

# 중간금속성 $YNi_2B_2C$ 초전도체의 상부임계자기장( $H_{c2}$ ) 연구

송규정, 이남진, 고락길, 박찬, 하홍수, 하등우, 오상수, 권영길,  
한국전기연구원, 초전도응용연구그룹

## The upper critical field ( $H_{c2}$ ) study of intermetallic $YNi_2B_2C$ superconductor

K.J. Song, N.J. Lee, R.K. Ko, C. Park, H.S. Ha, D.W. Ha, S.S. Oh, and Y.K. Kwon  
Applied Superconductivity Research Group, Korea Electrotechnology Research Institute

e-mail: kjsong@keri.re.kr

**Abstract** - Magnetization studies were conducted on a single crystal of  $YNi_2B_2C$  superconductor. The 17 mg crystal was studied at temperatures  $T$  from above  $T_c$  (15.5 K) to 3 K, in the magnetic fields  $H // c$ -axis up to 6 tesla. The crystal exhibited little magnetic irreversibility, with a critical current density  $J_c \sim 10^4 \times J_0$ , the depairing current density. Near  $T_c$ , the equilibrium magnetization  $M$  was London-like with  $M \propto \ln(H)$ . The upper critical field  $H_{c2}$  of the single crystal  $YNi_2B_2C$  was estimated by the several alternative approaches such as standard London limit, Ginzburg-Landau, and Abrikosov relations. The estimated  $H_{c2}$  values agree relatively well with each other approaches.

### 1. 서 론

고온초전도체가 1986년도 세상에 출현한 뒤 많은 연구들이 진행되어 왔지만, 고온초전도 물질 자체가 소유하고 있는 기본 특성으로 인하여, 고온초전도체의 실용적인 응용이 아직도 어려움으로 남아있다. 실용화를 방해하는 근본적인 원인으로 크게 다음과 같이 들 수 있다. 첫째, 고온초전도체가 깨지기 쉽고, 유연성이 부족한 세라믹스라는 것이다. 둘째, 고온초전도체의 특성들이 일반적인 저온초전도체의 특성들과는 다르게, 통전 전류를 미진하게 만드는 grain들 사이의 약한 결합력(weak link) 특성과 약한 flux pinning의 원인으로 기인하는 giant flux creep 특성인 것이다. 이러한 근본적인 문제점을 해결하기 위하여, 현재에도 많은 과학자들이 연구에 매진하고 있으며, 실제로 많은 연구 진전들이 이루어지고 있다. 예를 들어, 강한 flux pinning을 위하여 인위적인 flux pinning center들을 생성하는 방법들의 연구를 통하여[1~3], giant flux creep 특성의 단점을 해결할 수 있는 시점에 있다. 한편, 세라믹스의 단점을 극복하고 선재로서 응용이 가능한 제 1세

대 초전도 Bi-2223 PIT (powder-in-tube) 선재의 기술개발이 어느 정도 끝난 상태에서, 상용화가 이루어지는 시점에 있으며, 제 2세대 초전도 선재인 YBCO Coated Conductor 개발의 연구 열기가 세계적으로 뜨겁다.

이와 더불어, 많은 과학자들은 아직도 세라믹스 성질을 함유한 고온초전도체 물질 자체에 연성과 전성이 향상된 금속성의 특성을 얻기 위하여, 여러 종류의 금속성 원소들을 고온초전도체들에 첨가함으로써 일어나는 물리적인 효과 및 특성 연구를 수행 중에 있으며, 또한 현재 존재하는 산화물 고온초전도 물질의 구조와 그 특성이 다른, 금속성 성질을 함유한 미지의 다른 초전도 물질을 찾는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 이에 대한 부산물로서 1994년경에 새로운 형태의 중간금속성 (intermetallic) 니켈보로카바이드 (nickel-borocarbide) 물질들이 발견되어[4~6], 세라믹스의 특성을 벗어난 중간금속성 성질과 더불어, 흥미 있는 물리적 특성들로 인하여 여러 과학자들에게 많은 관심을 끌었으나, 실질적인 초전도응용 차원에서는 낮은 임계전이온도들 ( $T_c = 7 \text{ K} \sim 20 \text{ K}$ ) 때문에 공학도들의 관심을 유도하기에는 미진하였다.

그러나 기본적인 초전도특성을 이해함에 있어 새로운 타입의 좋은 초전도물질이기 때문에, 본 연구실에서는 Type-II 초전도 물질이 소유하는 기본 물리량들 중, 상부임계자기장( $H_{c2}$ ) 예측과 온도 변화에 따른 경향의 연구로 중간금속성 (intermetallic)  $YNi_2B_2C$  초전도체의 자기적 특성 연구를 수행하였다. 일반적으로  $YNi_2B_2C$  물질은 비교적 conventional하고 등방적 특성을 나타내는 Type-II 초전도체임이 발견 초기에 알려져 있었으나[7,8], 여러 연구 그룹들의  $YNi_2B_2C$ 에 대한 상부임계자기장( $H_{c2}$ )에 관한 연구 결과들이, 저온영역에서 상부임계자기장( $H_{c2}$ )의 예측 결과가 대체적으로 positive curvature 특성을 보여주는 unconventional 경향을 나타내고 있어 다소 논란이 되고 있다[9~12]. 지금까지 알려진 연구 결과들을 기준으로 볼 때,  $YNi_2B_2C$  초전도체는 시료

가 지나는 paramagnetic background 신호와  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  단결정 시료의 non-locality 효과 등 때문에 정확히 상부임계자기장( $H_{c2}$ )을 예측하기는 쉽지 않다. 그러나  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  초전도체는 nickel-borocarbide 초전도 물질의 한 종류로서 임계전이온도가  $\sim 15.5$  K 정도이고, 산화물 고온 초전도체에 비하여 상부임계자기장( $H_{c2}$ )이 매우 작기 때문에 실험적으로 상부임계자기장( $H_{c2}$ )의 고찰이 직접적으로 가능하다. 일반적으로 상부임계자기장( $H_{c2}$ )의 예측 방법은 여러 가지 방법들이 있으나, 비교적 다른 방법에 비하여 손쉽게 실험이 가능한 자기자화도(Magnetization:  $M$ ) 측정 방법을 통하여,  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  초전도체의 상부임계자기장( $H_{c2}$ )을 여러 이론들 도입과 실험 분석 결과로부터 예측하였다.

## 2. 실험 방법

실험에 사용된  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  시료는  $\text{Ni}_2\text{B}$ 와 동위원소  $^{11}\text{B}$ 를 이용하여 고온 flux 방법으로 성장시킨 단결정 시료이다. 시료의 크기는  $0.29 \times 0.23 \times 0.06 \text{ cm}^3$  이며, 무게가 17 mg 이다. 자세한 시료 성장 방법과 이 실험에 사용한 시료의 구조 특성들은 이미 발표된 다른 논문들에 잘 언급되었다 [13,14].

실험은 SQUID magnetometer (Quantum Design MPMS-7)를 이용하여 자기적 특성 연구, 즉 자기자화도(Magnetization:  $M$ ) 측정을 주도적으로 수행하였다. 준비된 17 mg 단결정  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  시료를 얇은 Al-disk 위에 Duco 접착제를 이용하여 붙인 다음, 그것을 Mylar 튜브 안에 넣어 자기적 특성을 측정하였다. 먼저 저자기장에서 실험을 수행하기 전에, SQUID magnetometer 내에 있는 초전도자석을 임계온도 이상으로 올림으로서, 초전도자석을 이루는 코일 내에 붙잡힌(trap) flux를 제거하기 위해 초전도자석을 reset 시켜 주었다. 그리고 저자기장( $H=10$  G)을 걸어준 후, ZFC(zero-field cooled)와 FC(field cooled: Meissner state) 상태에서 자기모우먼트(magnetic moment:  $m$ )를 측정하였다. 모든 실험치는 시료의 체적을 초전도체의 질량과 밀도로부터 계산한 후,  $M(\text{G}) = m(\text{Gcm}^3)/V(\text{cm}^3)$ 식을 이용한 자기자화도( $M$ )로 환산하여 표현하였다. 그리고 단결정  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  초전도 물질의 상부임계자기장( $H_{c2}$ ) 연구를 하기 위하여, 우선 시료를 자기장이 영인 상태에서 임계온도 보다 높은 온도로부터 서서히 냉각 시켜, 원하는 목표 온도로 안정화시킨 후, 이 안정된 온도에서 자기장의 세기가 6.5 T 까지 자기장을 증가시키고 다시 감소시키는 방법으로 시료의 자기자화도( $M$ )를 자기장의 변화에 따라 각각의 온도에서 측정하였다. 그리고 paramagnetic background 신호를 보정하기 위하여, 정상물질상태(normal state)의 자기모우먼트( $m$ )를 임계온도부터 상온까지 온도와 자기장의 변화에 따라 측정한 후, 분석하여 임계온도

이하 저온도까지 예측 직선을 따라 보정함으로써, 오직  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  초전도 물질에 의한 정확한 자기자화도( $M$ )의 물리량을 얻을 수 있었다.

## 3. 실험 결과 및 논의

중간금속성(intermetallic) 특성의 초전도체  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  단결정 시료의 임계전이온도( $T_c$ )는, ZFC(zero-field cooled)와 FC(field cooled: Meissner state)하에서 온도 변화에 따른 자기자화도( $M$ )를 측정을 한 후, 이 실험결과의  $M(T)$  곡선을 얻어,  $M = 0$  부분까지 직선적 연장선에 의해 만나는 점으로서 결정하였다. Fig.1은  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  단결정 초전도체의 온도 변화에 따른 FC-자기자화도( $M$ )를 저자기장( $H=10$  G)을 걸어 준 상태에서 얻은 곡선의 결과이다. Fig. 1에서 알 수 있듯이  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  초전도체의 임계전이온도( $T_c$ )는 15.5 K 정도이다. 여기서 임계전이온도( $T_c$ )를 결정할 때 임계전이온도( $T_c$ ) 부근에서 열적 변동으로부터 기인하는 실험 곡선(Fig.1)의 일부 꼬리부분을 무시하였다.

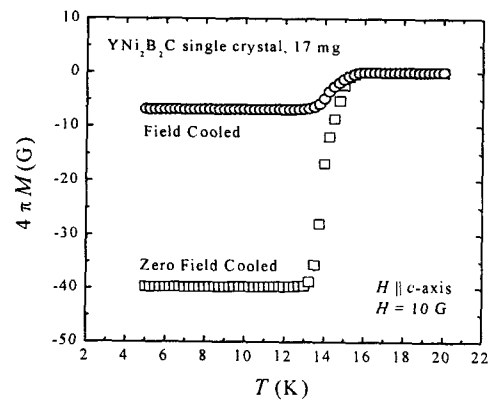


Fig. 1. ZFC and FC magnetization curves as the function of temperature, for  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  single crystal.

그리고  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  초전도체의 상부임계자기장( $H_{c2}$ )을 예측하기 위하여, 앞서 설명한 것처럼 자기자화도( $M$ )를 각각의 온도에서 세밀하게 측정 한 다음, paramagnetic background 신호를 보정한 후, 단결정  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  시료의 mixed state 자기자화도( $M$ )를 얻었다. Fig.2는  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$ 의 자기자화도  $M(H)$  결과를 보여주는데, 온도( $T$ )가 5 K의 저온일 때조차 자기자화도  $M(H)$ 은 거의 가역적(reversible) 특성을 보여 주고 있다. 이런 가역적(reversible) 자기자화도( $M$ ) 결과는 표준-London 이론의 평형-자기자화도(equilibrium magnetization)를 도입하여 자기적 특성 등을 분석할 수 있다[15]. 이런 가역적(reversible) 자기자화도( $M$ ) 측정 결과로부터 단결정  $\text{YNi}_2\text{B}_2\text{C}$  초전도체의 상부임계자기장( $H_{c2}$ )을 Ginzburg-Landau 및 표준 London-limit 이론에 의거하여 쉽게 예

$M_{c2}$ 과 자기장  $H$ 와의 그래프를 보여주고 있는데, 저온도영역에서  $M = 0$  근처의  $M(H)$  관계가 거의 선형적임을 알 수 있으며,  $M = 0$ 인 축선에 각각 온도의 선형적 연장선이 만나는 지점으로 상부임계자기장( $H_{c2}$ )을 예측할 수 있다. 이에 대한 상부임계자기장( $H_{c2}$ ) 예측결과를 Fig. 5의 삼각형 표시들로 나타내 주고 있다. 그러나 예상치 않은 peak-effect의 흔적이 있어 정확하게 상부임계자기장( $H_{c2}$ )을 예측하고 결정하는 것은 약간의 무리가 따른다.

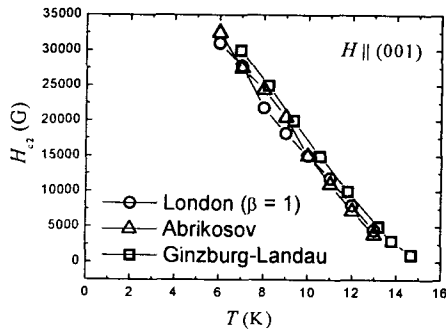


Fig. 5. The temperature dependence of  $H_{c2}$  using several analytic methods.

일반적으로  $YNi_2B_2C$  단결정 초전도체의 상부임계자기장( $H_{c2}$ )을 어느 정도 정확하게 예측할 수는 있으나, 비교적 저온도 영역에서의 예측은 다소 무리가 따른다. 왜냐하면, paramagnetic background 신호 이외에 이미 알려진 대로 Non-locality 효과로 인하여, 앞에 논한 방법들로 저온도 영역까지 확장하여 정확한 상부임계자기장( $H_{c2}$ )을 예측하는 것은 어렵다. 또한 아직까지 분명하게 규명되지 않고 있는  $YNi_2B_2C$  단결정 초전도체의 저온도 영역에서 peak-effect 흔적은 상부임계자기장( $H_{c2}$ )의 예측을 어렵게 만든다. 그러나 대체적으로 예측되어진 상부임계자기장( $H_{c2}$ )은 어느 정도 정확하게 일치됨을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

중간금속성(intermetallic) 성질의  $YNi_2B_2C$  단결정 초전도체의 임계전이온도( $T_c$ )가  $\sim 15.5$  K이고, 자기자화도(magnetization:  $M$ )에 의한 자기적 특성 분석으로 Ginzburg-Landau, 표준-London-limit, 그리고 Abrikosov 관계식들로부터  $YNi_2B_2C$  단결정 초전도체의 상부임계자기장( $H_{c2}$ )을 어느 정도 정확하게 예측할 수 있었다. 위의 세 방법으로 얻은 결과들은 서로 잘 일치하였으며, 저온도 영역에서 여러 다른 그룹들의 연구 결과와 유사하게 상부임계자기장( $H_{c2}$ )의

positive curvature 경향이 나타남을 확인하였으나, non-locality effect와 아직 확실하게 규명되지 않은 peak effect의 상부임계자기장( $H_{c2}$ ) 근처에서 나타남은 정확한 상부임계자기장( $H_{c2}$ )의 예측을 어렵게 만드는 요인이 되고 있다. 앞으로 계속적인 좀더 세밀한 실험을 통하여 peak effect의 이해와  $YNi_2B_2C$  초전도성의 연구가 요청된다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### [참고문헌]

- [1] L. Civale, et al., Phys. Rev. Lett. 67, 648 (1991).
- [2] L. Krusin-Elbaum, et al., Appl. Phys. Lett. 64, 3331 (1994).
- [3] L. Krusin-Elbaum, et al., Nature (London) 389, 243 (1997).
- [4] R. Nagarajan, et al., Phys. Rev. Lett. 72, 274 (1994).
- [5] R. J. Cava, et al., Nature (London) 367, 252 (1994).
- [6] T. Siegrist, et al., Nature (London) 367, 254 (1994).
- [7] Ming Xu, et al., Physica C 227, 321 (1994); Physica C 235-240, 2533 (1994).
- [8] E. Johnston-Halperin, et al., Phys. Rev. B 51, 12852 (1995-II).
- [9] C. Godart, et al., Phys. Rev. B 51, 489 (1995).
- [10] T. V. Chandrasekhar Rao, et al., Physica C 249, 271 (1995).
- [11] S. V. Shulga, et al., Phys. Rev. Lett. 80, 1730 (1998).
- [12] Mi-Ock Mun, et al., Physica C 303, 57 (1998).
- [13] M. Yethiraj, et al., Phys. Rev. Lett. 78, 4849 (1997).
- [14] K. J. Song, et al., Phys. Rev. B 59, R6620 (1999).
- [15] V. G. Kogan, et al., Phys. Rev. B 38, 11958 (1988).
- [16] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity* 2nd Ed., McGraw-Hill, New York (1996).