

원전 증기발생기 전열관 와전류검사용 보빈코일의 권선 수 변화에 대한 전기적 특성 연구

A Study on Electrical Characteristics for Coil Winding Number Changes of Eddy Current Bobbin Coil for Steam Generator Tubes in NPPs

남민우*[†], 김철기*

Minwoo Nam*[†] and Cheolgi Kim*

초 록 국내 원자력발전소 증기발생기 전열관의 건전성을 평가하기 위해서 수행되는 와전류검사의 탐촉자는 주로 두가지 종류가 사용한다. 첫 번째 와전류탐촉자는 마모와 같은 체적성 결함을 검사하기 위해 사용되는 보빈탐촉자이다. 두 번째 와전류탐촉자는 균열과 같은 비체적성 결함을 검사하기 위한 회전형 탐촉자이다. 와전류탐촉자는 검사 계통의 핵심적인 부분으로서 특정 절차서에 따라 평가가 이루어질 때 대상 시험체의 합부를 결정하는 자료를 제공하게 된다. 또한, 수집된 와전류신호의 품질은 사용되는 탐촉자의 설계특성, 기하학적 형태, 운전주파수에 따라 결정되고, 검사 결과에 미치는 영향이 크기 때문에 와전류검사 탐촉자의 선정은 특히 중요하다. 본 연구에서는 차동형 보빈탐촉자의 코일 권선 수의 변화가 탐촉자의 전기적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이 결과를 이용하여 원전 증기발생기 전열관 와전류검사 보빈탐촉자를 설계하였다. 연구 결과 코일 권선 수의 변화는 전열관 형상 및 재질에 따른 검사주파수 선정에 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서 본 연구 결과를 통하여 원전 증기발생기 전열관 와전류검사 보빈탐촉자의 설계 시 더욱 정밀한 코일 권선 수 설정에 토대를 구축하였다.

주요용어: 증기발생기, 와전류검사, 보빈코일, 임피던스, 공진주파수

Abstract Two kinds of eddy current probes are mainly used to perform the steam generator tube integrity assesment in NPPs. The first one is the bobbin probe using for inspection of volumetric defect like a fretting wear. The second one is the rotating probe using for inspection of non-volumetric defect like a crack. The eddy current probe is one of the essential components which consist of the whole eddy current examination system, and provides a decisive data for the tube integrity in accordance with acceptance criteria described in specific procedures. The design of ECT probe is especially important to improve examination results because the quality of acquired ECT data is depended on the probe design characteristics, such as coil geometry, electrical properties, operation frequency. In this study, it is analyzed that the coil winding number of differential bobbin probe affects the electrical properties of the probe. Eddy current bobbin probes for the steam generator tubes in NPPs are designed and fabricated according to the results. Experiment shows that the change in coil winding number has much effects on the optimum inspection frequency determined by the tube geometry and material. Therefore, the coil winding number in bobbin probe is very important in the probe design. In this study, a basis of the coil winding number for the eddy current bobbin probe design for steam generator tubes in NPPs is established.

Keywords: Steam Generator, Eddy Current Testing, Bobbin Coil, Impedance, Resonance Frequency

1. 서론

와전류검사법은 대상 시험체에 와전류를 유도하여 와전류와 재질 사이의 상호작용을 관찰하여 시험체의 상태를 분석하는 비파괴검사기술로서 시험체에 탐촉자를 직접 접촉할 필요가 없기 때문에 원격 고속자동검사가 가능하다. 특히 원전 1차계통 기기는 방사선으로 오염되어 비파괴검사의 접근이 제한되므로 비파괴검사에는 방사선 피폭으로부터 검사자를 보호하기 위해 원격검사가 가능한 와전류탐상법이 널리 적용되고 있다. 원전 1차계통의 압력경계중 가장 취약한 부분인 증기발생기 전열관은 계획예방정비기간에 건전성을 확인하기 위해 와전류검사를 수행하고 있으며, 증기발생기 전열관 와전류검사에 적용되고 있는 검사방법 중에서 보빈탐촉자 검사는 매 계획예방정비기간에 기본검사로 수행된다. 와전류탐촉자는 검사 계통의 핵심적인 부분으로서 특정 절차서에 따라 평가가 이루어질 때 대상 시험체의 합부를 결정하는 자료를 제공하게 된다. 또한, 수집된 와전류신호의 품질은 사용되는 탐촉자의 설계특성(권선 수, wire 직경 등), 기하학적 형태(충진율, 코일간극 등), 운전주파수에 따라 결정되고, 검사결과에 미치는 영향이 크기 때문에 와전류검사 탐촉자의 선정은 특히 중요하다[1]. 본 연구에서는 차동형 보빈탐촉자의 코일 권선 수의 변화가 탐촉자의 전기적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 이 결과를 이용하여 웨스팅하우스 F형 원전 증기발생기 전열관 와전류검사 보빈탐촉자를 설계하였다. 연구결과 코일 권선 수의 변화에 공진주파수가 일정한 크기로 변화함을 알 수 있었다. 따라서 탐촉자 권선 수 설계시 검사 전열관에 따라 결정되는 검사주파수에 일치하는 정확한 코일 설계가 가능하게 되었다.

2. 실험 준비

2.1. 실험용 보빈탐촉자 설계 제작

2.1.1. 코일 권선 수 계산

코일의 권선 수는 코일의 인덕턴스를 구하는 식을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{1}$$

식(1)에서 L(인덕턴스)을 계산하기 위한 식은 다음과 같이 정리된다.

$$L = \frac{1}{(2\pi)^2 \times C \times f_r^2} \tag{2}$$

여기서 f_r 는 공진주파수로서 경험식은 식(3)으로 표기된다.

$$f_r = 1.25 \times \text{검출주파수} \tag{3}$$

상수 1.25는 검사 전열관의 사용 주파수에 따라 적용된다. 본 연구에서는 전열관 재질로 인코넬 600을 적용하였다. C는 사용된 케이블의 총 캐패시턴스이다. 다음으로 코일의 인덕턴스를 구하는 식을 이용하여 코일의 권선 수를 계산한다.

$$L = 4\pi\mu_r\bar{r}N^2\left[\ln\left(\frac{8\bar{r}}{k}\right) - 2\right]10^{-10} \tag{4}$$

여기서 \bar{r} 는 코일의 평균 반경으로서 $\bar{r} = \frac{D_o + D_i}{4}$

이며, $k = 0.112(2l + D_o + D_i), mm$ 이다. $\mu_r = 1$ (코일 코아의 상대투자율)이다. Fig. 1에 코일의 단면 형상을 나타냈다.

식(4)에서 N(코일 권선 수)을 계산하기 위한 식은 다음과 같다.

$$N = \sqrt{\frac{L}{4\pi\bar{r}\mu_r\left[\ln\left(\frac{8\bar{r}}{k}\right) - 2\right] \times 10^{-10}}} \tag{5}$$

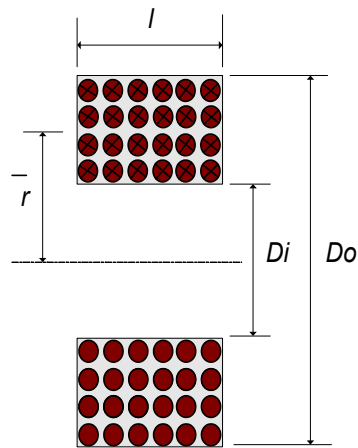


Fig. 1 Cross section of coil

Table 1 Design for coil winding numbers of the test probes

번호	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8
권선 수	N4 -15	N4 -10	N4 -5	N4	N4+ 5	N4+ 10	N4+ 15	N4+ 20

여기서 D_o 는 코일의 외경을 나타내며, 검사 전열관의 내경 상태에 따라 탐촉자의 충전률(fill factor, η)를 고려하여 계산한다.

$$\eta = \frac{(\text{coil OD})^2}{(\text{tube ID})^2} \quad (6)$$

여기서 coil OD는 코일 외경(D_o)를 나타내며 tube ID는 튜브 내경을 나타낸다[2].

위의 계산식은 모두 실험식에 해당되므로 코일의 최적 권선 수 설계를 위해 계산식에서 도출된 권선 수 N4의 상하로 5회씩 차이로 8개의 시제품(N1~N8)을 제작하였다. Table 1에 탐촉자 시제품별 코일 권선 수 설계를 나타냈다.

2.1.2. 실험용 보빈탐촉자 설계 제작

상기 2.1.1항에서 계산한 권선 수에 근거하여 5회의 권선 수 차이로 8개의 탐촉자(N1 ~ N8) 헤드를 제작하고 케이블은 현장 검사에 사용하는 탐촉자의 길이(100피트)로 1개를 제작하여 실험하였다. Fig. 2에 실험용 보빈탐촉자의 사진을 나타냈다. 탐촉자의 충전율은 84%로 설계하였으나 N6~N8은 충전율이 85%로 제작되었다.



Fig. 2 Experimental bobbin probe for variation of coil winding number

2.2. 적용 시험편

실험에 적용한 증기발생기 전열관은 웨스팅하우스 F형 증기발생기 전열관으로 탐촉자 코일을 삽입한 상태에서 임피던스를 측정하기 위해 건전한 튜브의 참조용 시험편을 사용하였다. Fig. 3에 실험용 시험편의 사진 및 사양을 나타냈다.


	재질	Inconel 600TT
	OD	0.688 inch
	두께	0.040 inch

Fig. 3 Reference specimen

3. 실험 방법

와전류검사 보빈탐촉자의 전기적 특성시험을 수행하기 위해 Agilent 4294A 임피던스 분석장치를 사용하였다. Agilent 4294A 임피던스 분석장치는 40 Hz ~ 110 MHz의 시험주파수 범위와 임피던스 측정 정확도는 $\pm 0.08\%$ 의 장비이다. 측정에 사용되는 프로그램은 Agilent connection expert 및 excel 프로그램이며, 장비와 연결하여 측정 데이터를 직접 그래프로 작성할 수 있다. 탐촉자 특성분석 프로그램은 임피던스 분석장치로부터 얻어진 보빈탐촉자의 공진주파수, 임피던스, 저항, 유도성 리액턴스를 측정하며, 다양한 주파수에 따른 탐촉자의 특성 데이터를 엑셀 파일에 나타내어 정규화 임피던스 곡선 등의 탐촉자 정보를 획득할 수 있다. Fig. 4에 탐촉자의 전기적 특성 실험 장치도를 나타냈다[3].

보빈코일의 전기적 특성실험은 코일이 시험편(인코넬 600 튜브)에 삽입된 상태, 공기중 상태 및 두 개의 차동형 코일을 결선한 상태와 한 개 코일만 연결된 절대형 상태에서 측정을 하였다.

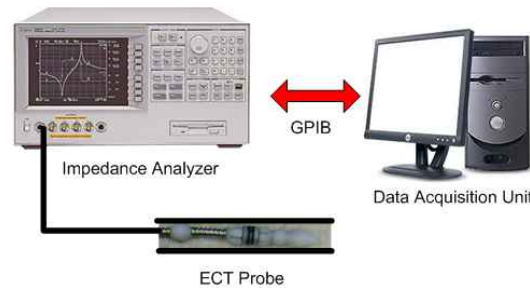


Fig. 4 Electrical property test system configuration for bobbin probe

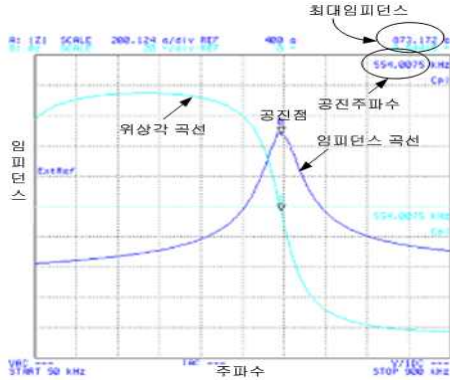


Fig. 5 Output display of electrical property test system for bobbin probe

4. 실험 결과 및 고찰

4.1. 코일 권선 수 변화에 따른 임피던스 변화 실험

Fig. 6에 코일 권선 수 변화에 대한 임피던스 선도를 나타냈다. 본 실험은 참조시험편의 내부에 탐촉자를 삽입한 상태에서 측정하였으며, 보빈코일의 두개 코일중 한개 코일은 단선하고 한개의 코일을 측정 장비에 연결한 상태(absolute mode)에서 측정하였다. 전체적으로 코일 권선 수가 증가함에 따라 임피던스의 진폭이 약간 증가함을 알 수 있다. 코일 권선 수를 5회씩 증가시킬 때 임피던스의 크기를 Fig. 7에 나타냈다. 실험 탐촉자의 N1에서 N5까지는 임피던스의 변화가 작게 나타났지만 N6 탐촉자부터 N8까지 임피던스가 약간 크게 증가한 것은 코일 권선 수 증가에 따른 충전율 증가 때문이라 판단된다. 따라서 임피던스는 코일 권선 수 증가에 의한 영향보다 충전율 증가에 의한 영향이 크게 작용함을 알 수 있다.

4.2. 코일 권선 수 변화에 따른 공진주파수 변화 실험

Fig. 6에서 알 수 있듯이 코일 권선 수가 증가함에 따라 임피던스 선도의 공진점이 좌측으로 이동하였다. 식(1)에서 L성분은 코일에 의한 인덕턴스 성분으로 코일 권선 수 증가에 따라 L성분이 증가하므로 공진주파수(f_r)는 감소한다. Fig. 8

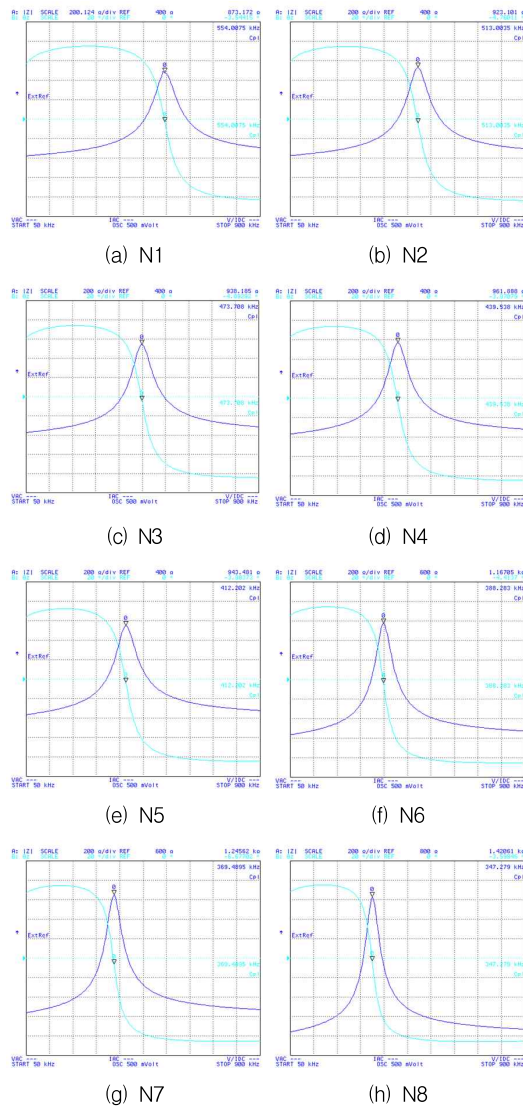


Fig. 6 Impedance plots for absolute mode due to coil winding variation in inconel tube

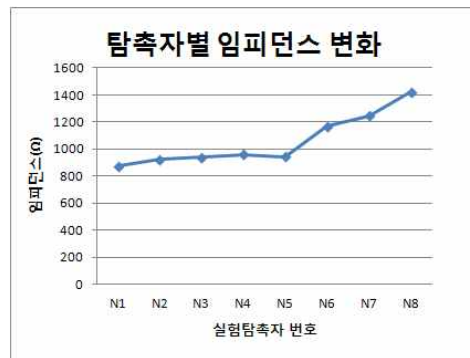


Fig. 7 Impedance of test bobbin probes

에 탐촉자별 공진주파수 변화를 나타냈다. 그래프에서 알 수 있듯이 코일 권선 수 증가에 따라 공진주파수는 일정하게 감소함을 알 수 있다. 설계시 계산된 코일 권선 수에 따른 공진주파수와 제작 시작품의 공진주파수의 차이를 다음과 같이 계산하였다.

코일 권선 수 계산은 식(3)에 따라 공진주파수를 계산하였다. 여기서 검출 주파수는 식(7)에 의하여 계산한다.

$$f_{90} = K \frac{\rho}{t^2} \quad (7)$$

위식에서 f_{90} : 검출주파수(detection frequency), K : 3(상수), ρ : 비저항(인코넬 600 : 103 micro-ohm-cm), t : 시험편의 두께(1.016 mm)

식(7)에 의하여 검출주파수(f_{90})를 계산하면 299.34 kHz가 된다(중기발생기 모델 F의 현장 검사에 적용되고 있는 검출주파수는 300 kHz임). 계산된 검출주파수는 내경결함과 외경결함의 위상각 차이가 90° 차이가 발생하는 주파수를 의미한다. 따라서 공진주파수(f_r) = 1.25×299.34 kHz = 374 kHz가 된다[4].

실제 제작된 시작품의 공진주파수를 측정하는 Fig. 8의 곡선 결과에 의하면 N6과 N7의 사이가 됨을 알 수 있다. 따라서 두께가 1.016인 인코넬 600 전열관 검사용 탐촉자의 코일 설계는 N6에서 1회선만 추가하여 권선하면 정확한 설계가 가능하다.

본 실험 결과를 활용하면 탐촉자의 코일 설계시 보다 정확한 코일의 권선 수 설계가 가능함을 알 수 있었다.

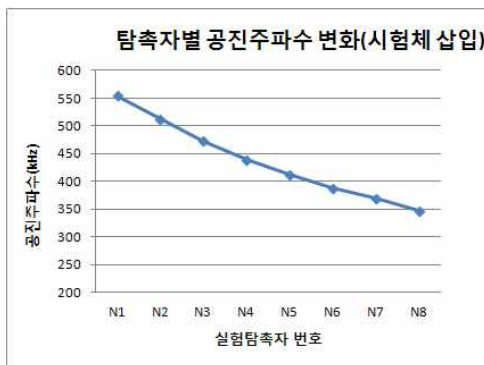
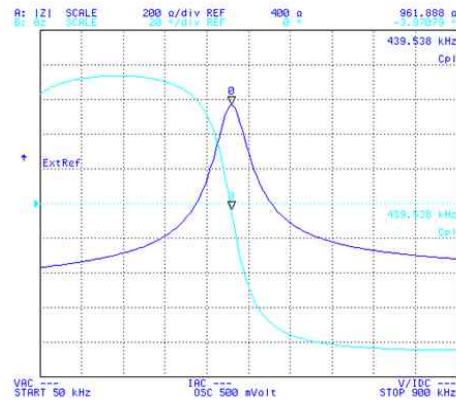


Fig. 8 Resonance frequency of test bobbin probes in reference tube

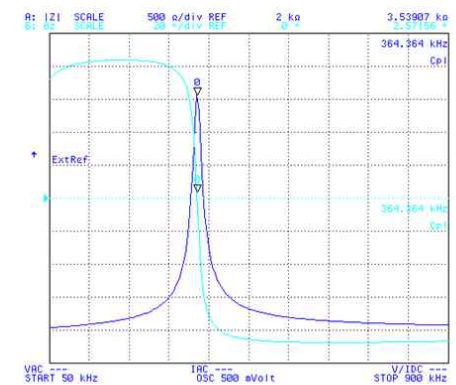
4.3. 탐촉자 코일 특성 실험시 시험체의 영향

Fig. 9에 탐촉자 코일을 시험편 내에 삽입한 상태와 공기중에서 측정한 임피던스 선도를 나타냈다. 시험편내에 코일을 삽입한 상태보다 공기중의 임피던스가 4배 이상 크게 나타났다. Fig. 10의 페이서 다이어그램에서 알 수 있듯이 시험체에 코일이 있을 때와 없을 때의 전압의 크기가 변화하며, 전압은 임피던스에 비례하므로 공기중에서보다 인코넬 600의 경우 임피던스의 크기 차이가 크게 발생하였다[5].

Fig. 10의 시험체가 없이 공기중에서 측정한 탐촉자별 공진주파수 변화는 Fig. 8의 시험체를 삽입한 탐촉자별 공진주파수 변화와 비교할 때 코일 권선 수 증가에 공진주파수가 거의 일정한 차이로 감소하는 경향을 나타냈다. 따라서 인코



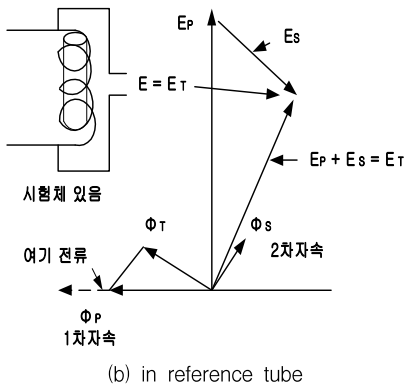
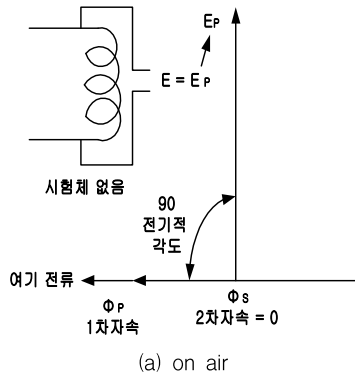
(a) in reference tube



(b) on air

Fig. 9 Impedance plots for absolute mode of N4 test probe in reference tube or on air

넬 600 전열관 검사용 와전류탐촉자 코일설계시 참조시험편이 없이 공기중 공진주파수 측정시 약 70 kHz 낮게 설정하면 시험체 삽입시와 유사한 결과를 도출할 수 있다. 하지만 보다 정확한 측정을 위해서는 코일을 시험체에 삽입한 상태의 측정을 수행해야 한다.



E = 코일전압, I = 여기전류, EP = 1차전압, ΦP = 1차자속,
 ES = 2차전압, ΦS = 2차자속, ET = 장전 코일전압,
 ΦT = 장전 코일자속

Fig. 10 Phasor diagram

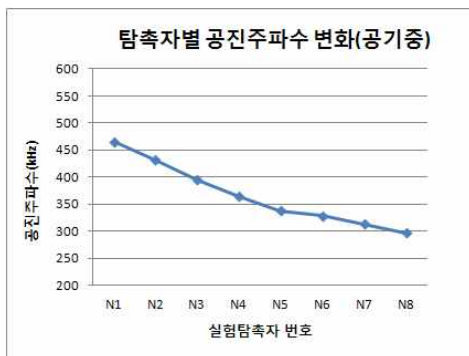


Fig. 11 Resonance frequencies of test bobbin probes on air

4.4. 탐촉자 코일 모드에 따른 특성 실험

Fig. 9(a)의 탐촉자 코일을 시험편 내에 삽입한 상태에서 차동형 코일의 두개 코일중 1개 코일을 단락하고 한개 코일만 측정할 임피던스 선도는 1개의 공진점을 나타냈지만, Fig. 12의 차동형 코일의 2개 코일을 연결한 상태에서 1개 코일에 대한 임피던스 측정에서는 공진점이 2개로 나타났다. 이러한 두개의 공명 침투치가 형성되는 현상은 Faraday에 의해 정립된 전자기 유도 현상에 의해 1개 코일에 전류가 흐를 때 근접 코일에 방향이 반대인 유도전류가 흐르기 때문에 발생한 현상이며, 두개의 공진점 중간인 골짜기 부근에서 Fig. 12(a)의 공진점에서 형성된 공진주파수와 거의 일치하였다. 따라서 차동형 코일의 임피던스 측정은 2개 코일을 단락시킨 상태에서 각각의 코일을 측정해야 한다.

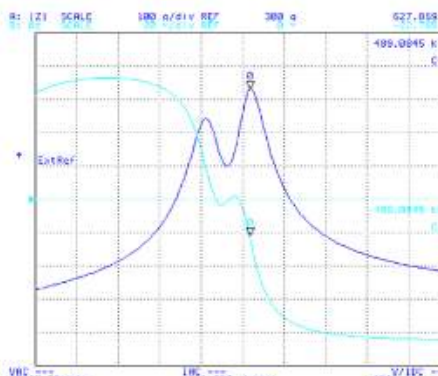
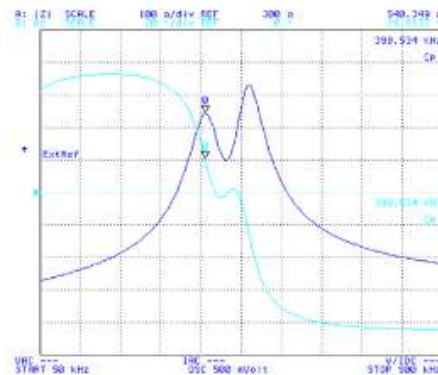


Fig. 12 Impedance plots for differential modes of N4 test probe in reference tube

아날로그 장비에서 0.8 ft(공진주파수) 아래에서 검출주파수를 설정한다. 1.2 ft 이상인 주파수에서는 용량성 리액턴스($1/\omega C$)가 감소하고 전류회로가 코일보다 케이블을 통하여 흐르기 때문에 와전류검사 장비의 감도가 주파수 증가에 따라 급속하게 감소한다[6]. 따라서 아날로그 장비는 공진주파수 근처에서 검출주파수를 사용하지 않도록 권장하는 이유라 판단된다. 물론 현재 검사에 사용하는 장비는 아날로그신호를 디지털로 변환하여 출력을 나타내므로 이러한 현상에 영향을 받지 않는다.

4. 결 론

본 연구는 원전 증기발생기 전열관 와전류검사 보빈탐촉자의 중요 설계인자인 코일 권선 수 변화에 따른 전자기적 특성을 분석하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 탐촉자 임피던스는 코일 권선 수 증가에 의한 영향은 적게 나타났으며, 충전율에 의한 영향이 지배적으로 작용할 것으로 판단된다.
- 2) 탐촉자 코일 권선 수는 실험적인 계산식에 의해 설계되며, 실제 제작한 탐촉자의 공진주파수는 설계시 반영한 공진주파수와 차이가 발생한다. 따라서 실험식에 의한 코일 설계 권선 수의 상하로 일정한 권선 수 차이로 몇 개의 시작품을 제작하여 추적 설계하면 검사대상체의 특성에 일치하는 탐촉자 제작이 가능

하리라 판단된다.

- 3) 탐촉자 코일을 시험편 내에 삽입한 상태와 공기중에서 측정된 임피던스는 시험편내에 코일을 삽입한 상태보다 공기중의 임피던스가 4배 이상 크게 나타났으며, 공진주파수는 약 70 kHz 낮게 나타났다. 따라서 보다 정확한 측정을 위해서는 코일을 시험체에 삽입한 상태의 측정을 수행해야 한다.
- 4) 차동형 코일의 두 개 코일중 1개 코일을 단락하고 한개 코일만 측정된 임피던스 선도는 1개의 공진점을 나타냈지만, 차동형 코일의 2개 코일을 연결한 상태에서 1개 코일에 대한 임피던스 측정에서는 공진점이 2개로 나타났다.

참고문헌

- [1] ASNT, Nondestructive Testing Handbook, Vol. 4, Part 4, p. 62 (1986)
- [2] CGSB, Advanced Manual for: Eddy Current Test Method, p. 74 (1986)
- [3] Agilent Tech., Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer Operation Manual, Sixth Edition (2002)
- [4] EPRI, Electromagnetic NDE Guide for Balance-of-Plant Heat Exchangers, Rev. 1, pp. 4-12 (1995)
- [5] ASNT, Level III Study Guide, pp. 5 (1983)
- [6] CGSB, Advanced Manual for: Eddy Current Test Method, p. 121 (1986)