

회전 실험에서의 다결정 $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ 초전도체내의 vortex flux의 거동

11-9-13

Behavior of the Vortex Flux in a Polycrystalline $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ Superconductor in a Rotational Experiment

박성재, 김용석, 김채옥

(Seong-Jae Park, Yong-Seok Kim, Chae-Ok Kim)

Abstract

Rotational Magnetization-vector measurements have been performed on a polycrystalline $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ sample in a field-cooled condition at 4.2 K. The experimental results show that vortex flux density (B) consists of 3 groups : (1) a weak pinning part (B_w) which stays at a fixed angle relative to the magnetic field $f(H)$; (2) a strong pinning part (B_s) which rotates rigidly with the sample and has same magnitude with the sample rotation, and (3) an intermediate pinning part (B_i) which rotates rigidly with the sample, but whose magnitude changes with the sample rotation. Our results have been explained in terms of a distribution in the strength of the vortex pinning torque and a repulsive intervortex torque.

Key Words (중요 용어) : Rotational Magnetization Vector Measurement(회전 자화벡터 측정실험), Shoulder part(테두리부분), Core part(핵심부분), Intermediate part(중간부분), Vortex pinning torque(소용돌이끼움 토크)

1. 서 론

2종 초전도체에 있어서 결정내의 불순물과 같은 여러 요인들과 상호작용에 의한 소용돌이의 끼움은 고 전류 부분의 응용에 있어서 많은 관심을 계속적으로 끌고 있다. 그러므로, 소용돌이 끼움의 강도에 대한 결정이 대단히 중요하다. 임계상태모형^{1,2,3)} 덕분에, 그와같은 결정은 자기장의 이력곡선의 폭으로부터 이루어 질 수 있고, 더불어 실험적인 방법에 광범위하게 사용되어졌다^{4,5)}. 회전 자화 벡터(RMV) 측정에 의해 보다 직접적인 방법이 제공되어졌으며 이것은 시료의 원판면에 대하여 평행하게 인가된 고정된 장 내에서 원판면의 축에 대하여 회전하며 측정하는 것을 말한다.

RMV 측정을 이용하여, Kouvel 등은^(6,7,8) 자기 다발 밀도 B 가 마찰을 가진 성분 B_F 와 회전성분 B_R 의 두 개의 부분으로 나누어 질 수 있음을 보였다. 시료가 외부의 자기장(H)에 대하여 각 θ 만큼 회전 되었을 때 ; 만약 끼움중심에서 기인한 소용돌이선의 최대 토크(τ_{max})가 H 에 의한 토크 τ_H 보다 크다면, 소용돌이선들은 시료에 고정되어 회전할 것이다. 그러나 만약 $\tau_{max} < \tau_H$ 라면, 소용돌이선들은 시료내에서 두 토크간의 균형이 이루어질 때 까지 H 를 향하여 회전하게 될 것이다. 그러므로, 시료내에 많은 소용돌이선들이 있고 최대 끼움 토크의 강도에 대한 분포가 있다면, 어떤 선들은(B_R) 시료에 고정되어 계속적으로 회전하는 반면, 나머지는(B_F) H 에 대하여 다양한 각도에 분포되어 남아있을 가능성이 존재하게 된다.

Boyer^{9,10,11)}등에 의해 제안된 일반적인 임계상태 모형(generalized critical state model)에서도 동일한 결론을 보였다. 이 모형에 의하면, 자기장에 대하여 시료를 회전할 때, 초전도체 내의 다발의 투과는 다

* : 한양대학교 물리학과

(서울시 성동구 행당동 17번지, Fax: 294-3592

E-mail :)

1998년 4월 14일 접수, 1998년 7월 13일 심사완료

음과 같이 발생한다. 표면에 가까운 다발은 장의 방향을 따라서 정렬되어 남아있는 반면, 시료의 깊은 곳에서는 장으로부터 기울어져 있고 시료 본래의 방향을 향하고 있다. 그러므로 그 방향에 대하여, 다발은 두 개의 부분으로 나누어진다. ; 시료 내부의 깊은 곳에 있고, 시료에 대하여 다발이 고정되어 회전하는 핵심영역(core region : B_R)과 시료의 표면에 존재하여, 외부장의 방향으로 정렬하는 테두리영역(shoulder region : B_F)이 그것이다.

위의 두 모형의 공통점은 시료가 회전할 때 소용돌이들의 꽃음력의 분포에 의해, 소용돌이-다발은 시료의 회전각(θ)과 같이 회전하는 부분과 외부장에 대하여 일정한 각에서 머무는 부분으로 구분할 수 있다는 점이다. 우리는 이들의 공통점을 θ 에 대하여 Fourier변환으로 일반화하여 보았다. 이로부터 대부분의 소용돌이-다발은 위의 두 부분으로 나누어 지지만, 중간 형태를 취하는 제 3의 부분이 있음을 알 수 있었다.

2. 실험 방법

우리가 실험에 사용한 시료는 U.C Davis에 있는 T.J.Goodwin박사에 의해 준비된 소결한 원판형의 $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ 시료이다. 선형적인 크기가 $\sim 0.1 \text{ mm}$ 인 불규칙적인 $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ 다결정 입자로 구성된 분말을 작은 양의 접착제와 함께 혼합하여 직경이 5 mm이고 두께가 0.5 mm인 시료 원판으로 압착하였다. 이렇게 제작한 다결정 원판 시료는 자기 이력 곡선 실험에 의하면, 소용돌이들의 평균 꽃음력의 결정방향성에 있어서 어떠한 선호성도 보이지 않았다. 이와같은 시료에 대하여 저온의 진동 시료 자화장치에서 RMV 측정을 수행하였으며, 두 쌍의 픽업 코일을 서로 마주 보도록 사각형의 형태로 설치하여 시료면에 대하여 수평으로 인가된 고정된 장에 대한(자기소거 인자가 극히 작아질 수 있도록) 시료 자화(M)의 평행(M_L)과 수직(M_T)성분을 측정하였다. 측정이 진행되는 동안, 원판의 시료를 그 축을 중심으로 360° 까지 단계적으로 회전시킨다. 시료의 한바퀴 회전은 보통 20분 정도가 소요되므로, 소용돌이의 얽힘(vortex creep)효과가 매우 작아 어떤 중요한 복잡성도 발생하지 않는다고 생각된다.

시료를 회전시키면서 시료 원판면에 인가된 고정된 장 H 에 대한 상대적인 각 θ 에 대하여 자화 성분 M_L 과 M_T 를 측정하였다. 그림 1의 벡터 도해와 관련하여, H 에 평행한 B 성분인 B_L 과 H 에 수직한

B 성분인 B_T 는 각각 다음과 같이 표현되며

$$B_L = H + 4 \pi (M_L \cos \theta + M_T \sin \theta) \quad (1)$$

$$B_T = 4 \pi (M_L \sin \theta - M_T \cos \theta) \quad (2)$$

여기에서 시료 원판면에 대한 자기소거인자는 무시하였다

3. 결과 및 토의

500 Oe의 외부장을 인가한 상태에서 4.2K까지 냉각하여 θ 에 대한 B_L 과 B_T 의 측정결과를 표시한 것이 그림 2이다. 초기전이 현상으로 인한 처음 180° 동안의 급격한 변화(기호가 없는 부분)

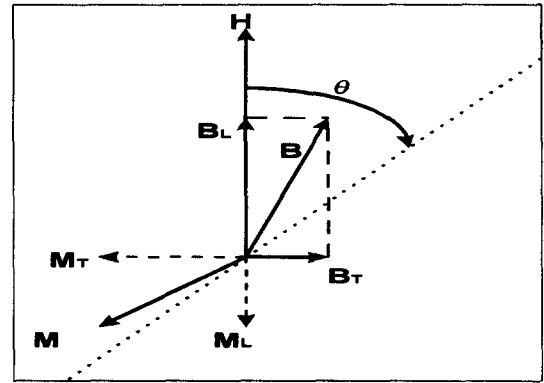


그림 1. 외부장 H , 시료회전각 θ , 다발 밀도 B 그리고 M_L (H 에 평행한 M 성분)과 M_T (H 에 수직한 M 성분)를 측정된 전체 시료 자화 M 을 보여주는 벡터도해

Fig. 1. Vector diagram showing field H , sample rotation angle θ , flux density B and total sample magnetization M measuring M_L (M component parallel to H), M_T (M component perpendicular to H)

는 무시하였고, 180° 이상의 점들은 거의 조화곡선과 같은 모습을 보이기 시작하므로 회전적 안정 상태라 볼 수 있다. 소용돌이 꽃음력(vortex pinning force)의 강도 분포에 기인하여, J.S.Kouvel 등과^(6,8) S.K.Hasanain 등은⁽¹¹⁾ 다음과 같은 식을 제시하였다.

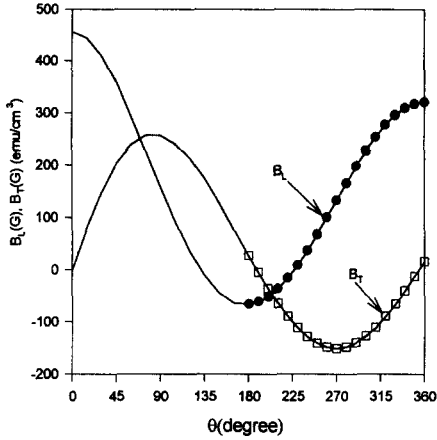


그림 2. 외부장 $H=5000\text{Oe}$ 를 인가한 상태에서 4.2K 까지 냉각한 다결정 $Y_1Ba_2Cu_3O_{7-\delta}$ 의 θ 대 B_L 과 B_T (H 에 대한 B 의 평행과 수직방향 성분)의 그림. 사각과 원의 표시는 각각 $\theta=180^\circ$ 까지 계속되는 초기 전이 간격 후의 θ 대 B_L 과 θ 대 B_T 를 나타낸다.

Fig. 2. For field cooling in $H=5000\text{Oe}$, θ vs. B_L , B_T are shown for lincreasing sample rotation angle θ . Square and circle signs represent θ vs. B_L and θ vs. B_T , respectively, after an initial transient interval.

$$B_L = B_F \cos \theta_0 + B_R \cos \theta$$

$$B_T = B_F \sin \theta_0 + B_R \sin \theta$$

B_F 는 시료를 회전하는 동안에 외부장 H 에 대하여 일정한 각 θ 에 머무르고 있는 마찰성분이고, B_R 은 시료와 같이 회전하는 회전성분이다. 이와같은 연구에 있어서 만약 위의 가정을 일반화 할 수 있다면, 그것들을 아마도 다음과 같이 표현할 수 있을 것이다.

$$B_L = B_w \cos \theta_0 + B_1^L \cos \theta + B_2^L \cos 2\theta + \dots \\ + C_1^L \sin \theta + C_2^L \sin 2\theta + \dots (3)$$

$$B_T = B_w \sin \theta_0 + B_1^T \sin \theta + B_2^T \sin 2\theta + \dots \\ + C_1^T \cos \theta + C_2^T \cos 2\theta + \dots (4)$$

500Oe 의 FC 상태에 대하여 4.2K 에서, B_L 의 각각의 계수들은 $B_w \cos \theta_0 = 131.03$, $B_1^L = 190.66$, $B_2^L = -2.479$ 이고 나머지 다른 성분들은 거의 영이 되었

고, B_T 의 각각의 계수들은 $B_w \sin \theta_0 = 21.991$, $B_1^T = 172.90$, $B_2^T = 0.3283$ 이고 나머지 다른 성분들은 거의 영이 되었다. 여기서 B_1^L 이 B_1^T 과 동일한 값이 아님을 주목하라. ; (이전의 가정에 의하면, B_1^L 은 반드시 B_1^T 과 같아야한다).

위의 결과를 좀더 명확하게 하기 위하여, 우리는 다시한번 회전에 대한 결과를 그림 3에 도해하였으며, 이것은 시료의 여러 가지 회전각(θ)에 대하여 0° 에서 360° 까지 B_L 대 B_T 를 그린 것이다. $B_T=0$ 이고 $B_L=456.3221$ 인 $\theta=0^\circ$ 에서부터 시작하여, 이러한 점들이 θ 가 180° 보다 증가하게 될 때, 실험 결과에 의한 점들은(사각형 모양) 시료의 회전과 동시에 거의 원의 모습을 나타내게 된다. 그러므로, 일차 근사에 의한 회전 안정상태 내에서, 전체 B 벡터는 원점에서 원의 중심으로 향하는 고정된 벡터(B_w)와 원의 중심으로부터 원의 주변으로 향하는 회전벡터(B_1)로 구성되어있는 것으로 보인다. 이 둘 두 벡터 B_w , B_1 은 마찰 성분(B_F) 및 회전 성분(B_R)의 소용돌이들과 상대적으로 일치한다. B_w 는 다른 소용돌이들과 비교할 때, 상대적으로 약한 끌음력을 가지고 있는 부분이므로 약한 끌음 영역(weak pinning part)이라 부르겠다.

지금까지의 거론에서 우리가 주목하여야 할 점은, $180^\circ \leq \theta \leq 270^\circ$ 일 때, B_1 이 줄어들고 있다는 것이다. 이것은 앞에서 거론하였듯이 B_F 와 B_R 내의 다발(flux)의 크기가 그들의 안정된 상태의 값에 도달하기 이전에 어떤 변화(flux creep 등)를 경험하는 초기 변이영역의 관찰과 일치하는 것으로 보인다. 그러나, $270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ 에서는 이와 상반된 현상이 발생한다. 즉, 시료를 270° 에서 360° 까지 회전시킬 때, $\theta=270^\circ$ 에서 B_1 은 최소치를 갖고, θ 가 증가함에 따라 B_1 이 증가하여 $\theta=360^\circ$ 일 때 B_1 은 최대치를 갖는다. 안정된 상태에서 이와같은 현상은 B_1 이 두 개의 벡터로 나누어짐을 말해준다: 다시 말하자면 B_1 ; 소용돌이들의 끌음이 너무 강하여, 시료의 회전에 대하여 소용돌이들이 시료와 같이 회전하면서, 그들의 크기도 변하지 않는 부분(강한 끌음 영역)과, B_2 ; 소용돌이들의 끌음력이 중간인 경우(약한 끌음 영역과 강한 끌음 영역의 중간 영역), 소용돌이들은 시료와 같이 회전하지만 그들의 크기는 θ

에 따라 변하는 부분(중간 꽂음 영역 ; intermediate pinning part)이다.

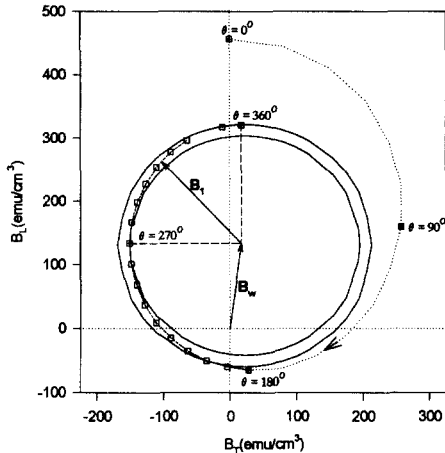


그림 3. 외부장 $H=5000\text{Oe}$ 를 인가한 상태에서 4.2K 까지 냉각한 다결정 $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 의 회전에 따른 B_T 대 B_L 의 그림. 사각의 표시는 각각 $\theta=180^\circ$ 까지 계속되는 초기 전이 간격 후의 B_L , B_T 의 변화를 나타낸다. 작은 원은 $\theta=270^\circ$ 에서 B_L 과 B_T 의 값을 중심으로 한 곡률반경을 가진 원이고 큰원은 $\theta=360^\circ$ 에서 B_L 과 B_T 의 곡률반경을 중심으로 한 원. B_w 는 원점에서 원의 중심까지의 크기. B_1 은 임의의 각 θ 에서 원의 중심에서 B_L , B_T 값까지의 크기이다.

Fig 3. B_T vs. B_L is shown for field cooling in $H=500\text{Oe}$ to 4.2K , for polycrystalline $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ rotated in an external field. The square symbol indicates the change of B_L and B_T after the initial transition interval continued to $\theta=180^\circ$. The small circle has a radius centered on the value of B_L and B_T at $\theta=270^\circ$ and the large circle is centered on the radius of curvature for B_L and B_T at 360° . B_w is the magnitude from origin to the center of circle. B_1 is the magnitude from the center of circle to the value of B_L and B_T at arbitrary angle θ .

임의의 회전각 $270^\circ \leq \theta \leq 360^\circ$ 에 대하여 B_1 를 고려하여보자(그림 4(a)). $B_1=B_s+B_i$ 이고, B_L - B_T 평면에서 B_s 와 B_i 는 시료와 같이 회전하므로, 같은 위상에 위치한다. 일반적인 임계상태모형(generalized critical

state model)^{9,11}에 의하면, 강한 꽂음력을 가진 소용돌이일 수록 시료의 내부에 위치하므로, B_i 은 시료의 마찰영역내부에 존재하고, 보다 강한 꽂음력을 가진 소용돌이들로 이루어진 B_s 는 시료의 가장 중심부에 위치할 것이다. 그리고 B_i 는 시료 내부의 B_w 영역과 B_s 영역 사이에서 존재할 것이다. 각각의 영역은 많은 소용돌이층으로 이루어져 있지만 간단히 하기 위하여 B_i 의 두 소용돌이만을 고려하자. 각 θ 에 대한 B_L - B_T 평면과 수직인 평면(B_1 평면)에서의 시료내의 소용돌이들은 그림 4(b)에 도해한 것과 같은 모양을 가질 것이다.

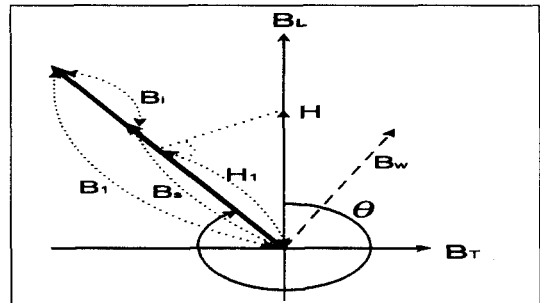


그림4(a)

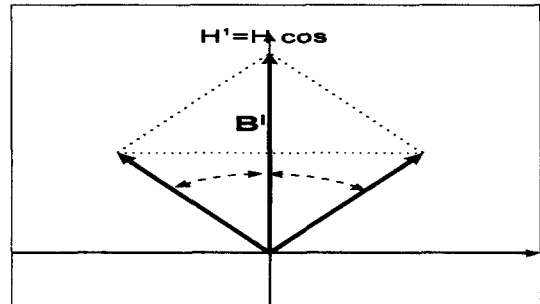


그림4(b)

그림 4. (a) 시료의 회전각 θ 에 대한 B_w , B_s , B_i 의 벡터 도해. B_L - B_T 평면에서 B_i 와 B_s 는 같은 위상에 위치하고, $B_1=B_i+B_s$ 이다. H_1 은 외부장 H 를 B_1 에 사영한 값이다. (b) 그림 (a)의 각 θ 에서 B_L - B_T 평면과 수직인 평면(B_1 평면)에 관한 H 과 B_i 의 벡터 도해. μ 는 시료의 중간 꽂음 영역(intermediate pinning part)에 있는 소용돌이 모멘트(vortex moment)를 나타내고, 이들은 척력에 의해 밀려내지만, H_1 은 이들의 움직임을 방해한다.

Fig 4. (a) Vector diagram showing sample rotation

angle θ vs. B_w , B_s , B_i . B_i , B_s are in same phase in a B_L - B_T plane and $B_i=B_i+B_s$. H_1 is a projected value of H to B_1 . (b) Vector diagram showing H_1 , B_i at an angle θ in a B_1 plane perpendicular to a B_L - B_T plane. μ is a vortex moment in an intermediate pinning part and it repels each other, but H_1 disturbs this behavior.

각 θ 에서 B_L - B_T 평면과 수직인 평면(B_1 평면)에서, 중간부분의 소용돌이들은 그들의 척력에 의해 벌어지려고 하며, (척력에 의한 토크는 소용돌이의 지역적인 다발 밀도(local flux density)에 의해 결정되고, 그 힘은 θ 에 관계없이 항상 일정할 것이다), 외부장의 사영부분($H_1=H\cos\theta$)은 이들을 다시 한 1방향(M_L - M_T 평면)으로 모으려고 할 것이다(이 토크는 H_1 에 비례할 것이다). 이 두 힘과 B_1 평면으로의 끌음력이 균형을 이루는 각 φ 에 소용돌이들은 위치할 것이고 그들의 사영치는 $2\mu\cos\varphi=B_i$ 가 될 것이다. $\theta=270^\circ$ 에서, $H_1=0$ 이므로 척력과 끌음력이 균형을 이루는 각 φ 가 최대치를 이룰 것이므로 B_i 는 최소치를 갖고, $\theta=360^\circ$ 에서 $H_1=H$ 이므로 B_i 는 최대치를 가질 것이다(그림 3 참조).

외부장 H 의 여러 값에 대하여 FC하에서 위의 실험을 반복하였다. 각각의 크기를 비교하기 위해, $B_s(\max)$ 를 강한 끌음 영역(strong pinning part)의 최대가능크기(그림 3의 작은 원의 반지름)로 $B_i(\min)$ 을 중간 끌음 영역(intermediate pinning part)의 최소가능크기(그림 3의 두 원의 반지름의 차이)로 하였다. 그림5는 H 대 B_w , $B_s(\max)$, $B_i(\min)$ 의 비율에 관한 그림이다. 외부장 H 가 커짐에 따라, B_w 는 급격히 증가하여 ($B_s(\max)$ 는 급격히 감소) $H=3000G$ 에서 거의 1이 되었다. B_i 는 B_w 와 B_s 의 비율이 같은 지점($H\approx 600G$)에서 최고치를 나타내고, H 가 증가함에 따라, 감소하였다. 모든 H 에 대하여 $B_i(\min)$ 의 비율은 $B_s(\max)$ 보다 항상 작다.

4. 결론

RMV 측정으로 부터, 소용돌이 다발 밀도(vortex flux density)는 3개의 부분으로 나누어짐을 보았다. B_w 는 시료 내부의 가장자리에 위치한 소용돌이들의 끌음 토크와 외부장 H 에 의한 토크가 균형을 이루는 지점에 머물고, B_s 는 시료 내부의 중심에 위치하는 소용돌이들로 끌음 토크의 크기가 H 에 의한 최

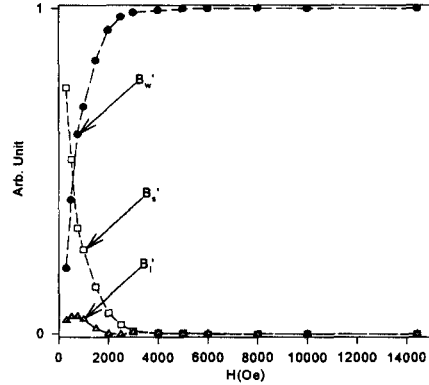


그림 5. 외부장 H 에 대한 B_s' , B_i' , B_w' 의 크기. B_s' , B_i' , B_w' 는

$$B_w' = \frac{B_w}{B_s(\max) + B_i(\min) + B_w}$$

$$B_i' = \frac{B_i}{B_s(\max) + B_i(\min) + B_w}$$

$$B_s' = \frac{B_s}{B_s(\max) + B_i(\min) + B_w} \text{를 의미한다.}$$

Fig. 5. Magnitudes of B_s' , B_i' , B_w' are shown. B_s' , B_i' , B_w' is

$$B_w' = \frac{B_w}{B_s(\max) + B_i(\min) + B_w},$$

$$B_i' = \frac{B_i}{B_s(\max) + B_i(\min) + B_w},$$

$$B_s' = \frac{B_s}{B_s(\max) + B_i(\min) + B_w}, \text{ respectively.}$$

대 토크보다 크므로 시료의 회전에 따라 같이 회전하고 그것의 크기도 변함이 없다. B_i 는 시료내부의 B_w 와 B_s 사이에 위치한 소용돌이들로 B_L - B_T 평면의 끌음 토크는 H 에 의한 최대 토크보다 크므로 시료의 회전과 같이 회전하지만, 회전각 θ 에서 B_L - B_T 평면과 수직인 평면 (B_1 평면)에서 사영외부장 $H_1=H\cos\theta$ 에 의한 토크와 소용돌이간의 척력에 의한 토크 및 끌음 토크가 균형을 이루는 곳에 위치한다. B_i 는 이 중간 부분의 소용돌이들의 B_L - B_T 평면으로의 사영부분에 속하므로 그 크기는 회전각 θ 에 따라 변한다. 즉 $\theta=270^\circ$ 에서 B_i 는 가장 작고, θ 가 커짐에 따라 점차적으로 커져서, $\theta=360^\circ$ 일 때 최대치가 됨을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. C.P. Bean, Phys. Rev. Lett. **8**, 250 (1962); Rev. Mod. Phys. **36**, 31 (1964).
2. P.W. Anderson, Phys. Rev. Lett. **9**, 309 (1962); P.W. Anderson and Y.B. Kim, Rev. Mod. Phys. **36**, 39 (1964).
3. Y.B. Kim, C.F. Hempstead, and A.R. Strnad, Phys. Rev. Lett. **9**, 306 (1962); Phys. Rev. **129**, 528 (1963); Rev. Mod. Phys. **36**, 43 (1964).
4. W.A. Fietz, M.R. Beasley, J. Silcox, and W.W. Webb, Phys. Rev. **136**, A335 (1964); Gang Xiao, F.H. Streitz, A. Gavrin, M.Z. Cieplak, J. Childress, Ming Lu, A. Zwicker, and C.L. Chien, Phys. Rev. B **36**, 2382 (1987); P.J. Kung, M.P. Maley, M.E. McHenry, J.O. Willis, J.Y. Coulter, M. Murakami, and S. Tanaka, *ibid.* **46**, 6427 (1992).
5. A.C. Mota, A. Pollini, P. Visani, K.A. Müller, and J.G. Bednorz, Phys. Rev. B **36**, 4011 (1987); M. Tuominen, A.M. Goldman, and M.L. Mecartney, *ibid.* **37**, 548 (1988); Y. Yeshurun and A.P. Malozernoff, Phys. Rev. Lett. **60**, 2202 (1988); I.A. Campbell, L. Fruchter, and R. Cabanel, *ibid.* **64**, 1561 (1990); Lu Zhang, J.Z. Liu, M.D. Lan, P. Klavins, and R.N. Shelton, Phys. Rev. B **44**, 10 190 (1991).
6. Liwen Liu, J.S. Kouvel, and T.O. Brun, Phys. Rev. B **38**, 11799 (1988).
7. H.P. Goeckner and J.S. Kouvel, Phys. Rev. B **50**, 3435 (1994).
8. Liwen Liu, J.S. Kouvel, and T.O. Brun, Phys. Rev. B **43**, 11481 (1991).
9. R. Boyer and M.A.R. LeBlanc, Solid State Commun. **24** 261 (1977).
10. R. Boyer, G. Fillion and M.A.R. LeBlanc, J. Appl. Phys. **51** 1692 (1981).
11. S.K. Hasanain et al./ Physica C **272** 43-50 (1996).