Progress in Superconductivity Vol.3 No.2 pp159-162 30 April 2002

Nondestructive Evaluation of Cracks in Metal Plates by using SQUID Gradiometer

Yunseok Hwang[a,b], Jin-Tae Kim*[,a], Soon-Gul Lee[c], Yong Ki Park[a]
[a] *Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon, Korea*
[b] *Korea University, Seoul, Korea*
[c] *Korea University, Jochiwon, Chungnam, Korea*
Received 20 August 2001

SQUID Gradiometer를 이용한 금속판의 결함에 대한 비파괴 평가

황윤석[a,b], 김진태*[,a], 이순걸[c], 박용기[a]

Abstract

We have detected cracks inside multi-layer metal sheets with nondestructive evaluation system consisting of SQUID gradiometer. Double D-shape coil was carefully designed with computer simulation for spatial distribution of magnetic field. It was aligned and placed in between SQUID and metal sheets in order to reduce the field effect to SQUID and to maximize eddy current in the sheets. The metal plate in bottom of the metal stack contained artificial cracks which were scanned by an X-Y scanning system. The information of crack position and size could be estimated by analysis of SQUID signal. Details of the results will be discussed.

Keywords : nondestructive evaluation, SQUID gradiometer , D -shape coil, eddy current

I. 서 론

고온초전도 SQUID 자기센서는 ~100 fT/Hz$^{0.5}$ (@ 1 Hz)의 감도를 가지고 있어서, 비파괴 평가에 사용되고 있는 기존의 자기 센서인 구리코일로는 측정이 불가능한 극미세 자기 신호의 검출이 가능하여 새로운 비파괴 평가시스템의 자기 센서로 응용되고 있다 [1,2]. 금속 표면 뿐 아니라 금속내부에서 발생한 균열이나 재료 열화도에 따른 피로결함의 상태를 확인할 수 있고, 또한 금속의 부식상태도 검출이 가능하다 [3]. 기존의 비파괴 평가에 사용되는 접촉 방법에 비해 SQUID는 비접촉 측정이 가능하고 금속재료로부터 상대적으로 먼 거리에서도 측정이 가능하여 강구조물 안의 철재 결함의 위치 및 상태도 알아낼 수 있고 지하에 묻힌 배관 설비 진단에도 사용 될 수 있다. SQUID 센서의 두 번째 특징은 저주파 자기 신호에도 고감도를 유지하므로 유도 자기장의 투과 깊이가 크다. 기존의 유도코일을 센서로 사용하는 와전류(eddy current) 탐상에서 측정이 불가능한

*Corresponding author. Fax : +82 42 868 5475
e-mail : jtkim@kriss.re.kr

여러 겹으로 되어 있는 금속 구조물 내부의 결함탐사가 가능하다 [4]. 또한 구리코일에 비해 SQUID 센서는 작은 면적으로 제작될 수 있으므로 상대적으로 높은 공간 분해능을 가진다 [5]. 현재 고온초전도 SQUID는 자기 차폐 공간에서는 충분히 우수한 감도를 가지고 있지만, 비차폐 일반 환경에서는 지구 자기장이나 주변 환경에서 발생되는 자기 잡음에 영향을 많이 받는다. 그래서 자기 센서를 gradiometer 형태로 제작하여 자기장의 변화를 측정하므로, 주변의 일정한 자기장이나 잡음은 줄이고 시료에서 발생되는 자기장만을 검출할 수 있게 된다.

본 연구에서는 비차폐환경에서 구동할 수 있는 SQUID를 이용한 비파괴 평가시스템을 제작하였다. 비차폐환경에서 금속판의 결함을 검출함으로써 비파괴 평가의 가장 기본적인 기반기술을 확립하였다.

II. 실험 방법 및 결과

Fig. 1은 비파괴 평가 시스템의 개략도이다. Dewar 밑에는 excitation coil이 놓여 있고, excitation coil에 function generator로부터 교류 전압을 걸어준다. Excitation coil은 두 개의 D 모양 coil이 대칭적인 형상으로 놓여져 있다. 이것을 double D-shape coil이라고 한다. Excitation coil에 전압을 걸어주면 coil에서 자기장이 형성되고 이 자기장은 coil 밑에 있는 금속판에 와전류를 유도시킨다. 이때, excitation coil로부터 생성되는 자기장의 세기는 coil 양단에 걸어주는 전압의 크기에 비례한다. 이 와전류에 의해 다시 자기장이 형성되고 그 자기장을 SQUID 센서가 감지하게 된다. 이렇게 감지된 신호는 lock-in amplifier를 거쳐서 computer로 데이터를 처리하도록 되어있다. Step motor로 구동되는 XY stage 위에 금속판을 놓고 신호를 검출함으로써 2-D mapping을 하였다. 금속 시편은 2 mm 두께의 알루미늄판을 사용하였으며, SQUID 센서는 비차폐 환경에서의 100 Hz 잡음 특성이 1.5 pT/($Hz^{0.5}$cm)인 독일의 Jülich group에서 제작한 rf-SQUID gradiometer를 사용하였다.

실험은 단일층 금속 시편과 다층 시편에 대해 진행하였다. 이 두 경우 모두 결함의 크기

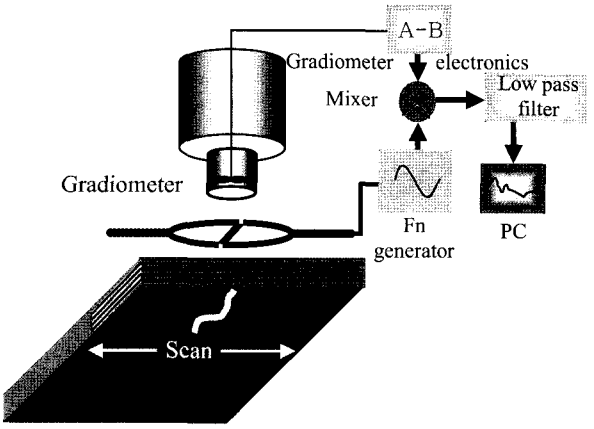
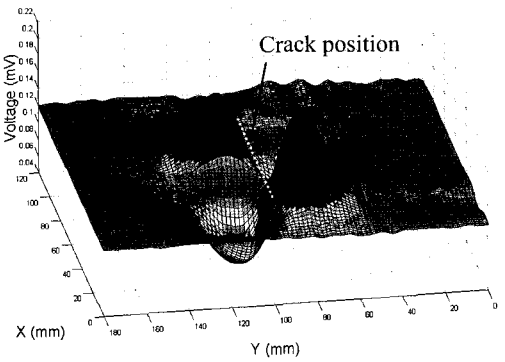


Fig. 1. Schematic diagram of SQUID NDE system.

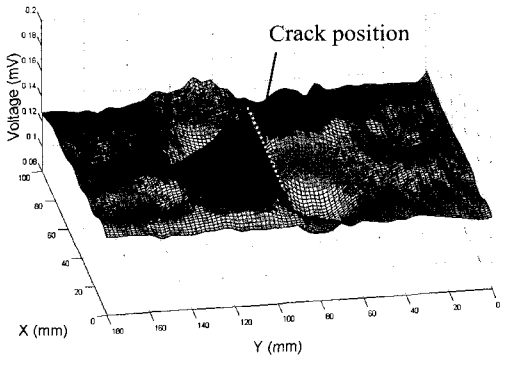
는 43 ㎜ × 0.5 ㎜이고 깊이는 2 ㎜로 동일하게 놓았고 다층 금속 시편은 각 시편 사이의 절연을 위해 시편 사이에 종이를 끼워 놓았다. 측정은 XY-scanner로 2-D mapping을 하였다. Excitation coil에 111 Hz의 교류 전압을 걸어서 금속 시편의 와전류를 유도하였다. Scan 범위는 120 ㎜ × 180 ㎜로 하였고, 결함은 이 범위의 중간 정도에 오게 한 후, 자기 신호를 측정하였다. 측정 결과를 보면, 단일 금속 시편의 결함을 중심으로 양쪽 부분에서 대칭적인 신호가 검출되었다(Fig. 2(a)). 이 결과를 토대로 결함의 위치를 정확하게 파악할 수 있고 대략적인 크기도 도출해 낼 수 있다. 마찬가지로 다층 금속 시편으로 가려진 결함에 대한 실험에서도 결함의 위치와 크기를 검출해 낼 수 있었다 (Fig. 2(b)). 단일층 금속 시편으로부터 얻은 실험 결과인 Fig. 2(a)를 보면 결함을 중심으로 한쪽은 양의 신호, 다른 한쪽은 음의 신호가 검출되는 것을 볼 수 있다. 이것은 와전류가 결함의 끝부분에 집중되고 집중된 전류의 방향 또한 끝부분을 중심으로 급격히 변화하기 때문이다. 즉, 와전류의 진행 방향을 거리에 대해 미분하면 미분값의 부호가 0에서 +(또는 -)로 바뀌다가 결함 부분에서 다시 0이 되고 결함을 지나면서 -(또는 +)로 바뀌었다가 다시 0으로 된다. 또한, 신호의 부호가 좌우 뿐만 아니라 상하로도 바뀌는데 이것도 앞에서 설명한 것과 같은 원리이다. 즉, 결함의 한쪽 끝부분과 다른 쪽 끝부분에 집중되는 와전류의 방향이 서로

다르기 때문이다. 이와 같은 결과는 다층 금속 시편으로 가려진 결함에서도 동일하게 나왔다 (Fig. 2(b)). 그러나, 단일층에 대한 결과와 다층에 대한 결과가 완전히 일치하는 것은 아니다. Fig. 2를 검출 전압에 대한 2-D로 본 Fig. 3(a)와 (b)를 비교해 보면 excitation coil에 걸어준 전압이 단일층과 다층에서 각각 700 mV와 7 V로 다층의 경우가 단일층의 경우보다 10 배가 크다. 따라서 coil로부터 생성되는 자기장의 세기도 10 배가 큼에도 불구하고 검출된 자기 신호는 단일층에서 검출된 자기 신호보다 훨씬 작게 나왔음을 알 수 있다. 이는 와전류의 특성상 금속 시편이 여러 겹으로 가려질수록 와전류의 크기가 점점 감쇄된 것으로 보여진다.

Fig. 4(a)와 (b)는 단일층과 다층의 결과를 등고선 형태로 2-D mapping한 것이다. 이를 보면 다층의 경우, 결함 주변의 자기 신호가 단일층 시편의 경우보다 다소 지저분한 것을 알 수 있다. 이것에 대한 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다. 우선, 금속 시편이 여러 층이므로 앞 절에서 설명한 것과 같이 위층의 시편으로부터 다음 층으로 유도되는 와전류의 크기가 감소하였을 것이고, 이런 방식으로 금속 시편이 여러 층일수록 와전류의 크기는 점점 더 감소하여 결함으로부터 유도되는 검출 신호의 크기가 작아짐을 알 수 있다. 또한, SQUID 센서에서 검출되는 자기 신호는 각각의 시편으로부터 발생하는 자기 신호에 대한 모든 정보를 담고 있다. 따라서 다층 시편의 경우에는 단일층 시편의 금속 결함에 대한 자기 신호에 비해 크기도 작고 잡음이 발생할 확률도 크게 되는 것이다.

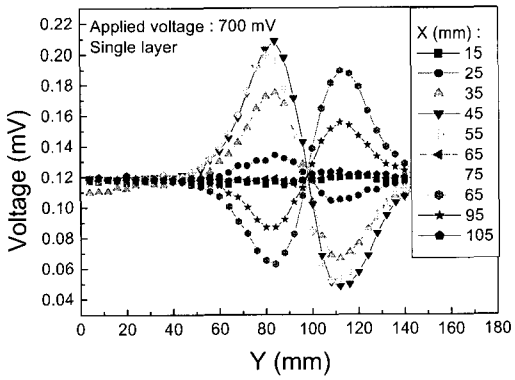


(a)

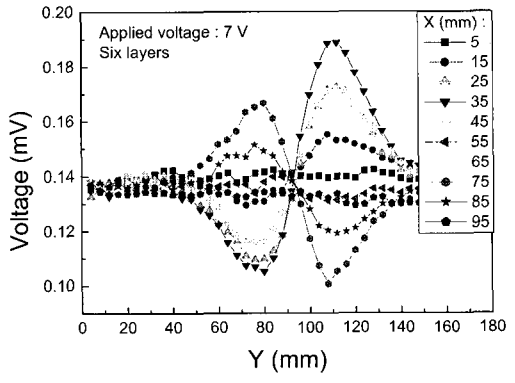


(b)

Fig. 2. 3-D view of (a) single layer and (b) six layers.



(a)



(b)

Fig. 3. SQUID signal of the crack on (a) single layer and (b) six layers with five shielding layers.

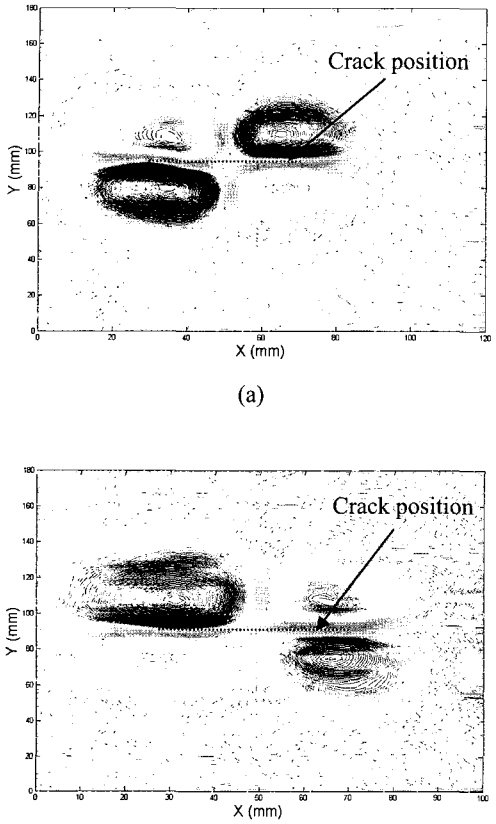


Fig. 4. 2-D view of (a) single layer and (b) six layers.

만약, 모든 시편이 균일한 상태를 유지하고 있다면 결함이 여러 층으로 싸여 있다 하더라도 결함 주위의 자기 신호는 깨끗하게 나와야 하지만 실제 측정된 결함 주위의 자기 신호는 공간적으로 다양하게 나왔다. 즉, 금속 시편의 상태가 균일하지 못하다는 것이다. 실제로 시편의 표면을 보면 크기는 매우 작지만 대부분 긁혀 있다. 이러한 이유로 다층 금속 시편의 결함 주위가 다소 지저분하게 나온 것이다.

한편, 단일층 금속 결함의 경우와 마찬가지로 다층 금속 결함의 경우에도 결함의 위치를 정확하게 탐지할 수 있었다. 이는 자기 신호 크기 차이에 의한 결함 주위의 잡음과 달리 결함을 중심으로 와전류의 방향이 급격하게 바뀌었기 때문이다.

III. 결 론

본 연구에서는 와전류 방식을 사용한 비파괴 평가 시스템을 개발하였으며, SQUID 센서가 excitation coil로 인한 자기장에 적게 노출되면서, 시편으로부터 유도되는 자기장을 잘 감지하도록 coil은 double D 형태로 제작하였다. 단일층 금속 시편에 대한 결함과 다층 시편에 대한 결함 모두를 위치와 크기까지 잘 검지할 수 있었다. 이처럼 SQUID 센서를 이용한 비파괴 평가 시스템을 구축할 경우에는 비행기 동체나 원자력 발전기의 외벽의 균열 등 기존의 비파괴 평가 시스템으로 검출해내기 어려운 시편의 결함을 검출해 낼 수 있을 것으로 기대한다

Acknowledgements

This work was supported by grant No. R01-2001-00042 from the Korea Science & Engineering Foundation and KRISS

References

[1] G. B. Donaldson, A. Cochran, D. McA. McKirdy, "The use of SQUIDs for NDE," in SQUID sensors: fundamentals, fabrication and applications, H. Weinstock, Ed. Dordrecht: Kluwer, 599-628 (1996).

[2] W. G. Jenks, S. S. H. Sadeghi, J. P. Wikswo, "SQUIDs for NDE," J. Phys. D, 30, 293-323 (1997).

[3] C. Carr, A. Cochran, J. Kuznik, D. McA. McKirdy, and G. B. Donaldson, "Electronic gradiometry for NDE in an unshielded environment with stationary and moving HTS SQUIDs," Cryogenics, 36, 691-695 (1996).

[4] M. L. Lucia, R. Hohmann, H. Solter, H. -J. Krause, W. Wolf, H. Bousack, M. I. Faley, G. Sporl, and a. Binneberg, "Operation of HTS SQUIDs with a portable cryostat: a SQUID system in conjunction with eddy current technique for non-destructive evaluation," IEEE Trans. Appl. Supercon., 7, 2878 –2881 (1997).

[5] J. P. Wikswo, "SQUID magnetometers for biomagnetism and nondestructive testing: important questions and initial answers," IEEE Trans. Appl. Phys., 5, 74-120 (1995).