

자성와이어를 이용한 동축케이블형 자계센서의 특성

김영학*

전기·제어공학부 부경대학교, 부산시 남구 용당동 산 100번지, 608-739

(2007년 3월 12일 받음, 2007년 4월 11일 최종수정본 받음)

본 논문에서는 Co를 주성분으로 하는 아몰퍼스 자성 와이어를 동축케이블의 신호선으로 하는 자계센서를 제작하여 외부자계에 대한 특성을 측정하였다. 측정된 임피던스의 주파수의존성에는 전송선로의 공진특성이 반영되었으며 인가자계가 없을 때, 1/4 파장에 해당하는 주파수가 250 MHz에서 나타났다. 측정 주파수대역에서는 표피효과에 의한 저항성분이 임피던스를 거의 결정하였으며 또한 외부자계가 0 Oe~1 Oe 사이에서 임피던스는 자성 아몰퍼스 와이어의 투자율의 변화에 의해 크게 변화하였다. 0.1 Oe 부근에서 150 MHz의 $\Delta Z/\Delta H$ 가 300 Ω/Oe 이라는 매우 큰 값이 얻어져 Co를 주성분으로 하는 자성와이어를 동축케이블형 자계센서로 사용하는 경우 센서로서 매우 유용함을 알 수 있었다.

주제어 : 아몰퍼스 와이어, 동축케이블, 공진형, 자계센서

I. 서 론

자성체에 전류를 흘려 외부자계를 인가하면 자성체의 임피던스가 변하며, 여기에 주파수가 높아지면 표피효과에 의해 임피던스의 변화가 더욱 크게 나타나는 것은 잘 알려진 사실이다[1]. 이런 현상은 미약한 외부 자계를 측정할 수 있는 센서를 구현하기 위해 이용되고 있으며 이런 센서를 MI(magnetic impedance)센서라고 알려져 있다[2]. MI센서에 이용되는 자성체는 센서의 동작특성 상, 유도자기이방성을 쉽게 얻기 위해 Co를 주성분으로 하는 아몰퍼스 자성체가 이용되고 있다[3, 4]. 특히, 자성체의 형상이 와이어 형태로 되면 자기모멘트가 원주방향으로 형성되어 반자계가 발생하지 않는 큰 이점을 가지게 된다[5]. MI센서를 이용하여 센서회로를 구성할 때, MI센서를 발진회로 중의 인덕티브 소자로 구성하게 되는데 이것은 외부자계가 인가되면 임피던스가 변화함과 동시에 발진주파수에 대해 공진현상이 발생한다. 이와 같은 공진현상은 임피던스의 변화를 회로의 큰 전압전폭을 가져오기 때문에 높은 감도의 센서를 제작할 수가 있다[6]. 공진현상을 이용하는 또 하나의 방법은 센서를 고주파 전송선로로 구성하는 것이다[7]. 전송선로의 입력임피던스는 선로길이 주파수에 의해 결정되는 선로파장의 1/4의 정수배에 맞추어 최대치를 가진다. 이 값은 전송선로의 종단이 단락 또는 개방이 될 때 최대 혹은 최소가 되어 이 근방에서 급격하게 변하게 된다.

본 논문에서는 Co를 주성분으로 하는 아몰퍼스 자성 와이어를 동축케이블의 신호선으로 한 동축케이블형 전송선로를

제작하여 외부자계에 대한 특성을 측정하고, 이 결과를 자기동역학과 전자기학적인 관점에서 고찰과 센서의 유용성에 대해 검토한다.

II. 실험 방법

자계센서의 특성은 Fig. 1에서와 같이 외부자계가 인가될 수 있도록 헬름홀츠 코일 사이에 자계센서를 두고 네트워크 분석기를 사용하여 측정되었다. 자계센서는 동축케이블의 구조를 가지며 Be-Cu 금속튜브에 유전체인 테프론을 채워 넣고 길이방향으로 구멍을 뚫어 아몰퍼스 자성와이어를 삽입하여 제작하였다. 튜브의 직경은 4 mm이며 두께는 50 μm , 길

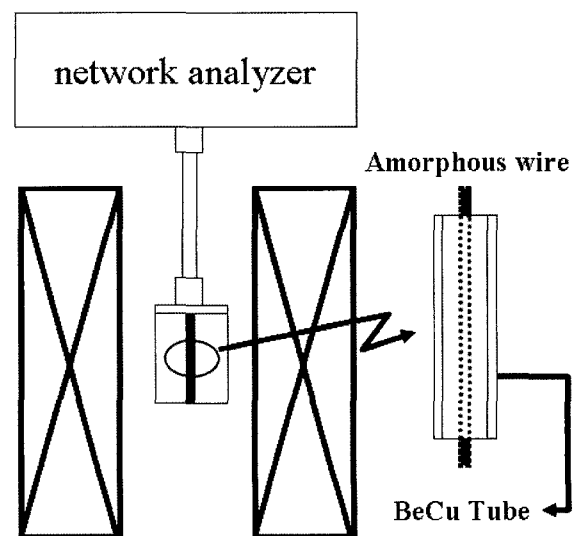


Fig. 1. Measurement Configuration.

*Tel: (051) 620-1438, E-mail: pknu.ac.kr

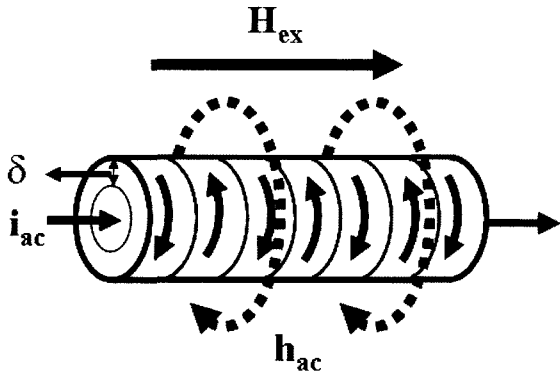


Fig. 2. Magnetic domain and magnetic field for amorphous wire.

이는 40 mm이다. 자성와이어는 일본유니티카(주), 모델명 125AF10의 시작품으로 직경이 125 μm이고 길이가 거의 40 mm이며, 와이어의 원주방향에 자화용이축이 되도록 유도 자기방향을 부여하기 위해 진공 중에서 열처리된 것이다.

제작한 자성 동축케이블 센서의 특성은 네트워크분석기를 이용하여 반사법(Reflection method)으로 측정되었으며, 이 때, 임피던스측정을 위한 네트워크분석기의 출력파워는 1 dBm으로 일정하게 유지하였다. 제작한 전송선로와 네트워크분석기와 전기적인 접속은 자성 와이어와 특성임피던스가 50 Ω으로 설계된 SMA커넥트를 이용하여 네트워크분석기의 신호 입출력용 케이블에 연결하는 방법을 이용하였다. 이 때, 측정 주파수는 300 kHz에서 3 GHz로 가변시키면서 측정하였고, 인가 자기장은 0 Oe~60 Oe 사이에서 가변하면서 측정을 실시하였다. 측정 시 보정(Calibration)지점은 SMA커넥트와 동축케이블 센서의 접속지점으로 하였고, 동축케이블형 센서의 종단을 그라운드면에 접지하였다.

Fig. 2는 자성와이어에 인가되는 고주파 교류자계와 외부 직류자계를 나타낸 것이며 여기에 자기구조도 함께 나타내었다. 그림과 같이 자성와이어는 원주방향으로 자화용이축이 형성되어 있고 여기에 고주파 교류전류를 흘리면 원주방향으로 교류자계가 발생한다. 이 상태에서 외부직류자계가 자화관축(길이방향)으로 인가되면 자기모멘트는 길이방향 성분이 점점 커지게 된다. 이 때 외부직류자계에 의한 투자율은 변화는 외부직류자계가 증가함에 따라 투자율이 증가하여 최대치를 가진 이후 다시 감소하는 것으로 알려져 있다[8]. 또한 고주파 교류자계가 인가됨에 따라 이몰퍼스 와이어의 단면에서는 표피효과가 발생하며 주파수의 증가에 따라 와이어 표면에 가까운 부분의 자기모멘트가 투자율에 기여하게 된다.

III. 센서의 분포정수

부하가 0인 경우(접지) 전송선로의 입력임피던스 Z_c 와 특성

임피던스 Z_o , 전파상수 γ 의 관계는 식(1)과 같으며 특성임피던스와 전파상수는 식(2)와 식(3)으로 주어진다.

$$Z = Z_o \tanh \gamma l \tag{1}$$

$$Z_o = \frac{\sqrt{R + j\omega L}}{\sqrt{G + j\omega C}} \tag{2}$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \tag{3}$$

여기서 ω 는 각주파수이며 l 은 선로의 길이이며 R, L, C, G 는 선로의 분포정수로서 저항, 인덕턴스, 용량, 컨덕턴스를 나타낸다. 식(1)에서와 같이 입력임피던스는 $\tanh \gamma l$ 함수형태로 주어지므로 주파수를 따라 최대치와 최소치가 나타나는 공진특성을 가지게 된다. 일반적인 동축케이블인 경우, 고주파에서 R, L, C, G 는 식(4)~(7)로 주어진다[9, 10].

$$R = \frac{1}{2\pi\sigma_{cond}\delta} \left(\frac{1}{2t} + \frac{1}{2h} \right) \tag{4}$$

$$L = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{h}{t} \right) \tag{5}$$

$$G = \frac{2\pi\sigma_{diel}}{\ln \left(\frac{h}{t} \right)} \tag{6}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \left(\frac{h}{t} \right)} \tag{7}$$

여기서 δ 는 표피효과에 의한 표피두께, h 는 동축케이블의 내부도체의 직경, t 는 외부도체의 외경, σ_{cond} 는 도체의 전기전도도, μ 는 투자율, σ_{die} 은 유전체의 전도도, ϵ 은 유전율을 나타낸다.

식(3)에서와 같이 저항 R 은 주파수가 높아지면 표피효과가 현저해지므로 저항은 커지게 된다. 또한 외부자계가 인가되면 자성체의 투자율 변화에 의해 인덕턴스가 변하게 되며, 또한 표피두께도 달라져 저항이 더욱 크게 변하게 된다. 이에 비해 C 와 G 는 형상을 제외하며 유전율과 도전율에 의해 결정되므로 외부자계에 대해 변화하지 않는다. 따라서 이 실험에서 이용하고 있는 동축케이블형 자기센서는 외부자계 인가에 의해 분포정수 R 과 L 이 변하게 되어 특성임피던스와 전파상수가 변하고 결국 식(1)에서와 같이 입력임피던스가 변하게 된다. 동축케이블형의 자기센서의 자기감도는 외부자계인가에 대한 입력임피던스의 변화율로 측정할 수 있다. 전송선로의 입력임피던스는 네트워크분석기로 측정되는 반사계수 S_{11} 을 이용하여 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$Z_c = Z_o \frac{1 + S_{11}}{1 - S_{11}} \tag{8}$$

이다. 여기서, Z_0 는 네트워크의 특성임피던스로 본 실험에서는 50 Ω 이었다.

IV. 결과 및 고찰

Fig. 3은 동축케이블형 자기센서의 종단을 단락시킨 경우의 임피던스, 저항, 리액턴스의 측정결과를 나타낸 것이다. 이 때 자기센서에는 0 Oe, 1 Oe, 60 Oe의 길이방향(자화곤란방향)의 자계를 인가하였다. Fig. 3(a)는 임피던스가 주파수의존성을 나타낸 것이다. 임피던스의 제1 공진피크는 0 Oe에서 250 MHz, 1 Oe에서 150 MHz, 60 Oe에서 450 MHz에서 최대치를 가지며 거의 2 GHz 부근에서 모두 최소치를 나타내고 있다. 그리고 이 그림으로부터 제2의 공진피크는 3 GHz 이상에서 나타날 것으로 예상된다. 외부자계에 대해 공진주파수가 변화하는 것은 아몰퍼스 와이어의 투자율이 외부자계에 대해

변화함에 따라 인덕터스가 변화하고 있음을 나타낸다. 수 MHz 이상의 교류자계에 대하여 투자율은 주로 자기모멘트의 회전에 의해서 일어난다. 이 센서에서는 고주파교류자계가 자화용이축인 원주방향으로 인가되며 외부직류자계는 자화곤란축인 길이방향으로 인가되고 있다. 외부직류자계가 증가하면 자기모멘트는 원주방향에서 길이방향으로 향하게 되며 이 때 적당한 크기의 외부직류자계에서는 자기모멘트의 회전이 순조롭게 되어 투자율은 최대로 증가하게 된다. 60 Oe의 외부자계가 인가된 경우의 자성 와이어의 투자율은 자기모멘트가 외부자계에 의해 길이방향으로 강한 에너지를 가지므로, 이로 인해 자화의 회전이 방해되어 투자율은 작아진다. 그리고 동축케이블에서의 파장은 매질의 전자기적인 특성(유전율과 투자율)의 평방근 반비례하여 외부자계를 인가하지 않았을 때, 250 MHz인 전자파의 1/4파장은 본 연구에서 제작한 동축케이블의 길이와 같게 됨을 의미한다.

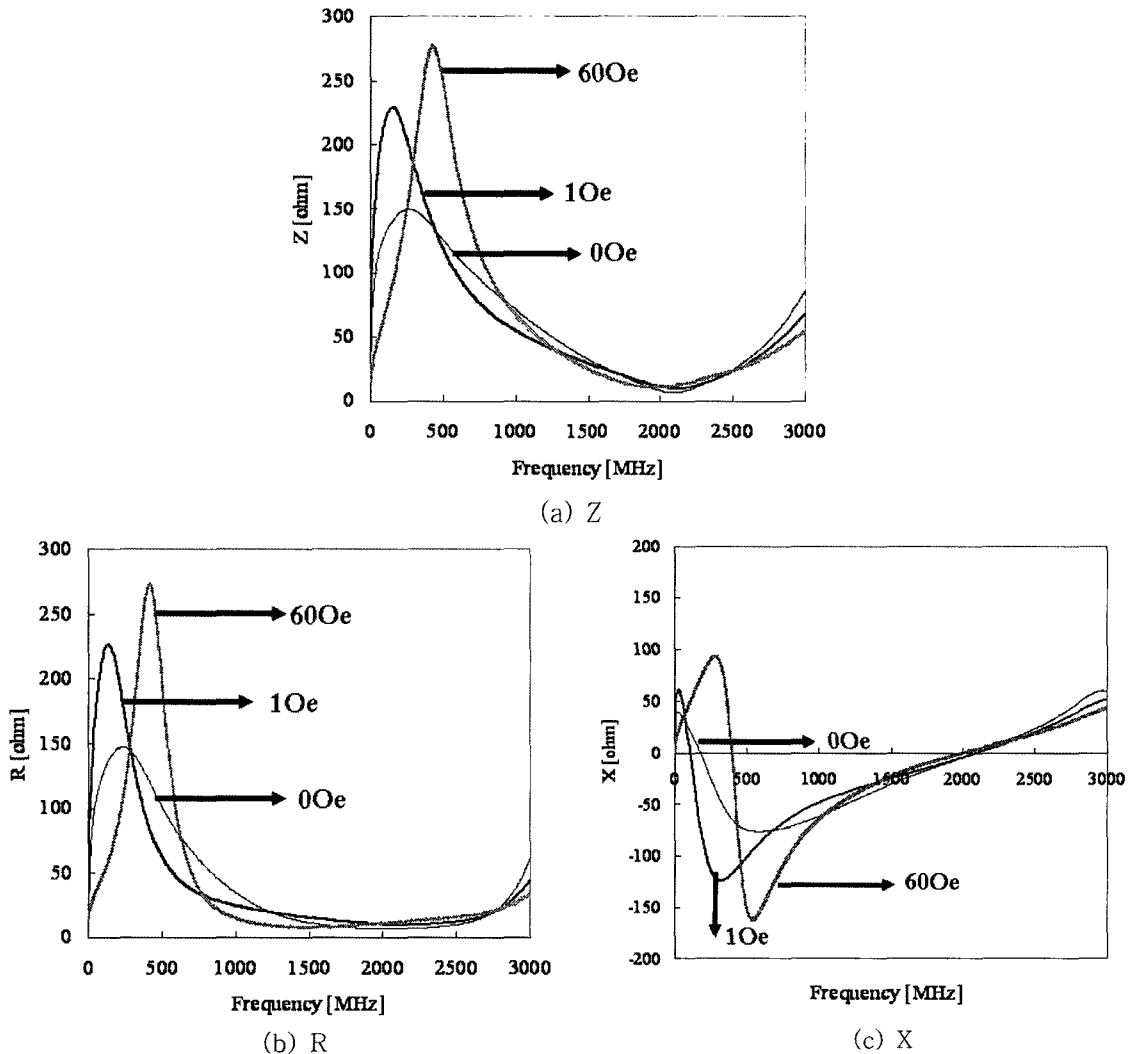


Fig. 3. Frequency dependence of measured Z , R , X .

Fig. 3(b)는 외부자계의 변화에 따른 저항의 주파수의존성을 나타낸 것이다. 저항의 주파수의존성과 임피던스의 주파수의존성은 거의 같은 경향을 나타내며 임피던스의 크기와 저항의 크기가 거의 같아 이 센서의 임피던스는 거의 저항성분에 의해 결정됨을 알 수 있다. 이 실험결과로부터 외부자계에 의한 투자율의 변화는 인덕턴스성분보다는 표피효과에 의한 저항성분이 더 크게 작용하고 있음을 알 수 있다. 0 Oe, 1 Oe, 60 Oe에서 저항의 최대치는 각각 148 Ω, 227 Ω, 273 Ω를 나타내고 있다. 외부인가 자계의 증가에 따라 저항이 증가하는 것은 표피효과에 의한 표피두께의 감소에 의한 것이다. 0 Oe~1 Oe에서는 투자율의 증가가 표피두께의 감소의 주된 요인이며 1 Oe~60 Oe에서는 주파수의 증가가 주된 요인으로 생각된다.

Fig. 3(c)는 리액턴스의 주파수의존성을 나타낸 것이다. 리액턴스는 임피던스가 최대가 되는 주파수에서 0이 되어 공진 현상을 잘 반영하고 있다. 이 결과는 동축케이블을 구성하고 있는 자성 와이어의 투자율 특성을 매우 잘 보여 주고 있다. 다만, 리액턴스는 투자율에 정비례하는 인덕턴스와 주파수의 곱으로 나타므로 0 Oe~1 Oe에서 리액턴스가 최대가 되는 주파수가 감소함에 불구하고 리액턴스값은 커지는 것은 여기서 투자율의 증가에 의한 것이며 1 Oe~60 Oe에서의 리액턴스의 증가는 주파수 증가에 의한 영향이다.

Fig. 4는 임피던스의 외부자계의존성을 주파수 150 MHz, 250 MHz, 450 MHz에서 나타낸 것이다. 인가자계의 범위는 0 Oe~3 Oe이며 주파수는 외부자계가 0 Oe, 1 Oe, 60 Oe에서 임피던스가 최대가 되는 주파수이다. 임피던스는 0 Oe에서 자계를 인가함과 동시에 증가하며 이 동축케이블형 자계센서는 동작점 설정을 위한 바이어스 자계[11]가 필요치 않음을 의미한다. 그리고 임피던스의 증가폭은 150 MHz에서 가장 크게 나타났다. Table 1은 0.1 Oe 부근에서 $\Delta Z/\Delta H$ 를 표시한 것으로 동축케이블형 자계센서의 감도를 실온에서 나타내는

Table 1. $\Delta Z/\Delta H$ at each frequency (room temperature).

f (MHz)	150	250	450
$\Delta Z/\Delta H(\Omega/Oe)$	300	190	≈ 0

것이다. 이것은 실제 센서회로를 구성하여 자계를 측정할 때 인가자계에 의한 전압변화로 측정된다. 이 센서에서는 150 MHz의 주파수에서 300 Ω/Oe의 매우 큰 값의 $\Delta Z/\Delta H$ 가 얻어져 Co를 주성분으로 하는 자성와이어를 동축케이블형 자계센서로 사용하는 경우, 센서로서 매우 유용함을 나타내는 것이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 아몰퍼스 자성 와이어를 신호선으로 사용한 동축케이블형 자계센서에 대해 0.3 MHz~3 GHz의 주파수 범위에서 특성을 측정하였다. 주파수에 대한 임피던스변화는 전송선로의 특성을 반영하고 있으며 자계인가가 없을 시, 1/4파장은 250 MHz에서 나타났다. 이 주파수 대역은 표피효과가 크게 발생하여 저항이 크게 증가하는 대역이므로 임피던스는 표피효과에 의한 저항성분에 의해 결정되었다. 또한 외부자계가 0 Oe~1 Oe 사이에서 임피던스가 크게 변화하는 것은 아몰퍼스 와이어의 투자율의 변화가 표피두께를 변화시켜 저항성분이 크게 변화하였기 때문이다. 0.1 Oe 부근에서 $\Delta Z/\Delta H$ 가 150 MHz에서 300 Ω/Oe의 매우 큰 값이 얻어져 Co를 주성분으로 하는 자성와이어를 동축케이블형 자계센서로 사용하는 경우 센서로서 매우 유용함을 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 2004학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- [1] E. P. Harrison, G. L. Turney, H. Rowe, and H. Gollop, Proc. Royal Soc., **157**, 651 (1937).
- [2] L. V. Panina and K. Mohri, Appl. Phys. Lett., **65**, 1189 (1994).
- [3] 島田寛, 일본금속학회지, **22**, 953 (1983).
- [4] Y. Shimada, Phys. Stat. Sol. (a), **80**, K87 (1983).
- [5] K. Mohri, Material Science and Engineering, **A185**, 141 (1994).
- [6] C. M. Cai, K. Mhori, Y. Honkura, and M. Yamamoro, Journal of the Magnetic Society of Japan, **25**, 967 (2001).
- [7] S. Ikeda, T. Sato, and K. Yamasawa, Journal of the Magnetic Society of Japan, **25**, 971 (2001).
- [8] M. Takezawa, M. Yamaguchi, K. Ishiyama, and K. I. Arai, J.

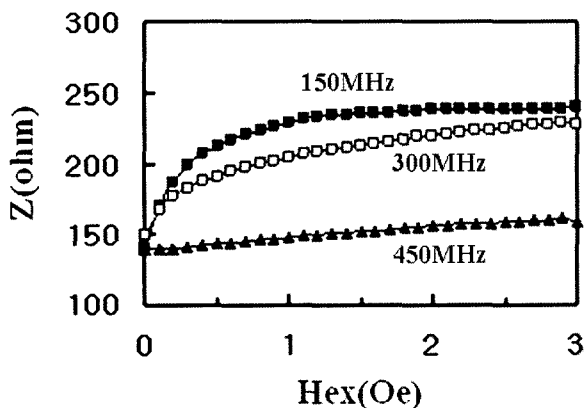


Fig. 4. Magnetic field dependence of Z.

- Appl. Phys., **83**(11), 7303 (1998).
[9] D. Menard, M. Britel, P. Ciureanu, and A. Yelon, J. Appl. Phys., **81**(8), 4032 (1997).
[10] R. Ludwig and P. Bretchko, RF Circuit Design, Prentice Hall, 57 (2000).
[11] Y. H. Kim, K. Ishiyama, and K. I. Arai, IEEE Trans. Mag., **35**, 5, 3394 (1999).

Characteristics of Coaxial Typed Magnetic Sensor Using Amorphous Wire

Y. H. Kim*

Department of Electric Engineering, Pukyong National University, San 100, Yongdang-Dong Nam-Gu, Busan 608-739, Korea

(Received 12 March 2007, in final form 11 April 2007)

Co-based amorphous magnetic wire with a diameter of 125 μm and a length of 40 mm was used as an inner conductor of a coaxial cable to construct a magnetic sensor. Sensor characteristics was measured up to 3 GHz with applied up to 60 Oe by using network analyzer. Frequency dependence of impedance for this sensor was very close to the impedance resonant pattern of transmission line and 250 MHz was obtained as a 1/4 wavelength without external magnetic field. Large impedance change was measured in the magnetic field range between 0 Oe and 1 Oe, which was influenced by permeability change of magnetic amorphous wire. Because $\Delta Z/\Delta H$ value of 300 Ω/Oe was obtained at 0.1 Oe, this coaxial cable with amorphous wire can be useful as a magnetic sensor.

Keywords : amorphous wire, coaxial cable, resonance, magnetic sensor