

### 초음파진동자를 이용한 자기 측정 방법 연구

## Study on the Magnetic Field Measurement Using the Ultrasonic Transducer

손 은영*	안성기능대학교 전자과
류 주현	세명대학교 전기공학과
윤 광희	연세대학교 전기공학과
정 영호	한전 기술원 배전자동화 그룹

Eun Young Sohn*	Dept. of Electronic. AhnSung Tech. Jr. College
Joo Hyun Yoo	Dept. of Electrical Eng. Semyung Univ.
kwang Hee Yoon	Dept. of Electrical Eng. Yonsei Univ
Young Ho Jung	Korea Electric Research Institute

#### ABSTRACT

A new magnetic field measuring system with induced coil is reported. This system consists of air-cored coil that is forced by the ultrasonic transducer. Induction voltage of coil is proportional to the DC magnetic field and the driving frequency of ultrasonic transducer by the principle of Faraday's law. The experimental measuring system is setup, and the possibility of a new magnetic field sensors is confirmed.

#### 1. 서론

일정 속도로 움직이는 도체가 자기 가운데 있으면, 전자유도에 의하여 도체에서 기전력이 발생한다. 진동하는 도체를 코일로 하면 코일에서 발생하는 기전력을 측정할 수 있다. 진동속도를 일정하게 하면, 이 기전력의 크기에 의하여 자계의 검출이 가능하며, 자계를 일정하게 하면, 진동속도의 검출이 가능하다. 이 때, 코일을 초음파진동으로 일정한 속도로 움직이게 하여 자계에 비례한 코일의 기전력을 얻는 방식의 자기검출법에 대하여 그 원리적인 가능성을 실험적으로 확인하여 보고자한다.

로 여진하는 진동판 위에 코일이 붙어 있다. 진동판의 진동속도에 따라 코일이 함께 움직인다. 이 때, 코일을 지나는 자속이 있으면, 전자유도현상에 의하여 자속에 비례한 기전력이 코일에서 부터 발생한다. 코일 진동에 의한 자속 변화를  $\Delta\Phi$ 로 하고, B를 자속밀도(Magnetic Flux Intensity), 코일 진동속도를 v 로 하면, 자속 변화  $\Delta\Phi$ 는

$$\Delta\Phi = \int_c B \cdot v dt \times dL \dots\dots\dots (1)$$

이며, 파라데이 법칙(Faraday's law of Induction)에 의하여 코일에서 발생하는 기전력 e 는 (이 때, 코일안에서의 자속밀도 B는 같다)

$$e = - \Delta\Phi / dt = B \cdot \int_c v \times dL \dots\dots(2)$$

이다. 코일의 반경이 R이고 코일의 모든 부분이 똑같이 진동하면서, 진동의 변위 진폭을 a , 진동의 각 주파수를  $\omega$  로 하면, (2)식의 기전력은

#### 2. 초음파 진동과 자기 측정

##### 2-1. 초음파진동을 이용한 자기 측정원리

그림 1과 같이, 초음파진동에 의하여 일정 속도

$$e = -2\pi R a B$$

가 된다. 지자계(  $B = 2.7 \times 10^{-5}$  [T] ) 에 의하여, 권선수가 1 이고 반경이 0.5cm인 코일이 진동 주파수  $f = 100$  kHz에서 진동하고 있을 때(이 때의 변위진폭은  $1\mu\text{m}$ 라고 하자), 코일에서 발생하는 지자계에 의한 유도 기전력은  $1.06\mu\text{V}$ 이다.

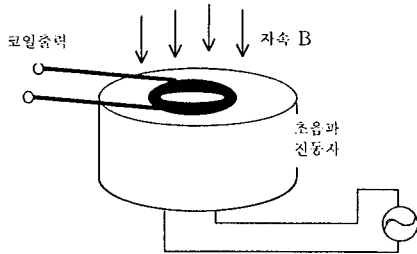


그림1. 초음파 진동을 이용한 자계측정원리  
Fig 1. Magnetic field measuring principles using the ultrasonic-vibration.

## 2-2. 검지코일

검지코일의 가장 기본이 되는 형태는 루프-안테나라고도 불리는 코일(air-cored coil)이다. 이들 유도코일을 사용하여 자계를 측정하면 선형성이 우수한 응답특성을 얻을 수 있으며, 무한대의 측정범위에서 측정가능하다는 장점을 가지어서, 코일은 ac 자계측정하기 위한 교정용으로 널리 사용되고 있다. 반면에, 고감도의 응답특성을 얻기 위해서는 코일 센서의 무게와 크기가 커진다는 단점을 가지고 있다.

검지코일의 권선법의 대표 예를 그림 2에 보이고 있다. 이들 검지코일의 내부 잠음전압  $V_N$  은 코일재료밀도와 저항도 곱의 1/2승에 비례한다.

$$V_N \propto (\nu \rho)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

이 때,  $\nu$ 는 코일 금속재료의 밀도이고(구리인 경우,  $8.9$  [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]이다),  $\rho$ 는 저항도 [ $\text{V}\cdot\text{m}/\text{A}$ ]이다. 구리선인 경우,  $(\nu \rho)^{1/2}$ 의 값은  $0.266$  [ $\text{V}\cdot\text{g}/\text{Am}^2$ ]<sup>1/2</sup>이다.

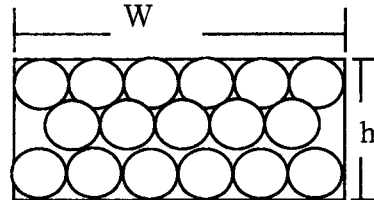


그림2. 유도 코일의 권선법  
Fig 2. Winding schemes of multilayer coil.

권선수가  $n$ 이고, 코일 평균 반경이  $R$ 인 검지코일의 개방루프 피크 출력전압  $V_o$ 는

$$V_o = 4 \pi^2 n R^2 f B \dots\dots\dots (4)$$

이다. 일반적으로 코일 감도  $S_o$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$S_o = V_o / (f \cdot B) = 4 \pi^2 n R^2 \dots\dots\dots (5)$$

또한, 코일의 DC저항  $R_{DC}$ 은

$$R_{DC} = 2 \rho n R / r^2 \dots\dots\dots (6)$$

이다. 이 때,  $r$ 은 코일 재료 금속선의 반경이다. 이 DC저항으로 인하여 발생하는 열잡음전압  $V_N$ 는 열잡음 전압 스펙트럼 밀도  $V_N / (\Delta f)^{1/2}$ 으로 나타낸다.

$$V_N / (\Delta f)^{1/2} = (4 k_B T R_{DC})^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

으로 나타낸다. 이 때,  $k_B$ 는 볼츠만 상수이고,  $T$ 는 절대온도이다.

## 2-3. 검지코일의 등가회로

저주파수인 경우에 검지코일의 출력전압은 (4)식을 사용하여 계산할 수 있다. 고주파수인 경우에 검지코일의 ac 임피던스는 그림 3에 보인 바와 같이, 인덕턴스  $L$ 과 ac저항  $R_{AC}$ 와 자기정전용량(self-capacitance)  $C$ 인 ac 콘덕턴스로 구성되어 있다.

유도코일의 인덕턴스 값은 권선의 크기와 권선수로 계산되는데,  $2R \gg W, h$ 인 다층 솔레노이드인 경우의 인덕턴스  $L$ 은

$$L = 314.8 R^2 n^2 \times 10^{-9} / (6R+9W+10h) \text{ [H]} \dots\dots\dots (8)$$

으로 근사된다. 이 때, 코일 크기 단위는 [cm]이다. AC저항은 금속선의 표피효과에 의하여 주파수가 높아질수록 코일 내에서의 손실 증가분으로 나타난다.  $R \gg r$ 인 경우에는  $R_{AC}$ 의 증가는 다만 표피효과에 의한 것이라고 가정하여도 무방하다. 코일 단자에서 본 부유정전용량 C(lumped capacitance)는 이웃하고 있는 코일층 사이에서 나타나는 분포정전용량이다. 이 부유정전용량 C는 L과 결합하여 겹치코일의 공진주파수에

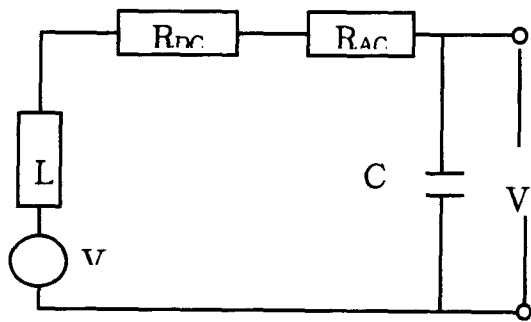


그림 3. 겹치코일의 등가회로  
fig 3. Equivalent circuit of air-cored induction coil.

가까이 가게 되면, 부유정전용량은 증가하게 된다. 이 때의 겹치코일 공진주파수는  $f_c = 1/[2\pi(LC)^{1/2}]$ 이다. 사용하고자 하는 주파수 범위 이상의 공진 주파수를 갖도록 부유정전용량으로 선정하여야 한다. 다층 솔레노이드인 경우, 부유정전용량 C는

$$C = 0.37 \epsilon_r W R / (R-r)n \quad [\text{pF}] \quad \dots\dots(9)$$

이다. 이 때, 코일 크기 단위는 [cm]이다.  $2r = 0.2$  [mm]인 에나멜구리선을 사용하여,  $2R = 11.2$  [mm],  $W = 1$  [mm],  $h = 1.4$  [mm], 권선수  $n = 40$  [Turns]인 겹치코일의 DC저항  $R_{DC}$ 는  $0.356$  [ $\Omega$ ]이고, 인덕턴스 L은  $2.78 \times 10^{-5}$  [H]이다. 에나멜 절연막의 유전율  $\epsilon_r$ 을 50으로 하여 부유정전용량을 구하여 보면,  $C = 0.563$  [pF]이다. 이들 L값과 C값을 기준으로 한 공진주파수는  $4$  [MHz]정도이다.

### 3. 실험

그림 4의 측정시스템을 구성하였다. 초음파 진동원으로는 하이드로폰(신창(주) 제작)을 사용하였고, 초음파진동자의 진동면 위에 보빈을 사용하여  $2R = 11.2$  [mm],  $W = 1$  [mm],  $h = 1.4$  [mm], 권선수  $n = 40$  [Turns]인 겹치코일 ( $2r = 0.2$  [mm]인 에나멜구리선으로 사용)을 고정하고, 겹치코일에 미치는 자속밀도를 측정하기 위하여 InSb - 홀소자 (HW200A)를 설치하였다. 각 출력단자 인출선은 초음파진동자의 진동을 억압하지 않도록 0.2mm경의 에나멜 선으로 사용하였다 (사진 1참조). 자속밀도의 소오스로는 알니코 금속계의 경자성재료를 사용하였다.

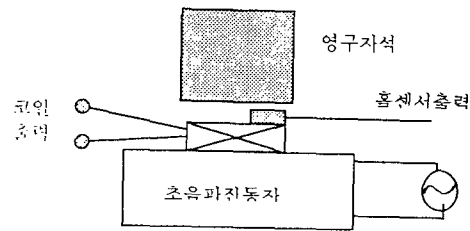


그림 4. 측정 시스템  
Fig 4. Measuring Systems

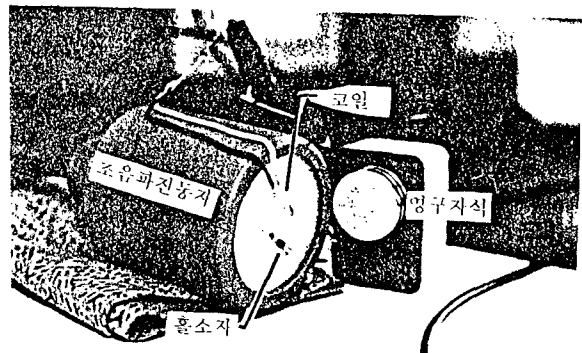


사진 1. 측정시스템의 향상  
Photo 1. Photography of measuring systems

그림 5에 구동주파수를 변화시켰을 때의 코일 출력 응답을 보이고 있다. 초음파진동자의 인가 피크 전압은 7V로 하였으며, 검출 코일에 영구자석을 가까이 고정하여 측정했다. 이 때의 홀센서의 출력은 700mV이었다. 초음파 기본 공진주파수 51 kHz에서 코일출력이 나타났고, 88.5 kHz에서 코일 출력이 가장 크게 나타났다. 초음파 진동자의 임피던스 특성은 그림 6에 보이고 있다.

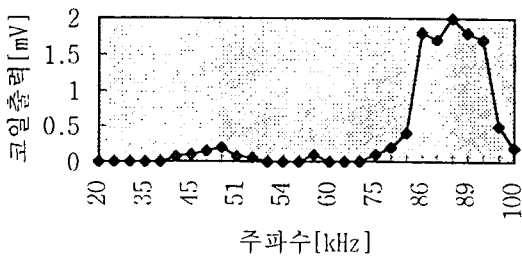


그림 5. 코일 출력-주파수특성

Fig 5. Induced voltage-frequency characteristics

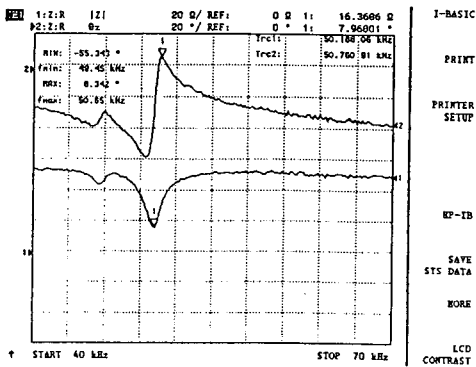
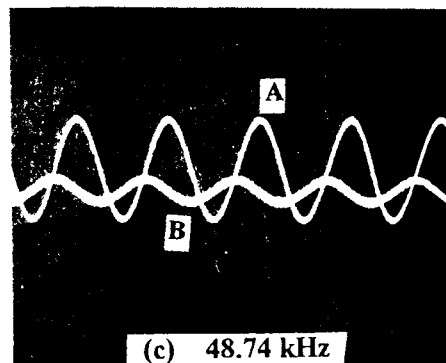
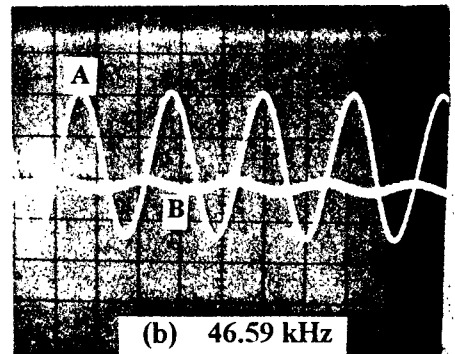
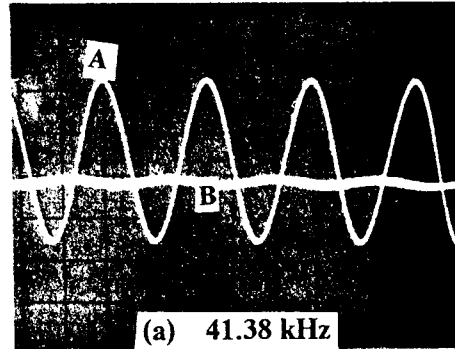


그림 6. 초음파진동자의 임피던스 특성

Fig 6. Impedance characteristic of the ultrasonic transducer

그림 7에 기본 공진주파수(50.9kHz) 부근의 주파수와 88.5 kHz 주파수로 구동했을 때의 초음파

인가 전압파형과 코일 출력파형을 보이고 있다. 이 그림 중 파형 A는 초음파진동자에 인가되는 파형(5V/div)이며, 파형 B는 코일 출력의 파형(1mV/div)이다.



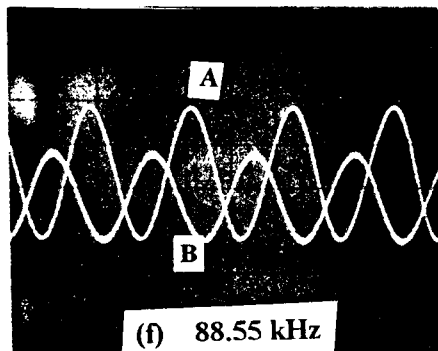
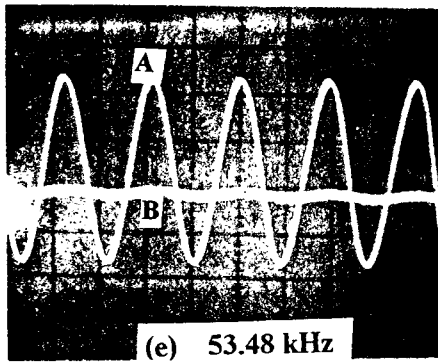
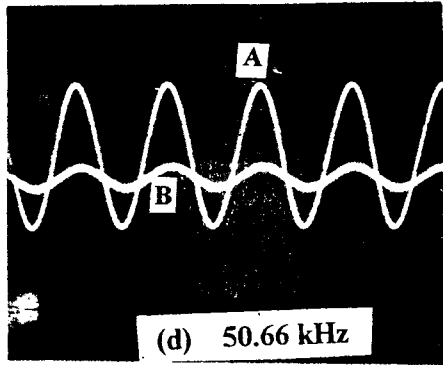


그림 7. 초음파 진동에 가해진 신호와 코일출력  
 Fig 7. Induced voltage and driving voltage of transducer

초음파진동자의 구동주파수를 89 kHz로 고정하고 영구자석을 코일에서 부터 점차 멀리 두면서, 코일에 통과하는 자속밀도를 홀센서 출력으로 측정하고 그 자속밀도에 대한 코일 출력을 측정한 결과를 그림 8에 보이고 있다.

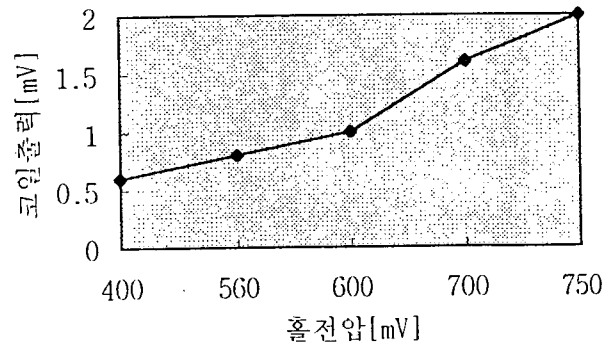


그림 8. 코일출력-자속밀도 특성

Fig 8. Induced voltage as functions of magnetic flux indensity

#### 4. 실험 결과 고찰

그림 7 (a), (b), (c), (d), (e), (f)에 있는 신호 파형 A 는 초음파 진동자에 인가되는 신호이며, 파형 B는 일정 자계 하에서의 코일 출력파형이다. 초음파진동자의 기본공진 주파수 부근에서의 코일 출력의 변화를 그림 7(a)~(e)에서 보이고 있다. 공진주파수가 공진주파수(50.5kHz)이전의 주파수에서는 초음파진동자에 인가되는 파형과 코일 출력파형에는 위상차이가 있다. 이 위상차이의 원인은 초음파 진동자의 임피던스 특성으로 변위와 인가 신호사이의 위상차이 결과이다. 공진 주파수 가까이에서 초음파진동자의 효율이 향상되므로 - 다시 말하면, 변위폭이 커지므로 코일 출력은 공진 주파수 가까이에서 가장 큰 출력을 얻는다. 초음파진동자는 기본 공진 주파수와 그외의 고차 공진 주파수에서 발진 할 수 있다. 그림 7(f)는 88kHz에서의 코일 출력 파형을 보이고 있는데 기본 공진 주파

수에서의 코일 출력보다 큰 출력이 얻어 지고 있다. 이 컷은 코일 출력은 주파수가 커짐에 따라 코일 출력은 증가하기 때문인 것으로 생각된다. 영구 자석을 사용하여 코일에 인가되는 자계를 변화하면서 코일출력의 변화를 보인 것이 그림 8이다. 자계의 세기는 홀센서의 출력값으로 기준하였다. 이 결과에서는 자계가 증가함에 따라 코일 출력은 증가하는 경향이 있으나, 선형성은 볼 수 없다. 홀센서의 출력을 오실로스코프를 사용하였다. 측정된 데이터는 각 측정범위 선택에 따라 각기 측정 오차를 가지고 있는 이유로 선형성 있는 결과를 찾아보기 어려운 것으로 생각한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 코일의 진동속도를 일정하게 유지하고, 일정자계 하에서 코일에서 발생하는 유도기전력을 측정하므로써, 자계의 세기를 측정할 수 있는 초음파방식의 자계 검출법에 대하여 그 원리적인 가능성을 실험적으로 확인 하였다.

본 연구에서는 51kHz의 기본 공진 주파수를 가지는 초음파진동자(하이드로폰)를 사용하여 코일을 일정속도로 진동하였고, 초음파진동자의 진동면 위에 보빈을 사용하여  $2R = 11.2$  [mm],  $W = 1$  [mm],  $h = 1.4$  [mm], 권선수  $n = 40$  [Turns]인 검지코일 ( $2r = 0.2$  [mm]인 에나멜구리선으로 사용)을 고정하고, 검지코일에 미치는 자속밀도를 측정하기 위하여 InSb - 홀소자(HW200A)를 설치한 측정 시스템을 사용하였다. 이 측정시스템을 사용하여 초음파진동 방식의 자계를 측정하였다. 그 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 초음파진동자의 공진주파수 부근에서 진동할 때, 코일 출력을 관찰할 수 있었다. 88kHz에서의 진동에서 검출코일의 출력 2mV을 얻었다.
2. 검출코일에 미치는 자계가 커질수록, 검출코일의 출력은 증가하였다.

3. 초음파진동을 이용한 자계측정시스템을 실험적으로 구현하였다.

## 参考文献

- (1) H. M. Frost, W.P. Mason & R.N. Thurston "Physical Acoustics", Academic Press, Vol.14, p. 185, 1979
- (2) W. Gopel, J.Hesse, J.N. Zemel, "Sensors, A Comprehensive Survey" Vol.5, pp. 206~220, 1989
- (3) Muller,W., "Numerical Calculation of Magnetic Fields Excitated by Currents and Hard Magnetic Materials", in: Proc. 9 Int. Workshop on Rare Earth Magnets and Their Appl., Bad Soden, FRG, Aug. 30., 1987.