

MgB₂ 초전도 기술

정국채

재료연구소 분말/세라믹 연구본부 나노기능분말연구실

1. 서 론

MgB₂는 2001년 발견되었으며 초전도 전이 온도가 약 40 K(Kelvin)로 현재 상용화된 저온초전도(약 10 K)보다 훨씬 높기에 향후 예상되고 있는 응용온도인 10-30 K에서는 값비싼 액체헬륨 대신 냉동기 사용이 가능한 큰 장점을 갖는다. 또한 높은 결정정렬성이 요구되지 않으므로 km급 이상의 선재 제조공정 등에도 적용 가능하다 [1-5].

현재 저온초전도의 대안으로 주목되는 MgB₂ 초전도 물질을 실질적인 도체형태로 개발하고 MRI, 한류기, 자기 분리, 등의 다양한 초전도 기기응용을 위해서는 긴 길이의 선재형태로 제조되어야 한다. 이러한 목적을 위해서는 짧은 선재나 벌크시료에서 얻어진 핵심기술 및 공정을 장선화 기술에 접목되어야 한다. 특히, 최근의 MgB₂ 초전도 연구결과에 따르면 기존 저온초전도 NbTi 특성에 버금가는 것을 볼 수 있다 [2]. 앞으로 남은 과제는 이러한 초전도 특성향상과 더불어 긴 길이의 도체형태에 적용하는 것이며 구체적으로 MgB₂ 장선재화 공정기술 확립과 보다 경제적인 공정이 요구되고 있다 [6-10].

2. MgB₂ 초전도 연구개발 동향

2.1. 국외 MgB₂ 초전도 연구개발

MgB₂ 초전도 연구개발 동향은 장선재 개발을 주도하고 있는 선도적인 기업체를 중심으로 기술하고 몇몇 연구소 및 대학의 연구결과를 살펴보았다.

미국 Hypertech Research Inc. (HTR)에서는 초기 MgB₂ 발견이후 선재 제조를 시작하였고 그림 1의 고유방식인 Continuous Tube Forming & Filling process (CTFF)를 채택하여 km급 선재를 제조하고

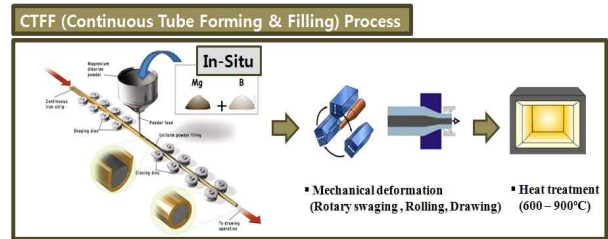


그림 1. MgB₂ 초전도선재 제조공정 (CTFF 방식).

있으며 기본 구조는 MgB₂를 둘러싸고 있는 화학적 반응 방지층으로는 Nb를 사용하고 안정화층으로 Cu, 그리고 최외각 피복재로는 Monel을 표준으로 사용하고 있다 [10-12]. HTR에서는 각 초전도 응용분야에 따라 다양한 형태 및 직경의 MgB₂ wire를 디자인하고 제조하였는데 단심 및 다심, 약 50 μm의 미세선, 그리고 케이블, wire in Channel 등이 있으며 다심의 경우 7, 18, 36, 등을 선보이고 있다.

최근에는 MgB₂ 연결성향상을 위하여 이태리에서 개발된 Reactive Liquid Infiltration 방식을 새로이 채택하여 자체적으로 Advanced Internal Mg Infiltration 개선공정을 선보이며 기존 CTFF 방식에 비하여 최대 약 4.7배 정도 증가한 초전도 임계전류특성을 보고하였고 이를 2nd Generation MgB₂ wire라고 명명하고 있다 (그림 2) [12-14]. HTR은 선재개발과 동시에 다양한 초전도 응용분야에

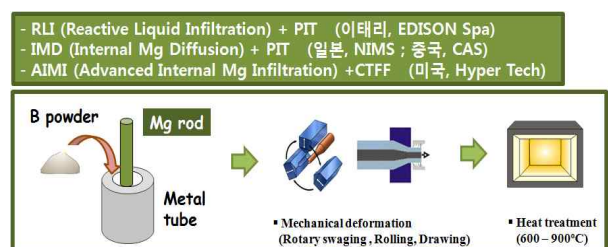


그림 2. MgB₂ 초전도선재 제조공정 (RLI, IMD, AIMI 방식).

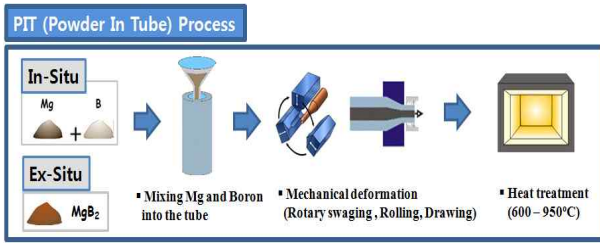


그림 3. MgB₂ 초전도선재 제조과정 (PIT 방식).

선재를 공급하여 실용화 가능성을 타진해 오고 있었으며, 현재 진입할 수 있는 틈새시장으로서 MRI systems, off-shore wind motors and generators, smart grid, fault current limiters 등 다양한 응용분야로 확대를 꾀하고 있다.

이태리 Columbus Superconductor는 MgB₂ 초전도 선재를 개발하고 있는 또 하나의 선도적인 업체로서 미국 Hypertech Research Inc.와 비슷한 초전도 선재개발 속도를 보여주고 있다. 주로 분말을 장입하는 Powder-In-Tube (PIT) 방식을 채택하고 있으며 사용하는 전구체 분말을 직접 제조하고 있다. 또한 Mg과 B을 혼합하여 외부에서 반응시킨 MgB₂ 분말을 사용하는 ex-situ 방식을 계속해서 고수하고 있고 선재의 형태는 테이프, 각형, 원형 및 단심/다심을 제조하고 있지만 테이프 형태의 MgB₂ wire 제조에 보다 더 강점을 갖고 있다 [15, 16].

특히 MgB₂ 초전도 실용화 측면에서 다양한 응용기기 개발에도 힘쓰고 있다. 다양한 형태의 MgB₂ coil 및 cable 연구를 통하여 Open-Sky MRI, DC induction heater, IGNITOR nuclear fusion project의 Tokamak용 outer poloidal field coils에 까지 응용분야 확대를 꾀하고 있다. 또한 이를 준비하기 위해 현재 2-4 km 수준의 single piece 길이를 약 20 km으로 scale-up하는 작업을 시작하였다고 보고하였다 [16]. MgB₂ 초전도의 가장 가능성 높은 응용분야로 생각되는 MRI 적용에 있어서도 이미 총길이가 약 18 km MgB₂ 선재를 제조하여 관련업체인 ASG, Paramed와 함께 세계 최초로 MgB₂ 선재를 사용한 상용화급 MRI를 선보였으며 이미 유럽 및 미국의 병원에 설치되었다 [16].

일본 Hitachi에서는 National Institute

for Materials Science (NIMS) 및 Univ. of Tokyo와의 협력을 통한 MgB₂ 초전도 선재를 개발하고 있다. 자체 연구개발에 대한 부분은 잘 알려져 있지 않으나 NIMS와의 연구협력이 매우 높은 것으로 판단된다. 공개된 자료에 의하면 MgB₂의 확산방지층으로 Fe를 사용하고 있으며 안정화층인 Cu를 전기도금으로 실시하고 있는 특징이 있다 [17-19]. 또한 자체적으로 MgB₂용 전구체 분말을 제조하고 있으며 MgB₂ coil 및 소형 MRI 제조 연구를 진행하고 있다. 특이한 것은 MgB₂ 장선재, 케이블, 초전도 자석 관련기술을 다수 특허출원하고 있다는 점이다 [19].

한편, 긴밀한 연구협력 중인 일본 NIMS은 MgB₂ 초전도 연구에 오랜 경험을 갖고 있으며 선도적인 기술개발을 주도해 왔다. 제조된 최종 MgB₂ 선재의 충전밀도(packing density)가 약 50%로 낮은 것에 주목하여 이를 극복하기 위해 PIT 공정에 Internal Mg Diffusion (IMD) 방식을 도입하였다. 이 방식은 sheath tube 내부에 Mg rod를 넣고 그 주위에 B 등을 넣어주게 되고 반응 후 MgB₂ core 밀도를 거의 100%에 가깝게 증가시킬 수가 있다. 그러나 확산반응의 한계, 내부 pore 생성, 미반응 B 등이 문제점으로 지적되고 있다. NIMS에서는 최종 Mg rod의 직경을 줄이기 위해 다심공정을 적용하였고 7-filamentary IMD MgB₂ wire에서 약 80%에 가까운 밀도를 달성하였다 [20].

이외에도 MgB₂ 초전도 선재를 개발하고

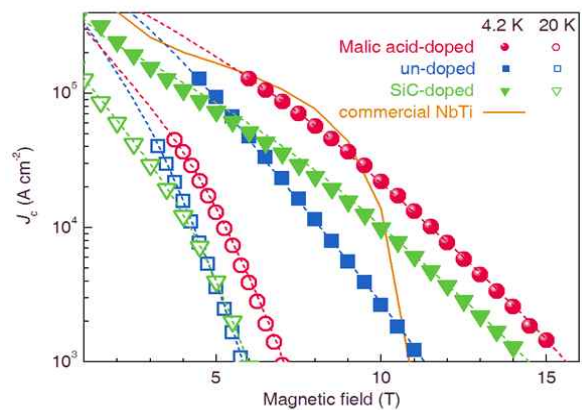


그림 4. Malic acid, SiC 도핑에 따른 MgB₂ 초전도 선재의 자기장하 임계전류밀도 특성 [9].

기업체를 소개하면, 이태리 EDISON는 에너지 전문기업으로 새로운 재료로 MgB₂ 초전도를 채택하여 Reactive liquid Mg infiltration 공정을 확립하여 관련 초전도 선재 제조기술을 개발 중이며, 독일 Bruker에서도 공동개발기관인 IFW Dresden과 함께 2009년부터 MRI 자석용으로 사용가능한 km급 MgB₂ 선재 기술을 개발하고 있다. 최근 대기업인 General Electric도 Healthcare 분야에 초전도 MRI사용을 염두에 두고 있으며 이를 위한 초전도자석용 선재로 MgB₂에 관심을 갖고 있다.

MgB₂의 초전도 물질의 특성향상에 있어서는 호주 울롱공 대학의 ISEM 연구소를 중심으로 많은 연구개발이 이루어져 왔다. SiC, Malic acid, CNT, Graphene, SiCl₄ 등 다양한 도핑소재 개발을 주도해 왔으며 장선재에도 적용이 가능한 균일도핑을 유도하기 위해 화학적 도핑소재 및 도핑공정 개발을 진행해 왔다. 그림 4와 같이 저온초전도 NbTi에 맞먹을 수 있는 특성을 보여주고 있으며 넓은 자기장 영역에서 도핑의 효과에 의한 초전도 임계전류밀도 향상을 볼 수 있다. 또한 미국, 일본, 터키, 중국 등 많은 외국연구기관 및 기업체와의 연구협력도 매우 적극적으로 추진하여 왔다.

2.2. 국내 MgB₂ 초전도 연구개발

국내 MgB₂ 초전도 연구개발을 살펴보면 현재 2개의 기업이 적극적으로 참여하여 초전도 선재개발에 나서고 있다. Kiswire Advanced Technology (KAT)는 초전도 선재 제조관련 전문회사로 2001년부터 시작하여 저온초전도체인 Nb₃Sn와 NbTi 선재개발을 완료하였고 2012년경부터는 MgB₂ 초전도 선재 개발을 진행하고 있다. 초전도 소재 및 선재제조까지 주요 핵심기술을 개발 보유하고 있으며 현재, MRI magnet 설계 및 개발 그리고 상용화에 힘쓰고 있다. 2015년부터는 정부지원을 받아 초전도 의료 및 전력기기 적용을 위한 임계전류특성이 우수한 6km급 MgB₂ 초전도 선재 및 코일 개발 사업을 진행하고 있다.

1977년 설립된 소재 전문 제조기업인 (주)삼동은 한국원자력연구원으로부터 MgB₂ 선재 제조기술을 이전받아 공동연구를 통해 고풍성

초전도 선재개발에 나서고 있다. 특히 특허기술인 글리세린 첨가공정은 균일코팅이 가능하여 MgB₂의 자기장하 임계전류특성 향상이 가능하며 저온 열처리공정을 통해 자속고정 특성 향상 및 원가경쟁력 확보가 가능할 것이다. 또한 초전도 선재 상용화에 필수적인 나노분말 제조 및 제어기술 등 공정노하우를 갖추게 되어 향후 차세대 전력기기 및 의료기기 신소재 및 새로운 절연소재 공동개발을 추진하고 양산화 기술개발로 세계시장 선점을 계획하고 있다.

한국전기연구원 초전도연구센터에서는 국내 최초로 MgB₂ 초전도 선재 제작을 시도하였으며 ex-situ 방식으로 외부 피복재 SUS를 사용하여 내부 MgB₂의 밀도향상을 이루었으며 이후 진공증착법에 의한 MgB₂ 박막연구도 시도하였다.

한국원자력연구원은 MgB₂의 입도제어, 글리세린 도핑, MgB₄ 전구체 등을 통한 초전도 특성향상 연구를 꾸준히 진행하고 있으며, 결정성장을 억제하기 위한 저온열처리 공정 등을 개발하여 단심의 초전도 선재에서 높은 임계전류 특성을 보여주고 있다.

재료연구소의 MgB₂ 초전도 소재 및 자속고정 특성연구는 원천적인 핵심기술 개발을 위한 자체경쟁력 확보를 위한 연구와 더불어 이 분야에서 가장 선도기관인 호주 ISEM과 긴밀한 공동연구를 수행해 왔다. 특히, 원료분말인 Mg과 B분말의 제조 및 입도/분포 제어, 새로운 도핑물질 개발에 힘쓰고 있으며, 또한 장선재 제조공정의 경쟁력확보를 위한 다양한 성형 공정 설계 및 공정최적화에 노력하고 있다.

한편, 고온초전도 Coated Conductor와 비슷한 형태로서 한국에서 주도적으로 MgB₂ coated conductor 개발도 진행되었다. 영남대, 성균관대, 충북대 협동연구로 고풍성 MgB₂ 박막제조가 가능한 새로운 방법인 Hybrid Physical-Chemical Vapor Deposition (HPCVD)관련 기술을 연구하였으며 세계적인 수준의 MgB₂ 박막기술을 확보하였다.

3. MgB₂ 초전도 기술의 전망

MgB₂ 초전도의 실질적인 상용화를 앞당기기 위해서는 우선적으로 고풍성 초전도 장선재의 개발이 절대적이며 이를 이용한 초전도 응용기기 등의 개발이 요구된다.

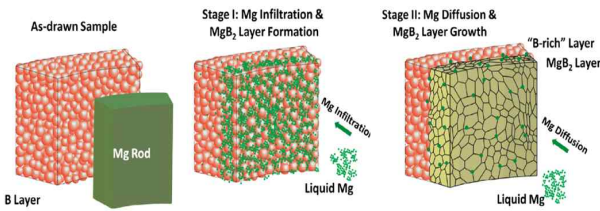


그림 5. AIMI(IMD) 방식에서 MgB₂ layer 형성에 대한 개략도(Two-stage formation), [14]

MgB₂ 장선재를 제조하기 위한 PIT 및 CTFE 공정기술은 현재 수 km 제조 가능성을 이미 보여주고 있다. 그러나 원료분말인 Mg과 B 그리고 반응된 MgB₂ 등으로 구성된 분말형태가 적용되고 있어 최종적으로 MgB₂ 장선재에서 발생하게 되는 내부 기공에 의한 초전도 밀도의 저하를 피할 수가 없다. 따라서 사용하는 원료분말의 입도제어, 기공발생을 최소화할 수 있는 기계적 가공 및 열처리의 최적화 등을 통한 MgB₂ core 밀도 향상이 반드시 달성되어야 한다. [14, 20].

따라서 최근 고밀도 층상구조의 IMD 방식은 향후 MgB₂ 초전도 장선재 제조기술로서 주목을 받고 있다. 그러나 액상변환 및 침입과정 그리고 이어지는 확산반응은 이미 형성된 층에 의한 확산거리의 한계성 그리고 반응 후 중심부에 남아있는 빈 공간은 피할 수가 없다. 또한 rod 형태의 Mg는 기계적 연성이 떨어지므로 장선재 가공의 어려움이 존재하고 km급의 초전도 선재길이 (현재 100 m 수준, 일본 NIMS)에서 균일성을 확보해야 하는 과제를 안고 있다 [13, 14, 20, 28].

MgB₂ 초전도 선재에 사용되는 MgB₂ 자체의 초전도 특성향상은 그동안 Bulk, Film, 등을 통해서 많은 연구가 이루어졌다. 특히, 도핑물질(Dopants) 도입을 통해 초전도 임계전류밀도 증가, 자기장하 자속고정력 증가, 등이 있었으며 또한 MgB₂ film 연구를 통하여 초전도 연결성 향상, 결정성장의 중요성 등이 입증되어 왔다 [4, 11].

그러나 초전도 장선재에 적용하기 위해서는 도핑의 균일성 확보가 가장 큰 문제점으로 지적될 수 있고 이러한 관점에서 볼 때 도핑공정은 기존 미량의 물리적인 첨가보다

는 화학적인 도핑에 의한 균일성 확보 (Carbon coated Boron 사용 등)가 필요하며 도핑공정 자체의 가격 경쟁력도 요구될 것이다. [2, 6, 7, 9, 13, 22].

또한 내부 MgB₂ core 밀도 및 연결성 향상을 위해 사용하는 원료분말의 순도 및 입도제어(입도 및 분포 등)를 최적화해야 할 것이다. 초전도 유효 단면적에 영향을 주는 절연성의 MgO 등을 최소화할 필요성이 높아지고 있으며 Mg의 높은 증기압을 제어하기 위한 저온 열처리 등이 요구되고 있다 [23].

원료물질인 고특성 붕소(Boron)의 안정적 확보 및 친환경 제조공정 개발도 MgB₂ 선재의 가격 경쟁력을 위해 반드시 해결해야 될 과제이다 [24-27].

MgB₂ 초전도 선재는 PIT 및 CTFE 공정을 적용하여 꾸준히 선재길이 증가 및 특성향상 등이 이루어졌다. 초기 1-2 km급 선재길이에서 현재 single piece로 약 5 km 이상으로 제조되고 있다 [12, 16]. 최근 주목받는 2nd Generation MgB₂ wire 제조공정인 IMD 의 경우 2015년 일본 NIMS에서 약 100 m 길이제조에 성공하였다 [28]. MgB₂ 초전도 선재길이에 대해서는 장비의 scale-up 문제만 남아있어 향후 길이에 대한 큰 제약은 없을 것으로 보이며 실제로 미국 HTR에서는 single piece로 60 km 이상을 계획하고 있다 [12].

MgB₂ 초전도 선재기술의 발전으로 가격도 초기에 비하여 절반 이하로 떨어졌으며, 향후 고가의 Nb 확산방지층 대체, 선재 대량생산, 초전도 특성향상에 힘입어



그림 6. MgB₂ 초전도기술의 응용분야.

1\$/m이하 가격도 현실화될 것으로 판단된다. 또한 MgB₂ 초전도 선재를 이용한 다양한 응용기기 개발을 위한 기반기술 등도 한층 활발히 진행될 것으로 예상된다.

4. MgB₂ 초전도 기술의 파급효과

MgB₂ 초전도 기술개발에 따라 그림 6과 같이 다양한 응용이 가능하며, 가장 영향력이 큰 분야는 의료 및 생명분야인 MRI, NMR, 등일 것이다. 기존 매장량이 한정되어 고갈이 예상되고 높은 가격의 액체헬륨을 사용하지 않는 무헬륨 냉각방식이 적용될 수 있기에 관련시장의 관심이 매우 높다. 특히 MgB₂가 적용되는 MRI의 경우 중소규모의 의료기관 및 후진국 오지 등에서 활용된다면 인류의 건강 및 복지향상에도 큰 기여를 하게 될 것이다 [4, 11]. 또한, MgB₂ 초전도 기술은 실용화 및 기반기술 발전에 따라 초전도 전력케이블, 초전도 자기에너지 저장장치 등 다양한 초전도 응용분야에도 적용이 예상된다.

전 세계적인 전기에너지 절감 및 수급문제에 대응하기 위한 신재생 에너지인 풍력 발전기 분야도 앞으로 대용량화 및 해상풍력단지 건설 등이 예상되고 초전도 기술의 활용이 크게 고려되고 있어, 하나의 대안으로써 MgB₂ 초전도 기술을 통해 무게 및 크기 감소뿐 아니라 에너지 효율향상을 기대할 수 있다.

다가올 미래의 친환경사회 구현에는 환경정화 기술이 필히 요구되고 있어 각종 환경오염물 제거 및 수처리 기술 분야 등에도 MgB₂ 초전도 기반의 자기분리 응용기술의 활용이 기대되고, 이외에도 핵융합로를 비롯한 거대과학 분야, 다양한 첨단과학의 연구용 자석분야 등에도 MgB₂ 초전도 기술의 활용도가 높아질 것으로 기대하고 있다.

참고문헌

[1] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, J. Akimitsu, Superconductivity at 39 K in magnesium diboride, Nature 410,

63-64, (2001)
 [2] S. X. Dou et al, Enhancement of the critical current density and flux pinning of MgB₂ superconductor by nanoparticle SiC doping, Appl. Phys. Lett. 81, 3419 (2002)
 [3] I. I. Mazin, V. P. Antropov, Electronic structure, electron-phonon coupling, and multiband effects in MgB₂, Physica C 385, 49 (2003)
 [4] B. Cristina and Y. tsutomu, Review of the superconducting properties of MgB₂, Supercond. Sci. Technol. 14, R115 (2001)
 [5] H. Kumakura, A. Matsumoto, H. Fujii, K. Togano, High transport critical current density obtained for powder-in-tube-processed MgB₂ tapes and wires using stainless steel and Cu-Ni tubes, Appl. Phys. Lett. 79, 2435 (2001)
 [6] S. X. Dou et al, Mechanism of enhancement in electromagnetic properties of MgB₂ by nano SiC doping, Phys. Rev. Lett. 98, 097002 (2007)
 [7] C. Shekhar, R. Giri, R. S. Tiwari, O. N. Srivastava, S. K. Malik, Enhancement of flux pinning and high critical current density in graphite doped MgB₂ superconductor, J. Appl. Phys. 102, 093910 (2007)
 [8] M. Eisterer, Magnetic properties and critical currents of MgB₂, Supercond. Sci. Technol. 20, R47 (2007)
 [9] J. H. Kim et al, Microscopic role of carbon on MgB₂ wire for critical current density comparable to NbTi, NPG Asia Materials 4, e3 (2012)
 [10] M. Tomsic et al, Development of magnesium diboride(MgB₂) wires and magnets using in situ strand fabrication method, Physica C 456, 203 (2007)
 [11] M. Tomsic et al, Overview of MgB₂ superconductor applications,

- Int. J. Appl. Ceram. Technol. 4 (3), 250 (2007)
- [12] www.hypertechresearch.com
- [13] G. Z. Li et al, Enhanced higher temperature (20-30 K) transport properties and irreversibility field in nano-Dy₂O₃ doped advanced internal Mg infiltration processed MgB₂ composites, Appl. Phys. Lett. 105, 112603 (2014)
- [14] G. Z. Li, M. D. Sumption, E. W. Collings, Kinetic analysis of MgB₂ layer formation in advanced internal magnesium infiltration (AIMI) processed MgB₂ wires, Acta materialia 96, 66 (2015)
- [15] B. Birajdar, V. Braccini, A. Tumino, T. Wenzel, O. Eibl, G. Grasso, MgB₂ multifilamentary tapes: microstructure, chemical composition and superconducting properties, Supercon. Sci. Technol. 19, 916 (2006)
- [16] www.columbussuperconductors.com
- [17] www.ascinc.org/asc2012/ Applied Superconductivity Conference 2012, October 7-12, 2012, Portland, Oregon, USA
- [18] T. Nakamura et al, Development and fundamental study on a superconducting induction/synchronous motor incorporated with MgB₂ cage windings, Supercond. Sci. Technol. 25, 014004 (2012)
- [19] United States Patent Application Publication, K. Tanaka et al. MgB₂ SUPERCONDUCTIVE WIRE, US 2012/0220465 A1, Aug. 30, 2012
- [20] S. J. Ye et al, High-performance MgB₂ superconducting wires for use under liquid-helium-free conditions fabricated using an internal Mg diffusion process, Supercond. Sci. Technol. 26, 125003 (2013)
- [21] www.conectus.org/market.html
- [22] S. J. Ye et al, Novel nanometer-level uniform amorphous carbon coating for boron powders by direct pyrolysis of coronene without solvent, Nanotechnology 26, 045602 (2015)
- [23] F. Cheng et al, Improved superconducting properties in the Mg₁₁B₂ low activation superconductor prepared by low-temperature sintering, Sci. Rep. 6, 25498 (2016)
- [24] D. Patel and J. H. Kim, Magnesium diboride(MgB₂) wires for applications, Prog. Supercond. Cryog. 18(1), 1 (2016)
- [25] P. Kováč et al, Properties of MgB₂ wires made by internal magnesium diffusion into different boron powders, Supercond. Sci. technol. 28, 095014 (2015)
- [26] D. Xu et al, Microstructure and superconducting properties of nanocarbon-doped internal Mg diffusion-processed MgB₂ wires fabricated using different boron powders, Supercond. Sci. Technol. 29, 045009 (2016)
- [27] D. Wang et al, Influence of crystalline boron powders on superconducting properties of C-doped internal Mg diffusion processed MgB₂ wires, Supercond. Sci. Technol. 28 105013 (2015)
- [28] H. Kumakura et al, Development of internal Mg diffusion(IMD)-processed MgB₂ superconducting wires towards long-length wire fabrications, 12th European Conference on Applied Superconductivity, 6-10th Sep. 2015, Lyon, France

저자이력



정국채 (鄭國采)

1989-1996년 경희대학교 물리학과, 1996-1998년 한국과학기술원 물리학과, 1998-2004년 한국과학기술원 물리학과, 2004-한국기계연구원부설 재료연구소 책임연구원