

논문 2010-47SC-2-1

# Air-cored induction 코일 센서의 실험 기반 고주파 특성 모델링에 대한 연구

(Empirical Characterization of an Air-cored Induction Coil Sensor using  
Constructional Parameters)

임 한 상\*, 김 인 주\*\*

(Hansang Lim and Injoo Kim)

## 요 약

본 논문은 air-cored induction 코일 센서의 고주파 동작 특성에 대한 실험적 관계식을 제시한다. Air-cored induction 코일 센서는 입, 출력 간 선형성이 좋고 저주파 영역에서 정확한 출력 특성 예측이 가능해서 널리 사용되지만 민감도가 낮다는 단점이 있다. 반면, 고주파 영역에서는 코일 센서 구성상의 기생 효과로 인해 민감도가 크게 향상되지만 인가되는 자기장 주파수에 대한 출력 민감도의 의존성으로 인해 사용이 제한되어 왔다. 그러나 최근 고정된 주파수의 자기장을 대상으로 하는 비파괴 자기 검사법에서 검사 성능을 향상시키기 위하여 이와 같은 코일 센서의 고주파 특성을 이용하기 시작하였는데 코일 센서를 고주파 영역에서 사용하기 위해서는 고주파 영역에서의 센서 특성에 대한 예측이 요구된다. 본 논문에서는 다양한 코일 센서의 구성 조건하에서 코일 센서의 주파수 응답 특성을 측정하고 이 측정 결과를 기반으로 하여, 민감도가 최대가 되는 공진 주파수와 최대 민감도를 코일 센서 단면의 지름, 권선 지름, 그리고 권선 수와 같은 구성 파라미터의 함수식으로 근사하였다. 함수식은 실험결과를 잘 반영하며, 추론된 함수식으로부터 원하는 사양을 가지는 코일 센서의 구성 방안 및 관련 회로 설계 사양을 얻을 수 있다.

## Abstract

This paper presents empirical equations indicating the high frequency performance characteristics of air-cored induction coil sensors with their constructional parameters. An air-cored induction coil sensor is widely used due to good linearity at low frequency ranges but the sensor has weakness of relatively low sensitivity to the magnetic field. At high frequency ranges, the sensitivity can be dramatically increased, largely depending on the frequency of the injected field, and this property can be a great asset to some electromagnetic inspections, since they utilize the interrogating current with a fixed frequency. The application of this property of the coil sensor requires the estimation of its high frequency performance. We made experiments on the frequency responses of the coil sensors under diverse constructional conditions and, on the basis of the experimental results, the high frequency performance, such as the resonant frequency and the sensitivity at the frequency, was estimated, as a function of the constructional parameters of the coil sensor. The good agreements between experimental and estimated data were reported.

**Keywords :** empirical characterization, air-cored induction coil, high frequency performance.

## I. 서 론

\* 정회원, 광운대학교 전자융합공학과  
(Department of Electronics Convergence  
Engineering, Kwangwoon University)

\*\* 정회원, 삼성전자 DMC 연구소  
(Samsung Electronics Co., LTD)

접수일자: 2009년7월2일, 수정완료일: 2010년3월1일

Air-cored induction 코일 센서는 입력 자기장과 출력 전압 사이의 선형성이 좋고 저주파 영역에서는 측정된 출력 전압으로부터 입력 자기장의 세기를 정확히 계

산할 수 있다는 장점을 가진다<sup>[1]</sup>. 이와 같은 특성으로 인해, 전류 프로브 등의 각종 계측 기기와 ECP (electric current perturbation)<sup>[2~4]</sup>나 와전류(eddy current) 탐사<sup>[5]</sup>와 같은 비파괴 자기 검사법에 널리 사용되고 있다. Air-cored induction 코일 센서의 가장 큰 단점은 상대적으로 민감도가 낮다는 점이다.

반면, 고주파수 영역에서는 센서 구성상의 기생 성분들로 인한 공진 특성에 의해 민감도가 급격히 증가하지만, 공진 영역에서의 민감도가 입력 자기장의 주파수에 크게 의존하여 범용 계측 기기에서는 사용이 제한되어 왔다. 그러나 ECP(electric current perturbation)와 같은 자기 검사법에서는 고정된 주파수의 검사 전류와 자기장을 이용하므로, 이와 같은 고주파 특성을 사용하여 검사 민감도와 측정 상의 공간 해상도를 향상시킬 수 있다<sup>[6]</sup>.

코일 센서를 고주파 영역에서 사용하기 위해서는, 코일 센서의 고주파 특성 예측을 위한 모델이 요구된다. 하지만, 앞에서 언급한 것처럼 주파수 의존도로 인한 제한으로, 코일 센서에 관련한 연구는 주로 코일 센서 구성의 기생 성분 및 저주파 영역에서의 특성 분석에 대해 주로 이루어져 왔다<sup>[1,7]</sup>. 그러나 기생 성분들에 대한 근사 모델들을 이용하여 공진 특성을 예측하기에는 모델들의 오차가 누적되어 예측의 정확도가 떨어진다는 문제가 있다.

그래서, 본 논문에서는 코일 센서의 주파수 특성을 실험하고, 그 실험 결과로부터 직접 코일 센서의 고주파 특성을 모델링하였다. 코일 센서 단면의 지름, 권선의 지름, 그리고 권선 수와 같이 다양한 센서 구성 조건 하에서 air-cored induction 코일 센서의 주파수 응답 특성을 측정하였다. 그리고 측정 결과를 기반으로, 공진 주파수와 공진 주파수에서의 센서 출력과 같은 공진 영역에서의 고주파 특성을 코일 센서의 구성 조건에 대한 근사식으로 모델링하였다. 이와 같은 고주파 특성 모델은 자기 검사법에서 필요한 사양의 코일 센서 구성 예측 및 실제 제작에 도움이 될 것이다.

II 장에서는 air-cored induction 코일 센서의 주파수에 따른 특성을 살펴본다. III 장에서는 다양한 구성 조건 하에서 코일 센서의 주파수 응답 특성을 측정하고 이로부터 공진 특성을 모델링한 후 IV 장에서 결론을 제시한다.

## II. Air-cored Induction 코일 센서

Air-cored induction 코일 센서는 페리데이의 유도법칙에 기반하여 센서의 출력 전압이 입력 자기장의 변화율에 비례하는 성질을 가지며 코일이 자기장을 측정할 수 있는 능력을 정확하게 예측할 수 있다는 장점을 가진다. 그에 비해, 민감도와 센서 크기 간에 양의 상관관계가 있어서 높은 민감도를 가지는 코일 센서는 그 크기가 커지고 크기가 커지면 균일하지 않은 자기장에 대해서 측정의 공간 해상도가 떨어진다는 단점이 있다.

코일 센서 단면의 지름이  $D$ , 권선의 지름이  $d$ , 권선 수가  $n$ 회라고 할 때, 각속도가  $\omega (= 2\pi f)$ 이고 세기가  $H$ 인 정현파 특성을 가지는 입력 자기장에 대한 코일 센서의 출력 전압  $V_o$ 는

$$V_o = \frac{\pi^2}{2} n D^2 \mu_0 f H \tag{1}$$

이 되고 민감도  $S_o$ 는

$$S_o = \frac{V_o}{fH} = \frac{\pi^2}{2} n D^2 \mu_0 \tag{2}$$

이 된다. 그러므로 입력 자기장의 주파수가 증가하면 출력 전압도 선형적으로 증가하는 특성을 가진다.

그러나 식 (1), (2)에 의한 코일 센서 특성의 예측은 입력 자기장이 저주파 영역인 경우로 제한된다. 자기장의 주파수가 증가하면 코일 센서를 구성하는 권선 내부 및 권선 간의 기생 성분들의 영향이 나타나기 시작하며 그 영향은 그림 1과 같이 저항 성분  $R_{AC}$ ,  $R_{DC}$ 와 인덕턴스  $L$ , 커패시턴스  $C$  성분을 포함하는 등가 모델로 나타낼 수 있다<sup>[1]</sup>.

그림 1에서  $V_o$ 는 식 (1)에 의해 유도되는 저주파 영역에서의 출력 전압을 나타내고,  $R_{AC}$ 는 주파수가 증가

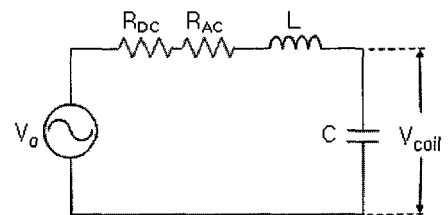


그림 1. Air-cored induction 코일 센서의 고주파 영역 등가 모델

Fig. 1. Equivalent circuit of an air-cored induction coil sensor.

함에 따라 표면 효과(skin effect)와 근접 효과(proximity effect)에 의해 증가하는 손실을 나타낸다. L은 권선의 길이로 인한 인덕턴스 성분으로, 권선 수와 권선을 감는 구조에 의해 영향을 받는다. C는 인접한 권선 및 층간에 분포한 커패시턴스로, 다양한 요소들에 의해 영향을 받아서 일반적인 모델 식을 유도하기는 어렵다.

코일 센서의 고주파 영역에서의 출력 전압  $V_{coil}$ 을 정리하면

$$V_{coil} = V_o \frac{1/(j\omega C)}{R_{DC} + R_{AC} + j\omega L + 1/(j\omega C)} \quad (3)$$

이 된다. 식 (3)으로부터 코일 센서가 L과 C의 영향으로 주파수  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 에서 공진하며 공진 주파수에서의 출력 전압은 저주파 영역에서의 출력 대비  $\frac{\sqrt{L/C}}{R_{AC} + R_{DC}}$  배가 됨을 알 수 있다.

그림 2는 이와 같은 코일 센서의 주파수 응답 특성을 나타낸 것으로 입력 자기장의 크기는 고정하고 주파수만 변경하면서 측정한 결과이다. 그림 2에서 가로 축은 주파수이고, 세로 축은 코일 센서의 출력 전압( $V_{coil}$ )이다. 그림에서 11MHz 주변에서 공진 특성을 보이며, 공진 영역에서는 동일한 크기의 입력 자기장에 대해 저주파 영역 대비 수십 배 이상의 출력 전압을 가지는 것을 알 수 있다. 그러나 공진 영역 주변에서 출력 전압의 주파수 의존성으로 인해, 범용적으로 사용 시 코일 센서는 그 영향을 무시할 수 있도록, 공진 주파수의 약

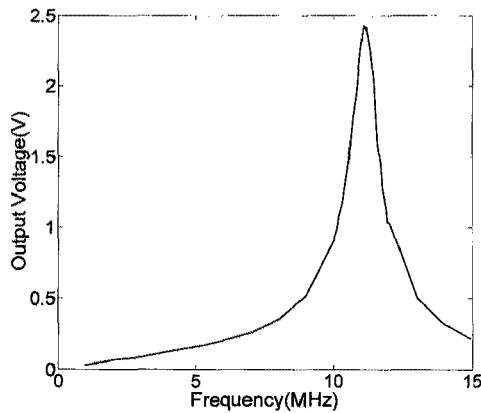


그림 2. Air-cored induction 코일 센서의 주파수 응답 특성

Fig. 2. Frequency response of an air-cored induction coil sensor.

1/10 이하의 주파수 영역에서 사용한다.

그에 비해 ECP나 와전류 탐사와 같은 자기 검사법에서는 고정된 주파수를 가지는 탐사 전류를 사용하므로 측정하는 자기장의 주파수도 고정된다. 공진 영역에서도 입력 자기장의 세기에 대한 출력 전압의 선형성은 유지되며 고정된 주파수의 자기장을 사용하여 주파수 의존성에 영향을 받지 않으므로 이와 같은 공진 특성을 적용하여 자기 검사법의 민감도를 향상시킬 수 있다.

또한, 민감도를 동일하게 유지하는 경우에는, 필요한 코일 센서의 크기가 크게 감소하므로 검사의 공간 해상도가 향상되어 전체적으로 검사 성능을 향상시킬 수 있게 된다.

이와 같은 코일 센서의 고주파 특성을 효과적으로 이용하기 위해서는 주어진 코일 센서 구성 조건(코일 센서 단면, 권선 지름, 권선 수)에서의 공진 영역 특성이나 원하는 사양을 가지는 코일 센서의 구성 조건을 예측할 수 있는 이들 사이의 관계식이 요구된다.

### III. 코일 센서 고주파 특성의 실험적 모델링

본 장에서는 다양한 구성 조건을 가지는 air-cored induction 코일 센서들의 주파수 응답 특성을 측정하고 이 측정 결과로부터 가장 중요한 고주파 특성인 공진 주파수 및 공진 주파수에서의 출력 전압에 대한 실험적 관계를 모델링한다.

#### 1. 주파수 응답 측정

코일 센서의 공진 영역 특성은  $R_{AC}$ , L, C와 같은 기생 성분에 의해 결정되며 이 기생 성분들은 코일 센서의 단면  $D$ , 권선의 지름  $d$ , 권선 수  $n$ 과 같은 구성 조건들에 의해 결정된다. 그러므로 코일 센서의 범용적인 구성 조건 범위 내에서 다양한  $D$ ,  $d$ ,  $n$ 을 가지는 air-cored induction 코일 센서들을 제작하고 이 센서들의 주파수 응답 특성을 측정하였다. 측정한 코일 센서들의 구성 조건들은

- 코일 센서 지름  $D = 3.6, 5.9, 10.2, 18.2$  (mm)
- 권선 지름  $d = 0.15, 0.25, 0.35, 0.45$  (mm)
- 권선 수  $n = 10, 20, 30, 40, 60$  (회)

로, 구성 조건 간  $d \ll D, 0.05D < n \cdot d < 7.5D$ 의 관계를 가진다.

그리고 코일 센서 제작 시 권선 층은 single layer를

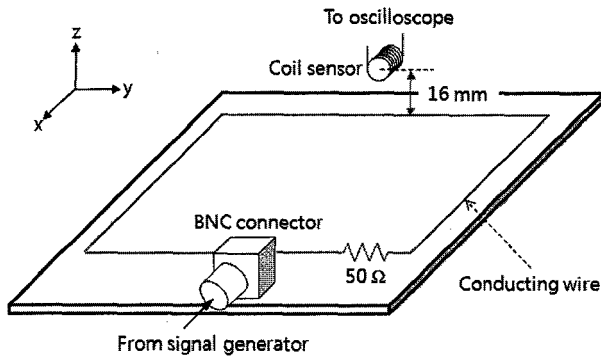


그림 3. 주파수 응답 특성 실험 구성  
Fig. 3. Experimental setup for frequency response measurements.

대상으로 하였다. 이는 single layer의 경우, magnetic stray effect에 의해 주파수에 따른 커패시턴스 변화의 영향으로 C 성분의 추정에 오차가 커서 개별 기생 성분 모델을 통한 고주파 특성 예측이 어려우면서도 권선을 감는 방식에 의한 영향이 상대적으로 적기 때문이다.

그림 3은 코일 센서의 주파수 응답 특성 측정을 위한 실험 구성을 보여준다. BNC 커넥터를 통해 도선에 고정된 크기를 가지는 정현파를, 주파수를 변경하면서 인가하고 오실로스코프를 사용하여 코일 센서의 출력 전압을 측정한다. 1 MHz의 해상도를 가지고 정현파 주파수를 변경하면서 출력 전압을 측정하고 출력 전압의 차이가 일정 수준 이상인 주파수 영역에서는 측정 주파수 간격을 100 kHz로 줄여서 측정하였다. 그리고 출력 전압이 가장 큰 주파수 영역에서는 다시 측정 주파수 간격을 10 kHz로 하여 세밀하게 측정하였다.

그림 3에서 보여지는 것처럼 측정되는 자기장이 최대가 되도록 코일 센서의 원형 단면을 x축에 수직이 되도록 위치하였다. 코일 센서의 단면과 수직으로 위치한 두 도선에 흐르는 전류에 의한 자기장은 크기가 서로 같고 방향이 서로 반대이므로 상쇄되어 영향을 주지 않는다. BNC 커넥터 쪽 도선은 이 도선을 통해 흐르는 전류에 의해 유도되는 자기장의 영향은 무시할 수 있도록 코일 센서로부터 충분히 떨어져 위치하였다.

그리고 주파수에 따른 도선 임피던스 변화의 영향을 제거하고 정현파를 공급하는 함수 발생기와 임피던스 정합을 위하여, 정현파를 인가하는 도선은 50Ω 저항으로 터미네이션 하였다. z축 상에서 도선으로부터 코일 센서 중심까지의 높이는 16mm로 고정하였다. 코일 센서의 중심에서 예상되는 자기장 세기 H의 크기는 약  $3.143 \times 10^{-2}$  (A/m)이다.

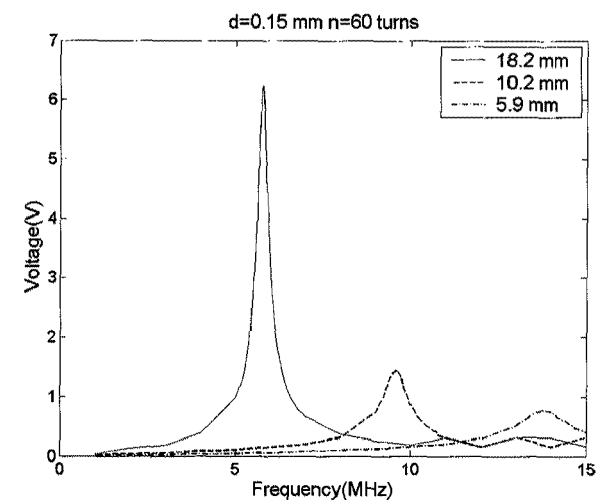
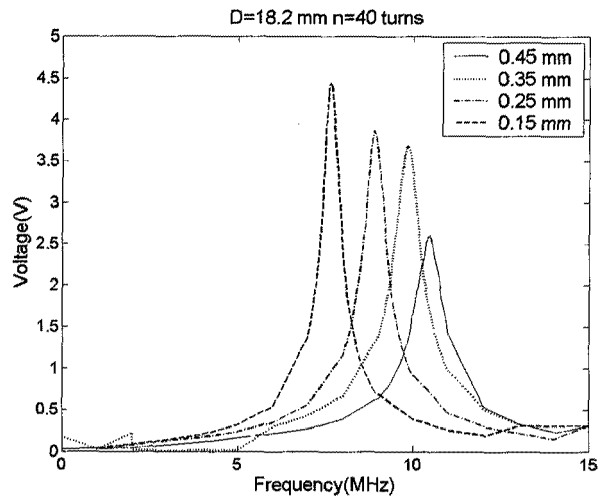
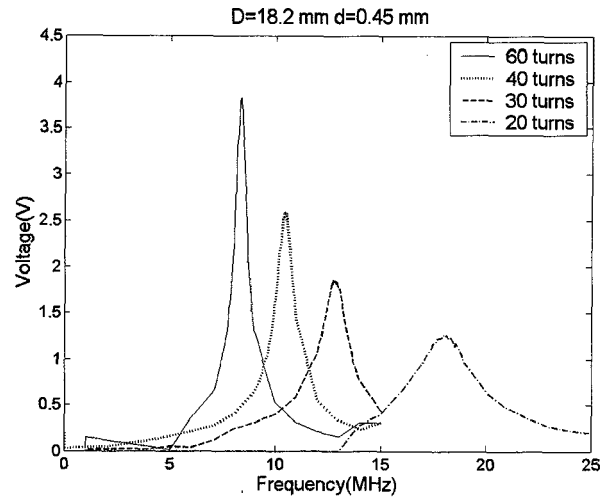


그림 4. 주파수 응답 특성 측정 예  
Fig. 4. Measured frequency responses under diverse constructional conditions.

그림 4는 이와 같이 측정된 주파수 응답 특성의 예를 보여준다. 코일 센서 구성 조건들의 영향을 살펴보기 위하여 세 조건 중 두 조건을 고정하고 나머지 한 조건

의 변화에 의한 주파수 응답 특성 변화를 나타내었다. 맨 위 그림은 코일 센서 단면의 지름( $D = 18.2 \text{ mm}$ )과 권선 지름( $d = 0.45 \text{ mm}$ )을 고정하고 권선 수  $n$ 을 변경한 경우이고 가운데 그림은 코일 센서 단면의 지름( $D = 18.2 \text{ mm}$ )과 권선 수( $n = 40$  회)를 고정하고 권선 지름  $d$ 를 변경한 경우, 가장 아래 그림이 권선 지름( $d = 0.15 \text{ mm}$ )과 권선 수( $n = 60$  회)를 고정하고  $D$ 를 변경한 경우이다. 각 그림에서 가로 축은 주파수를, 세로 축은 출력 전압을 나타낸다.

그림에서  $n$ 이 증가할수록 공진 주파수도 증가하고 출력 전압도 증가하며,  $d$ 가 증가하면 공진 주파수는 증가하지만 출력 전압은 작아지는 경향을 보이며 그 상관관계가  $n$ 보다는 작게 나타난다. 또한  $D$ 가 증가할수록 공진 주파수는 낮아지고 출력 전압은 증가하는데, 출력 전압의 증가율은 코일 센서 단면적의 증가율보다 큰 성향을 보인다. 이와 같이 실험으로부터 확인된 구성 조건들의 영향에 대해 수식적으로 모델링한다.

## 2. 실험 기반 공진 특성 모델링

먼저, 주어진 구성 조건( $d \ll D, 0.05D < n \cdot d < 7.5D$ )하에서 air-cored induction 코일 센서의 공진 주파수와 구성 조건들과의 실험적 관계식을 모델링한다.

그림 4에서 살펴본 바와 같이 구성 조건 중에 두 조건은 고정시키고 한 조건만 변화시키면서 측정 결과로부터 공진 주파수  $f$ 와의 관계를 근사하였다. 즉,  $D$ 와  $d$ 를 고정시키고  $n$ 의 차수를 변경하면서  $f$ 와  $n$ 사이에 비용 함수(cost function)

$$\text{cost function} = \sqrt{\sum (f_{\text{measure}} - f_{\text{estimate}})^2} \quad (4)$$

가 최소가 되는 관계를 파악한다.  $D$ 와  $d$ 에 대해서도 동일한 방식으로  $f$ 와의 관계를 파악하여, 공진 주파수  $f$ 는  $d^2$ 에는 비례하고  $D$ ,  $n^2$ 에는 반비례하는 관계가 있음을 확인하였다.

이와 같은 관계로부터 공진 주파수  $f_{\text{estimate}}$ 는

$$f_{\text{estimate}} = \frac{1}{\frac{k_1 D + k_2}{d^2 + k_3 d + k_4} n^2 + \frac{k_5 D + k_6}{d^2 + k_7 d + k_8} n + \frac{k_9 D + k_{10}}{d^2 + k_{11} d + k_{12}}} \quad (5)$$

와 같이 모델링된다. 식 (5)의 모델 파라미터들은 모든  $D$ ,  $d$ ,  $n$ 에 대해서 측정 결과( $f_{\text{measure}}$ )와의 비용 함수가 최소가 되도록 최소자승법(least-square estimate)을 통

하여 추정하였으며 추정결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} k_1 &= -1.017 \times 10^{-16}, k_2 = -1.134 \times 10^{-19}, \\ k_3 &= -8.744 \times 10^{-4}, k_4 = 3.105 \times 10^{-7}, \\ k_5 &= -1.070 \times 10^{-13}, k_6 = -3.627 \times 10^{-17}, \\ k_7 &= -8.923 \times 10^{-4}, k_8 = -4.304 \times 10^{-7}, \\ k_9 &= -2.203 \times 10^{-14}, k_{10} = 1.313 \times 10^{-15}, \\ k_{11} &= -3.114 \times 10^{-4}, k_{12} = -1.250 \times 10^{-7} \end{aligned}$$

다음은, air-cored induction 코일 센서의 공진 주파수에서의 출력 전압  $V$ 와 구성 조건들과의 실험적 관계식을 모델링한다. 공진 주파수의 경우와 동일하게, 측정 결과에서 두 구성 조건은 고정된 상태에서 나머지 한 구성 조건과  $V$ 와의 관계를 근사함으로써, 출력 전압  $V$ 는  $D^2$ ,  $d^2$ ,  $n^2$ 에 비례하는 관계가 있음을 확인하였다.

이와 같이 측정 결과로부터, 공진 주파수에서의 출력 전압  $V_{\text{estimate}}$ 는

$$\begin{aligned} V_{\text{estimate}} &= (l_1 n^2 + l_2 n + l_3)(m_1 d^3 + m_2 d^2 + m_3 d + m_4) D^2 \\ &+ (l_4 n^2 + l_5 n + l_6)(m_5 d^3 + m_6 d^2 + m_7 d + m_8) D \\ &+ (l_7 n^2 + l_8 n + l_9)(m_9 d^3 + m_{10} d^2 + m_{11} d + m_{12}) \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 모델링된다. 식 (6)의 모델 파라미터들은 측정 결과( $V_{\text{measure}}$ )와의 비용 함수

$$\text{cost function} = \sqrt{\sum \left( \frac{V_{\text{measure}} - V_{\text{estimate}}}{V_{\text{measure}}} \right)^2} \quad (7)$$

가 최소가 되도록 최소자승법을 통하여 추정하였다. 출력 전압은 공진 주파수에 비해 센서 구성 조건에 따른 크기 차이가 매우 크므로 출력 전압의 크기를 표준화한 비용 함수를 적용하였다. 이를 통해 주어진 구성 조건 하에서 출력 전압이 작은 경우와 큰 경우의 영향이 균일하게 반영되도록 하였다. 추정된 파라미터들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} l_1 &= -7.638 \times 10^{-1}, l_2 = 1.841 \times 10^2, \\ l_3 &= -5.354 \times 10^2, l_4 = 5.366 \times 10^{-7}, \\ l_5 &= -7.686 \times 10^{-3}, l_6 = 4.588 \times 10^{-5}, \\ l_7 &= 9.305 \times 10^{-6}, l_8 = -1.488 \times 10^{-5}, \\ l_9 &= 6.383 \times 10^{-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m_1 &= -4.284 \times 10^9, m_2 = -2.828 \times 10^5, \\
 m_3 &= 4.071 \times 10^2, m_4 = 1.221, \\
 m_5 &= 4.709 \times 10^{10}, m_6 = -6.957 \times 10^5, \\
 m_7 &= 2.027 \times 10^4, m_8 = 1.347, \\
 m_9 &= 1.069 \times 10^{10}, m_{10} = -6.398 \times 10^6, \\
 m_{11} &= 1.621 \times 10^3, m_{12} = 9.097 \times 10^{-1}
 \end{aligned}$$

### 3. 모델링 결과 비교

식 (5)와 (6) 및 관련 모델 파라미터들을 이용하여 다양한 센서 구성 조건들에서의 공진 특성을 예측하고 실제 측정 결과와 비교하였다.

그림 5는  $D = 18.2, 10.2, 5.85, 3.6$  (mm)인 코일 센서에서 권선 수와 코일 지름에 따른 공진 주파수의 변화를 보여준다. 각 그림에서 가로 축은 권선 수, 세로 축은 MHz 단위의 공진 주파수를 나타낸다. 그리고 'x', '◇', '○', '△'는 각각  $d = 0.15, 0.25, 0.35, 0.45$  (mm) 조건에서 측정된 공진 주파수를, 실선, 일점쇄선, 점선, 이점쇄선은 동일한 조건에서 식 (5)로부터 예측된 공진 주파수를 나타낸다.

그림 5에서  $d$ 가 증가하면 공진 주파수는 증가하지만  $D$ 와  $n$ 이 증가하면 공진 주파수는 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 단면  $D$ 가 증가하면 권선 수의 영향은 상대적으로 증가하지만, 권선 지름의 영향은 상대적으로 감소

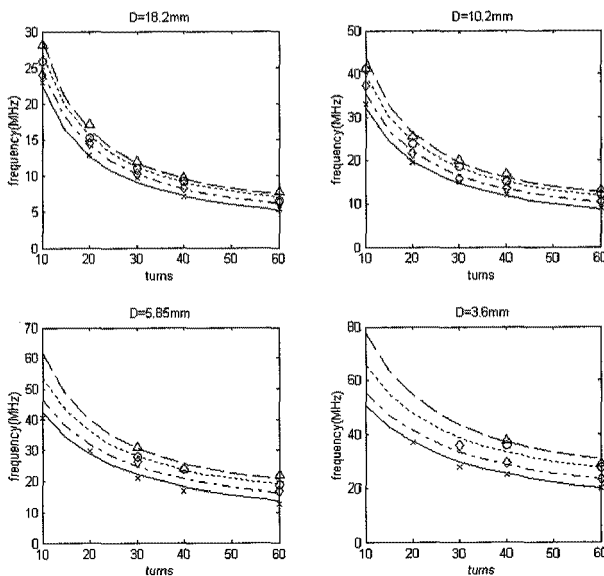


그림 5. 다양한 코일 구성 조건에서의 공진 주파수 예측

Fig. 5. Comparison of the resonant frequency under diverse constructional conditions.

소하는 경향을 보인다. 예측된 공진 주파수는 측정 결과와 동일한 경향을 보이며 둘 사이의 오차는 최대  $\pm 8\%$  이내이다.

그림 6은  $D = 18.2, 10.2, 5.85, 3.6$  (mm)인 코일 센서에서 권선 수와 코일 지름에 따른 공진 주파수에서의 출력 전압의 변화를 보여준다. 각 그림에서 가로 축은 권선 수, 세로 축은 볼트(V) 단위의 출력 전압을 나타낸다. 그리고 'x', '◇', '○', '△'는 각각  $d = 0.15, 0.25, 0.35, 0.45$  (mm) 조건에서 측정된 출력 전압을 나타내고 실선, 일점쇄선, 가는 점선, 점선은 동일한 조건에서 식 (6)으로부터 예측된 출력 전압을 나타낸다.

그림 6에서  $d$ 가 증가하면 출력 전압은 감소하지만  $D$ 와  $n$ 이 증가하면 출력 전압은 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 그 경향은 달라서  $n$ 에 대해서는 선형적인 비례 관계가 주요하나  $D$ 에 대해서는 제곱에 따른 비례 관계가 주요한 경향을 보인다.

측정 결과와 예측된 출력 전압간의 오차는 최대  $\pm 30\%$ 로, 오차가 다소 커 보이지만, 실제 전압의 크기로는 최대 190mV를 넘지 않는다. 이와 같은 오차는 실제 자기장의 분포가 균일하지 않기 때문에 코일 센서 단면 면적에 따라 측정되는 자기장의 평균 세기가 달라지고 센서의 출력 전압도 영향을 받기 때문으로 생각된다. 또한, 일부 구성 조건의 센서에서 실제 공진 주파수와 측정된 공진 주파수의 차이로 인한 출력 전압의 차이도 영향을 주었

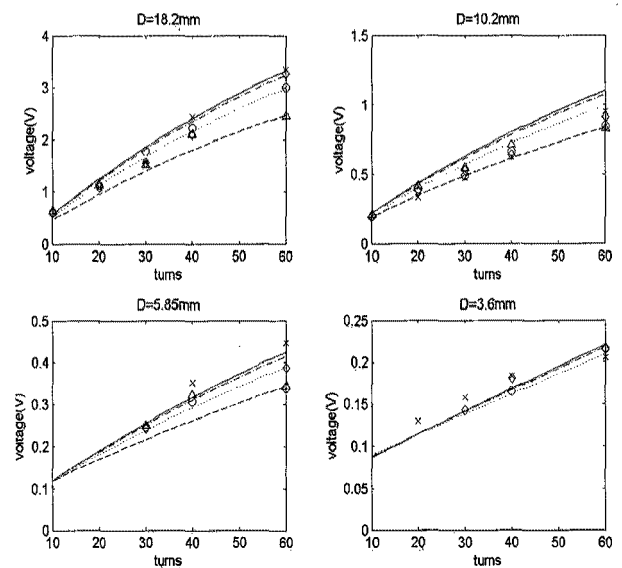


그림 6. 다양한 코일 구성 조건에서의 출력 전압 예측

Fig. 6. Comparison of the output voltage under diverse constructional conditions.

다고 생각된다.

이와 같은 출력 전압을 코일 센서 중심에서의 자기장 세기로 나누어 표준화하면, 다른 자기장 세기를 가지는 경우에도 적용이 가능하다. 즉, 자기 검사법에서 탐사 전류의 크기나 코일 센서의 장착 위치에 따른 자기장의 세기를 계산하고 본 논문에서 계산된 자기장 세기  $3.143 \times 10^{-2}$  (A/m)와의 비를 식 (6)에 곱하면 출력 전압의 크기를 예측할 수 있다.

#### IV. 결 론

ECP와 같은 자기 검사법을 포함하여, 코일 센서를 고주파 영역에서 사용하는 시스템에서 사양에 맞는 코일 센서를 설계하거나 코일 센서의 출력 신호를 처리하는 신호 처리 회로(signal conditioning circuits)를 설계하기 위해서는 코일 센서의 공진 특성의 예측이 반드시 요구된다. 하지만, 코일 센서의 기생 성분( $R_{AC}$ ,  $R_{DC}$ ,  $L$ ,  $C$ )들에 대한 근사 모델 자체의 오차와 이 오차들의 누적으로 인하여 기생 성분 모델을 이용한 공진 특성 예측에는 한계가 있다.

그래서, 본 논문에서는 air-cored induction 코일 센서의 범용적인 구성 조건( $d \ll D$ ,  $0.05D < n \cdot d < 7.5D$ ) 하에서 주파수 응답 특성 실험 결과를 바탕으로, 코일 센서의 공진 특성의 실험적 관계식을 모델링하였다. 코일 센서에서 센서 단면의 지름  $D$ , 권선 지름  $d$ , 권선 수  $n$ 의 구성 조건과, 공진 주파수 및 공진 주파수에서의 출력 전압사이의 관계식을 도출하였다.

이와 같은 공진 특성 모델링은 자기 검사법에서 필요한 사양의 코일 센서 설계에 직접 적용될 수 있을 뿐 아니라, 공간 해상도 등으로 인해 코일 센서의 크기가 결정된 경우, 센서 후단에 요구되는 신호 처리 회로의 설계 사양의 결정에도 사용된다. 또한, 주파수에 대한 선형성을 유지해야 하는 응용 분야에서도 공진 영향 없이 사용 가능한 최대 주파수 예측에 사용될 수 있다.

#### 참 고 문 헌

[1] R. Boll and K.J. Overshott, Sensors: A Comprehensive Survey, Volume 5, Magnetic Sensors, VCH, pp. 205-253, 1989.  
 [2] G.L. Burkhart and R.E. Beissner, "Electric Current Perturbation NDE," ASM Handbook, pp. 136-142, 1989.

[3] G.W. Scott and G.L. Burkhardt, "Electric Current Perturbation Method for Inspection of Aluminum Welds," Rev. Progr. Quant. NDE, Vol. 5B, pp. 1713-1721, 1986.  
 [4] C.M. Teller and G.L. Burkhardt, "NDE of Fastener Hole Crack by the Electric Current Perturbation Method," Rev. Progr. Quant. NDE, Vol. 1, pp. 399-403, 1982.  
 [5] J.L. Fisher, "Remote-Field Eddy Current Inspection," ASM Handbook, pp. 195-201, 1989.  
 [6] H. Lim and J. Park, "Modified Electric Current Perturbation (ECP) Characterization for a Circular Aperture," IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, Vol. 55, no. 1, pp. 212-218, February 2008.  
 [7] F.E. Terman, Radio Engineers' Handbook, McGRAW-HILL, pp. 73-90, 1943.

#### 저 자 소 개



임 한 상(정회원)  
 1996년 서울대학교 전기공학부 학사 졸업.  
 1998년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사 졸업.  
 2004년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사 졸업.

2009년~현재 광운대학교 전자융합공학과 조교수  
 <주관심분야 : 고속 계측 시스템, 자동차 전장>



김 인 주(정회원)  
 2002년 서울대학교 전기공학부 학사 졸업.  
 2004년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 석사 졸업.  
 2005년~현재 삼성전자 DMC 연구소

<주관심분야 : 혼성 회로 및 알고리즘 설계 >