

Magnetic T_c Measurements of Composite Superconductors for a Standard Method

K. W. Lee^{*,a}, M. S. Kim^a, D. H. Kim^b, S. G. Lee^c

^a Korea Research Institute of Standards and Science, Taejeon, Korea

^b Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

^c Korea Agency for Technology and Standards, Gwacheon, Korea

Received September 30, 2004

복합초전도체의 자기적 임계온도 측정의 표준화연구

이규원*, 김문석, 김동호, 이상근

Abstract

Magnetic T_c of composite superconductors has been studied for providing a standard method. Various magnetization-temperature curves of NbTi, Nb₃Sn and Bi-2223 wires were measured using a SQUID magnetometer. Magnetization-temperature curve of zero-field-cooled procedure showed larger values than field-cooled procedure. To obtain higher resolution near the onset temperature, we employed a two-field-direction method which measures a magnetization-temperature curve of a specimen first in positive and then negative fields. Analytical comparison of the magnetic T_c with the resistive T_c was accomplished for three specimens. The magnetic T_c method showed more detailed information on superconducting state of a specimen than the resistive T_c method. We have also studied the field dependence of the magnetic T_c from 5 Oe to 120 Oe, however, no significant difference on field strength was found in our three specimens

Keywords : critical temperature, composite superconductor, SQUID magnetometer, magnetization-temperature curve

I. 서론

초전도물질의 임계온도는 저항이 있는 상태에서 저항이 0인 초전도상태로 전이하는 온도로, 초전도체의 가장 기본적이고 중요한 인자이다. 물질의 임계온도를 측정하는 방법에는 저항측정법, 자화측정법 등이 있다. 저항법은 온도변화에 따라 저항의 변화를 측정하는 방법

으로 측정장치가 간편하여 널리 사용되고 있다. 국제표준화기구인 IEC에서도 저항법을 이용한 임계온도시험에 대한 IEC규격을 제정하여 사용을 권고하고 있다 [1]. 그러나 시편의 grain사이에 절연층이 있거나 대상시편이 매우 작거나 분말시편인 경우, 측정이 매우 곤란하다.

물질이 초전도상태가 되면 외부자장의 침투를 배척하는 마이스너상태가 되어 강한 반자성 신호가 관측된다. 이 온도변화에 따른 반자성 신호를 측정하여 임계온도를 판정하는 데, 시편의 형상이나 크기, grain사이의 절연층 여부

*Corresponding author. Fax : +82 42 868 5475

e-mail : leekw@kriss.re.kr

에 관계없이 측정할 수 있다. 이와 같은 자기적 임계온도는 SQUID magnetometer, VSM, 직류 혹은 교류 susceptometer를 이용하여 측정할 수 있다. 이들 중 SQUID magnetometer는 VSM이나 susceptometer 보다 측정감도가 월등히 우수하므로 일반초전도체의 측정은 물론 초전도신물질개발, 박막측정에 널리 이용되고 있다. 그러나 측정자에 따라 임계온도의 시험방법이 다르고, 적합한 판정기준이 없어 학술적으로는 물론, 국제무역 거래시 마찰을 일으킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내는 물론 세계적으로 널리 보급된 SQUID magnetometer를 이용하여 자기적 임계온도의 시험을 표준화시키려 여러 실험을 실시하였다. 우선 많이 사용하는 NbTi, Nb₃Sn, Bi-2223선재를 대상으로 zero-field-cooled/field-cooled (ZFC/FC) 방법, 전이시작 온도의 판별능력 향상, 전기적 임계온도와 자기적 임계온도의 비교, 적합한 자장의 크기 등을 조사하였다.

II. 시편준비 및 실험

실험에 사용된 SQUID magnetometer 제품 [2]은 온도가변장치, 초전도자석을 이용한 자장인가장치, 시편의 모멘트를 측정하는 감지코일(pickup coil)과 SQUID장치 등으로 구성되어 있고, 모든 실험절차는 컴퓨터에 의해 수행되고 있다. 임계온도의 측정은 온도변화에 따른 자화측정인 M-T특성곡선으로 부터 구해지는데, 시편을 자화시킨 후 감지코일 내에서 운동시켜서 자화값을 측정하게 된다.

감지코일은 2nd derivative gradiometer로 구성되어 있는데, 코일 각 층간 거리가 3 cm이므로 시편의 길이는 demagnetization효과를 상쇄시키는 7 mm이하가 적당하다.

실험에 사용된 NbTi와 Nb₃Sn시편은 초전도 필라멘트가 Cu로 감싸여진 원형코일형태 이었고, Bi-2223시편은 Ag으로 피복된 사각테일 형태이었다. NbTi시편은 직경 0.78 mm, 길이 3.72 mm (0.013g), Nb₃Sn시편은 직경 0.77 mm, 길이 5.20 mm (0.022g), Bi-2223시편은 4.05 × 0.30 × 5.33 mm (0.053g)의 크기이다.

대상시편을 자기모멘트가 작은 홀더에 고정

하고 감지코일내에서 운동가능한 가늘고 긴 지지봉에 매달아 SQUID magnetometer내에 장착했다. 자장은 시편의 길이방향에 평행하도록 가하였다. 감지코일내에서 측정에 적합한 위치에 시편을 고정시키고 온도와 자장을 맞춘 후 측정하였다.

III. 결과 및 토의

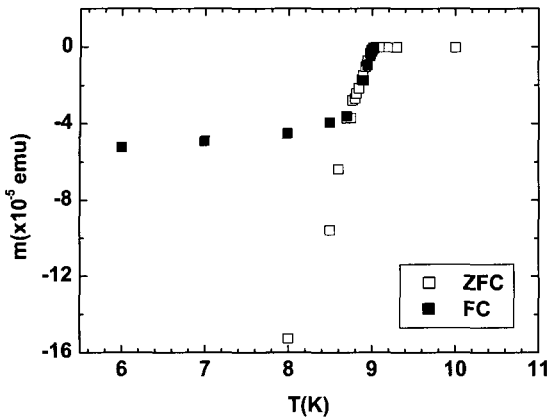
ZFC과 FC측정과정의 비교

임계온도측정에 적합한 자장인가방법을 조사하기 위하여 ZFC과 FC과정의 측정값을 비교하였다. ZFC에서는 시편을 실험하려는 최저 온도로 낮춘 후, +10 Oe의 자장을 가하고 magnetization-temperature (M-T) 특성을 측정하였고, FC에서는 ZFC실험 후 시편의 임계온도 이상 높은 온도의 상전도 상태에서 +10 Oe의 자장을 가하고 온도를 최저온도로 낮춘 후 온도를 올리면서 M-T특성을 측정하였다.

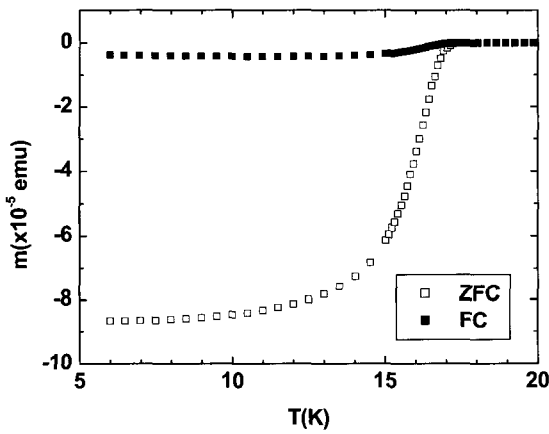
Fig. 1(a)는 NbTi시편의 초전도전이 근처에서 측정한 결과로, 8 K에서 ZFC의 자화가 -1.6×10^{-4} emu인데 FC의 자화는 -4.5×10^{-5} emu로 작다. 반자성신호가 10^{-6} emu이상의 신호를 보이는 기준을 적용하면 NbTi의 임계온도는 9.01 K이며 이때 자화값은 -1.56×10^{-6} emu이지만 FC의 자화값은 -6.0×10^{-7} emu로 작다.

Fig. 1(b)는 Nb₃Sn시편의 6 K ~20 K까지 측정 한 결과이다. 10 K에서 ZFC의 자화가 -8.6×10^{-5} emu인데 FC의 자화는 -0.4×10^{-5} emu로 매우 작다. 17 K 근처를 확대하면 Nb₃Sn의 임계온도는 17.1 K이며, 이때 ZFC의 자화값은 -0.8×10^{-6} emu이지만 FC의 값은 -4.3×10^{-8} emu로 SQUID magnetometer의 측정능력 밖이라 볼 수 있다.

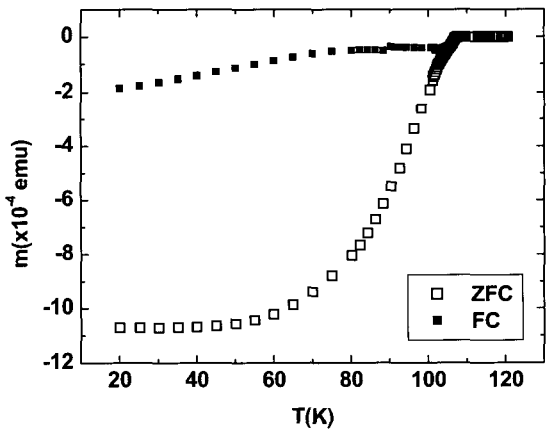
Fig. 1(c)는 Bi-2223시편의 10 Oe자장에서 측정 한 결과이다. 60 K에서 ZFC의 자화가 -10×10^{-4} emu인데 FC의 자화는 -1.7×10^{-4} emu로 매우 작다. 110 K 근처를 확대하면 Bi-2223시편의 임계온도는 109 K이며 ZFC의 자화값은 -1.46×10^{-6} emu 인데 FC의 자화값도 거의 같았다. 이는 고온초전도체의 irreversibility line [3]이 임계온도이하 특정온도 까지는 같기 때문에 나타난 것으로 추정한다. 하지만 임계온도판정에는 일



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. ZFC/FC curves of specimens. (a) NbTi, (b) Nb₃Sn and (c) Bi-2223.

정구간의 M-T곡선을 측정해야 하기 때문에 ZFC과정이 적합한 것으로 생각한다.

ZFC과 FC의 측정결과를 분석하여 보면 ZFC의 자화값이 FC보다 크게 나타났다. 이는 이번 실험에 사용된 시편들은 초전도자석등에 사용되고 있는 것으로 임계전류를 크게 하기 위하여 pinning력을 크게 하였으므로 FC의 측정값이 작은 것으로 생각한다. 또한 FC의 경우 자화값이 10^{-5} emu 이하로 작아지면 SQUID magnetometer의 소프트웨어적인 문제 때문에 자화값의 부호가 바뀌는 현상도 여러 번 관측되었다. 많은 경우, 실제 임계온도측정의 대상 시편들은 이와 같은 pinning력이 강한 시편일 것이므로, FC보다는 ZFC과정으로 M-T특성을 측정하는 것이 정확도를 높일 것으로 판단한다.

전이온도의 분해능 향상

한쪽 방향의 자장을 가하고 측정한 M-T특성 곡선에서 초전도전이가 시작되는 정확한 온도를 판정하기가 어렵다. 일반적으로 상자성 측정값에 부합하는 직선을 긋고, 반자성 신호가 이 직선으로부터 벗어나는 온도를 초전도전이 온도로 적용한다. 일본의 경우 [4], 상자성직선과 반자성직선이 교차하는 온도 혹은, $10^{-3} \sim 10^{-6}$ emu/cm³ 등 특정자화값을 기준으로 채택하고 있지만, 공식적으로 정해진 기준은 없다.

초전도전이 시작온도의 판정능력을 향상하기 위하여 (+)자장과 (-)자장을 가하고 각각의 M-T곡선을 측정하여 분석하는 방법을 시도했다. 이는 상자성 직선으로부터 벗어나는 온도의 판별능력을 2배 향상시키는 효과를 주기 때문이다.

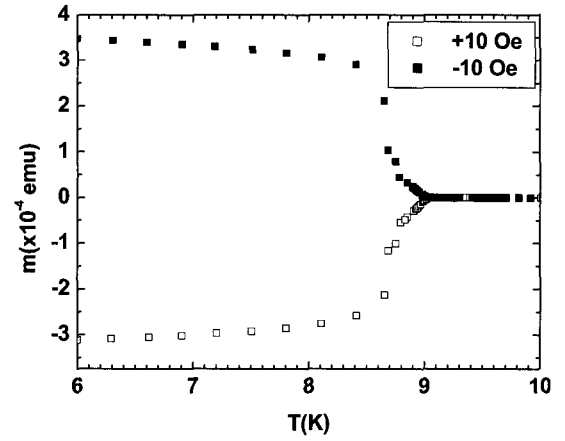
Fig. 2에 +10 Oe의 자장과 -10 Oe의 자장을 가하고 측정한, 각 시편의 M-T곡선이 나타나 있다. NbTi시편의 경우 6K ~ 10 K사이의 온도에서 M-T곡선을 측정하였는데, 6 K ~ 8 K까지는 약 3×10^{-4} emu 수준의 반자성 신호를 보이다가 8 K 이상의 온도에서는 빠른 감소를 보였다 특히 전이시작 온도인 9 K 이하의 8.65 K에서도 급격한 감소를 보인 것으로 보아 여러 단계의 초전도상이 존재하는 것으로 추정된다. 전이시작 부분을 확대하여 분석해보면, 각각의 M-T곡선이 상전도부분에서 0으로 일치하지 않

는다. 이는 NbTi 초전도체를 감싸고 있는 Cu의 상자성성분 때문이다. Cu에 의한 상자성 성분을 0으로 보정하여 (+)자화와 (-)자화곡선을 일치시키면 9.03 K에서 초전도전이 시작되는 것을 뚜렷이 볼 수가 있었다.

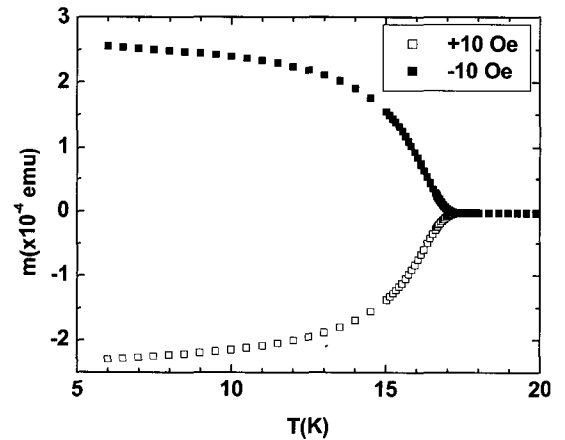
Nb₃Sn시편의 경우, Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 6 K ~ 20 K사이의 온도에서 M-T곡선을 측정하였는데, 6 K ~ 13 K까지는 약 2.2×10^{-4} emu 수준의 반자성 신호를 보이다가 15 K 이상의 온도에서 빠른 감소를 보였다. 16 K ~ 18 K 부분을 확대하면, 이 시편은 17 K 근처에서 초전도성이 사라짐을 볼 수 있다. Nb₃Sn의 임계온도가 18 K로 알려져 있는데 이 온도보다 다소 낮다. NbTi와 달리 Nb₃Sn은 제작사로부터 구입하여 자석 등으로 미리 감고 난 후, 열처리를 해야 초전도체가 된다. 아마 열처리과정이 불충분하여 임계온도가 낮아진 것으로 추정한다.

NbTi시편과 마찬가지로 상자성부분에서 (+)자화와 (-)자화곡선이 0이 되지않고 있는데, 이것도 안정재로 쓰이는 Cu의 상자성 때문이다. 상자성성분을 보정하여 (+)자화와 (-)자화곡선을 일치시키면 17.25 K에서 초전도가 시작됨을 알 수 있었다. 이때의 자화값은 1.7×10^{-6} emu 이었다. 한쪽 방향의 M-T곡선에서 17.1 K로 판정할 때 보다 좀 더 분명히 전이가 시작되는 온도를 판정할 수 있었다.

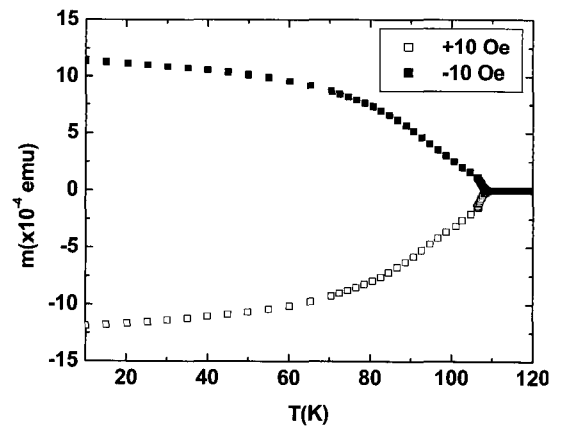
Bi-2223시편의 경우 Fig. 2(c)에 나타난 것처럼 10 K ~ 120 K사이의 온도에서 M-T곡선을 측정하였다. 10 K ~ 70 K까지는 약 1.2×10^{-3} 에서 9×10^{-4} emu로 천천히 감소하다 70 K 이상의 온도에서는 빠른 감소를 보였다. 전이시작 온도인 109 K 이하의 온도까지도 몇 차례의 감소를 보인 것으로 보아 Bi-2212상을 포함한 임계온도가 다른 초전도상이 존재하는 것으로 분석된다. Bi-2223시편의 107 K ~ 110 K 부분을 확대하면 NbTi나 Nb₃Sn과 달리 상자성 성분으로 인한 상자성직선의 불일치가 크지 않았다. 이것은 Ag가 Cu보다 상자성이 작거나 Ag의 함량이 적어서 나타난 현상으로 생각된다. 108.5 K (-1.62×10^{-5} emu 근처)와 108.7 K (-5.07×10^{-6} emu)에서 측정값들이 약간씩 흔들리고 있었으나 전이온도 결정에는 영향을 주지 않았다. 상자성성분을 보정하여 (+)자화와 (-)자화곡선을 일치시키면 109.1 K에서 초전도가 시작됨을 알



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Results of M-T curves of (+) and (-) fields. (a) NbTi (b) Nb₃Sn and (c) Bi-2223.

수 있었다. 이때의 자화값은 1.4×10^{-6} emu이었다. 한쪽 방향의 M-T곡선에서 109 K로 판정할 때 보다 높은 분해능으로 전이가 시작되는 온도를 판정할 수 있었다.

M-T특성과 R-T특성 비교

자기적 특성인 M-T특성과 기존 임계온도 측정에 통용되는 resistance-temperature (R-T) 특성을 비교하기 위하여 시편들을 10 Oe의 자장에서 R-T특성을 측정하였다. 시편에 단자를 붙여야 하는 관계로 저항측정용 시편을 자성측정에 사용했던 최인점 부분에서 절취하였다. 각 대상시편에서 약 10 mm 길이의 시편을 채취하여 전압, 전류단자를 붙이고, 제작사에서 구입한 Manual Insertion Utility Probe에 시편을 고정하여 SQUID magnetometer내에서 동일한 조건으로 R-T특성을 측정하였다. 시편에 흐르는 시험전류는 HP사의 전류공급기 (6632A)에서 공급하고, 시편에서 발생하는 전압은 Nanovoltmeter (Keithley181)로 측정하였다. 모든 시편에 가해진 전류는 100 mA이었다.

Fig. 3(a)는 NbTi시편의 M-T특성과 R-T특성을 비교한 결과이다. M-T특성곡선에서 9.0 K에서 전이가 시작하여 8.65 K에서 또 다른 급격한 변화 등 5 K까지 지속적으로 변하고 있지만, R-T특성곡선의 경우 9.0 K에서 저항이 0인 상태로 급격한 변화를 보이고 그 이하에서는 계속 0인 상태를 보인다. 이는 자기적으로 완전한 반자성 상태가 아니지만, 전기적으로는 저항이 0인 물질이 서로 연결되어 있어 시험전류가 그곳으로 흐르는 percolation현상 때문이다 [5].

Fig. 3(b)는 Nb₃Sn시편의 M-T특성과 R-T특성을 비교한 결과이다. M-T특성곡선에서 17.1 K에서 전이가 시작하여 5 K 까지 지속적으로 변하고 있다. R-T특성곡선의 경우 전이가 시작되는 17 K 근처와 전이가 거의 끝나는 16 K 근처에서 측정값이 요동하고 있지만, 대략 17 K에서 전기적 전이가 시작하여 15.5 K에서 저항이 0으로 접근한다. 여기서도 전기적으로는 1.5 K 정도로 좁은 전이폭을 갖는다.

Fig. 3(c)는 Bi-2223시편의 M-T특성과 R-T특성을 비교한 결과이다. M-T특성곡선에서 109 K에서 전이가 시작하여 70 K 까지 지속적으로

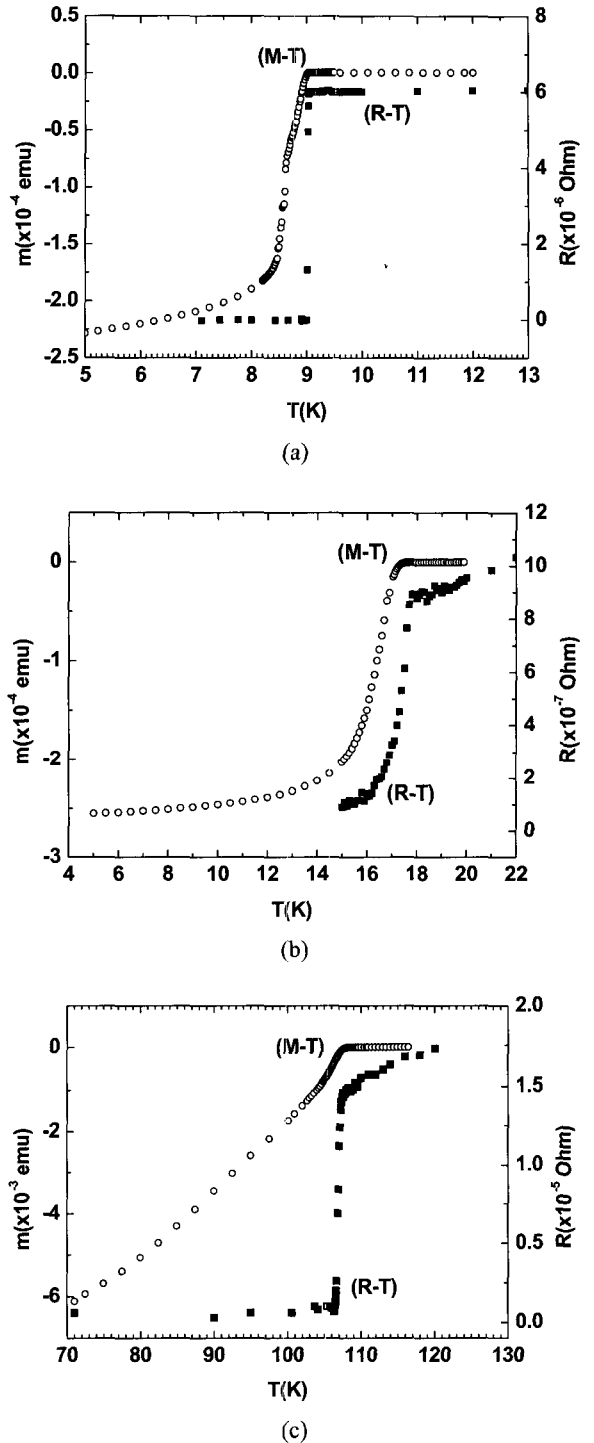


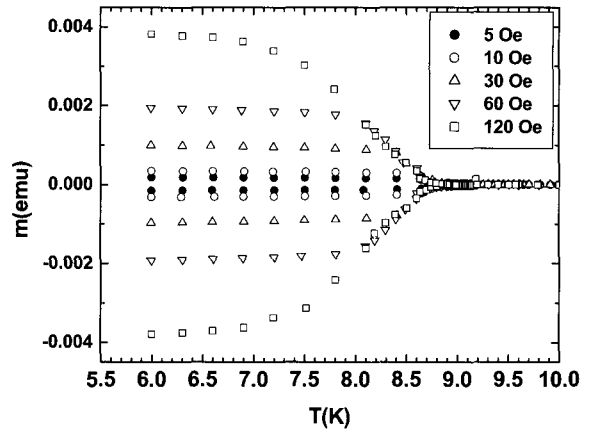
Fig. 3. Comparison of M-T curves with R-T curves. (a) NbTi, (b) Nb₃Sn and (c) Bi-2223.

변하고 있다. R-T 특성곡선의 경우 전이가 시작되는 108 K와 전이가 끝나는 106 K 근처에서 측정값이 약간 요동하고 있지만, 108 K에서 전기적 전이가 시작하여 106.5 K에서 저항이 0으로 급격히 변한다.

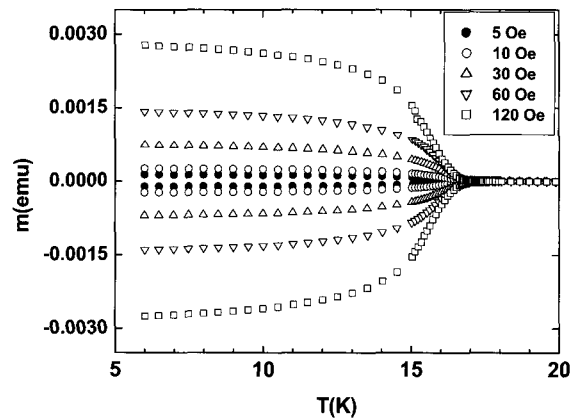
시편들의 M-T 곡선과 R-T 곡선을 비교한 결과 자기적 임계온도는 전기적 방법에서 발견할 수 없는 정보를 알 수 있었다. 대부분의 시편들이 여러 grain으로 구성되어 있으므로 R-T 특성은 초전류의 소통 현상만 관측하는 반면, M-T 특성은 미세 초전도 특성까지 분석할 수 있었다. 그외 시편이 매우 작거나 형상이 특이한 경우에도 자기적 임계온도 측정법은 또 다른 수단으로 활용할 수 있을 것이다.

자장크기에 따른 효과

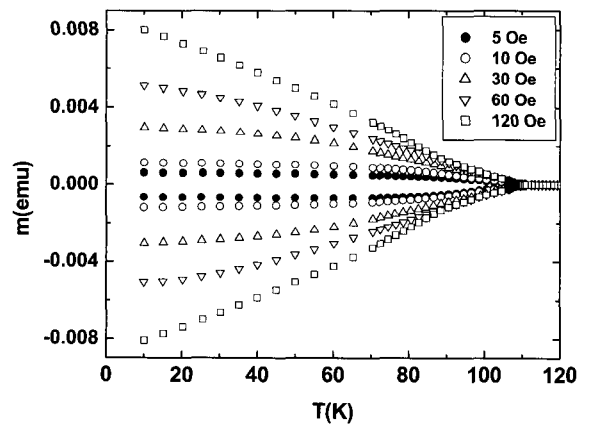
자기적 임계온도 측정에 적합한 자장의 크기를 조사하기 위하여 5 Oe ~ 120 Oe의 자장을 가하고 M-T 특성을 조사하였다. Fig. 4(a)는 NbTi 시편의 6 ~ 10 K에서 결과이다. 자장의 크기가 증가함에 따라 6 K에서 자화값이 -1.8×10^{-4} emu (+5 Oe), -3.4×10^{-4} emu (+10 Oe), -1.0×10^{-3} emu (+30 Oe), -1.9×10^{-3} emu (+60 Oe), -3.8×10^{-3} emu (+120 Oe)으로 선형적으로 증가하고 있다. 6 K에서 측정한 M-H 특성에서 NbTi 시편의 H_{c1} 은 약 250 Oe로 측정되었으므로 이 현상은 예견되었다. 그림의 9.0 K 근처를 확대하여 분석하여 보면, 8.9 K에서 9.0 K로 올라가면서 NbTi의 초전도성이 약해지고 Cu에 의한 상자성효과가 강해지고 있다. 임계온도인 9.03 K 이상의 온도에서는 30 Oe 이상의 자장을 가하면 상자성효과가 커서 60 Oe에서 $+3.4 \times 10^{-6}$ emu, 120 Oe에서 $+7.6 \times 10^{-6}$ emu로 나타났다. 따라서 (+)자장과 (-)자장을 가하고 측정한 \pm 자화곡선이 임계온도 이상의 온도에서 0으로 수렴하지 못하고 교차하는 현상이 발생하여 임계온도 판정에 문제가 발생한다. 전이 시작 온도를 구하기 위하여 상자성값들을 0으로 보정하고, 각 자장의 \pm M-T 곡선을 다시 그리면 9 K 근처에서 0으로 수렴하여 임계온도를 판정할 수 있었다. 즉, 6 K ~ 8 K까지는 인가자장이 커짐에 따라 자화값이 선형적으로 커졌지만, 9 K 근처에서는 자화값이 0으로 수렴하여 전이 시작 온도 9.03 K에서 모두 0이 되었다. 따라서 전이 시작 온도는 5



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Field dependence of M-T curves. (a) NbTi, (b) Nb₃Sn and (c) Bi-2223.

~ 120 Oe의 자장의 크기에 크게 영향을 받지 않는 것으로 보였다.

Fig. 4(b)는 Nb₃Sn시편의 6 ~ 20 K에서 결과이다. 자장의 크기가 증가함에 따라 6 K에서 자화값이 -1.1×10^{-4} emu (+5 Oe), -2.1×10^{-4} emu (+10 Oe), -7.0×10^{-4} emu (+30 Oe), -1.4×10^{-3} emu (+60 Oe), -2.7×10^{-3} emu (+120 Oe)으로 선형적으로 증가하고 있다. 5 K에서 H_{c1}이 약 800 Oe로 측정되었으므로 자장의 크기에 따라 선형적으로 증가하는 것이다. 그림의 17 K근처를 확대하여 분석하여 보면, NbTi처럼 Nb₃Sn의 초전도성이 약해지지만 Cu에 의한 상자성효과는 크지 않았다. 17.4 K 이상의 온도에서 60 Oe의 자장하에서 $+2.5 \times 10^{-6}$ emu, 120 Oe에서 $+5.4 \times 10^{-6}$ emu로 나타났다.

전이시작 온도를 구하기 위하여 상자성값들을 0으로 보정하고, 각 자장의 \pm M-T곡선을 다시 그리면 17.2 K 근처에서 0으로 수렴하여 임계온도를 판정할 수 있었다. 즉, 6 K ~ 15 K까지는 인가자장이 커짐에 따라 자화값이 선형적으로 커졌지만, 16.8 K 근처에서는 자화값이 0으로 수렴하여 전이시작온도 17.2 K에서 모두 0이 되었다. 따라서 전이시작온도는 5~120 Oe의 자장의 크기에 영향을 받지 않은 것으로 본다.

Fig. 4(c)는 Bi-2223시편의 10 ~ 120 K에서 결과이다. 자장의 크기가 증가함에 따라 10 K에서 자화값이 -6.5×10^{-4} emu (+5 Oe), -1.2×10^{-3} emu (+10 Oe), -3.0×10^{-3} emu (+30 Oe), -5.1×10^{-3} emu (+60 Oe), -8.0×10^{-3} emu (+120 Oe)으로 약간 비선형적으로 증가하고 있다. 5 Oe과 10 Oe의 자장의 경우 10 K ~ 70 K까지 일정하다 80 K부터 반자성신호가 감소하고, 30 Oe의 경우 40 K 이상의 온도에서 감소하기 시작하는 데, 60 Oe이나 120 Oe의 경우 10 K 부터 감소한다. 이는 다른 시편에 비해 Bi-2223초전도성분이 균일하지 못하고 산소함량 등의 부족과 낮은 H_{c1}으로 나타난 현상으로 보인다. 그림에서 보는바와 같이 90 K에서 60 Oe와 120 Oe의 자화값이 -1.3×10^{-3} emu의 동일한 값을 보이다가 102 K부터는 5 ~ 30 Oe까지 -4.0×10^{-4} emu의 동일한 값을 보인다. 그림의 109 K근처를 확대하여 분석하여 보면, 온도가 올라가면서 Bi-2223의 초전도성이 약해지지만, Ag에 의한 상자성효과는

크게 나타나지 않고 109 K로 수렴하고 있다. 그러나 임계온도 이상인 110 K에서 120 Oe의 상자성값은 $+4.0 \times 10^{-6}$ emu의 수준이었다. 이들을 0의 값으로 상자성을 보정하면 109.1 K로 수렴하였다. 따라서 전이시작온도는 5 ~ 120 Oe의 자장의 크기에 따라, 실험기기의 오차범위 내에서 영향을 받지 않는 것으로 보인다.

IV. 결론

초전도선재의 자기적 임계온도 측정표준화를 위하여 NbTi, Nb₃Sn, Bi-2223 선재들의 자기적 특성을 조사하였다. 자화-온도 특성곡선의 측정에 적합한 자장인가 방식을 알기 위하여 ZFC과 FC과정을 비교했을 때, ZFC과정에서 측정된 자화값이 FC과정으로 측정된 자화값 보다 훨씬 컸다.

전이시작 온도의 판정기준 향상을 위하여 (+)자장과 (-)자장을 가하고 측정하는 방법을 시도 했는데, 전이가 시작되는 온도를 더욱 분명히 관측할 수 있었다.

NbTi, Nb₃Sn, Bi-2223선재에 대하여 저항법에 의한 임계온도와 자기적 방법에 의한 임계온도 특성을 비교하였다. 자기적으로는 시편의 초전도성이 불균질 한데, 전기적으로는 percolation 현상 때문에 균질한 것처럼 측정되었다. 이는 저항법에서 사용하는 측정기기의 감도가 SQUID의 감도보다 낮기 때문으로, 자기적 방법의 필요성을 다시 한번 확인하는 계기가 되었다.

자기적 임계온도 측정에 적합한 자장의 크기를 구하기 위하여 5 Oe ~ 120 Oe의 자장을 가하고 M-T곡선을 측정하였다. 자장의 크기에 따라 초전도 전이시작온도는 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 초전도상태에 미치는 영향을 최소화 하기 위하여 인가자장은 5 Oe ~ 20 Oe가 적합한 것으로 보인다.

향후 저항법에 의한 임계온도 기준과 부합하는 자기적 방법의 기준을 도출하기 위한 연구를 수행할 예정이며, 국제간 RRT 등을 실시하여 국내규격은 물론 국제규격 제정에 본 연구 결과를 활용할 계획이다.

Acknowledgments

본 연구는 산업자원부 기술표준원의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 초전도시편을 제공하여 주신 KERI의 오상수박사님과 KIMM의 유재무박사님께 감사를 드립니다.

References

- [1] IEC61788-10 Critical temperature measurement by a resistance method (2002).
- [2] MPMS manual published by Quantum Design Co.
- [3] P. Rodrigues, J. Schaf and P.Pureur, *Physical Review B*, 49, 15292 (1994).
- [4] 금속계 및 산화물 초전도재료의 시험·평가방법, ISTEK (1993).
- [5] S. Jin, T. Tiefel, R. Sherwood, R. Dver, *Appl. Phys. Lett.*, 52, 2074 (1988).