

## 교환결합을 가진 연자성 비정질 리본을 이용한 자기 임피던스 센서 개발과 비파괴검사 응용

### Development of Magnetoimpedance Sensor Utilizing Soft Magnetic Amorphous Ribbon with Exchange Coupling and Application to Nondestructive Testing

윤석수\*<sup>†</sup>, 김건우\*, 이상훈\*\*\*, 김철기\*\*

Seok Soo Yoon\*<sup>†</sup>, Gunwoo Kim\*, Sang Hun Lee\*\*\* and CheolGi Kim\*\*

**초 록** 최근 바이오센서, 비파괴진단, 방위센서 등 다양한 분야에서 휴대가 가능하며 감도가 높은 자기센서에 대한 요구가 증대되고 있다. 연자성 리본의 거대 자기임피던스 효과를 이용한 새로운 휴대용 고감도 자기 임피던스 센서 시스템을 개발하였다. 자기임피던스 센서는  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  연자성 비정질 리본을 공기중에서 자기장 열처리하는 방법으로 교환결합을 발생시켜 비대칭 자기임피던스 특성을 부여한 센서용 헤드와 신호처리 회로로 구성되었다. 개발된 센서는  $-1 \text{ Oe} \sim 1 \text{ Oe}$ 의 다이내믹 레인지에서 선형에 가까운 특성을 보였으며 자기장 민감도는 약  $10.5 \text{ V/Oe}$  였다. 자기임피던스 센서 시스템이 와이어로프의 결함 진단 장치에 응용될 수 있음을 보였다.

**주요용어:** 자기센서, 자기임피던스, 와이어로프 비파괴 검사

**Abstract** Recently, portable magnetic sensors with high sensitivity are strongly required for various applications such as biosensor, nondestructive testing and directional sensor. A novel magnetic sensor system was developed by utilizing giant magnetoimpedance(MI) effect of soft magnetic ribbons. The sensor system consists of sensing head of  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{Si}_{15}\text{B}_{15}$  ribbon having asymmetric MI characteristics through exchange coupling produced by field-annealing in open air and circuit for signal processing. The sensor system showed almost linear characteristics in dynamic range of  $-1 \text{ Oe} \sim 1 \text{ Oe}$  and sensitivity of  $10.5 \text{ V/Oe}$ . The sensor was applicable to nondestructive testing system to detect defects in wire ropes.

**Keywords:** Magnetic Sensor, Magnetoimpedance, Wire Rope Nondestructive Testing

#### 1. 서론

휴대폰에 사용되는 전자 나침반을 위한 방위 센서와 특정 단백질이나 바이러스 검출 등을 위한 바이오센서 등 여러 분야에서 낮은 소비전력, 작은 헤드 사이즈, 높은 감도와 분해능, 빠른 반응속도를

가진 자기센서를 필요로 하고 있다. 기존의 자기센서들 중에서 fluxgate 센서의 경우 분해능은 약  $1 \mu\text{Oe}$ 로 가장 좋으나 소비전력이 약  $1 \text{ W}$ 로 높은 단점을 지니고 있다. 반대로 Hall, MR, GMR 자기센서들은 소비전력이 약  $10 \text{ mW}$ 로 매우 뛰어나지만 분해능이 수십에서 수백  $\text{mOe}$ 로 낮은 단점을

지니고 있다[1].

연자성 재료에 교류 전류를 흘릴 때 발생하는 전압과 가해진 전류의 비, 즉 임피던스가 외부자기장에 따라 크게 변하는 현상을 거대 자기 임피던스(giant magnetoimpedance, GMI) 효과라 부르며, 이러한 GMI 효과를 이용한 자기센서의 경우 Fluxgate 센서 수준의 높은 자기장 분해능과 Hall, MR, GMR 센서 수준의 낮은 소비전력을 실현할 수 있는 장점을 동시에 지니고 있다[1]. 일본의 Aichi Micro Intelligent 사에서는 비정질 연자성 와이어의 GMI 효과를 이용한 자기센서(MI센서)를 개발하여 시판하고 있다.

가장 이상적인 자기센서 소재는 출력전압이 영의 자기장을 중심으로 +와 -부호의 특정 자기장 범위 내에서 선형적으로 변하는 특성을 지닌 것이다. 그러나 일반적인 연자성 리본이나 와이어의 GMI 효과는 영의 자기장을 중심으로 선형적이 아닌 대칭적인 자기장 의존 특성을 보인다. 따라서 MI 자기센서를 개발하기 위해서 비대칭적인 GMI 특성을 얻는 방법이 요구된다. Aichi Micro Intelligent 사에서 만든 MI 센서는 비대칭적인 GMI 효과를 얻기 위해 센서 헤드에 바이어스 코일을 감고 직류 자기장을 인가하는 방법을 적용하고 있다. 그러나 이러한 방식의 경우 바이어스 자기장을 위해 부가적인 전류의 공급이 필요하여 이로 인해 소비전력이 증가하게 된다.

연자성 리본을 공기중에서 자기장 열처리 하는 방법으로 표면에 경자성 층을 형성하고 이 경자성 표면층과 연자성 내부층 사이의 교환결합(exchange coupling)으로 인해 별도의 부가적인 바이어스 자기장의 공급 없이 비대칭 MI 특성을 지닌 소재를 제작하는 방법이 개발되었다[2,3].

본 논문에서는 비대칭 MI 소재를 이용하여 선형 자기센서 시스템을 개발한 방법과 성능을 제시하고자 한다. 아울러 MI 센서 시스템을 이용하여 와이어로프의 결함을 비파괴적으로 검사하는 방법과 결과도 제시하고자 한다.

## 2. MI 효과

### 2.1. 리본 형태의 자성체에서 MI 효과의 근원

Fig. 1과 같이 두께가 얇고 길이가 길며 전기전도도가  $\sigma$ 인 자성체 리본에 길이 방향(z축 방향)으

로 각주파수  $\omega$ 의 교류전류  $I(\omega)$ 를 인가하면 Maxwell 방정식에 의해 자기장 H와 전기장 E가 각각 폭 방향(y축 방향)과 길이 방향으로 유도 된다. 이때 두 전극사이의 교류 전위차  $V(\omega)$ 와  $I(\omega)$ 의 비로 정의되는 임피던스를 Maxwell 방정식의 해로부터 구하면 다음 식으로 표현 된다[4].

$$Z = R_{dc}ka \coth(ka) \quad (1)$$

여기서  $R_{dc}$ 는 리본의 직류저항,  $2a$ 는 리본의 두께이며  $k$ 는 다음과 같이 표피깊이(skin depth)  $\delta$ 와의 관계에서 정의된다.

$$k = \frac{1-j}{\delta}, \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu_y}} \quad (2)$$

위 식에서  $j = \sqrt{-1}$ 이며  $\mu_y$ 는 교류전류에 의해 발생한 폭 방향 자기장에 의해 자화된 정도를 나타내는 투자율이다. 통상  $\mu_y$ 는 좌표축의 선택에 관계없이 수직방향 투자율  $\mu_t$ 라 부르며 자기완화 현상으로 인해 복소수이다.

식 (1)과 (2)를 보면 임피던스가 외부 자기장에 민감하게 변하는 현상은 임피던스가 수직방향 투자율  $\mu_y$ 의 함수이기 때문에 생기는 현상임을 알 수 있다. 식 (1)을  $ka$ 에 대한 시리트로 전개한 후 저주파와 고주파 극한을 취하면 다음과 같은 근사식을 얻을 수 있다.

$$Z \simeq R_{dc} \left\{ 1 + \frac{1}{3}(ka)^2 \right\}, \quad ka \ll 1 \quad (3)$$

$$Z \simeq R_{dc}ka = R_{dc}(1-j)a \sqrt{\frac{\omega\sigma\mu_y}{2}}, \quad ka \gg 1 \quad (4)$$

위 근사결과를 보면 표피 깊이  $\delta$ 가  $a$ 보다 매우 큰 저주파의 경우 식 (3)에 따라 임피던스는 거의 직류저항값이 되기 때문에 비록 수직방향 투자율이 외부자기장에 민감하게 변할지라도 임피던스에는 변화를 거의 주지 못한다는 것을 알 수 있다.  $\delta$ 가  $a$ 보다 매우 작은 고주파의 경우 식 (4)에 따라 임피던스는 바로 수직방향 투자율의 제곱근에 비례하기 때문에 수직방향 투자율이 외부자기장에 민감하게 변하는 경우 임피던스도 자기장에 민감한 변화를 보이게 된다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 MI

효과의 근원은 바로 수직방향 투자율의 자기장 의존성에 있음을 알 수 있다.

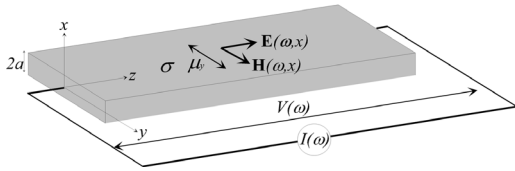


Fig. 1 Magnetoimpedance effect of soft magnetic ribbons

2.2. 비정질 연자성 리본의 전형적인 MI 특성

비정질 연자성 리본의 MI 특성(임피던스의 외부 자기장 의존성)은 리본의 자기이방성의 방향에 따라 달라진다. MI 특성의 자기이방성 방향 의존성은 이론적으로 구할 수 있다. Fig. 2와 같이 길이방향으로부터  $\theta_k$  각도로 단일 축 자기 이방성을 가진 쌍 자구로 이루어진 연자성 리본을 고려하자. 이 재료에서 자벽의 폭은  $d$ 이며 자기이방성 상수는  $K$ , 포화자화 값은  $M_s$ 이다. 이 리본의 길이 방향으로 외부자기장  $H_{ext}$ 를 인가하면 자기 에너지를 최소화 하기위해 자벽의 변위  $x$ 와 각 자구내의 자화벡터 방향  $\phi_1$ 과  $\phi_2$ 는  $H_{ext}$ 에 따라 변하게 된다. 주어진  $H_{ext}$  하에서 교류전류  $I(\omega)$ 를  $z$ 방향으로 인가하면  $y$ 방향으로 교류자기장  $H_y(\omega)$ 가 유도되며 이로 인해  $x$ 와  $\phi_1, \phi_2$ 는 모두 평형위치로부터 진동하게 된다. 이때 수직방향 자화율  $\chi_t$ 은 다음 식에 의해 구할 수 있다[5,6].

$$\chi_t = \frac{\Delta M_t}{\Delta H_y} = \frac{M_t(H_{ext}, H_{y0}) - M_t(H_{ext}, 0)}{H_{y0} - 0} \quad (5)$$

여기서  $H_{y0}$ 는 수직방향 교류자기장  $H_y(\omega)$ 의 진폭이며  $M_t$ 는 다음과 식에 의해 얻을 수 있는 수직방향 자화이다.

$$M_t(H_{ext}, H_y) = (1/2 + x/d)M_s \sin\phi_1 - (1/2 - x/d)M_s \sin\phi_2 \quad (6)$$

여기서  $x, \phi_1, \phi_2$ 는  $H_{ext}$ 와  $H_y$  값의 함수이다.  $H_{ext}$ 와  $H_y = H_{y0}$  일 때의  $x, \phi_1, \phi_2$  값과  $H_{ext}$ 와

$H_y = 0$  일 때의  $x, \phi_1, \phi_2$  값은 총 자기 에너지가 최소화 되는 조건을 컴퓨터를 이용한 수치적 계산 방법으로 구할 수 있다. 식 (6)과 (5)에 그 결과를 대입하면 수직방향 자화율의 외부 자기장 의존 특성을 시뮬레이션 할 수 있다. 수직방향 자화율과 투자율은 단순히  $\mu_y = \mu_0(1 + \chi_y)$  (여기서  $\mu_0$ 는 진공에서의 투자율) 관계를 만족하며 자기 임피던스는 표피 깊이가 리본의 두께보다 적어지는 고주파수에서 수직방향 투자율의 단순증가 함수이기 때문에 자기임피던스 특성곡선은 자화율 특성곡선과 형태가 같게 된다.

Fig. 3은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻은 수직방향 자화율의 자기장 의존 특성을 보여준다. 이 그림에 MI 효과와 자화과정 사이의 연관성에 대한 이해를 돕기 위해 몇몇 특정  $H_{ext}$  값에서 자화의 평형 상태(교류 전류를 인가하지 않았을 때의 자화 상태)를 함께 표시하였다. Fig. 3에는 자벽이동과 자화회전이 모두 완화된 상태 없이 교류  $H_y(\omega)$ 를 따

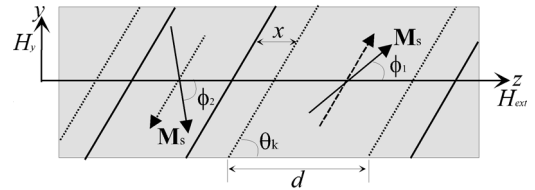


Fig. 2 Geometry of domain structure in the model for magnetoimpedance of soft magnetic ribbons

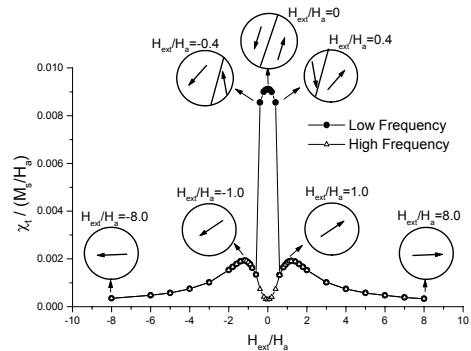


Fig. 3 Transverse susceptibility versus external magnetic field calculated for  $\theta_k = 70^\circ$  with model of Fig. 2. Here  $H_{ext}$  and  $\chi_t$  are normalized to anisotropy field  $H_a = 2K/\mu_0 M_s$  and  $M_s/M_a$ , respectively. See Ref. [6] for detail calculations

라 잘 진동하는 저주파수에서의 특성곡선과 자화회전은 완화현상 없이  $H_y(\omega)$ 를 따라 잘 진동하지만 자벽은  $H_y(\omega)$ 의 진동수가 너무 빨라 진동하지 못하고 평형 위치에서 정지하고 있는 고주파에서의 특성곡선을 함께 그렸다. 이 결과로부터 i) 자화회전만 수직방향 자화에 기여하는 고주파의 경우  $H_{ext} = 0$ 에서 골짜기를 가지는 쌍봉 형태의 특성곡선을 보이며 ii) 자벽이동이 함께 기여하는 저주파 경우  $H_{ext} = 0$ 에서 최대값을 가지는 대칭적인 단일 봉우리 형태의 특성곡선이  $H_{ext} = 0$  근방의 자기장 범위 내에서 나타난다는 것을 알 수 있다.

Fig. 3의 결과를 보면 MI 효과는 저주파와 고주파 모두  $H_{ext} = 0$ 를 기준으로 대칭적인 특성을 보여 준다. 이러한 대칭적인 특성으로 인해 일반적으로는 연자성 소재의 MI 효과를 이용하여  $H_{ext} = 0$ 를 기준으로 선형 특성을 지닌 자기센서용 소재는 얻을 수 없다는 것을 알 수 있다.

### 3. MI 자기센서 시스템 개발

#### 3.1. 비대칭 MI 특성 센서 헤드 제작

일반적인 비정질 연자성 소재는 대칭적인 MI 특성을 보이기 때문에 선형자기 센서 소재로 이용하는데 제한이 있다. 비정질 연자성 리본을 공기중에서 열처리 하는 방법으로  $H_{ext} = 0$ 을 기준으로 비대칭적인 MI 특성을 지닌 소재를 제작하는 방법이 개발되었다[2]. 비정질 연자성 리본을 공기중에서 자기장 열처리 하는 과정에서 산화로 인한 조성의 변화로 표면에 결정화 온도가 내부 비정질 부분보다 낮은 층이 형성된다. 열처리 온도 시간 및 자기장 크기를 적절히 조절하면 표면의 결정화로 인해

단일방향 이방성을 가진 경자성층을 만들 수 있으며 이 경자성층과 내부 연자성 층사이의 교환결합으로 인해 비대칭 MI 특성이 생기게 된다[3,6].

본 연구에서 사용한 소재는 상업적으로 판매되고 있는  $Co_{66}Fe_4B_{15}Si_{15}$  연자성 비정질 리본(폭 2 mm, 두께 20  $\mu m$ ) 이다. 이 리본을 5 cm 길이로 자른 후 온도 380°C에서 리본의 길이방향으로 3 Oe의 자기장을 인가하여 8시간동안 열처리하여 비대칭 MI 특성을 부여하였다. 열처리후 에칭용액을 이용하여 산화막을 제거하고 소재의 크기를 폭 1 mm, 길이 1 cm로 소형화한 후 전극을 부착하여 MI 센서용 헤드를 제작하였다.

#### 3.2. MI 센서용 신호처리 회로 개발

Fig. 4는 본 연구에서 개발한 MI 센서용 회로의 블록 다이어그램을 보여준다. 회로의 입력부는 교류전압 신호를 발생시키고 이를 교류전류로 변환하여 센서헤드에 인가해 주는 oscillator와 voltage-to-current converter로 구성되어 있다. 본 회로에서 교류 입력전류  $I_i(\omega)$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$I_i(\omega) = (V_{ip}/R_i)\sin \omega t \tag{7}$$

여기서  $R_i$ 는 voltage-to-current converter의 내부 저항이며  $V_{ip}$ 와  $\omega$ 는 oscillator 출력 전압의 진폭과 주파수이다. 입력 전류가 비대칭 MI 특성을 지닌 비정질 연자성 리본의 센서헤드에 인가될 때 MI 효과에 의해 센서헤드 양단에 발생하는 교류전압 신호  $V_{IM}$  (MI 신호)를 차동증폭(differential amplifier) 회로로 증폭 감지한 후 다시 증폭회로를 통해 2차 증폭을 하였다. 이때 2차 증폭 후의 신호 Y는 다음과 같이 된다.

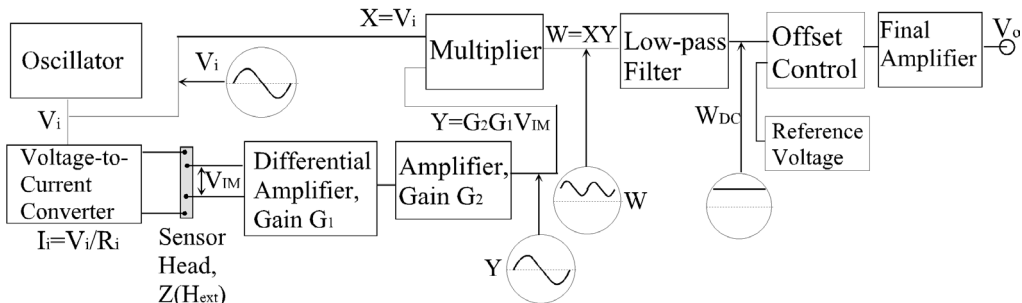


Fig. 4 Block diagram of MI sensor circuit

$$Y = \frac{G_2 G_1 |Z|}{R_i} V_{ip} \sin(\omega t + \phi) \quad (8)$$

여기서  $G_1, G_2$ 는 각 증폭회로의 Gain 값이며  $|Z|$ 와  $\phi$ 는 복소수인 임피던스의 절대값과 위상각이다.

MI 출력신호의 진폭값을 잡음으로부터 정밀하게 측정하기 위해 MI 출력신호에서 oscillator의 신호와 동위상의 성분만을 측정하는 lock-in amplifier(phase sensitive detection)방법을 채택하였다. 이를 위해 multiplier IC 회로를 이용하였으며 이 IC는 oscillator 신호  $V_i$ 와 MI 신호  $Y$ 를 곱한 신호를 10으로 나눈 값을 출력  $W$ 로 준다. 그 결과 신호  $W$ 는 다음 식에서 알 수 있듯이 DC offset을 가진 주파수가 두 배 된 신호가 된다.

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{10} V_{ip} \sin \omega t \left\{ \frac{G_2 G_1 |Z|}{R_i} V_{ip} \sin(\omega t + \phi) \right\} \\ &= \frac{1}{20} \frac{V_{ip}^2 G_2 G_1 |Z|}{R_i} \{ \cos \phi - \cos(2\omega t + \phi) \} \end{aligned} \quad (9)$$

Multiplier의 출력  $W$ 를 저역필터(low-pass filter)회로를 거쳐 교류성분을 제거하여 다음과 같은 직류신호  $W_{DC}$ 를 얻었다.

$$W_{DC} = \frac{1}{20} \frac{V_{ip}^2 G_2 G_1}{R_i} |Z| \cos \phi \quad (10)$$

이와 같은 과정을 거쳐 센서 헤드의 임피던스 실수부  $Z' = |Z| \cos \phi$ 에 비례하는 직류전압을 출력신호로 얻게 된다.

마지막 단계로 외부자기장  $H_{ext} = 0$  일 때 출력 전압을 영으로 조정하는 offset control 회로와 최종 증폭회로를 거쳐 다음과 같이 자기 임피던스의 크기에 비례하는 최종 출력신호  $V_0$ 를 얻었다.

$$V_0 \propto \Delta Z' = \{ Z'(H_{ext}) - Z'(H_{ext} = 0) \} \quad (11)$$

### 3.3. 개발된 MI 센서 시스템의 특성

Fig. 5는 본 연구에서 제작한 비대칭 MI 특성을 지닌 폭 1 mm, 길이 1 cm 비경질 리본 헤드를 PCB로 제작한 Fig. 4의 회로에 연결하여 출력전압의 외부자기장 의존성을 측정된 결과를 보여준다.

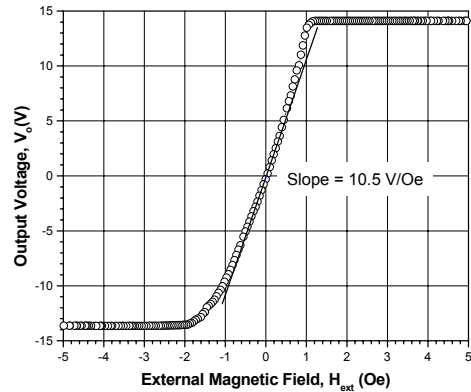


Fig. 5 Output characteristics of the developed MI sensor system

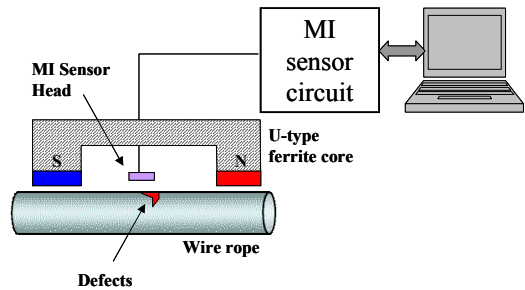


Fig. 6 Block diagram of wire rope tester system utilizing MI sensor

여기서 인가한 입력전류의 주파수와 진폭은 각각 100 kHz와 10 mA였으며, 센서회로의 각 gain들은 센서가 약 -1 Oe와 1 Oe범위의 다이내믹 레인지를 가지도록 적절히 조절하였다. Fig. 5의 결과로부터 개발된 MI 자기센서는  $H_{ext} = 0$  근처에서 선형에 가까운 특성을 보이며 자기장 민감도는 약 10.5 V/Oe가 됨을 알 수 있다.

### 4. MI 자기센서 시스템의 응용

개발된 MI 자기센서 시스템을 자기비드를 감지하는 바이오센서 분야, 와이어로프의 결함을 비파괴적으로 진단하는 분야 등에 응용하는 연구를 진행하고 있다. Fig. 6은 MI 센서시스템을 이용하여 개발하고자 하는 와이어로프 검사장비의 개략도를 보여준다. 이 장치는 와이어로프에 U자형 페라이트 코어 자석을 접촉하여 와이어로프와 U-코어를 통해 닫힌 자기선속을 발생시키며 와이어로프에 결함이 존재할 때 발생하는 누설자속을 MI 자기센서

시스템으로 감지하는 원리를 이용한다. 사용한 와이어로프의 전체직경은 10 mm, 소선의 직경은 1 mm 이었으며, 인공결합은 소선을 단선시켜 만들었다. 소선을 다양한 가닥 수 만큼 단선시킨 인공결합을 와이어로프 위에 일렬로 만든 후 MI 센서 헤드의 위치를 와이어로프 위에서 이동시키면서 출력신호를 측정된 결과가 Fig. 7이다. 이 결과를 보면 MI센서 시스템의 신호대/잡음비(S/N)가 1개 이상의 소선의 단선은 충분히 검출할 수 있음을 보여준다. MI 센서를 이용한 와이어로프 결합측정 방법은 Hall 센서 등 다른 자기센서 방식에 비해 i) 자기장 민감도가 높으며 ii) 리본형의 센서헤드를 쉽게 휠 수 있기 때문에 와이어로프를 한 바퀴 감싸는 형태로 헤드를 만들면 센서와 결합사이의 각도에 관계없이 결합을 검출할 수 있다는 장점을 지니고 있어 와이어로프 검사를 위한 새로운 장비 개발에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

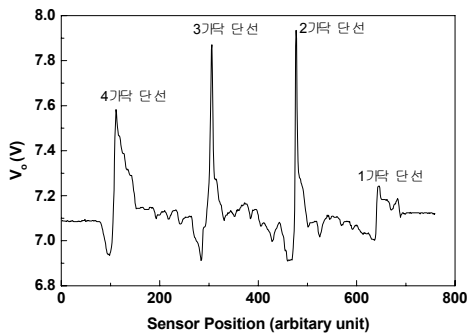


Fig. 7 Detection signals for artificial defects in wire rope with MI sensor system

## 5. 결론

연자성 비정질 리본을 공기중에서 자기장 열처리하는 방법으로 비대칭 MI 특성을 부여한 센서 헤드를 만들고 이를 구동하고 신호를 처리하는 회로를 제작하여 선형에 가까운 특성을 지닌 고감도 자기센서 시스템을 개발 할 수 있었다. 본 자기센서 시스템은 바이오센서, 와이어로프 결합진단 등 다양한 분야에 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- [1] K. Mohri, T. Uchiyama, L. P. Shen, C. M. Cai and L. V. Panina, "Amorphous wire and CMOS IC-based sensitive micro-magnetic sensors (MI sensor and SI sensor) for intelligent measurements and controls," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 249, No. 1-2, pp. 351-356, (2002)
- [2] C. G. Kim, K. J. Jang, H. C. Kim and S. S. Yoon, "Asymmetric giant magnetoimpedance in field-annealed co-based amorphous ribbon," *Journal of Applied Physics*, Vol. 85, No. 8, pp. 5447-5449, (1999)
- [3] C. G. Kim, C. O. Kim and S. S. Yoon, "The role of exchange coupling on the giant magnetoimpedance of annealed amorphous materials," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 249, No. 1-2, pp. 293-299, (2002)
- [4] L. V. Panina, K. Mohri, T. Uchiyama, M. Noda and K. Bushida, "Giant magnetoimpedance in co-rich amorphous wires and films," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 31, No. 2, pp. 1249-1260, (1995)
- [5] D. Atkinson and P. T. Squire, "Phenomenological model for magnetoimpedance in soft ferromagnets," *Journal of Applied Physics*, Vol. 83, No. 11, pp. 6569-6571, (1998)
- [6] S. S. Yoon, N. A. Buznikov, D. Y. Kim, C. O. Kim and C. G. Kim, "The orientation-effect of exchange bias on giant magnetoimpedance in surface crystallized  $\text{Co}_{66}\text{Fe}_4\text{B}_{15}\text{Si}_{15}$  amorphous ribbons," *The European Physical Journal B*, Vol. 85, No. 2, pp. 231-235, (2005)