

Fabrication of MgB₂ superconducting wires with advanced Mg-Powder-Compaction process

S. H. Oh^{a, c}, Y. S. Oh^a, S. H. Jang^b, Y. H. Moon^c, K. C. Chung^{*, a}, and S. H. Kang^{+, a}

^a Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

^b Kiswire Advanced Technology Ltd., Daejeon, Korea

^c Pusan National University, Pusan, Korea

(Received 6 December 2021; revised or reviewed 16 December 2021; accepted 17 December 2021)

Abstract

The Mg-Powder-Compaction (MPC) process is proposed to fabricate the MgB₂ superconducting wires. Mg powder wall, similar to the Mg metal tube, inside the Nb outer sheath has been made and the stoichiometric B powder was inserted into the wall. Even though the very high MgB₂ core density of 2.53 g/cm³ is obtained, the superconducting area fraction of MgB₂ is not high enough for the applications. In this work, an advanced MPC process was adopted by adding Mg powder into B powder. The Mg powder wall in the initial wire was fabricated by controlling the wall thickness while maintaining a constant density, and the mixture of B and Mg powder was filled into the Mg powder wall with the same filling density. It is found that the reduction in the area of the Mg powder wall proceeds similar to the wire, and the Mg powder wall is well maintained at the final wire diameter, which is advantage for the fabrication of long wires. With the advanced MPC process, as the added Mg is increased the densities of MgB₂ core is decreased and the porous structure is formed, it is found that the area fraction of superconducting MgB₂ increase up to the 37.7 % with the improved high critical current density (J_c) and the engineering critical current density (J_e).

Keywords: MgB₂, wires, Mg-Powder-Compaction(MPC) process, MgB₂ area, critical current

1. INTRODUCTION

2001년 임계온도가 39 K인 MgB₂가 발견되었으며 저온 초전도체에 비해 높은 임계온도로 인해 액체 헬륨을 사용하지 않고 냉동기를 통한 냉각만으로도 초전도 특성을 유지할 수 있어 다양한 연구가 진행 중이다 [1]. 하지만 초전도 산업 응용에 필수적인 상부 임계자장 (H_{c2}) 과 임계전류밀도 (J_c)가 기존의 저온 초전도체에 비해 낮기 때문에 MgB₂의 실질적인 상용화를 위해서는 임계전류밀도 등의 향상이 필수적이다.

현재, Powder-In-Tube (PIT) 공정으로 제작된 MgB₂ 선재의 임계전류밀도는 기존 저온 초전도체인 NbTi 및 Nb₃Sn의 임계전류밀도 보다는 낮은 값을 가지기 때문에 향후 저온 초전도체를 대체하기 위해서는 MgB₂ 초전도 임계 특성을 보다 향상시켜야 하는 상황이다 [2, 3].

한편, MgB₂의 초전도 특성향상을 위해 각각 Mg rod와 Mg tube을 사용하고, Mg와 B의 영역이 상호 확산 반응하는 공정을 기반으로 MgB₂를 형성하는 Internal-Mg-Diffusion (IMD)와 External-Mg-Diffusion (EMD) 공정이 제안되었다 [4-6]. 기존의 PIT 공정에 비해 층상구조를 가지는 고밀도의 MgB₂ 초전도 형성이 가능하여 우수한 초전도 특성을 가지는 것으로 보고되어 있지만 실용화를 위한 km급 장선재 제조에는 공정자체가 가지고 있는 한계가 존재한다. IMD 공정의 경우, Fe tube 내부의 중심에 존재하는 Mg rod의 성형성이 좋지 않기 때문에 장선재를 위한 인발공정에서 Mg의 종축 길이방향으로 분포의 균일성을

확보하기가 어려운 것으로 알려져 있으며 현재 보고된 IMD 선재의 길이도 ~100 m에 머물러 있는 상황이다 [7].

본 연구에서는, MgB₂ 장선재 제조를 위해 사용되는 기존의 Mg 금속의 tube을 대체하는 방안으로써 Mg 분말을 압축하여 소위 분말 tube 형태를 만들어 사용하는 Mg-Powder-Compaction (MPC) 공정을 고안하였다(Fig. 1). 즉, 외부 금속 Nb 피복재 내부에 Mg 분말을 이용하여 벽을 형성하였으며, 선재의 단면적이 ~99% 감소에도 불구하고 Mg 분말벽이 형태를 잘 유지하는 것이 가능하였다. 또한 Mg과 B의 확산반응을 향상시키기 위해 Mg 분말 tube 내부에 있는 B 분말 영역에 Mg 분말을 일부 혼합하여 채움으로써 확산거리를 줄여 MgB₂의 반응성을 높여 초전도 특성을 향상시킬 수 있다. 본 MPC 공정을 통해 제조되는 MgB₂ 초전도 선재의 임계전류밀도(J_c)와 공칭임계전류밀도(J_e)

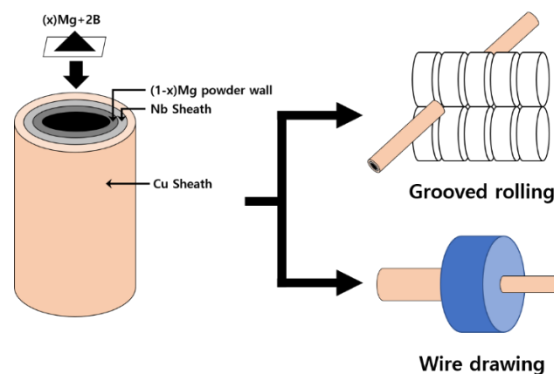


Fig. 1. Schematic of Advanced Mg-Powder-Compaction (MPC) process.

* Corresponding author: kcchung@kims.re.kr

+ Corresponding author: kangsh@kims.re.kr

를 동시에 향상시키는 방법을 연구하였으며, Mg 분말벽 두께 감소에 따라 내부 혼합분말 중 Mg 함량의 변화가 MgB₂ 선재의 초전도 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. EXPERIMENT

본 실험에서는 순도 99% 이상의 Mg 분말(한국, HanaAMT사, 분말크기 ~40 μm)과 순도 99% 이상인 B 분말(터키, Pavezum사, 분말크기 ~0.5 μm)를 사용하였다. 본 연구에서 개발된 MPC 공정은 Mg 분말벽과 내부에 B 분말로만 구성된 것이고, Advanced MPC 공정은 Mg 분말벽의 두께를 줄이면서 내부에는 B 분말과 화학양론비를 맞춘 일부 Mg 분말을 같이 혼합하여 채워준 구성이다. 각각 MPC, AM14, AM28, AM41, 그리고 AM55로 명명된 총 5 종류의 MgB₂ 초전도 선재를 제작하였다. 각각 선재에 대한 보다 자세한 정보는 Table I에 나타내었다. 선재 내부의 MgB₂의 화학적 양론비를 유지하기 위해 Mg 분말벽의 두께는 MPC, AM14, AM28, AM41 및 AM55가 Nb tube 내부에 (1-x)Mg의 양으로 각각 1.75, 1.50, 1.25, 1.00, 0.75 mm의 두께의 벽형태로 형성하였다. 그리고 Mg 분말벽 내부에 충전되는 혼합분말은 (x)Mg+2B 조성으로 제작하였으며 Mg 분말벽 두께에 따라 혼합분말 중 Mg 양(x)은 각각 0, 0.14, 0.28, 0.41, 0.55 몰로 하였다.

위와 같이 준비된 Nb/Mg(1-x)/(x)Mg+2B의 조립체는 구리 tube에 다시 장입하였으며, 최초 ~26mm 선경을 ~2 mm까지 공형압연 및 인발공정을 실시하였다. 인발된 선재에서 ~200 mm 길이로 잘라낸 후 Ar 분위기에서 열처리를 실시하였다. 실온에서 5°C/min 속도로 675°C까지 상승시킨 후 675°C에서 1시간 유지한 후 실온까지 냉각하였다.

제조된 MgB₂ 초전도 선재의 횡단면은 FE-SEM(JEOL사, JSM-6610LV)을 통해 MgB₂의 단면적 및 Mg 분말벽을 관찰 및 분석하였다. 그리고 기계적 방법으로 Nb tube 내부에 존재하는 MgB₂ core를 따로 추출하여 파라핀으로 코팅한 후 아르키메데스 원리를 사용하여 MgB₂ 밀도를 측정하였다. MgB₂ 초전도의 상은 XRD(Rigaku사, Ultima IV)를 사용하여 20-80도 범위에서 측정 및 분석하였다.

MgB₂ 선재의 초전도 특성은 선재에서 추출한 MgB₂ Core에 대하여 PPMS(Quantum Design사, Evercool II)의 VSM(Vibrating Sample Magnetometer) option을 이용하여 측정하였다. MgB₂의 임계전류밀도(J_c) 및 공칭임계전류밀도는 VSM으로 각각 5 K와 20 K에서 측정된 MgB₂ core의 M-H data를 Bean's critical model (1)를 이용하여 J-B 곡선으로 변환하여 분석하였다.

$$J = \frac{30\Delta M}{\pi d^3 l/4} \quad (1)$$

TABLE I
DETAILS OF THE FABRICATED MgB₂ WIRES.

Sample ID	MPC	AM14	AM28	AM41	AM55
Method	MPC	Advanced MPC			
Mg powder wall thickness (mm)	1.75	1.50	1.25	1.00	0.75
Molar ratio of Mg in powder mixture (x)	0	0.14	0.28	0.41	0.55
MgB ₂ area fraction (%)	25.3	26.6	33.3	37.4	37.7
MgB ₂ Core Density (g/cm ³)	2.53	2.44	2.29	2.13	2.04

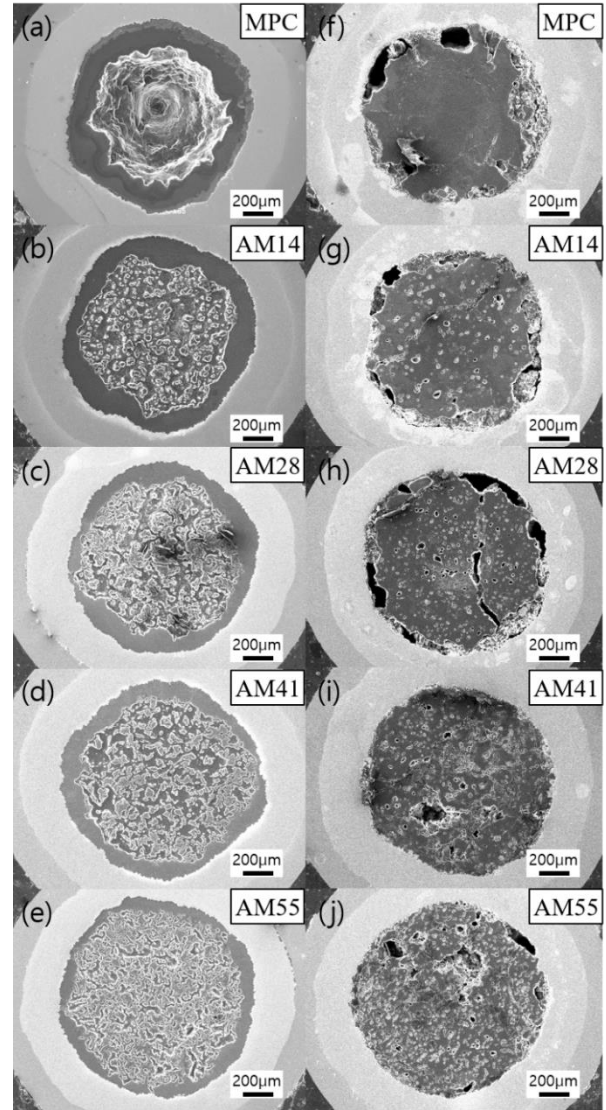


Fig. 2. SEM images of the transverse cross section (a-e) before heat treatment and (f-j) after heat treatment.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Fig. 2은 제조된 MgB₂ 선재의 단면 SEM 사진으로 (a-e)는 선경이 ~2 mm의 열처리 전 횡단면 모습이고 (f-j)는 열처리가 된 후 측정된 횡단면의 모습이다. Fig. 2의 (a-e)에 나타낸 SEM 사진을 통해 Mg 분말벽을 확인할 수 있으며, MgB₂ 전체 선재의 감면율과 Mg 분말벽의 감면율이 유사하게 감소한 것을 확인할 수 있다. 즉, MgB₂ 선재는 최

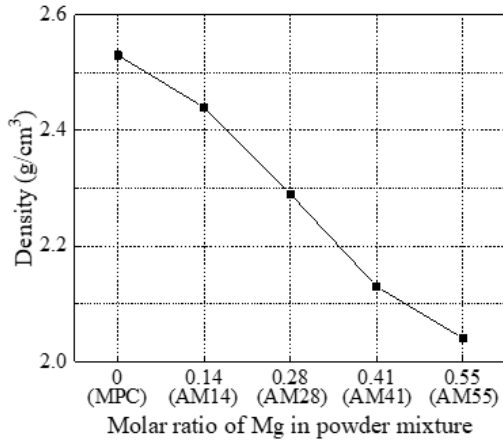


Fig. 3. MgB₂ Core densities of the wires fabricated by the advanced MPC process.

초 선경 26 mm에서 최종 선경 2 mm까지 총 99.4%의 단면적이 감소하였으며 Mg 분말벽 면적은 평균적으로 99.3%의 단면적 감소가 이루어졌다. 이를 통해, 선재의 감면과 Mg 분말벽의 감면이 인발 과정에서 유사하게 진행되며 많은 소성변형 후에도 Mg 분말벽이 내부에서 잘 유지되기 때문에 MgB₂ 장선재 제조에도 충분히 이용 가능할 것으로 생각된다.

한편, Fig. 2의 열처리 후 단면 SEM 사진을 통해 혼합분말 내 Mg의 양이 많아질수록 내부 core에 많은 기공이 형성되는 것을 관찰할 수 있고, Nb과 MgB₂의 계면부분을 따라 기공이 형성된 것도 확인할 수 있다. 계면의 기공은 MPC 공정 자체의 특성으로 분말벽을 형성하는 Mg 분말이 용융 및 확산하는 과정에서 Mg이 원래 있었던 부분에서 열처리 후 생기는 현상으로 볼 수 있다. 그리고 SEM 사진을 통해 모든 시료의 MgB₂ core 면적을 측정하였으며 MPC, AM14, AM28, AM41, AM55 선재의 MgB₂ 면적분율은 각각 25.3, 26.6, 33.3, 37.4, 37.7 %로 확인되며 Mg 분말벽이 감소할수록 MgB₂ 면적분율이 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 Mg 분말벽이 얇아질수록 B과 Mg 혼합분말의 영역이 증가하고 확산거리가 짧아짐으로써 용융 및 반응과정을 통해 MgB₂ 반응영역도 증가한 것으로 생각된다.

선재 내부에 존재하는 MgB₂ core를 기계적으로 직접 추출하여 아르키메데스의 원리를 통해 MgB₂의 밀도를 측정하였다. 시료 MPC, AM14, AM28, AM41, AM55 선재의 MgB₂ core 밀도는 각각 2.53, 2.44, 2.29, 2.13, 2.04 g/cm³로 측정되었으며 Mg 분말벽이 감소할수록 core 밀도도 감소하는 경향을 보인다 (Fig. 3). Fig. 2의 열처리 후 SEM 사진에서 볼 수 있듯이 혼합분말에 들어가는 Mg의 함량이 증가할수록 반응 형성된 MgB₂에 기공의 수가 증가하는 모습을 볼 수 있고, 이러한 이유때문에 밀도가 감소한다는 것을 확인할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 현재 보고된 일반적인 PIT 공정에서 나타나는 MgB₂ 밀도인 1.2 g/cm³보다는 큰 값을 갖고 있다 [8]. 특히 MPC 선재의 경우, 밀도값이 2.53 g/cm³로 MgB₂의 이론밀도(2.63 g/cm³)에 근접하는 높은 값을 보였다. 또한 현재 보고된 확산기반의 공정 중 Modified Internal Mg Diffusion (MIMD)로 제조된 선재에서 추출한 MgB₂ core의 밀도인 2.38 g/cm³보다도 높은 값이다 [9]. MIMD 공정의 경우 Mg 금속 tube의 다소 낮은 성형성으로 인해 총 감면율이 작아 내부 B 분말의 충전밀도가 낮을 수 있지만, Mg 분말벽을 가지는 본 연구의 MPC 공정은 내부 B 분말의 충전밀도가 높고 인발 공정과정에서 외부 압력에 대해 내부방향으로의 압축 및 반

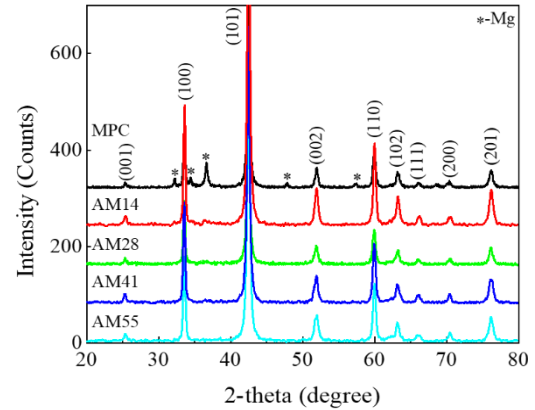


Fig. 4. XRD analysis of the MgB₂ cores fabricated by the advanced MPC process.

발압축, 그리고 따로 분리되어 있는 분말간에 상호 압축되는 현상 등이 MPC 선재에서 보다 효과적으로 작용하여 MgB₂ core 밀도가 더 큰 것으로 생각된다.

Fig. 4에는 Mg 분말벽 내부에 장입한 혼합분말에 포함된 Mg 분말의 함량에 따라 형성된 MgB₂ 초전도의 상 분석 결과를 보여준다. 모든 시료에서 반응 형성된 MgB₂가 주요상을 알 수 있다. 한편, B 분말만을 Mg 분말벽 내부에 장입한 MPC 선재의 경우에는 XRD 측정에서 반응하지 않고 남아 있는 Mg에 의한 회절선이 관찰되었다. 한편, IMD 공정에서 중심에 위치하고 있는 Mg rod가 B 영역으로 용융 및 확산되어 MgB₂를 반응할 때 형성되는 MgB₂의 두께가 20–30 μm로 Mg이 확산하는데 한계가 있다고 보고되었다 [10]. 본 연구의 MPC 선재의 경우, 선재 중 가장 두꺼운 Mg 분말벽을 가지기 때문에 B 영역으로 모두 확산하지 못하여 결국 반응하지 못하고 남아있기에 Mg 회절선이 관찰된 것으로 생각된다. 한편, 흥미롭게도 MPC 선재를 제외한 Advanced MPC 공정으로 제조된 나머지 선재들은 Mg 분말벽 내부에 B 분말 대신 B과 Mg 혼합분말이 사용되었으며, 이로 인해 반응에 참가할 수 있는 Mg의 확산거리를 충분히 확보되었기에 모든 Mg와 B이 충분히 반응을 한 것으로 볼 수 있다. 또한 MgB₂ 주요상 이외에 나타나는 불순물인 MgO가 XRD 상에서는 매우 작게 보이는 부분도 흥미로운 점이다. 일반적으로 MgB₂ bulk시료에 비해서 선재형태에서 자주 보이는 현상으로 인발 공정 및 열처리 과정에서 외부 금속 피복재로 인해 내부의 Mg 분말이 산화되는 것이 차단될 수 있는 것도 하나의 요인이라고 볼 수 있다.

MgB₂ 선재의 초전도 임계전류밀도와 공칭임계전류밀도 특성을 Fig. 5에 각각 나타내었다. MgB₂ core에 대해 측정된 M-H data를 바탕으로 Bean's critical model을 사용하였으며 MPC, AM14, AM28, AM41, AM55의 J_c-B 곡선을 얻기 위해 MgB₂ Core의 유효직경 d는 각각 0.08, 0.10, 0.10, 0.10, 0.11 cm를 사용하였으며 선재의 길이 l은 각각 0.35, 0.5, 0.47, 0.45, 0.44 cm를 사용하였다. J_c-B 곡선은 J_c-B 곡선에서 선재의 유효직경만 달리하여 계산되었으며, 모든 선재의 유효직경 d를 0.21cm로 하여 계산하였다.

Fig. 5에서 측정온도 5 K에서는 flux jump 현상을 관찰할 수 있으며, 이는 MgB₂ 초전도체 내부로 magnetic flux가 갑자기 침투하여 고정되지 않고 유동함으로써 에너지 손실과 더불어 국부적 온도상승, 그리고 자기 모멘트 값이 급격히 감소하는 현상으로 이어지는 것이다. 제2종 초전도체의 혼합상태에서, 특히 측정온도가 낮을수록 시료의 열적 불안정성이 높아지고 임계전류가 증가하기 때문에 초전도

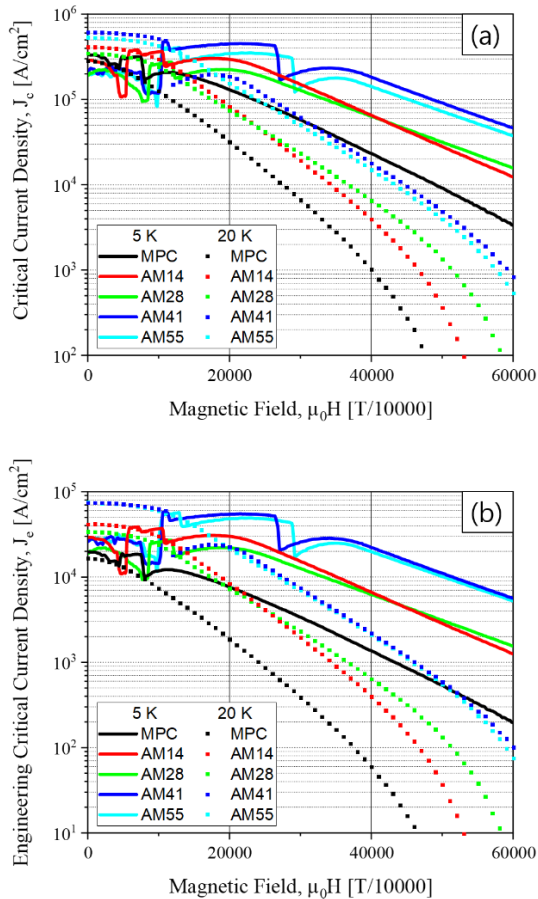


Fig. 5. (a) Critical current density vs. magnetic field and (b) Engineering critical current density vs. magnetic field of the MgB_2 wires fabricated by the advanced MPC process.

임계상태의 불안정성에 기인하는 현상이다 [11, 12].

Fig. 5(a)에서 보면 Mg 분말벽 두께가 감소함에 따라 외부에서 가해진 자기장에 대해 J_c 가 증가하는 경향을 볼 수 있으며, AM14과 AM28 선재 그리고 AM41과 AM55 선재가 서로 유사하게 나타났다. MPC 선재가 가장 낮은 임계전류밀도를 가지며, AM41 선재가 가장 우수한 임계전류밀도를 나타낸다. AM41 선재의 5 K, 4 T에서 임계전류밀도는 $\sim 2 \times 10^5$ A/cm²으로 기존의 보고된 IMD 공정으로 제작된 선재의 5 K, 4 T에서 임계전류밀도는 $\sim 10^5$ A/cm²에 비교하여 거의 2배 정도 높은 값을 확인할 수 있다 [13].

한편, MPC 선재는 가장 높은 core 밀도에도 불구하고, 다소 낮은 MgB_2 면적분율과 앞선 XRD 회절분석 결과에 나타난 반응하지 않은 Mg이 불순물로 작용하여 임계전류밀도가 낮게 나온 것으로 생각된다. 향후 열처리 온도를 높이거나 머무는 시간을 증가시켜 진행한다면 보다 임계전류밀도가 향상될 것이라 생각된다. AM41, AM55 선재의 경우 실험한 MgB_2 선재 중 높은 임계전류밀도를 가진다. 비록 MgB_2 core 밀도가 상대적으로 낮음에도 불구하고 높은 초전도 면적분율을 가지고 있으며, 이는 다른 선재에 비해 혼합분말 중 Mg의 함량이 높기에 확산거리가 짧아져 Mg와 B의 반응이 높아진 것으로 생각된다.

Fig. 5(b)는 MgB_2 초전도 선재의 전체 단면적에 대해 계산된 공칭임계전류밀도에 대한 J_e -B 곡선이다. 앞선 J_c 와 마찬가지로 Bean's critical model을 사용하였다. J_e -B 특성도 J_c -B와 비슷한 모습을 확인할 수 있으며, Mg 분말벽 두께가 감소할수록 자기장에 대해 J_e 가 증가하는 경향을 볼 수 있다. MgB_2 core 자체의 초전도 특성이 유사하다면 전

체 선재의 단면적에서 초전도 MgB_2 의 면적분율이 J_e 에 가장 큰 영향을 미치기 때문이다. 이는 앞선 분석과 같이 혼합분말 중 Mg 분말 첨가에 의해 높은 반응을 위한 확산거리가 짧게 만들어 준 것에 기인하는 것으로 판단된다.

향후, MgB_2 선재의 core 직경을 줄이기 위한 다심 MgB_2 제조 공정을 적용한다면 Mg와 B의 반응 확산거리는 훨씬 더 줄일 수 있을 것이며, Nb tube와의 계면에 존재하는 기공 크기를 줄이거나 거의 없앨 수 있을 것으로 판단된다. 또한 높은 core 밀도를 확보할 수 있으므로 높은 임계전류밀도 및 공칭임계전류밀도를 기대할 수 있을 것이다.

4. CONCLUSION

본 연구에서는 Mg 분말을 압축한 tube 형태와 내부에 B 분말을 장입한 Mg-Powder-Compaction (MPC)와 내부 B에 일부 Mg를 혼합한 Advanced MPC 공정을 고안하여 MgB_2 초전도 선재를 제조하고 미세조직 및 밀도 특성 등을 분석하였다. Nb tube 내부에 형성된 Mg 분말벽은 인발 가공 후에도 그 형태를 잘 유지하고 있어 향후 MgB_2 장선화에도 적용 가능함을 확인할 수 있었으며, Mg의 확산 및 반응으로 생성된 MgB_2 core는 2.53 g/cm³로 매우 높은 밀도를 보여주었다. 비록 혼합분말 내부의 Mg 첨가량이 증가할수록 MgB_2 core 밀도가 감소하고 MgB_2 특유의 기공이 형성 및 증가되었지만, 초전도 MgB_2 가 차지하는 면적분율이 크게 증가함으로써 기존의 PIT 공정에 비해 J_c 및 J_e 를 증가시킬 수 있었다. 즉, MPC 공정의 문제점으로 확인된 불완전한 상호 반응성을 혼합분말 내부에 Mg를 일부 첨가함으로써 Mg 확산거리를 짧게 함으로써 해결할 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Technology Innovation Program (N0002598) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea) and the fundamental research program of Korea Institute of Materials Science (PNK7760).

REFERENCES

- [1] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride," *nature*, vol. 410, no. 6824, pp. 63-64, 2001
- [2] R. Flükiger, H. Suo, N. Musolino, C. Beneduce, P. Toulemonde, and P. Lezza, "Superconducting properties of MgB_2 tapes and wires," *Physica C: Superconductivity*, vol. 385, pp. 286-305, 2003
- [3] P. Sunwong, J. Higgins, Y. Tsui, M. Raine, and D. Hampshire, "The critical current density of grain boundary channels in polycrystalline HTS and LTS superconductors in magnetic fields," *Superconductor Science and Technology*, vol. 26, no.9, pp. 95006, 2013
- [4] G. Giunchi, "The Reactive Liquid Infiltration (RLI) Technique for the Bulk Reaction to MgB_2 ," *MgB₂ Superconducting Wires: Basics and Applications*, pp. 159-208, 2016
- [5] J. Hur, K. Togano, A. Matsumoto, H. Kumakura, H. Wada, and K. Kimura, "Fabrication of high-performance MgB_2 wires by an internal Mg diffusion process," *Superconductor Science and Technology*, vol. 21, no.3, pp. 032001, 2008
- [6] M. Son, N. Kaneda, M. Kanazawa, Y. Yamada, and K. Tachikawa, "Superconducting properties and structures of MgB_2 wires prepared by external diffusion method," *Journal of Advanced Science*, vol. 26, pp. 32-35, 2014
- [7] D. Wang, D. Xu, X. Zhang, C. Yao, P. Yuan, Y. Ma, H. Oguro, S. Awaji, and K. Watanabe, "Uniform transport performance of a 100

- m-class multifilament MgB₂ wire fabricated by an internal Mg diffusion process.” *Superconductor Science and Technology*, vol. 29, no. 6, pp. 065003, 2016
- [8] A.V. Pan, S. Zhou, H. Liu, and S. Dou, “Properties of superconducting MgB₂ wires: in situ versus ex situ reaction technique,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 16, no.5, pp. 639, 2003
- [9] M. Kulich, P. Kováč, M. Hain, A. Rosová, and E. Dobročka, “High density and connectivity of a MgB₂ filament made using the internal magnesium diffusion technique,” *Superconductor Science and Technology*, vol. 29, no.3, pp. 035004, 2016
- [10] H. Kumakura, “Development of high performance MgB₂ tapes and wires,” *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 81, no.1, pp. 011010, 2011
- [11] V. Chabanenko, R. Puźniak, A. Nabialek, S. Vasiliev, V. Rusakov, L. Huanqian, R. Szymczak, H. Szymczak, J. Jun, and J. Karpiński, “Flux jumps and HT diagram of instability for MgB₂,” *Journal of low temperature physics*, vol. 130, no. 3, pp. 175-191, 2003
- [12] Y. Kimishima, S. Takami, T. Okuda, M. Uehara, T. Kuramoto, and Y. Sugiyama, “Complete flux jump in bulk MgB₂ sintered under high pressure,” *Physica C: Superconductivity and its applications*, vol. 463, pp. 281-285, 2007
- [13] X. Xu, W. Li, X. Wang, and S.X. Dou, “Superconducting properties of graphene doped magnesium diboride,” *Applications of High-Tc Superconductivity*, pp. 201-218, 2011