

## Temperature dependence of the Hall conductivity in MgB<sub>2</sub> superconducting thin films

Soon-Gil Jung<sup>a</sup>, W. K. Seong<sup>a</sup>, Ji Young Huh<sup>a</sup>, T. G. Lee<sup>a</sup>, W. N. Kang<sup>\*,a</sup>  
Eun-Mi Choi<sup>b</sup>, Hyeong-Jin Kim<sup>b</sup>, Sung-Ik Lee<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Department of Physics, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

<sup>b</sup>National Creative Research Initiative Center for Superconductivity, Department of Physics,  
Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Korea

## MgB<sub>2</sub> 초전도 박막의 홀 전도도의 온도 의존성

정순길<sup>a</sup>, 성원경<sup>a</sup>, 허지영<sup>a</sup>, 이태경<sup>a</sup>, 강원남<sup>\*,a</sup>  
최은미<sup>b</sup>, 김형진<sup>b</sup>, 이성익<sup>b</sup>

### Abstract

We have measured the Hall conductivity ( $\sigma_{xy}$ ) of *c*-axis-oriented MgB<sub>2</sub> thin films as functions of temperatures and magnetic fields. We found that the Hall conductivity ( $\sigma_{xy}$ ) is expressed by the sum of two terms,  $\sigma_{xy} = C_1/H + C_3H$ , where the coefficient  $C_1$  and  $C_3$  are independent of the magnetic fields and have positive values. The coefficient  $C_1$  is strongly dependent on the temperature, while the  $C_3$  is weakly dependent on the temperature. We have obtained that the  $C_1$  is proportional to  $(1 - T/T_c)^n$  with  $n = 4.2$ , which is consistent with the data observed in La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> superconductors with low anisotropy ratio.

*Keywords* : MgB<sub>2</sub> thin film, Hall conductivity, Hall effect, time-dependent Ginzburg-Landau theory

### I. 서론

1965년 초전도 상태의 Nb과 In에서 처음으로 홀 효과(Hall effect)가 관측된 [1] 이후로 초전도체에서 홀 효과에 관한 수많은 연구가 진행되어왔다 [2-7]. 하지만 아직 초전도 상태에서의 홀 효과에 대한 근원은 밝혀지지 않고 있

다. 홀 효과는 제2종(Type-II) 초전도체에서 볼텍스 운동(vortex motion)을 설명하기 위해 중요한 현상 중의 하나이다.

대부분의 제2종 초전도체에서는 홀 효과 관측 시 홀 부호가 바뀌는 현상(Hall sign anomaly)을 보이는데, 이러한 현상은 홀 부호는 항상 양수 값을 가진다는 Bardeen-Stephen과 [8] Nozières-Vinen의 [9] 이론으로는 설명할 수가 없다. 하지만 Kopnin, Ivlev, Kalatsky와 [10] Dorsey에 [11] 의해 제안된 시간에 의존하는

\*Corresponding author. Fax : +82 31 290 7055

e-mail : wnkang@skku.ac.kr

긴즈버그-란다우 이론(time-dependent Ginzburg-Landau theory: TDGL theory)으로 홀 부호가 바뀌는 것을 설명 할 수 있다. 이 이론에 따르면 홀 전도도( $\sigma_{xy}$ )는 볼텍스와 quasiparticles 각각의 운동에 영향을 받으며 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma_{xy} = \sigma_{xy}^n + \sigma_{xy}^f \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{xy}^n$ 는 quasiparticles의 운동에 의한 항으로 자기장의 세기에 비례하고( $\propto H$ ),  $\sigma_{xy}^f$ 는 볼텍스 운동에 의한 항으로 자기장의 세기에 반비례( $\propto 1/H$ )한다.

긴즈버그-란다우 이론에 기초하여 홀 전도도를 연구한 사례들을 몇 가지 살펴보면 untwined  $\text{YB}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$  (YBCO) [7] 단결정은 두 항의 합( $\sigma_{xy} = C_1/H + C_3H$ )으로, 수은계 초전도 박막은 [12] 세 항의 합( $\sigma_{xy} = C_1/H + C_2 + C_3H$ )으로 나타내어진다. 그리고  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  (LSCO) 단결정 박막의 [13] 경우 Sr의 첨가량에 따라 홀 전도도가 변하게 되는데 Sr의 첨가량이 적은 경우( $x = 0.1 - 0.2$ ) 세 항의 합( $\sigma_{xy} = C_1/H + C_2 + C_3H$ )으로, Sr이 과다 첨가된 경우( $x = 0.24$ ) 두 항의 합( $\sigma_{xy} = C_1/H + C_3H$ )으로, 각각 표현된다. 여기서  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ 는 자기장에는 의존하지 않고 온도에 의존하는 계수들로  $C_1$ 과  $C_3$ 는 각각 볼텍스와 quasiparticles의 운동에 관련된 계수들이고,  $C_2$ 는 물질의 비등방성에 의존하는 계수이다. 식  $C_1 \sim (1-T/T_c)^n$ 을 통한  $C_1$ 의 온도 의존성을 살펴보면 YBCO의 경우  $n = 2$ , LSCO의 경우  $n = 2-3$ , 그리고 수은계 초전도 박막의 경우  $n = 1.8-2.3$ 으로 관측되었다. LSCO의 경우 Sr의 첨가량이 증가할수록 비등방성이 감소하고, 이에 따라 계수  $C_2$ 의 값도 감소하는 경향을 보인다. 또한, Sr이 과다 첨가된 경우 홀 부호의 바뀌는 현상이 사라짐을 보인다.

$\text{MgB}_2$  초전도 박막의 경우 비등방성이 작고 [14, 15], 홀 부호의 바뀌는 나타나지 않으므로 [16, 17] 비등방성이 작지만 홀 부호의 바뀌는 나타나는 untwined YBCO 단결정보다 Sr이 과

다 첨가된 LSCO 초전도 단결정 박막과 더 흡사하다고 할 수 있다.

본 논문에서 우리는  $\text{MgB}_2$  초전도 박막의 홀 전도도의 자기장에 대한 의존성을 살펴보고, 긴즈버그-란다우 이론에 기초하여 나타나는 홀 전도도를 구성하는 각 항들의 계수가 온도에 어떻게 의존하는지를 조사해 보았다.

## II. 실험방법

$\text{MgB}_2$  초전도 박막은 pulsed laser deposition (PLD)과 후 열처리 방법(post-annealing techniques)을 이용하여 만들었는데, 먼저 고진공( $\sim 10^{-7}$  Torr) 하에서 PLD를 이용하여  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $1\bar{1}02$ ) 기판 위에 B 박막을 증착하고, 이것을 Ar 분위기의 Ta 관에 Mg과 함께 넣고 밀봉한 뒤 후-열처리함으로써 얻을 수 있었다[18]. X-선 회절(XRD) 분석을 통해  $c$ -축으로 아주 잘 성장한 것과 불순물의 함량( $< 1\%$ )이 거의 없는 것을 관측할 수 있었다. 외부에서 인가한 자기장이 없을 때, 15 K의 온도에서 임계 전류 밀도( $J_c$ )는  $10^7 \text{ A/cm}^2$  정도의 값을 가졌다 [19]. 홀 측정(Hall measurement)을 위해 먼저 표준적인 photolithographic 방법을 이용하여  $\text{MgB}_2$  박막 위에  $1 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  크기의 직사각형 모양의 Hall-bar 무늬를 3개가 짝이 되게 만든다. 그리고 접촉저항을 줄이기 위해 각각의 접촉 pads에 Au를 입히고 난 뒤, 6 단자법(six-probe method)을 이용하여 같은 온도, 같은 외부 자기장 하에서 길이방향의 비저항( $\rho_{xx}$ )과 홀 방향의 비저항( $\rho_{xy}$ )을 동시에 측정하였다. 측정시 인가한 전류 밀도 ( $J$ )의 크기는  $10^4 \text{ A/cm}^2$ 이다.

## III. 결과 및 토의

$\text{MgB}_2$  초전도 박막의 홀 전도도( $\sigma_{xy}$ )를 구하기 위해 먼저 길이방향의 비저항( $\rho_{xx}$ )과 홀 방향의 비저항( $\rho_{xy}$ )을 측정하였다.  $\rho_{xx}$ 와  $\rho_{xy}$  측정시 인가한 전류밀도  $J = 10^4 \text{ A/cm}^2$ , 온도 10-34

K의 범위에서 자기장을 0에서 18 T까지 인가 해주었다. 각각의 온도에서 인가한 자기장의 변화에 따른  $\rho_{xx}$ 와  $\rho_{xy}$  값들을 Fig. 1 (a)와 (b)에 각각 나타내었다.  $\text{MgB}_2$  초전도 박막의 임계온도( $T_c$ )는 39 K 정도를 보였다.

Fig. 1의  $\rho_{xx}$ 와  $\rho_{xy}$  값들을 홀 전도도( $\sigma_{xy}$ )에 관한 식  $\sigma_{xy} = \rho_{xy} / (\rho_{xx}^2 + \rho_{xy}^2)$ 에 대입하여 먼저  $\sigma_{xy}$ 를 구한다. 이렇게 구한  $\sigma_{xy}$ 를 TDGL 이론에 근거한 식  $\sigma_{xy}(H) = C_1/H + C_2 + C_3H$ 와 비교해보았다. 각 온도에서  $C_2$ 의 값들은 거의 0에 가까운 값들로 무시할 수 있었으며,  $\sigma_{xy}(H)$ 를 다음과 같이 두 항의 합으로 나타낼 수 있었다.

$$\sigma_{xy}(H) = \frac{C_1}{H} + C_3H \quad (2)$$

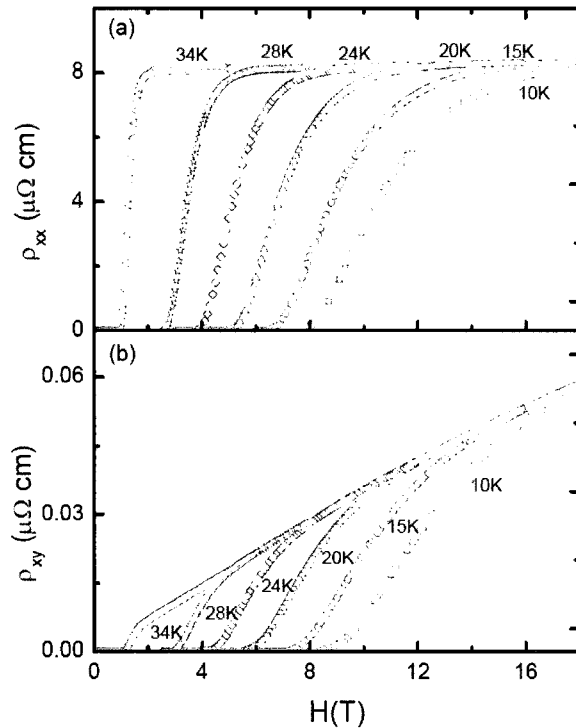


Fig. 1. The magnetic field dependence of (a) the longitudinal resistivity ( $\rho_{xx}$ ) and (b) the Hall resistivity ( $\rho_{xy}$ ) for  $\text{MgB}_2$  thin films at a reduced temperature ( $T/T_c$ ) from 0.26 up to 0.91 and at a applied current density of  $10^4 \text{ A/cm}^2$ .

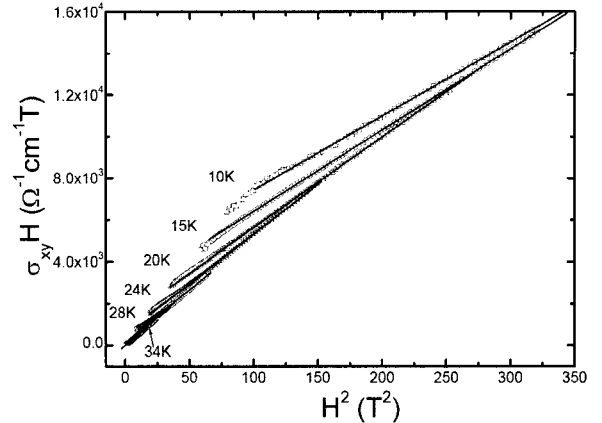


Fig. 2.  $\sigma_{xy}H$  vs  $H^2$  for a mixed-state of  $\text{MgB}_2$  thin films.

$$\sigma_{xy}H = C_1 + C_3H^2 \quad (3)$$

계수  $C_2$ 의 값은 물질의 비등방성에 비례하는 값으로 비등방성이 작은 YBCO나 [7] Sr이 과다 첨가된 LSCO 초전도체들처럼 [13] 비등방성이 작은  $\text{MgB}_2$  초전도 박막에서도  $C_2$ 의 값이 사라짐을 볼 수 있었다. 그리고 식 (2)에서 계수  $C_1$ 과  $C_3$ 를 구하기 위하여 식 (3)과 같이 변형한 뒤, 측정된  $\sigma_{xy}(H)$ 를 이용하여 Fig. 2에서와 같이 도식화하였다. Fig. 2에서 각 온도에서의 선형적인 부분의 자료들만을 이용하여 선형 (linear) fitting을 한 뒤, 각각의 기울기와  $y$ -절편을 구하였다. 여기서 구한 기울기는  $C_3$ 의 값이고,  $y$ -절편은  $C_1$ 의 값이 된다(Fig. 3).  $T_c$  근처에서의 자료들이 부족하여 시료들의 임계온도 값이 조금 차이가 낮지만, 그 자료들을 사용하여 Fig. 3과 Fig. 4에 부과하였다.

Fig. 3에서  $C_1$ 과  $C_3$ 의 온도의존성을 보면  $C_1$ 은 온도에 크게 의존하지만,  $C_3$ 는 온도에 거의 의존하지 않는 것을 볼 수 있다. 온도가 증가함에 따라  $C_1$ 의 값이 감소하는 것은 온도가 증가함에 따라 홀 전도도에 미치는 볼텍스 운동의 영향이 감소함을 의미한다. 그리고 계수  $C_1$ 의 온도의존성 정도를 살펴보기 위하여 식 (4)를 이용,  $C_1$ 과  $(1-T/T_c)$ 의 로그-로그 그래프를 통하여  $n=4.2$ 의 지수 값을 구할 수 있었다(Fig. 4). 다른 초전도체들에 [7, 12, 13] 비해  $\text{MgB}_2$

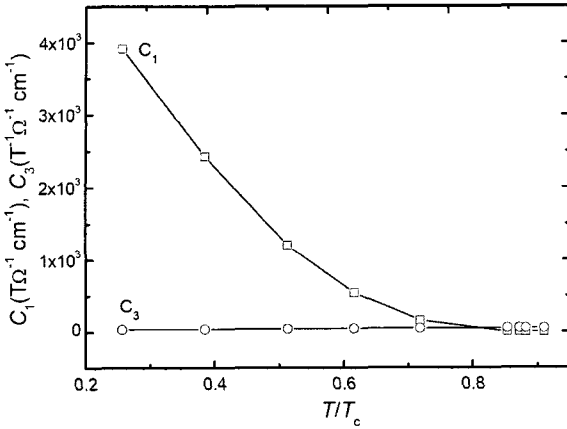


Fig. 3. Temperature dependence of the coefficient  $C_1$  and  $C_3$ .

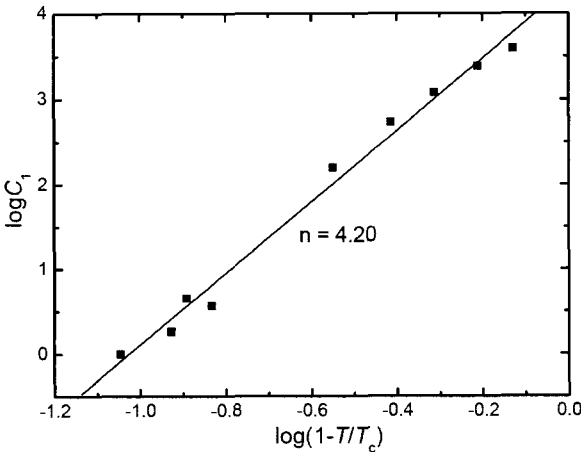


Fig. 4. The  $\log(1-T/T_c)$  vs  $\log C_1$ . We found the exponent  $n = 4.20$ .

$$C_1 \sim (1 - T/T_c)^n \quad (4)$$

초전도체의  $C_1$ 이 온도에 크게 의존하는 것은  $\text{MgB}_2$  초전도체가 아주 작은 비등방성을 [14, 15] 가지기 때문이라고 여겨진다.

#### IV. 결론

$\text{MgB}_2$  초전도 박막에서 홀 전도도( $\sigma_{xy}$ )를 관측한 결과 홀 전도도는 두 항의 합으로 잘 기술되었다( $\sigma_{xy} = C_1/H + C_3H$ ). 여기서 계수  $C_1$ 과

$C_3$ 의 온도의존성을 살펴보았는데,  $C_3$ 는 온도의존성을 거의 보이지 않지만,  $C_1$ 은  $C_1 \sim (1-T/T_c)^n$ 에서  $n = 4.2$ 라는 값을 가지고 온도에 크게 의존함을 보였다. 이것은  $\text{MgB}_2$  초전도체가 아주 작은 비등방성을 [14, 15] 가지기 때문이라고 사료된다. 그리고 YBCO나 [7] Sr이 과다 첨가된 LSCO [13] 초전도체들처럼 계수  $C_2$ 의 값이 사라짐을 볼 수 있는데, 이것은 비등방성이 작을수록  $C_2$ 의 값이 사라진다는 것을 지지해준다.

#### Acknowledgements

본 연구는 한국과학재단과 한국학술진흥재단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### References

- [1] W. A. Reed, E. Fawcett and Y. B. Kim, "Observation of the Hall effect in superconductors", *Phys. Rev. Lett.* 14, 790-792 (1965).
- [2] W. N. Kang et al., "Triple sign reversal of Hall effect in  $\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  thin films after heavy-ion irradiations", *Phys. Rev. B* 61, 722-726 (2000).
- [3] T. W. Jing and N. P. Ong, "Flux-flow Hall-effect problem: Comparison of the theory of Nozières and Vinen with results in  $2\text{H-NbSe}_2$ ", *Phys. Rev. B* 42, 10781-10784 (1990).
- [4] S. J. Hagen et al., "Anomalous flux-flow Hall effect:  $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_{4-y}$  and evidence for vortex dynamics", *Phys. Rev. B* 47, 1064-1068 (1993).
- [5] W. N. Kang, Hyeong-Jin Kim, Eun-Mi Choi, Heon Jung Kim, Kijoon H. P. Kim, H. S. Lee, and Sung-Ik Lee, "Hall effect in  $c$ -axis-oriented  $\text{MgB}_2$  thin films", *Phys. Rev. B* 65, 134508 (2002).
- [6] J. P. Rice, N. Rigakis, D. M. Ginsberg, and J. M. Mochel, "Sign reversal of the Hall effect below  $T_c$  in untwined single-crystal  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ", *Phys. Rev. B* 46, 11050-11055 (1992).
- [7] D. M. Ginsberg and J. T. Manson, "Sign reversal of the Hall effect in untwined single-crystal

- superconducting  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ”, *Phys. Rev. B* 51, 515-518 (1995).
- [8] John Bardeen and M. J. Stephen, “Theory of the Motion of Vortices in Superconductors”, *Phys. Rev.* 140, A1197 - A1207 (1965).
- [9] P. Nozières and W.R. Vinen, “The motion of flux lines in type II superconductors”, *Philos. Mag.* 14, 667 (1966).
- [10] N. B. Kopnin, B. I. Ivlev and V. A. Kalatsky, “The Flux-Flow Hall Effect in Type-II Superconductors. An Explanation of the Sign Reversal. *J. Low Temp. Phys.* 90, 1-13 (1993).
- [11] Alan T. Dorsey, “Vortex motion and the Hall effect in type-II superconductors: A time-dependent Ginzburg-Landau theory approach”, *Phys. Rev. B* 46, 8376-8392 (1992).; Robert J. Troy and Alan T. Dorsey, “Transport properties and fluctuations in type-II superconductors near  $H_{c2}$ ”, *Phys. Rev. B* 47, 2715-2724 (1993).
- [12] Wan-Seon Kim *et al.*, “Temperature-scaling behavior of the Hall conductivity for Hg-based superconducting thin films”, *Physica C* 324, 77-82 (1999).
- [13] Y. Matsuda *et al.*, “Hall anomaly in the vortex state of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ ”, *Phys. Rev. B* 52, R15749-R15752 (1995).
- [14] A. Dulčić, M. Požek, D. Paar, Eun-Mi Choi, Hyun-Jung Kim, W. N. Kang, and Sung-Ik Lee, “Coherence lengths and anisotropy in  $\text{MgB}_2$  superconductor”, *Phys. Rev. B* 67, 020507(R) (2003).
- [15] L. Lyard *et al.*, “Anisotropies of the Lower and Upper Critical Fields in  $\text{MgB}_2$  Single Crystal”, *Phys. Rev. Lett.* 92, 057001 (2004).
- [16] W. N. Kang, Hyeong-Jin Kim, Eun-Mi Choi, Heon Jung Kim, Kijoon H. P. Kim, and Sung-Ik Lee, “Universal scaling of the Hall resistivity in  $\text{MgB}_2$  superconductors”, *Phys. Rev. B* 65, 184520 (2002).
- [17] Soon-Gil Jung, W. K. Seong, W. N. Kang, Eun-Mi Choi, Heon-Jung Kim, Sung-Ik Lee, Hyeong-Jin Kim, H. C. Kim, “Scaling behavior of mixed-state Hall effect in  $\text{MgB}_2$  thin films”, *Physica C* 450, 114-117 (2006).
- [18] W. N. Kang, Hyeong-Jin Kim, Eun-Mi, Choi, C. U. Jung, Sung-Ik Lee, “ $\text{MgB}_2$  Superconducting Thin Films with a Transition Temperature of 39 Kelvin”, *Science* 292, 1521-1523 (2001).
- [19] Hyeong-Jin Kim, W. N. Kang, Eun-Mi Choi, Mun-Seog Kim, Kijoon H. P. Kim and Sung-Ik Lee, “High Current-Carrying Capability in *c*-Axis-Oriented Superconducting  $\text{MgB}_2$  Thin Films”, *Phys. Rev. Lett.* 87, 087002 (2001).