

# Hall effect of K-doped BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> superconducting thin films

Eunseon Son <sup>a</sup>, Nam Hoon Lee <sup>a</sup>, Tae-Jong Hwang <sup>b</sup>, Dong Ho Kim <sup>b</sup>, and Won Nam Kang <sup>a,\*</sup>

<sup>a</sup> Department of physics, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

<sup>b</sup> Department of physics, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

(Received 6 September 2013; revised or reviewed 25 September 2013; accepted 26 September 2013)

## Abstract

We have studied Hall effect for potassium (K)-doped BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> superconducting thin films by analyzing the relation between the longitudinal resistivity ( $\rho_{xx}$ ) and the Hall resistivity ( $\rho_{xy}$ ). The thin films used in this study were fabricated on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) substrates by using an *ex-situ* pulsed laser deposition (PLD) technique under a high-vacuum condition of  $\sim 10^{-6}$  Torr. The samples showed the high superconducting transition temperatures ( $T_c$ ) of  $\sim 40$  K. The  $\rho_{xx}$  and the  $\rho_{xy}$  for K-doped BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> thin films were measured by using a physical property measurement system (PPMS) with a temperature sweep (T-sweep) mode at an applied current density of 100 A/cm<sup>2</sup> and at magnetic fields from 0 up to 9 T. We report the T-sweep results of the  $\rho_{xx}$  and the  $\rho_{xy}$  to investigate Hall scaling behavior on the basis of the relation of  $\rho_{xy} = A\rho_{xx}^\beta$ . The  $\beta$  values are  $3.0 \pm 0.2$  in the *c*-axis-oriented K-doped BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> thin films, whereas the thin films with various oriented-directions like a polycrystal showed slightly lower  $\beta$  than that of *c*-axis-oriented thin films. Interestingly, the  $\beta$  value is decreased with increasing magnetic fields.

**Keywords** : Hall effect, K-doped BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>, superconducting thin film

## 1. 서 론

제 2종 초전도체인 철 기반 초전도체는 상전도 상태와 초전도 상태가 공존하는 혼합 상태(mixed or vortex state)가 존재한다. 혼합 상태에서는 자기다발이 물질의 내부로 침투하며, 이때 자기다발은 양자화된 상태를 가진다. 이를 볼텍스 혹은 자속양자(vortex or flux quantum)라 부른다. 볼텍스는 외부에서 흘려준 전류에 의해 로렌츠힘(Lorentz force)을 받아 운동을 하게 되고, 그 결과 초전도 상태에서 세로 저항(longitudinal resistance)과 홀 저항(Hall resistance)이 나타난다. 따라서 홀 효과(Hall effect)에 관한 연구는 볼텍스 동역학(vortex dynamics) 연구에 큰 도움을 줄 수 있다. 볼텍스 동역학에 관한 연구는 초전도체의 물성 분석 및 응용 분야에서 중요하며, 초전도체 연구에서 가장 흥미로운 분야 중 하나이다. 특히, 초전도체에서 홀 비저항의 스케일링 행태를 보여주는 실험 결과에 주목하여 보면, 세로 비저항( $\rho_{xx}$ )과 홀 비저항( $\rho_{xy}$ ) 사이의 관계를  $\rho_{xy} = A\rho_{xx}^\beta$  의 식으로 나타낼 수 있다. 구리 산화물계 고온초전도체의 경우 2보다 작은  $\beta$  값이 관측되었고 [1]–[5], MgB<sub>2</sub>는 2에 가까운 값을 [6]–[8], 그리고 최근 활발하게 연구되고 있는 철 기반 초전도체에서 전자가 도핑된 Ba(Fe,Co)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 박막의 경우는 2보다 작은 값을, 단결정은 3 근처의 값들이 보고되고 있다 [9]–[11].

본 연구에 사용된 물질은 칼륨(K)이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 초전도 박막이다. 이 화합물은 122 상을 갖는 철 기반 초전도물질 중의 하나로 알려져 있다. 2008년 초부터 연구가 활성화된 철 기반 초전도체들은 대부분 철-비소(Fe-As) 층을 가지고 있다 [12]. 특히 삼원자 화합물에 칼륨이 도핑된 Ba<sub>1-x</sub>K<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>는 철-비소 층 사이의 바륨 이온(Ba<sup>2+</sup>) 자리에 칼륨 이온(K<sup>+</sup>)을 대체함

으로써 양공(hole)이 도핑된 형태가 된다. 칼륨과 같은 양공이 도핑된 초전도 박막을 제작하는 것은 원소의 높은 휘발성 때문에 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고 본 연구 그룹에서는 성공적으로 양질의 칼륨이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 초전도 박막을 제작하였다 [13]. 이는 철 기반 초전도체 중에서 40 K 근방의 높은 초전도 임계온도( $T_c$ )를 가짐으로써 물리적 특성연구뿐만 아니라 응용 분야 연구에서도 매우 흥미로운 물질로 알려져 있다. 게다가 전자가 도핑된 Ba(Fe<sub>1-x</sub>Co<sub>x</sub>)<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 박막과의 비교 연구를 위해서도 이 물질에 대한 연구 및 이해는 매우 중요하다 할 수 있다.

본 연구를 위하여 먼저 칼륨이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 초전도 박막을 펄스 레이저 증착법과 후열처리법을 통하여 제작하고, 물성 특성 측정 장비를 이용하여 세로 저항 및 홀 저항을 넓은 범위의 자기장하에서 측정하였다. 측정 결과로부터 시료의 수송 특성을 확인하고, 홀 및 세로 비저항의 관계를  $\rho_{xy} = A\rho_{xx}^\beta$  식으로부터 논의하여  $\beta$  값을 얻을 수 있었으며, 결정 성장방향에 따른  $\beta$  값의 변화를 비교·연구하였다.

## 2. 실험방법

칼륨이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 초전도 박막은 고진공 조건 하에서 248 nm의 파장을 가지는 KrF 엑시머 펄스 레이저 증착법(pulsed laser deposition, PLD)과 후열처리 방법으로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0001) 기판 위에 성장되었다. 본 연구에 사용된 박막의 제작 과정은 [13]에 자세하게 설명되어 있다. 먼저 상온의 기판 온도에서 레이저의 에너지 밀도는 3.5 J/cm<sup>2</sup>, 타겟과 기판 사이의 거리는 4 cm, 그리고 5 Hz의 레이저 빔 진동수를 사용하여  $\sim 10^{-6}$  Torr의 고진공하에서 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> precursor 박막을 증착하였다.

\* Corresponding author: wnkan@skku.edu

이렇게 제작된 precursor 박막을 칼륨 덩어리와 함께 석영관에 넣어 밀봉시킨 뒤, 725 °C의 온도에서 후열처리하여 양질의 칼륨이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 초전도 박막을 얻을 수 있었다.

세로 및 홀 저항 측정시 접촉저항을 줄이기 위하여 아르곤 이온 밀링(Ar-ion milling) 장치를 이용하여 제작된 박막의 표면을 깨끗하게 한 뒤, 표준 포토리소그래피(standard photolithography) 기법을 사용하여 6-probe 홀바(Hall bar) 무늬를 만들었다[14]. 이 여섯 개의 배열을 사용하여 우리는 같은 온도, 같은 자기장하에서  $\rho_{xx}$ 와  $\rho_{xy}$ 를 동시에 측정할 수 있었다.

이렇게 준비된 시료의 수송 특성은 Quantum Design사의 물성 특성 측정 장비(physical property measurement system, PPMS)를 이용하여 측정하였다. 자기장은 시료의 표면에 수직한 방향으로 가하였고, 100 A/cm<sup>2</sup>의 전류 밀도를 흘려주었다. 그림 3 내부의 위쪽에 보이는 홀 패턴에서 1-2를 통해 전류를 흘려주면서 세로 비저항(5-6)과 홀 비저항(3-4)을 동시에 측정할 수 있도록 준비하였다. 측정 결과로부터 정확한 홀 비저항 값을 추출해내기 위하여 자기장을 시료에 수직한 방향으로 걸었을 때의 비저항 값과( $\rho_{xy+}$ ) 반대 방향으로 걸었을 때의 비저항 값을 얻어내어  $\rho_{xy} = (\rho_{xy+} - \rho_{xy-})/2$  식으로부터 구하였다. PPMS 이용하여 자기장은 9 T까지 가하였고, 28 K에서 305 K까지의 온도 범위에서 측정하였다.

### 3. 결과 및 논의

홀 측정에 앞서, 주사 전자 현미경(scanning electron microscopy, SEM)을 사용하여 제작된 칼륨이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 박막의 표면 형태와 두께를 확인하였다. 그림 1(a)의 표면 사진은 결정들간의 연결성이 좋음을 보여주며, 그림 1(b)의 단면 사진으로부터 박막의 두께가 400 nm임을 얻었다. 에너지 분산형분석기(energy dispersive spectroscopy, EDS)를 이용하여 증착된 박막의 성분 분석 결과, 원자 구성 비율은 Ba:K:Fe:As = 0.55:0.35:2:2.1로서 Ba<sub>1-x</sub>K<sub>x</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>에서  $x = 0.35$  정도의 성분 함량을 보였다. 이는 본 연구진에서 제작된 박막이 최적의 칼륨 도핑함량( $x \approx 0.4$ )과 비슷한 칼륨 양을 가진다고 볼 수 있다.

그림 2는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(0001) 기판 위에 증착된 칼륨이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 초전도 박막의 엑스선 회절 무늬의  $\theta - 2\theta$  스캔 결과인데, 칼륨이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 초전도체가 기판으로 사용된 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>와 다른 결정구조 및 격자상수를 가지고 있음에도 불구하고, (00 $l$ ) 방향의 봉우리가 잘 성장되었음을 보여준다. 이는 칼륨이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 이 기판 표면에 수직하게  $c$ -축 방향으로 매우 잘 성장되었음을 가리킨다.

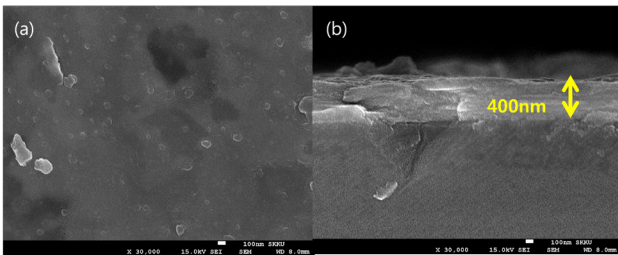


Fig. 1. (a) Surface morphology and (b) the cross-sectional image for K-doped BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> superconducting thin films.

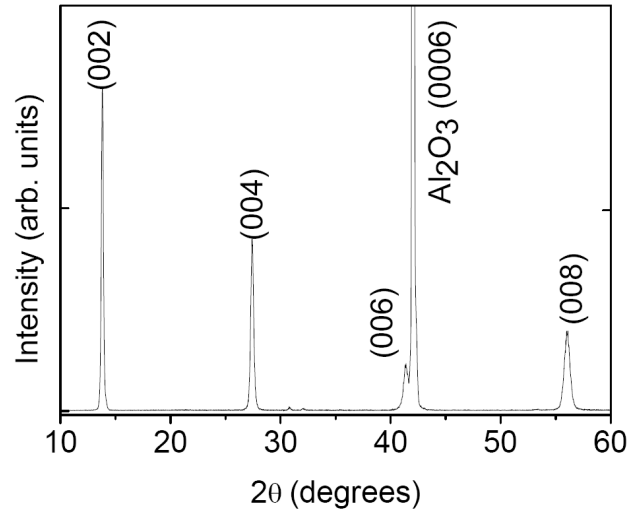


Fig. 2. X-ray diffraction patterns for K-doped BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> superconducting thin films.

단일 방향으로 성장한 박막은 여러 방향으로 성장된 박막에서보다 물리적 특성을 연구하는데 유리하다.

시료에 자기장이 인가되지 않았을 때 칼륨이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 초전도 박막의  $\rho_{xx}$ 의 온도의존성 결과를 그림 3에 나타내었다. 초전도 임계온도( $T_c$ )는 약 41 K, 초전도 전이너비(superconducting transition width,  $\Delta T_c$ )는 약 2 K이며, 잔류 비저항 비(residual resistivity ratio, RRR)는 6.5 이다. 이 박막의  $T_c$ 는 35 K 및 38 K의  $T_c$ 를 보이는 다결정 및 단결정보다 다소 높은  $T_c$ 를 보였다 [15]–[18].

홀 바 패턴을 입힌 칼륨이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 초전도 박막의  $\rho_{xx}$ 와  $\rho_{xy}$ 를 PPMS를 통해 자기장을 고정하고 온도를 변화시키며 측정하였다. 그림 4(a)와 (b)는 각각 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기판 위에 증착시킨 칼륨이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 초전도 박막의 0.5에서 9 T까지의 다양한 자기장에서의  $\rho_{xx}$ 와  $\rho_{xy}$ 의 온도의존성을 보여준다. 그림 4(a)에서 볼 수 있는 바와 같이,  $\rho_{xx}$ 는 자기장이 증가함에 따라 초전도 임계온도가 더 낮아지는 경향성을 보이고 전이 너비도 더

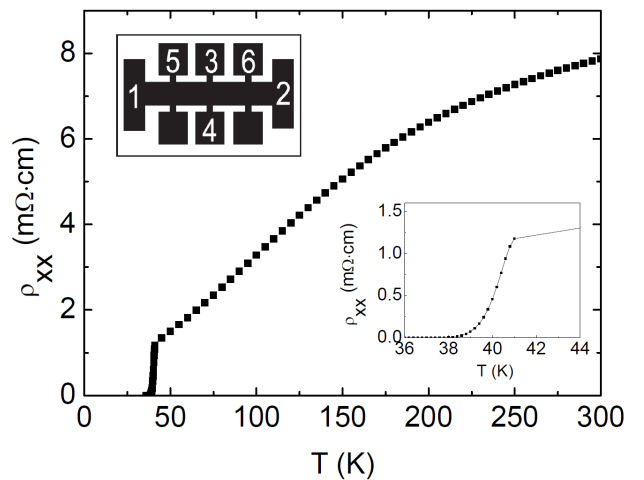


Fig. 3. Temperature dependence of the  $\rho_{xx}$  for K-doped BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> superconducting thin films. The upper inset is a Hall bar pattern and the lower inset is a magnified view of the  $\rho_{xx}$ - $T$  curve near  $T_c$ .

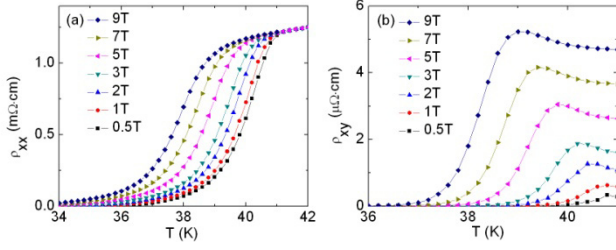


Fig. 4. Temperature dependence of (a)  $\rho_{xx}$  and (b)  $\rho_{xy}$  for K-doped  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  superconducting thin films in a magnetic field up to 9 T.

넓어짐을 보인다. 그에 대응하는  $\rho_{xy} - T$  결과는 그림 4(b)에 나타내었다. 0.5부터 9 T까지의 자기장하에서 홀 비저항의 부호 변경(sign reversal)은 관측되지 않았다. 초전도 전이 직전에  $\rho_{xy}$  값은 상전도 상태에서 온도가 감소함에 따라 증가하다가 초전도 상태가 시작되면서부터 임계온도 아래에서 온도 감소에 따라 감소한다. 이는 온도가 감소함에 따라 전하 수송자가 감소하여 홀 비저항이 증가하다가 초전도 상태가 되어 저항의 감소에 의하여 전체 홀 저항이 감소함에 기인한다.

그림 4에서의 온도 쏠기 결과로부터 홀 비저항의 스케일링 행태를 살펴보고자  $x$  축에  $\rho_{xx}$  와  $y$  축에  $\rho_{xy}$  를 로그-로그 스케일을 이용하여 그림 5에 재도표화하여 나타내었다.  $\rho_{xx}$  와  $\rho_{xy}$  의 관계식  $\rho_{xy} = A\rho_{xx}^\beta$  에서  $\beta$  값은 도표의 기울기로부터 얻을 수 있었다.  $c$ -축 성장된 박막의 경우  $\beta = 3.0 \pm 0.2$  의 값을 보였으며, 이  $\beta$  값은 자기장이 증가함에 따라 감소하는 경향성을 보였다. 이는 자기장이 증가함에 따라 세로 비저항( $\rho_{xx}$ )에 비해 홀 비저항( $\rho_{xy}$ )의 크기 변화가 상대적으로 강하기 때문이라 여겨진다. Table 1에 자기장에 따른  $\beta$  값의 크기를 정리하였다.

$\rho_{xx}$  와  $\rho_{xy}$  의 스케일링 행태에서  $\beta$  값이 3이 되는 실험 결과는 전자가 도핑된  $\text{Ba}(\text{Fe},\text{Co})_2\text{As}_2$  단결정에서 보고된 적이 있으나 [10], 그 현상을 설명하기 위하여 원인을 분석하여 체계적으로 정리가 된 이론은 아직까지 제안되지 않았다. 이전의 이론으로서 볼텍스 운동과 관련 지어 설명하려는 몇 시도가 있었는데, 먼저 Dorsey와 Fisher는

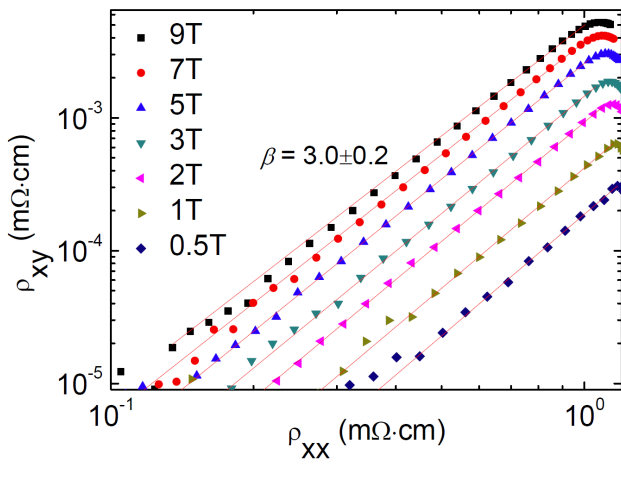


Fig. 5. Scaling behaviors between  $\rho_{xx}$  and  $\rho_{xy}$  for the K-doped  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  superconducting thin films. Magnetic fields are applied from 0.5 to 9 T, and the slopes ( $\beta$ ) of  $\log\rho_{xx} - \log\rho_{xy}$  curves are around  $3.0 \pm 0.2$ .

TABLE I

MAGNETIC FIELD DEPENDENCE OF THE  $\beta$  VALUES.

$H$ (T)	0.5	1	2	3	5	7	9
$\beta$	3.07	3.02	2.97	2.92	2.83	2.82	2.82

$\beta \approx 1.7$ 을 보이는 홀 비저항의 스케일링 행태를 입자-양공 대칭성 (particle-hole symmetry)으로 설명하였다. 이로부터 볼텍스-글래스(vortex-glass) 전이에서 적당한  $\beta$  값을 결정하기 위해 입자-양공 비대칭 요소가 특정 값으로 지정되어야 한다고 주장하였다. 여기서 적당한  $\beta$  값을 결정할 수 있는 특정한 영역은 볼텍스-글래스 전이 온도  $T_g$  근처로 제한된다 [19]. 이후 1992년에 Vinokur, Geshkenbein, Feigel'man, 그리고 Blatter (VGFB)에 의하여 제안된  $\beta \approx 2$ 가 되는 모델은 열적으로 보조되는 자속 흐름(thermally assisted flux flow, TAFF) 영역에서 이루어진 실험에서 잘 맞으며, 특정한 영역의 자기장하에서 자속 고정 힘(flux pinning force)에 독립적임을 설명한다.

결과적으로 식  $\rho_{xy} = A\rho_{xx}^\beta$  에서  $A$  를 특정 상수로 놓음으로써 고정 힘의 크기에 상관없이 볼텍스 운동의 속도가 독립적이라고 주장하고 있다 [20]. 그러나 혼합 상태에서의 홀 효과는 열적 요동(thermal fluctuation) 및 고정 힘 효과도 고려하여 볼텍스 운동에 대하여 설명할 수 있어야 할 것이다 [21]. 이 이론들은 모두 제 2종 초전도체들의 실험 결과를 기반으로 하여 이끌어낸 현상론적인 이론들이다. 하지만 그것들 중 어떤 것도 본 실험 결과를 설명할 수 있는 것이 없다. 그러므로  $\beta = 3.0 \pm 0.2$ 을 설명할 수 있는 새로운 스케일링 이론에 대한 체계적인 연구가 필요할 것이다.

우리는  $c$ -축 성장된 박막과 다결정성 박막 시료가 스케일링 행태에 있어서 동일한 경향성을 보이는지를 살펴보기 위해 5 T 및 9 T의 자기장하에서의  $\beta$  값을 비교해 보았다. 이를 위해 사용한 다결정 박막은  $a$ -축과  $c$ -축 성장 방향성을 가졌고, 초전도 임계온도 및 전이 너비는 각각  $\sim 40$  K와 2 K 정도로  $c$ -축으로 성장된 시료들과 비슷한 값을 보였다. 그림 6(a)와 (b)에서 볼 수 있는 바와 같이, 흥미롭게도  $\rho_{xy}$ 는 두 시료가 거의 비슷한 값을 보이는데 반해,  $c$ -축으로 성장된 박막의  $\rho_{xx}$ 는 다결정

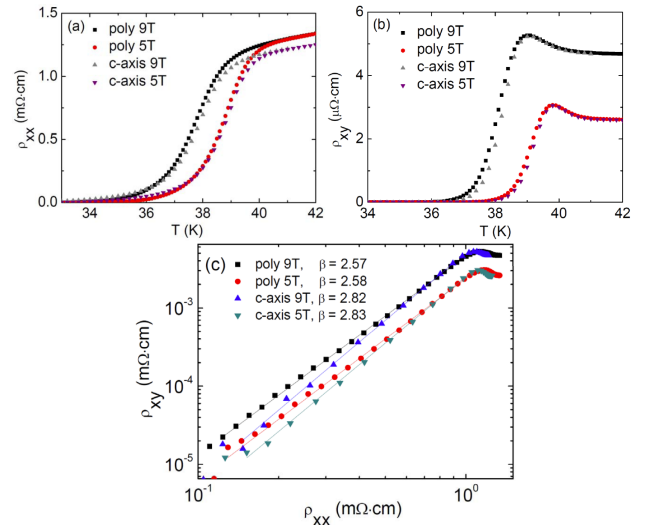


Fig. 6. Temperature dependences of (a)  $\rho_{xx}$  and (b)  $\rho_{xy}$  for polycrystalline and  $c$ -axis-oriented K-doped  $\text{BaFe}_2\text{As}_2$  thin films and (c) their Hall scaling behaviors at 5 and 9 T.

시료보다 다소 작은 값을 보였다. 두 가지 시료의  $\rho_{xx}$ 와  $\rho_{xy}$  사이의 관계를 로그-로그 스케일로 재도표화하여 그림 6(c)에 나타내었다. 두 시료 모두 자기장 크기에 상관없이 거의 일정한  $\beta$  값을 보였으며,  $c$ -축 성장된 박막의 경우  $\beta \approx 2.8$ , 다결정 박막의 경우 이보다 다소 작은 2.6 정도의 값을 보였다. 이는 두 시료간의  $\rho_{xx}$  크기 차이로 인해  $c$ -축으로 성장된 박막의  $\beta$  값이 다결정 박막보다 큰 값을 보이는 것으로 판단된다. 이 경우, 결정성장 방향에 따른 세로 비저항( $\rho_{xx}$ )의 크기 차이의 원인을 분석한다면,  $\beta$  값의 차이를 설명할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

우리는 칼륨이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 초전도 박막의 홀 스케일링 행태(Hall scaling behavior)를 연구하기 위하여  $c$ -축으로 성장된 박막의 혼합 상태에서의 세로 비저항( $\rho_{xx}$ )과 홀 비저항( $\rho_{xy}$ )을 측정하고 분석하였다. 100 A/cm<sup>2</sup>의 전류 밀도를 흘려주며 0.5에서 9 T까지의 고정된 자기장하에서 온도 쓸기 방식을 이용하여 측정된  $\rho_{xx}$ 와  $\rho_{xy}$  결과를 로그-로그 스케일을 이용하여 분석해본 결과,  $c$ -축 성장된 박막의  $\beta$  값은  $3.0 \pm 0.2$ 으로 관측되었으며, 이 값들은 자기장이 증가함에 따라 감소함을 보였다. 다결정성 박막의  $\beta$  값과 비교하여 보면  $c$ -축 성장된 박막의  $\beta$  값이 다소 큰 값을 보였다. 칼륨이 도핑된 BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 초전도 박막에서 보이는  $\beta \approx 3$ 이 되는 스케일링 행태를 설명하기 위한 이론은 아직 제시된 것이 없으므로 더 심도 있는 연구를 진행하여 이러한 실험 결과를 설명할 수 있는 새로운 스케일링 이론이 개발되어야 할 것이다.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Mid-career Researcher Program through NRF grant funded by the Ministry of Education, Science & Technology (MEST) (No. 2010-0029136).

#### REFERENCES

- [1] S. J. Hagen, C. J. Lobb, R. L. Greene, M. G. Forrester, and J. H. Kang, *Phys. Rev. B* 41, pp. 11630, 1990.
- [2] J. Luo, T. P. Orlando, J. M. Graybeal, X. D. Wu, and R. Muenchausen, *Phys. Rev. Lett.* 68, pp. 690, 1992.
- [3] A. V. Samoilov, *Phys. Rev. Lett.* 71, pp. 617, 1993.
- [4] R. C. Budhani, S. H. Liou, and Z. X. Cai, *Phys. Rev. Lett.* 71, pp. 621, 1993.
- [5] W. N. Kang, D. H. Kim, S. Y. Shim, J. H. Park, T. S. Hahn, S. S. Choi, W. C. Lee, J. D. Hettinger, K. E. Gray, and B. Glagola, *Phys. Rev. Lett.* 76, pp. 2993, 1996.
- [6] W. N. Kang, H.-J. Kim, E.-M. Choi, H. J. Kim, K. H. P. Kim, and S.-I. Lee, *Phys. Rev. B* 65, pp. 184520, 2002.
- [7] W. N. Kang, H. J. Kim, H.-J. Kim, E.-M. Choi, K. H. P. Kim, H. S. Lee, and S.-I. Lee, *Supercond. Sci. Technol.* 16, pp. 237-240, 2003.
- [8] W. N. Kang, C. U. Jung, K. H. P. Kim, M.-S. Park, S. Y. Lee, H.-J. Kim, E.-M. Choi, K. H. Kim, M.-S. Kim, and S.-I. Lee, *Appl. Phys. Lett.* 79, pp. 982-984, 2001.
- [9] F. Rullier-Albenque, D. Colson, A. Forget, and H. Alloul, *Phys. Rev. Lett.* 103, pp. 057001, 2009.
- [10] L. M. Wang, U.-C. Sou, H. C. Yang, L. J. Chang, C.-M. Cheng, K.-D. Tsuei, Y. Su, T. Wolf, and P. Adelman, *Phys. Rev. B* 83, pp. 134506, 2011.
- [11] H. Sato, T. Katase, W. N. Kang, H. Hiratsmu, T. Kamiya, and H. Hosono, *Phys. Rev. B* 87, pp. 064504, 2013.
- [12] Y. Kamihara, T. Watanabe, M. Hirano, and H. Hosono, *J. Am. Chem. Soc.* 130, pp. 3296, 2008.
- [13] N. H. Lee, S.-G. Jung, D. H. Kim, and W. N. Kang, *Appl. Phys. Lett.* 96, pp. 202505, 2010.
- [14] W. N. Kang, H.-J. Kim, E.-M. Choi, H. J. Kim, K. H. P. Kim, H. S. Lee, and S.-I. Lee, *Phys. Rev. B* 65, pp. 134508, 2002.
- [15] J. D. Weiss, C. Tarantini, J. Jiang, F. Kametani, A. A. Polyanskii, D. C. Larbalestier and E. E. Hellstrom, *Nat. Mater.* 11, pp. 682, 2012.
- [16] J. G. Checkelsky, R. Thomale, Lu Li, G. F. Chen, J. L. Luo, N. L. Wang, and N. P. Ong, *Phys. Rev. B* 86, pp. 180502, 2012.
- [17] H. Yang, H. Luo, Z. Wang, and H.-H. Wen, *Appl. Phys. Lett.* 93, pp. 142506, 2008.
- [18] H. Q. Yuan, J. Singleton, F. F. Balakirev, S. A. Baily, G. F. Chen, J. L. Luo, and N. L. Wang, *Nature* 457, pp. 565-568, 2009.
- [19] A. T. Dorsey, *Phys. Rev. B* 46, pp. 8376, 1992.
- [20] V. M. Vinokur, V. B. Geshkenbein, M. V. Feigel'man, and G. Blatter, *Phys. Rev. Lett.* 71, pp. 1242, 1993.
- [21] Z. D. Wang, J. D. Dong, and C. S. Ting, *Phys. Rev. Lett.* 72, pp. 3875, 1994.