

Commercial MgB₂ superconducting wires at Sam Dong

Dong Gun Lee^a, Jun Hyuk Choi^{*a}, Du Na Kim^a, Ju Heum Jeon^a, Minoru Maeda^b, Seyong Choi^b, and Jung Ho Kim^c

^a Sam Dong Co., Ltd, Daejeon, Korea

^b Kangwon National University, Gangwon, Korea

^c University of Wollongong, NSW, Australia

(Received 4 May 2020; revised or reviewed 18 May 2020; accepted 19 May 2020)

Abstract

Since 2014, Sam Dong Co., Ltd. has successfully developed high-performance MgB₂ superconducting wires with a kilometer-scale. Herein, we studied performances of various MgB₂ wires fabricated by the Sam Dong with different Cu fractions and diameters for practical applications. Critical current densities of our commercial wire, 18+1'Cu multifilamentary MgB₂ wire, are estimated to be 270,000 A/cm² at 3 T and 4.2 K and 100,000 A/cm² at 2 T and 20 K, respectively. We further discuss research progress of various MgB₂ superconducting wires at Sam Dong Co., Ltd and make an effort to align with customers' requirements.

Keywords: MgB₂ superconducting wire, critical current density, Commercial MgB₂ wire, multifilamentary wire

1. INTRODUCTION

MgB₂ 초전도체는 2001년 일본의 아키히츠 (Akimitsu) 그룹에 의해 39 K (영하234°C)에서 초전도 현상이 발견된 이후 상용화 목적의 선재 형태로 개발되어 왔다 [1, 2]. MgB₂ 초전도체는 두 개의 원소로만 구성되어 결정구조가 매우 간단하고, 소결 시 이차상 형성 가능성을 줄일 수 있다 [3]. 특히 소결 온도가 낮고 (650°C 내외) 소결 시간이 짧아 (30분 내외) 기존 초전도체와 비교해 생산성 효율 측면이 우수하다. 또한 MgB₂의 상대적으로 높은 임계온도는 고가 냉매인 액체헬륨 대신 10–20 K의 냉동기로 작동을 가능하게 하여 응용기기 운영 단가를 크게 낮출 수 있다. 이러한 장점들로 인하여 자기공명영상장치 (magnetic resonance imaging, MRI) [4, 5], 전력전송 케이블 (power transmission cable) [6], 풍력발전기 (wind turbine) [7], 초전도 에너지저장장치 (superconducting magnetic energy storage, SMES) [8] 등에 적용연구가 활발히 진행되고 있다.

(주)삼동은 1977년 설립된 전기·전자용 절연코일 소재 전문제조업체로 전 세계 초고압 변압기, 발전기 등의 중전기기 분야를 비롯하여 자동차, 의료, 가전 등의 분야에 무산소동 절연코일 소재를 공급하고 있다 [9]. (주)삼동은 새로운 상용화 소재의 개발 수요에 대응하기 위하여 2014년부터 국내외 산학 협력으로 MgB₂ 초전도 선재 개발을 시작하였다. 2015년에 (주)삼동 기술연구소가 대덕연구개발특구단지 내로 이전하여 MgB₂ 초전도 선재 개발을 본격화하였고, 2018년에는 상용화급 1 km 길이 MgB₂ 초전도 선재 제조에 성공하였다. (주)삼동은 오랜 기간 축적된 절연 코일 생산 기술 노하우와 다양한 선재 제조기술을 바탕으로 현재 주문생산 방식의 맞춤형

MgB₂ 초전도 선재를 제조·공급하고 있다 [10].

본 논문에서는 우수한 특성의 상용화 MgB₂ 초전도 선재 제조를 위해 원료분말 물성 제어와 공정 최적화를 연구하였다. 또한, 선재의 운전 안정성을 위한 구리 시스 (sheath) 비율 조절 연구와 다양한 응용기기 설계에 대응하기 위한 MgB₂ 초전도 선재의 직경 변화 및 이에 대한 특성 연구도 진행하였다.

2. EXPERIMENTAL

본 연구에서는 MgB₂ 초전도 선재 제작을 위해 마그네슘 (Mg, 순도 99.95% 이상, 평균 입도 10 μm)과 보론 (B, 순도 98.5% 이상, 평균 입도 300 nm)을 화학적 정량비 (Mg:B=1:2)로 균일하게 혼합하고, PIT (Powder-In-Tube) 공정을 적용하여 다양한 선재의 형태로 제조하였다. 제조된 선재는 이차상 생성과 산화 방지를 위해 불활성 분위기인 아르곤 (Ar) 분위기에서 650°C, 30 분간 열처리하였다. 공정 변수에 따른 초전도 선재의 특성 비교를 위해 열처리 온도와 시간은 고정 하였다.

MgB₂ 초전도 선재의 임계전류 (critical current, I_c) 특성은 표준 4단자법을 사용하여 전계 1 μV/cm 기준으로 측정하였다. 각 측정 선재는 시단부 5 cm 길이 단축 선재를 샘플링하였다. 10–30 K 온도에서의 측정은 호주 울런공대학교 (University of Wollongong)에서 보유한 15 Tesla 가변 온도 마그넷 시스템을 사용하였고, 4.2 K 온도에서의 측정은 (주)삼동에서 보유한 7 Tesla 마그넷 시스템을 사용하였다. 임계전류밀도 (critical current density, J_c)는 MgB₂ 코어의 단면적을 적용하여 계산하였다. 또한 제작된 선재의 미세조직 특성은 X-선 회절 (X-ray diffraction, XRD) 패턴과 주사전자현미경 (scanning electron microscope, SEM)으로 평가 하였다.

* Corresponding author: jhchoi@samdongkorea.com

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1. km급 길이의 상용화 MgB₂ 초전도 선재

그림 1은 선재 제작에 사용된 원료 분말의 X-선 회절 패턴과 주사전자현미경 이미지이다. 마그네슘 분말은 구형의 결정질 구조로 불순물 MgO를 포함 하는 것으로 관찰되었다. 이는 마그네슘 분말이 산소에 민감하여 분말 제조 시 표면이 쉽게 산화되어, 표면에 산화층의 형태로 존재하는 것으로 사료된다. 선재 열처리 공정 시 MgO는 무반응 형태로 존재 하지만 마그네슘 표면에 산화층 형태로 존재하는 MgO의 경우 보론과의 반응을 어렵게 만든다. 보론 분말은 구형의 비정질 상이며 소량의 B₂O₃ 또는 H₃BO₃가 불순물로 존재하는 것을 확인하였다. B₂O₃는 녹는점이 450–500°C인 비정질 상으로 XRD 패턴에서 명확한 피크로 관찰되지 않지만 분무 열분해(spray pyrolysis) 방법의 보론 분말 제조 공정 특성상 일부 결정화되어 존재할 수 있다. 또한 비정질 B₂O₃는 습기와 쉽게 반응하여 H₃BO₃ 상을 형성한다. 하지만 H₃BO₃ 상을 형성하는 B₂O₃-H₂O의 화학적 결합이 강하지 않기 때문에 원료분말의 습도를 조절하는 전처리 공정에서 H₂O가 쉽게 제거되고 비정질 B₂O₃ 상으로 분해될 수 있다[11, 12]. MgB₂ 소결 시 B₂O₃는 마그네슘과 450°C 온도에서 MgO로 반응하여

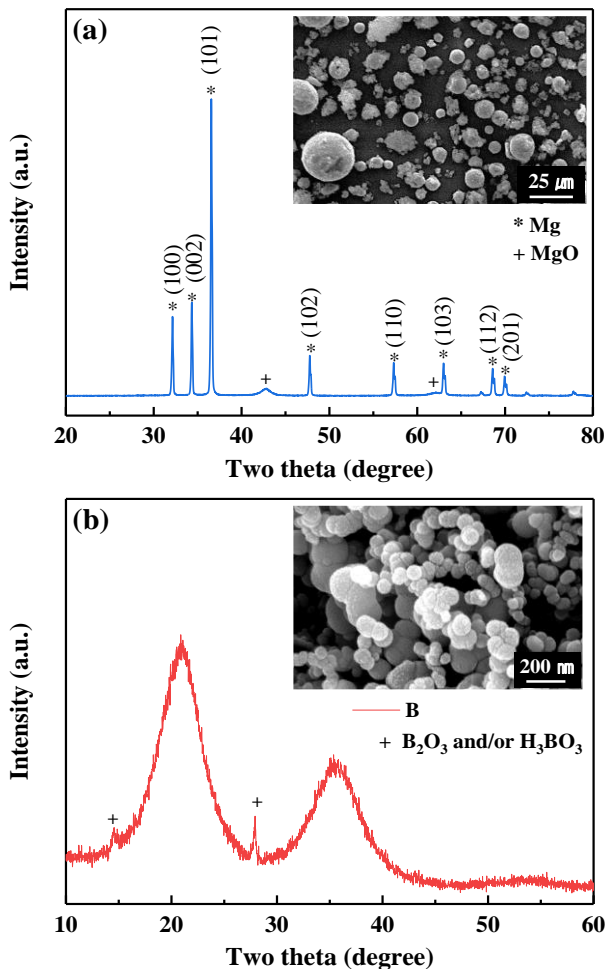


Fig. 1. XRD diffraction patterns of (a) magnesium and (b) boron powders. The insets correspond Mg and B images.

불순물 형태로 결정립 계면에 존재하고, 이는 선재 통전 특성을 저하하는 직접적인 요인이 될 수 있다. 기존 연구 결과에 의하면 판상의 결정질 보론 분말과 비교해 구형의 비정질 보론 분말 사용 시 낮은 온도, 짧은 소결 시간에도 쉽게 MgB₂ 상이 형성되는 것으로 보고 되었다[13, 14]. 또한, 상대적으로 적은 B₂O₃ 또는 H₃BO₃ 상이 존재하여 열처리 후 선재의 MgO 양을 줄일 수 있는 장점이 있다. 주목할 점은 두 원료 분말의 상대적 크기 차이로 인해 일반적인 분말 혼합 후 뭉침 현상이 발생하며, 이는 불밀링 공정을 통해 어느 정도 해결할 수 있다.

그림 2는 ㈜삼동의 상용화 선재인 1 km급 길이의 MgB₂ 초전도 선재가 보빈(내경 350 mm)에 권취된 사진과 선재의 단면 이미지이다. 표 1에 상용화 MgB₂ 초전도 선재의 상세한 사양을 기술하였다. 선재의 전체 길이는 1.23 km이고 최종 직경은 0.83 mm이다. 현재 MgB₂ 초전도 선재는 PIT 방법으로 최대 3 km의 단위 길이까지 통전 특성 균일성을 보장한다. 초전도 선재의 내부 구성은 18 개의 MgB₂ 초전도 심들과 중심에 한 개의 구리심으로 구성되어 있다. 외부 시스는 선재의 기계적 강도 향상을 위하여 구리(Cu)와 니켈(Ni)의 합금인 모넬(Monel)을 사용하였고, 전기적·열적 안정성을 위하여 내부 기지(inner matrix)로는 구리를 사용하였다. 사용된 모넬과 인접 구리는 기계적 가공 중에 물리적 접합 특성이 우수하다. 또한, 열처리 시에도 열팽창계수가 유사하여 디본딩 현상을 최소화할 수 있다. MgB₂ 소결 열처리 시 구리와 원료 분말인 마그네슘의 반응을 억제하기 위한 배리어(barrier)로는 니오븀(Nb)을 사용하였다. MgB₂ 초전도 선재의 구리 분율은 약 30% 정도이고, MgB₂ 코어 분율은 약 16% 정도이다. ㈜삼동은 MgB₂ 코어 분율을 20% 이상으로 향상시키기 위하여 원료분말 공정, 선재 디자인 등의 연구를 진행하고 있다.

그림 3의 (a)는 4.2–30 K의 다양한 온도 범위에서 상용화 MgB₂ 초전도 선재의 외부 자계에 대한 임계전류와 임계전류밀도 특성을 측정 및 계산한 결과이다. 측정 온도 4.2 K, 외부 자계 3 Tesla에서 선재의 통전 임계전류는 240 A, 임계전류밀도는 270,000 A/cm²이고, 20 K, 2 Tesla에서 임계전류는 86 A, 임계전류밀도는 100,000 A/cm²으로 측정 및 계산되었다. 추후 선재 단면적에 대한 MgB₂ 코어 분율이 20%까지 향상되면 임계전류는 4.2 K, 3 Tesla 기준 300 A, 20 K, 2 Tesla 기준 100 A까지 향상될 것으로 예상된다.

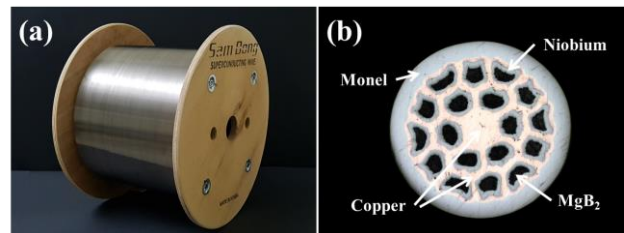


Fig. 2. Photographs of (a) wound wires and (b) cross-sectional image of 1 km-scale commercial MgB₂ wire fabricated by Sam Dong.

TABLE I
THE SPECIFICATION OF COMMERCIAL MgB₂ WIRE.

Parameter	Specification
Length	1.23 km
Diameter	0.83 mm ^φ
Filament Number	18+1'Cu
Outer sheath	Monel (Cu+Ni)
Inner sheath	Cu
Barrier	Nb
Cu fraction	30%
MgB ₂ filling factor	16%
I_c (@ 4.2 K, 3 T)	240 A
J_c (@ 4.2 K, 3 T)	2.7×10^5 A/cm ²
J_c (@ 4.2 K, 3 T)	4.4×10^4 A/cm ²
I_c (@ 20 K, 2 T)	86 A
J_c (@ 20 K, 2 T)	1.0×10^5 A/cm ²

특히 응용 기기에 적용하기 위해서는 km 급 장선재의 특성 균일성 확보가 필수적이다. 선재의 균일성 확인을 위해 1 km급 선재를 50 m 간격으로 총 21 개 단척 시료를 샘플링하여 임계전류를 평가하였다. 그림 3 (a)의 단척 선재를 기준으로 모든 샘플들의 임계전류 편차는 약 10%였으며, 향후 분말의 전처리 공정 및 소성가공 최적화를 통해 5% 이내의 우수한 선재를 개발하기 위한 연구 중에 있다. 관찰된 결과에 의하면 선재 통전 전류 특성 평가 온도가 제작된 선재의 임계온도(35 K)에 근접할수록 외부 자계 증가에 따른 임계전류 감소폭이 커진다. 이는 열처리 온도(700°C 이상) 및 시간 증가에 따른 MgB₂ 상분율 증가 및 불순물인 이차상 감소로 해결할 수 있다[15]. 그러나 고온 또는 장시간 열처리 시 MgB₂의 결정립 크기가 조대화 되고, 이는 외부 자계에 따른 특성 감소를 야기시킬 수 있다. 문헌에 알려진 바와 같이 MgB₂의 외부 자계에 대한 통전 특성은 결정립의 미세화(grain boundary pinning mechanism)에 의해 향상된다[16]. 이 외에도 외부 자계에 따른 초전도 특성은 잘 알려진 바와 같이 다양한 탄소 도핑에 의해서도 향상시킬 수 있으며, 이는 도핑 시 MgB₂ 격자 결합 및 결정립의 자기 이방성 특성 감소에 따른 효과로 보고되고 있다[17, 18]. 향후 응용기기의 운전 온도와 자계 범위에 따라 선재의 최적 열처리 조건 및 탄소 도핑 공정 등을 적용한 맞춤형 MgB₂ 초전도 선재 공급이 가능할 것으로 사료된다. 그림 3의 (b)는 전 세계 우수 업체의 상용품 MgB₂ 선재들의 임계전류밀도 특성을 비교한 결과이다[2, 19]. (주)삼동과 미국의 Hyper Tech사는 *in-situ* 공정으로 선재를 제조하는 반면에 이탈리아의 Columbus사는 *ex-situ* 공정으로 선재를 제조한다. 4.2 K 기준으로 4.5 Tesla 이하의 영역에서는 (주)삼동 선재의 임계전류밀도 특성이 가장 우수한 것을 확인하였다. 20 K의 온도에서는 1.5 Tesla 이상의 자계에서 Hyper Tech사 선재의 특성보다 낮았다. 이는 상기 기술한 열처리 조건 및 탄소 도핑 방법으로 향후 특성 향상이 가능할 것으로 판단된다.

그림 4는 MgB₂ 코어 XRD 회절 패턴의 리트벨트 정량 분석(rietveld refinement) 결과이다. 열처리 후 마그네슘과 보론의 원료분말은 MgB₂로 합성되었고, 불순물인 MgO 산화물을 확인하였다. MgB₂의 a-축과 c-축의 격자상수(lattice parameter)는 각각 3.0830Å

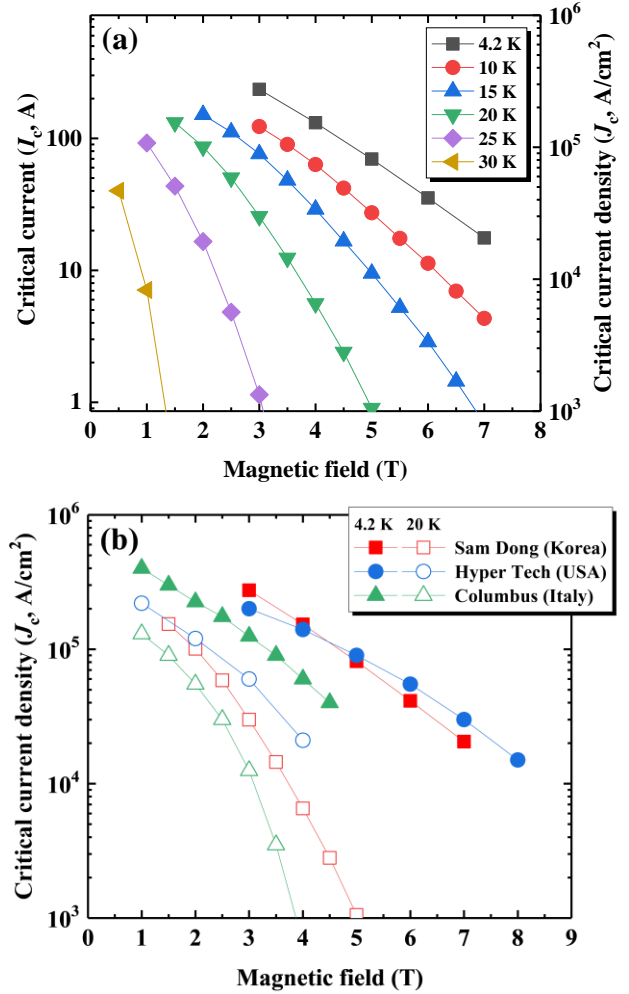


Fig. 3. (a) Magnetic field dependence of critical current and critical current density at 4.2-30 K and (b) comparison of critical current density between Sam Dong (Korea), Hyper Tech (USA) [2], and Columbus (Italy) [19].

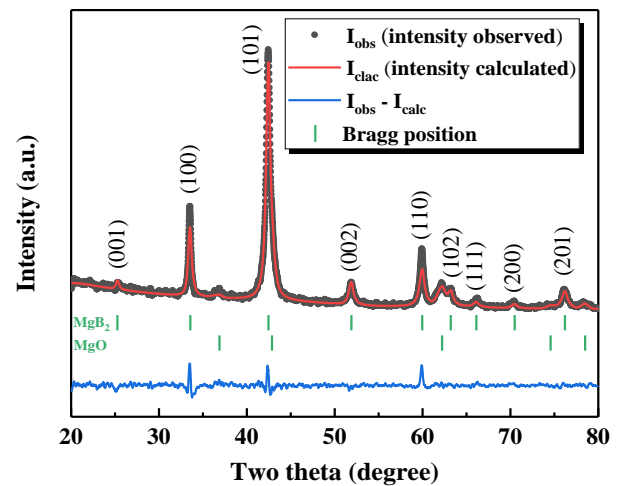


Fig. 4. Rietveld refined XRD patterns of MgB₂ core.

과 3.5210 Å으로 계산되었다. 정량분석 결과 MgB₂ 상은 85 wt%, MgO 상은 15 wt% 존재하였다. MgO는 앞서 언급되었듯이 사용된 마그네슘의 순도 및 크기, 원료분말 작업 환경, MgB₂ 소결 열처리 분위기 등에

영향을 받는 것으로 잘 알려져 있다[14, 15, 20, 21]. 또한 유사한 많은 연구에서 MgB₂ 내 MgO 양은 10 wt% 이하인 것으로 보고되었다[14, 15, 22]. MgB₂ 초전도 선재의 임계전류 특성 향상을 위해서는 불순물인 MgO 분율을 최대한 줄이고, 초전도 물질인 MgB₂의 분율 향상이 필수적이다. (주)삼동은 원료분말인 마그네슘 내에 MgO를 제거하기 위한 전처리 공정 연구를 수행하고 있으며, 향후 이를 통해 더욱더 향상된 MgB₂ 초전도 선재의 전기적 특성을 기대할 수 있다.

3.2. 구리 부피 분율에 따른 MgB₂ 초전도 선재의 초전도 특성

MRI, NMR 등과 같이 직류(DC) 환경 적용 시 MgB₂ 초전도 선재의 내부 기지인 구리는 퀀치가 발생할 경우 내부 온도 상승을 줄여 선재를 보호하는 역할을 한다[23]. 이와 같이 MgB₂ 초전도 선재의 구리 분율이 중요하며, 각기 다른 응용기기에 따라 최적의 구리 분율이 요구될 수 있다. 그림 5는 구리 분율에 따른 다양한 18+ '1' Cu심 MgB₂ 초전도 선재들의 단면 사진이다. 각 선재는 구리 분율을 최대 50%에서 최소 30%로 조절하여 제작하였고, 제작 조건에 따라 구리 분율 증가를 육안으로 확인할 수 있다. 표 2에 구리 분율에 따른 각 선재의 시스 및 MgB₂ 코어의 부피 분율을 기술하였다. 구리 분율 증가에 따라 외부 시스인 모넬은 최대 2.5% 정도의 차이로 거의 동일하였고, 배리어인 니오븀과 MgB₂ 초전도 코어의 분율은 감소하였다. 주목해야 할 점은 구리 분율과 관계없이 각 조건에서 필라멘트 간격은 일정하게 유지되었다. 즉, 기계적 가공이 구리 분율에 따른 필라멘트간의 단선에는 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

그림 6은 구리 분율에 따른 0.83 mm 직경의 18+ '1' Cu심 MgB₂ 초전도 선재의 임계전류 측정 및 임계전류밀도 계산 결과이다. 4.2 K, 3 Tesla 기준으로 구리 분율이 30%인 선재의 임계전류 특성은 240 A로

TABLE II
THE DETAILED SPECIFICATION OF VARIOUS MgB₂ WIRES WITH DIFFERENT COMPOSITIONS.

Sample	Monel (%)	Cu (%)	Nb (%)	MgB ₂ (%)
Cu 50	30	50	10	10
Cu 40	31	40	16	13
Cu 35	31	35	20	14
Cu 30	32	30	22	16

가장 높았고, 구리 분율이 증가할수록 임계전류 특성이 감소하여 구리 분율이 50%인 선재의 임계전류 특성은 100 A로 평가되었다. 상대적으로 임계전류밀도 특성은 구리 분율과 관계없이 측정 오차 범위 내에서 거의 동일한 수준으로 확인하였다. 그러나 직접적으로 각 선재의 초전도 분율이 작아짐에 따라 임계전류 특성은 감소하였다. 임계전류 특성의 감소 없이 구리 분율을 증가시키기 위해서는 MgB₂ 초전도 코어 분율을 유지하고 외부 시스인 모넬의 분율이 작아져야 한다. 이 경우 선재의 기계적 강도 감소가 예상되며, 이를 보완하기 위하여 기계적 강도가 높은 시스 물질 적용이 필요하다. ODS-Cu (oxide dispersion strengthened copper) 등의 사용으로 MgB₂ 초전도 선재의 기계적 강도가 향상된 결과가 보고되었으며[2, 24], 향후 동 재료의 적용으로 임계전류 특성 감소 없이 구리 분율 조절이 가능할 것으로 판단된다. 상대적으로 고가인 니오븀 확산 방지층의 분율 감소는 기계적 가공 후 열처리 시 모재인 구리와 원료분말인 마그네슘이 화학적으로 반응할 수 있기에 이에 대한 연구는 좀 더 필요하다. 또는 니오븀을 완전히 대체할 수 있는 차세대 확산 방지 층에 대한 궁극적인 연구가 이상적이다.

3.3. 선재 직경에 따른 MgB₂ 초전도 선재의 초전도 특성

MgB₂ 초전도 선재를 코일로 적용 시 직경이 작을수록 소형으로 치밀하게 권선이 가능하다. 하지만 작은 직경일수록 물리적으로 다루기 어려우며 초전도 면적이 작아 임계전류가 상대적으로 낮다. 응용기기의 설계에 따라 적용 가능하도록 선재의 직경을 다르게 제작하여 초전도 특성을 분석하였다. 그림 7은 (a) 0.83 mm 직경부터 (f) 1.41 mm 직경의 18+ '1' Cu심 MgB₂

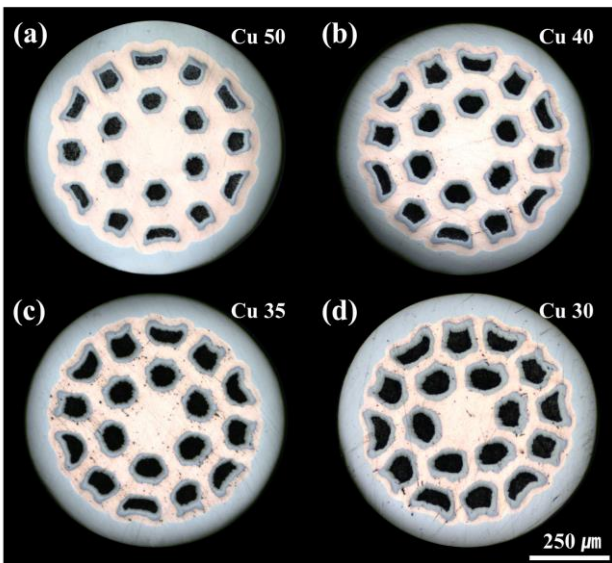


Fig. 5. Cross-sectional views of customized 18+'1'Cu multifilamentary MgB₂ wires with different Cu fractions of (a) 50%, (b) 40%, (c) 35%, and (d) 30%.

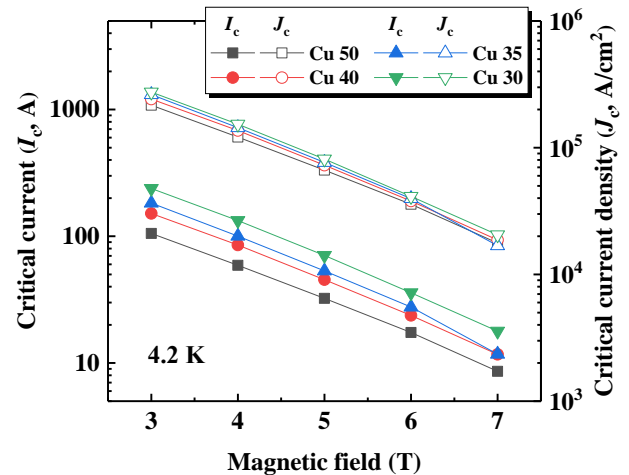


Fig. 6. I_c (J_c)-B characteristics of 18+'1'Cu multifilamentary MgB₂ wire with different Cu fractions at 4.2 K.

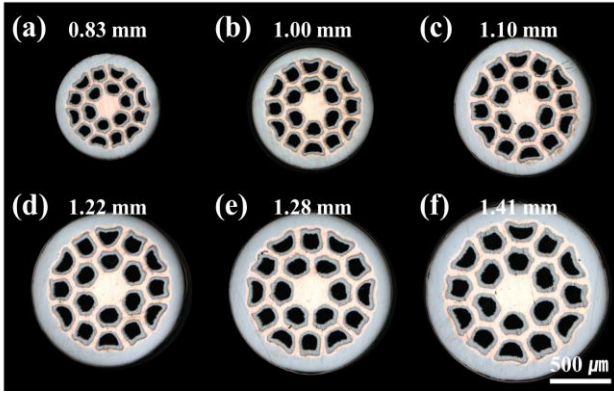


Fig. 7. Cross-sectional views of 18+1'Cu multifilamentary MgB₂ wires with different outer diameters of (a) 0.83 mm, (b) 1.00 mm, (c) 1.10 mm, (d) 1.22 mm, (e) 1.28 mm, and (f) 1.41 mm.

초전도 선재 단면 사진이다. 선재 인발 공정에 따라 최종 직경을 다르게 제작하였으며 모든 선재의 내부 구조는 동일한 것을 확인하였다.

그림 8은 선재 직경에 따른 18+ '1' Cu심 MgB₂ 초전도 선재의 임계전류 및 임계전류밀도 특성 결과이다. 선재 직경이 증가할수록 초전도 상분을 증가에 따라 임계전류 특성은 증가하는 것을 확인하였고, 4.2 K, 3 Tesla, 1.41 mm 직경 기준 임계전류가 560 A로 높았다. 임계전류밀도 특성은 선재 직경과 관계없이 유사한 것을 확인하였고, 이는 1.41 mm 직경 이하에서 선재 인발 공정을 통해 MgB₂ 코어의 압축이 충분히 된 것으로 판단된다. 향후 선재 직경과 운전 전류 수요에 따른 대응이 가능할 것이다. 현재 직경 0.6 mm까지 제조가 가능하며 여러 개의 선재를 트위스팅한 대용량 선재 제작도 활발히 연구하고 있다.

그림 9는 (a) 0.83 mm 직경과 (b) 1.41 mm 직경의 18+ '1' Cu심 MgB₂ 초전도 선재 SEM 사진이다. 두 직경의 선재 모두 외곽 부분에 위치한 심을 동일 배율로 관찰하였고, 각각의 선재 MgB₂ 코어 내부에 5 μm 이하의 기공들이 관찰되었다. 이 기공들은 마그네슘 용점 이상의 온도에서 열처리 시 마그네슘 분말이 보론 분말로 확산이 되고, 그 분말이 존재하는 부분에서 생성되는 것으로 알려져 있다[25]. 이는 원료분말의 기계적 밀링 공정을 통해 기공을 감소시키고, 상대적으로 초전도 코어 밀도를 향상할 수 있다. 선재의 직경과 관계없이 사용된 니오븀 배리어층은 기계적인 파손 없이 제작됨을 확인하였다. ㈜삼동은 원료분말 밀링 최적화 공정 연구를 수행 중이며, 향후 고성능의 MgB₂ 초전도 선재 공급이 가능할 것으로 기대한다.

4. CONCLUSION

본 연구에서는 1 km 길이의 상용화 MgB₂ 선재와 구리 비율 및 선재 직경에 따른 18+ '1' Cu심 MgB₂ 선재의 전기적 특성을 분석하였다. 제작된 MgB₂ 선재의 4.2 K, 3 Tesla 기준 임계전류는 240 A, 임계전류밀도는 270,000 A/cm² 이고, 20 K, 2 Tesla 기준 임계전류는

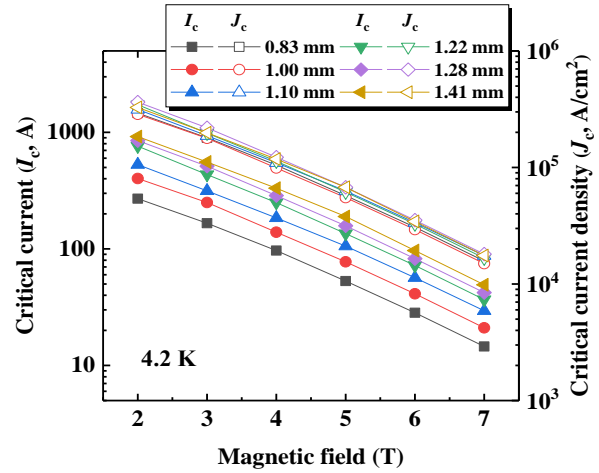


Fig. 8. I_c (J_c)- B characteristics of 18+1'Cu multifilamentary MgB₂ wire with different outer diameters at 4.2 K.

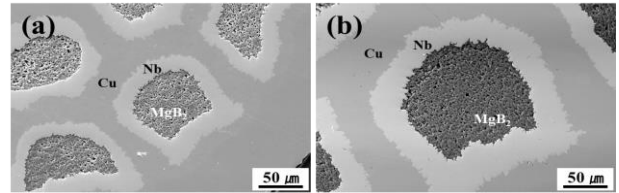


Fig. 9. SEM images of 18+1'Cu multifilamentary MgB₂ wires with different outer diameters of (a) 0.83 mm and (b) 1.41 mm.

86 A, 임계전류밀도는 100,000 A/cm²으로 평가되었다. 구리 비율은 선재 단면적 대비 30%를 기준으로 최대 50%까지 조절이 가능하였다. 다만 구리비율 증가에 따른 MgB₂ 초전도 코어 분율 감소로 임계전류 특성은 감소하였다. 0.83–1.41 mm의 직경별 MgB₂ 선재 제조 및 전기적 특성 분석 결과, 4.2 K, 3 Tesla 기준의 1.41 mm 직경 선재의 임계전류는 560 A로 높아 초전도 응용기 요구사항에 다양하게 적용이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 리트벨트 분석처럼 열처리 후 큰 분율의 MgO가 존재하므로 향후 원료분말의 전처리 공정 확립을 통하여 상용 MgB₂ 초전도 선재의 특성을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (2017R1D1A3B03035092) and by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (2020R1A2C1013662).

REFERENCES

- [1] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride," *Nature*, vol. 410, pp. 63-64, 2001.

- [2] M. Tomsic, M. Rindfleisch, J. Yue, K. McFadden, D. Doll, J. Phillips, M. D. Sumption, M. Bhatia, S. Bohnenstiehl, and E. W. Collings, "Development of magnesium diboride (MgB₂) wires and magnets using in situ strand fabrication method," *Physica C*, vol. 456, pp. 203-208, 2007.
- [3] C. Buzea and T. Yamashita, "Review of superconducting properties of MgB₂," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 14, pp. R115-R146, 2001.
- [4] Y. Iwasa, "Towards liquid-helium-free, persistent-mode MgB₂ MRI magnets: FBML experience," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 30, pp. 053001, 2017.
- [5] D. Patel, M. S. A. Hossain, W. Qiu, H. Jie, Y. Yamauchi, M. Maeda, M. Tomsic, S. Choi, and J. H. Kim, "Solid cryogen: a cooling system for future MgB₂ MRI magnet," *Sci. Rep.*, vol. 7, pp. 43444, 2017.
- [6] A. Ballarino, C. E. Bruzek, N. Dittmar, S. Gianneli, W. Goldacker, G. Grasso, F. Grilli, C. Haberstroh, S. Hole, F. Lesur, A. Marian, J. M. Martiez-Val, L. Martini, C. Rubbia, D. Salmieri, F. Schmidt, and M. Tropeano, "The BEST PATHS project on MgB₂ superconducting cables for very high power transmission," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, pp. 5401705, 2016.
- [7] I. Marino, A. Pujana, G. Sarmiento, S. Sanz, J. M. Merino, M. Tropeano, J. Sun, and T. Canosa, "Lightweight MgB₂ superconducting 10 MW wind generator," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 29, pp. 024005, 2016.
- [8] T. Yagai, S. Mizuno, T. Okubo, S. Mizuochi, M. Kamibayashi, M. Jinbo, T. Takao, N. Hirano, Y. Makida, T. Shintomi, T. Komagome, K. Tsukada, T. Onji, Y. Arai, A. Ishihara, M. Tomita, D. Miyagi, M. Tsuda, and T. Hamajima, "Development of design for large scale conductors and coils using MgB₂ for superconducting magnetic energy storage device," *Cryogenics*, vol. 96, pp. 75-82, 2018.
- [9] www.samdongkorea.com
- [10] J. H. Choi, D. G. Lee, J. H. Jeon, E. J. Lee, M. Maeda, and S. Choi, "Customized MgB₂ superconducting wire toward practical applications at Sam Dong in Korea," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 32, pp. 1219-1223, 2019.
- [11] E. McCalla and R. Brünig, "Amorphization of crystalline orthoboric acid on a vitreous B₂O₃ substrate," *J. Mater. Res.*, vol. 17, pp. 3098-3104, 2002.
- [12] M. Maeda and S. Choi, "Effects of boron powder by hydrocarbon gas treatment on the structural and superconducting properties of in situ-processed MgB₂ polycrystalline materials," *J. Alloys Compd.*, vol. 787, pp. 1265-1271, 2019.
- [13] X. Xu, M. J. Qin, K. Konstantinov, D. I. Santos, W. K. Yeoh, J. H. Kim, and S. X. Dou, "Effect of boron powder purity on superconducting properties of MgB₂," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. 466-469, 2006.
- [14] J. H. Kim, S. X. Dou, J. L. Wang, D. Q. Shi, X. Xu, M. S. A. Hossain, W. K. Yeoh, S. Choi, and T. Kiyoshi, "The effects of sintering temperature on superconductivity in MgB₂/Fe wires," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. 448-451, 2007.
- [15] J. H. Kim, S. X. Dou, D. Q. Shi, M. Rindfleisch, and M. Tomsic, "Study of MgO formation and structural defects in in situ processed MgB₂/Fe wires," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. 1026-1031, 2007.
- [16] P. Mikheenko, E. Martinez, A. Bevan, J. S. Abell, and J. L. MacManus-Driscoll, "Grain boundaries and pinning in bulk MgB₂," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. S264-S270, 2007.
- [17] J. H. Kim, S. Oh, Y.-U. Heo, S. Hata, H. Kumakura, A. Matsumoto, M. Mitsuhashi, S. Choi, Y. Shimada, M. Maeda, J. L. MacManus-Driscoll, and S. X. Dou, "Microscopic role of carbon on MgB₂ wire for critical current density comparable to NbTi," *NPG Asia Mater.*, vol. 4, pp. E3, 2012.
- [18] J. H. Kim, S. Oh, H. Kumakura, A. Matsumoto, Y.-U. Heo, K.-S. Song, Y.-M. Kang, M. Maeda, M. Rindfleisch, M. Tomsic, S. Choi, and S. X. Dou, "Tailored materials for high-performance MgB₂ wire," *Adv. Mater.*, vol. 23, pp. 4942-4946, 2011.
- [19] V. Braccini, D. Nardelli, R. Penco, and G. Grasso, "Development of *ex situ* processed MgB₂ wires and their applications to magnets," *Physica C*, vol. 456, pp. 209-217, 2007.
- [20] K. Vinod, N. Varghese, R. G. A. Kumara, U. Syamaprasad, S. B. Roy, "Influence of Mg particle size on the reactivity and superconducting properties of in situ MgB₂," *J. Alloy. Compd.*, vol. 464, pp. 33-37, 2008.
- [21] D. Yang, H. Sun, H. Lu, Y. Guo, X. Li, and X. Hu, "Experimental study on the oxidation of MgB₂ in air at high temperature," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 16, pp. 576-581, 2003.
- [22] M. Maeda, J. H. Kim, S. Oh, W. X. Li, K. Takase, Y. Kuroiwa, S. X. Dou, and Y. Takano, "Enhancing the superconducting properties of magnesium diboride without doping," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 96, pp. 2893-2897, 2013.
- [23] C. Poole, T. Baig, R. J. Deissler, D. Doll, M. Tomsic, and M. Martens, "Numerical study on the quench propagation in a 1.5T MgB₂ MRI magnet design with varied wire compositions," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 29, pp. 044003, 2016.
- [24] M. D. Sumption, M. A. Susner, M. Bhatia, M. A. Rindfleisch, M. J. Tomsic, K. J. McFadden, and E. W. Collings, "High Critical Current Density Multifilamentary MgB₂ Strands," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, pp. 2838-2841, 2007.
- [25] D. N. Kim, B.-H. Jun, S.-D. Park, C.-J. Kim, and H. W. Park, "Effects of the size of Mg powder on the formation of MgB₂ and the superconducting properties," *Prog. Supercond. Cryog.*, vol. 18, pp. 9-14, 2016.