

기상측정용 3축 구조의 초소형 와전류 센서 개발 및 평가

Ultra Miniature Eddy Current Sensor with 3 Axes for On-Machine-Measurement

김선호^{1,✉}
Sun-Ho Kim^{1,✉}

1 동의대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Dong-Eui Univ.)
✉ Corresponding author: sunhokim@deu.ac.kr, Tel: 051-890-2259

Manuscript received: 2009.5.29 / Revised: 2009.11.9 / Accepted: 2010.1.21

The OMM(On-Machine-Measurement) system has many advantages compare to conventional measurement in the way the time and cost. But, the sensor suitable to OMM system is restrictive use. Touch trigger probe sensor has long time for measurement and non-contact sensor has directional demerit. Because the long mechanical parts such as gear and lead screw for pump, injector and machine tools has big and heavy, unclamp and transferring for measurement in machining process is very difficult. This paper presents a development of ultra miniature eddy current displacement sensor with 3 axes for On-Machine-Measurement system. The accuracy of the sensor is experimentally proved in the grinding machine. In experimental results, the accuracy has under $\pm 5 \mu m$.

Key Words: OMM (On-Machine-Measurement, 기상측정), Eddy Current Displacement Sensor (와전류 변위 센서)

1. 서론

제품의 고품질화 추세에 따라 생산시스템에서 측정 및 검사공정의 중요성은 증대되고 있다. 이를 위해 기계가공품을 정확하고 빠르게 측정하기 위한 다양한 기술들이 연구되고 있다.

대량 생산시스템의 경우에는 전용 측정 및 검사공정을 두는 것이 유리하지만, 다품종 소량 생산시스템에 적합한 제품의 경우에는 이와 같은 방식은 비효율적일 수가 있다. 따라서 이러한 제품의 경우에는 3 차원 측정기가 사용되고 있다. 3 차원 측정기를 이용한 측정 및 검사방법은 유지비용이 많이 들고, 가공물의 이동시간이 길고, 설치 및 측정시간이 길어져 생산성 저하요인이 되고 있다. 특히, 3 차원 측정기의 한정된 크기 때문에 대형 가공물이라든지 공정상 가공물의 분리가 어려운 경우에는 마땅한 측정방법이 없는 실정이다. 이러

한 문제들을 해결하기 위해, CNC(Computerized Numerical Controller) 공작기계 상에서 제품의 가공이 완료된 후, 공구를 측정용 센서인 프로브(Probe)로 교체하여 OMM(機上測定: On the Machine Measuring; OMM) 측정이 가능한 측정시스템이 연구되고 있다. OMM 을 도입하는 경우, 검사공정이 단순해지고 후공정의 효율적인 수행이 기대된다.^{1,2} Fig. 1 은 OMM 시스템을 적용하는 경우 단순해지는 생산시스템의 구성도를 보여 준다.

OMM 에 적용이 가능한 센서는 접촉식과 비접촉식으로 나눌 수 있는데, 접촉식으로는 터치 트리거 프로브(Touch trigger probe)가 그리고 비접촉식으로는 레이저(Laser), 와전류(Eddy current), 정전용량형 센서 등이 사용되고 있다.

터치 트리거 프로브는 CNC 와의 인터페이스가 필요하고 측정시간이 오래 걸리는 단점을 가진다. 상용화 되어 있는 와전류 및 정전용량 센서는 넓

은 면을 측정하기에 적합한 구조를 가지고 있으며, 레이저 센서의 경우 측방향으로만 측정이 가능한 단점을 가진다.

펌프, 사출기, 공작기계용 리드 스크루 등과 같이 측방향으로 길이가 길고 나사의 깊이가 깊은 형상을 가진 기어나 스크루의 경우에는 크기가 크고 무게가 무거워서 측정을 위한 이동 시 셋팅이 어려울 뿐 아니라, 피치(Pitch)가 작아 측정에 적합한 상용 센서도 없는 실정이다.

본 연구에서는 기어나 스크루의 치형을 비접촉식으로 연속 측정이 가능한 초소형 다축 와전류 센서 및 신호처리 시스템을 개발했다. 와전류 센서는 기하학적인 형상, 코일, 베이스 메탈 등의 특성에 따라 출력이 비선형적으로 나타난다.³ 또한, 여러 개의 와전류 센서를 가까운 위치에 두고 동시에 사용하는 경우에는 상호간섭이 문제가 된다.^{4,5} 이러한 문제는 와전류 센서의 코어에 사용되는 재료와 코어의 형상구조 측면에서의 연구를 통해 비선형성과 상호간섭성을 해결했다.⁶ 개발된 센서는 연삭가공기에 설치하여 성능을 평가했다.

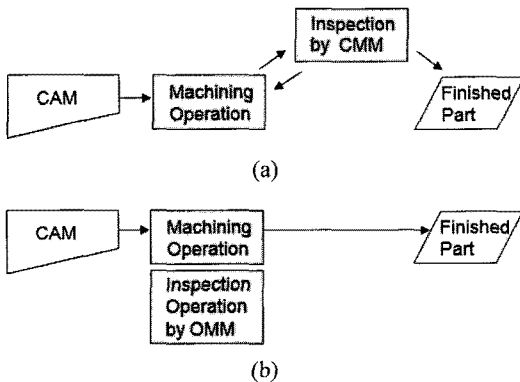


Fig. 1 (a) Block diagram of conventional measurement, (b) Block diagram of OMM measurement

2. 와전류 센서의 원리

Fig. 2 와 같이 도체에 투과되는 자기장이 시간에 따라 변할 때, 도체 위에는 고리와 같은 폐회로가 유도된다. 이것을 와전류라고 한다.

와전류는 금속의 전도도, 투자율 등과 같은 재료적 성질에 가장 큰 영향을 받으며, 이것이 결정된 후에는 거리 d 와 관련성이 갖는다. 이러한 원리를 이용하여 와전류 변위 센서를 제작했다.

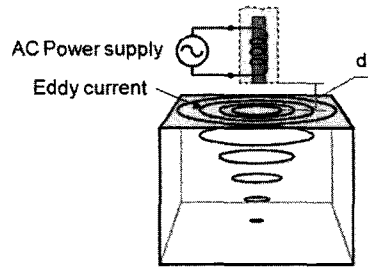


Fig. 2 Principle of eddy current

3. 와전류 센서의 성능 개선연구

Fig. 3 은 본 연구에서 개발하고자 하는 초소형 3 축 센서의 구조를 보여준다. 그림에서 센서 헤드 1 과 3 의 폭은 본 연구에서 대상으로 하는 피측정물의 형상을 고려하여 7.2mm 로 설정했다.

일반적으로 와전류 센서의 코어는 철(Fe)이 사용되는데 철은 전도율이 높아 장시간 사용할 경우에는 와전류에 의해 발생된 열이 센서의 노이즈로 작용되어 정밀도를 저하시키게 된다.⁷

또한, 본 연구에서 대상으로 하는 센서는 센서 헤드 1, 2, 3 의 위치가 매우 가까이 위치하여 코일이 동시에 발진을 하는 경우 각 센서 간에 간섭이 발생할 수 있다. 이는 센서의 선형성을 저하시켜 정밀도를 저하시키게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 높은 투자율을 가지면서 전도성이 적은 코어 재질을 선택해야 하며 센서간의 간섭을 차폐할 수 있는 최적의 구조를 적용해야 한다.

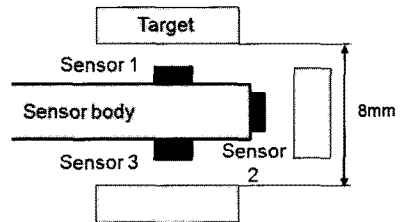


Fig. 3 Structure of eddy current sensor with 3 axes

Fig. 4 는 3 축 동시 발진을 고려하지 않고 일반적인 방법으로 개발된 센서를 피측정물에 접근시키면서 측정된 결과를 보여 준다. 측정을 위한 변위기구는 분해능 1 마이크로 정확도 2 마이크로를 가지는 마이크로미터를 이용했다. 그림에서 보이듯이 센서 1, 2, 3 을 독립적으로 발진시킨 경우에는

측정범위 내에서 선형성을 나타내지만, 센서 1, 2, 3 을 동시에 발진시킨 경우에는 선형성이 떨어짐을 보인다. 측정거리가 멀어짐에 따라 비선형성을 더욱 커짐을 나타낸다. 오차 측면에서 분석해 보면, 개별적인 발진의 경우에는 선형오차가 1.58% 그리고 3 축 동시 발진의 경우에는 3.86%로 평가되었다. 이러한 비선형 오차의 원인은 코일에서 생성되는 자기장이 다른 센서에 영향을 주기 때문으로 추정된다.

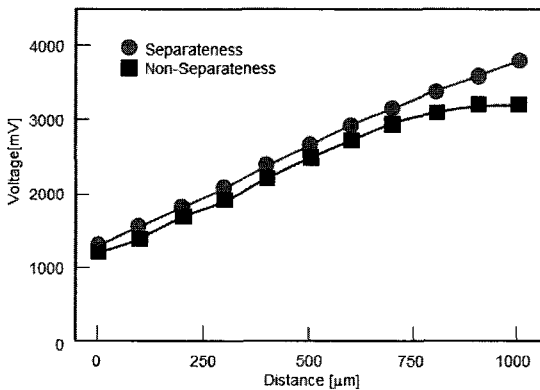


Fig. 4 Non-linearity of sensor output with target distance variations

본 연구에서는 가까이 위치한 센서가 동시에 발진되면서 발생하는 상호간섭을 제거하기 위해 구조 측면에서는 간섭을 차폐할 수 있는 구조를 적용하고, 재질 측면에서는 높은 투자율과 낮은 전도성을 갖는 재질의 코어를 적용하고자 했다.

센서의 형상 측면에서 센서의 코어 구조는 매입형(Closed)과 돌출형(Open)이 있는데 매입형 구조의 페라이트 코어는 Fig. 5 와 같이 코어가 코일은 감싸고 있는 구조이다. 이러한 구조는 공기 중의 자속변화를 차단하고 다른 센서와의 간섭을 배

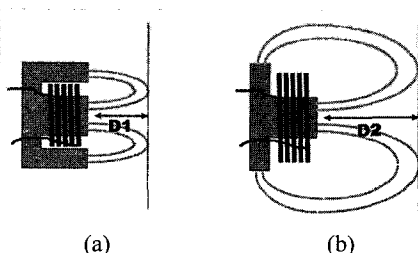


Fig. 5 (a) Structure of closed type sensor core, (b) Structure of open type sensor core

제할 수 있어 정밀도 향상과 외부 간섭을 차폐할 수 장점을 가진다.

Fig. 6 은 측정범위 3.5mm 범위에서 돌출형과 매입형의 구조에 대한 실험결과를 보여 준다. 매입형은 검출범위는 작지만 외부 간섭성이 강해 상대적으로 센싱 민감도와 선형성이 뛰어남을 보여 준다. 이러한 형상 특성을 고려하여, 본 연구에서는 매입형 코어를 적용했다.

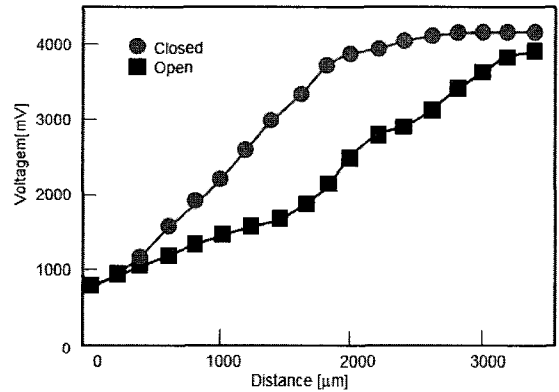


Fig. 6 Gain of sensor output for 2 types of core

센서의 재질 측면에서 페라이트는 비투자율이 높은 강자성체이므로 자기저항이 적은 곳으로 자속이 집중되는 성질을 갖는다. 이를 코어 재료로 사용하면 적은 코일 권선수로 높은 용량(L)을 얻을 수 있다. 따라서 소비전력이 작고 코일부의 열 발생량을 감소시킬 수 있는 장점을 갖는다. 또한, 제조 측면에서는 가공이 용이하고 구조 측면에서는 센서의 소형화를 이룰 수 있는 장점을 갖는다. 이러한 원리는 아래 관계식 (1), (2)로 설명할 수 있다.

$$B = \mu \cdot H \tag{1}$$

여기서, B 는 자속밀도, μ 는 투자율 그리고 H 는 자계강도를 의미한다.

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} \tag{2}$$

여기서, L 은 용량, N 은 코일 권선수, A 는 면적 그리고 l 은 길이를 의미한다.

코어로서 적용이 가능한 페라이트는 니켈-아연

을 주성분으로 하는 그룹과 망간-아연을 주 성분으로 하는 그룹으로 나눌 수 있다.

니켈-아연을 주성분으로 하는 페라이트는 온도 변화에 대한 안정성이 높고 500kHz 에서 100MHz 사이의 주파수 대역에서 Q-Factor 가 상당히 높지만, 큰 고유저항을 갖고 투자율이 낮기 때문에 주로 광대역 트랜스포머용이나 필터용으로 사용된다.

망간-아연을 주성분으로 하는 페라이트는 1kHz 와 1MHz 사이의 주파수 대역에서 높은 Q-Factor 를 갖고 매우 낮은 고유저항을 갖기 때문에 망간-아연을 주성분으로 하는 페라이트 코어가 미소한 와전류를 센싱하는 코어 재료로서 적합한 것으로 평가되었다. 본 연구에서는 센서 출력의 비선형성을 개선하기 위해 코어로서 망간-아연계를 사용했다.

Fig. 7 은 코어 재료로서 망간-아연계 페라이트를 코어 구조로서 매입형 구조를 적용한 경우의 결과를 보여 준다. 비선형성이 크게 향상되었음을 보여 준다. 오차 측면에서 분석해 보면, 개별적인 발진의 경우에는 선형오차가 1.73% 그리고 3 축 동시 발진의 경우에는 1.81%로 평가되었다.

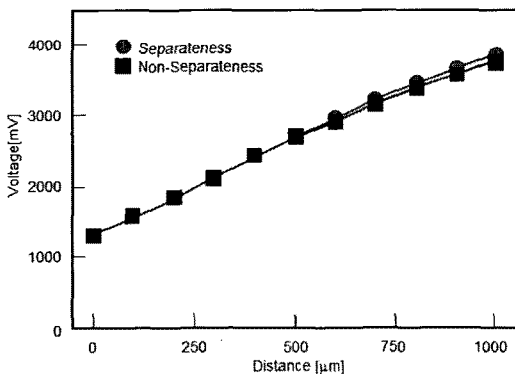


Fig. 7 Linearity improvement of sensor output

코어의 재질 및 형상 변경에 의해 센서의 간섭을 최소화 할 수 있지만 신호의 전송거리가 길어지게 되면 센서의 임피던스 변화가 노이즈를 만들게 된다. 이러한 문제는 측정된 신호를 이동평균(Moving average)화 함으로서 노이즈의 영향을 줄였다. 본 연구에서는 4 차 이동평균을 적용했다.

4. 연삭기에 적용한 OMM 시스템

Fig. 8 은 개발된 초소형 3 축 와전류 센서의 모습을 보여 준다. 센서 헤드 1,3 간 거리는 7.2 mm이다.

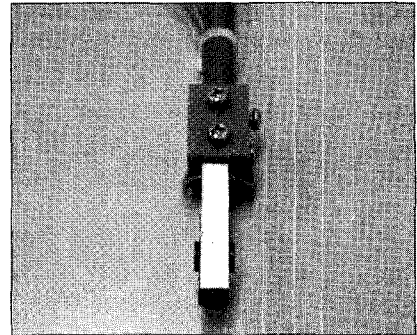


Fig. 8 Developed eddy current sensor with 3 axes

개발된 와전류 센서를 적용한 OMM 측정시스템을 Fig. 9 와 같이 구성했다. 3 개의 센서에 의해 출력되는 신호는 프리 앰프에 의해 증폭이 되고 증폭된 신호 값은 변위 값으로 환산되어 RS232C 를 통해 PC 로 전달된다. 컨트롤러는 RS232C 를 통해 수신된 값을 변환하는 변환부와 운영 시스템으로 구성된다. 변환부는 센서와 앰프 그리고 통신 모듈로 구성된다. 운영 시스템은 센서와의 인터페이스, 드라이버 그리고 운영 소프트웨어로 구성된다. 본 연구에서는 운영 시스템으로 PC 기반의 판넬 컴퓨터를 적용했다.

Fig. 10 은 연삭기에 적용한 OMM 시스템을 이용한 측정장면을 보여 준다. 연삭기는 1 μm 이내의 측정정밀도를 가지는 초정밀 연삭기를 적용함으로써 기계정밀도가 측정정밀도에 미치는 영향을 최소화했다. 측정은 로터의 반경방향과 축방향으로

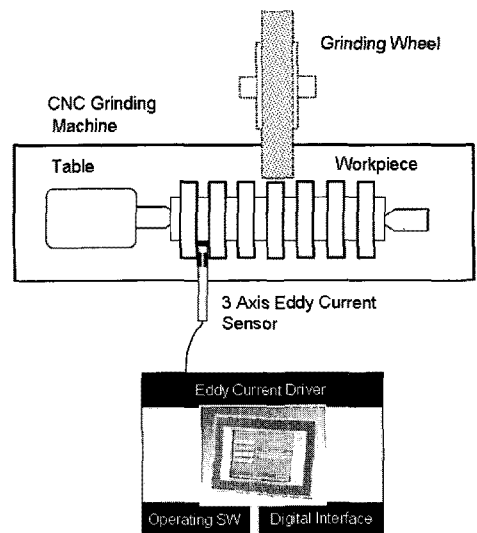


Fig. 9 OMM system for gear screw measurement

각 30 회씩 측정을 수행했다. 측정의 정확성을 위해 매 측정 시마다 일정위치로 복귀시킨 후 측정을 반복했다.

Fig. 11 은 반경방향의 측정 다이어그램을 보여 준다. 측정결과를 Table 1 에 나타내었다. 측정범위 0~250 μm 에서 50 μm 간격으로 측정했다. 표에서 측정 1, 2, 3 은 30 회 측정결과 중에서 샘플링으로 3 개의 데이터를 예시한 것이다. 반복정밀도는 1 μm ~2 μm , 오차는 -4 μm ~5 μm 으로 측정되었다.

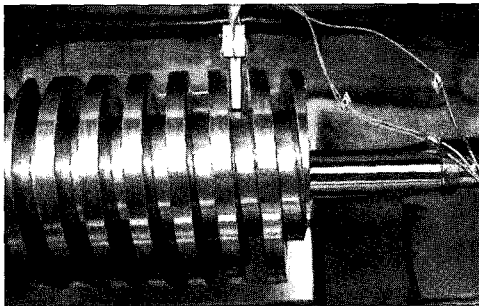


Fig. 10 Photograph for OMM measurement

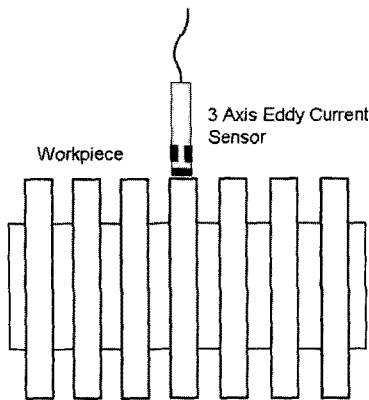


Fig. 11 Radial directional measurement

Table 1 Measurement result for radial direction

| Position | Count 1 | Count 2 | Count 3 | Repeatability | Average | Error |
|----------|---------|---------|---------|---------------|---------|-------|
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 50 | 47 | 48 | 48 | 1 | 48 | -2 |
| 100 | 95 | 96 | 96 | 1 | 96 | -4 |
| 150 | 147 | 147 | 148 | 1 | 148 | -4 |
| 200 | 198 | 199 | 200 | 2 | 199 | 1 |
| 250 | 254 | 255 | 255 | 1 | 255 | 5 |

(Unit: μm)

Fig. 12 는 축방향의 비교 측정 다이어그램을 보여 준다. 측정결과를 Table 2 에 나타내었다. 반복정밀도는 1 μm ~3 μm , 오차는 최대 5 μm 으로 측정되었다. 반복정밀도는 1 μm ~2 μm , 오차는 -4 μm ~1 μm 으로 나타났다.

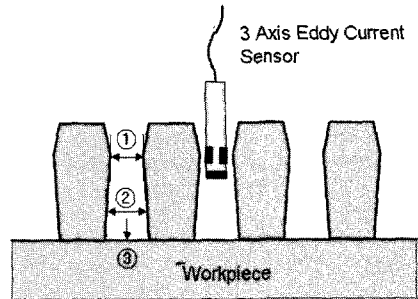


Fig. 12 Axial directional measurement

Table 2 Measurement result for axial direction

| Position | Count 1 | Count 2 | Count 3 | Count 4 | Count 5 |
|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| ① | 4 | 5 | 4 | 4 | 2 |
| ② | 5 | 3 | 4 | 5 | 4 |
| ③ | 3 | 2 | 3 | 2 | 3 |

(Unit: μm)

OMM 측정에서 대체로 수 미크론의 오차가 발생하는 원인을 분석해 보면, 센서가 가지는 측정기 오차 외에 센서 헤드의 설치오차가 영향을 미치는 것으로 판단된다.

Fig. 13 은 센서의 설치오차 발생 개념도를 보여 준다. 와전류 센서는 고주파 발진에 의해 코일에 생성되는 자기장에 의해 피측정면에 발생하는 와전류로 인한 전력 손실량을 측정하여 변위 값으로 환산한다. 따라서 센서 헤드가 피측정면에 평행하게 놓이지 않는 경우에는 측정오차를 유발할 가능성이 매우 크게 된다. 특히, 반경방향의 경우에는 곡률 형상이 측정 값에 미치는 영향도 크다고 할 수 있다. 본 연구에서는 피측정물의 곡률오차는 고려하지 않았다.

5. 결론

본 연구에서는 기어나 스크루와 같이 치형이 깊고 좁은 가공형상 측정에 적합한 초소형 3 축 구조를 가지는 와전류 변위 센서를 개발하고 이를

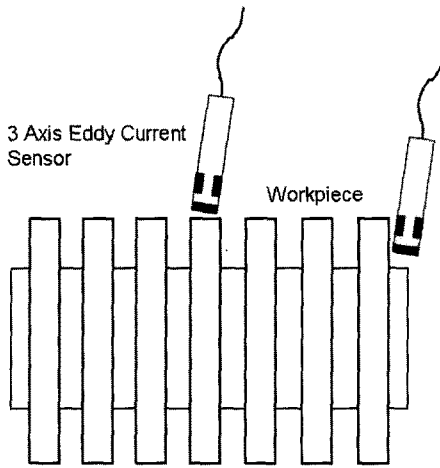


Fig. 13 Factors of measurement errors

운영할 수 있는 신호처리 시스템을 개발했다. 개발된 센서가 가지는 비선형성, 상호간섭성은 코어의 재질과 코어의 형상을 개선함으로써 그 성능을 향상시킬 수 있었다. 이러한 연구를 통해 다음과 같은 몇 가지 결과를 얻었다.

센서 헤드를 가까운 위치에서 동시에 사용하면 발생하는 비선형성과 상호간섭성은 코어의 재질과 센서 코어의 구조 측면에서의 개선을 통해 해결할 수 있었다.

개발된 시스템을 연삭기에 적용하고 측정성능을 평가한 결과, 반경방향의 경우 측정범위 0~250 μm 에서 반복정밀도는 1 μm ~2 μm , 오차는 -4 μm ~5 μm 으로 평가되었으며, 축방향의 경우 반복정밀도는 1 μm ~3 μm , 오차는 최대 5 μm 으로 평가되었다.

참고문헌

1. Lee, S. J., Kim, S. H. and Kim, O. H., "The OMM system for machined form and surface roughness measurement concerned with volumetric error," *Journal of KSPE*, Vol. 17, No. 7, pp. 232-240, 2000.
2. Kim, S. H. and Kim, D. H., "On-the-Machine Measurement System," *Journal of KSPE*, Vol. 18, No. 6, pp. 9-18, 2001.
3. ASME Special Technical Publication, "Eddy Current Characterization of Materials and Structures," American Society for Testing and Materials, 1981.
4. Dowell, P. L., "Effects of Eddy Currents in Transformer Windings," *Proceeding of IEE*, Vol. 113,

No. 8, pp. 1387-1394, 1966.

5. Cheng, C., Dodd, C. C. and Deeds, W. E., "General analysis of probe coils near stratified conductors," *International Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 3, pp. 109-130, 1971.
6. Kim, S. H. and Noh, M. G., "Ultra Miniature Eddy Current Sensor with 3 Axes for On-Machine-Measurement," *Proceeding of KSMPE Autumn Conference*, pp. 164-168, 2008.
7. Norton, S. J. and Bowler, J. R., "Theory of eddy current inversion," *Journal of Applied Physics*, Vol. 73, No. 2, pp. 501-512, 1993.