

# 펄스 유도 방식의 금속탐지기 코일 설계

## Coil Design of Pulse Induction Metal Detector

정 병 민 · 장 유 신 · 한 승 훈

Byung-Min Jung · Yu-Shin Chang · Seung-Hoon Han

### 요 약

펄스 유도(Pulse Induction) 방식의 금속 탐지기 코일 설계에 대하여 살펴보았다. 0.3 mm, 0.5 mm, 1.0 mm의 직경을 갖는 도선과 30 cm×30 cm 및 35 cm×35 cm 크기의 유전체 탐지판을 이용하여 탐지 코일을 제작하였고, 코일 크기와 코일 감은 수 등의 파라미터 변화에 따른 코일 시정수 및 코일 전류 등의 특성을 살펴보았다. 도선의 직경, 코일 크기 및 코일 감은 수 변화에 따른 코일의 인덕턴스, 저항 및 시정수 값에 대하여 계산 결과와 측정 결과를 비교 분석하였다. 또한, 입력 펄스폭 변화에 따른 탐지 코일의 전류 변화에 대하여 계산 결과와 측정 결과를 비교 분석함으로써 펄스 유도 방식의 금속탐지기 코일 설계에 대하여 논하였다.

### Abstract

A coil design of pulse induction metal detectors has been described. The search coil was demonstrated by using the wire with the diameter of 0.3 mm, 0.5 mm and 1.0 mm and the dielectric plate with the 30 cm×30 cm and 35 cm×35 cm, the time constant and the currents of the coil as the variation of the coil size and the number of coil turns was characterized. The coil parameters like the resistance, the inductance and the time constants as the variation of the diameter of the wire, the coil size and the number of coil turns were compared and analysed through the calculation and the measurement. In addition, investigating the coil currents as the variation of the input pulse width, the coil design of pulse induction metal detectors has been discussed.

Key words: Metal Detector, Pulse-Induction, Coil Design, Time-Constant, Landmine Detector

## I. 서 론

금속탐지기는 자기장을 이용하여 금속의 유무 및 위치를 판단하는 장비이다. 금속탐지기의 송신 코일에 전류를 인가함으로써 코일로부터 자기장을 유도하고, 이렇게 유도된 자기장은 금속 표적 표면에 전류를 발생시킨다. 금속 표적 표면에 흐르는 전류는 다시 자기장을 유도하고, 수신 코일을 이용하여 금속으로부터 유도된 자기장을 탐지하는 원리를 이용한다. 금속탐지기에 관한 연구 개발은

전 세계뿐 아니라, 국내에서도 매우 활발하다<sup>[1]~[3]}</sup>. 금속 탐지기 중 지뢰 탐지 센서는 휴대용 및 차량용 등 용도에 따라 구분되고, 탐지 방식에 따라 구분되기도 한다. 일반적으로 매설 깊이가 작은 대인 지뢰는 휴대용 지뢰탐지기를 이용하여 탐지하고, 깊이 매설되어 있는 대전차 지뢰는 차량용 지뢰탐지기를 이용하여 탐지한다.

현재까지 널리 알려진 금속탐지 방식에는 비트 주파수 발진기(Beat Frequency Oscillation: BFO) 방식, 인덕션 밸런스(Induction Balance: IB) 방식<sup>[4]</sup>, 펄스 유도(Pulse Induc-

「본 연구는 방위사업청의 지원과 국방과학연구소의 관리하에 삼성탈레스 주관 핵심기술 연구개발 사업으로 수행되었음(과제번호 UC120055ID).」  
삼성탈레스 ISR · PGM 연구소(ISR · PGM R&D Center, Samsung Thales)

· Manuscript received September 4, 2014 ; Revised December 5, 2014 ; Accepted March 12, 2015. (ID No. 20140904-070)

· Corresponding Author: Byung-Min Jung (e-mail: byungmin75.jung@samsung.com)

tion: PI) 방식<sup>[5]</sup> 등이 있다. 비트 주파수 발전기 방식은 주로 작은 휴대용 금속탐지기에 사용된다. 코일로부터 금속을 탐지하면, 수신 신호에 의해 발생된 주파수와 내부 발전기에서 발생한 주파수 차이를 이용하여 금속을 탐지하는 방식이다. 인덕션 벨런스 방식은 송신코일에 교류전압을 인가하여 자기장을 발생시킨 후, 금속 표적으로부터 생성되는 자기장을 수신코일이 수신하여 표적을 탐지하는 방식이다. 수신 코일에 의해 수신되는 신호는 송신 코일에 의한 영향을 받지 않도록 차폐되어 있기 때문에, 금속 표적으로부터 유도된 자기장만을 수신한다. 펄스 유도 방식은 송신과 수신 시간차를 이용하여 금속을 탐지하는 방식이다. 송신 시간과 수신 시간이 다르기 때문에, 한 개의 모노 코일을 이용하여 금속을 탐지할 수 있는 장점을 지니고 있다. 또한, 인덕션 벨런스 방식과 달리 심코일 간의 간섭에 의한 영향이 적고 구현이 쉽다는 장점이 있기 때문에 최근에는, 펄스 유도 방식의 금속탐지기에 관한 연구가 활발하다. 삼성탈레스는 핵기술 연구개발 사업으로 금속탐지기와 다양한 센서의 결과를 융합하는 지면투과 지뢰탐지 시스템을 연구 개발 중이다(과제명 : 초광대역/중성자 복합 센서 기반 지뢰 탐지 시스템).

본 논문에서는 펄스 유도 방식의 금속탐지기 코일 설계에 관하여 논하였다. 코일 크기 및 코일 감은 수 등의 파라미터 변화에 따른 코일의 인덕턴스, 코일 저항 및 코일 전류 등의 특성을 살펴보았다. 제 II 장에서는 펄스 유도 방식의 금속탐지기에 대하여 간단히 설명하였고, 제 III 장에서는 도선의 두께, 코일 크기 및 감은 수에 따른 코일 인덕턴스, 코일 저항 및 코일 전류 등의 파라미터에 대하여 이론값과 실험값의 결과에 대하여 논하였다. 제 IV 장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 펄스 유도 방식의 금속탐지기 동작원리

그림 1은 코일 반지름이  $r_{coil}$  이고, 코일 감은 수가  $N_{coil}$  인 펄스 유도 방식 금속탐지기의 개념도를 보이는 그림이다. 펄스 유도 방식의 금속탐지기는 외부로부터 전압을 인가하여 코일에 일정한 전류가 흐르도록 하고, 펄스 파를 이용하여 코일에 흐르는 전류를 차단함으로써 코일로부터 자기장을 발생시킨다. 코일로부터 발생한 자

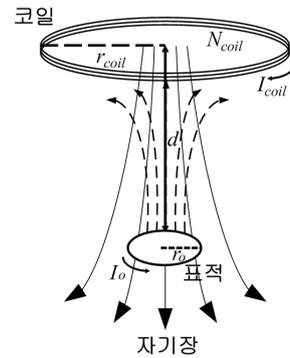


그림 1. 펄스 유도 방식의 금속탐지기 동작원리  
Fig. 1. Operation principle of the pulse induction metal detector.

기장에 의해 금속 표적에 전류를 야기하고, 금속 표적에 흐르는 전류에 의해 발생한 자기장을 수신함으로써 금속 표적의 유무를 탐지하는 원리를 이용한다.

코일로부터 발생하는 기전력은 식 (1)에서 보듯이, 코일이 감싸는 면에 흐르는 자속,  $\Phi$ 의 시간 변화율에 비례한다는 패러데이 법칙 이론에 기초하고 있다.

$$V(t) = - \frac{\partial \Phi(t)}{\partial t} \tag{1}$$

$$\Phi = \int B \cdot dS \tag{2}$$

식 (2)는 코일이 감싸는 면에 생성되는 자속을 표현하는 수식이다.

$$B_t(t)|_{z=0} = \mu_0 \frac{N_{coil} I_{coil}(t)}{2 r_{coil}} \tag{3}$$

그림 1에서와 같이, 코일 반지름이  $r_{coil}$  이고, 코일 감은 수가  $N_{coil}$  이며, 코일 전류가  $I_{coil}(t)$  일 때, 코일이 감싸는 면에 생성되는 자속 밀도  $B_t(t)$ 는 비오-사바르의 법칙으로부터 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$V_t(t) = - \frac{\partial}{\partial t} [B_t(t) \pi r_{coil}^2 + L_{coil} I_{coil}(t)] \tag{4}$$

식 (4)는 금속탐지기의 코일로부터 발생하는 유도기전력을 표현하는 수식이다. 코일을 감싸는 면에 생성된 자속과 코일 인덕턴스,  $L_{coil}$ 에 의한 자속의 합에 비례한다.

그리고 그림 1에서 보듯이, 금속 표적에 흐르는 전류는 표적 위치에서의 자기장으로부터 유도된다.

$$B_t(t)|_{z=d} = \mu_0 \frac{N_{coil} I_{coil}(t)}{2} \frac{r_{coil}^2}{(\sqrt{r_{coil}^2 + d^2})^3} \quad (5)$$

식 (5)는 코일 중심으로부터  $d$ 만큼 떨어진 위치에 야기되는 자속 밀도를 구하는 수식이다<sup>[2]</sup>.  $\mu_0$ 는 공기 중에서의 자화율이고,  $\sqrt{r_{coil}^2 + d^2}$ 은 그림 1에서 볼 수 있듯이, 코일 반지름,  $r_{coil}$ 과 코일 중심으로부터  $d$ 만큼 떨어진 거리에 의해 형성되는 직각 삼각형의 빗변이다. 식 (5)에서 볼 수 있듯이, 코일로부터  $d$ 만큼 떨어진 거리에 야기되는 자속 밀도는 송신 코일 감은 수, 코일에 흐르는 전류 및 코일 단면적에 비례하고, 송신 코일과 표적이 이루는 빗변의 3 제곱에 반비례하는 것을 알 수 있다.

$$V_o(t) = - \frac{\partial}{\partial t} [B_t(t) \pi r_o^2 + L_o I_o(t)] \quad (6)$$

식 (6)은 금속탐지기 코일로부터 발생한 자속 밀도,  $B_t(t)$ 에 의해 금속 표적에 야기되는 유도기 전력을 표현하는 수식이다. 송신 코일에 의해 코일 중심으로부터  $d$ 만큼 떨어진 위치에 발생하는 자속과 표적 인덕턴스,  $L_o$ 에 의한 자속의 합에 비례함을 알 수 있다.  $r_o$ 는 그림 1에서 보듯이, 금속 표적의 반지름이다. 표적에 흐르는 전류는 송신 코일로부터 발생한 자기장의 세기와 관계되는데, 펄스 유도 방식의 금속탐지기에서는 스위치를 이용하여 코일에 흐르는 전류를 차단함으로써 코일로부터 자기장을 발생시키고, 표적에 전류를 흐르게 한다. 코일 전류 차단 시간이  $\Delta t$ 일 때, 표적 전류,  $I_o$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_o|_{t=\Delta t} &= \frac{\pi r_o^2}{L_o} B_o - \frac{R_o}{L_o} \int_0^{\Delta t} I_o(t) dt \\ &\cong \frac{\pi r_o^2}{L_o} B_o \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)은 스위치 차단 시간,  $\Delta t$ 가 매우 작을 때, 금속 표적에 야기되는 최대 전류를 나타내는 수식이다.  $B_o$ 는  $t=0$ 일 때 표적 위치에서의 자속 밀도이다. 표적에 흐르는 최대 전류는 코일로부터  $d$ 만큼 떨어진 거리에 야기되

는 자속 밀도와 표적 단면적에 비례하고, 표적의 인덕턴스에 반비례함을 알 수 있다.

$$I_o(t) \cong \frac{\pi r_o^2}{L_o} B_o \exp\left[-\frac{t - \Delta t}{\tau_o}\right] \quad (8)$$

식 (8)은  $t > \Delta t$ 일 때, 시간에 따른 표적 전류를 나타내는 수식이다.  $\tau_o$ 는 표적의 시정수이다. 표적 전류는 시간이 지남에 따라 표적의 시정수와 관계되어 기하급수적으로 감소됨을 볼 수 있다. 이와 같이 시간에 따라 변화하는 표적 전류는 수신 자기장을 발생하게 된다.

$$B_r(t) = \mu_0 \frac{I_o(t)}{2} \frac{r_o^2}{(\sqrt{r_o^2 + d^2})^3} \quad (9)$$

식 (9)는 금속 표적에 흐르는 전류에 의해 표적 중심으로부터  $d$ 만큼 떨어진 위치에 야기되는 자속 밀도를 구하는 수식이다. 표적 전류 및 표적 단면적에 비례하고, 표적과 수신코일이 이루는 빗변의 3 제곱에 반비례하는 것을 알 수 있다.

$$V_r(t) = - \frac{\partial}{\partial t} [B_r(t) \pi r_{coil}^2 + L_{coil} I_r(t)] \quad (10)$$

식 (10)은 그림 1에서 금속 표적에 흐르는 전류로부터 발생한 자기장에 의해 수신 코일에 야기되는 수신 전압을 표현하는 수식이다.  $B_r(t)$ 는 금속 표적에 의해 발생한 자속이고,  $I_r(t)$ 는 수신 전류이다.  $L_{coil}$ 은 코일 인덕턴스이다.

$$\begin{aligned} I_r(t) &= \left[ \frac{\pi r_{coil}^2}{L_{coil}} B_r(t) - \frac{R_{coil}}{L_{coil}} \int_{\Delta t}^{\infty} I_r(t) dt \right] \\ &\cdot \left[ \exp\left(-\frac{t - \Delta t}{\tau_c}\right) \right] \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)은  $t > \Delta t$ 일 때, 수신 코일에 흐르는 수신 전류를 구하는 수식이다. 금속 표적에 흐르는 전류의 시간 변화에 의한 감소로부터 발생하는 수신 기전력은 표적으로부터  $d$ 만큼 떨어진 거리에 야기되는 자속 밀도와 수신 코일 단면적이 증가함에 따라 증가하고, 수신 코일의 인덕턴스에 반비례함을 알 수 있다. 또한, 수신 전류는 시간이 지남에 따라 수신 코일의 시정수와 관계되어 기하급

수적으로 감소됨을 볼 수 있다.

$$\tau_c = \frac{L_{coil}}{R_{coil}} \tag{12}$$

$\tau_c$ 는 코일의 시정수인데, 식 (12)에서와 같이 코일의 인덕턴스,  $L_{coil}$ 와 코일 저항,  $R_{coil}$ 의 비를 이용하여 구할 수 있다. 펄스 유도 방식의 금속탐지기는 식 (10)과 (11)에서와 같은 수신 전압과 전류를 이용하여 표적의 유무를 판단하게 된다.

그림 2는 펄스 유도 방식 금속탐지기의 회로 개념도를 보이는 그림이다. 외부로부터 전압을 인가하여 코일에 일정한 전류가 흐르도록 하고, 스위치와 연결된 펄스 파를 이용하여 코일에 흐르는 전류를 생성하고 차단함으로써 코일로부터 자기장을 발생시킨다.

$$I_{coil}(t) = \frac{V_{cc}}{R_{coil}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\tau_P}{\tau_c}t\right) \right] \tag{13}$$

식 (13)은 그림 2의 펄스 유도 방식의 금속탐지기 회로 구성도에서 코일에 흐르는 전류를 구하는 수식이다. 코일에 흐르는 전류는 입력전압,  $V_{cc}$ 에 비례하고, 코일 저항,  $R_{coil}$ 에 반비례한다. 이 때 코일 저항은 도선의 종류, 도선의 두께 및 도선 길이를 이용하여 구할 수 있다. 그리고  $\tau_P$ 는 그림 2에서 스위치를 연결하고, 차단하는 신호의 펄스폭이다. 스위치를 연결하면 코일에 전류가 충전되고, 차단하면 전류가 방전되며 기전력을 일으킨다.

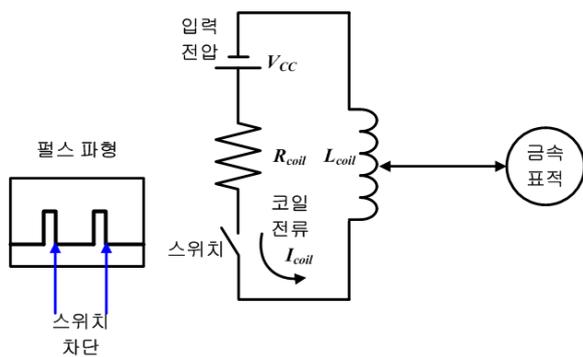


그림 2. 펄스 유도 방식 금속탐지기 회로 개념도  
Fig. 2. Schematic diagram of the pulse induction metal detector circuit.

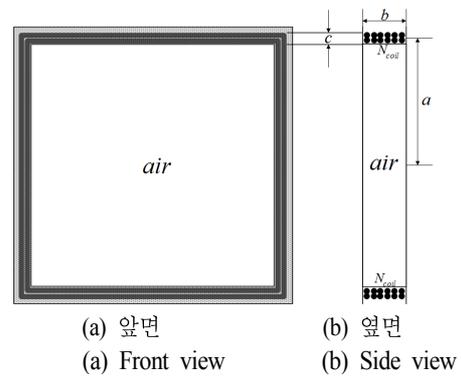


그림 3. 정사각 탐지코일  
Fig. 3. The square coil.

### III. 실험 및 토의

그림 3은 금속탐지기 연구 개발을 위해 제작한 탐지 코일 구성도이고, 정사각 탐지코일의 앞면과 옆면을 보이는 그림이다. 유전체로 이루어진 정사각 탐지 판을 제작하고 도선을 감음으로써 탐지코일을 구현하였다. 탐지코일 한 변의 길이는  $2a$ 이고, 탐지코일 길이는  $b$ 이며, 코일 두께는  $c$ 이다. 그리고 도선 단면적과 코일 감은 수의 변화에 따른 코일 저항 및 코일 인덕턴스 등 탐지코일 특성을 살펴보았다. 고유저항값이  $0.01785 \text{ } [\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$ 이고, 직경이 각각  $0.3 \text{ mm}$ ,  $0.5 \text{ mm}$ ,  $1.0 \text{ mm}$ 인 도선을 이용하여 코일을 구현하였고, 계측기를 통해 탐지코일의 저항과 인덕턴스를 측정하였다.

그림 4는 원형 코일과 정사각 코일에 흐르는 전류를 이용하여 코일 중심에서의 자속밀도를 계산하는 수식을 설명하는 그림이다. 두 가지 경우, 모두 비오-사바르의 법칙으로부터 유도할 수 있다. 원형 코일의 지름과 정사각 코일 한 변의 길이가 동일할 경우, 코일 중심에서의 자속 밀도의 세기는 원형 코일이 크고, 코일 면적은 정사각 코일이 큰 것을 알 수 있다<sup>6)</sup>. 그러나 그 차이는 크지 않음을 알 수 있다.

본 논문의 실험에서는 정사각 코일을 이용하여 도선의 단면적, 코일 크기, 코일 감은 수의 변화에 따른 탐지 코일의 특성을 살펴보았다.

그림 5는 LCR 측정기를 사용하여 그림 3에서 제작한 탐지코일에 대하여 도선 단면적과 코일 감은 수 변화에

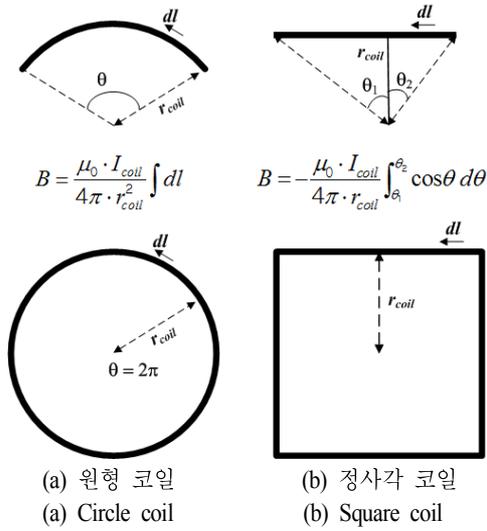


그림 4. 코일에 흐르는 전류에 의한 자속 밀도 비교  
Fig. 4. Comparison of the magnetic flux density generated by the current.

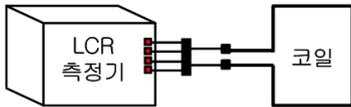


그림 5. 코일 저항 및 인덕턴스 측정 방법  
Fig. 5. Measurement method of coil resistance and inductance.

따른 코일 저항 및 코일 인덕턴스 등을 측정하는 방법을 보이는 그림이다. 코일의 두 끝 단을 LCR 측정기의 프로브에 연결하여 측정하였다. 이 때, LCR 측정기에 사용하 주파수는 저주파수 대역인 100 kHz이다.

$$R_{coil} = \eta_{wire} \frac{l_{wire}}{A_{wire}} \quad (14)$$

식 (14)는 코일 저항을 구하는 수식이다. 코일 저항은 고유저항,  $\eta_{wire}$ , 과 도선의 길이,  $l_{wire}$  에 비례하고 도선의 단면적,  $A_{wire}$  에 반비례하는 것을 알 수 있다. 도선의 길이는 코일 한 변의 길이와 코일 감은 수의 곱으로 계산할 수 있다.

$$L_{coil} = 0.8 \frac{a^2 N_{coil}^2}{6a + 9b + 10c} \quad (15)$$

식 (15)는 참고문헌 [6]의 다중으로 감은 코일에 대한 인덕턴스를 계산하는 Wheeler's formula를 나타내는 수식이다. 코일 인덕턴스는 코일 감은 수,  $N_{coil}$  제곱에 비례하고, 코일의 구조 파라미터와 관계하는 것을 알 수 있다.

그림 6은 그림 3에서의 한 변의 길이가 30 cm인 정사각 코일에 대하여 코일 감은 수 및 도선의 직경에 따른 코일 저항과 인덕턴스의 계산 결과와 측정 결과를 비교한 것이다. 도선은 직경이 (a) 0.3 mm, (b) 0.5 mm, (c) 1.0 mm인 도선을 이용하였다. 코일 저항은 식 (14)에서 보듯

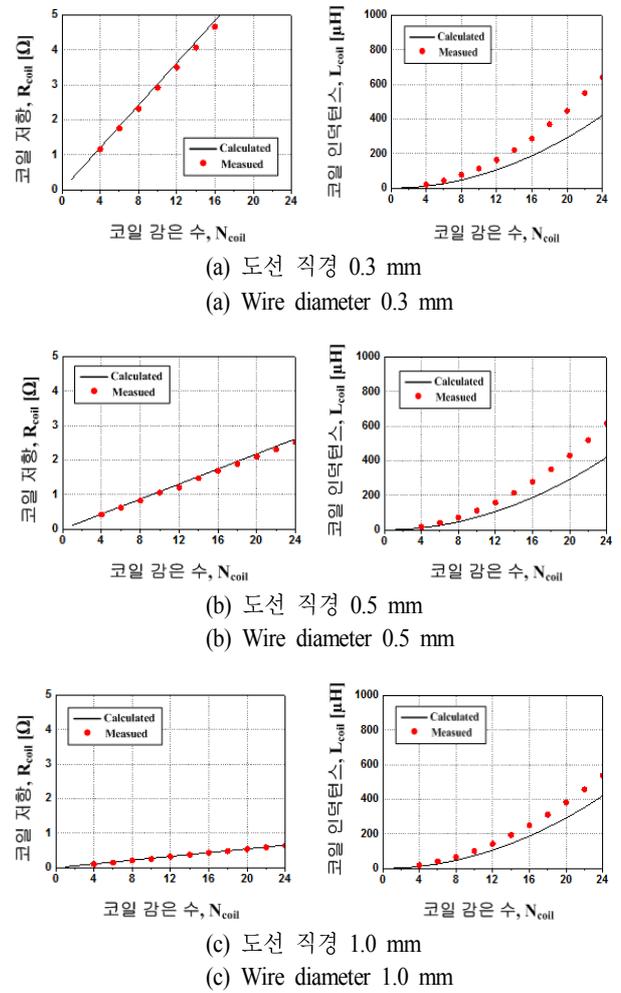


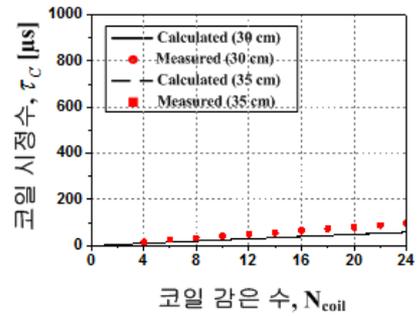
그림 6. 코일 감은 수 및 도선 직경에 따른 코일 저항 및 인덕턴스

Fig. 6. Coil resistance and inductance as the number of coil turns and the wire diameter.

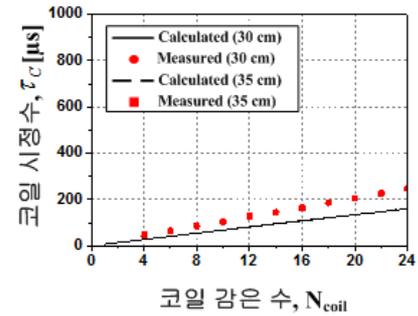
이, 코일 감은 수가 증가함에 따라 도선의 길이가 증가하기 때문에 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있고, 도선 직경이 증가함에 따라 도선의 단면적이 증가하기 때문에 감소하는 것을 볼 수 있다. 그리고 코일 인덕턴스는 식 (15)에서 보듯이, 코일 감은 수가 증가할수록 감은 수 제곱에 비례하여 증가하고, 도선 직경이 증가함에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다. 코일 인덕턴스의 경우, 계산과 측정 결과의 차이가 약 20~50 % 정도 발생하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 코일 인덕턴스 계산에 사용한 식 (15)의 Wheeler's formula는 원형 코일에 대한 것이고, 주파수 특성을 반영하지 못하기 때문이다. 반면, 측정 결과는 정사각 코일에 대한 것이고, LCR 측정기로 측정되는 인덕턴스의 경우, 임피던스의 허수부인 리액턴스와 사용 주파수(100 kHz)의 비로 계산되기 때문이다. 그러나 코일 감은 수 및 도선 직경 등에 따라 인덕턴스의 변화 특성을 볼 수 있기 때문에 코일 설계에 반영할 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 본 논문의 코일 구조는 파장에 비해 해석하고자 하는 크기가 매우 작기 때문에, 상대적으로 저주파에서 동작하는 구조이므로 DC에서 계산된 값으로도 시 영역 해석이 가능하다.

그림 7은 한 변의 길이가 30 cm와 35 cm인 정사각 코일에 대하여 코일 감은 수와 도선 직경 (a) 0.3 mm, (b) 0.5 mm, (c) 1.0 mm 변화에 따른 코일 시정수의 계산 결과와 측정 결과를 비교한 것이다. 코일 시정수는 코일 감은 수와 도선의 단면적이 증가함에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 코일 크기와는 관계가 크지 않음을 알 수 있었다. 계산과 측정 결과의 차이가 발생하는 이유는 코일 시정수는 인덕턴스와 저항의 비로 계산되는데, 앞에서 설명하였듯이 코일 인덕턴스 계산에 사용된 수식이 주파수 특성을 반영하지 못하기 때문이다. 그러나 감은 수 및 도선 단면적에 따른 코일 시정수의 특성을 살펴볼 수 있음을 알 수 있었다.

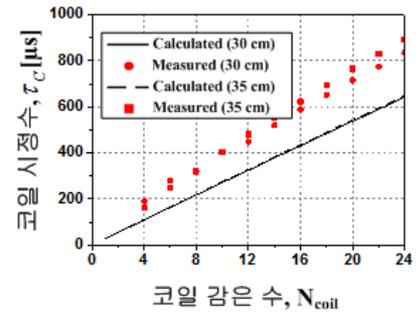
표 1은 그림 2의 펄스 유도 방식의 금속탐지기 구성도에서 입력 펄스폭,  $\tau_p$ 에 따른 코일 전류,  $I_{coil}$ 의 계산 결과와 측정 결과이다. 입력 펄스의 경우, 펄스 반복 주기 (Pulse Repetition Interval: PRI)는 1,000  $\mu s$ 인 펄스를 사용하였고, 펄스폭이 각각 300  $\mu s$ , 500  $\mu s$ , 700  $\mu s$ 일 때, 코일에 충전되는 코일 전류에 대하여 계산 결과와 측정 결



(a) 도선 직경 0.3 mm  
(a) Wire diameter 0.3 mm



(b) 도선 직경 0.5 mm  
(b) Wire diameter 0.5 mm



(c) 도선 직경 1.0 mm  
(c) Wire diameter 1.0 mm

그림 7. 한 변의 길이가 30 cm와 35 cm인 정사각 코일에 대하여 코일 감은 수 및 도선 직경  
Fig. 7. Time constants of the coil as the number of coil turns and the wire diameter for the square coil with 30 cm and 35 cm side lengths.

과를 비교하였다. 코일은 한 변의 길이가 30 cm인 정사각 코일에 대하여 직경이 0.5 mm인 도선을 이용하여 20회 감은 코일을 사용하였다. 이 때, 코일 저항과 시정수의 측정값은 각각 2.1  $\Omega$ 과 204.7  $\mu s$ 인 것을 알 수 있다. 코일

표 1. 입력 펄스 폭에 따른 코일 전류  
Table 1. Coil currents as the pulse width.

펄스 폭	코일 전류	
	계산	측정
300 $\mu$ s	4.4 A	4.1 A
500 $\mu$ s	5.2 A	4.4 A
700 $\mu$ s	5.5 A	4.4 A

입력 전압이 12 V일 때, 식 (13)을 이용한 계산 결과와 그림 2와 같은 회로를 구성한 실험에서의 측정 결과를 통하여 코일 전류를 비교하였다. 입력 펄스폭이 각각 300  $\mu$ s, 500  $\mu$ s, 700  $\mu$ s일 때, 계산에서는 4.4 A, 5.2 A, 5.5 A의 코일 전류 충전 결과를 얻을 수 있었고, 측정에서는 각각 4.1 A, 4.4 A, 4.4 A의 결과를 얻을 수 있었다. 계산 결과와 측정 결과가 매우 유사한 것을 볼 수 있었다.

식 (13)과 표 1에서 볼 수 있듯이, 펄스 유도 방식의 금속탐지기에서는 입력 펄스폭이 증가함에 따라 코일에 충전되는 전류량이 증가함을 알 수 있었다. 수식을 통하여 코일 전류를 70 % 충전한 후 방전시키기 위해서는 펄스폭을 코일 시정수의 1.2 배로 입력해 주어야 하고, 80 % 충전한 후 방전하기 위해서는 1.6 배, 90 %는 2.3 배 입력해 주어야 함을 알 수 있었다. 100 % 충전 후 방전시키기 위해서는 약 5배 이상 입력해 주어야 함을 알 수 있었다.

펄스 유도 방식의 금속탐지기로부터 송수신되는 신호는 탐지 코일의 코일 전류와 코일 감은 수 등의 파라미터와 관계되는 것을 알 수 있었고, 이와 같은 파라미터는 도선의 길이에 비례하고, 단면적에 반비례하는 코일 저항, 코일 감은 수와 구조 파라미터와 관계되는 코일 인덕턴스, 코일 인덕턴스와 저항의 비로 계산되는 코일 시정수 및 코일 시정수에 따른 펄스폭 등과 같은 파라미터를 고려함으로써 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 향후에는 이와 같은 금속탐지기 코일 설계 방법을 바탕으로 금속의 종류를 구분할 수 있는 연구를 진행할 예정이다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 펄스 유도 방식의 금속 탐지기 코일 설계에 대하여 살펴보았다. 펄스 유도 방식의 금속탐지기로부터 송수신되는 신호는 탐지 코일의 코일 전류, 코일 크

기 및 코일 감은 수 등의 파라미터와 관계되는 것을 알 수 있었고, 이와 같은 파라미터는 코일 저항, 코일 인덕턴스, 코일 시정수 및 입력 펄스폭 등을 고려하여야 함을 알 수 있었다. 도선의 단면적, 도선 길이 및 코일 감은 수 등의 변화에 따른 코일 저항, 코일 인덕턴스, 코일 시정수 등의 파라미터에 대하여 실험을 통하여 특성을 비교 분석하였다. 또한, 입력 펄스폭 변화에 따른 코일 전류 변화에 대해서도 계산 결과와 측정 결과를 비교 분석하였다.

#### References

- [1] Y. Das, J. E. McFee, J. Toews, and G. C. Stuart, "Analysis of an electromagnetic induction detector for real-time location of buried objects", *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 28, no. 3, pp. 278-288, May 1990.
- [2] Claudio Bruschini, "A multidisciplinary analysis of frequency domain metal detectors for humanitarian demining", *Thesis of Ph.D Degree, Brussel University*, 2002.
- [3] Waymond R. Scott, "Broadband array of electromagnetic induction sensors for detecting buried landmines", *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, vol. 2, 2008.
- [4] Waymond R. Scott, Michael Malluck, "New cancellation technique for electromagnetic induction sensors", *Proc. of SPIE*, vol. 5794, 2005.
- [5] Carl V. Nelson et al., "Wide bandwidth time-domain electromagnetic sensor for metal target classification", *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 6, pp. 1129-1138, Jun. 2001.
- [6] Martin Misakian, "Equations for the magnetic field produced by one or more rectangular loops of wire in the same plane", *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technoloty*, vol. 105, no. 4, pp. 557-564, Jul. 2000.
- [7] Harold A. Wheeler, "Simple inductance formulas for radio coils", *Proc. of the Institute of Radio Engineers*, vol. 16, pp. 1398-1400, 1928.

정 병 민



2000년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)  
2002년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)  
2007년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학박사)  
2007년 10월~2009년 2월: University of

Ottawa, Research Fellow

2009년 2월~2010년 8월: 광주과학기술원 연구교수

2010년 9월~현재: 삼성탈레스(주) 전문연구원

[주 관심분야] 능동 위상배열 레이더 시스템, 금속탐지기 시스템

한 승 훈



1999년 8월: 경희대학교 전자공학과 (공학사)  
2001년 8월: 경희대학교 전자공학과 (공학석사)  
2001년 6월~현재: 삼성탈레스(주) 전문연구원  
[주 관심분야] 레이더시스템 구조설계

장 유 신



1996년 2월: 부산대학교 제어기계공학과 (공학사)  
1998년 2월: 부산대학교 정밀기계공학과 (공학석사)  
2006년 8월: 부산대학교 지능기계공학과 (공학박사)  
2006년 7월~현재: 삼성탈레스(주) 수석연

구원

[주 관심분야] 레이더 서보구동제어시스템, 지뢰탐지실험플랫폼시스템, 시스템규명, Robust 제어, Adaptive 제어