

Fabrication of an HTS DC SQUID Electronic Gradiometer and it's application in NDE system

고온 초전도 Electronic Gradiometer의 제작과 NDE system 에의 응용

Jin-Young Kim, Sung-Gun Han, Joon-Hee Kang,
Eun-Hong Lee* and I-Hun Song*

김진영, 한성건, 강준희, 이은홍*, 송이현*

Department of Physics of University of Incheon, Incheon 402-749, Korea
** Samsung Institute of Technology*

인천광역시 남구 도화동 인천대학교 물리학과, 402-749
*삼성종합기술원

We designed and constructed a non-destructive evaluation system using an HTS DC SQUID electronic gradiometer. Our DC SQUID electronic gradiometer is composed of two DC SQUID magnetometers. The system included a non-magnetic stainless steel cryostat and a set of coaxial exciting coils, which were used to induce an eddy current in the test material. We also have calculated the eddy current density produced by an exciting coil in any direction of the testing object. We could compute the eddy current density distribution in 3D. The SQUIDs were computer controlled and the output data from the electronic gradiometer was obtained by using a Labview software.

1. 서 론

산업이 고도로 발달한 현재 많은 부분에서 비파괴 검사의 필요성이 점차 커지고 있다. 여러 가지 방법을 이용하여 비파괴 검사가 이루어지고 있지만 그 중에서도 고온 초전도 SQUID (Superconducting Quantum Interference Device)를 이용한 Nondestructive Evaluation (NDE) System은 아주 미세한 자기장에도 민감하게 반응하는 SQUID의 특성을 이용하기 때문에 매우 감도가 좋은 비파괴 검사 장치로 사용할 수 있음은 물론 이러한 탁월한 특징을 이용함으로써 금속재료의 미세한 결함을 검출 할 수 있다[1]. 본 연구에서는 미세자장을 측정하는데 있어서 뛰어난 감도를

갖고 있는 HTS DC SQUID를 이용하여 노이즈 환경에서도 사용할 수 있는 electronic gradiometer를 구성하였다. 또한 non-magnetic shielding 환경에서 하에서의 gradiometer의 noise를 측정하였다. 금속 재료의 결함을 검출하기 위하여 Eddy current를 유도시켜 주는 exciting coil을 디자인하였으며, coil에 의해 발생하는 eddy current의 분포와 거리에 따른 자기장의 세기를 계산하였다. 또한 test piece를 scan하여 gradiometer의 성능을 test하였다.

2. 실험방법

DC SQUID magnetometer를 제작하기 위하여

SrTiO₃ bi-crystal 기판 위에 200nm 두께의 YBCO film을 PLD 방법을 이용하여 증착하였다.

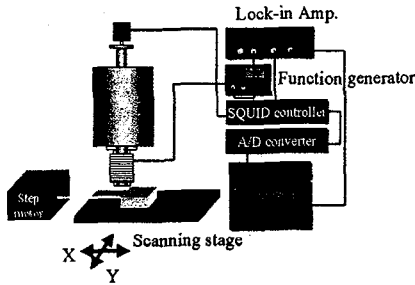


그림 1. DC SQUID NDE system.

일반적인 photo-lithography 방법과 ion etching 방법을 사용하여 YBCO film에 dry etching을 사용하여 SQUID pattern을 하였다. Junction 폭과 길이는 각각 2 μ m, 6 μ m 이었다. 본 연구에서는 두 개의 DC SQUID를 사용하여 Electronic gradiometer를 구성하는데 초점을 두었다. 일반적으로 사용하는 gradiometer는 magnetometer와는 달리 외부의 자기장이나 노이즈 상태에서도 사용할 수 있는 장점이 있으며, 또한 비파괴 검사 장치에서는 자기장의 절대값보다는 자기장의 gradient를 측정하는 것이 필수적이므로 양질의 gradiometer를 제작하는 것은 비파괴 검사 장치의 개발을 위해서는 필수적이다. gradiometer는 magnetometer와는 달리 자기장을 검출하는 pick-up loop가 두 개이다. gradiometer의 경우 두 개의 loop에서 자기장을 검출하는데 지구 자기장처럼 일정한 자기장은 두 개의 loop에서 동시에 측정되므로 한 개의 loop에서 측정된 자기장이 다른 loop에서 측정된 자기장과 상쇄되어 변화되는 자기장만이 측정되므로 외부 자기장이나 노이즈가 있는 상태에서도 사용할 수 있다. 2개의 loop 면적의 차와 면적의 비를 balance라고 부르고 gradiometer의 성능을 나타내는 parameter의 하나로 되어있다. 고온 초전도체 SQUID의 경우에는 balance가 좋은 gradiometer의 제작이 용이하지 않기 때문에 본 연구에서는 두 개의 DC SQUID magnetometer를 사용하여 양쪽 SQUID의 data 차에 따라 gradiometer의 기능을 할 수 있는 전자식 gradiometer를 구성하고 이를 사용하여 NDE system을 구성하였다. 그림 1은 NDE system의 개략도이다. 그림 2는

electronic gradiometer의 개념도 이다. electronic gradiometer에서는 두 개의 DC SQUID가 각각 독립된 Channel을 가지고 작동하고 각각 얻어지는 data를 사용하여 gradient output을 얻게된다 [2].

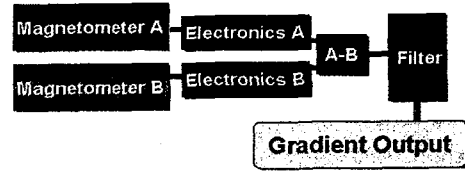


그림 2. Electronic gradiometer의 개념도.

두 개의 DC SQUID를 사용하여 electronic gradiometer를 구성하기 위하여 적절한 PCB 보드를 디자인하였다[3]. 이 PCB보드는 probe에 장착되어 liquid-N₂ dewar에 잠기게 된다. 본 연구에서 사용된 dewar는 non-magnetic stainless steel로 되어있고 아래쪽에 tail이 있어서 그 안에 electronic gradiometer가 놓이게 되고 바깥쪽에 exciting coil이 위치하게 된다. 그림 3은 본 연구에서 사용된 coil의 디자인이다. exciting coil은 inner coil frame과 outer coil frame 두 부분으로 구성되어 있다. inner frame은 지름이 2cm, outer frame은 4cm로 되어 있으며, 코일 wire의 지름은 0.01mm 이고, frame은 각각 200 Ω 의 저항 값을 가진다. 본 연구에서는 디자인된 coil에 의해 발생하는 eddy current 분포를 계산하였으며 또한 Labview software를 이용하여 각각의 SQUID channel에서 얻어지는 data를 사용하여 field gradient를 구하였다.

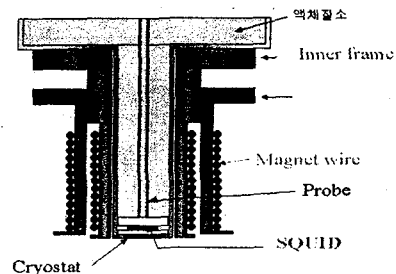


그림 3. exciting coil 디자인.

3. 결과 및 고찰

exciting coil을 디자인하기 위하여 원형 코일에 finite plate에 발생시키는 Eddy current 분포를 다음 식에 따라 계산하였다.

$$J_{\theta}(r, z) = -\frac{ip^2 I}{a^2} \int_0^{\infty} \exp(-kb/a) J_1(k) J_1(kr/a) \cdot \frac{(k\mu_r + q) \exp(q(c-z')/a) - (k\mu_r - q) \exp[-q(c-z')/a]}{(k\mu_r + q)^2 \exp(qc/a) - (k\mu_r - q)^2 \exp(-qc/a)} k dk$$

$$q = (k^2 + ip^2)^{1/2}, p = \sqrt{\mu_0 \omega \alpha^2}$$

$\mu = \mu_0 \mu_r \cdot \mu_r$, k are the relative permeability of the medium and the constant of separation

그림 4는 Eddy current 분포를 계산한 결과를 보여주고 있다. 이 결과는 coil의 반경과 가해주는 전류의 frequency에 따라 current density가 어떠한 관계를 가지고 있는지를 보여 준다. 이 계산은 2cm의 두께를 가지는 plate에 10mA의 전류를 흘렸을 때 유도된 eddy current 분포를 나타낸 것이다. 그림4의 결과로부터 70Hz의 전류를 코일에 가해줄 때 최대의 Eddy current를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

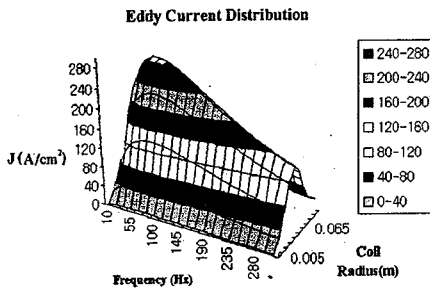


그림 4. Computation result of an Eddy current distribution.

1 inch 두께의 plate 와 exciting coil 사이의 magnetic field 분포를 계산하였으며 이는 그림 5에 나타나 있는 바와 같다. 그림 5의 결과를 사용하여 자기장의 세기가 coil과 plate의 거리에 따라 어떤 분포를 갖는지를 구하였다.

본 연구에서는 SQUID를 control 하기 위해 Conductus PC-1000 SQUID controller를 사용하였으며 좋은 blance를 얻기 위하여 Labview software를 사용하였다. 그림 6에는 Mu-metal shielding 환경 하에서 측정된 SQUID 각각의

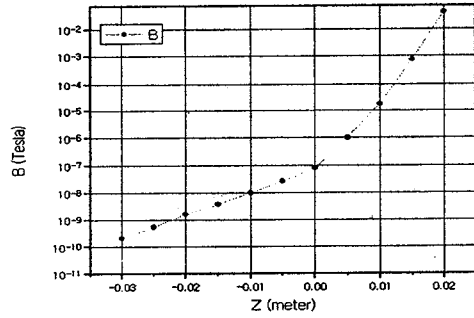


그림 5. exciting coil과 plate 거리에 따른 magnetic field의 분포.

output과 이 결과로부터 얻어진 gradiometer의 output을 보여주고 있다.

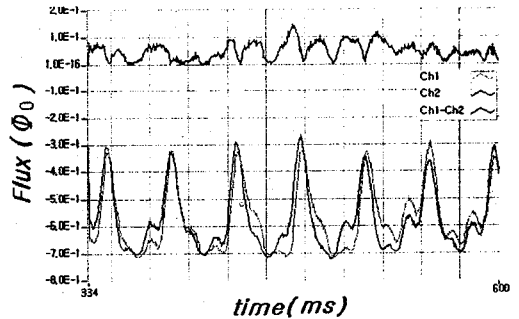


그림 6. Mu-metal shielding 환경에서의 각각의 SQUID channel 측정결과 및 gradiometer(Ch1-Ch2)의 output 결과.

그림 7에는 Un-shielding 환경에서 측정된 각각의 SQUID의 output 결과와 gradiometer의 output 결과를 보여주고 있다. 이 그림에 보여지고 있는 바와 같이 Mu-metal shielding 환경 하에서 측정된 결과에 비하여 훨씬 더 많은 noise가 검출됨을 알 수 있다. 이에 대한 분석을 위하여 측정결과들과 Labview software를 사용하여 spectrum 분석을 하였다. 그림 8에는 Mu-metal shielding 환경 하에서의 gradiometer의 output 결과를 spectrum 분석한 결과를 보여주고 있으며 그림 9에는 un-shielding 환경 하에서의 gradiometer의 output 결과를 spectrum 분석한 결과를 보여주고 있다. 그림 8과 그림 9에서 볼 수 있듯이 shielding을 하지 않은 경우에 약 1 order of magnitude의 차이가 남을 알 수 있다.

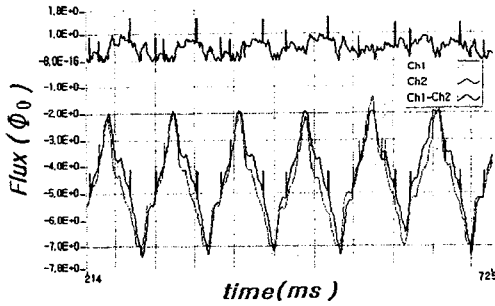


그림 7. 각각의 SQUID channel의 측정결과 및 un-shielded gradiometer의 output 측정결과.

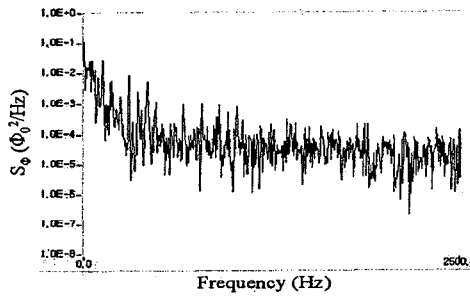


그림 8. un-shielded gradiometer의 output에 대한 spectrum 분석결과.

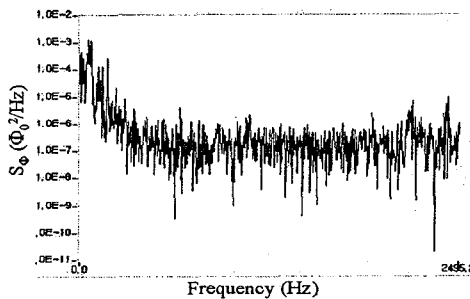


그림 9. shielded gradiometer의 output에 대한 spectrum 분석결과.

그림 10은 electronic gradiometer를 사용하여 구성한 NDE system의 시험을 위하여 weak magnet test piece를 scan한 결과를 보여주고 있다. 본 실험에서 사용한 magnet test piece의 자기장의 세기는 2cm 거리에서 약 1.5Gauss의 세기를 나타내었다. test piece를 scan한 속도는 6cm/s 이었고, gradiometer와 test piece 사이의 거리는 약 2cm 이었다. 그림 10의 결과는

output signal을 15Hz low pass filter로 처리한 결과이다.

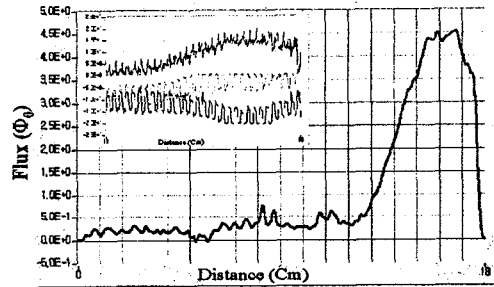


그림 10. magnetic test piece를 NDE system 하에서 scan한 결과.

(안쪽의 그림은 ch1,ch2,ch1-2의 측정결과.)

4. 결론

본 연구에서는 각각의 독립된 채널의 YBCO DC SQUID를 이용하여 Electronic Gradiometer를 구성하였다. 또한 비자기 차폐환경 하에서 weak magnet을 scan 하여 봄으로서 제작된 NDE system을 시험하였다.

감사의 글

본 연구는 학술진흥재단의 기초과학연구소지원 프로그램에 의한 것입니다.

참고문헌

- [1] V. Schultze, R. Stolz, and V. Zakosarenko High Tc SQUIDs for Unshielded Measuring in Disturbed Environments JOURNAL DE PHYSIQUE IV, vol 6, C3-367, 1996.
- [2] F. Schmid, S. Wunderlich and H. Specht HTSC-dc-SQUID Gradiometer for a nondestructive testing system, Inst. Phys. Conf. No158, pp. 651-654, 1997.
- [3] J. Y. Kim, J. H. Kang, E. H. Lee, I. H. Song, J. H. Gohng, and T. S. Hahn, Construction and Measurements of HTS DC SQUID Electronic Gradiometer to be used in NDE Systems, IEEE Transaction on Appl. Supercond.