

금속 표면결합 검출용 자기유도 마이크로 박막 센서

Inductive Micro Thin Film Sensor for Metallic Surface Crack Detection

김기현

Ki Hyeon Kim

초 록 비자성 및 자성 금속 시편의 표면 결함을 검출하기 위하여 교류자기장을 이용하였다. 비파괴 센서 프로브는 자성 박막 요크와 박막형 코일로 구성된 신호 검출부와 시편에 교류자기장을 인가하기 위한 단일 직선을 이용한 여기 코일로 이루어져 있다. 박막형 유도 코일 센서는 스퍼터, 전기도금, 건식 식각과 사진식각 공정을 이용하여 제작되었다. 시편에 교류자기장을 인가하기 위하여 0.7 MHz-1.8 MHz 주파수 영역에서 0.1A-1.0A의 교류전류를 여기코일에 인가하였다. 센서의 특성은 최소 0.5 mm의 깊이와 폭을 가진 인위적인 슬릿 형태 비자성체 Al과 자성체 FeC 결합 시편을 이용하여 측정하였다. 측정된 신호는 높은 감도를 갖고 결합 시편위의 슬릿결합의 위치와 일치함을 알 수 있었다. 또한 박막형 유도 코일 센서를 이용하여 마이크로 크기의 표면 결함을 가진 자성체 FeC의 시편을 비접촉 스캔하여 측정된 유도전압의 변화를 이미지화 하였으며 그 결과를 광학적 이미지와 비교하였다.

주요용어: 연자성 박막, 센서, 코일, 표면 결합

Abstract Alternating magnetic field was used for detection of surface flaws on nonmagnetic and magnetic metallic specimens. The nondestructive sensor probe was composed of the planar coil with inductive magnetic thin film yoke as a sensing component and a single straight typed exciting coil. The planar inductive coil sensor with magnetic yoke was fabricated by sputtering, electroplating, dry etching and photolithography process. The alternative currents with the range of 0.1A to 1.0A (0.7 MHz to 1.8 MHz) were applied to the exciting coil. The specimens were prepared with the slit shaped artificial surface flaws (minimum depth and width; 0.5 mm) on metallic plate (Al; nonmagnetic metal and FeC; magnetic metal). The detected signal for the positions and shapes of surface flaws on specimens were obtained with high sensitivity and high signal to ratio. The measured output signals by the non-contacted scanning on surface of FeC specimen with micron-sized crack were converted to the images of the flaws. And these results were compared with the optical images, respectively.

Keywords: Soft Magnetic Film, Sensors, Coils, Surface Crack

1. 서 론

자기장 검출 센서에 있어서 유도 코일센서는 가장 오래되고 잘 알려진 자기 센서형태의 하나이다. 이러한 유도 코일센서는 자기장 검출, 위치 및 거리 감지, 자기기록헤드 그리고 비파괴 시험 등에 널리

사용되어져 왔다. 이러한 유도코일은 동작 및 설계가 간단하고 광대역 주파수에 사용할 수 있으며 큰 신호의 검출 등의 중요한 장점 때문에 현재까지 범용적으로 사용되고 있다. 유도코일 센서는 검출할 수 있는 자기장의 범위가 매우 넓어 다른 자기장 센서와 비교해서 매우 우수함을 알 수 있다[1].

대부분의 센서는 분해능의 실질적 한계가 신호 잡음의 발생 정도에 의존하고 있다. Prance [2-4] 등은 다양한 자기장 센서의 잡음 수준을 다음과 같이 나타내고 있다. 초전도 양자 간섭 소자(SQUID)~500 fTHz^{-1/2}, 유도코일<100 fTHz^{-1/2}, 플럭스게이트(fluxgates)~100 fTHz^{-1/2}, 자기저항(magneto-resistive) 센서~100 pTHz^{-1/2}, 홀(Hall) 센서~10 nTHz^{-1/2}. 이러한 여러 자기 센서들의 응용에 있어서, 유도코일 센서는 측정 기술에 있어 매우 중요한 역할을 하고 있다. 유도코일 센서의 상세한 특성은 이미 잘 알려져 있다[5]. 유도코일을 이용한 신호 검출 기능은 기초적인 패러데이 법칙에 의해 나타나며, 코일에서 검출되는 전압은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다[1,6,7].

$$V_{signal} = N\pi r^2 \frac{dB}{dt} \propto N\pi r^2 f \quad (1)$$

여기서 N 은 코일의 감긴 수, πr^2 은 루프의 면적, $\frac{dB}{dt}$ 는 자기장의 변화율, f 는 인가 주파수를 나타낸다[8].

식 (1)에서 나타낸 바와 같이 유도 코일에 의해 검출되는 신호는 코일의 감긴 수에 비례하여 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 코일 길이의 증가에 따라 코일 자체의 저항 잡음이 증가하게 된다. 이러한 유도코일의 감도는 존슨 잡음(Johnson noise)에 의해 제한을 받게 된다[5]. 이와 더불어 측정시 증폭기의 잡음에 의해 영향을 받지 않고 충분히 신호를 증폭할 수 있도록 감겨져야 한다. 대부분의 유도 코일은 손, 기계 그리고 마이크 공정 과정에 의해 형성되는데 최적화 과정은 여러 가지 변수를 가지게 된다[1].

산업에 있어서 금속 물질에 대한 전기적 기초에 근거한 비접촉식 비파괴 평가가 증가하고 있으며 이러한 것들은 주로 금속 구조체, 파이프, 원자력 발전소등의 검사 등에 주고 적용된다. 전자기에 기초한 비파괴 평가들 중에서 와전류 탐상 프로브는 탐상 시편에 와전류를 유도하는 여기코일과 결합 등에 의해 전류의 섭동을 이용하는 검출부로 구성되어 있다.

특히, 여기 코일에 교류 전류를 인가시켜 탐상 시편에 교류 자기장을 발생함으로써 유도코일을 이용하여 자기장의 변화를 검출하는 방법은 비자성체 및 자성체 금속시편의 표면 결함을 검출하기에 매우

유용한 방법 중의 하나이다[7,9]. 최근에 이러한 유도 코일 센서 프로브를 이용하여 표면결함 검출 특성을 보고 한바 있다[9]. 사용되었던 프로브 센서는 페라이트 요크에 감긴 신호 검출용 유도 코일과 원형 루프 타입의 여기 코일로 구성되어 있으며 프로브의 전체 크기는 8 mm×7 mm×7 mm (가로×세로×두께)였다[9]. 하지만 더욱 광범위한 적용을 위하여 마이크론 크기의 유도코일 센서 프로브가 요구된다.

그러므로 본 연구진은 교류 자기장을 이용한 단일 직선형태의 여기코일과 자성체 요크를 갖는 박막형 마이크로 유도 코일 센서를 제작하여 비자성체 및 자성체 금속의 표면 결함 검출 특성을 조사하였다.

2. 실험방법

박막형 유도 코일 마이크로 센서는 스퍼터링, 전기도금, 건식에칭 등 사진식각공정을 이용하여 AlTiC 기판위에 제작되었다. Fig. 1 (a)-(g)은 박막형 마이크로 유도 코일 센서의 제작 공정에 대한 개략도를 보여주고 있다. Fig. 2는 박막형 유도 코일 마이크로 센서의 개략도 (a), 단면 (b)와 평면도 (c)를 각각 보여주고 있다. 신호를 검출하기 위한 박막형 유도 코일 센서는 288 μm×360 μm×23 μm (가로×세로×높이)의 크기로 제작되었다.

검출용 유도 코일은 Co₂₄Ni₃₇Fe₃₉ 자성 박막 사이에 가로, 세로 2.5 μm × 3.5 μm의 구리 도선이 2층 구조로 40번 감겨져 있으며 자성체 및 코일은 전기도금법에 의해 증착되었다. 자기 코어로서 사

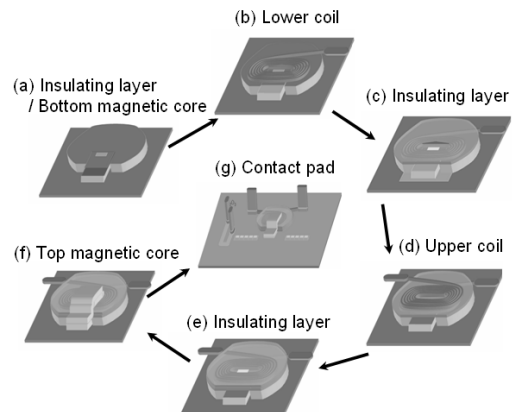


Fig. 1 Schematic of the fabrication process for the planar inductive coil sensor (a)-(g)

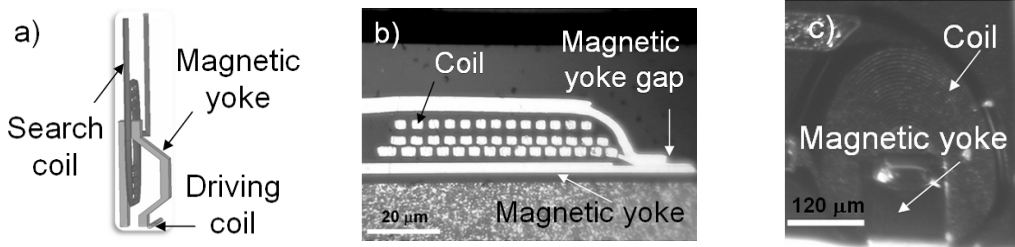


Fig. 2 a) A schematic of thin film inductive sensor, b) side view and c) top view of real image

용된 자성체 박막은 코일 아래 및 위층에 샌드위치 구조로 증착되어 있으며 미세 결함에서의 자기장 변화를 검출하기 위하여 자성체 코어 끝 부분은 0.6 μm의 갭을 갖고 있다. 박막형 유도 코일 센서 프로브는 마이크로 공정을 통하여 제작된 검출용 박막형 유도 코일부와 탐상 시편에 교류 자기장을 여기하기 위한 120 μm 직경의 직선 도선으로 구성되어 있다. 자기장 검출용 박막형 유도 코일 센서 옆에 여기코일을 부착하여 결함 시편에 교류자기장을 인가하게 된다. 결함 시편 표면에 교류 자기장의 크기에 따른 검출 신호의 변화를 측정하기 위하여 주파수 변화(0.7 MHz-1.8 MHz)에 따른 0.1-1.0A 크기의 교류 전류를 인가하였다.

박막 센서 프로브는 결함 시편에서의 표면 결함을 검출하기 위하여 시편으로부터 0.2 mm - 1 mm의 높이에서 4 mm/s의 속도로 x-y축 스캐너에 의해 이동하게 된다.

다양한 결함의 측정 특성을 평가하기 위하여 Fig. 3와 같이 인위적인 슬릿 형태의 표면 결함을 가진 5 mm 두께의 비자성 및 자성 금속 시편을 준비하였다. 일정한 깊이 (1 mm)의 표면 결함을 0.5 mm에서 1.2 mm까지 결함 폭을 변화시켰고 이

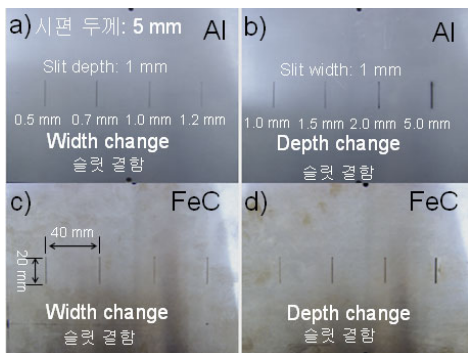


Fig. 3 The slit typed artificial crack with the change of slit width and slit depth on the surface of a), b) nonmagnetic Al and c), d) magnetic FeC specimens, respectively

와 반대로 일정한 폭 (1 mm)을 갖는 표면 결함을 1 mm에서 5 mm까지 결함 깊이를 변화시켰다. 박막형 유도코일 센서에서 측정된 신호는 전치증폭기에 의해 증폭 및 필터링이 되었다.

또한 임의의 표면결함을 가진 시편위의 자기장분포의 변화를 분석하기 위해서 유한요소법을 적용한 전자기 해석 프로그램(Maxwell 3D)을 이용하여 전산모사를 수행하였다.

3. 결과 및 토론

박막형 유도 코일 센서를 제작하기 위하여 박막형 유도 코일 센서의 간단한 모델을 이용하여 센서의 위치에 따른 자기장 변화 분포를 유한요소법에 의한 3차원 전산모사를 수행하였다. 결함 시편은 인위적인 슬릿 형태의 표면 결함을 가진 알루미늄 재질이며 전산모사의 계산 용량을 고려하여 8회 감

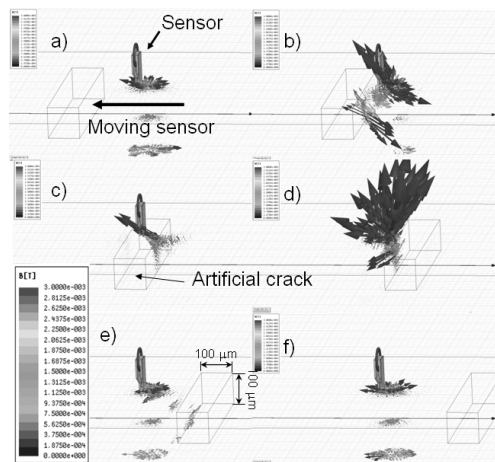


Fig. 4 The magnetic field distributions on specimen at a) initial sensor position on non-crack area, b) near edge side of crack, c) center of crack, d) opposite edge side of crack, e) near the crack and f) opposite side of non-crack area

긴 유도코일 박막 센서를 이용하였으며 여기 코일에는 1A의 교류전류가 인가되었다. 센서는 50 μm \times 100 μm 의 크기이며 자기장의 변화는 시편으로 부터의 0.3 mm 높이에서 4 mm/s의 속도로 연속적으로 수평이동하면서 계산되었다. Fig. 4는 직선 여기 코일이 부착된 박막형 유도 코일 센서의 위치에 따른 자기장 변화 분포를 보여주고 있다 ; (a) 결함이 없는 영역에서의 초기 센서 위치, (b) 결함 근처 모서리 (c) 결함 가운데 (d) 반대편 결함 모서리, (e) 반대편 결함 모서리 (f) 반대편 결함이 없는 영역. 결함 시편위의 자기장 세기는 표면 결함이 없는 영역에 비하여 결함이 있는 영역 근처에서 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 이러한 결함 주위에서의 자기장의 급격한 변화는 식 (1)에서 보여진 바와 같이 박막형 유도 코일 센서에 유도 전압이 발생하게 된다.

결함 시편에 인가한 교류자기장의 변화는 일반적으로 시편의 형상, 여기코일에 인가되는 전류와 주파수의 크기, 시편의 전기전도도와 투자율에 민감하게 의존하게 된다. 그러므로 결함 시편에 인가되는 직선 도선 여기코일에서의 전류와 주파수 변화에 따른 유도 코일센서의 유도전압의 변화에 대해 분석하였다. 또한 비자성 및 자성 금속 시편위의 슬릿 결함의 깊이 및 폭의 변화에 따라 비교하였다. Fig. 5는 직선도선 형태의 여기코일에 1.8 MHz에서 0.2A의 교류 전류를 인가하여 비자성 시편 및 자성 시편위의 슬릿형태 표면 결함의 폭과 깊이가 증가함에 따라 박막형 유도 코일 센서에서 검출된 유도전압의 변화를 보여주고 있다. 비자성 금속 시편위의 슬릿 표면 결함의 폭이 증가함에 따라 유도 전압의 크기가 증가하였으며 결함의 깊이가 증가함

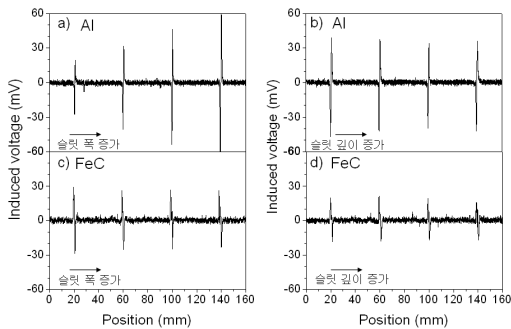


Fig. 5 The obtained induced voltage with the increment of slit width and slit depth on the surface of a), b) nonmagnetic Al and c), d) magnetic FeC specimens, respectively

에 따라서는 검출된 유도 전압이 약간 감소하는 경향을 보였다. 이는 비자성 금속 표면결함의 폭이 증가할수록 결함의 경계가 명확해지기 때문에 결함 내에서의 자기장의 변화율이 상대적으로 크게 나타나기 때문이며 결함의 폭이 같고 깊이가 증가함에 따라서 유도전압의 크기가 큰 차이를 보이지 않은 이유는 시편 결함내의 자기장의 변화율이 크게 변화하지 않았기 때문으로 판단된다. 또한 자성 금속 시편에서는 결함의 폭 과 깊이가 증가함에 따라 검출된 유도 전압의 크기는 큰 변화를 보이지 않았으나 약간 감소하는 경향을 보였다. 이는 자성 금속의 투자율 때문에 결함이 없는 표면과 비교하여 결함에서의 자기장의 변화율이 그다지 크지 않기 때문으로 판단된다.

Fig. 6은 여기코일에 인가하는 주파수를 1.6 MHz로 고정하고 전류를 0.1A, 0.5A, 1.0A로 증가함에 따라 슬릿 표면 결함을 가진 비자성 금속 Al 시편위의 박막형 유도 코일 센서에서 측정된 유도 전압 변화를 측정하였다. 여기코일에 인가하는 전류가 증가함에 따라 시편에 분포하는 자기장의 크기가 증가하여 식 (1)에서 나타내 바와 같이 유도 전압의 크기가 증가하는 현상을 보였다.

Fig. 7은 여기코일에 인가하는 전류의 크기를 0.1A로 고정하고 주파수를 0.7 MHz에서 1.8 MHz까지 변화시켜 슬릿 표면 결함을 가진 비자성 금속 Al 시편위의 유도 코일 센서에서의 유도전압 변화를 보여주고 있다. 여기 코일에 인가된 주파수가 증가함에 따라 검출된 유도전압의 크기가 급격히 증가하는 현상을 보였다. 이는 피검체의 표면 투과

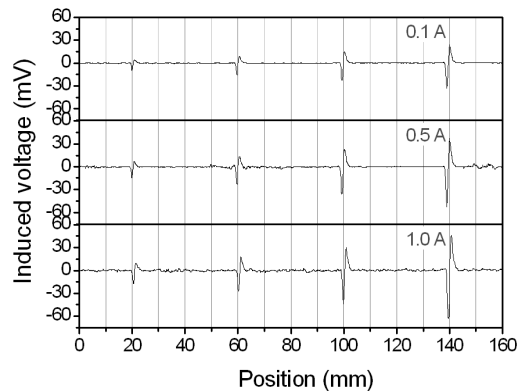


Fig. 6 The magnitude of induced voltages with the increment of exciting current on nonmagnetic Al specimen with slit typed crack

깊이(skin depth)가 주파수가 클수록 작아짐에 따라 표면결함을 검출하는데 있어서 유리함을 나타내 주고 있다. Fig. 8은 여기코일에 1.6 MHz, 0.1A를 인가하여 결함 시편으로부터 박막형 센서의 측정 높이(0.2 mm-1.2 mm)에 따른 유도전압의 크기를 비교하였으며 작은 검출 신호를 비교하기 위하여 각각의 배율로 확대하여 나타내었다. 이미 예측한 바와 같이 박막형 유도 코일 센서의 측정 높이가 증가함에 따라 검출된 유도 전압의 크기가 감소하는 것을 보였다.

측정된 모든 유도전압 출력 신호는 시편위의 결함위치와 잘 일치하고 있다. 전기 전도도가 큰 비자성 금속 결함시편에서 자성 금속 결함 시편에 비하여 측정된 신호의 크기가 크게 측정되었다. 이러한 이유 중의 하나는 자성 금속 결함 시편의 높

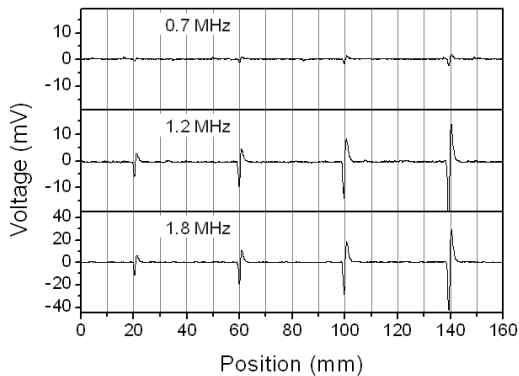


Fig. 7 The magnitude of induced voltages with the increment of exciting frequency on nonmagnetic Al specimen with slit typed crack

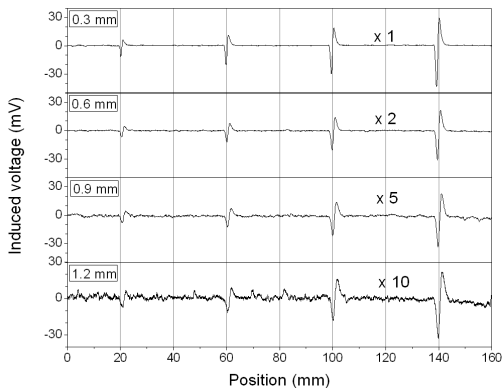


Fig. 8 The magnitude of induced voltages with the increment of flying height of the sensor from the nonmagnetic Al specimen with slit typed crack

은 투자율에 의해 상대적으로 다른 표피 깊이 효과 (skin depth effects)와 밀접한 관련이 있다.

Fig. 9는 약 10 μm 이하의 선폭을 갖는 표면 선형 결함이 있는 FeC 시편의 실제 사진과 박막형 유도코일 센서에 의해 0.2 mm의 높이에서 0.1 mm 간격으로 일축 스캔하여 측정된 신호를 이용하여 얻은 이미지와 비교하였다. 광학적 이미지와는 달리 측정된 이미지의 선폭이 다소 크게 나타났지만 육안으로 검출하기 어려운 마이크론 크기의 결함을 정확한 위치에서 선명하게 이미지를 나타냄으로써 결함의 형상을 확인할 수 있었다.

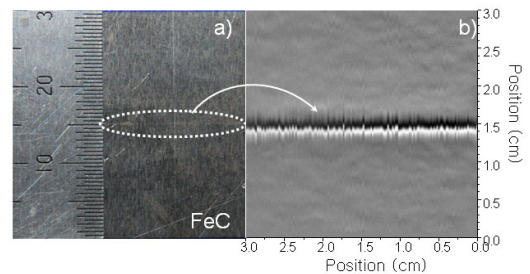


Fig. 9 a) The optical image of the magnetic FeC specimen with the micron size of the crack and b) the converted image using the induced voltages by thin film inductive micro sensor

4. 결론

비자성 및 자성 금속 결함 시편의 표면 결함을 검출하기 위하여 박막형 유도 코일 센서를 제작하여 결함을 측정하였다. 매우 짧은 직선 도선으로 형성된 여기 코일부는 박막형 검출 코일부와 분리하여 자기장 인가에 따른 검출 신호의 상호 임피던스 영향을 최소화하였다. 측정 결과, 여기 주파수와 여기 전류의 증가에 따라 유도 전압의 크기가 비례하였으며 결함의 위치와 출력 신호가 일치하는 결과를 얻었다. 교류 자기장과 박막 유도 코일 센서를 이용하여 자기장의 변화를 검출함으로써 비접촉 비파괴 방식으로 금속 결함 시편의 결함을 검출할 수 있었다. 또한 결함의 위치에서 검출된 유도 전압의 이미지화를 통하여 정확한 결함의 위치뿐만 아니라 결함의 모양도 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 부품소재기술개발사업에

의해 수행되었으며 센서 공정에 도움을 주신 (주) 노바마그네틱스에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] S. Tumanski, "Induction coil sensors-a review," *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 18(3), pp. R31-R46, (2007)
- [2] R. J. Prance, T. D. Clark and H. Prance, "Room temperature induction magnetometers," *Encyclopedia of Sensors*, Vol. 10, pp. 1 - 12, (2006)
- [3] R. J. Prance, T. D. Clark, H. Prance and M. Nock, "Compact gradiometric induction magnetometer," *Sensors and Their Applications VIII*, Glas-gow, Vol. 7 - 10, pp. 137 - 142, (1997)
- [4] R. J. Prance, T. D. Clark and H. Prance, "Low noise cooled induction magnetometer system," *Sensors and Their Applications X*, Cardiff, pp. 281 - 285, Vol. 5 - 8, (1999)
- [5] V. Korepanov, R. Berkman, L. Rakhlin, Y. Klymovych, A. Prystai, A. Marussenkov and M. Afanassenko, "Advanced field magnetometers comparative study," *Measurement*, Vol. 29, pp. 137-146, (2001)
- [6] C. Cavoit, "Closed loop applied to magnetic measurements in the range of 0.1 - 50 MHz," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 77, pp. 064703(1-7), (2006)
- [7] O. Hesse and S. Pankratyev, "Usage of magnetic field sensors for low frequency eddy current testing," *Meas. Sci. Rev.*, Vol. 5, No. 3, pp. 86-93, (2005)
- [8] A. Jander, C. Smith, and R. Schneider, "Magnetoresistive sensors for nondestructive evaluation," *Proc. 10th SPIE International Symposium Nondestructive Evaluation for Health Monitoring and Diagnostics*, Conference 5770, pp. 1 - 13, (2005)
- [9] Ki Hyeon Kim, Jun Sik Lee, Nanyong Kim, Doguen Jang, Young Ho Kim and Jongryoul Kim, "Nondestructive testing for metallic flaws using inductive coil sensor with circular typed single loop excitation coil," *Phys. Stat. Sol. a*, Vol. 204, No. 12, pp. 4083 - 4086, (2007)