

# Magnetic Pinning Properties and Flux Jumps in Superconducting MgB<sub>2</sub>

W. S. Yoon<sup>a</sup>, Eui-Wan Lee<sup>a</sup>, C. J. Kim<sup>b</sup>, B. G. Kim<sup>c</sup>, H.-C. Ri<sup>\*,a</sup>

<sup>a</sup> Department of Physics, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Republic of Korea

<sup>b</sup> Nuclear Nanomaterial Development Laboratory, Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI),  
Daejeon 305-353, Republic of Korea

<sup>c</sup> HANARO Utilization Technology Development Center, Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI),  
Daejeon 305-353, Republic of Korea

## Abstract

Magnetization studies have been carried out on MgB<sub>2</sub> polycrystalline samples in the temperature range of 5 – 44 K and in the magnetic field up to 7 Tesla. The critical current density was calculated from hysteresis loops using the Bean's critical state model, and the highest value of  $J_c$  at 20 K was  $2.7 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup> at 2 Tesla. The hysteresis loops were carefully examined to determine the temperature and magnetic field range where flux jumps appeared. The first jump occurred typically at 1 Tesla. Due to the strong pinning, we observed the presence of flux jump below  $H = 1$  Tesla at temperature below 30 K

*Keywords* : MgB<sub>2</sub>, flux jump, pinning property

## 1. 서론

새로운 초전도체인 MgB<sub>2</sub>는 39 K이상의 임계 온도를 가지고 있기 때문에 응용의 가치가 매우 높다고 평가되고 있다. MgB<sub>2</sub>의 상용화를 위해서 임계 전류 밀도를 높이는 연구와 함께 보텍스의 자기적 특성에 대한 보다 근본적인 이해를 하고자 하는 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 우리는 MgB<sub>2</sub>의 자기적 특성을 보다 자세하게 이해하기 위해서 다결정 MgB<sub>2</sub> 시료들의 임계온도와 자기화(magnetization), 임계 전류 밀도, 그리고 비가역 자기장 (irreversibility field)  $H_{irr}$ 를 측정하였다. 또한 MgB<sub>2</sub>에서 현저하게 관찰되는 플럭스 튜브(flux jump) 현상에 대해서도 자세하게 연구 하였다.

플럭스 튜브 현상은 제2종 초전도체(type II superconductor)에서 발견되는 특성 중 하나이다. 혼합상태(mixed state)에 있는 초전도체에 온도 또는 외부 자기장의 작은 요동이 가해지면 임계 상태 (critical state)가 불안정하게 되고, 자기 플럭스 (magnetic flux)가 초전도체 내부로 갑자기 침투하게 되면서, 자기 플럭스의 사태 (avalanche)와 같은 현상이 발생하게 된다. 그 결과 자기 플럭스의 운동으로 인해 발생하는 에너지 손실 때문에 초전도체의 온도가 급격히 상승하면서 저항이 발생되거나 심지어 정상 상태 (normal state)가 될 수 있다. 다시 말해 플럭스 튜브는 초전도체 내부로의 자기 플럭스 침투와 자체 온도 상승과 관계가 있는 현상이다.

이론적으로 초전도체의 플럭스 튜브 현상은 물질의 자기확산도(magnetic diffusivity)  $D_m$ 과 열확산도 (thermal diffusivity)  $D_t$ 가 국소 단열 조건

\*Corresponding author. Fax : +82 53 950 1739  
e-mail : hcrl@knu.ac.kr

(local adiabatic condition)인  $D_l \ll D_m$ 을 만족하는 경우 발생하는 것으로 알려져 있다 [1].

$MgB_2$ 의 경우 현재까지 보고된 실험 결과에 의하면 20 K 이상에서는 플럭스 튜브 현상이 발견되지 않는다고 알려져 있다 [2]. 그러나 이번 실험에 사용한  $MgB_2$  시료의 경우 플럭스 튜브 현상이 30 K에서도 관측되었다. 이는 이번 실험에 사용한 시료가 다른  $MgB_2$  시료에 비해 높은  $J_c$  값을 가지고 있기 때문이라 판단된다. 일반적으로 플럭스 튜브 현상이 발생하면 자기 플럭스들이 사태과정을 겪으면서 시료 내부로 순간적으로 침투하게 되어 자기 모멘트 값이 급격히 감소하게 된다 [3-9]. 최근에는 0 T 부근에서 플럭스 튜브로 인해 초전도체의 온도가 임계온도까지 상승하게 되어 자기 모멘트가 0의 값을 가지는 완벽한 플럭스 튜브 (complete flux jump) 현상이 실험적으로 확인되었다 [2]. 그러나 이번 실험에서는 플럭스 튜브로 인해 자기 모멘트 값이 0의 값을 지나서 심지어 부호까지 바뀌는 특이한 현상 (자기모멘트의 부호 반전)이 발견되었다.

이번 연구에서는 동일한 방법으로 제조된 크기가 다른 12개의 시료를 이용하여 실험하였으며, 시료들은 전형적으로 3 mm x 3 mm x 1 mm의 체적을 가지는 판상형태를 지니고 있다.  $MgB_2$ 의 임계 온도와 비가역 자기장을 확인하기 위하여 Quantum Design사의 MPMS XL-7을 이용하여 10 Oe ~ 7 T의 외부 자기장을 인가하면서 ZFC & FC (ZFC: 시료를 자기장이 없는 상태에서 냉각하여 자기장 인가 후 온도를 상승시키며 측정한다. FC: 자기장을 인가한 후 냉각하여 동일 조건으로 측정한다.)

자기화의 온도 의존성을 측정하였다. 또한 임계 전류 밀도의 온도 및 자기장 의존성과 플럭스 튜브 현상을 연구하기 위하여 7 ~ -7 T까지 외부 자기장을 변화시키면서  $MgB_2$ 의 자기 이력곡선 (hysteresis curve)를 측정하였다.

## 2. 시료제작

다결정  $MgB_2$ 의 시료는 다음과 같이 제작되었다. 5 ~ 10  $\mu m$  크기의 Mg 분말(Tangshan Weiho Mg Powder Co., Ltd)과 1  $\mu m$  크기의 B 분말(Mg 제조사와 동일)의 무게를 정확히 측정 후 핸드 밀링을 이용하여 혼합하였다. 혼합된 분말을 금속 거푸집에 넣고 한 방향으로 압력을 가하여 원기둥 형태의 펠렛으로 제작하였다. 펠렛을 열 전기로에 넣어 온도를 300  $^{\circ}C/h$ 의 비율로 850  $^{\circ}C$ 까지 상승시킨 후, 850  $^{\circ}C$ 에서 30분 동안 온도를 유지한 후 상온까지 냉각시켰다. Mg의 산화를 막기 위하여 펠렛을 Ti 튜브에 넣고 Ar 가스 조건하에서 열처리 하였다. 이렇게 제작된 벌크로 부터 판상 형태로 절단하여 12개의 시료를 확보 하였다.

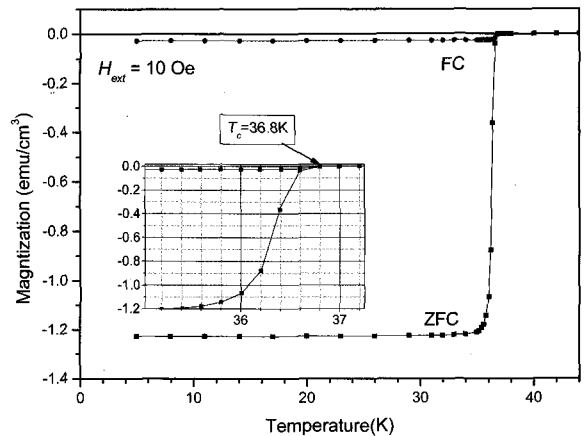


Fig. 1. Field-cooled and zero-field-cooled magnetization of  $MgB_2$  as a function of temperature in an applied field of 10 Oe.

## 3. 결과 및 분석

### 3.1 임계 온도 측정

다결정  $MgB_2$  시료들의 임계 온도는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 MPMS를 이용하여 얻은 자기화의 온도 곡선을 이용하여 측정하였다. Fig. 1에는 외부 자기장  $H = 10$  Oe에서 온도를 4 K에서 44 K까지 변화하면서 측정한 ZFC & FC 자기화의 온도 의존성이 나타나 있다. 12개의

시료들 모두  $T_c = 36.8$  K의 임계 온도를 가지고 있으며, 포화 자기화의 10%에서 90%까지 변화하는 자기 전이 간격(magnetic transition width)  $\Delta T_c$ 는 1.44 K정도이다. 12개의 시료 모두 동일한 자기적 특성을 보이고 있었기 때문에 비가역 자기장, 자기이력곡선 및 플럭스 튜브 현상의 연구를 위해 특정 시료를 대상으로 하여 자기적 특성을 측정하는 실험을 실시하였다.

### 3.2 비가역 자기장

외부 자기장이 10 Oe ~ 7 T일 때 측정한 자기화의 ZFC & FC 곡선으로부터 자기화가 분리되는 온도를  $T_{irr}$ 로 결정하였다. Fig. 2 (b)의  $H - T$

도표에는  $MgB_2 - 12$  시료의  $T_{irr}$ 를 표시하였으며, 비가역 곡선 (irreversibility line)으로부터  $H_{irr}$ 의 온도 의존성 (a)을 확인 하였다.  $H_{irr}$ 는 지수 법칙 관계(power-law)를 이용하여 설명할 수 있으며 관계식은 다음과 같다 [10].

$$H_{irr}(T) = H_{irr}(0)(1 - T_{irr}/T_c)^\alpha \quad (1)$$

식 (1)을 사용하여 피팅한 결과  $H_{irr}(0) = 14$  T와 지수  $\alpha = 1.33$ 의 값을 얻었다. 이는 이미 여러 논문에서 보고된  $MgB_2$ 에서 얻은 결과와 유사한 크기이다 [11, 12].

### 3.3 자기 이력 곡선

$T = 5, 20, 25, 30, 35$  K에서  $c$ 축에 평행한 방향으로 가해진 외부 자기장을 7 ~ -7 T까지 변화

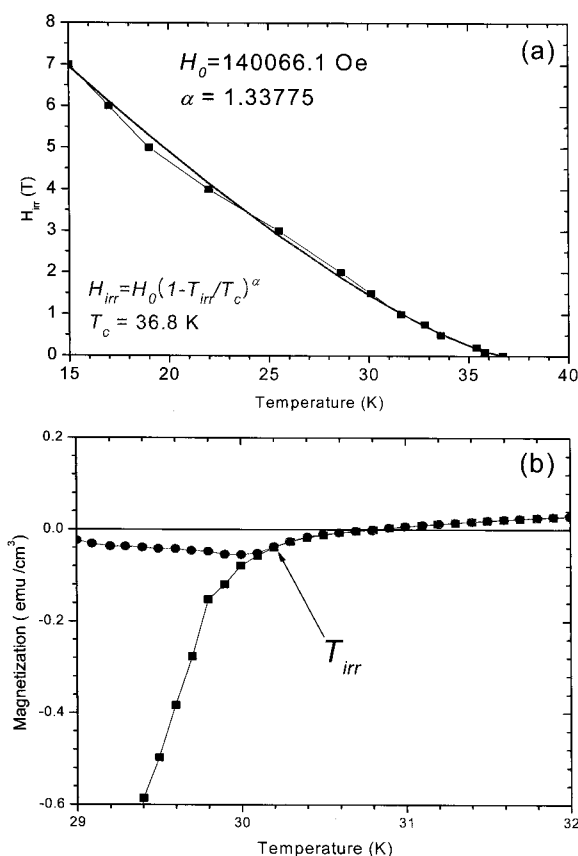


Fig. 2. (a) Temperature dependence of the irreversibility line. The dotted line is a fit to the data according to Eq. (1). (b) Field-cooled and zero - field - cooled magnetization of  $MgB_2$  at  $H = 1.5$  T. The arrow marks the irreversibility temperature  $T_{irr}$ .

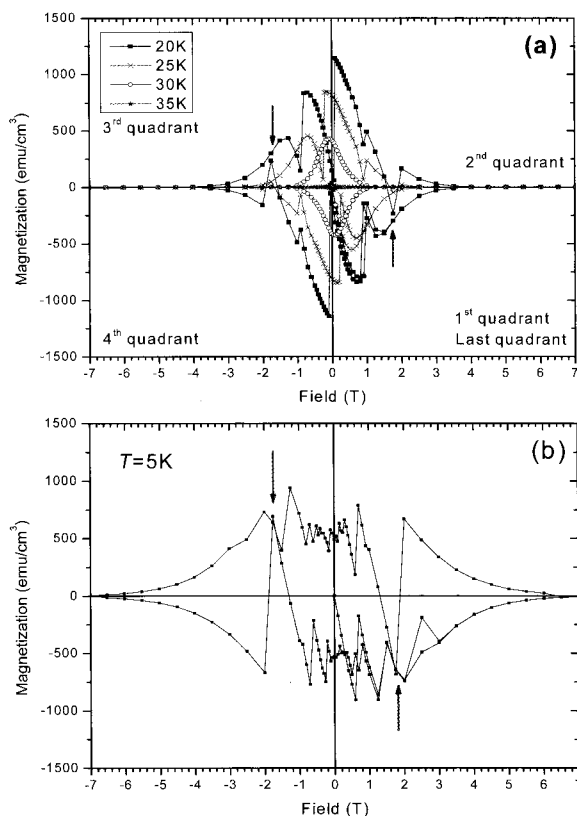


Fig. 3. Magnetization hysteresis loops of  $MgB_2$  (a) at  $T = 20, 25, 30,$  and  $35$  K (b)  $T = 5$  K. Flux jumps disappear at temperatures above 30 K.

시키면서  $MgB_2$  - 5 시료의 자기 이력 곡선을 측정하였다. 이미 각종 연구 결과를 통해 보고된 바와 같은 플럭스 뒹 현상이 본 실험에서도 뚜렷이 발견되었다. Fig. 3 (a)에서 보는 바와 같이  $T = 20$  K, 1 사분면 약 1 T에서 처음으로 플럭스 뒹 현상이 나타났으며,  $T = 25$  K에서는 2 사분면 약 1.75 T에서, 그리고  $T = 30$  K에서는 2 사분면 약 0.9 T에서 측정되었다. 그러나  $T = 35$  K에서는 플럭스 뒹 현상이 측정 되지 않았다. 플럭스 뒹 현상이 원점을 중심으로 1 사분면과 3 사분면 그리고 2 사분면과 4 사분면에서 대칭적인 구조를 보이고 있다.

시료의 온도를  $T = 5$  K에서 30 K까지 변화시키면서 자기 이력 곡선을 측정한 결과 플럭스 뒹 현상은 거의 동일한 자기장에서 관측 되었다.

### 3.4 임계전류 밀도

$MgB_2$  시료의 임계 전류 밀도  $J_c$ 를 측정된 자기 이력 곡선을 이용하여 계산하였다. Bean의 임계 상태 모델에 의하면  $J_c$ 를 다음과 같이 계산할 수 있다 [13-15].

$$J_c = \frac{20\Delta M}{b(1-b/3a)} \quad (2)$$

여기서  $a, b$ 는 각각 시료의 가로 방향과 세로 방향의 길이이며,  $a > b$ 이다. 임계 전류 밀도를

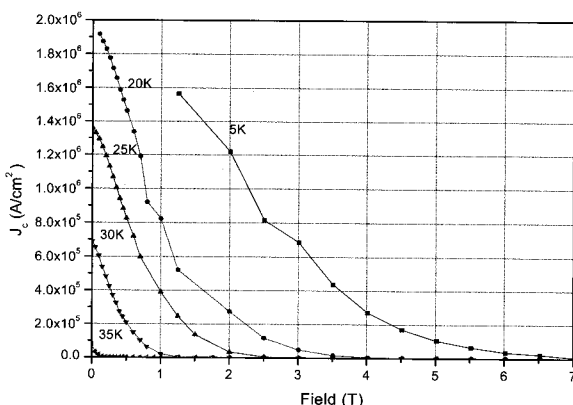


Fig. 4. Magnetic field dependence of the critical current density for  $MgB_2$ .

계산할 때 플럭스 뒹 현상이 일어난 점은 제외하였다. 외부 자기장  $H = 1$  T, 온도  $T = 20$  K에서  $J_c = 8.0 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>의 값을 가짐을 확인할 수 있다. 이는 일반적으로 보고된  $H = 1$  T,  $T = 20$  K에서 다결정  $MgB_2$ 가 가지는  $J_c = 10^4 \sim 10^5$  A/cm<sup>2</sup>에 비교하여 매우 큰 값이다 [4,13].

### 3.5 플럭스 뒹

$MgB_2$ 에서 관찰되는 플럭스 뒹 현상은  $T = 20$  K 이상의 온도 영역에서는 보고된 바가 없다 [2]. Fig. 3 (a)에서 볼 수 있는 것과 같이 본 연구를 통해 처음으로  $T = 30$  K까지 플럭스 뒹 현상을 관찰하였다. 동일한 벌크에서 확보한 다양한 시료를 이용하여 반복 실험을 실시한 결과  $T = 30$  K까지 플럭스 뒹이 나타난다는 것을 확인할 수 있었다.  $T = 30$  K에서도 플럭스 뒹이 나타나는 이유는 3.4장에서 언급한 바와 같이 본 연구에서 사용한 시료들이 매우 높은  $J_c$ 를 가진다는 사실과 관련 있다고 판단된다.

$H = 7 \sim 2$  T의 구간에서는  $\Delta H = 5000$  Oe,  $H = 2 \sim 1$  T에서는  $\Delta H = 2500$  Oe,  $H = 1 \sim 0.5$  T에서  $\Delta H = 1000$  Oe 그리고  $H = 0.5 \sim 0$  T에서  $\Delta H = 500$  Oe 간격으로 측정하였다. 2 사분면의  $H = 1.75$  T와 0.9 T에서 공통적으로 나타나는 플럭스 뒹은  $\Delta H$ 가 바뀐 후 처음 측정한 결과로서  $\Delta H$ 의 변화가 플럭스 뒹 현상과 관련이 있음을 알 수 있다. 그러나 1 사분면의  $H = 1$  T 부근에서 나타나는 플럭스 뒹은  $\Delta H$ 의 변화와 무관하다. 이로써 본 연구에서는 외적 실험 조건인  $\Delta H$ 의 변화와 관계가 있는 현상과 (2 사분면의  $H = 1.75$  T와 0.9 T),  $MgB_2$  시료의 고유한 특성과 관련된 (1 사분면의  $H = 1$  T 부근) 현상으로 구별되는 2가지 종류의 플럭스 뒹 현상을 관찰하였다.

$\Delta H$ 의 변화와 관계가 있는 플럭스 뒹 현상을 좀 더 자세히 분석하기 위하여 비교적 플럭스 뒹 현상을 간단하게 분석할 수 있는 온도인  $T = 20$  K에서 3가지 조건으로  $\Delta H$ 를 변화시켜 가면서 자기 이력 곡선을 측정하였다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 첫 번째 플럭스 뒹은  $H = 1$  T 부근에서 항상 동일하게 일어났으며, 따라서 이 플럭스 뒹은  $\Delta H$  크기에 무관하

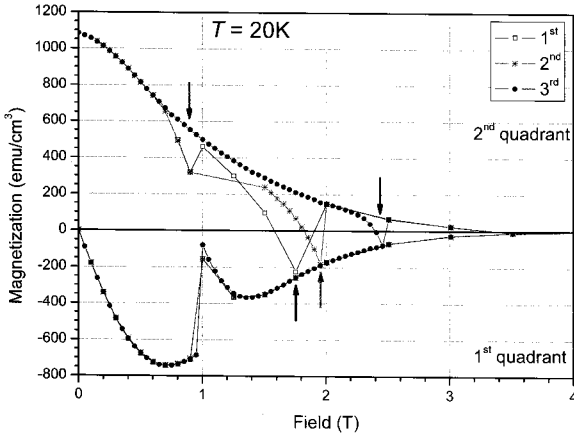


Fig. 5. The 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> quadrant part of the magnetization curves at  $T = 20$  K. The first flux jumps are observed approximately at  $H = 1$  T regardless of different  $\Delta H$ .

다는 것을 알 수 있다.

첫 번째 플럭스 튜브 현상이 나타난 이후 가해진 외부 자기장의 최대치인  $H = 4$  T까지 증가하는 동안 플럭스 튜브 현상은 일어나지 않았다. 처음과 두 번째 실험에서 1 사분면 영역 중  $H = 0 \sim 2.5$  T 구간은  $\Delta H = 2500$  Oe으로 그리고  $H = 2.5 \sim 4$  T 구간에서는  $\Delta H = 5000$  Oe으로 설정하였다. 세 번째 실험 조건은  $H = 0 \sim 2.5$  T구간에서  $\Delta H = 500$  Oe으로 변화시켰으며,  $H = 2.5 \sim 4$  T구간은  $\Delta H = 5000$  Oe이었다.

2 사분면의 실험조건으로 첫 번째 실험에서는  $H = 4 \sim 2$  T 구간은  $\Delta H = -5000$  Oe으로,  $H = 2 \sim 1$  T에서는  $\Delta H = -2500$  Oe으로 그리고  $H = 1 \sim 0$  T까지는  $\Delta H = -1000$  Oe으로 설정하였다. Fig. 5에서 화살표로 표시된 것처럼  $H = 1.75, 0.9$  T에서 플럭스 튜브 현상이 일어남을 확인할 수 있다.

두 번째 실험에서는  $H = 4 \sim 2$  T 구간에서  $\Delta H = -5000$  Oe,  $H = 2 \sim 1.5$  T 구간에서  $\Delta H = -500$  Oe,  $H = 1.5 \sim 0.9$  T 구간에서  $\Delta H = -6000$  Oe,  $H = 0.9 \sim 0.5$  T는  $\Delta H = -1000$  Oe,  $H = 0.5 \sim 0$  T는  $\Delta H = -500$  Oe 간격으로 다양하게 설정 하였다.  $H = 1.95, 0.9$  T에서 플럭스 튜브 현상이 확실하게 일어남을 확인할 수 있다. 세 번째 실험에서는  $H = 2.5$  T이하에서  $\Delta H$ 를 변화시키지 않기 위해  $H = 4 \sim 2.5$  T구간에서는  $\Delta H = -5000$  Oe으로  $H =$

$2.5 \sim 0$  T는  $\Delta H = -500$  Oe를 유지 하였다. 앞의 두 실험 결과와 동일하게  $\Delta H$ 를 변화시킨 지점, 2.45 T에서 플럭스 튜브 현상이 일어났다. 그러나  $\Delta H$ 가 동일하게 유지되는 구간인  $H = 2.5 \sim 0$  T에서는 더 이상의 플럭스 튜브 현상은 일어나지 않았다.

이러한 실험 결과들로부터 1 사분면의  $H = 1$  T에서 나타나는 플럭스 튜브는 시료의 고유의 특성이며, 2 사분면에서 관찰되는 플럭스 튜브는  $\Delta H$ 의 변화와 관련된 것임을 알 수 있었다.

본 연구에서 관찰된 특이한 현상은 Fig. 3 (a)와 (b)에 화살표로 표시하고 있는 것과 같이  $\Delta H$ 의 변화에 의해 유도된 자기 모멘트의 변화 중에서 부호를 바꾸는 형식의 자기 모멘트의 부호 반전 형태도 일어난다는 점이다.  $T = 5, 20, 25$  K에서는  $H = 1.75$  T에서 공통적으로 자기모멘트의 부호 반전이 일어났으며  $T = 30$  K에서는  $H = 0.9$  T 부근에서 자기모멘트의 부호 반전이 나타났다.

자기모멘트의 부호 반전 효과를 보다 자세하게 분석하기 위하여 2 사분면에서  $\Delta H$ 를 1회만 변화시켜서 자기 이력 곡선을 측정하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이  $\Delta H = 500$  Oe로 일정하게 유지하면서 측정한 결과 1 사분면의  $H = 1$  T 부근에서만 플럭스 튜브가 나타났다. 나머지 5회의 실험은 외부 자기장  $H = 2 \sim 1$  T 사이의 영역 중  $H = 2, 1.5, 1.2, 1.1, 1$  T에서  $\Delta H = 500$  Oe를  $\Delta H = 200$  Oe로 변화시켰다. 공통적으로 자기장 변화의 결과로 플럭스 튜브 현상이 발견 되었다. 플럭스 튜브가 발생한 후 계속 외부 자기장의 세기가 변화하면 공통적으로, 플럭스 튜브가 발생하지 않은 1번 곡선으로 복귀하는 현상을 보이며, 6개의 곡선이 최종적으로  $H = 0.7$  T 부근에서 결합하는 것을 볼 수 있다.

특이하게도  $H = 1.2$  T 보다 큰 자기장 영역에서는 자기모멘트의 부호 반전이 나타났으며, 플럭스 튜브가 발생하지 않은 1번 곡선으로 복귀하는 동안 상당히 넓은 자기장 영역에서 음의 자기화 값을 유지하고 있다. 이와 같은 자기모멘트의 부호 반전은 초전도체가 임계 온도

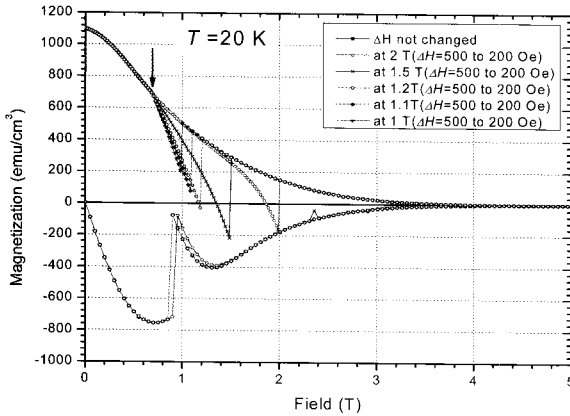


Fig. 6. Magnetization curves measured with different  $\Delta H$ .

이상으로 가열되는 완벽한 플럭스 텀 모델로도 설명이 되지 않으며, 향후 그 원인을 설명할 수 있는 이론이 필요한 매우 신기한 현상이다. 국소 단열 조건이 만족되면 완벽한 플럭스 텀 현상이 발견될 수 있다. 자기모멘트의 부호 반전과 같이 매우 큰 자기모멘트의 변화와 관계된 시료의 온도 상승이 자기 이력 곡선의 특성에 미치는 영향을 측정하기 위하여, 자기 모멘트의 부호 반전이 발생한 후 자기 모멘트의 시간의존성을 측정하였다. 자기이력곡선 측정은 시료의 온도가 일정하게 유지되고 있는 등온과정이다. 플럭스 텀으로 시료의 온도가 급속하게 상승하는 과정은 준 단열 과정으로 취급할 수 있다. 시료는 지속적으로 헬륨가스에 의해 냉각되기 때문에 비교적 짧은 시간에 온도가 상승한 후 다시 설정된 온도로 냉각될 것이다. 자기모멘트의 부호 반전이 발생한 후 자기장을 일정하게 유지하면 시간이 경과함에 따라 시료는 FC 상태로 냉각될 것이다.  $T = 20$  K과  $H = 2$  T에서 측정한 FC 자기화 측정 실험으로부터 얻은 FC 자기모멘트 값인  $-2.6 \times 10^{-4}$  emu과 비교할 때 Fig. 6의  $m = -1.54$  emu는 약  $6 \times 10^3$ 배나 큰 값이다. 따라서 자기모멘트의 부호 반전은 플럭스 텀 현상이 발생하는 동안 등온→단열→등온 과정을 반복하면서 가질 수 있는 반자성 신호로 설명할 수 없다.

Fig. 7에 표시되어 있는 것처럼 자기모멘트의 부호 반전이 일어난 뒤 동일한 외부 자기장  $H$

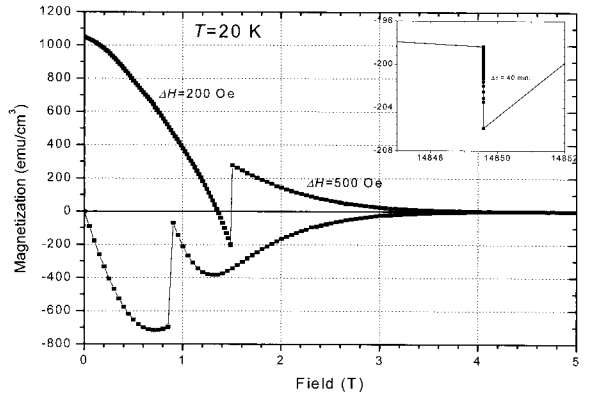


Fig. 7. The 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> quadrant part of the magnetization curves at  $T = 20$  K. The inset shows the change of magnetization measured after the flux jump at  $H = 1.48$  T.

= 1.48 T 속에서 40분 동안 40회 반복하여 자기모멘트를 측정하였다.

Fig. 7에 삽입된 그림과 같이 40분 동안 자기모멘트는 0.06738 emu만 변화하였다. 따라서 등온→단열→등온으로의 과정이 매우 짧은 시간 동안에 일어남을 보여준다 [15].

#### 4. 결론

이번 실험을 통해 다결정  $MgB_2$  시료의 자기적 특성을 연구 하였다. 자화율 측정 실험을 통하여, 본 연구에서 사용한 시료가 36.8 K의 임계온도를 가지고,  $H = 1$  T,  $T = 20$  K에서  $J_c = 8.0 \times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>를 가지는 것을 확인하였다. 또한 비가역 곡선 (irreversibility line)의 지수 법칙 관계를 확인하였으며,  $H_{irr}(0) = 14$  T와 지수  $\alpha = 1.33$ 의 값을 얻었다.

또한,  $MgB_2$  시료에서 현저하게 나타나는 플럭스 텀 현상을 정밀하게 분석하였다.  $T = 30$  K까지 플럭스 텀 현상이 관측되었다. 시료의 고유한 특성과 관련된 것과  $\Delta H$ 의 변화와 관련된 2가지 종류의 플럭스 텀 현상을 관찰하였다. 특이하게도 자기모멘트의 부호 반전 효과도 나타났다. 이 자기모멘트의 부호 반전 효과는 기존의 완벽한 플럭스 텀 모델로 설명할 수 없는 매우 특이한 현상이다.

## Reference

- [1] Chabanenko V., Puźniak R., Nabiałek A., Vasiliev S., Rusakov V.F., Huanqian L., Szymczak R., Szymczak H., Jun J., Karpiński J., Finkel V., "Flux Jumps and H-T Diagram of Instability for MgB<sub>2</sub>" *J. Low Temp. Phys.* 130 (3/4) 175-191 (2003).
- [2] Y. Kimishima, S. Takami, T. Okuda, M. Uehara, T. Kuramoto and Y. Sugiyama "Complete flux jump in bulk MgB<sub>2</sub> sintered under high pressure" *Physica C* 463 281-285(2007).
- [3] Kimishima, Oshihide, Takami, Satoshi, Uehara, Masatomo, Tetsuji, "Pinning property of Cu/MgB<sub>2</sub> system" *Physica C* 445 224-227 (2006).
- [4] Dou S.X., Wang X. L., Horvat J.<sup>1</sup>, Milliken D., Li A. H., Konstantinov K., Collings E. W., Sumpston M. D., Liu H. K. "Flux jumping and a bulk-to- granular transition in the magnetization of a compacted and sintered MgB<sub>2</sub> superconductor" *Physica C* 361 2 79-83(5) (2001).
- [5] H. H. Wen, S. L. Li Zhao, H. Jin, Y. M. Ni, Z. A. Ren, G. C. Che, Z. X. Zhao, "Flux dynamics and vortex phase diagram of the new superconductor MgB<sub>2</sub>" *Physica C* 363 170-178 (2001).
- [6] A. Nabialek, M. Niewczas, "The critical state stability in textured Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> superconductor" *Physica C* 436 43-50 (2006).
- [7] Kunitoshi Murai, Jun'ya Hori, Yoshiko Fujii, Jonah Shavar, Gregory Kozlowski, "Magnetic flux pinning and flux jumps in polycrystalline MgB<sub>2</sub>" *Cryogenics* 45 415-420 (2005).
- [8] I. Felner, V. P. S. Awana, Monika Mudgel, and H. Kishan, "Avalanche of flux jumps in polycrystalline MgB<sub>2</sub> superconductor" *J. Appl. Phys.* 101 (2007).
- [9] T. H. Johansen, M. Baziljevich, D. V. Shantsev, P. E. Goa, Y. M. Galpern, W. N. Kang, H. J. Kim, E. M. Choi, M. -S. Kim, S. I. Lee "Dendritic magnetic instability in superconducting MgB<sub>2</sub> films" *Europhys. Lett.* 59(4), 599-605 (2002).
- [10] K. J. Song, C. Park, S. W. Kim, R. K. Ko, H. S. Ha, H. S. Kim, S. S. Oh, Y. K. Kwon, S. H. Moon and S. -I. Yoo "Superconducting properties of polycrystalline MgB<sub>2</sub> superconductors fabricated by spark plasma sintering", *Physica C* 426 588-593 (2005).
- [11] Y. Kimishima, M. Uehara, T. Kuramoto, Y. Ichihyanagi, Y. Iriyama, K. Yorimasa. "Comments on magnetically estimated J<sub>c</sub> for MgB<sub>2</sub> by critical modes", *Physica C* 377 196-201(2002).
- [12] G. Fuchs, K. -H. Müller, A. Handstein, K. Nenkov<sup>1</sup>, V. N. Narozhnyi<sup>2</sup>, D. Eckert, M. Wolf and L. Schultz "Upper critical field and irreversibility line in superconducting MgB<sub>2</sub>", *Solid State Communications* 118 497-501 (2001).
- [13] Anurag Gupta, H. Narayan, D. Astill, D. Kanjilal, C. Ferdeghini, M. Paranthaman and A. V. Narlikar "Study of magnetization and pinning mechanisms in MgB<sub>2</sub> thin film superconductors: effect of heavy ion irradiation" *Supercond. Sci. Technol.* 16 951-955 (2003).
- [14] Z. W. Zhao, S. L. Li, Y. M. Ni, H. P. Yang, Z. Y. Liu, H. H. Wen, W. N. Kang, H. J. Kim, E. M. Choi, S. I. Lee "Suppression of superconducting critical current density by small flux jumps in MgB<sub>2</sub> thin films" *Phys. Rev. B* 65 (2002).
- [15] P. S. Swartz and C. P. Bean "A Model for Magnetic Instabilities in Hard Superconductors: The Adiabatic Critical State", *J. Appl. Phys* 39 (1968).