

원전 증기발생기 전열관 와전류검사 보빈탐촉자 설계

Eddy Current Bobbin Probe Design for Steam Generator Tubes in NPPs

남민우*[†], 이희종*, 지동현*, 정지홍*, 김철기**

Minwoo Nam*[†], Heejong Lee*, Donghyun Jee*, Jeehong Jung* and Cheolgi Kim**

초 록 원자력발전소 증기발생기 전열관의 건전성을 평가하기 위해서 계획예방정비 기간에 수행되는 와전류 검사의 여러 가지 기법중에서 보빈 탐촉자 검사는 가장 기본적인 중요한 검사이다. 와전류 탐촉자는 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, 검사결과에 미치는 영향이 크기 때문에 와전류검사 탐촉자의 선정은 특히 중요하다. 본 연구에서는 국내 원전 증기발생기 전열관 검사를 위한 최적의 차동형 보빈탐촉자를 설계하였다. 또한 보빈탐촉자 제작품의 전기적 특성과 와전류신호 특성 평가를 수행하여 만족한 결과를 도출하였다.

주요용어: 증기발생기, 와전류검사, 보빈탐촉자, 교정표준시험편, 차동형코일

Abstract The bobbin probe examination is basic and the important method among other ECT techniques for the steam generator tube integrity assesment that is practiced during each plant outage. The bobbin probe is one of the essential components which consist of the whole ECT examination system, and provides us a decisive data for the evaluation of tube integrity in compliance with acceptance criteria described in specific procedures. The selection of examination probe is especially important because the quality of acquired ECT data is determined by the probe design characteristics, such as geometry and operation frequency, and has enormous effects on examination results. In this study, An optimal differential bobbin probe is designed for the steam generator tube inspection in nuclear power plants(NPPs). Based on the test results for electrical and ECT signal characteristics, the prototype bobbin probe satisfies all the criteria.

Keywords: Steam Generator, Eddy Current Testing, Bobbin Probe, Calibration Standard, Differential Coil

1. 서 론

와전류검사법은 전도성재질의 시험체에 와전류를 유도, 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 비파괴검사자의 접근

이 제한되므로 방사선 피폭으로부터 검사자를 보호하기 위해 원격검사가 가능한 와전류탐상법이 증기발생기 비파괴검사로 널리 적용되고 있다. 증기발생기 전열관은 원전 1차계통의 압력경계중 가장 취약한 부분으로서 건전성을 확인하기 위해 계획예방정비기간중에 와전류검사를 수행하고 있으며, 증기발생기 전열관 와전류검사에 적용되고 있는 검사기법중에서 보빈 탐촉자 검사는 매 계획예방정비기간

에 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(권선수, 와이어 직경 등), 기하학적 형태(충진율, 코일간극 등), 운전주파수에 따라 결정되고, 검사결과에 미치는 영향이 크기 때문에 와전류검사 탐촉자의 선정은 특히 중요하다[1]. 본 연구에서는 국내 원전 증기발생기 전열관 검사를 위한 최적의 차동형 보빈탐촉자를 설계하였으며 보빈탐촉자 시작품의 전기적 특성과 와전류신호 특성 평가를 수행하여 미국 전력연구원의 가압경수로 증기발생기 검사 지침서[2]에 요구된 기준을 만족하는 것을 확인하였다.

2. 보빈탐촉자 설계

2.1. 코일 권선수 계산

코일의 권선수는 코일의 인덕턴스를 구하는 식을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

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

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

여기서 f_r 는 공명주파수로서 경험식은 $f_r = 1.25 \times \text{Detection frequency}$ (검출주파수)이며, 상수 1.25는 검사 전열관의 사용 주파수에 따라 적용된다. 본 연구에서는 전열관 재질로 인코넬 600을 적용하였다. C는 사용된 케이블의 총 커패시턴스이다. 다음으로 코일의 인덕턴스를 구하는 식을 이용하여 코일의 권선수를 계산한다.

$$L = 4\pi\mu_r \bar{r} N^2 \left(\ln \frac{8\bar{r}}{k} - 2 \right) 10^{-10} \quad (3)$$

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. Fig. 1에 코일의 단면 형상을 나타냈다.

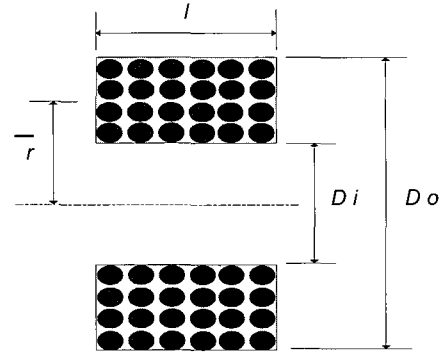


Fig. 1 Cross section of coil

식 (3)에서 N(코일 권선수)을 계산하기 위한 식은 다음과 같다.

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

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

$$\eta = \frac{(\text{Coil OD})^2}{(\text{Tube ID})^2} \quad (5)$$

여기서 Coil OD는 코일 외경(D_o)를 나타내며 Tube ID는 튜브 내경을 나타낸다[3].

위의 계산식은 모두 실험식에 해당되므로 코일의 최적 권선수는 $\pm 10\%$ 오차를 고려하여 시행착오로 접근하였다.

2.2. 코일 몸체(Coil Body) 설계

코일 몸체는 검사대상 증기발생기 전열관 내부에서 삽입 인출이 적절하게 이루어지도록 제작해야 하며, 재질은 충분한 내마모성을 가지고 흡습성이 최소인 재질로 제작해야 한다. 코일 및 케이블 연결부는 사용 도중에 절연이 파괴되지 않도록 밀봉

재로 적절하게 방수 처리되어야 한다. 코일 몸체 외경은 전열관 치수에 따라 검사가 가능한 최대 충전율(fill factor)이 되도록 결정하였으며, 검사대상 전열관 곡관의 곡률반경 및 내경 검사환경 상태에 따라 약 80%~86%로 설계하였다. Fig. 2에 제작 보빈탐촉자의 몸체를 나타냈으며, Table 1에 탐촉자 종류별 충전율을 나타내었다.

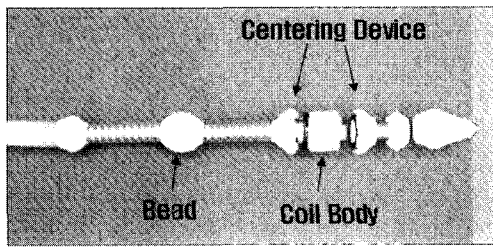


Fig. 2 Bobbin probe head assembly

Table 1 Fill factor of prototype probes

| 탐촉자 | 전열관 OD(mm) | 전열관 두께(mm) | 전열관 ID(mm) | 코일 OD(mm) | 충진율 (%) |
|-------|------------|------------|------------|-----------|---------|
| 시작품 1 | 19.05 | 1.066 | 16.92 | 15.5 | 84 |
| 시작품 2 | 17.47 | 1.016 | 15.44 | 14.0 | 82 |
| 시작품 3 | 15.87 | 1.13 | 13.6 | 12.2 | 80 |
| 시작품 4 | 22.22 | 1.24 | 19.7 | 18.3 | 86 |

2.3. 탐촉자 중심화 장치(Centering Device) 설계

탐촉자 중심화 장치는 탐촉자가 전열관내로 이동시 코일이 편심되지 않고 전열관 중심과 동심을 유지시키는 장치로서 전열관 내경보다 약 0.2 mm 크게 설계하였다. 중심화 장치의 재질은 탄력성이 강하고 파손되지 않는 엔지니어링 플라스틱을 사용하였다.

2.4. 탐촉자 케이블 설계

탐촉자 케이블은 동축케이블(RG-174)을 사용하였으며, 케이블의 길이는 증기발생기 전열관의 전체 길이와 검사장비와의 연결을 고려하여 약 31 m의 길이를 사용하였다. 탐촉자 인출시 탐촉자 몸체가 열교환기 내부에서 절손되는 것을 방지하기 위하여 내부식성 강선 와이어(Stainless steel)을 케이블 전 길이에 삽입하였다. Fig. 3에 보빈탐촉자의 시작품을 나타내었다.

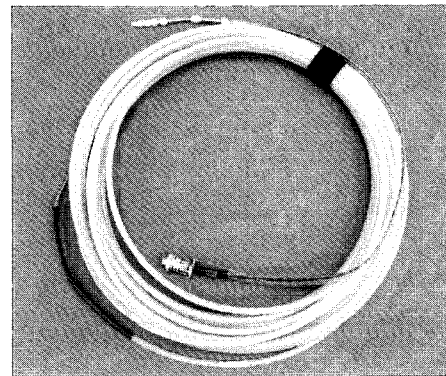


Fig. 3 Prototype bobbin probe

3. 보빈탐촉자 시작품 특성 시험

3.1. 탐촉자 특성시험 시스템 구축

탐촉자 특성시험으로 전기적 특성시험과 와전류 신호 특성시험을 수행하였다. 탐촉자 전기적 특성 시험에서는 LABVIEW 프로그램을 사용하여 임피던스 분석장치(Model: HP-4194A)와 GPIB Board (Model: NI PCI-GPIB)를 이용하여 탐촉자의 특성을 분석하였다. 탐촉자 특성분석 프로그램은 임피던스 분석장치로부터 얻어진 보빈탐촉자의 공명주파수(Resonance frequency), 임피던스, 저항, 유도성 리액턴스를 컴퓨터의 윈도우 주 화면에 나타내는 기능을 갖고 있다. 또한 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.

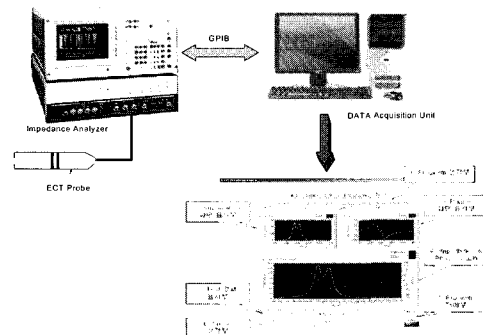


Fig. 4 Electrical property test system configuration for bobbin probe

와전류신호 특성시험은 주파수를 발생시키는 주파수 발생장치로 64채널 용량으로 주파수 대역이 10 kHz ~ 1 MHz인 미국 Zetec사의 Miz-30을, 신호 수집 및 분석장치로는 Zetec사의 EddyNet 프로그램을 사용하였고 Fig. 5와 같은 검사 시스템을 구성하여 시험을 수행하였다[4,5]. 본 검사 시스템은 현재 원전 증기발생기 전열관 와전류검사에 사용하고 있는 장비와 프로그램으로 구성하였다.

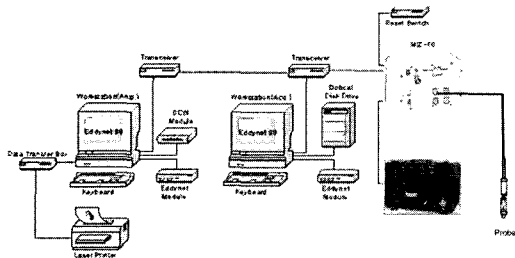


Fig. 5 Eddy current signal property test system configuration for Bobbin probe

3.2. 특성시험 시험편 설계

와전류검사에 사용하는 보정표준시험편은 항상 검사할 튜브와 같은 재질, 등급 및 치수로 제작되어야 한다. 또한 참조 결함 신호에 잡음이 포함되지 않도록 재료적인 열화가 없는 건전한 재료로 제작되어야 한다. 본 연구의 특성시험을 위해 3가지의 보정 표준시험편(Fig. 6 참조)을 설계 제작하였다. 증기발생기 전열관의 외부에 발생할 수 있는 균열 및 점식 등의 결함을 모의하기 위한 ASME 평저공(FBH, flat bottom hole) 보정표준시험편과 탐촉자 시작품의 특성시험을 위한 보정표준시험편을 설계 제작하였다. 그리고 보빈탐촉자의 절대형 검사시 비교시험편으로 사용되는 대비시험편을 설계 제작하였다.

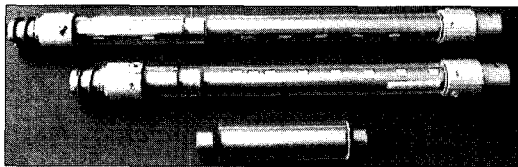


Fig. 6 Calibration Standard

Fig. 7에 탐촉자 특성시험용 보정표준시험편의 도면을 나타냈으며 Table 2에 특성시험용 보정표준시험편의 참조결함에 관련된 사항들을 요약하였다.

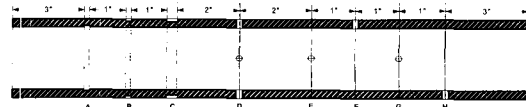


Fig. 7 Calibration standard drawing for bobbin probe property test

Table 2 The summary of property test calibration standard

| 대비 결함 | 위치 | 형태 | 깊이 | 치수 |
|-----------------|------------|--------------------------|------|---------|
| 내측(ID) 결함 | A | ID Groove | 10% | 0.05" |
| 외측(OD) 결함 | B | OD Groove | 20% | 0.05" |
| 절대형 측정을 위한 대비결함 | C | OD Wide Groove | 30% | 0.5" |
| 차동형 측정을 위한 대비결함 | D | 4 Holes, 90° 간격 | 100% | 4×0.05" |
| 중심화 측정 결함 | E, F, G, H | 4 Holes, 90° 간격, 축방향 4영역 | 100% | 4×0.05" |
| 건전 영역 | 끝단 | | | 2×3" |

3.3. 특성 실험 방법 및 결과

탐촉자 시작품 특성실험 수행을 위해 국내 증기 발생기 전열관 형상에 따라 4종류 시작품에 대하여 각 4개씩 제작하여 본 연구의 특성 실험을 수행하였다. 본 특성실험의 제한치는 EPRI 지침서와 ASME 코드요건에 따라 설정된 값이다.

3.3.1. 공명주파수 측정 실험

탐촉자 케이블이 길거나(약 10 m 이상) 고주파수(약 200 kHz 이상)를 적용할 때 감도가 최대로 발생하는 특정 주파수가 존재하는데 이를 공명주파수(resonance frequency)라 부른다[6]. 와전류신호는 공명주파수에서 감도가 최대로 발생하며 위상이 180° 반전되는 것을 알 수 있다. 공명주파수는 탐촉자의 검사 주파수를 정하는데 기준이 된다. 탐촉자가 설계 주파수범위를 벗어나 사용될 경우 결함검출 감도가 현저히 저하되며, 탐촉자 연장케이블은 탐촉자 주파수반응에 크게 영향을 미치므로 검사주파수 선정은 중요하다. Fig. 4의 전기적 특성 실험장치를 사용하여 교정시험편의 결함이 없는 건전부위에 탐촉자를 위치시킨 후 공명주파수를 측정하였다. 이때 측정주파수 범위는 검사대상 전열관의 조건에 따라 일정하게 정하며 일반적으로 약 300 ~

400 kHz 주파수범위를 사용한다. 측정된 공명주파수가 여러 개일 경우 첫 번째 발생하는 공명 주파수를 기준으로 하였다. 공명주파수는 검사 대상 증기발생기 전열관의 형상 및 재질에 따라 결정된 공명주파수를 적용하며 같은 종류의 전열관 검사에 사용될 탐촉자들은 평균 공명주파수의 $\pm 10\%$ 이내의 제한치를 나타내야 한다. 본 실험에 사용된 모든 시작품이 제한치 이내의 만족한 결과를 나타냈다. Fig. 8에 공명주파수 측정 그래픽 화면을 나타냈으며, Table. 3에 측정 결과를 나타냈다. 차동코일 보빈탐촉자는 두개의 코일로 구성되어 각 탐촉자에 대하여 두개의 단자를 측정해야 한다.

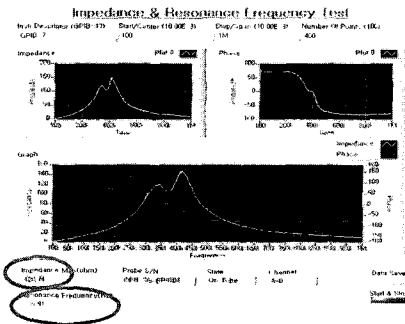


Fig. 8 Display for resonance frequency measurement

Table 3 Results of resonance frequency measurement

| 탐촉자 종류 | 단자 | 4개 탐촉자 측정 공명주파수(kHz) | | | |
|--------|-----|----------------------|-----|-----|-----|
| | | #1 | #2 | #3 | #4 |
| 시작품 1 | A-D | 336 | 336 | 336 | 336 |
| | B-C | 336 | 336 | 337 | 336 |
| 시작품 2 | A-D | 367 | 367 | 367 | 367 |
| | B-C | 367 | 367 | 367 | 367 |
| 시작품 3 | A-D | 390 | 390 | 390 | 390 |
| | B-C | 390 | 390 | 390 | 390 |
| 시작품 4 | A-D | 301 | 305 | 302 | 301 |
| | B-C | 301 | 305 | 302 | 301 |

3.3.2. 위상각 퍼짐(Phase Angle Spread) 측정 실험

와전류신호 위상각 퍼짐은 최적 주파수에서 차동형 모드 및 절대형 모드에 대해 측정한다. 이때 ASME 표준시험편의 100% 관통공과 20% 평저공(FBH) 신호 사이의 위상각 차이를 측정하며 50 ~ 120° 위상각 퍼짐이 이루어져야 한다. 결함에 대한 위상각대 결함크기 측정시 위상각 퍼짐이 클수록

공명이 향상되지만 와전류침투 깊이를 고려하여 적절하게 설계되어야 한다. Fig. 9에 위상각 퍼짐에 대한 ASME 코드요건을 나타냈다[7,8].

Fig. 10 및 Table 4에 국산화 시작품의 위상각 퍼짐 측정 그래픽 및 결과를 나타냈다. 측정 결과 국산화 제작한 4종류 증기발생기 전열관 검사용 보빈탐촉자는 105° ~ 119° 사이의 위상각 퍼짐을 나타냈으며, 상기 기준에 만족됨을 알 수 있다.

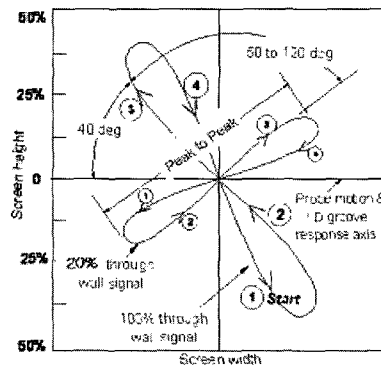


Fig. 9 Phase angle spread (ASME code requirement)

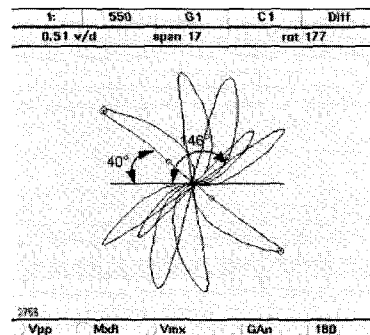


Fig. 10 Display of Phase angle spread for prototype bobbin probe

Table 4 Results of phase angle spread

| 탐촉자 종류 | 차동/절대 | 4개 탐촉자 위상각 퍼짐(°) | | | |
|--------|-------|------------------|-----|-----|-----|
| | | #1 | #2 | #3 | #4 |
| 시작품 1 | 차동 | 107 | 105 | 107 | 106 |
| | 절대 | 113 | 115 | 116 | 114 |
| 시작품 2 | 차동 | 106 | 105 | 107 | 106 |
| | 절대 | 111 | 109 | 107 | 108 |
| 시작품 3 | 차동 | 119 | 118 | 118 | 119 |
| | 절대 | 116 | 118 | 116 | 114 |
| 시작품 4 | 차동 | 110 | 109 | 110 | 110 |
| | 절대 | 113 | 115 | 111 | 115 |

3.3.3. 절대형 신호의 정확도 측정 실험

절대형 모드의 모든 검사주파수에서 신호의 정확도 측정을 수행한다. 절대형 모드는 일반적으로 결합의 형상을 예상할 수 있는 경우에 진폭대 결합크기 측정 기법 적용시 주로 사용한다. 시험편 결합의 2차 로브 진폭(A_s)과 1차 로브 진폭(A_m)를 측정한다. 1차 로브 진폭과 전체 신호 진폭(1차 로브 진폭 + 2차 로브 진폭) 사이의 진폭비(R_s)는 다음과 같은 식으로 계산하며, Fig. 11에 절대형 모드에서의 건전 및 불량 신호의 형상을 나타냈다.

$$R_s = \frac{100 \times A_m}{A_m + A_s} \quad (6)$$

A_m : 1차 로브의 원점대 첨두 진폭(volts)

A_s : 2차 로브의 원점대 첨두 진폭(volts)

R_s : 로브의 진폭비(%)

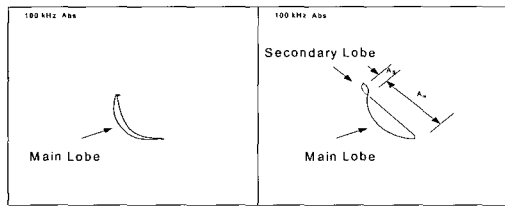


Fig. 11 Acceptable and unacceptable absolute signals

보빈 탐촉자의 절대형신호에서 2차 로브가 형성되지 않는 완벽한 신호는 로브의 진폭비가 100%가 되며, 합격기준은 최소한 90% 이상이 되어야 한다 [9]. Fig. 12에 국산화 시작품의 절대형 로브 측정 그래픽을 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 절대형 신호의 정확도 측정은 2차 로브가 모든 탐촉자에서 형성되지 않아서 100%를 나타냈다.

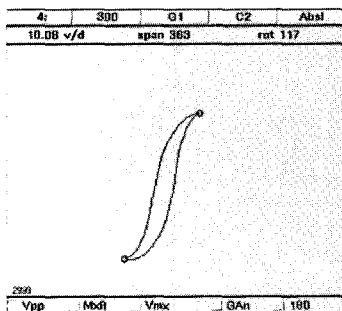


Fig. 12 Display of absolute signal for prototype bobbin probe

3.3.4. 차동형 신호의 대칭성 측정 실험

차동형 신호의 대칭성 측정 실험은 모든 검사주파수에서 측정한다. 검사주파수는 일반적으로 4개의 주파수가 사용되며, 기본주파수(f_0)는 검출결합의 크기 측정주파수이고 검출주파수(f_{90})는 기본주파수의 약 절반되는 주파수로 신호의 크기가 가장 큰 주파수이며 결합의 검출에 사용된다. 확인주파수(f_m)는 지시가 검출되면 결합지시인지 다른 이상지시인지를 확인하는 주파수이며, 분별주파수(f_l)는 저주파수(보통 증기발생기 전열관 검사의 경우 10 ~ 20 KHz 사용)로 전열관 외부의 구조물 위치를 분별하기 위해 사용된다. 차동형 모드에서 신호의 불균형(D_s)은 시험편 결합의 두개 신호 로브(첫 번째 로브와 두 번째 로브)의 진폭에 대한 차이를 나타내고, 첫 번째 로브의 첨두 진폭(A_1) 및 두 번째 로브의 첨두 진폭(A_2)를 측정하여 아래의 식을 사용하여 계산한다.

$$D_s = \frac{200 \times (A_1 - A_2)}{(A_1 + A_2)} \quad (7)$$

A_1 : 첫 번째 로브의 원점대 첨두 진폭(volts)

A_2 : 두 번째 로브의 원점대 첨두 진폭(volts)

D_s : 신호 불균형(%)

두개 로브의 진폭이 같으면 신호불균형은 "0"이며, 합격 기준은 20% 신호불균형 이하가 되어야 한다[9]. Fig. 13에 차동형 신호의 대칭성을 나타냈다.

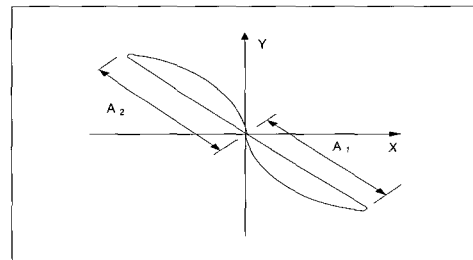


Fig. 13 Symmetry of a differential signal

Fig. 14에 보빈탐촉자 시작품의 차동형 신호에 대한 대칭성 측정 그래픽을 나타냈다. Table 5에는 시작품의 차동형 신호 로브 측정 결과를 나타냈다. 측정 결과 최대치는 12.31%로서, 모두 신호 기준치 20%보다 낮아 기준치를 만족하였다.

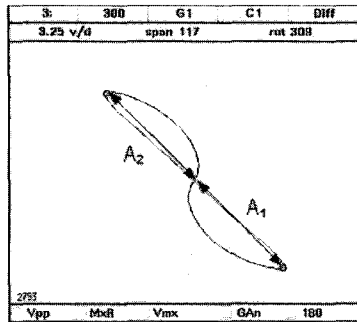


Fig. 14 Symmetry display of a differential signal for prototype bobbin probe

Table 5 Symmetry measurement results of a differential signal

| 탐촉자 종류 | 주파수 (kHz) | 4개 탐촉자 신호 불균형(%) | | | |
|--------|-----------------|------------------|------|-------|-------|
| | | #1 | #2 | #3 | #4 |
| 시작품 1 | f ₀ | 3.13 | 1.72 | 4.81 | 4.57 |
| | f ₉₀ | 0.95 | 0.91 | 0.32 | 2.80 |
| | f _m | 0.11 | 0.81 | 0.12 | 2.17 |
| | f _L | 2.74 | 0 | 1.31 | 5.19 |
| 시작품 2 | f ₀ | 8.30 | 8.68 | 12.31 | 11.90 |
| | f ₉₀ | 4.82 | 4.61 | 7.17 | 6.22 |
| | f _m | 3.80 | 3.83 | 5.46 | 5.07 |
| | f _L | 3.43 | 3.47 | 4.71 | 6.45 |
| 시작품 3 | f ₀ | 9.47 | 2.75 | 4.43 | 2.01 |
| | f ₉₀ | 8.25 | 0.56 | 1.79 | 1.97 |
| | f _m | 6.00 | 0.57 | 1.35 | 1.33 |
| | f _L | 5.00 | 0 | 0 | 0 |
| 시작품 4 | f ₀ | 5.82 | 5.75 | 11.12 | 2.16 |
| | f ₉₀ | 3.01 | 4.15 | 8.58 | 6.22 |
| | f _m | 3.19 | 4.98 | 6.95 | 5.52 |
| | f _L | 1.65 | 8.26 | 4.88 | 6.06 |

※ f₀ : 기본주파수, f₉₀ : 검출주파수(f₀/2),
 f_m : 확인주파수(f₀/4), f_L : 분별주파수(저주파수)

3.3.5. 탐촉자 중심화장치(Centering Device) 성능 측정 실험

탐촉자 중심화 장치 성능 측정은 차동모드의 기본주파수에서 수행한다. 측정은 시험편의 축방향으로 일정한 간격과 90° 방향으로 각각 분리된 인공 결함을 사용하여 수행한다. 네 개의 연속적인 결함에서 발생한 네 개 신호의 침두대 침두 진폭이 측정된다. 측정 분산도(D_i)는 네 개 신호의 평균 진폭(M)과 평균으로부터 최대 편차(D_{vmax})에 의해 계산된다.

$$D_i = 100 \times \frac{|D_{VMAX}|}{M} \quad (7)$$

M : 네 개 신호의 평균 진폭(volts)

D_v : 평균으로부터의 편차

D_i : 측정 분산도(%)

이상적인 중심화 장치는 측정 분산도가 0%이어야 하며, 합격기준은 15%이하 이어야 한다[9]. Fig. 15에 차동신호의 분산도의 예를 나타냈다.

Fig. 16에 시작품의 차동신호 분산도 측정 그래프를 나타냈다. Table 6에 시작품의 탐촉자 중심화 장치 성능 측정 결과를 나타냈으며, 측정 결과 최대치는 12.49%로서 모두 신호 측정 분산도 기준치 15%를 만족하였다.

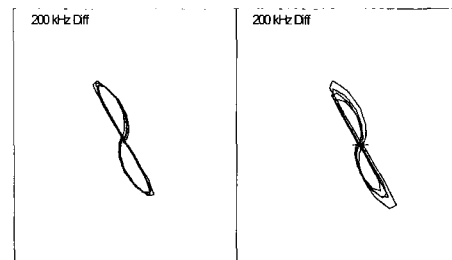


Fig. 15 High and low dispersion of differential signals showing the performance of centering devices

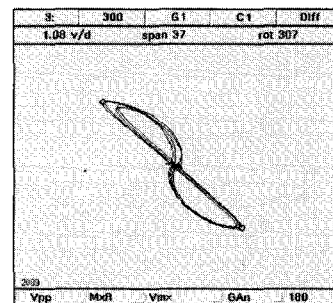


Fig. 16 Dispersion graphic display of differential signals for prototype bobbin probe

Table 6 Dispersion measurement results of a differential signal

| 탐촉자 종류 | 4개 탐촉자 측정 분산도(%) | | | |
|--------|------------------|-------|-------|-------|
| | #1 | #2 | #3 | #4 |
| 시작품 1 | 10.59 | 5.60 | 5.99 | 11.85 |
| 시작품 2 | 3.60 | 9.06 | 5.38 | 2.56 |
| 시작품 3 | 7.55 | 11.41 | 12.49 | 7.36 |
| 시작품 4 | 3.31 | 3.13 | 4.23 | 6.33 |

3.3.6. 탐촉자 내구성 실험

실제 크기의 증기발생기 Mock-up을 사용하여 탐촉자의 내구성을 시험하였다. 내구성 시험은 표준 시험편 혹은 시험용 시험편을 설계 제작하여 신호의 재현성평가 결과에 기초하였다. 연속적인 신호 취득 데이터를 검토하여 설정 위상각의 $\pm 5^\circ$ 변화 및 $\pm 20\%$ 진폭 변화 시점 전까지의 신호취득 전열관 수를 해당 탐촉자의 내구성 한도로 규정한다[2]. 본 연구 수행을 위해 곡률반경이 다른 실제 크기의 4개 전열관을 설치하여 실험을 수행하였다. Fig. 17에 내구성 실험 신호취득을 위해 설계 개발한 Mock-up과 전열관 설치도를 나타냈다. 전열관(약 12 m 높이)은 실험실 벽면에 설치하여 자동신호취득 시스템을 사용하여 검사하였다.

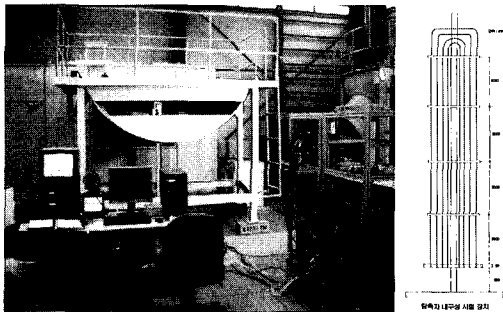


Fig. 17 Mock-up and real size tube specimen for probe durability test

내구성 시험 결과를 Table 7에 나타냈으며, 1000회 시험에서도 상기 기준치를 만족하였다.

Table 7 Durability test of prototype bobbin probe

| 전열관 검사 회수 | 위상각 변화($^\circ$) 기준: $35^\circ \sim 45^\circ$ | 진폭변화(V) 기준: 3.2V~4.8V |
|-----------|----------------------------------------------------|--------------------------|
| 1회 | 40 | 4.00 |
| 200회 | 39 | 4.01 |
| 400회 | 40 | 3.98 |
| 600회 | 41 | 4.04 |
| 800회 | 40 | 4.06 |
| 1000회 | 41 | 4.04 |

4. 결론

본 논문은 원자력발전소 증기발생기 전열관 와전류검사용 보빈탐촉자의 최적 설계 기준을 확립하기 위하여 전열관 재질 특성에 따라 보빈탐촉자 코일 권선수를 설계하였다. 또한 탐촉자 외경은 증기발생기 전열관 형상에 따라 충진율을 설계하였으며, 탐촉자 중심화 장치는 탐촉자의 전열관 삽입 인출시 흔들림을 방지하고 탄력성을 유지하도록 설계하였다. 탐촉자 케이블은 전열관 검사 조건에 맞는 길이와 강선을 삽입하여 내구성을 증대시켰다.

탐촉자의 전기적 및 와전류 신호특성을 분석하여 보빈탐촉자의 성능이 미국 전력연구원의 가압경수로 증기발생기 전열관 검사 지침서에서 제시한 기준치에 만족하였다. 시제품 탐촉자의 내구성도 만족한 결과를 도출하였다. 원전 증기발생기 전열관 와전류검사용 보빈탐촉자 설계 기술의 국산화로 향후 특수 와전류탐촉자 설계 기술의 개발이 가능하리라 생각한다.

참고문헌

- [1] ASNT, Nondestructive Testing Handbook. Vol. 4, Part 4, pp. 62, (1986)
- [2] EPRI, Pressurized Water Reactor Steam Generator Examination Guidelines: Revision 6, pp 6-19, (2002)
- [3] CGSB, Advanced Manual for : Eddy Current Test Method, pp. 74, (1986)
- [4] Zetec Inc., EddyNet 98 Analysis User Guide, (2002)
- [5] Zetec Inc., EddyNet 98 Acquisition Control Includes MIZ-70 & PM-3A User Guide, (2002)
- [6] EPRI, Electromagnetic NDE Guide for Balance-of-Plant heat Exchangers, Rev. 1, pp. 4-12, (1995)
- [7] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. V, Article 8, pp. 165-169, (1995)
- [8] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI, App IV, pp. 303, (1995)
- [9] EPRI, Eddy Current Data Quality Parameters for Inspection of Steam Generator Tubes, Vol. 1 : Bobbin Coil Probe, (2001)