가장 높은 통전 전류밀도를

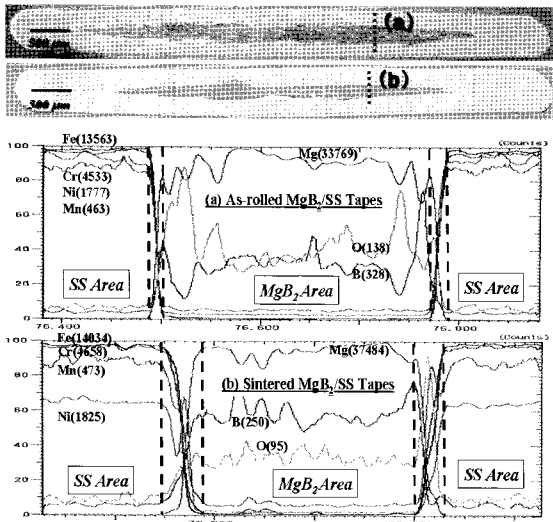


그림 2. 국내최초 제작한 MgB<sub>2</sub> PIT 선재 단면과 단면을 가로지르는 EPMA 결과; (a)는 열처리하지 않은 MgB<sub>2</sub> PIT 선재이고, (b)는 열처리한 MgB<sub>2</sub> PIT 선재임.

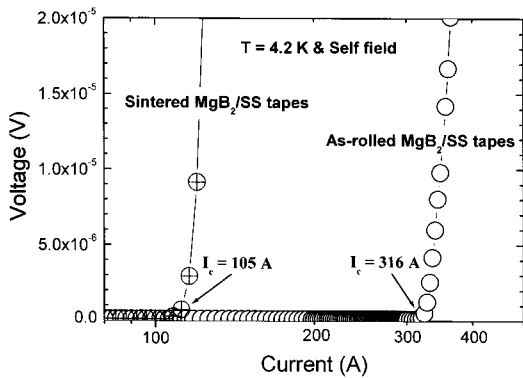


그림 3. 국내 최초로 제조된 열처리하지 않은 MgB<sub>2</sub> PIT 선재와 열처리한 MgB<sub>2</sub> PIT 선재의 4.2 K 온도에서 I-V 곡선.

한편, 그림 3은 액체헬륨 온도 4.2 K 및 자체-자기장 조건에서 열처리과정을 생략한 경우의 MgB<sub>2</sub> PIT 선재와 열처리과정을 수행한 MgB<sub>2</sub> PIT 선재들의 임계전류를 각각 측정된 결과인데, 열처리를 수행한 선재의 경우 임계전류  $I_c$ 가 105 A인데 비하여, 열처리를 수행하지 않은 선재의 경우는 임계전류  $I_c$ 가 열처리한 경우보다 3배정도 높은 316 A이다. 이와 같은 결과는 그림 2에서 설명하였듯이 열처리한 MgB<sub>2</sub> PIT 선재의 SS 피복재료와 MgB<sub>2</sub> 코어 사이의 경계에서 넓은 영역에 걸쳐 존재하는 반응층, 즉 사층(dead

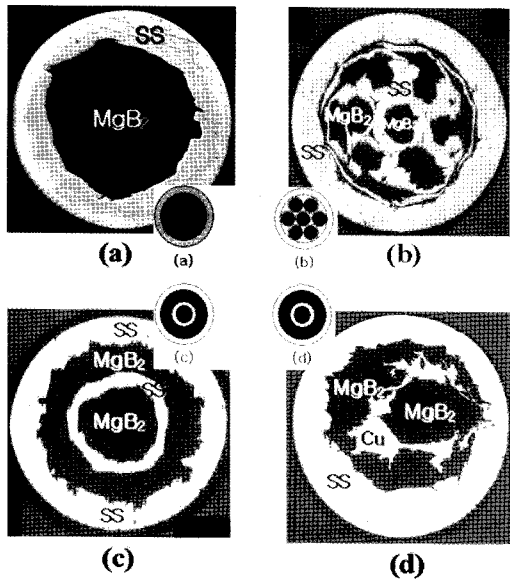


그림 4. 국내 최초로 제조된 (a)단일-필라멘트 구조, (b)멀티-필라멘트 구조, (c)스테인리스 스틸들의 동-축심 필라멘트 구조, (d)스테인리스스틸-구리 동-축심 필라멘트 구조들의 MgB<sub>2</sub> PIT 선재들 단면모양.

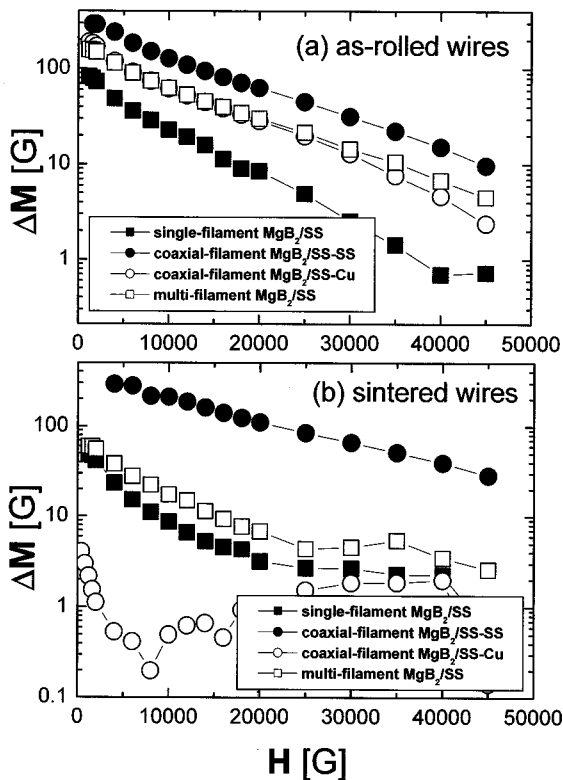


그림 5. 다양한 기하학적인 구조를 가지는 MgB<sub>2</sub> PIT 선재들의 (a)열처리를 하지 않은 상태 그리고 (b)열처리를 수행한 상태 등에서 측정된 자화도의 자기장 의존성.

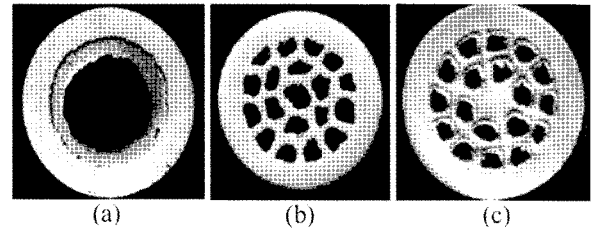


그림 6. 현재 미국 HyperTech 회사에서 시판 중인 선재들의 단면사진; (a) Cu-Monel 단일-필라멘트 MgB<sub>2</sub> PIT 선재 구조, (b) Cu를 사용한 19-필라멘트 선재 구조, (c) Cu-Monel 단일 필라멘트를 사용한 19-필라멘트 선재 구조.

보여주고 있으며, SS-Cu 동-축심 필라멘트 구조는 그림 4에서 알 수 있듯이 Cu 특성이 SS보다 무르기 때문에 스웨이징 제조 과정에서 MgB<sub>2</sub> 분말이 Cu 표면을 뚫고 나올 수 있어 효과적인 압력 전달이 이루어지지 않았음이 통전 전류밀도 결과로부터 예측할 수 있으며, 비슷하게 SS 멀티-필라멘트 구조도 그림 4에서 알 수 있듯이 스웨이징 제조 과정에서 필라멘트들의 일부 망가짐으로 MgB<sub>2</sub> 분말에 효과적인 압력 전달이 이루어지지 않아 통전 전류밀도 결과가 동-축심 결과에 비하여 다소 떨어짐을 알 수 있다. 한편, 그림 5-(b)는 각각 구조의 MgB<sub>2</sub> PIT 선재들을 열처리한 후 측정 결과인데, SS-Cu 동-축심 구조의 경우에 코어 부분의 MgB<sub>2</sub> 분말이 열처리 동안에 Cu와 반응하여 초전도 특성이 거의 사라짐을 알 수 있으며, 전체적으로 열처리를 하게 되면, SS-SS 동-축심 구조의 선재만이 다소 통전 전류밀도가 상승함을 알 수 있다.

이미 선재 제조 방법에서 언급했듯이, 그림 6은 미국 Hypertech 회사에서 자체 개발한 CTFP 제조 공정을 이용하여 제조하고 시판 중인 MgB<sub>2</sub> PIT 선재들의 단면을 보여주고 있는데[20], 모두 가공성을 용이하게 하기 위하여 Cu 피복 재료를 사용하였고, 가공 과정에서 MgB<sub>2</sub> 분말에 균일한 압력 전달하여 튜브 내에 분말들을 치밀하게 다져넣기 위해 내부 튜브로 모넬(Monel)을 사용하였다. 보편적으로 CTFP 제조 방법으로는 튜브 내에 MgB<sub>2</sub> 분말들의 치밀도 향상에 어느 정도 한계가 있기 때문에 초전도 통전 특성이 다소 떨어지는 단점이 있다. 그러나 CTFP 방법은 1 km 이상의 장-선재 제조와 이상적인 기하학적 구조의 멀티-필라멘트 구조

MgB<sub>2</sub> PIT 신재 제조에 매우 용이하기 때문에 많이 이용되고 있다.

#### 4. MgB<sub>2</sub> PIT 신재 특성향상: Flux Pinning 효과

고온초전도 Bi-계 PIT 신재에 비하여 매우 가격이 저렴한 MgB<sub>2</sub> PIT 신재들의 상업적인 응용을 위한, 자기장하에서 통전 특성향상 방법의 다른 하나는 자속고정(flux pinning; FP) 효과를 향상시키는 것으로, MgB<sub>2</sub> 초전도체 내에 인위적인 FP 센터들을 형성하는 것이다. 이와 같은 FP 센터들을 형성하는 과정에 종종 MgB<sub>2</sub> 물질들이 아세톤이나 에탄올 같은 보편적인 화학 약품에 노출되는 경우가 있는데, 이에 대한 영향을 그림 7에 보여주고 있다. 그림 7의 실험 결과에서 알 수 있듯이 아세톤이나 에탄올 등의 일반적인 화학물질은 MgB<sub>2</sub>의 초전도성에 영향을 주지 않으나, 물(H<sub>2</sub>O)은 완전히 MgB<sub>2</sub> 초전도성을 사라지게 한다[14].

한편, MgB<sub>2</sub> 초전도체 내에 FP 센터들을 인위적으로 형성하기 위한 대표적인 방법으로 가장 널리 용이하게 사용되는 방법은 나노 분말들을 소량 첨가하는 방법이다[22]. 그림 8은 한국전기연구원 연구그룹에서 얻은 결과로 Ag와 SiC 나노 분말들을 적당량 MgB<sub>2</sub> 분말에 첨가하여 형성된 FP 효과이다[10,12]. 그림 8에서 알 수 있듯이, 3 T 이상의 고자기장 영역에서 130 nm 크기의 SiC 나노분말을 8 wt% 첨가한 경우에 통전 전류 특성이 가장 이상적으로 향상됨을 확인할 수 있다.

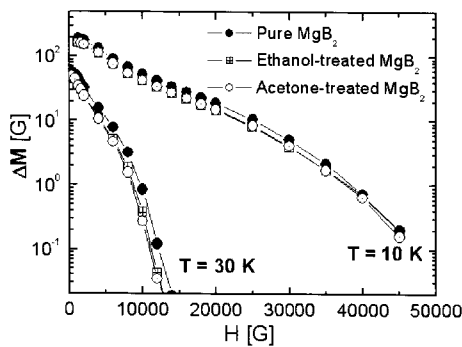


그림 7. MgB<sub>2</sub> 물질을 화학적인 아세톤이나 에탄올에 노출시켰을 때 MgB<sub>2</sub> 초전도체 자화도의 자기장 의존성.

이와 같이 MgB<sub>2</sub> 초전도체 내에 인위적인 FP 센터들의 형성을 통한 통전 전류 향상 결과는 그림 9에 잘 나타나 있다. 그림 9의 결과는 일본의 NIMS 연구그룹에서 얻은 결과인데[23], 그림에 표기된 다양한 방법으로 MgB<sub>2</sub> 초전도체 내에 FP 센터들을 형성시킨 모든 경우가 순수한 MgB<sub>2</sub> 초전도체보다 통전 전류특성이 현저하게 향상됨을 보여주고 있으며, 특히 나노 크기의 Mg 분말을 이용하고, 또한 SiC 나노 분말을 10 mol% 첨가한 경우에 가장 많이 향상된 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

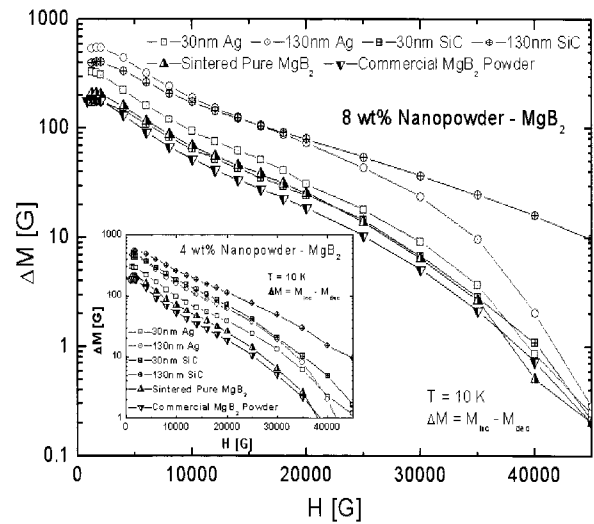


그림 8. Ag와 SiC 나노분말을 첨가한 MgB<sub>2</sub> 초전도체 자화도의 자기장 의존성.

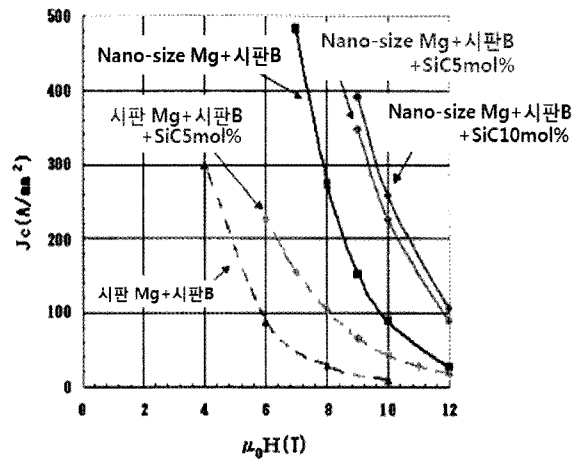


그림 9. flux pinning 효과를 향상시키기 위하여 다양한 방법으로 제조한 MgB<sub>2</sub> 초전도체내 전류밀도의 자기장 의존성.

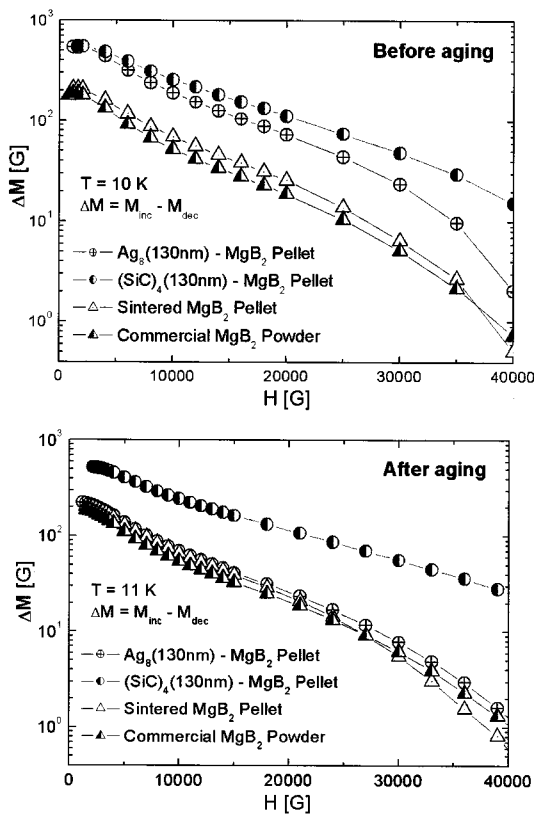


그림 10. Ag-MgB<sub>2</sub> 및 SiC-MgB<sub>2</sub> 초전도체들의 일정한 시간경과 전후 자화도 특성의 자기장 의존성.

이와 더불어 재미있는 현상의 하나는 FP 효과들이 시간이 지남에 따라 다소 변할 수 있다는 것이다[14]. 그림 10은 130 nm 크기의 Ag와 SiC 나노분말을 MgB<sub>2</sub> 초전도체내 8 wt% 첨가한 후, 시간이 경과하기 전에 Ag-MgB<sub>2</sub> 및 SiC-MgB<sub>2</sub> 초전도체들의 FP 효과를 측정 하였는데, 전체 자기장 영역에서 순수 MgB<sub>2</sub> 초전도체 보다 현저하게 통전 특성이 향상되었음을 알 수 있다. 그러나 흥미롭게 약 2년 6개월이 지난 후의 결과는 다소 차이가 있음을 알 수 있는데, SiC-MgB<sub>2</sub> 초전도체의 경우는 시간이 경과 전의 처음 경우와 거의 같은 수준으로 FP 효과가 유지됨을 확인할 수 있다. 그러나 Ag-MgB<sub>2</sub> 초전도체의 경우는 시간이 경과전의 처음 경우와 완전히 다르게 FP 효과가 거의 사라지고, 어느 정도 순수한 MgB<sub>2</sub> 초전도체의 경우로 되돌아감을 알 수 있다. 따라서 우리는 이상적인 FP 효과를 얻기 위해서는 적정 나노 크기의 적정량 SiC 나노분말 첨가해야 한다.

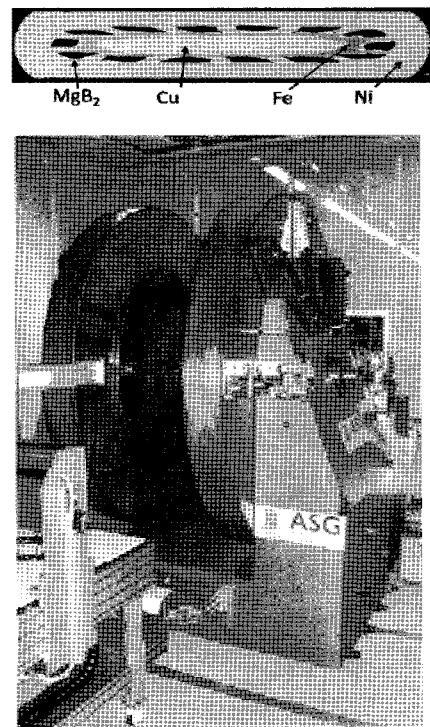


그림 11. 그림 위의 단면구조를 갖는 MgB<sub>2</sub> PIT 선재들을 이용하여 제작한 MgB<sub>2</sub>-based, cryogenic free, open MRI 마그넷모습.

## 5. MgB<sub>2</sub> PIT 선재의 응용성

이미 언급한 것처럼 MgB<sub>2</sub> 물질은 2-성분계 초전도체이므로 합성이 쉽고, 지구상에 대체적으로 Mg와 B의 매장량이 풍부하며, 또한 제조 방법이 기존의 PIT 방법으로 쉽게 제조할 수 있고, 고온초전도 Bi-계 PIT 선재에 사용하는 값비싼 Ag 피복 재료 대신에 매우 경제적인 Cu나 Fe 등의 피복 재료를 사용하기 때문에 MgB<sub>2</sub> PIT 선재 가격이 약 1 \$/kA-m 정도로 매우 저렴하다. 따라서 그림 11에서 MgB<sub>2</sub> PIT 선재를 이용하여 20 K, 0.5 T 자기장을 가지는 MRI용 MgB<sub>2</sub> 초전도자석을 개발한 것처럼[24], MgB<sub>2</sub> PIT 선재를 이용한 초전도응용기기 개발이 현재 세계적으로 활발히 진행되고 있는데, MgB<sub>2</sub> 초전도체의 임계전이 온도가 39 K이므로 액체 질소 온도에서 사용하는 초전도응용기기 개발은 불가능하더라도, 20 K 온도 영역에서 가동되는 응용기기 개발을 함으로써 값비싼 액체헬륨을 사용하는 저온초전도 선재 시장을 목표로 하고 있다. 이와 같은 목표가 실현되기 위해서는, 먼저 MgB<sub>2</sub> PIT 선재의 20

K 온도와 고-자기장 하에서 통전 특성향상과 상대적으로 낮은 상부임계자기장  $H_{c2}$ 의 상승이 요구되는데, 이에 대한 기초 연구결과들이 이미 발표되어 현재 이를 응용 중에 있다.

## 6. MgB<sub>2</sub> CC 선재 제조의 어려움

지금 까지 기술한 MgB<sub>2</sub> PIT 선재 이외에, 또한 MgB<sub>2</sub> 소자 응용을 위한 박막 제조 연구들이 2001년 MgB<sub>2</sub> 초전도체가 소개된 이후 꾸준히 진행되어 왔다. 일반적인 MgB<sub>2</sub> 박막 제조의 방법으로는 크게 2-단계 (two-step) 방법 혹은 in-situ 1-단계 (one-step) 방법 등이 있다. 2001년 초에 성균관대 강원남 교수님께서 포항공대 연구팀에 소속되어 있을 때 세계 최초로 2-단계 방법을 이용하여, 최고 좋은 성능의 MgB<sub>2</sub> 박막 제조에 성공하였다[25]. 그러나 2-단계 방법으로 제조 되는 박막은 여러 가지 물리적 특성 문제로 초전도 전자 소자용 박막 제조에 적합하지 않고, 또한 장-선의 MgB<sub>2</sub> 박막 선재 (Coated Conductor; CC) 제조 또한 적합하지 않다. 따라서 in-situ 1-단계 (one-step) 방법을 개선한 새로운 MgB<sub>2</sub> 박막 제조 기술 개발 등이 활발히 진행되어, 2002년 미국 펜실바니아 연구팀에서 개발한 HPCVP (Hybrid Physical Chemical Vapor Deposition) 방법이 각광을 받았으나, 유해가스인 B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>을 사용해야하고, 장선의 CC 개발 용으로는 적합하지 않은 단점이 있다[26]. 따라서 2005년경 미국의 Conductors 회사에서 HPCVD 방법과 차이가 있고, 다소 제조가 용이한 반응열증발 (Reactive Evaporation) 방법으로 다양한 기판위에 MgB<sub>2</sub> 박막을 제조하는 것에는 성공하였으나[27], 아직까지 장선의 MgB<sub>2</sub> CC 선재 제조하였다는 보고는 없다.

한편, 한국전기연구원에서는 MgB<sub>2</sub> CC 선재 개발을 목표로 유해가스 B<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 사용 없이 기존의 제조 방법과 다른 개념으로 ESSD (Evaporation Sputtering Simultaneous Deposition) 방법을 고안하고 in-situ MgB<sub>2</sub> 박막 제조를 시도하여 단결정위에 MgB<sub>2</sub> 박막 제조는 성공하였으나[28,29], MgB<sub>2</sub> CC 선재 개발에는 만족할만한 성과를 얻지 못했다. 그러나 그림 12에 나타난 것처럼, 장선의

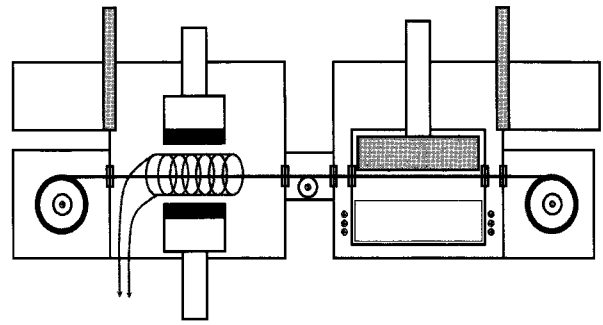


그림 12. 장선의 MgB<sub>2</sub> CC (박막선재)를 제조하기 위한 개념적인 연속공정 도식도.

MgB<sub>2</sub> CC 선재 제조를 위하여 기존의 2-단계 증착 방법을 개선하여, 먼저 B를 sputtering으로 증착한 후, Mg vapour 상태에서 반응을 이끌어 in-situ 2-단계 reel-to-reel MgB<sub>2</sub> CC 제조 방법을 고안하여 국내 특허를 출원한 상태이나[30], 현실적으로 장선의 MgB<sub>2</sub> CC 선재 제조는 기술적인 극복할 어려움이 있고, MgB<sub>2</sub> PIT 선재 제조에 비하여 매우 비경제적이기 때문에, 고온초전도 Bi-계 PIT 선재를 ReBCO CC 선재로 대체하고 있듯이, MgB<sub>2</sub> CC 선재가 MgB<sub>2</sub> PIT 선재를 대체하여 초전도응용기에 적용을 기대하기란 매우 어렵다고 할 수 있다.

## 7. 결 론

MgB<sub>2</sub> 물질의 초전도성이 밝혀진지 10년째로 접어들고 있는 시점에, MgB<sub>2</sub> 물질에 관련된 물리적인 초전도 특성들에 대하여 많은 사실들이 규명되어 최종적인 MgB<sub>2</sub> 초전도 메커니즘 규명이 진행되고 있으며, 2-성분계로서 중간금속성 성질인 MgB<sub>2</sub> 초전도체는 PIT 선재 제조가 비교적 쉽고, 제조 단가가 매우 경제적이기 때문에 이미 MgB<sub>2</sub> PIT 선재가 상용화되어 일부는 시장에 나왔으나, 기존의 저온초전도 선재 NbTi 혹은 Nb<sub>3</sub>Sn 초전도 선재를 압도하는 특성들을 보여주지 못하고, 상대적으로 고온초전도 ReBCO CC 선재 개발이 이루어져 상용화가 이루지는 중이기 때문에, 신기술 및 신개념을 도입한 MgB<sub>2</sub> PIT 선재의 획기적인 특성 향상 없이는 MgB<sub>2</sub> PIT의 산업적 응용을 기대하기 힘들다. 따라서 우리는 기존의 기술에서 과감히 탈피하고, 새로운 아이디어 창출을 추진

하여, MgB<sub>2</sub> 나노 탐침 (nano probe) 및 MgB<sub>2</sub> 나노 선재(nano wire) 개발 같은 독창적인 기술에 도전하는 연구가 필요하다고 하겠다.

### 참고문헌

- [1] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39K in magnesium diboride," *Nature*, 401, pp. 63-64, 2001.
- [2] S. L. Bud'ko, G. Lapertot, C. Petrovic, C. E. Cunningham, N. Anderson, and P. C. Canfield, "Boron isotope effect in superconducting MgB<sub>2</sub>," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 86, pp. 1877-1880, 2001.
- [3] H. J. Choi, D. Roundy, H. Sun, M. L. Cohen, and S. G. Louie, "The origin of the anomalous superconducting properties of MgB<sub>2</sub>," *Nature*, 418, pp. 758-760, 2004.
- [4] H. Schmidt, J. F. Zasadzinski, K. E. Gray, and D. G. Hinks, "Evidence for two-band superconductivity from Break-Junction Tunneling on MgB<sub>2</sub>," *Phys. Rev. Lett.*, 88, pp. 127002-1~4, 2002.
- [5] D. C. Larbalestier, L. D. Cooley, M. O. Rikel, A. A. Polyanskii, J. Y. Jiang, S. Patnaik, X. Y. Cai, D. M. Feldmann, S. A. Gurevich, A. A. Squitieri, M. T. Naus, C. B. Eom, E. E. Hellstrom, R. J. Cava, K. E. Regan, N. Rogado, M. A. Hayward, T. He, J. S. Slusky, P. Khalifah, K. Inumara, and M. Hass, "Strongly linked current flow in polycrystalline forms of the superconductor MgB<sub>2</sub>," *Nature*, 410, pp. 186-189, 2001.
- [6] A. Gurevich, "Enhancement of the upper critical field by nonmagnetic impurities in dirty two-gap superconductors," *Phys. Rev. B*, vol. 67, pp. 184515-1~13, 2003.
- [7] A. Gurevich, S. Patnaik, V. Braccini, K. H. Kim, C. Mielke, X. Song, L. D. Cooley, S. D. Bu, D. M. Kim, J. H. Choi, L. J. Belenky, J. Giencke, M. K. Lee, W. Tian, X. Q. Pan, A. Siri, E. E. Hellstrom, C. B. Eom, and D. C. Larbalestier, "Very high upper critical fields in MgB<sub>2</sub> produced by selective tuning of impurity scattering," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 278-286, 2004.
- [8] K. J. Song, N. J. Lee, H. M. Jang, H. S. Ha, D. W. Ha, S. S. Oh, M. H. Sohn, R. K. Ko, C. Park, Y. K. Kwon, and K. S. Ryu, "Single-filament composite MgB<sub>2</sub>/stainless-steel ribbons by powder-in-tube process," *Physica C*, vol. 370, pp. 21-26, 2002.
- [9] K. J. Song, C. Park, N. J. Lee, H. M. Jang, H. S. Ha, D. W. Ha, S. S. Oh, M. H. Sohn, R. K. Ko, Y. K. Kwon, and J. H. Joo, "Fabrications and properties of MgB<sub>2</sub>/stainless-steel tapes by PIT process," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, pp. 3221-3224, 2003.
- [10] K. J. Song, S. J. Choi, S. W. Kim, C. Park, J. H. Joo, H. J. Kim, J. K. Chung, R. K. Ko, H. S. Ha, E. Y. Lee, G. H. Rim, and Y. K. Kwon, "Influence of Ag nano-powder additions on the superconducting properties of MgB<sub>2</sub> materials," *Jour. of the Kor. Ins. of Appl. Supercond. and Cryogenics*, vol. 5, pp. 6-10, 2003.
- [11] K. J. Song, S. W. Kim, C. Park, J. H. Joo, S. J. Choi, R. K. Ko, H. S. Ha, D. W. Ha, and S. S. Oh, "The effect of geometry of composite MgB<sub>2</sub>/stainless-steel(SS) wires fabricated by PIT process on the superconducting properties," *Physica C*, 407, pp. 17-22, 2004.
- [12] K. J. Song, S. W. Kim, C. Park, J. K. Chung, J. S. Yang, J. H. Joo, R. K. Ko, H. S. Ha, H. S. Kim, D. W. Ha, S. S. Oh, E. Y. Lee, Y. K. Kwon, and G. H. Rim, "The effect of nano-powder additions on the superconducting properties of MgB<sub>2</sub>," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, pp. 3288-3291, 2005.
- [13] K. J. Song, C. Park, S. W. Kim, R. K. Ko, H. S. Ha, H. S. Kim, S. S. Oh, Y. K. Kwon, S. H. Moon, and S. -I. Yoo, "Superconducting properties of polycrystalline MgB<sub>2</sub> superconductors fabricated by spark plasma sintering,"



Physica C 426-431, pp. 588-593, 2005.

[14] K. J. Song, R. K. Ko, H. S. Kim, T. H. Kim, N. J. Lee, H. S. Ha, D. W. Ha, S. S. Oh, S. H. Moon, C. Park, and S. I. Yoo, "The effect of solvent treatments and aging on the superconducting properties of MgB<sub>2</sub> materials," Physica C, 467, pp. 106-111, 2007.

[15] 김호섭, 송규정, 김태형, 오상수, 하홍수, 하동우, 고락길, "2원화 복합 동시증착 박막 증착 장치," 등록번호: 10-0772009 (2007.10.25).

[16] 송규정, 김호섭, 김석환, 오상수, "박막증착장비 및 그 방법," 등록번호: 10-0661912 (2006.12.20).

[17] 송규정, 김석환, 박찬, 문승현, 유상임, "통전 활성 소결 방법을 이용한 MgB<sub>2</sub> PIT 초전도 선재의 제조장치 및 제조방법," 등록번호: 10-0581556 (2006.05.12)

[18] 송규정, 김석환, 박찬, 권영길, "동축심 형태의 봉화 마그네슘 초전도선재의 제조," 등록번호: 10-0524557 (2005. 10.21).

[19] 오상수, 하동우, 하홍수, 송규정, 권영길, 류강식, "MgB<sub>2</sub> 초전도 선재의 제조 방법," 등록번호: 10-0392511 (2003. 07.10)

[20] <http://www.hypertechresearch.com>, Hyper Tech research, Inc.'s CTFP processing.

[21] C. P. Bean, "Magnetization of high-field superconductors," Rev. Mod. Phys., vol. 36, pp. 31-36, 1964.

[22] "The second special issue of Physica C on MgB<sub>2</sub>," edited on Setsuko Tajima, Physica C, 456, pp. 1, 2007, and references therein.

[23] H. Yamada, M. Hirakawa, H. Kumakura, A. Matsumoto, and H. Kitaguchi, "Critical current densities of powder-in-tube MgB<sub>2</sub> tapes fabricated with nanometer-size Mg powder," Appl. Phys. Lett., vol. 84, pp. 1728-1730, 2004.

[24] <http://www.columbussuperconductors.com>, "First MRI system based on the MgB<sub>2</sub> superconductor," Columbus Superconductors' press releases, Nov. 2006.

[25] W. N. Kang, H. -J. Kim, E. -M. Choi, C. U. Jung, S. -I. Lee, "MgB<sub>2</sub>

superconducting thin films with a transition temperature of 39 Kelvin," Science, 292, pp. 1521-1523, 2001.

[26] X. H. Zheng, A. V. Pogrebnikov, A. Kotcharov, J. E. Jones, X. X. Xi, E. M. Lyszczek, J. M. Redwing, S. Y. Xu, Q. Li, J. Lettieri, D. G. Schlom, W. Tian, X. Q. Pan, and Z. K. Liu, "In situ epitaxial MgB<sub>2</sub> thin films for superconducting electronics," Nat. Mater., 1, pp. 35-38, 2002.

[27] Brian H. Moeckly, Menlo Park, Ward S. Ruby, "Growth of in situ thin films by reactive evaporation," US Patent Application Publication, US 2005/0116204 A1, pp. 1-17, 2005.

[28] K. J. Song, H. S. Kim, T. H. Kim, Y. S. Lee, R. K. Ko, H. S. Ha, D. W. Ha, S. S. Oh, S. H. Moon, C. Park, and S. -I. Yoo, "The growth of in-situ MgB<sub>2</sub> thin film by ESSD method," Jour. of the Kor. Ins. of Appl. Supercond. and Cryogenics, vol. 8, pp. 18-22, 2006.

[29] H. S. Kim, K. J. Song, R. K. Ko, S. S. Oh, D. W. Ha, T. H. Kim, H. S. Ha, and C. Park, "Fabrication of in-situ MgB<sub>2</sub> films using evaporation and sputtering simultaneous deposition technique," IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 19, pp. 2815-2818, 2009.

[30] 송규정, 고락길, 김호섭, 하홍수, 하동우, 오상수, "박막선재 제조장치," 출원번호: 10-2007-0097973 (2007.9.28).

## 저자이력



송규정(宋奎丁)

1963년 4월 14일생, 1986년 고려대학교 물리학과 졸업, 1988년 동대학원 졸업(이학석사), 1999년 미국 테네시주립대학원 졸업(이학박사), 1999~2000년 미국 메사추세츠주립대 Post Doc., 2000~2008년 한국전기연구원 책임연구원, 현재 전북대학교 과학교육학부 조교수.



고락길(高樂吉)  
1972년 5월 1일생, 1995년 배재대 물리학과 졸업, 1997년 동 대학원 졸업(이학석사), 현재 한국전기연구원 초전도연구센터 선임연구원.



김호섭(金昊燮)  
1972년 3월 4일생, 1995년 연세대 물리학과 졸업, 2003년 한국과학기술원 물리학과 졸업(이학박사), 현재 한국전기연구원 초전도연구센터 선임연구원.



하홍수(河洪秀)  
1969년 5월 21일생, 1995년 성균관대 공대 금속공학과 졸업, 1997년 동 대학원 금속공학과 졸업(공학석사), 2007년 동 대학원 신소재공학부 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도연구센터 선임연구원.



하동우(河東雨)  
1962년 7월 12일생, 1985년 경북대 금속공학과 졸업, 동 대학원 졸업(공학석사), 2001년 연세대 대학원 금속공학과 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도연구센터 책임연구원.



오상수(吳詳秀)  
1959년 11월 1일생, 1983년 경북대 금속공학과 졸업, 1992년 Kyoto대 대학원 졸업(공학박사), 현재 한국전기연구원 초전도연구센터 책임연구원.