

## 초전도체 자화특성 측정을 위한 실험장치의 구축 및 그 동작 특성

### Setup and Operating Characteristics of the Experimental Apparatus for Magnetization Measurements of Superconductor

최세용\*, 나완수\*\*, 주진호\*\*\*

Seyong Choi\*, Wansoo Nah\*\*, Jinho Joo\*\*\*

**Abstract:** Superconductors are dissipative when exposed to time-varying magnetic fields. To analyze the AC characteristics of a superconductor, one usually needs to know magnetization curves of it. Good magnetization curves can be obtained only in homogeneous magnetic field. In this paper, we report the setup and test results of a magnetization measurement system, which consists mainly of frequency-variable power supply and homogeneous magnet with 7-cm long air gap. Special emphasis are focused on the design and fabrication of the magnet, which aims to give background magnetic fields, and on the overall characteristics of the system.

**Key Words:** magnetization, magnet, AC loss

#### 1. 서 론

1987년 고온 초전도체의 발견 이후, 활발한 연구들을 통해서 초전도 응용 분야는 점점 그 영역을 확장시켜 나아가고 있으며, 그 중의 일부는 이미 실용화의 단계에 접어들고 있다. 주지하다시피 초전도체는 임계자장 이하의 직류 자장하에서 저항이 완전히 0인 무저항성을 가진다. 그러나 교류전원과 교류자장하에서의 초전도체는 히스테리시스손, 결합손, 와전류손등의 교류손실을 갖는다. 이런 손실들을 정확히 측정하고 그 양을 계산하는 것은 초전도체를 이용한 시스템을 설계할 때 반드시 요구되는 중요한 변수중의 하나이다. 즉, 초전도선재 또는 케이블의 교류손실을 예측함으로써, 초전도 응용기기 전체의 교류손실 특성을 예측하고 또 손실을 최소화 할 수 있는 방법을 모색할 수 있게 된다.

교류손실 해석에 가장 널리 쓰이는 방법 중의 하나는, 초전도체를 시변 자장 (time-varying magnetic field) 의 환경에 노출하여 초전도체 주위에 권선된 코일에 유기되는 전압의 파형을 관찰하는 이른바 자화법 (magnetization method) 이라고 불리우는 방법이다.

자화법으로 교류 손실을 측정하는데는 기본적으로

균등한 자장을 비교적 넓은 공극에서 (초전도체와 이것을 초전도 상태로 유지시키기 위한 용기를 포함할 수 있는 공간을 말함. 본 논문에서 구축한 시스템에서는 7 cm 임.) 발생시킬 수 있는 마그네트와 여기에 교류전류를 공급할 수 있는 대용량 주파수 가변 전원장치가 요구된다. 본 논문에서는 이러한 장치들의 구축에 대하여 기술하였으며, 특히 균등자장용 마그네트의 설계 및 제작에 대하여 상술하였다. 그리고 구축된 전체 시스템의 교류 운전특성을 분석하였다.

#### 2. 실험 장치의 구성

자화 특성을 측정하기 위한 장치는 그림 1과 같이 크게 나누어서 전원발생부, 자장 발생부, 측정부의 세 부분으로 나눌 수 있다. 구축된 전원발생부는 주파수 가변 전원장치로서 직류·교류 모두 인가가 가능하며, 정전류 또는 정전압 모드에서 동작한다. 또, 직류에서는 0~200 [A]의 전류와 0~200 [V]의 전압을 공급할 수 있으며, 교류에서는 실효치로 0~141 [A]의 전류와 0~141 [V]의 전압을 공급한다. 파형의 모양은 정현파, 구형파, 삼각파등을 발생할 수 있으며, 주파수 가변영역은 0~400 [Hz]이다.

그림 1에서의 자장 발생장치는 전원에서부터 직·교류의 전원을 인가 받아서 공극에 직류, 교류자장을 발생시키는 마그네트이다. 측정하고자하는 초전도 시료가 이 마그네트의 공극에 삽입하여 초전도 시료 주위에 권선된 코일에 유기된 전압을 측정함으로써 자화특성의

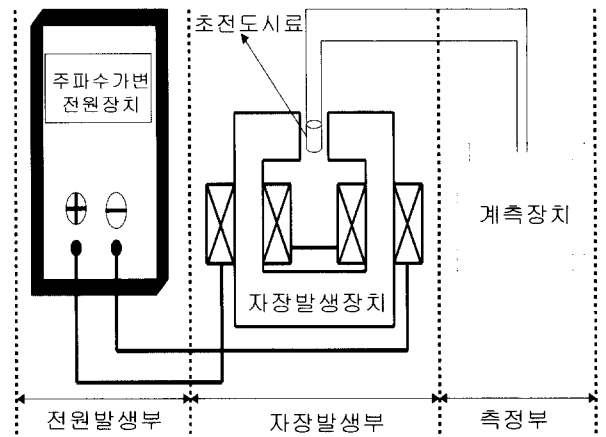


그림 1. 자화특성 측정 실험장치의 개념도

Fig. 1. Schematic diagram of experimental equipments for magnetization measurement

\* 학생회원 : 성균관대 전기전자 컴퓨터공학부 석사과정

\*\* 정 회 원 : 성균관대 전기전자 컴퓨터공학부 부교수

\*\*\* 정 회 원 : 성균관대 금속재료 공학부 부교수

원고접수 : 1999년 4월 08일

심사완료 : 1999년 6월 16일

정보를 얻게 된다. 여기에서 유기된 전압 파형은 적분기와 증폭기등의 계측장치를 통해 자화곡선을 산출해낸다. 이 때, 보다 정확한 자화특성 곡선을 얻기 위해서는 공극에서의 자장 균일도(homogeneity)가 우수해야 하며, 자장의 크기도 가능하면 커야 한다. 다음 장에서는 공극의 길이가 7 cm 라는 큰 크기를 가지면서 어느 기준 이상의 자장 균일도를 만족하는 마그네트의 제작과정, 그리고 그 특성에 대하여 기술하고자 한다.

### 3. 마그네트의 설계 및 제작

#### 3.1 마그네트의 사양 결정

자장 발생 장치로 사용되는 마그네트는 직류나 교류의 전원을 권선부에 인가하여 공극에 자장을 발생시키는 장치를 말한다. 보통 대전류를 통진할 수 있는 초전도 마그네트의 경우에는 코아(core)를 사용하지 않는 구조(空心)를 이용하지만, 일반적인 구리선으로 권선을 하는 경우에는 자기저항(magnetic reluctance)을 감소시키기 위해서 코아를 사용한다. 여기에서는 코아를 사용하여 구리선으로 권선한 마그네트를 설계, 제작하였다. 마그네트의 초기 사양 결정에서는 자속의 누설이 전혀 없는 이상적인 경우를 상정하였다. 이것은 마그네트 공극의 길이가 7 [cm] 나 되는 반면, 코아의 단면적이 10 [cm] x 10 [cm] 밖에 되지 않는 것을 고려하면, 지나치게 이상적인 경우를 상정한 것이라고 할 수 있다. 즉, 실제로 제작된 마그네트의 공극에서는 누설자속 때문에 표 1에 기술된 목적 자장 1 [T] 보다 매우 작은 값을 갖게 될 것을 예측할 수 있다. 초기에 설정된 마그네트의 사양 및 외관을 표 1과 그림 2에 각각 나타내었다.

표 1. 초기에 설계된 누설자속이 없는 이상적인 마그네트의 사양

Table 1. Design parameters of the ideal leakageless magnet (1st stage magnet)

Input data		Output data	
목적자장	1 [Tesla]	저항	0.0902 [ $\Omega$ ]
인가전류	140 [A]	인덕턴스	0.0284 [H]
전류밀도	2 [A/mm <sup>2</sup> ]	암페어 턴	55,720 [A*Turns]
공극	0.07 [m]	권선수	398 [Turns]

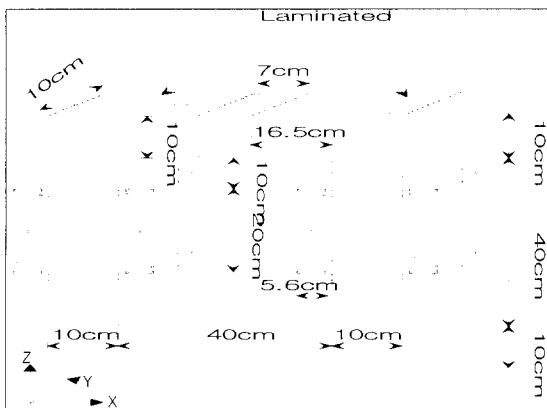


그림 2. 초기에 설계된 마그네트의 외형  
Fig. 2. Outer view of the first stage magnet

#### 3.2 마그네트의 제작 및 자장분포 측정

위에서 결정된 사양으로 마그네트를 실제로 제작하였으며, 그림 3은 이것의 실물 모습을 보인다. 여기에서 마그네트의 코아는 0.5t 의 철심을 성층시켜서 제작하였으며, 또 140 [A]의 전류가 흐를 때 약 1.8 [kW]의 주열이 발생하게 되는데, 이것을 냉각시키기 위해서 마그네트의 권선부 전체를 절연유에 함침시켰다. 그림 3의 사진의 양쪽 둥근 부분은 절연유에 잠기기 전의 권선부의 모양을 보이고 있으며, 왼쪽과 오른쪽 각각 199회씩 양쪽에 모두 398회 권선하였다. 그리고 왼쪽과 오른쪽 두 코일의 단말부분들은 마그네트 외부에서 직렬 또는 병렬로 결선할 수 있도록 제작되었다.

제작된 마그네트는 홀 소자 (Hall sensor)를 이용하여 공극에서의 자장분포를 측정하였으며 그림 4에 자장분포 측정을 위한 좌표계를 나타내었다. 좌표의 원점을 중심으로 x = 2, 3.5 [cm], y = 4, 6 [cm], z = 0, 2, 4, 6, 8, 10 [cm]의 부위에서 자장을 측정하였으며, 전류가 각각 30, 80, 140 [A] 일 때의 자장분포를 그림 5의 (a), (b), (c)에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 140 [A] 통전시 공극에서의 자장의 세기가 누설자속이 없다고 가정된 이상적인 마그네트의 설계시 목표로 취했던 1 [T] 에 비해서 1/3 이상 현저히 감소한 것을 알 수 있다. 이것은 기본적으로 공극이 마그네트의 단면적에 비하여 너무 커서 누설자속이 급격히 증가하였기 때문으로 해석할 수 있다.



그림 3. 초기형상으로 제작된 마그네트의 형상  
Fig. 3. Photograph of the fabricated magnet (the 1st stage magnet)

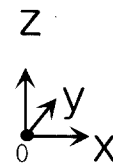


그림 4. 자장분포 측정 좌표계  
Fig. 4. Coordinates for magnetic field distribution measurements

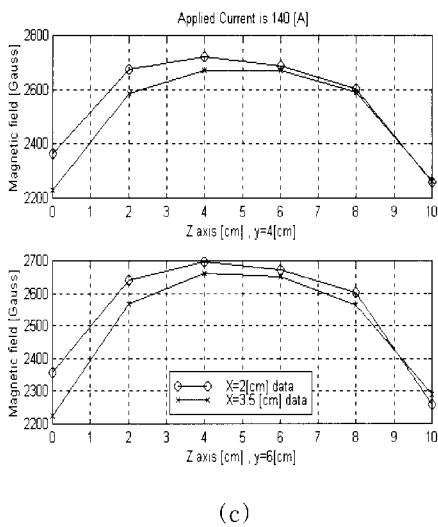
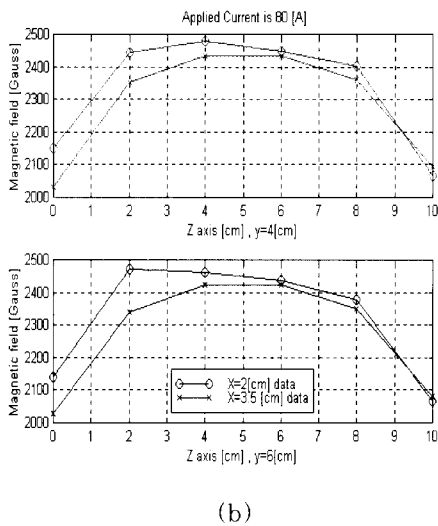
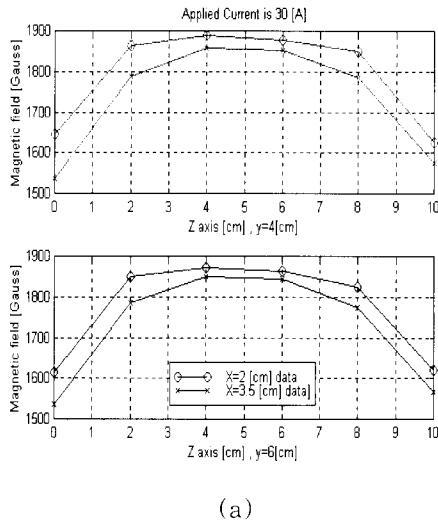


그림 5. 초기 제작된 마그네트의 경우 (a) 30 [A], (b) 80 [A], (c) 140 [A]의 전류가 인가됐을 때 공극에서 측정된 자장 분포  
Fig. 5. Magnetic field distribution in the air gap with current of (a) 30 [A] (b) 80 [A] (c) 140 [A] : for the 1st stage magnet

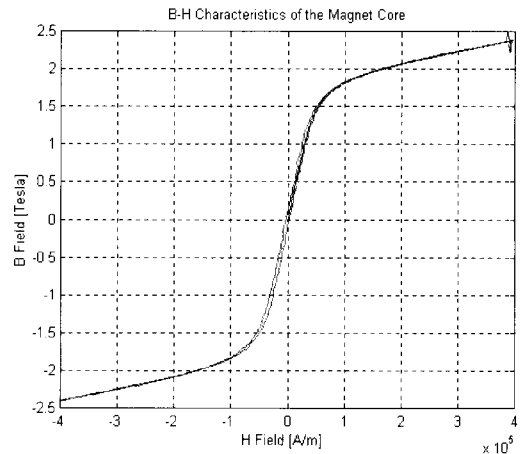


그림 6. VSM 방법으로 측정된 마그네트 코아의 자기 이력 곡선  
Fig. 6. Hysteresis loop of the magnet core measured by VSM(Vibration Sample Magnetometer) technique

또, 그림 5의(a)에서와 같이 전류가 30 [A]일 때의 자장의 세기가 약 2000 [Gauss] 이었던 반면에, (c)에서와 같이 전류가 140 [A]로 4 배 이상 증가하였음에도 자장은 약 3000 [Gauss]로 두 배도 증가하지 않았다는 것은 마그네트의 코아가 자기적으로 포화 되었음을 시사한다. 이것을 실제로 확인하기 위해서 마그네트의 코아로 사용된 철의 B-H 곡선을 VSM (Vibration Sample Magnetometer) 방법을 이용하여 측정했으며, 그림 6은 측정 결과를 보이고 있다. 여기에서 알 수 있듯이 마그네트 제작에 사용된 코아는 자장의 세기가 약  $1 \times 10^5$  [A/m] 부근에서 급격히 포화영역으로 들어가는 것을 알 수 있다. 한편, 전류를 증가시킬 때 코아 내부에서의 자장 변화를 살펴보기 위해서 코아 단면의 중심 ( $x=3.5, y=5, z=5$  [cm])에서 자장을, 마그네트의 전류를 증가시켜가면서, 측정하였으며, 그림 7은 그 결과를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 약 20 [A]의 전류에서부터 자장이 포화되기 시작함을 알 수 있다. 자장  $B$ 의 법선 성분은 경계면에서 연속이고, 또 코아의 기하학적인 모양이  $y=5, z=5$  [cm]의 선을 중심으로 대칭이므로, 코아단면의 중심에서 측정한  $B$ 는 코아내부에서의 자장에 비례하는 양으로 해석할 수 있다. 그림 7에서 가장아래에 위치한 곡선은 (실제로는 2개의 곡선임.) 마그네트의 형상을 재설정 한 후 (다음절 참조) 각각  $x=3, 4$  [cm]에서 측정된 자장을 함께 보인 것이며, 그 값들은 거의 일치함을 알 수 있다. 즉, x축의 거리에 따른 자장의 크기는, 코아에 매우 근접한 경우를 제외하고는, 거의 같은 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 이것은 코아 단면의 중심을 x축으로 연장한 선 ( $x, y=5, z=5$  [cm]) 상에서  $B (= \mu_0 H)$ 가 실질적으로 같은 값을 가진다는 것을 의미한다. 실제로 x 축상으로 위치를 변경시켜 가면서 자장을 측정 한 결과 코아 단면의 바로 인접한 곳 이외에는 거의 같은 값을 가진다는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 마그네트 코아의 중심선을 따라서 이루어지는 폐곡선 (integral path, C)으로 적분선을 취하여 암페어의 법칙을 적용하고, 코아에서의 기자력 강하(mmF drop: magnetomotive force drop)를 무시하면 기자력 강하는 공극에서만 발생했다고 할 수 있으므로, 다음 식이 성립한다.

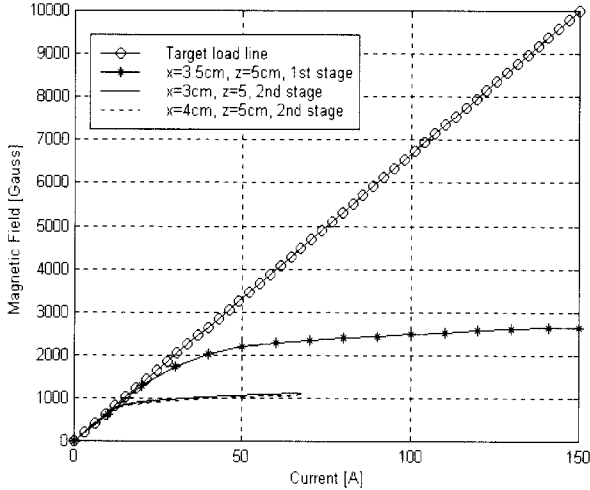


그림 7. 마그네트의 부하곡선  
 Fig. 7. Load lines of the magnets: the designed, 1st stage, and 2nd stage magnets

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_{gap} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = N \cdot I \quad (1)$$

여기에서  $N$ 은 권선수이고  $I$ 는 전류, 공극의 길이는 7 [cm]이다. 따라서 전류가 20 [A]일 때의 자기장의 세기  $H$ 는 약  $1.1 \times 10^5$  [A/m]로 계산된다. 이 값은 그림 6에서 자기포화가 시작된  $H$ 의 값과 일치하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 그림 5에서와 같이 전류가 30 [A]에서 140 [A]로 증가했음에도 공극에서의 자기장의 크기가 비례하여 증가하지 않은 것은 코어가 포화되었기 때문임을 확인할 수 있다.

이제 측정된 공극의 자장을 균일도 측면에서 살펴보기로 한다. 그림 5의 각 그림에서 첫 번째 그래프는  $y = 4$  [cm], 두 번째는  $y = 6$  [cm]에서의 자장 분포를 나타낸다. 이 측정 결과로 나타난 마그네트 공극에서의 자장의 최대값과 최소값의 차이인 자장 변화량  $\Delta B (= B_{max} - B_{min})$ 를 표 2에서 정리하였으며, 대략 75 - 100 [Gauss]의 변화량을 보였다.

표 2. 초기에 제작된 마그네트 공극에서의 자기장 변화량 ( $\Delta B$ )

Table 2. Magnetic field variations in the air-gap of the 1st stage magnet

그림 5-(a)		그림 5-(b)		그림 5-(c)	
y=4	y=6	y=4	y=6	y=4	y=6
75	74	80	85	101	101
[Gauss]	[Gauss]	[Gauss]	[Gauss]	[Gauss]	[Gauss]

### 3.3 마그네트의 자장 균등도 향상

이제 위에서 측정된 공극에서의 자기장의 변화량이 균등도 측면에서 충분한지 또는 그렇지 않은지를 분석할 필요가 있다. 자장을 경험하는 시편에서 나오는 자화 신호 전압은 식 (2)의 형태로 유기된다. 여기에서  $v$ 는 측정되는 자화 전압,  $N$ 은 시료 주위에 권선한 코일의 권선수,  $\Phi$  [wb]는 쇠교자속이다.

$$v = N \frac{d\Phi}{dt} = N \frac{d}{dt} \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (2)$$

초전도 시편의 단면적  $S$ 에 인가되는 자장  $B$ 는

$$B = B_0 + \Delta B \quad (3)$$

와 같이 표현될 수 있고, 측정하려는 시료의 단면적 상에서 일정한 자장  $B_0$ 와 변화량  $\Delta B$ 로 표현될 수 있다. 그리고 식 (2)의 전압도 식 (4)와 같이 일정 자장  $B_0$ 에 의한 유기 전압  $v_0$ 와 자장 변화량  $\Delta B$ 에 의한 유기 전압  $\Delta v$ 로 나타낸다.

$$v = v_0 + \Delta v \quad (4)$$

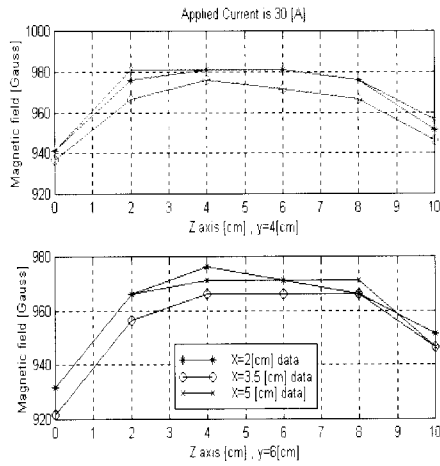
즉, 시편에서 유기되는 신호전압은 자장의 변화량  $\Delta B$ 로 인하여 우리가 원하는 자화 신호 성분인  $v_0$  이외에도 자장의 공간적 변화량 때문에 유기되는  $\Delta v$ 라는 전압이 더해져서 측정된다.  $\Delta v$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta v = N \cdot \Delta B \cdot S \cdot \omega \quad (5)$$

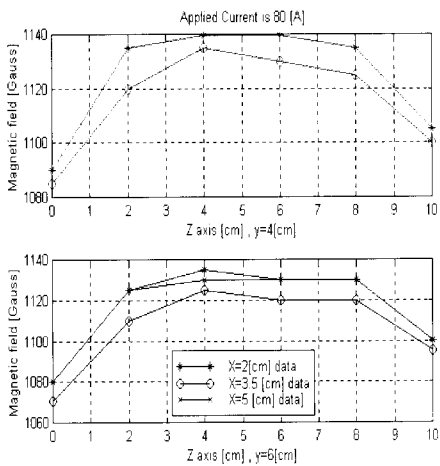
만약 시편의 단면적 ( $S$ )이  $1.0 \times 10^{-4} [m^2]$ , 시편에 감은 코일의 권선수 ( $N$ )가 74 [turns], 시편에 가하는 자장의 주파수 ( $\omega$ )와 균등도 ( $\Delta B$ )를 각각 10 [Hz], 100 [Gauss]라고 가정하면,  $\Delta v$ 는 식 (5)에 의하여 4~5 [mV]가 유기됨을 알 수 있다. 샘플의 크기 및 종류에 따라서 다르지만, 일반적으로 측정되는 자화 전압이 작게는  $[\mu V]$  오더에서 크게는 수~수십 [mV]라는 것을 감안하면 4~5 [mV]라는 전압은 매우 큰 값이다. 즉,  $\Delta B$ 에 기인한 전압의 교란은 자화 전압의 측정에서 제거되어야 하거나, 최소한으로 줄어야 한다. 이를 위해서는 식 (4)에서 보는 바와 같이 자장의 균일도를 높여서  $\Delta B$ 를 최소로 만들어야 한다. 이와같이 만들기 위해서 마그네트의 형상을 재설정하였다. 이 과정에서는 마그네트 공극 주위의 철심에 새로 성층된 철심 (pole shoe)을 부착하여 공극의 단면적을 약 9배 넓혔다. 그림 8은 새로 수정, 보완된 마그네트 형상의 사진이다. 한편, 이와같이 수정된 마그네트의 형상에서는 자장의 균일도 향상과 함께 자장 크기의 감소도 함께 예상되었다. 자장감쇄의 주요한 이유로는 코어축을 지나는 자속의 양이 이전의 형상일 때와 비교하여 비슷하다고 하면, 자속이 지나가는 단면적이 pole shoe의 추가로 인해 9배 증가하였기 때문으로이다. 이러한 예상은 다음에 기술되는 공극에서의 자장분포 측정결과에서부터 확인이 된다.



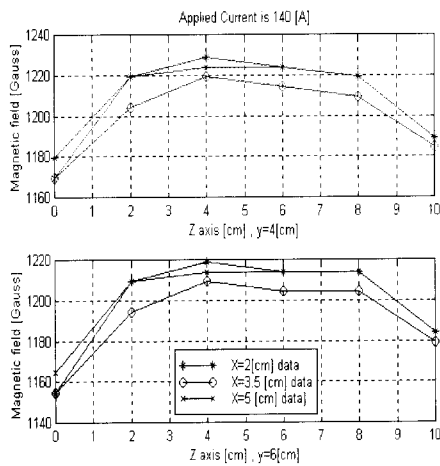
그림 8. 수정되어 재제작된 마그네트의 형상  
 Fig. 8. Photograph of the fabricated magnet (the 2nd stage magnet)



(a)



(b)



(c)

그림 9. 수정된 마그네트에 (a) 30 [A], (b) 80 [A], (c) 140 [A]의 전류가 인가됐을 때 공극에서 측정된 자장 분포  
**Fig. 9.** Magnetic field distribution in the air-gap with current of (a) 30 [A] (b) 80 [A] (c) 140 [A] : for the 2nd stage magnet

표 3. 수정되어 재제작된 마그네트 공극에서의 자기장 변화량

**Table 3.** Magnetic field variations in the airgap of the 2nd stage magnet

그림 5-(a)		그림 5-(b)		그림 5-(c)	
y=4	y=6	y=4	y=6	y=4	y=6
10	10	15	14	15	15
[Gauss]	[Gauss]	[Gauss]	[Gauss]	[Gauss]	[Gauss]

새로 보완된 마그네트의 자장과 균등도를 확인해 보기 위해서 이전의 형상에서 측정했던 동일한 방법으로 자장 분포를 측정했다. 측정소자는 같은 홀소자를 이용했고, 좀더 조밀한 측정을 위해서  $x = 2, 3.5$  [cm] 이외에  $x = 5$  [cm] 부위의 자장을 추가로 측정했으며,  $y = 4, 6$  [cm],  $z = 0, 2, 4, 6, 8, 10$  [cm]의 장소에서 자장을 측정했다. 이 때 전류는 각각 30, 80, 140 [A] 이다. 그림 9의 각 그림 첫 번째는  $y = 4$ , 두 번째는  $y = 6$  [cm]의 자장 분포를 나타낸다. 앞에서 언급한대로, 마그네트의 형상을 변경하는 과정에서 자기저항 성분의 증가가 예상되었으며, 실제로 측정 결과 그림 9에서처럼 자장이 많이 감소된 것을 확인할 수 있다. 여기에서 새롭게 수정, 보완된 마그네트의 공간에 대한 자장 변화량을 살펴보면 표 3에서 나타난 것과 같이 10~15 [Gauss] 정도로 이전의 형상에 비해 약 7~10 배정도 균일한 자장 분포를 나타낼 수 있다.

#### 4. 실험장치의 교류 특성

본 실험장치가 교류 전원하에서 어떠한 특성을 나타내는지 살펴보기 위해서 정현파 모양의 정전류 전원을 인가하여 주파수 특성을 살펴보았다. 그림 10의 (a)는 마그네트의 주파수에 대한 리액턴스 성분을 측정된 결과를 나타낸다.

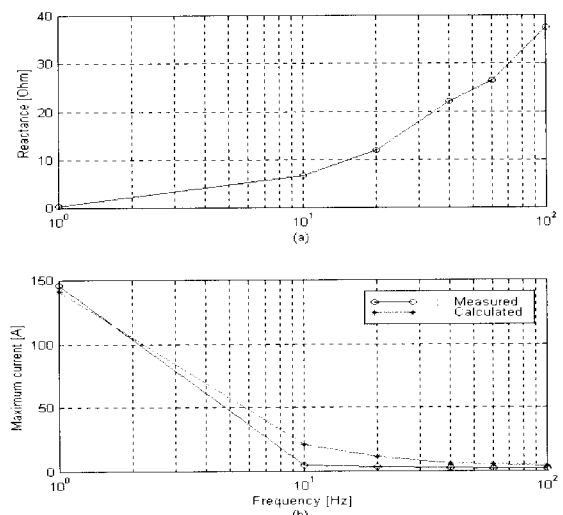


그림 10. 주파수별 리액턴스 특성과 최대 실효치 전류  
**Fig. 10.** Reactance and maximum root mean square current with variable frequencies

한편, 전원장치가 갖는 최대전압과 최대전류의 실효치가 각각 141 [A] 와 141 [V] 로 제한되기 때문에 실제로 본 실험장치에 인가될 수 있는 전류의 양은 그림 10의 (b)에서와 같이 1 [Hz]에서 140 [A]로 전원부 전류의 전체 용량이 인가될 수 있으나, 10~100 [Hz] 영역에서는 리액턴스의 증가 때문에 흐를 수 있는 전류의 양은 급격히 감소해서 2~7 [A] 만이 인가될 수 있다. 이 때 공극의 중심부에서는 1 [Hz]에서 1000 [Gauss], 10~100 [Hz] 영역에서 120~460 [Gauss]의 교류자장을 발생시킬 수 있었다. 마지막으로 위와 같이 제작된 장치를 이용하여 YBCO 초전도체의 자화특성 곡선을 측정하였다. 이 실험과정 및 결과분석에 대해서는 다른 지면을 통하여 상세히 발표될 예정이며, 여기에서는 여러가지로 측정된 결과 중의 하나를 그림 11에 나타내었다. 이 곡선은 10 [Hz]의 주파수에서의 파형이며, 초전도체가 포화되기 전에서의 반자성 특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

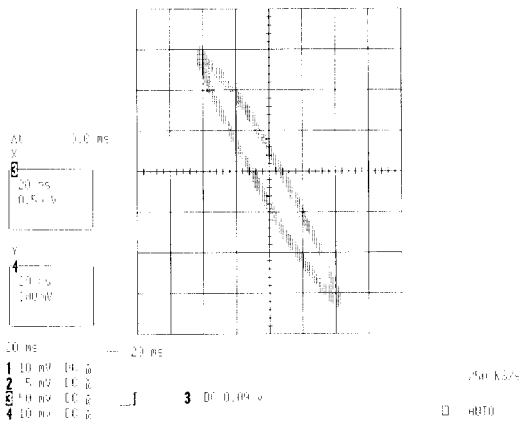


그림 11. YBCO 초전도체의 반자성 특성곡선  
 Fig. 11. Magnetization trace of YBCO bulk superconductor at 10 Hz

### 5. 결 론

본 논문에서는 초전도 시료의 자화특성 관찰을 위한 실험 장치를 제작, 구축하였으며, 전체 실험장치의 동작 특성에 관하여 기술했다. 실험장치 중에서 자장 발생부의 공극은 초전도 시료가 담길 용기를 수용할 수 있도록 크게 제작했으나, 이로 인해 공극에서의 자속 누설이 심해지고 자장이 상대적으로 불균일했다. 이러한 자장 균일도를 향상시키기 위해서 마그네트 형상을 재설정하였으며, 이 때 공극에 인접한 코아의 주위에 pole shoe를 부착함으로써 자장의 불균일성을 보완했으나, 자속이 지나가는 단면적이 pole shoe의 추가로 인해 증가하여, 그 결과로 자장의 크기 자체는 더욱 작아졌다. 최종적으로 구축된 실험장치는 직류 및 1 [Hz]에서 1000 [Gauss]의 자장을, 10~100 [Hz] 영역에서 120~460 [Gauss]의 교류자장을 7 [cm]의 공극에 발생시킬 수 있었다. 이 때 직경 10 [cm]의 구 영역 (spherical diameter of 10 [cm])에서 자장의 변화량은 10~15 [Gauss] 정도이고, 일반적으로 샘플의 크기가 수 [cm] 인 것을 감안하면 실제 샘플이 경험하는 자장의 공간적 변화량은 10 [Gauss] 미만이다. 끝으로, 구축된 장치를 이용하여 YBCO 초전도체의 반자성 특성곡선을 얻을 수 있었음을 보였다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 97 핵심전문연구과제와 96년도 성균학술연구과제 지원에 의해 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 최세용, 나완수, 이세희, 박일한, "균등 자계 발생용 마그네트의 제작 및 특성", 한국초전도 저온공학회 제1회 학술대회 논문집, pp. 73-76, 1999.
- [2] 강형구, 나완수, "YBCO BULK 초전도체의 자화특성에 관한 실험적 연구", 한국초전도 저온공학회 제1회 학술대회 논문집, pp. 77-80, 1999.
- [3] 김광윤 외 9인 공역, "자성 재료학", 반도출판사, 제2장, 1993.
- [4] G.R.Slemon, A.Straughen, "Electric Machines", Addison-Wesley Publishing Company Inc., pp. 2-82, 1980.
- [5] 中田高義외 2인, "直交 電磁石의 設計と應用", 森北出版株式會社, pp. 28~46, 1991.
- [6] Martin N. Wilson, "Superconducting Magnets", Clarendon Press Oxford pp. 159-199, 1983.
- [7] C.Schmidt, K.Itoh, H.Wada, "Second inter-comparison: A.C. loss magnetization measurement of hysteresis and coupling losses in NbTi multifilamentary strands", Cryogenics, 37, pp. 77-89, 1997.

### 저 자 소 개



#### 최세용(崔世鎔)

1974년 10월 9일생, 1998년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 현재 동대학원 전기전자 컴퓨터 공학부 석사과정



#### 나완수(羅浣洙)

1962년 6월 14일생, 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업, 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1991년~93년 미국 Superconducting Super Collider lab. Guest Collaborator, 1991년~95년 한국전기연구소 초전도응용연구사업팀 선임연구원, 현재 성균관대 전기전자 컴퓨터 공학부 부교수



**주진호(朱鎭皓)**

1961년 12월 6일생, 1984년 성균관대 공대 금속공학과 졸업, 1986년 미국 웨인주립대학 금속공학과 졸업(공학석사), 1993년 미국 일리노이 공대 금속재료공학과 졸업(공학박사), 1995년 동대학원 연구원 및 아르곤 국립연구소 객원연구원, 1995년~현재 성균관대 금속재료공학부 부교수