

Nondestructive Evaluation System using SQUID in Magnetically Un-shielded Environment

비자기 차폐 환경에서의 SQUID를 이용한 비파괴 평가 시스템에 대한 연구

Soon Hee Chung, Yunseok Hwang*, Heeseok Choi**, Jin-Tae Kim,
Hae-Ryong Lim***, In-Seon Kim, Hyuk Chan Kwon, Yong Ki Park,
Jong-Chul Park, Soon-Gul Lee*, Dong Hoon Lee**, and Dong Ho Kim***

정순희, 황윤석*, 최희석**, 김진태, 임해용***, 김인선, 권혁찬, 박용기,
박종철, 이순걸*, 이동훈**, 김동호***

P.O. Box 102, Yusong, Taejon, Korea 305-600, Korea Research Institute of Standards
and Science

*Korea University, **Paichai University, ***Yeungnam University

대전광역시 유성우체국 사서함 102, 한국표준과학연구원
*고려대학교, **배재대학교, ***영남대학교

본 연구에서는 SQUID를 이용한 비파괴 평가 시스템을 제작, 측정하였다. 이 시스템은 비자기 차폐 환경에서 작동할 수 있도록 설계하였고, 측정 자기 센서로는 dc 및 rf-SQUID gradiometer를 사용하였다. 비자기 차폐 환경에서 $\sim nT$ 의 미세 자기 신호를 검출하였고, 공간적으로 변화하는 외부 자기 신호를 측정, 분석하였다. 또한, 측정된 자기 신호를 통해 dc-SQUID와 rf-SQUID에 대한 비교를 했다.

1. 서론

SQUID (Superconducting Quantum Interference Devices)는 초전도 양자 간섭 소자로서 10^{-15} Tesla까지의 초미세 자기장을 측정하는 자기센서이다. 고온초전도 SQUID 자기센서는 ~ 100 ft/Hz^{1/2} (@ 1 Hz)의 감도를 가지고 있어서, 비파괴 평가에 사용되고 있는 기존의 자기 센서인 구리코일로는 측정이 불가능한 극미세 자기 신호의 검출이 가능하여 새로운 비파괴 평가 시스템에 자기센서로 응용되고 있다. 금속 표면 뿐 아니라 금속내부에서 발생한 균열이나 재료 열화도에 따른 파괴결함의 상태를 확인할 수 있고, 또한 금속의 부식상태도 검출이 가능하다[1]. 기존의 비파괴 평가에 사용되는 접촉방법에 비해 SQUID는 비접촉 측정이 가능하고 금속재료로부

터 상대적으로 먼 거리에서도 측정이 가능하여 강구조물 안의 철재 결함의 위치 및 상태도 알아 낼 수 있고 지하에 묻힌 배관 설비 진단에도 사용될 수 있다. SQUID 센서의 두 번째 특징은 저주파 자기신호에도 고감도를 유지하므로 유도 자기장의 투과 깊이가 크다. 기존의 유도코일을 센서로 사용하는 와전류 (eddy current) 탐상에서 측정이 불가능한 여러 겹으로 되어 있는 금속 구조물 내부의 결함탐사가 가능하다[2,3]. 또한 구리코일에 비해 SQUID 센서는 작은 면적으로 제작될 수 있으므로 상대적으로 높은 공간분해능을 가진다[4]. 현재 고온초전도 SQUID는 자기 차폐 공간에서는 충분히 우수한 감도를 가지고 있지만, 비차폐 일반 환경에서는 지구 자기장이나 주변 환경에서 발생하는 자기잡음에 영향을 많이 받는다. 그래서 자기센서를 gradiometer 형태로

제작하여 자기장의 변화를 측정하므로, 주변의 일정한 자기장이나 잡음은 줄이고 시료에서 발생되는 자기장만을 검출할 수 있게 된다. rf-SQUID는 dc-SQUID에 비해 slew rate이 높고, 잡음의 근원이 되는 vortex들이 pinning되는 효과가 있으며, 또한 센서를 wire로 연결하지 않아도 되므로 비차폐 환경 운용에 장점이 있다. 본 연구에서는 비차폐 환경에서 작동하는 자기센서로 1st-order planar dc-SQUID gradiometer와 rf-SQUID gradiometer를 사용하였다.

2. 실험 및 결과

NDE용 저온용기는 외부에서 인가한 excitation field에 의해 저온용기 안의 초절연판(superinsulation layer)에서 발생되는 자기잡음을 줄이도록 설계, 제작하였다. 외부로부터 열전달을 차단하기 위해 고진공 (10^{-5} torr)을 유지하여 약 3.5 리터 액체 질소를 저장한 후 6 개월 간 액체 질소를 첨가하며 계속 사용할 수 있다. Hot to cold 거리는 4 mm이다. 그림 1은 bicrystal SrTiO₃ 기판 위에 PLD (pulsed laser deposition) 방법으로 YBCO 박막을 증착시켜 제작한 두 개의 1st-order planar dc-SQUID gradiometer를 나타낸다. Gradiometer의 크기는 8×4 mm²이며, baseline은 4 mm, pick-up coil의 인덕턴스는 2 nH(#1), 4.4 nH(#2)이다. SQUID loop의 인덕턴스는 100 pH이며, 접합 폭은 $3 \mu\text{m}$ 이다.

그림 2는 자기차폐실 내에서 측정된 두 센서의 자기 잡음 스펙트럼 특성이다. 그림 3은 비차폐

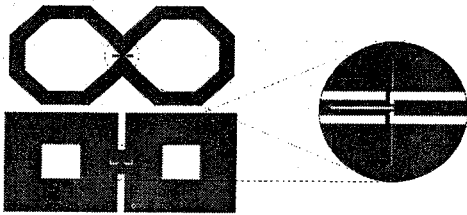


그림 1. 1st-order planar dc-SQUID gradiometer(위(#1), 아래(#2)).

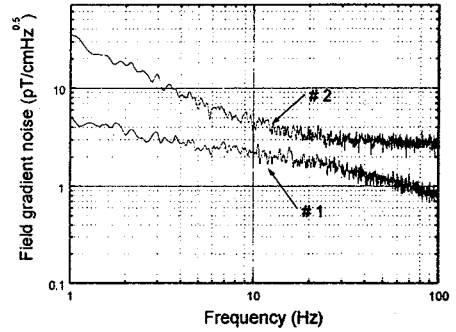


그림 2. 차폐 환경에서의 dc-SQUID gradiometer의 잡음 스펙트럼.

환경에서 dc-SQUID gradiometer를 이용하여 측정된 $\sim\text{nT}$ 크기의 수정시계 자기신호를 보여 준다. 전원이 불안정하고 전원 케이블이 전자파에 노출되어 부가되는 잡음과 비차폐 환경에서 외부 자기장에 의해 만들어지는 vortex 요동으로 인한 잡음을 줄이고자 다음과 같은 작업을 하였다. SQUID controller에 공급되는 전원을 외부전원과 차단된 battery로 바꾸고, 전원 케이블 등에서 발생하는 자기장의 영향을 저하시킨 후에 잡음이 4 배로 감소하였다. 또한 SQUID loop에 slot, moat, pickup coil에 flux-dam 등을 첨가하여 여러 종류의 gradiometer를 제작하였는데 그 중 slot이 하나 첨가된 센서의 경우 저주파 영역에서의 $1/f$ 잡음이 줄어든 것으로 나타났다.

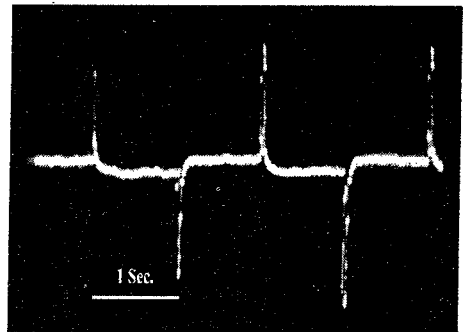


그림 3. 비차폐 환경에서 dc-SQUID gradiometer로 측정된 $\sim\text{nT}$ 의 자기 신호.

Rf-SQUID gradiometer는 LaAlO₃기판에 step-edge 접합으로 제작된 double-hole 1st-order planar gradiometer로서 baseline이 3.6 mm, SQUID loop 크기는 80×80 μm²이다. Tank circuit의 공진 주파수는 868 MHz이며 Transfer coefficient는 0.12 V/Φ₀, white noise level은 40 μΦ₀/Hz^{1/2}이다[5~7]. 그림 4는 차폐, 비차폐 환경에서의 rf-SQUID의 잡음 스펙트럼이다. 비차폐 환경에서의 스펙트럼은 저주파 영역에서는 차폐 환경에 비해 잡음의 크기가 1.5 배 증가하나, 50 Hz보다 큰 주파수 영역에서는 차폐 환경에서의 잡음보다 약간 큰 값을 가졌다. 비차폐 환경에서의 스펙트럼에는 60 Hz 잡음이 SQUID 잡음의 100 배 큰 값을 보이고 있다.

그림 5는 전류가 흐르는 도선의 위치와 전류의 양을 변화시켜가며 도선으로부터 발생하는 자기장의 변화를 rf-SQUID gradiometer로 측정된 결과이다. 센서에서 5.5 cm 떨어진 위치에 도선을 평행하게 놓고, pickup loop의 방향과는 수직으로 전류(200 Hz, 0.1 ~ 1 mA)를 흐르게 한다. 센서의 위치에는 ~3.6 nT의 자기장이 걸리게 된다. 이 결과는 다른 그룹의 실험 결과들과 일치하였다[8]. rf-SQUID는 비차폐 환경에서 dc-SQUID에 비해 자기신호를 더 안정적으로 검출하는 것을 관찰할 수 있었다. 그러나 신호 대 잡음비를 관찰한 결과 rf-SQUID의 경우 그 값이

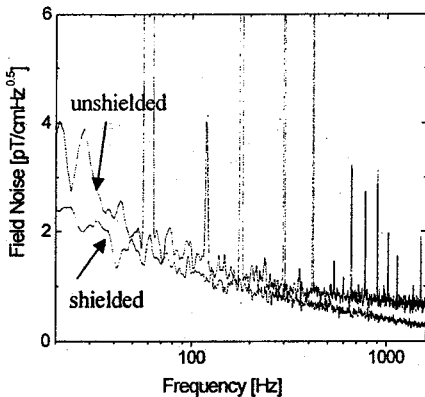


그림 4. rf-SQUID의 잡음 스펙트럼.

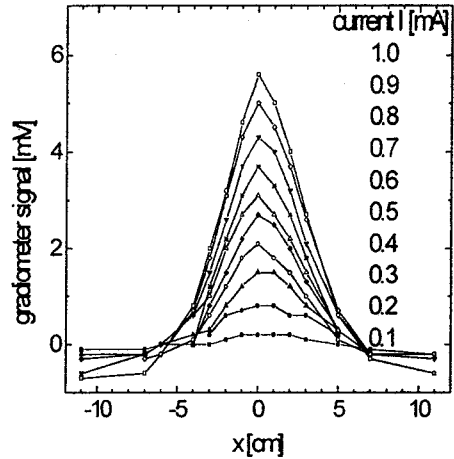


그림 5. 도선과 rf-SQUID 센서간의 거리가 5.5 cm 일 때 도선에 흐르는 전류의 양의 변화에 따른 도선의 Scan.

더 작은 것을 통해 외부 전자파에 더 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었다.

3. 결론

고온초전도 1st-order planar dc-SQUID gradiometer와 rf-SQUID gradiometer를 이용하여 비차폐 환경에서 액체 질소 온도에서 작동하는 비파괴 평가 시스템을 구축하였다. 비차폐 환경에서 ~nT 크기의 미세자기 신호를 검출하였다. 일반 환경에서 rf-SQUID는 dc-SQUID에 비해 더 안정하지만, 주변의 rf-전자파로부터 영향을 더 받는 것으로 관찰되었다. 이 rf-SQUID를 이용하여 도선에 흐르는 전류의 변화에 따른 자기장 (~ nT)을 측정하였다. 이 rf-SQUID NDE 시스템은 일반환경에서 금속의 결함검출을 위한 SQUID 와전류 탐상 시스템으로 발전될 수 있다. 이를 위하여 와전류 탐상시 SQUID 센서가 유도 코일로 인한 자기장에 적게 노출되면서, 시편으로부터 유도되는 자기장을 잘 감지하도록 코일 디자인에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] C. Carr, A. Cochran, J. Kuznik, D. McA. McKirdy, and G. B. Donaldson, *Cryogenics*, **36**, 691 (1996).
- [2] M. L. Lucia, R. Hohmann, H. Solter, H. -J. Krause, W. Wolf, H. Bousack, M. I. Faley, G. Sporn, and a. Binneberg, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **7**, 2878 (1997)
- [3] Naser S. Alzayed, Chang-xin Fan, D. F. Lu, K. W. Wong, Marvin Chester, and David E. Knapp, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **4**, 81 (1994)
- [4] J. P. Wikswo, *IEEE Trans. Appl. Phys.*, **5**, 74 (1995)
- [5] Y. Chang, M. Muck, K. Herrmann, J. Schubert, W. Zander, A. I. Braginski, and C. Heiden, *IEEE Trans. Appl. Supercon.*, **3**, 2465 (1993)
- [6] Y. Chang, M. Muck, K. Herrmann, J. Schubert, W. Zander, A. I. Braginski, and C. Heiden, *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 645 (1992)
- [7] D. F. He, X. H. Zeng, H. -J. Krause, H. Soltner, F. Ruders, and Y. Zhang, *Appl. Phys. Lett.*, **72**, 969 (1998)
- [8] S. Wunderlich, F. Schmidl, H. Specht, L. Dorrer, H. Schneidewind, U. Hubner, and P. Seidel, *Supercond. Sci. Technol.*, **11**, 315 (1998)