

# The magnetic relaxation of MgB<sub>2</sub> powder

Jeong Hun Yang, Jong Su You, Soo Kyung Lee, and Kyu Jeong Song\*

Div. of Science Education and Institute of Sci. Education,  
Jeonbuk National University, Jeonju, 54896 Korea

(Received 28 August 2023; revised or reviewed 28 September 2023; accepted 29 September 2023)

## Abstract

Magnetic relaxation properties of pure MgB<sub>2</sub> powder samples and diluted water-treated MgB<sub>2</sub> powder samples were investigated. The magnetic field  $H$ -dependence,  $m(H)$ , and the time  $t$ -dependence,  $m(t)$ , of the magnetic moment  $m$  were measured and analyzed using the PPMS-VSM magnetometer equipment, respectively. The  $m(t)$  reduction rates of pure MgB<sub>2</sub> powder samples and diluted water-treated MgB<sub>2</sub> powder samples decreased to about 0.7 ~ 1.8% and 0.6 ~ 1.0% for about 7200 s, respectively, at temperature  $T = 15$  K. The magnetic relaxation properties of the two types of MgB<sub>2</sub> powders were analyzed by calculating the magnetic relaxation rate  $S = -d\ln(M_{int})/d\ln(t)$  values according to Anderson-Kim theory. The magnetic relaxation ratio  $S$  values of the two types of MgB<sub>2</sub> powder samples were almost similar. As a result of the quantum creep effect, the constant magnetic relaxation rate  $S$  characteristic was confirmed at a temperature range of  $T = 10$  K or less.

**Keywords:** MgB<sub>2</sub> powder, magnetic moment, magnetic relaxation rate, flux creep, quantum creep effect

## 1. 서 론

2001년도 발견된 MgB<sub>2</sub> 초전도체는 현재까지 다양한 초전도 특성들을 나타내고 있다[1-3]. MgB<sub>2</sub>는 금속성 초전도체로서 높은 임계전이온도  $T_c = \sim 39$  K 특성, 두-밴드 (2D- $\sigma$  및 3D- $\pi$ ) 초전도 특성, 입계 경계면을 가로지르는 입계들 사이의 강한연결(strong-link) 전류흐름 특성, 및 높은 비등방적 초전도 특성 등을 나타내고 있다[4-7]. 특히, 물질 내에 인위적인 자속고정 결함들(artificial flux pinning defects)을 도입으로 MgB<sub>2</sub>의 자기적 특성들이 현저하게 향상하는 특성과 물질 내에 비자성 불순물들(nonmagnetic impurities) 도핑(doping)으로 증가되는 무질서도(disorder)에 의한 MgB<sub>2</sub>의 상부임계자기장(upper critical field)  $H_{c2}$  값이 획기적으로 향상하는 특성들을 보여주고 있다[8-11]. 이와 같은 기본적인 초전도 특성들의 향상으로 MgB<sub>2</sub> 초전도체는 의료용 MRI 마그넷 개발 등 산업적 응용 가능성이 커지고 있으나,  $H = 2$  T 이상의 높은 자기장과  $T = 20$  K 이상의 높은 온도에서 MgB<sub>2</sub>의 전류흐름 성능 등이 급격히 저하되는 단점으로 인하여 MgB<sub>2</sub> 상용화가 활발하게 이루어지지 않고 있는 실정이다. 따라서 MgB<sub>2</sub> 초전도체의 상용화를 위해서는 지속적으로 기본적인 MgB<sub>2</sub> 초전도 물리량들의 특성향상 연구와 더불어 MgB<sub>2</sub> 초전도체의 세밀한 자기적 특성 연구들이 병행되어야 한다. 일반적으로 고온초전도체들은 입계 사이의 약한 결합(weak-coupling)과 거대한-자속-저속거동(giant flux creep) 특성들을 가지고 있으나[12], 이와 반대로 MgB<sub>2</sub> 초전도체는 입계 사이의 강한 결합(strong-coupling)과 작은-자속-저속거동(small flux creep) 특성들을 가지고 있다[6, 13-14]. 자속 고정 결함들을 도입한 고온초전도체들의 거대한-자속-저속거동에 대한 자기완화(magnetic relaxation)

연구들이 많이 진행되어 있으나[12], MgB<sub>2</sub> 초전도체의 경우에는 오직 MgB<sub>2</sub> 박막(thin film) 시료에 국한하여 자기완화 연구가 일부 진행되었다[13-14]. 따라서 MgB<sub>2</sub> 초전도체의 전체적인 자기적 특성들을 이해하기 위해서는 MgB<sub>2</sub> 분말(powder)들에 대한 추가적인 자기완화 연구들이 필요하다.

본 논문은 순수한 MgB<sub>2</sub> 초전도 분말 시료와 증류수-에탄올 혼합물 처리된 MgB<sub>2</sub> 초전도 분말 시료들의 자기완화 연구들을 수행하였다. 물성특성측정시스템(physical property measurement system, PPMS) 마그네토미터(magnetometer) 장비를 이용하여 일정한 자기장  $H$ 와 온도  $T$ 에서 준비된 MgB<sub>2</sub> 분말 시료들의 자기모멘트의 시간의존성  $m(t)$  변화량을 측정하여 분석하였다. 측정된  $m(t)$  값들을 이용하여 Anderson-Kim 이론[15]에 의한 자기완화비율(magnetic relaxation rate)  $S$  값들을 구하였다. 순수한 MgB<sub>2</sub> 초전도 분말 시료와 증류수-에탄올 혼합물 처리된 MgB<sub>2</sub> 초전도 분말 시료들의 자기완화비율  $S$  값들은 서로 큰 차이가 없었으며, MgB<sub>2</sub> 박막 시료의 자기완화비율  $S$  값들 분석결과[14]와 유사하게,  $T = 10$  K 이하의 낮은 온도 영역에서 일정한 자기완화비율  $S$  값들의 특성을 보이는 양자-저속거동-효과(quantum creep effect)[16] 특성을 보였다.

## 2. 실험 과정

자기완화 연구를 위해 두 종류의 MgB<sub>2</sub> 분말 시료들을 준비하였으며, 하나는 Alfar Aesar 회사에서 구입한 상용화된 순수한 MgB<sub>2</sub> 분말(pure MgB<sub>2</sub> powder) 시료이고, 다른 하나는 증류수-에탄올 혼합물 처리된 MgB<sub>2</sub> 초전도 분말(diluted water-treated MgB<sub>2</sub> powder) 시료이다. 이전 논문에서 기술하였듯이 상용화된 MgB<sub>2</sub> 분말 시료는 XRD 분석에서 불순물상(phase)이 거의 없는 순수한 MgB<sub>2</sub> 분말 시료이고, 증류수-

\* Corresponding author: songkj@jbnu.ac.kr

에탄올 혼합물 처리된  $MgB_2$  초전도 분말 시료는 증류수 4 ml와 에탄올 16 ml 혼합물 안에 3일간 유지한 후 꺼내어 70 °C 온 열판위에서 습기를 완전히 제거하여 얻은  $MgB_2$  초전도 분말 시료이다[17–18]. 실험에 사용한 순수한  $MgB_2$  분말 시료의 질량은 31.2 mg이고, 증류수-에탄올 혼합물 처리된  $MgB_2$  초전도 분말 시료의 질량은 26.1 mg이다.

미국 Quantum Design 회사의 물성특성측정시스템 PPMS-VSM 장치를 이용하여  $T = 5$  K 부터  $T = 45$  K 까지 온도영역에서 준비된 두 종류  $MgB_2$  분말들의 각 온도별 자기모멘트  $m$ 의 자기장  $H$  세기 의존성  $m(H)$ 을 측정하였다. 측정된 자기모멘트  $m$ 의 단위는  $[emu = G \cdot cm^3]$ 이고, 데이터 분석할 때 사용한 자기모멘트  $m$ 의 단위는 측정값을 시료의 질량으로 나눈 단위질량당 자기모멘트  $m$ 의 단위로서  $[emu/g]$ 이다. 한편,  $m(H)$  측정에 사용된 PPMS-VSM 장치를 동일하게 이용하여  $MgB_2$  분말들의 자기완화 측정들을 수행하였다. 이전 논문에서 기술하였듯이[14], 자기완화 측정 방법은 다음과 같이 순서대로 기술할 수 있다. 첫 번째, 자기장을 인가할 때, 자기장이 증가하는 영역에서는 목표 지정된 자기장 값보다 더 높은 자기장에 도달하지 못하도록 하고, 자기장이 감소하는 영역에서는 목표 지정된 자기장 값보다 더 낮은 자기장에 도달하지 못하도록 하는 No-overshoot 모드를 선택하여 사용하였다. 두 번째, 주어진 온도  $T$ 에서 전체 자기 이력곡선(full magnetic hysteresis loop)을 zfc(zero field cooling) 조건에서 측정하였다. 세 번째, 위의 두 번째를 실행함으로써 시료 내에 자속을 완전히 통과시킨 후, 자기장이 증가하는 영역에서 지정된 자기장  $H_f$  세기를 인가하였다. 네 번째, 자기장이 증가하는 영역에서 인가한 지정된 자기장  $H_f$  세기를 일정하게 유지한 채로 자기모멘트 감소율  $m(t)$  값들을 측정하였다. 여기서 시간의 함수로서  $m(t)$  값들은  $t \sim 100$  s 시간 간격으로  $t \sim 7200$  s 까지 측정하였다. 다섯 번째, 위의 네 번째를 수행한 후, 자기장  $H = 7$  T 까지 충분히 큰 자기장을 인가하였다. 그리고 자기장이 감소하는 영역에서 인가한 지정된 자기장  $H_f$  세기를 일정하게 유지한 채로 자기모멘트 감소율  $m(t)$  값들을 위와 동일하게 측정하였다. 이와 같은 방법으로 지정된 온도들( $T = 5$  K  $\sim$  35 K)에서와 지정된 자기장 세기들( $H_f = 1000$  G  $\sim$  10000 G)에서 반복적으로 자기모멘트 감소율  $m(t)$  값들을 각각 측정하였다.

한편, 비가역 자기자화도(irreversible magnetization)  $M_{irr}(H)$  값들을 자기모멘트  $m$ 의 자기장  $H$  세기 의존성  $m(H)$  측정값들로부터 구하였다. 비가역 자기자화도  $M_{irr}(H)$ 는  $M_{irr}(H) = |M_{mea} - M_{avg}|$  이고,  $M_{avg} = [M(H_{dec}) - M(H_{inc})]/2$  이며,  $M(H_{inc})$ 와  $M(H_{dec})$ 는  $M(t)$  측정값으로부터 각각 자기장이 증가하는 영역과 감소하는 영역에서 자기자화도 값들이다[14]. Bean 임계상태 모델[19]을 이용하여  $J_c(H, T, t) \propto M_{irr}(H, T, t)$  데이터들을 얻을 수 있고, 이로 부터 자기완화비율(magnetic relaxation rate)  $S = -dn(M_{irr})/dn(t)$ 을 구하여 분석하였다[15].

### 3. 결과 및 논의

순수한  $MgB_2$  분말(pure  $MgB_2$  powder) 시료와 증류수-에탄올 혼합물 처리된  $MgB_2$  분말(diluted water-treated  $MgB_2$  powder) 시료들에 대해, 물성특성측정시스템인 PPMS-VSM 장비를 이용하여,  $T = 5$  K부터  $T = 45$  K까지 온도영역에서

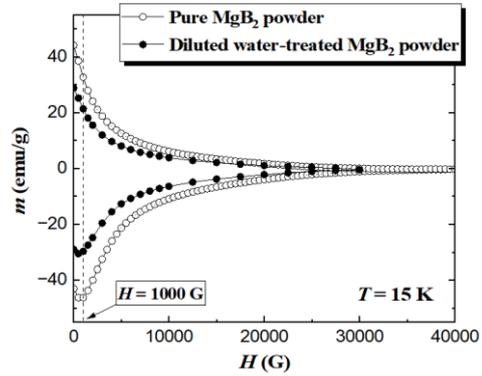


Fig. 1. The The magnetic moment  $m$  versus magnetic field  $H$  of the pure and the diluted water-treated  $MgB_2$  powders, at  $T = 15$  K.

자기모멘트  $m$ 의 자기장  $H$  의존성인  $m(H)$  그래프들을 측정하였다. 모든  $m(H)$  그래프들은 임계전이온도  $T_c(\sim 39$  K) 이상의 온도에서 측정된 백-그라운드  $m(H)$  그래프들을 이용하여 보정하였다. Fig. 1은 특정온도  $T = 15$  K에서 두 종류의  $MgB_2$  초전도 분말 시료들에 대한 자기모멘트  $m$ (unit: emu/g)과 자기장  $H$ 의 의존성 관계인  $m(H)$  그래프들을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 알 수 있듯이, 자기장  $H$ 의 전체 영역에서 순수한  $MgB_2$  분말 시료의 자기모멘트  $m$  값들이 증류수-에탄올 혼합물 처리된  $MgB_2$  분말 시료의 자기모멘트  $m$  값들보다 상당히 큼을 알 수 있다. 일반적으로 에탄올로 처리된  $MgB_2$  분말들의 초전도성은 감소됨이 없이 일정하게 유지되지만, 희석된 물로 처리된  $MgB_2$  분말들의 초전도성은 물의 희석 정도에 따라 급격하게 저하됨을 이전 논문에서 발표하였다[17–18]. Fig. 1의 증류수-에탄올 혼합물 처리된  $MgB_2$  분말 시료는 증류수 4 ml와 에탄올 16 ml 혼합물로 처리하여 얻은  $MgB_2$  초전도 분말 시료이다.

일반적으로 초전도 내에 자속(magnetic flux or vortex)들이 열에너지 등을 받으면, 기존 고정위치에서 다른 고정위치로 점프하며 움직이는데, 이러한 움직임의 현상들을 “자속-저속거동(magnetic flux creep)” 이라 부른다[12]. 이와 같은 자속-저속거동, 즉 자기완화 효과로 해석하는 실험 결과의 하나는 시간의 함수로서 자기모멘트  $m(t)$  값들이 천천히 변화하는 것이다. 따라서  $MgB_2$  박막 시료에 대한 자속완화 연구결과처럼[14], 순수한  $MgB_2$  분말과 증류수-에탄올 혼합물 처리된  $MgB_2$  분말들의 자기완화 비율  $S$ 를 분석하고, 고유한 자속고정 효과 등을 조사하기 위해 특정한 자기장 및 특정한 온도에서 두 종류  $MgB_2$  분말 시료들의 자기모멘트  $m(t)$ 의 시간의존성들을 측정하였다.

Fig. 2는 순수한  $MgB_2$  분말 시료의 자기모멘트  $m(t)$  값에 대한 시간의존성 그래프들을 보여주고 있다. Fig. 2(a)는 증가하는 자기장  $H_{inc}$  영역에서 인가한 지정된 자기장  $H_f$  세기를 1000 G로 일정하게 유지하고 지정된 온도들( $T = 5$  K  $\sim$  35 K)에서 측정된 자기모멘트  $m(t)$  값에 대한 시간의존성 그래프들이며, Fig. 2(b)는 감소하는 자기장  $H_{dec}$  영역에서 인가한 지정된 자기장  $H_f$  세기를 1000 G로 일정하게 유지하고 지정된 온도들( $T = 5$  K  $\sim$  35 K)에서 측정된 자기모멘트  $m(t)$  값에 대한 시간의존성 그래프들이다. 측정된  $m(t)$  데이터들은 약 100 s 간격으로 약 7200 s 까지 시간  $t$ 의 함수로서 측정된 것이다. 그리고 Fig. 2(a)와 (b)의 온도  $T = 5$  K 그래프들을 확대한 Fig. 2(c)와 (d)

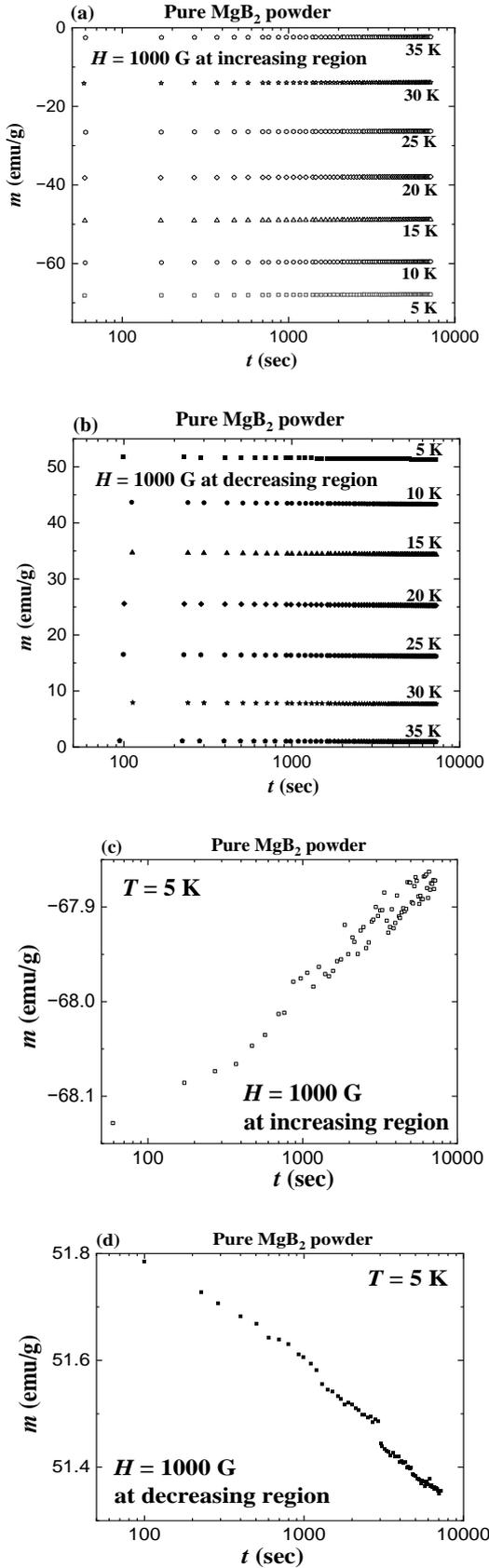


Fig. 2. Magnetic moment  $m$  versus time  $t$  of pure MgB<sub>2</sub> powder for (a) the increasing field  $H_{inc}$  branch and (b) the decreasing field  $H_{dec}$  branch, at temperatures from 5 to 35 K with field of  $H = 1000$  G. (c) and (d) show the magnified view of  $m(t)$  at  $T = 5$  K from (a) and (b), respectively.

의 그래프들에서 알 수 있듯이, 온도  $T = 5$  K에서 약 7200 s 동안 자기모멘트  $m$  값들이 0.5~1.0% 정도 감소함을 알 수 있는데, 고온초전도체의 ~20% 감소비율에 비해 현저하게 낮으며, MgB<sub>2</sub> 박막시료  $c$ -축 방향의 2~3% 감소비율보다 4배 정도 더 낮고, MgB<sub>2</sub> 박막시료  $ab$ -평면의 0.2~0.3% 감소비율의 크기와 유사함을 알 수 있다[12, 14]. 그리고 온도  $T = 15$  K에서 약 7200 s 동안 순수한 MgB<sub>2</sub> 분말 시료의 자기모멘트  $m$  값들의 감소율은 0.7~1.8% 정도로서  $T = 5$  K의 감소율과 유사하였다.

한편, Fig. 3은 증류수-에탄올 혼합물 처리된 MgB<sub>2</sub> 분말 시료의 자기모멘트  $m(t)$  값에 대한 시간의존성 그래프들을 보여 주고 있다. Fig. 3(a)는 증가하는 자기장  $H_{inc}$  영역과 감소하는 자기장  $H_{dec}$  영역에서 각각 인가한 지정된 자기장  $H_f$  세기를 1000 G로 일정하게 유지하고, 각각 지정된 온도들( $T = 15$  K, 25 K, 및 35 K)에서 약 100 s 간격으로 약 7200 s 까지 시간  $t$ 의 함수로서 각각 측정된 자기모멘트  $m(t)$  값에 대한 시간의존성 그래프들이다. 그리고 Fig. 3(a)의 온도  $T = 15$  K 그래프들을 확대한 Fig. 3(b)와 (c)의 그래프들에서 알 수 있듯이, 온도  $T = 15$  K에서 약 7200 s 동안 자기모멘트  $m$  값들이 0.6~1.0% 정도 감소함을 알 수 있는데, 순수한 MgB<sub>2</sub> 분말 시료의 자기모멘트  $m$  값들의 0.5~1.0% 감소비율 크기와 거의 일치함을 알 수 있다. 이와 같은 결과들을 통해 본 연구에서 사용된 두 종류의 MgB<sub>2</sub> 분말들의 자속고정효과(flux pinning effect)는 MgB<sub>2</sub> 박막시료의  $c$ -축 방향 경우보다 현저하게 강하며  $ab$ -평면 경우와 다소 비슷함을 예측할 수 있다. 또한, Fig. 4는 증가하는 자기장  $H_{inc}$  영역과 감소하는 자기장  $H_{dec}$  영역에서 지정된 온도  $T = 15$  K를 일정하게 유지하고, 각각 지정된 자기장 세기들( $H_f = 1000$  G ~ 10000 G)에서 약 100 s 간격으로 약 7200 s 까지 시간  $t$ 의 함수로서 각각 측정된 자기모멘트  $m(t)$  값에 대한 시간의존성 그래프들이다.

이전 논문에서 기술하였듯이[14], Blatter 그룹에서 제시한 열적으로 활성화된 자속-미소거동(thermally activated magnetic flux creep)에 대한 고전이론에 의하면, 전류밀도  $J$ 에 대한 붕괴 방정식이  $\partial J/\partial t \approx (-J_c/\tau_0) \exp[-U(J)/kT]$  으로 유도됨을 보였다[16]. 여기서  $U(J)$ 는 활성화 에너지이다. 그리고 1964년에 Anderson-Kim은 열적 활성화에 기인한 피닝-퍼텐셜-우물들(pinning potential wells) 개념을 도입하여 전류밀도  $J$ 와 활성화 에너지  $U$ 의 선형적인 관계를 보이고,  $J = J_c [1 - (kT/U_0) \ln(1 + t/t_0)]$  관계식을 유도하여, 자속-저속거동에 따른 전류밀도  $J$ 의 대수적 시간붕괴(logarithmic time decay)를 설명하였다[15]. 그리고 Bean 임계상태 모델에 의해  $J \propto M$  이므로[16], 자속-저속거동에 따른 자기자화도  $M$ 의 대수적 시간붕괴(logarithmic time decay)를 예측할 수 있다. 따라서 Anderson-Kim 이론의 대수적 자기완화 관계식을 적용하여 MgB<sub>2</sub> 분말들의 자속-저속거동 현상을 설명할 수 있다. 이를 위해 자속고정효과 등을 규격화된 저속거동비율(normalized creep rate)  $S$ 를 도입하여 분석하는데,  $S$ 는 자기완화비율(magnetic relaxation rate) 혹은 대수적 시간붕괴(logarithmic time decay)율이라고 하며,  $S = -(1/M_{irr})[dM_{irr}/dn(t)] = -dn(M_{irr})/dn(t) = -dn(J)/dn(t)$ 의 관계식으로  $S$  값을 결정할 수 있다[15].

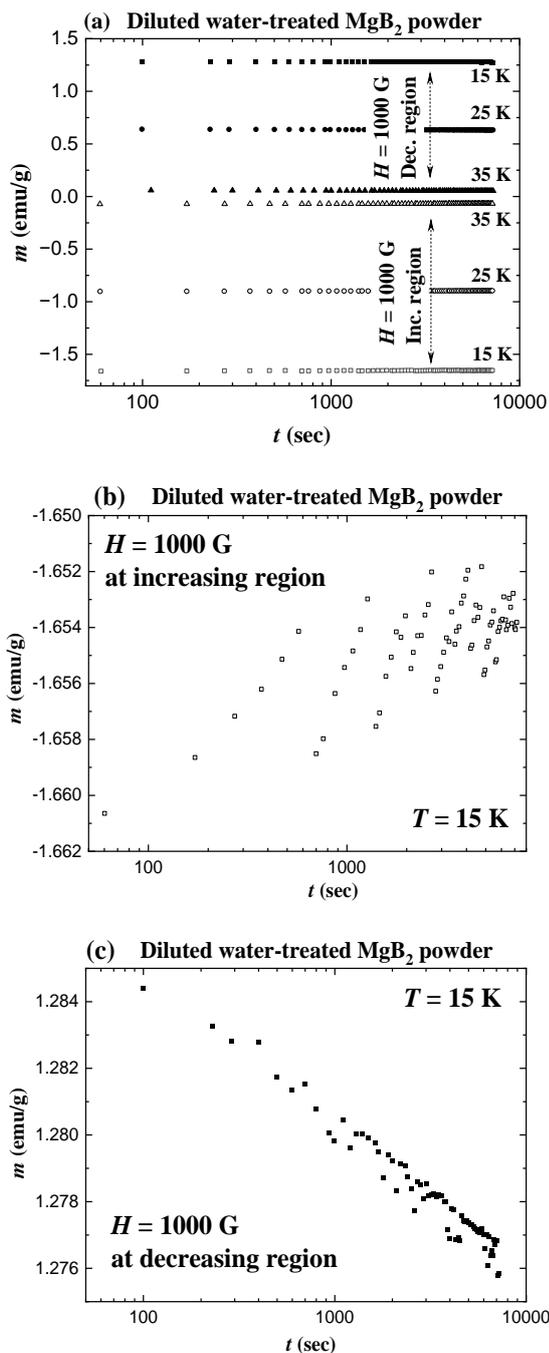


Fig. 3. (a) Magnetic moment  $m$  versus time  $t$  of diluted water-treated  $\text{MgB}_2$  powder for both the increasing field  $H_{\text{inc}}$  branch and the decreasing field  $H_{\text{dec}}$  branch, at temperatures of 15, 25, and 35 K with field of  $H = 1000$  G. (b) and (c) show the magnified view of  $m(t)$  for both field branches at  $T = 15$  K from (a).

Fig. 1에 나타난 자기모멘트  $m$ 의 자기장  $H$  의존성인  $m(H)$  그래프들에 초전도 부피  $V_s$ 로 나뉘므로써 자기자화도  $M(H)$  그래프들을 얻을 수 있고, 이를 통해 비가역 자기자화도 (irreversible magnetization)  $M_{\text{irr}}(H)$  값들을 구할 수 있다. 비가역 자기자화도  $M_{\text{irr}}(H)$  값은  $M_{\text{irr}}(H) = |M_{\text{mea}} - M_{\text{avg}}|$  관계식으로 얻을 수 있으며, 여기서  $M_{\text{avg}} = [M(H_{\text{dec}}) - M(H_{\text{inc}})]/2$  이고,  $M(H_{\text{inc}})$ 와  $M(H_{\text{dec}})$ 는  $M(t)$  측정값으로부터 각각 자기장이 증가하는 영역과 감소하는 영역에서 자기자화도 값들이다.

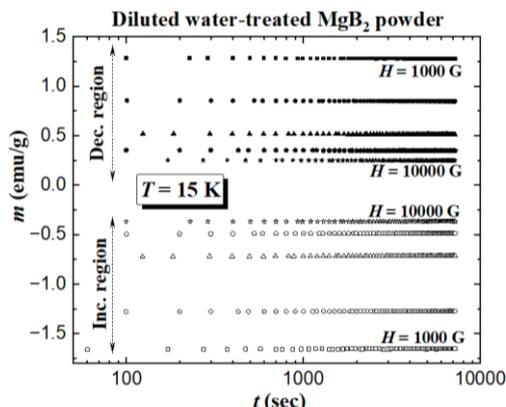


Fig. 4. Magnetic moment  $m$  versus time  $t$  of diluted water-treated  $\text{MgB}_2$  powder for both the increasing field  $H_{\text{inc}}$  branch and the decreasing field  $H_{\text{dec}}$  branch, at fields from 1000 to 10000 G with temperature of  $T = 15$  K.

이에 따라 본 논문의 두 종류  $\text{MgB}_2$  분말들의 자기완화비율 (magnetic relaxation rate)  $S = -d \ln(M_{\text{irr}}) / d \ln(t)$ 을 각각 구하여 분석하였다. Fig. 5(a)와 5(b)는 순수한  $\text{MgB}_2$  분말 시료와 증류수-에탄올 혼합물 처리된  $\text{MgB}_2$  분말 시료들에 대하여 지정된 자기장 세기들( $H_f = 1000$  G ~ 10000 G)에서 자기완화비율  $S$ 의 온도의존성 그래프들을 각각 보여주고 있다. 인위적인 자속고정점들을 도입하지 않은 두 종류  $\text{MgB}_2$  분말 시료들에 대하여, Fig. 5에서 알 수 있듯이  $T = 25$  K 이하 온도영역에서 자기완화비율  $S$ 의 작은 값들의 결과들은 고유의 약한 집단적인 자속고정효과(intrinsic weak collective pinning effect)로 설명할 수 있다. 그리고  $\text{MgB}_2$  박막 시료의 결과들과 유사하게 [14] 순수한  $\text{MgB}_2$  분말 시료의 경우에  $T = 10$  K 이하 온도영역과  $H_f = 5000$  G 이하 자기장에서 자기완화비율  $S$  값들의 변화가 거의 없는, 즉 일정한 값들의 결과들은 양자-저속거동-효과(quantum creep effect)의 명확한 현상으로 이해할 수 있다. 이와 같은 양자-저속거동-효과는 이전 논문들[20-21]에서 볼 수 있듯이 전류밀도  $J(T)$  그래프들의 저온 영역에서 완만한 변화 결과들과 관련하여 설명할 수 있다.

Fig. 6은 본 논문의 순수한  $\text{MgB}_2$  분말 시료와 증류수-에탄올 혼합물 처리된  $\text{MgB}_2$  분말 시료, 그리고 이전 논문[14]의  $\text{MgB}_2$  박막 시료들에 대하여 자기장  $H_f = 1000$  G와 7500 G 세기에서 자기완화비율  $S$ 의 온도의존성 그래프들을 상호 비교하여 보여주고 있다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 순수한  $\text{MgB}_2$  분말 시료와 증류수-에탄올 혼합물 처리된  $\text{MgB}_2$  분말 시료들의 자기완화비율  $S$  값들은 서로 거의 차이가 없는 유사한 크기를 가지며,  $\text{MgB}_2$  박막 시료의  $ab$ -축으로 인가한 자기장에 의한 자기완화비율  $S$  값들과 유사함을 알 수 있다. 그리고  $\text{MgB}_2$  박막 시료의  $c$ -축으로 인가한 자기장에 의한 자기완화비율  $S$  값들은 다른 시료들에 비하여 상대적으로 크음을 알 수 있다. 순수한  $\text{MgB}_2$  분말 혹은 증류수-에탄올 혼합물 처리된  $\text{MgB}_2$  분말들은  $\text{MgB}_2$  다결정(poly-crystal) 물질로서 입체 경계면 사이에 존재하는 자속고정효과(flux pinning effect) 혹은 분말들의 입체 사이에 존재하는 다양한 결함(defect)들로 인한 자속고정효과들이 단결정  $\text{MgB}_2$  박막 시료에 비하여 강하게 나타남을 예측할 수 있고, 이는 Fig. 6의 자기완화비율  $S$ 의 온도의존성 그래프 결과들로 잘 설명된다.

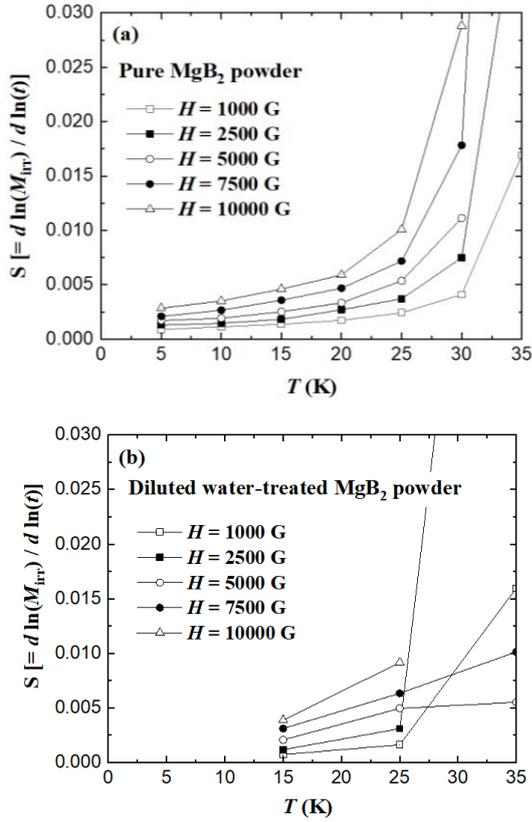


Fig. 5. Flux creep rate  $S$  versus temperature  $T$  for (a) the pure MgB<sub>2</sub> powder and (b) the diluted water-treated MgB<sub>2</sub> powder, at fields from 1000 to 10000 G.

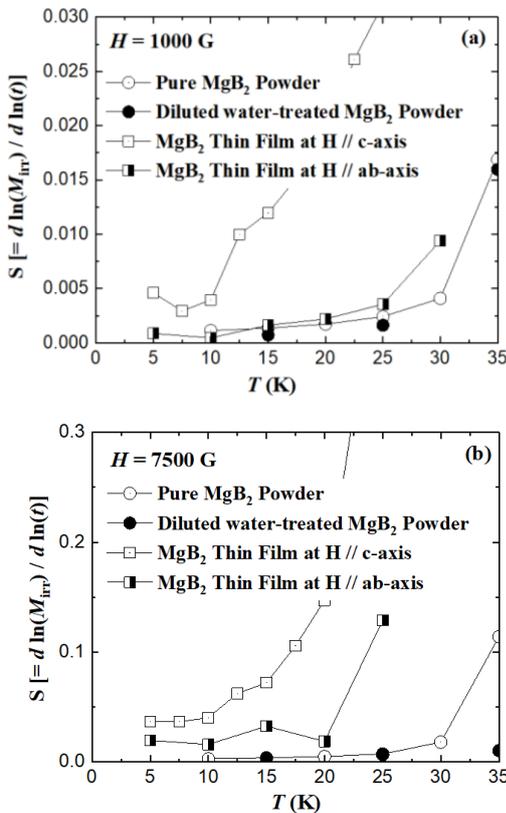


Fig. 6. Flux creep rate  $S$  versus temperature  $T$  for several MgB<sub>2</sub> samples with (a)  $H = 1000$  G and (b)  $H = 7500$  G.

#### 4. 결론

순수한 MgB<sub>2</sub> 분말 시료와 증류수-에탄올 혼합물 처리된 MgB<sub>2</sub> 분말 시료들의 자기완화 특성들을 조사하였다.  $T = 5 \sim 35$  K의 지정된 온도와  $H_T = 1000 \sim 10000$  G의 지정된 자기장에서 약 7200 s 시간 동안에 약 100 s 간격으로 자기모멘트  $m(t)$ 의 시간 의존성을 PPMS-VSM 마그네토미터(magnetometer) 장비를 이용하여 측정하였다. 순수한 MgB<sub>2</sub> 분말 시료의 경우에 온도  $T = 5$  K와  $T = 15$  K에서 약 7200 s 동안 자기모멘트  $m$  값들이 0.5 ~ 1.0%와 0.7 ~ 1.8% 정도로 각각 감소하였으며, 증류수-에탄올 혼합물 처리된 MgB<sub>2</sub> 분말 시료의 경우에 온도  $T = 15$  K에서 약 7200 s 동안 자기모멘트  $m$  값들이 0.6 ~ 1.0% 정도로 감소하였다. Anderson-Kim 이론에 의한 대수적 자기완화 관계식  $S = -d \ln(M_{irr}) / d \ln(t)$ 을 이용하여 두 종류 MgB<sub>2</sub> 분말들의 자기완화 특성을 조사하였다. 자기완화비율  $S$  값들은 비가역 자기자화도 시간 의존성  $M(t)$  결과들을 이용하여 구하였다. 순수한 MgB<sub>2</sub> 분말 시료와 증류수-에탄올 혼합물 처리된 MgB<sub>2</sub> 분말 시료들의 자기완화비율  $S$  값들은 거의 비슷하였으나, MgB<sub>2</sub> 박막 시료의  $c$ -축 자기장 결과들과 비교하면 현저하게 작은 값을 나타내었다. 이를 통해 다결정(poly-crystalline) MgB<sub>2</sub> 분말 시료들의 자속고정효과(flux pinning effect) 특성들이 단결정(single crystalline) MgB<sub>2</sub> 박막 시료의  $c$ -축 자기장에 의한 특성들보다 현저하게 우수함을 예측하였다. 한편, MgB<sub>2</sub> 박막 시료의 경우와 유사하게  $T = 10$  K 이하 온도영역에서 자기완화비율  $S$  값들은 거의 같은 크기로 일정하였고, 이는 양자-저속거동-효과(quantum creep effect)의 현상으로 설명하였다.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by a grant from the Basic Science Research Program, administered through the National Research Foundation of Korea (NRF) and funded by the Ministry of Education (NRF-2021R1A2C1094771).

#### REFERENCES

- [1] J. Nagamatsu, N. Nagagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride," *Nature*, vol. 401, pp. 63, 2001.
- [2] C. Buzea and T. Yamashita, "Review of superconducting properties of MgB<sub>2</sub>," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 14, pp. R115-R150, 2001, and references therein.
- [3] Setsuko Tajima, "The second special issue of Physica C on MgB<sub>2</sub>," *Physica C*, vol. 456, pp. 1, 2007, and references therein.
- [4] H. J. Choi, D. Roundy, H. Sun, M. L. Cohen and S. G. Louie, "The origin of the anomalous superconducting properties of MgB<sub>2</sub>," *Nature*, vol. 418, pp. 758-760, 2002.
- [5] S. Souma, Y. Machida, T. Sato, T. Takahashi, H. Matsui, et al., "The origin of multiple superconducting gaps in MgB<sub>2</sub>," *Nature*, vol. 423, pp. 65-67, 2003.
- [6] D. C. Larbalestier, L. D. Cooley, M. O. Rikel, A. A. Polyanskii, J. Y. Jiang, et al., "Strongly linked current flow in polycrystalline forms of the superconductor MgB<sub>2</sub>," *Nature*, vol. 410, pp. 186-189, 2001.
- [7] V. G. Kogan and S. L. Bud'ko, "Anisotropy parameters of

- superconducting MgB<sub>2</sub>,” *Physica C*, vol. 385, pp. 131-142, 2003, and references therein.
- [8] S. X. Dou, S. Soltanian, J. Horvat, X. L. Wang, S. H. Zhou, M. Lonescu, H. K. Liu, P. Munroe, and M. Tomsic, “Enhancement of the critical current density and flux pinning of MgB<sub>2</sub> superconductor by nanoparticle SiC doping,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, pp. 3419-3421, 2002.
- [9] K. J. Song, S. W. Kim, C. Park, J. K. Chung, J. S. Yang, J. H. Joo, R. K. Ko, H. S. Ha, H. S. Kim, D. W. Ha, S. S. Oh, E. Y. Lee, Y. K. Kwon, and G. H. Rim, “The effect of nano-powder additions on the superconducting properties of MgB<sub>2</sub>,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, pp. 3288-3291, 2005.
- [10] A. Gurevich, “Enhancement of the upper critical field by nonmagnetic impurities in dirty two-gap superconductors,” *Phys. Rev. B, Condens. Matter*, vol. 67, pp. 184515-1-13, 2003.
- [11] A. Gurevich, S. Patnaik, V. Braccini, K. H. Kim, C. Mielke, X. Song, L. D. Cooley, S. D. Bu, D. M. Kim, J. H. Choi, L. J. Belenky, J. Giencke, M. K. Lee, W. Tian, X. Q. Pan, A. Siri, E. E. Hellstrom, C. B. Eom, and D. C. Larbalestier, “Very high upper critical fields in MgB<sub>2</sub> produced by selective tuning of impurity scattering,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 278-286, 2004.
- [12] Y. Yeshurun, A. P. Malozemoff, and A. Shaulov, “Magnetic relaxation in high-temperature superconductors,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 68, no. 3, pp. 911-949, 1996, and references therein.
- [13] H. H. Wen, S. L. Li, Z. W. Zhao, H. Jin, Y. M. Ni, W. N. Kang, H.-J. Kim, E.-M. Choi, and S.-I. Lee, “Magnetic relaxation and critical current density of MgB<sub>2</sub> thin films,” *Phys. Rev. B*, vol. 64, pp. 134505-1-5, 2001.
- [14] K. J. Song, W. N. Kang, and C. Park, “The magnetic relaxation of MgB<sub>2</sub> thin films grown by hybrid physical-chemical vapor deposition,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4, pp. 8200804, 2006.
- [15] P. W. Anderson and Y. B. Kim, “Hard superconductivity: Theory of the motion of Abrikosov flux lines,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 36, no. 1, pp. 39-43, 1964.
- [16] G. Blatter, M. V. Feigel'man, V. B. Geshkenbein, A. I. Lakin, and V. M. Vinokur, “Vortices in high temperature superconductors,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 66, no. 4, pp. 1125-1388, 1994.
- [17] K. J. Song, R. K. Ko, H. S. Kim, T. H. Kim, N. J. Lee, H. S. Ha, D. W. Ha, S. S. Oh, S. H. Moon, C. Park, and S. I. Yoo, “The effect of solvent treatments and aging on the superconducting properties of MgB<sub>2</sub> materials,” *Physica C, Supercond.*, vol. 467, pp. 106-111, 2007.
- [18] K. J. Song, J. C. Lim, S. Kang, R. K. Ko, K. C. Chung, S. Yoon, and C. Park, “The effect of diluted water treatments on the superconducting properties of MgB<sub>2</sub>,” *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, pp. 7100304, 2013.
- [19] C. P. Bean, “Magnetization of high-field superconductors,” *Rev. Mod. Phys.*, vol. 36, pp. 31-36, 1964.
- [20] K. J. Song, C. Park, and S. Kang, “The effect of SiC nanoparticle addition on the flux pinning properties of MgB<sub>2</sub>,” *Physica C*, vol. 470, pp. 470-474, 2010.
- [21] J. C. Lim, K. J. Song, and W. N. Kang, “Magnetic properties of MgB<sub>2</sub> thin films grown by using HPCVD,” *New Phys., Sae Mulle*, vol. 63, no. 11, pp. 1241-1248, 2013.