

의료기용 MgB₂ 초전도체 제조 및 특성 ; B 분말 밀링, 탄소 도핑, 저온 고상 반응

전 병혁, 박 순 동, 김 찬 중
한국원자력연구원 중성자과학연구부

1. 서 론

MgB₂ 초전도체는 Nb-Ti 또는 Nb₃Sn 등의 저온 초전도체와 비교해 보았을 때 39 K의 높은 임계 온도를 갖고 있으며 고온 초전도체와 비교시 결맞음 길이 (coherence length)가 길어서 전력 및 의료 기기 산업으로의 응용이 기대되는 재료이다. MgB₂는 two gap 초전도체이며 산화물 고온 초전도체와는 달리 강한 이방성을 보이지 않는다는 장점이 있다. MgB₂의 초기 원료 분말인 Mg과 B 분말의 가격은 저온 초전도체에 비하여 낮아 실제 응용을 위한 또 다른 이점이 있다. 또한 MgB₂ 초전도체는 액체 헬륨이 아닌 경제적 이점이 있는 냉동기를 사용하여 20-25 K에서 작동하는 magnetic resonance imaging (MRI)용 마그네트 제작에 사용될 수 있다.

MgB₂ 초전도 특성을 향상시키는 중요한 방법중의 하나는 높은 반응성을 갖는 C 소스 도펀트의 개발이다. 고 자기장 하에서 MgB₂ 초전도 임계 전류 특성을 향상시키고자 SiC, 탄소 (C) 화합물, 탄화수소 (hydrocarbon) 그리고 탄수화물 (carbohydrate)와 같은 여러 종류의 형태의 탄소 도핑 연구가 많이 시도되어져 왔다 [1-5]. 그런데 탄소 도핑 없이 고 전류 특성을 갖는 순수 MgB₂ 선재의 제조 또한 중요하다. 산화물 고온 초전도체와는 달리 MgB₂ 초전도체의 중요한 특성중의 하나는 결정립계 (grain boundary) 간에 약 결합 (weak links)이 없다는 것이다. 특히, 작은 결정립 (grain)을 갖는 MgB₂ 초전도는 높은 결정립계 밀도의 플럭스 피닝 센터를 갖게 되어 임계 특성이 향상된다고 알려져 있다 [6].

Mg의 녹는점 (650°C) 이하의 저온 고상 반응은 작은 결정립과 낮은 결정성을 갖는 MgB₂ 상을 형성하여 초전도 임계특성을 향

상시킨다고 알려져 있다 [7]. 그런데 저온에서 Mg과 B 간의 반응을 완전히 일으키기 위하여 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다. 한편 기계적 밀링은 초기 원료 물질을 정련 (refine)하여 반응성 향상 및 작은 결정립으로 초전도 특성을 향상시킨다고 알려져 있다. Mg 없이 B 분말만의 밀링이 MgB₂의 임계전류밀도 (J_c)를 향상시키는데 효과적인 것으로 보고되고 있다 [8].

밀링되어 표면적이 넓어진 B 분말의 C에 의한 pre-coating은 임계특성 향상에 더욱 효과적일 수 있다. 본 연구에서 C 소스로 사용된 글리세린 (C₃H₈O₃)은 음식물이나 의약품에 범용적으로 사용되고 있으며 독성이 없는 sugar alcohol 이다. 액체형태의 C 소스로서 약 40도의 낮은 온도에서 B 분말과 wettability가 좋으며 대부분의 고체 형태의 C 화합물 안에서 발생할 수 있는 나노 입자들의 뭉침 (agglomeration) 거동을 피할 수 있다. 본 리뷰에서는 B 분말의 밀링 공정과 탄소 도핑 공정을 결합하여 작은 입자에 넓은 표면적을 갖는 B 분말에 탄소 도핑을 통한 MgB₂ 벌크의 microstrain과 결정립 크기 변화와 임계전류특성의 향상을 소개하고자 한다. 또한 밀링 여부 및 저온 열처리 조건에 따른 *in situ* PIT (powder in tube) MgB₂/Fe 선재의 결정성, 결정립 크기, 미세구조 및 임계특성등을 800°C의 고온 열처리와 비교, 분석하였다.

2. MgB₂ 벌크 및 선재 제조 방법

중국 Tangshan Weihao Magnesium 사의 Mg 분말 (99 %, 4 - 10 μm) 및 저순도의 준 결정상 B 분말 (95-97 %, 1 μm 이하)을 원료로 사용하였다. B 분말의 습식 밀링시, B₂O₃ 생성 방지를 위하여 산소가 없는 톨루엔 (C₇H₈) 미디어를 사용하였다.

Mg 분말의 경우 산소가 없는 습식 분위기라도 밀링후 공기와 접촉하게 되면 높은 활성화(activity) 때문에 쉽게 산화되어 MgO 상이 형성될 수 있다. 이때 생성된 MgO 상 분율이 증가하면, MgB₂ 초전도 상 분율이 작아지고, 이에 따라 초전도 특성이 저하될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 B 분말만의 습식 밀링을 행하였다. 밀링은 planetary ball milling (Pulverisette 5, Fritsch) 기를 사용하였다. As-received B 분말을 톨루엔에 넣어 200 rpm의 planetary disc 속도로 2시간 동안 직경이 2 mm인 지르코니아 볼을 이용하여 습식 밀링하였다. 이후 100°C 진공 오븐에서 24시간 동안 건조하였다.

밀링된 B 분말과 밀링되지 않은 B 분말은 C 소스인 글리세린을 사용하여 40도에서 혼합되었고 200°C, 20시간 동안 진공오븐에서 건조되었다. As-received B, glycerin-added B, 2 h milled B, 그리고 2 h milled + glycerin-added B 분말이 준비되었고 Mg:B=1:2의 비로 Mg 분말과 혼합하였다. *In situ* MgB₂ 분말은 15 mm 직경, 1.2 mm 두께로 펠렛을 제조후 산소 getter 용 Ti tube에 넣어 900°C, 30분간 고순도 Ar 분위기 하에서 열처리 되었다. 이때 승온속도는 5 °C/min 이었다. 이러한 4 종류의 B 분말로 제조된 MgB₂ 벌크를 순서대로 "샘플 1, 2, 3, 4" 로 각각 정의하였다.

한편, as-received B 분말과 2시간 밀링된 B 분말을 사용하여 Mg과 혼합된 분말은 8 mm의 외경, 6 mm의 내경을 갖는 Fe tube에 충전시킨 후, PIT 공정으로 1.58 mm까지 인발하였다. B 분말의 밀링 여부에 따라 인발된 MgB₂/Fe 선재를 적당 길이로 절단 후 산화 방지를 위해 Ti 튜브 내에 봉하여 고순도 Ar 가스 분위기에서 열처리를 행하였다. 5 °C/min의 속도로 승온하여 550°C에서 10, 20, 40, 80시간, 600°C에서 10, 20, 40시간 동안 각각 저온 열처리 하였으며, 일반 고온 열처리와 비교하기 위한 샘플에 대해서는 800°C, 30분에서 열처리 하였다.

상 분석으로는 XRD를 사용하여 MgB₂ 상 생성 분율 및 피크의 반가폭 (full width at half maximum, FWHM)을 측

정하였다. 열처리 조건에 따른 MgB₂ 표면 형상을 관찰하기 위하여 FE-SEM을 이용하였다. MgB₂ 초전도체의 J_c 는 magnetic property measurement system (MPMS, 7 T, Quantum Design) 또는 physical property measurement system (PPMS, 9 T, Quantum Design)을 사용하여 측정되었다. 이때 J_c 는 선재의 길이 방향에 평행한 자기장을 가하여 5 K 및 20 K에서 측정되었다. Bean critical model을 사용하여 자기 루프의 폭 (ΔM) 으로부터 J_c 를 계산하였다. 통전임계온도, 상부 임계 자기장 (upper critical field, H_{c2}) 및 비가역 자기장 (irreversibility field, H_{irr})은 5 - 300 K의 범위에서 4 단자법에 의한 PPMS를 사용하여 자기-저항 (magneto-resistivity) 곡선을 통해 측정되었다. 통전임계온도는 0 T에서 저항 천이의 중간 지점으로 정의되었다. 상부임계자기장 및 비가역자기장 값은 다양한 자기장에서의 저항 (R) 대 온도 (T)의 곡선으로부터 정상 상태 저항값의 90% 및 10% 값으로 각각 정의되었다.

3. 밀링된 B 분말을 사용한 탄소 도핑된 MgB₂ 벌크 제조 및 특성

그림 1은 네 가지 종류의 B 분말을 사용하여 900°C, 30분간 열처리된 MgB₂ 샘플들의 XRD 패턴을 보여준다. 글리세린 첨가로 *a-b* in-plane과 관계된 MgB₂ (110) 피크는 높은 2-theta로 이동하는 것을 볼 수 있다. 이는 MgB₂내 B 자리의 C 치환이 일어나는 것을 의미한다. 반면에 (002) 피크는 거의 변화가 없음을 볼 수 있다. "샘플 4"의 in-plane 피크 이동은 "샘플 2"보다 훨씬 큼을 볼 수 있는데 이는 B 분말의 밀링에 의하여 더 넓은 표면적에 의한 활발한 C 함유 및 치환이 일어나는데 기인한다. BET 결과로부터, B 분말의 2시간 밀링 후 표면적이 16.1 m²g⁻¹에서 22.5 m²g⁻¹로 증가하였다. 입자 크기의 감소는 MgB₂내 더 작은 결정립과 반응성 향상을 유도할 수 있고 이는 J_c 의 향상을 기대할 수 있다. 반면 "샘플 3"의 단지 기계적 밀링에 의한 피크이동은 미약하였다.

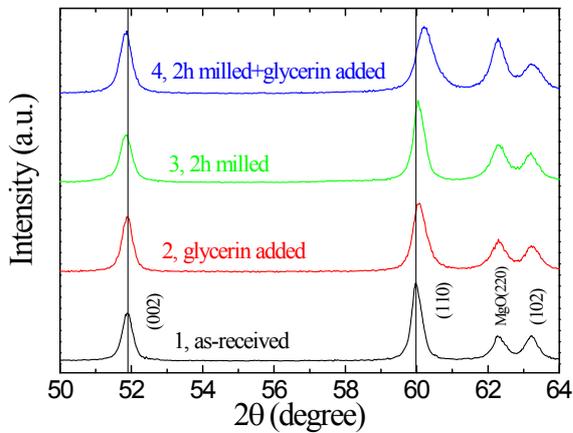


그림 1. 여러가지 처리된 B 분말로 900°C에서 30분간 열처리된 MgB₂ 펠렛의 XRD 패턴 [9].

그림 1에서 보듯이 밀링과 글리세린 첨가에 따라 MgO 분율 [MgO(220)/MgB₂(102) 강도비]이 증가하였다. 2시간 밀링된 B 분말의 톨루엔 건조 후, 반결정성 B 분말은 비정질화되고 표면적이 증가하게 된다. 밀링된 B 분말과 공기중 산소와의 반응성이 높아져 B 분말 표면에 산화가 일어날 수 있다. 또한 밀링된 B 분말에 글리세린 첨가는 글리세린내 산소의 존재로 인하여 산화에 영향을 줄 수 있다고 사료된다. B₂O₃의 산소 원자는 MgB₂상 생성 열처리 과정 중 Mg와 반응하여 MgO를 생성시킨다.

밀링 또는 글리세린 첨가된 경우, MgB₂ 피크의 반가폭 (full width at half maximum, FWHM)은 그림 1에서 보듯이 모두 증가하였다. 이것은 결정립 크기의 감소와 결정성 악화로 해석할 수 있다. x-ray 피크 broadening은 crystallite 크기 (역비례관계)와 격자 스트레인에 의해 야기된다. 반가폭 데이터로부터 Williamson-Hall 분석을 이용하여 결정립 크기와 microstrain을 계산하였다. 계산된 microstrain 값으로부터 lattice disorder는 글리세린 처리에 의하여 쉽게 일어남을 확인할 수 있다. 즉 “샘플 2”의 microstrain 값이 “샘플 1”에 비하여 크다는 것을 알 수 있다.

스트레인은 원소 치환, 특히 C 함유 또는 원자의 결핍에 의한 격자왜곡 (lattice distortion)에 기인하는 중요한 요소이다.

밀링에 의하여 결정성의 감소와 Mg 결핍등을 야기시킬 수 있으며 이는 “샘플 3”에서 a-축 변화와 J_c의 향상을 가져올 수 있다. 2시간 밀링을 통하여 입자 크기의 감소가 일어났으며 계산된 결정립 크기는 171 nm (샘플 1)에서 86 nm (샘플 3)로 감소하였다. 반면 microstrain은 약간 감소하였다. “샘플 2”의 계산된 결정립 크기는 C 치환으로 인하여 118 nm로 감소되었고 “샘플 4”의 경우 밀링과 C 치환의 동시 효과로 45 nm까지 감소하였다. 이러한 경향은 FE-SEM 분석 결과와 잘 일치하였다. “샘플 3”의 결정립이 “샘플 2”에 비하여 더 균일한 것을 볼 수 있다. 이는 볼 밀링으로 인한 균일성 향상과 더 작은 결정립 생성에 영향을 주는 것으로 사료된다. 즉, 기계적 볼 밀링은 결정립 정련 (grain refinement)에 효과적인 공정으로 판단된다.

그림 2는 여러 B 분말에 따른 MgB₂ 샘플의 천이 임계온도 변화를 보여주고 있다. As-received B를 사용한 경우, 37.4 K의 T_c를 보여 주었다. 밀링 또는 글리세린 첨가에 따라 T_c의 감소가 일어남을 볼 수 있다. 이는 반가폭 증가에서 언급한 결정성의 악화로 설명할 수 있다. “샘플 4”의 경우 T_c는 밀링된 B 분말의 더 활발한 C 치환으로 인하여 35.1 K으로 줄어들었다.

그림 3은 여러 B 분말을 사용하여 900°C, 30분간 열처리한 MgB₂ 샘플의 자기 임계전류밀도 특성을 보여준다.

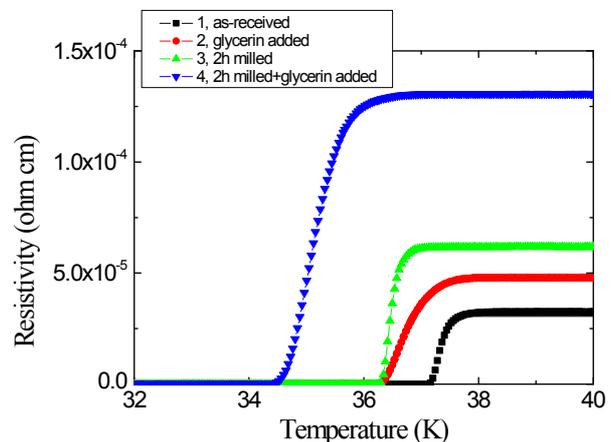


그림 2. 여러 B 분말로 제조된 MgB₂ 샘플의 비저항-온도 그래프(천이 임계온도) [9].

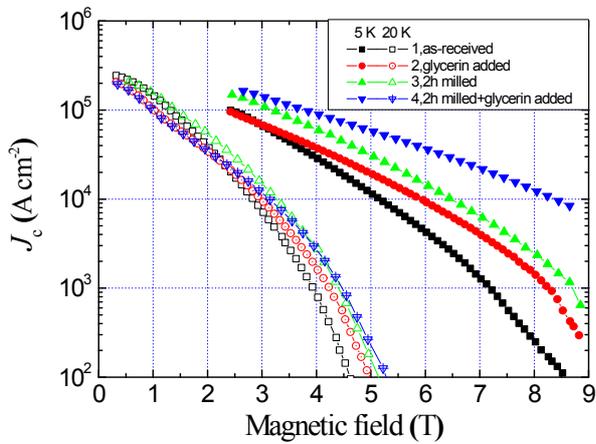


그림 3. 여러 B 분말로 900°C에서 30 분간 열처리된 MgB₂ 펠렛의 5 K 및 20 K에서 임계전류밀도의 자기장 의존성 [9].

단지 밀링된 B 분말을 사용한 “샘플 3”의 경우, 결정립계의 증가로 J_c 는 증가하였다. 반면, 글리세린 첨가된 샘플은 B 자리에 치환된 C에 의한 격자왜곡 또는 스트레인을 갖게 된다. “샘플 4”의 경우 disorder의 증가와 결정립 크기 감소의 동시 효과로 인하여 5 K, 8 T에서 $1.27 \times 10^4 \text{ Acm}^{-2}$ 의 높은 J_c 를 보이게 된다. 이는 아무 처리되지 않은 순수 B 분말을 사용한 MgB₂ 샘플에 비교해 보았을 때 효과적인 J_c 증가를 보여주었다.

4. 밀링된 B 분말을 사용하여 저온 고상 반응된 MgB₂ 선재 제조 및 특성

그림 4는 un-milled B 분말과 2시간 밀링된 B 분말을 이용하여 제조된 MgB₂ 초전도 선재의 X-선 회절 패턴을 나타낸 것으로, 그림 4(a)는 550°C, 10시간, 4(b)는 600°C, 10시간 4(c)는 800°C, 30분 열처리된 시편에 대한 회절 패턴을 보여주고 있다. Mg의 녹는점 미만의 온도에서 열처리 하였을 경우, 미반응된 Mg 피크가 검출된 반면, 800°C Mg의 녹는점 이상의 온도에서 열처리 하였을 경우, 미반응된 Mg 피크는 검출되지 않았다. 이는 고상 (B)-액상 (Mg) 공정에 비해 저온에서 MgB₂의 상 형성 고상 확산 반응의 동력학이 상당히 느리기 때문이다. 한편, 그림 4에 도시된 un-

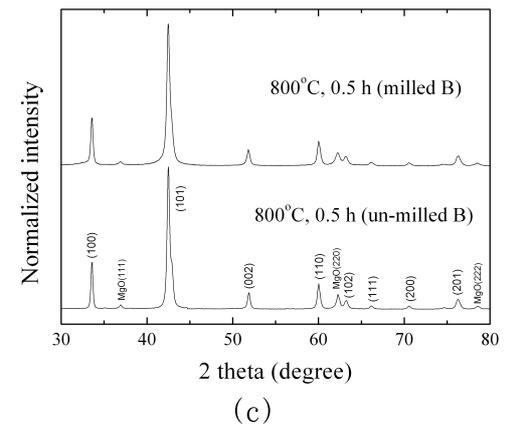
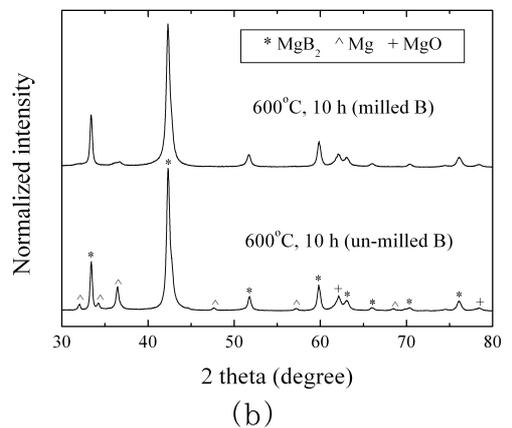
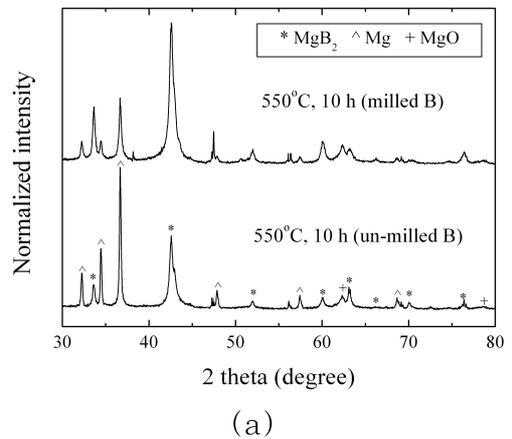


그림 4. B 분말의 밀링여부 및 열처리 조건에 따른 MgB₂의 XRD 패턴; (a) 550°C, 10 h (b) 600°C, 10 h (c) 800°C, 0.5 h [10].

milled & milled B 분말을 사용한 MgB₂의 X-선 회절 패턴 모두에서 작은 양의 MgO 상이 주요 불순물 상으로서 유사한 수준으로 존재하였다. 밀링된 B 분말을 사용한 경우가 밀링되지 않은 B 분말을 사용한

경우와 비교시 상대적으로 미반응된 Mg가 적게 잔존하고 있었다. 즉, MgB_2 상형성의 동력학은 밀링된 B 분말을 사용한 샘플이 밀링되지 않은 B 분말을 사용한 샘플들 보다 큼을 알 수 있다. 밀링된 B 분말을 사용하여 $600^\circ C$ 에서 10시간 동안 열처리된 샘플이 $800^\circ C$ 샘플과 비슷하게 미반응된 Mg를 적게 함유하고 향상된 MgB_2 상을 갖는다는 것을 알 수 있었다. $800^\circ C$ 에서의 고상-액상 반응의 경우, 피크 형상 및 MgB_2 상의 양은 B 분말의 밀링 여부와 관계없이 상생성이 잘 이루어졌다.

표 1에 기재된 바와 같이, 동일 열처리 조건 하에서, B 분말의 밀링이 수행된 경우가 밀링이 수행되지 않은 경우보다 MgB_2 피크들의 반가폭 값이 더 큼을 알 수 있었다. 반가폭 값의 증가는 밀링에 의한 MgB_2 결정립 크기의 감소 및 결정성의 저하에 기인한다. 반가폭 값들을 이용하여 Williamson-Hall 분석을 행하였고 표 1에 기재된 결정립 크기를 계산, 예측하였다. 동일 온도 조건에서, 밀링된 B 분말을 이용한 MgB_2 의 계산된 결정립 크기가 더 작았다. 즉, 결정립계 밀도는 증가함을 알 수 있었다. 아울러, B 분말을 밀링하지 않은 경우에서, 열처리 온도가 상승함에 따라 계산된 결정립 크기는 증가하였다. 이와 마찬가지로 B 분말을 밀링한 경우에서도, 열처리 온도가 상승함에 따라 계산된 결정립 크기는 증가하였다.

그림 5는 각 열처리 조건 및 B 분말의 밀링 여부에 따른 MgB_2 초전도 상 분율을 나타낸 것이다. $500^\circ C$ 에서 열처리된 경우 un-milled & milled B 분말을 사용한 샘플들 모두에서 형성된 MgB_2 상 분율은 80시간 동안 열처리되었음에도 불구하고 작았다. $550^\circ C$ 에서는 밀링 여부와 상관없이 열처리 시간이 증가함에 따라 MgB_2 상 분율은 증가하였다. 또한, $600^\circ C$ 에서도 비슷한 경향을 보였으나 밀링된 B 분말을 이용하여 $600^\circ C$, 10-40 시간 열처리된 MgB_2 상 분율은 약 90%의 높고 비슷한 값을 나타냈다. 이는 고상-액상간 고온 반응인 $800^\circ C$ 에서 30분 동안 열처리된 샘플과 유사한 수준임을 알 수 있다. 또한, 동일 열처리 온도 및 시간 하에서, 밀링된 B 분말을 사용한

열처리 조건		(100) 반가폭 (deg.)	(002) 반가폭 (deg.)	계산된 결정립 크기 (nm)	임계 온도 (K)	ρ_{300K} ($\mu\Omega \cdot cm$)	ρ_{40K} ($\mu\Omega \cdot cm$)	잔류 비저항비 (RRR)
550°C, 40 h	un-milled B	0.343	0.36	73	36.4	110	60.4	1.82
	milled B	0.424	0.48	47	36.1	151	97.6	1.55
600°C, 10 h	un-milled B	0.36	0.382	102	36.4	100	56.2	1.78
	milled B	0.41	0.523	53	35.9	142	91.2	1.56
800°C, 0.5 h	un-milled B	0.327	0.302	143	36.7	91.5	48.2	1.9
	milled B	0.38	0.342	70	36.5	96.8	55	1.76

표 1. B 분말의 밀링여부 및 여러 열처리 조건에서 제조된 MgB_2 선재에 대한 측정 및 계산 데이터 [10].

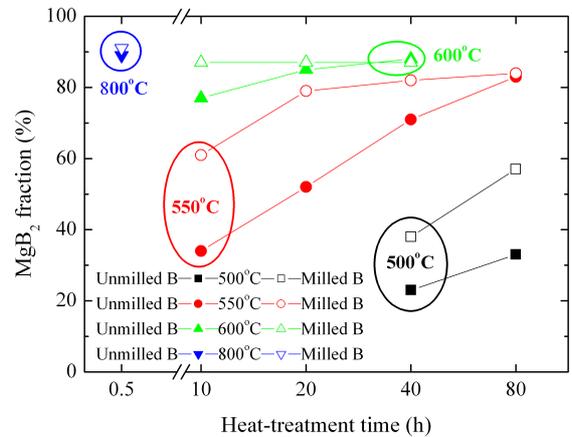


그림 5. B 분말 밀링 여부 및 여러 열처리 조건에 따른 MgB_2 초전도 상 분율.

경우가 밀링되지 않은 B 분말을 사용한 경우보다 MgB_2 초전도 상 생성률이 큼을 알 수 있었다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 밀링 후 B 분말의 반응성이 향상되었기 때문이라 판단된다.

그림 6은 저온 및 고온 열처리된 밀링 여부에 따른 초전도 선재의 self-field 하에서 온도-저항 천이를 나타낸 것이다. 그림 6 및 표 1을 참조하면, $800^\circ C$ 고온 열처리된 시편은 결정성이 향상되기 때문에, 높은 임계 온도를 나타낸 반면, 저온 열처리된 시편은 상대적으로 낮은 임계 온도 천이를 나타냈다. 이때, 밀링된 샘플의 임계 온도 값들은 밀링

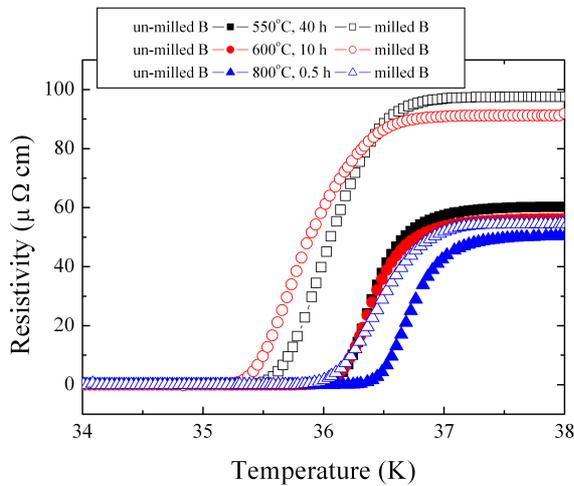


그림 6. B 분말 밀링 여부와 여러 열처리 조건에서 제조된 MgB₂ 선재의 저항-온도 변화 [10].

되지 않은 샘플의 임계온도 값보다 낮았다. 반면 동일 열처리 조건 하에서, 밀링된 샘플의 비저항 (ρ) 값이 밀링하지 않은 샘플의 비저항 값보다 높았다. 이는 밀링 과정에 의해 결정성이 악화되었을 뿐만 아니라 결정립계 밀도가 증가하였기 때문이라 할 수 있으며 임계온도가 상대적으로 낮은 이유이다.

그림 7은 저온 및 고온 열처리된 밀링 여부에 따른 MgB₂ 초전도 선재의 H_{c2} 및 H_{irr} 를 나타낸 것이다. 동일 열처리 조건 하에서, H_{c2} 및 H_{irr} 모두 밀링된 B 분말을 사용한 경우가 밀링되지 않은 B 분말을 사용한 경우보다 높았다. 이는 표 1에 기재된 잔류 비저항 비 (residual resistivity ratio: RRR)의 감소가 나타내듯이, 밀링 과정에 의하여 결정성 저하 및 결함들이 생성되며 작은 결정립 크기와 격자 무질서의 증가로 인한 결정립계 산란 (grain boundary scattering)의 증가로 설명할 수 있다. 또한 저온 고상 반응 또한 느린 결정립 성장으로 인하여 임계특성을 향상시킬 수 있다. 그림에서와 같이 밀링된 샘플의 600°C, 10시간 저온 열처리시 가장 좋은 임계 물성을 보여주었다.

그림 8은 밀링 여부 및 저온 또는 고온 열처리된 샘플의 J_c 를 비교하였다. 밀링된 B 분말을 사용한 경우, 600°C, 10시간 열처리된 샘플이 전 자기장 구간에서 가장 높은 전류 특성을 보였으며 800°C 고온 열처리된 샘플과 비교시 MgB₂ 분율이 유사함에도 불

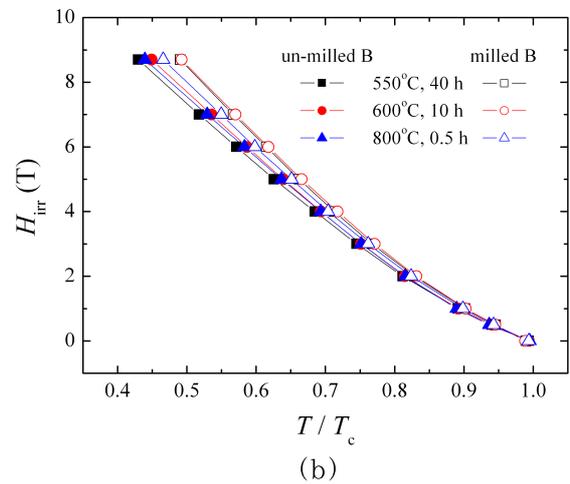
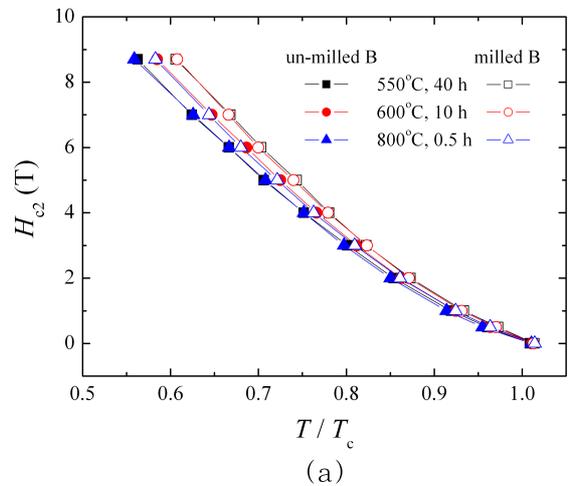


그림 7. B 분말의 밀링 여부 및 여러 열처리 조건에서 제조된 MgB₂ 선재에 대한 (a) H_{c2} 및 (b) H_{irr} 의 온도 의존성 [10].

구하고, 결정립 크기는 저온 열처리된 샘플에서 더 작아 J_c 값이 보다 높아질 수 있었다. 저온 고상 반응은 MgB₂ 내 높은 결정립계 밀도를 갖고 이로 인하여 증가된 전자 산란 결함이 H_{c2} 와 J_c 의 증가와 같은 플럭스 피닝 성질을 향상시킨다.

5. 요약

B 분말을 밀링과 글리세린 첨가의 결합된 공정을 이용하여 제조된 MgB₂ 벌크 시편은 결정성의 악화로 인하여 반가폭은 크고 임계온도는 낮았다. 반면 임계전류밀도값은 모든 자장하에서 크게 향상되었다. 이는 각

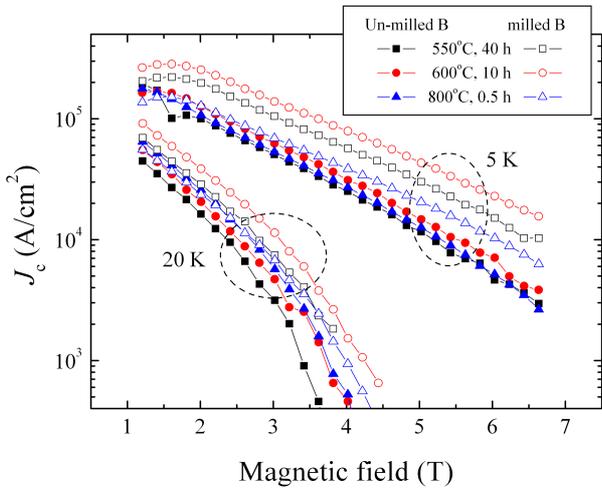


그림 8. B 분말의 밀링 여부와 저온 및 고온 열처리 조건에서 제조된 MgB_2/Fe 선재에 대한 5 K와 20 K에서 J_c 의 자기장 의존성 [10].

각 밀링된 B 분말의 작은 입자 크기와 넓은 표면적으로 인한 더 작은 결정립과 활발한 C 함유에 기인한다. 높은 결정립계 밀도와 활발한 C 치환으로 인한 증가된 전자 산란 결합은 플럭스 피닝 성질을 향상시킬 수 있었다.

또한 밀링된 B 분말을 사용하여 *in situ* PIT 법으로 MgB_2 선재를 제조하였고 600°C 이하의 저온에서 열처리를 행하였다. 이로부터 MgB_2 의 결정립 크기가 작게 되어 임계물성이 향상됨을 알 수 있었다. 즉, 밀링된 B 분말의 사용과 Mg의 녹는점보다 낮은 온도에서 열처리되는 고상-고상 반응은 MgB_2 의 결정립계 밀도를 높이고 결정성을 저하시켜 H_{c2} 및 H_{irr} 을 향상시킬 수 있었으며, 아울러 J_c 를 증가시킬 수 있었다. 이러한 저온 열처리 공정을 이용하면 임계 특성의 향상 뿐만 아니라 선재 제조시 sheath 선택의 폭을 넓힐 수 있으리라 예상된다. 현재 탄소가 도핑된 선재에서도 저온 고상 반응으로 탄소 치환 효과 뿐만 아니라 결정립 크기 효과를 얻을 수 있는지에 관한 연구를 수행중이다.

참고문헌

[1] H. Kumakura, H. Kitaguchi, A.

Matsumoto, H. Hatakeyama, "Upper critical fields of powder-in-tube-processed MgB_2/Fe tape conductors", *Appl. Phys. Lett.* 84, 3669 (2004).

[2] Z. Gao, Y. Ma, X. Zhang, D. Wang, Z. Yu, H. Yang, H. Wen, E. Mossang, "Enhancement of the critical current density and the irreversibility field in maleic anhydride doped MgB_2 based tapes", *J. Appl. Phys.* 102, 013914 (2007).

[3] J.H. Kim, X. Xu, M.S.A. Hossain, D.Q. Shi, Y. Zhao, X.L. Wang, S.X. Dou, S. Choi, T. Kiyoshi, "Influence of disorder on the in-field J_c of MgB_2 wires using highly active pyrene", *Appl. Phys. Lett.* 92, 042506 (2008).

[4] Y.-J. Kim, B.-H. Jun, K.S. Tan, B.G. Kim, J.M. Sohn, C.-J. Kim, "Effect of glycerin addition on the superconducting properties of MgB_2 ", *Physica C* 468, 1372 (2008).

[5] K.S. Tan, S.K. Chen, B.-H. Jun, C.-J. Kim, "Enhancement in critical current density and irreversibility field of bulk MgB_2 by C and $CaCO_3$ co-addition", *Supercond. Sci. Technol.* 21, 105013 (2008).

[6] P. Mikheenko, E. Martínez, A. Bevan, J.S. Abell, J.L. MacManus-Driscoll, "Grain boundaries and pinning in bulk MgB_2 ", *Supercond. Sci. Technol.* 20, S264 (2007).

[7] A. Yamamoto, J. Shimoyama, S. Ueda, Y. Katsura, S. Horii, K. Kishio, "Improved critical current properties observed in MgB_2 bulks synthesized by low-temperature solid-state reaction", *Supercond. Sci. Technol.* 18, 116 (2005).

[8] J.H. Lee, S.Y. Shin, C.-J. Kim,

H.-W. Park, "Superconducting properties of MgB_2 prepared from attrition ball-milled boron powder", J. Alloys Compd. 476, 919 (2009).

[9] B.-H. Jun, Y.-J. Kim, K. S. Tan, C.-J. Kim, "Effective carbon incorporation in MgB_2 by combining mechanical milling and the glycerin treatment of boron powder", Supercond. Sci. Technol. 21, 105006 (2008).

[10] B.-H. Jun, N.-K. Kim, K.S. Tan, C.-J. Kim, "Enhanced critical current properties of *in situ* processed MgB_2 wires using milled boron powder and low temperature solid-state reaction", J. Alloys Compd. 492, 446 (2010).



박순동(朴淳東)

1955년 5월 25일생, 1986년 대전대학교 화학공학과 학사, 1996년 전북대학교 화학공학과 석사, 현재 한국원자력연구원 책임연구원.



김찬중(金讚中)

1958년 10월 26일생, 1983년 성균관대학교 금속공학과 학사, 1986년 한국과학기술원 재료공학과 석사, 1990년 한국과학기술원 재료공학과 박사, 1992-1993년 미국 Notre Dame 대학 전기공학과 (Post-Doc.), 현재 한국원자력연구원 영년직 책임연구원, 한국초전도학회 학술위원장.

저자이력



전병혁(全炳赫)

1970년 10월 17일생, 1993년 고려대학교 재료공학과 학사, 1995년 한국과학기술원 전자재료공학과 석사, 1998년 한국과학기술원 재료공학과 박사, 1998-1999년 미국 UC at Santa Barbara 재료과 (Post-Doc.), 2000-2001년 일본 이화학연구소, RIKEN Semiconductors Lab. (Post-Doc.), 2001년-현재 한국원자력연구원 책임연구원.