pISSN 1229-3008 eISSN 2287-6251
Progress in Superconductivity and Cryogenics
Vol.22, No.2, (2020), pp.32~37 https://doi.org/10.9714/psac.2020.22.2.032

Overview of MgB_2 superconducting conductors at Sam Dong in Korea

Jun Hyuk Choi*, Dong Gun Lee, Du Na Kim, Gi Yeong Yoon, and Ju Heum Jeon

Sam Dong Co., Ltd, Daejeon, Korea

(Received 11 May 2020; revised or reviewed 5 June 2020; accepted 6 June 2020)

Abstract

Sam Dong Co., Ltd. has been succeeded in producing a 1 km multi-filament conductor in 2018. So far, we become more widespread to fabricate a variety of customized multi-filament wires such as 6 + '1' Cu, 18 + '1' Cu, and 36 + '1' Cu. In this work, we discuss the research progress on various MgB_2 wires over the past three years. We also provide a brief review for applications with our wires.

Keywords: MgB_2 superconducting wire, critical current density, Multi-filamentary wire

1. INTRODUCTION

MgB_2 (magnesium diboride) 초전도 재료는 임계온도가 39 K로 Nb-Ti, Nb_3Sn 등 저온 초전도들에 비해 상대적으로 높아[1, 2], 10−20 K의 운행온도에서 다양한 전력계통의 케이블, 변압기, 발전기, 모터 등에 적용 가능성이 있으며, 이 외에도 자기부상열차와 같은 수송수단, NMR (nuclear magnetic resonance)/MRI (magnetic resonance imaging)와 같은 분석 및 의료기기에도 응용이 적합하다[3, 4]. 또한, 최근 액체 헬륨 공급 난항으로 MgB_2 초전도 선재 응용에 대한 관심도가 더욱 높아지고 있다. 특히 원재료인 마그네슘(Mg)과 보론(B)의 가격 경쟁력이 우수하며 다양한 루트를 통한 수급이 용이하고, 선재형태로 가공 시 기존의 상용 초전도체에 비해 다양한 금속튜브 선택이 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 MgB_2는 결정립 간의 강한 결합력이 없어도 초전류가 흐를 수 있어 테이프, 와이어 등 다양한 형태로 제조가 가능하다. MgB_2를 선재화 하는 다양한 방법 중 PIT (powder-in-tube) 공정은 가장 널리 적용되고 있는 방법이다[5]. 재료적 측면에서 MgB_2는 소성가공이 불가능한 세라믹 재료이기 때문에 분말을 금속 튜브에 장입하여 선재로 제조하는 PIT 공정이 일반적이다. 이 외에도 미국의 하이퍼텍(Hyper Tech Research)에서는 금속 스트립에 분말을 직접 피딩하여 선재를 생산하는 CTFF (continuous tube forming and filling)의 방법을 MgB_2 선재화에 적용하고 있다[6]. PIT 공정에서는 소성가공뿐만 아니라 이종 재료인 원료 분말의 특성 및 품질 또한 초전도성에 영향을 주는 중요한 변수 중 하나이다. 특히 분말 혼합 공정에서 분말의 크기 및 분포는 반응성과 MgB_2 코어 밀도에 영향을 미치기 때문에 통전전류 특성과 밀접한 관계가 있다. 이를 위해 입자 크기를 조절하는 다양한 밀링 방법이 사용되고 있다[7−9].

응용 측면에서 MgB_2는 많은 장점에도 불구하고 고온 초전도체와 달리 상부임계자기장(upper critical field, B_{c2})이 낮아, 높은 자기장에서의 응용에 제약이 있다[10, 11]. 현재 이를 해결하기 위한 가장 효율적 인 방법은 탄소를 MgB_2 격자 내로 치환시키는 도핑 방법으로, 고자장 특성을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 다양한 상용화급 다심 7 (6 + ‘1’ Cu)심, 19 (18 + ‘1’ Cu)심, 그리고 37 (36 + ‘1’ Cu)심 MgB_2 초전도 선재의 제작 및 특성 평가에 대해 연구하였다. 또한, 탄소 도핑을 통한 고자장에서의 특성 향상과 극저온 기계적 특성 평가 결과를 제시하여 다양한 응용기기 적용에 필요한 특성을 확보하였다.

2. EXPERIMENTAL

2.1. MgB_2 선재 제작 및 평가

본 연구에서는 MgB_2 초전도 선재 제작을 위해 순도 99.95% 이상, 평균 입도 10 ㎛ (325 mesh)의 마그네슘(Mg)과 순도 98.5% 이상, 평균 입도 200−300 ㎚의 보론(B)을 일정 비율로 균일하게 혼합 하였다. 혼합된 분말은 튜브에 장입하고 소성가공을 통하여 다양한 다심 선재의 형태로 제조하였다. 고자장에서의 특성 향상을 위해서 파이렌(pyrene, $C_{16}H_{10}$)을 분말 혼합 공정 중에 첨가하였으며, 선재 제조 공정은 동일하게 적용되었다. 인발을 통해 제작된 선재의 절연 공정은 보통 s−glass를 사용하며 목적에 따라 다른 종류의 절연도 적용이 가능하다. 열처리 공정은 대구경 보빈에 권선 후에 불활성 분위기인 아르곤(Ar) 분위기에서 650−700℃, 1 시간 이내로 열처리하는 것을 기본으로 한다. 초전도 선재의 평가 기준인 자기장 하에서 통전

* Corresponding author: jhchoi@samdongkorea.com

전류는 4단자법을 사용하여 1 $\mu V/cm$ 기준으로 측정하였다. 10−30 K 온도에서의 측정은 호주 울런공 대학교 (University of Wollongong)에서 보유한 15 Tesla (T) 마그넷 시스템에 장착된 시료 온도 가변 장치를 사용하였고 4.2 K 온도에서의 측정은 ㈜삼동에서 보유한 7 T 마그넷 시스템을 사용하였다. 임계전류밀도(critical current density, J_c)는 MgB_2 코어의 단면적으로 임계전류(critical current, I_c) 값을 나누어 계산하였으며, 선재의 미세조직 특성은 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM)으로 평가하였다. 분말 혼합 전 · 후 분말의 평균 입도와 분포는 입도분석기를 사용해 분석하였다.

동작 온도에서 선재의 기계적 특성을 확인하기 위해 인장강도 테스트를 진행하였다. 평가는 온도 20 K, 자장 2 T 조건에서 진행되었으며, 일본 도호쿠 대학교 IMR (Institute for Materials Research) 연구소의 마그넷 시스템을 이용하였다.

2.2. ㈜삼동 기술 연구소

㈜삼동은 다년간 축적된 다양한 선재 제조 기술을 바탕으로 2014년 MgB_2 초전도 선재 사업에 착수하였고, 2015년 대덕 연구단지에 기술연구소를 개설하여 초전도 선재 개발을 본격화하였다[12, 13]. 꾸준한 자체 연구비 투자와 인력 보강을 통하여 초전도 원료분말 전처리부터 초전도 선재 생산 및 평가, 그리고 응용기기 적용을 위한 프로토타입 마그넷/케이블 제작까지 가능하게 되었다. 2020년 현재 연간 MgB_2 초전도 선재 생산 능력은 약 1,000 ㎞이다. 최근에는 다양한 선재 절연 및 선재/코일 대형 열처리 설비까지 확보되어 생산 능력은 더욱 확장될 것으로 사료된다.

선재의 특성 향상을 위해서 2018년에 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI), 한국기초과학지원연구원(Korea Basic Science Institute, KBSI), 호주 울런공대학교(University of Wollongong)로부터 공동 연구 및 일부 기술을 이전 받아 성능 및 가격 경쟁력이 가능한 MgB_2 초전도 선재를 시판 중이다.

Fig. 1. Wire production facilities (top) and 7 Tesla magnet (bottom) of Sam Dong.

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1. 분말 혼합 공정

MgB_2 초전도 분말은 소성가공 시 선재의 균일성과 임계전류 특성에 큰 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 그림 2 (a)와 (b)는 각각 마그네슘과 보론 혼합분말의 입도 분석 결과와 미세조직을 보여주는 SEM 사진이다. 최적의 혼합 후 분말 분포는 세 개 이상의 균등 분포된 분말(계단식 입도분포) 형태로 관찰이 되었으며, 이는 상대적인 분말 크기 차이에서 기인하는 것으로 사료된다. 분말은 그 특성에 따라 PIT 공정 초기 충진율과 균일도 향상에 영향을 미친다. 균일한 분말을 이용한 소성가공시 분말에 높은 하중이 일정하게 적용되어 열처리 후에도 MgB_2 조직이 균일하고 치밀해지기 때문에 임계전류 밀도가 향상될 수 있다. 특히 심수가 많은 19심 이상의 다심 선재에는 미세화 된 분말 사용이 필수적이다. 분말의 뭉침으로 인해 최종 선재 외경 1 ㎜이하에서 내부 필라멘트의 크기 (70−80 ㎛)보다 혼합 분말 크기가 더 크게 되면 필라멘트가 더 이상 감소하지 못하고 국부적으로 응력을 받게 되어 파손되는 현상이 발생할 수 있기 때문이다[14]. 이는 결국 통전전류 특성 저하를 야기시킨다. 또한 MgB_2 초전도체의 입자 크기는 고자장에서 J_c의 자기 의존성과 연관이 있다. 예를 들면 입계 자속고정 메커니즘(grain boundary pinning mechanism)에 의해 작은 결정립의 경우 높은 전기적

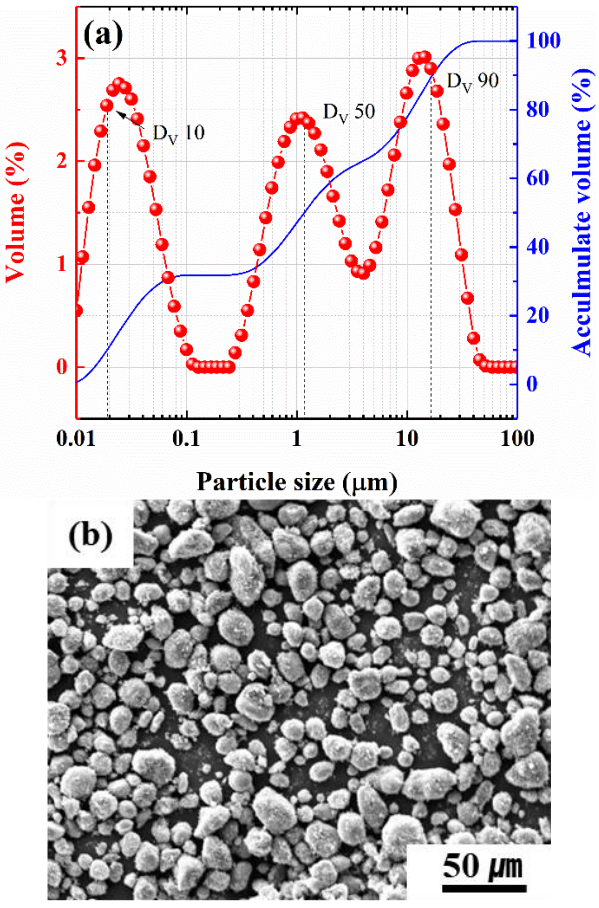

Fig. 2. (a) Size distribution and (b) SEM image of powder mixture.

특성을 보인다[15]. 초기 분말의 입도 감소는 결과적으로 전류밀도를 향상시킬 수 있다. 현재 ㈜삼동은 다양한 분말 혼합 공정 및 미세화를 통하여 이를 선재에 적용하는 연구를 진행하고 있다.

3.2. 다양한 다심 초전도 선재 제작

MgB_2 초전도 선재는 응용처와 응용 방법에 따라 최적의 구리의 비율, 심의 개수, 초전도 충진율 등의 요구조건이 달라지기 때문에 그에 따른 고객들의 다양한 요구가 존재한다[16, 17]. 이를 위해서 고객의 요구에 맞는 다심 선재들을 제조하고 있다. 그림 3은 ㈜삼동에서 제조되고 있는 다양한 다심 선재 중 대표적인 사양의 단면 사진을 보여주고 있으며 각 선재 단면의 재료 비율을 표 1에 정리를 하였다. 그림 3의 다심 MgB_2 초전도 선재들은 초전도 심수와 관계없이 기계적 특성 강화를 위해 공통적으로 외부 시스(sheath)로 구리−니켈 합금인 모넬(Monel)을 사용하였고, 전기적/열적 안정성을 위한 내부 시스로 구리(Cu), 그리고 원료 분말인 마그네슘 혹은 보론과 반응을 억제하기 위한 확산 방지층으로 니오븀(Nb)을 사용하였다. 이 중 확산 방지층인 니오븀은 재료 구성 비율의 약 20%를 차지하는데 비해 가격적인 측면에서는 높은 비율인 약 45%를 차지하고 있어 추후 선재의 가격 경쟁력 확보를 위해서는 대체 재료 개발이 필요하다. 현재까지 니오븀을 대체할 최적의 후보는 철(Fe)이다[18]. 다만 열처리 시 보론과 반응하여 Fe_2B 혼합물을 만들어 기계적 가공 시 다른 이종 금속 간의 밀착성을 취약하게 만들기 때문에 새로운 형태의 반응 억제층에 대한 많은 연구가 필요하다. ㈜삼동은 자체 연구 투자와 국가 연구 개발 사업 통해 니오븀 대체 확산 방지 층 개발을 진행하고 있다.

그림 3의 (a)와 (b)는 각각 구리 비율을 높인 6 + ‘1’ Cu심 선재와 18 + ‘1’ Cu심 선재이다. 초전도 선재 내부의 구리는 퀜치(quench) 발생 시 초전도 코어의 전류 우회로로 사용되고, 높은 열전도도로 열적 안정성 측면에서도 우수하다[17, 19]. 그림 3의 (c)는 일반적인 18 + ‘1’ Cu심 선재에서 필라멘트 간의 간격을 일정

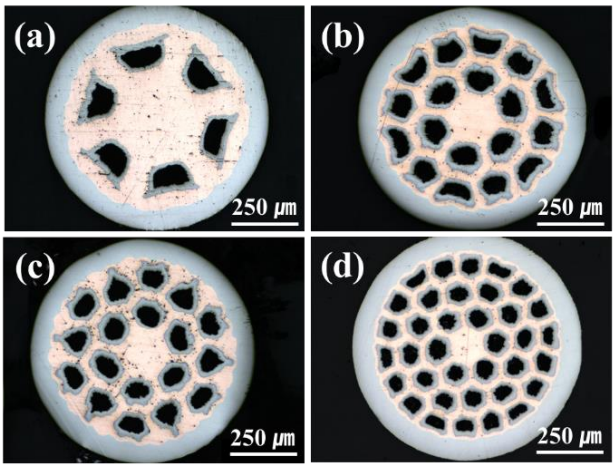

Fig. 3. Cross sectional views of (a) 6 + ‘1’ Cu, (b) 18 + ‘1’ Cu type I, (c)18 + ‘1’ Cu type II, and (d) 36 + ‘1’ Cu filaments MgB_2 wires produced by Sam Dong Co., Ltd.

TABLE I
COMPOSITIONS RATIO OF VARIOUS MgB_2 CONDUCTORS.

Filament No.	6 + ‘1’ Cu	18 + ‘1’ Cu type I	18 + ‘1’ Cu type II	36 + ‘1’ Cu
Cu (%)	48	30	33	26
Nb (%)	11	21	20	26
Monel (%)	32	33	32	30
Powder (%)	9	16	15	18

하게 개선하여 교류 응용기기에 최적화한 선재이다. 이 선재는 약 15%의 초전도 충진율을 가지고 있으며, 구리 비율은 33%에 가깝다. (d) 선재는 36 + ‘1’ Cu심 선재로 약 18%의 초전도 충진율과 약 26%의 구리 비율을 가지고 있다. 이 선재는 기계적인 특성이 많이 요구되는 응용기기에 적합할 것이라 생각된다. 현재 ㈜삼동은 외부 시스인 모넬을 구리로 대체하여 특성이 유사하나 가격적 우위를 보이는 선재를 제작 중이다. 다만 기계적특성이 좋지 못해 고자장에서 사용은 쉽지 않으나 여러 개의 선재를 묶음 형태로 제작 시 구리의 높은 연성에 의해 대용량 선재, 특히 멀티−스트랜드(multi-strand) 형태의 선재로 제조가 가능하다. 이 밖에도 시스 두께, 필라멘트 크기 제어 등 고객 요구에 맞는 다양한 선재들을 주문 생산 방식으로 제작하고 있다.

3.3. MgB_2 초전도 다심 선재의 전기적 특성평가

초전도 선재의 임계전류와 임계전류밀도는 선재의 전기적 특성을 평가하는 가장 중요한 척도이다. ㈜삼동은 7 T 마그넷 시스템을 구축하여 4.2 K 임계전류 자체 측정이 가능하다. 또한, 호주 울런공대학교 등 국제적 인지도가 높은 초전도 그룹과 상호 협력을 맺고, 온도 가변형 마그넷을 사용하여 특성을 평가하고 있다.

그림 4는 18 + ‘1’ Cu심 MgB_2 선재(그림 3 (b))의 임계전류특성을 4.2−30 K의 다양한 온도 범위에서 자기장에 대해 측정한 결과이다. 선재 직경 0.83 ㎜의 경우, 20 K, self−field에서 임계전류는 약 400 A로 측정이 되었다. 4.2 K, 3 T 기준 임계전류는 240 A (J_c~270,000 A/㎠)이고, 20 K, 2 T 기준 임계전류는 73 A (J_c~84,000 A/㎠)이다. 보통 MgB_2가 응용기기에 고려되는 3 T 미만, 15, 20 K 온도에서 선재의 임계전류는 각각 100, 150 A 정도이며, 선재 직경 증가와 초전도 코어면적 증가에 따라 임계전류 값은 증가할 수 있다.

임계전류의 향상과 장선재의 균일한 임계전류 특성은 각 필라멘트의 밀도와 밀접한 관계가 있다. 내 · 외부 필라멘트의 밀도차가 클수록 임계전류밀도 특성은 감소한다. 그림 5의 (a)는 열처리 후 선재의 SEM 단면사진이다. 분말 충진이나 초기 분말 균일도에 따라 초전도 코어 내에 공극들이 존재한다. 외각 초전도 필라멘트의 경우 단단한 금속 튜브에 의한 압착으로 인해 내부 필라멘트에 비해 일반적으로 밀도가 높고 공극이 적은 편이다. 이는 초전류 흐름에 큰 장점을 보인다. 그림 5의 (b)와 (c)는 각각 18 + ‘1’ Cu 심 MgB_2 초전도 선재의 내 · 외각 필라멘트의 단면 사진으로 공극이나 밀도에 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

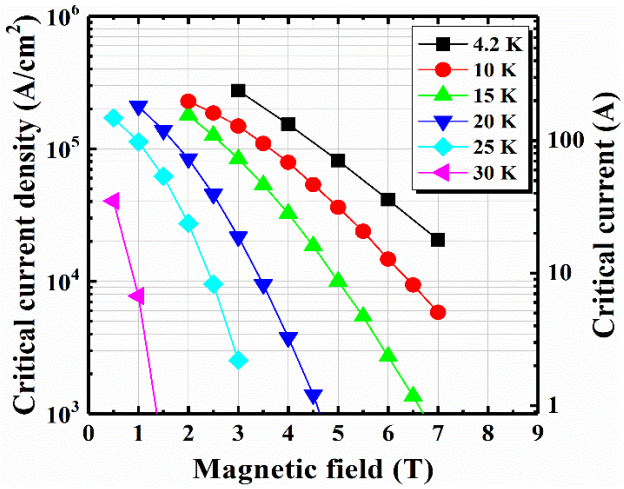

Fig. 4. Magnetic field dependence of 18+1 'Cu' filaments MgB_2 wire at different operating temperatures (4.2 – 30 K).

다만 인발 공정 시 내·외각 필라멘트의 밀도 향상을 위해 큰 단면 감소율을 적용하거나 기계적 강도가 높은 최외각 튜브 사용 시 확산 배리어 층인 니오븀이 손상을 받을 수 있기 때문에 10−30% 정도의 단면 감소율로 인발 공정을 하는 것이 적절하다. 적정 단면 감소율에 따라 인발 된 선재는 열처리 공정 후에도 니오븀과 구리의 우수한 밀착성으로 굽힘 반경에 의한 파손은 상대적으로 적은 편이다.

3.4. 탄소 도핑

분말 미세화를 통한 밀도 향상은 저자장 영역에서 임계전류 특성 향상에 큰 영향을 미치지만 고자장 영역에서 특성 향상을 위해서는 화학적 탄소 도핑이 필요하다. 탄소가 MgB_2에 도핑 될 때, 탄소원자는 부분적으로 보론 자리에 치환(substitution)되거나 보론 공공(vacancy)을 발생시켜 MgB_2 입자 내에 격자 왜곡과 함께 적층 결함을 생성한다. 이러한 구조적 결함은 불순물 산란(impurity scattering) 증가를 야기시켜 상부임계자기장이 향상되며 궁극적으로 고자장에서의 임계전류 특성이 향상시킨다 [20].

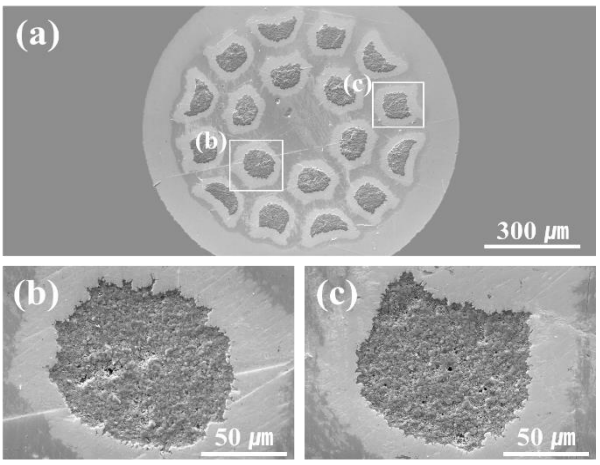

Fig. 5. Cross sectional image of (a) 18+1 'Cu' filaments MgB_2 wire, enlarged (b) inner filament, and (c) outer filament.

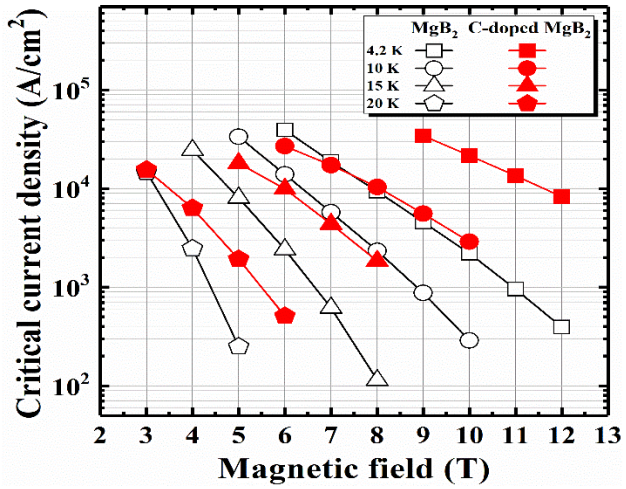

Fig. 6. Magnetic field dependence of MgB_2 and carbon doped MgB_2 wires for comparison.

그림 6은 도핑 유무에 따른 MgB_2 선재의 임계전류밀도 특성을 비교하였다. 도핑 방법은 고상법을 이용하였고, 도핑재료로는 파이렌을 사용하였다. 파이렌은 무색의 고체 상태로 존재하며 145−148℃의 낮은 온도에서 탄소(C)로 분해되어 열처리 공정 시 격자 내에 쉽게 치환이 가능하기 때문에 600−650℃ 열처리에서도 적용이 가능하다[21]. 그림 6의 결과는 측정온도 4.2−20 K 영역에서 자기장에 대한, 탄소 도핑유무에 따라 제작된 선재 J_c의 차이를 보여준다. 도핑이 된 선재의 J_c는 낮은 온도인 4.2 K, 고자장 영역인 10 T 에서는 도핑되지 않은 선재보다 약 10 배 높게 측정되었다. 측정 온도 20 K, 자기장 3 T에서는 도핑 선재와 도핑 하지 않은 선재의 J_c 교차를 확인할 수 있었다. 결과적으로 최종 응용기기의 동작 온도 및 외부 자장 영역에 따라 선재의 도핑의 유무 선택이 필요하다.

3.5. 다심 선재(18 + '1' Cu)의 기계적 특성

MgB_2 초전도 선재의 기계적 향상을 위해 특수한 금속튜브를 사용하기도 하지만 가공성, 경제성 및 모든 측면을 고려하였을 때 모넬 사용이 가장 일반적이다. 다만 모넬 튜브를 이용한 MgB_2 선재 제작 시에 권선 및 저온에서의 외부 응력이나 변형에 의한 임계전류 특성 감소와 기계적 파손 등을 이유로 기계적 특성평가가 필요하다. 특히 대부분의 응용기기는 선재를 보빈에 권선하여 마그넷으로 사용하기 때문에 운행 시 동작 전류에 의한 로렌츠 힘이 발생하여 저온에서의 인장 강도 평가는 필수적이다. ㈜삼동은 다심 MgB_2 초전도 선재를 저온영역에서 기계적 강도를 확인하기 위하여 온도 20 K, 자기장 2 T 환경에서 인장 강도 테스트를 실시하였다. 그림 7은 18 + '1' Cu 심 MgB_2 선재의 I_c와 인장 변형(tensile strain)의 관계를 보여준다. 최종 직경 0.83 ㎜ 선재의 변형율 한계(ε_{irr})는 약 0.25% 이다. 열처리된 선재의 경우 초기 보빈에 권선 된 상태부터, 권선 및 응용기기의 동작을 고려하면 MgB_2 초전도 선재의 변형율은 0.2% 수준을 유지하여야 한다[21]. ㈜삼동은 다양한 초전도 선재의 기계적 특성 평가를 통하여 그에 따른 고객의 요구에 대응하고 있다.

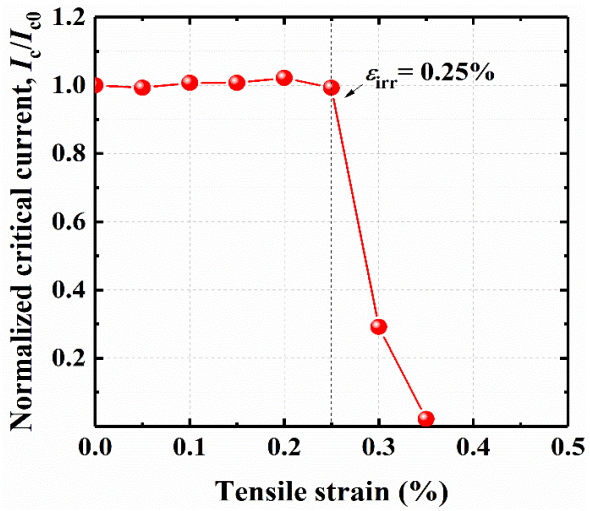

Fig. 7. Critical current (I_c) versus tensile strain for 18 + '1' Cu multi-filament MgB_2 wire.

4. CONCLUSION

본 논문에서는 ㈜삼동에서 제작하고 있는 7 (6 + '1' Cu), 19 (18 + '1' Cu), 그리고 37 (36 + '1' Cu)심의 다양한 MgB_2 초전도 선재의 전기적 그리고 기계적 특성을 평가하였다. 현재 1 ㎞ 이상 선재의 임계전류 특성은 4.2 K, 3 T 기준 J_c는 270,000 A/㎠ 이고, 20 K, 2 T 기준 84,000 A/㎠로 평가되었다. 장선의 선재에도 불구하고 가공 후 내부 초전도 코어의 파손이 발생하지 않고, 각 초전도 코어의 균일한 면적 및 밀도를 유지하는 것으로 관찰되었다. 기공의 최소화는 분말 혼합 최적화에 의해 크게 영향을 받는다. 고자장에서 적용가능한 선재 개발을 위해 탄소 도핑 연구 또한 진행되었다. 파이렌 소스를 이용하여 전처리 공정에서 최적 혼합 적용시 4.2 K, 10 T에서 도핑 되지 않은 선재보다 약 10 배의 J_c 향상을 확인하였다. 특이한 점은 20 K 온도, 3 T 자기장에서 도핑 선재와 도핑 되지 않은 선재의 J_c 교차가 발생하였다. 기계적 강도 확인을 위한 20 K, 2 T 조건에서 인장 변형율 한계는 0.25%였다. 다양한 MgB_2 다심 선재는 그 사용 목적에 맞게 밀링, 탄소 도핑 등의 분말 전처리 공정 최적화, 다심 구조 개선 등을 통한 선재 기계적 강도 향상 등을 통하여 상용화급 초전도 선재의 특성을 더욱 향상시킬 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

The authors express their gratitude to Prof. Jung Ho Kim, University of Wollongong, Australia and Prof. Seyong Choi and Dr. Minoru Maeda, Kangwon National University, Korea, about fruitful discussion and critical reading of the manuscript. The authors also express their gratitude to Prof. Hyung Seop Shin, Andong National University, Korea, for tensile strain test.

This research was financially supported by the Ministry of SMEs and Startups(MSS), Korea, under the "Regional Specialized Industry Development Program(R0004502)" supervised by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) and by the Technology Innovation Program or Industrial Strategic Technology Development Program (20002088, Scalable integration of MgB_2 superconducting wire towards cost effectiveness and industrial competitiveness) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy.

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 (MgB_2) wires and magnets using in situ strand fabrication method," *Physica C*, vol. 456, pp. 203-208, 2007.

[3] A. Ballarino, C. E. Bruzek, N. Dittmar, S. Giannelli, 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 MgB_2 superconducting cables for very high power transmission," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, pp. 5401705, 2016.

[4] Y. Iwasa, "Towards liquid-helium-free, persistent-mode MgB_2 MRI magnets: FBML experience," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 30, pp. 053001, 2017.

[5] T. Machi, S. Shimura, N. Koshizuka, and M. Murakami, "Fabrication of MgB_2 superconducting wire by in situ PIT method," *Physica C*, vol. 392, pp. 1039-1042, 2003.

[6] D. Patel, M. Hossain, A. Motaman, S. Barua, M. Shahabuddin, and J. H. Kim, "Rational design of MgB_2 conductors toward practical applications," *Cryogenics*, vol. 63, pp. 160-165, 2014.

[7] A. Gümbel, J. Eckert, G. Fuchs, K. Nenkov, K.-H. Müller, and L. Schultz, "Improved superconducting properties in nanocrystalline bulk MgB_2," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, pp. 2725-2727, 2002.

[8] M. Herrmann, W. Haessler, C. Rodig, W. Gruner, B. Holzapfel, and L. Schultz, "Touching the properties of NbTi by carbon doped tapes with mechanically alloyed MgB_2," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, pp. 082507, 2007.

[9] M. Takahashi1 and H. Kumakura, "Improvement of the *Jc*–B property of MgB_2 tapes using the Taguchi method," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 25, pp. 115021, 2012.

[10] J. H. Kim, S. X. Dou, S. Oh, M. Jerčinović, E. Babić, T. Nakane, and H. Kumakura, "Correlation between doping induced disorder and superconducting properties in carbohydrate doped MgB_2," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, pp. 063911, 2008.

[11] M. Eisterer, "Magnetic properties and critical currents of MgB_2," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. R47-R73, 2007.

[12] J. H. Choi, D. G. Lee, J. H. Jeon, E. J. Lee, M. Maeda and S. Choi, "Customized MgB_2 Superconducting Wire Toward Practical Applications at Sam Dong in Korea," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 32, pp. 1219-1223, 2019.

[13] www.samdongkorea.com

[14] D. Sha, G. Yan, L. Zhou, J. S. Li, C. S. Li, Q. Y. Wang, X. M. Xiong, and G. F. Jiao, "Multifilamentary MgB_2 wires fracture behavior during the drawing process," *Physica C*, vol. 483, pp. 17-20, 2012

[15] P. Mikheenko, E. Martinez, A. Bevan, J. S. Abell, and J. L. MacManus-Driscoll, "Grain boundaries and pinning in bulk MgB_2," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. S264-S270, 2007.

[16] M. D. Sumption, M. Bhatia, X. Wu, M. Rindfleisch, M. Tomsic and E. W. Collings, "Multifilamentary, in situ route, Cu-stabilized MgB_2 strands," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 18, pp. 730-734, 2005.

[17] M. D. Sumption, M. Bhatia, M. Rindfleisch, M. Tomsic and E. W. Collings, "Transport properties of multifilamentary, in situ route, Cu-stabilized MgB_2 strands: one metre segments and the $J_c(B, T)$ dependence of short samples," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. 155-160, 2006.

[18] A. V. Pan, S. Zhou, H. Liu and S. Dou, "Properties of superconducting MgB_2 wires: in situ versus ex situ reaction technique," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 16, pp. 639-644, 2003.

[19] S. Jin, H. Mavoori, C. Bower, and R. B. van Dover, "High critical currents in iron-clad superconductingMgB_2 wires," *Nature*, vol. 411, pp. 563-565, 2001.
[20] J. H. Kim, X. Xu, M. S. A. Hossain, D. Q. Shi, Y. Zhao, X. L. Wang, S. X. Dou, S. Choi, and T. Kiyoshi, "Influence of disorder on the in-field J_c of MgB_2 wires using highly active pyrene," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 92, pp. 042506, 2008.
[21] K. Salama, Y. X. Zhou, M. Hanna, M. Alessandrini, P. T. Putman and H. Fang, "Electromechanical properties of superconducting MgB_2 wire," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 18, pp. s369-s372, 2005.