

## 8×1 다중코일 와전류탐촉자를 이용한 원전 증기발생기 전열관 단면형상검사 기법 개발

### Development of Profile Technique for Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plants Using 8×1 Multi-Array Eddy Current Probe

남민우\*<sup>†</sup>, 이희종\*, 김철기\*\*

Minwoo Nam\*<sup>†</sup>, Heejong Lee\* and Cheolgi Kim\*\*

초 록 원전 증기발생기 전열관의 건전성을 평가하기 위해서 여러 가지 와전류검사 기법이 적용되고 있다. 이와 같은 와전류검사 기법중에서 보빈탐촉자 기법은 전열관에 발생할수 있는 축방향균열, 마모 검사에 적용하고 있으며, MRPC 기법은 튜브시트 상단 및 곡관부위 균열의 정밀검사에 적용된다. 원전 증기발생기 전열관의 설치공정 혹은 운전중에 전열관에 덴트(dent, 혹은 ding) 및 벌지(bulge)가 형성될 수 있으며, 와전류검사에서 이러한 지시는 결함으로 간주하지 않기 때문에 일정 크기 이상의 지시만 검사보고서에 기록하여 관리하고 있다. 이러한 지시는 보빈탐촉자 기법으로 용이하게 검출이 가능하고 보빈단면형상검사에 의해 대략적인 크기의 측정이 가능하지만, 정확한 크기 및 형상은 알 수는 없으므로 본 연구에서는 단면형상검사의 정확도를 증가시키기 위해 8×1 다중코일 탐촉자를 설계 개발하여 그 정확도를 평가하였다. 한편, OPR-1000형 증기발생기 전열관의 튜브시트 확관 천이영역에 형성된 덴트부위에 균열성 결함이 발생할 가능성이 높기 때문에 일부 발전소에서는 예방차원의 슬리빙을 수행하고 있다. 이와 같은 슬리빙 대상 전열관 선정시 본 검사 기법을 활용하면 유용할 것으로 판단된다.

주요용어: 증기발생기, 와전류검사, 8×1 다중코일 탐촉자, 교정표준시험편, 리프트-오프

**Abstract** Various ECT techniques have been applied basically to assess the integrity of steam generator tubing in nuclear power plant. Among these techniques, the bobbin probe technique is applied generally to examine the volumetric flaws such as a crack-like defect and wear which is generally occurred on steam generator tubing, and additionally MRPC probe is used to examine closely the top of tubesheet and bending regions due to the high possibility of cracking. Dent and bulge also may be formed on tube during installation process and operation of steam generator, but the dent and bulge indications greater than specific size criteria are recorded on examination report because these indications are not considered as flaw. These indications can be easily detected with bobbin probe and approximately sized with profile bobbin probe, but the size and shape can not be accurately verified. Accordingly, in this study, the 8×1 multi-array EC probe was designed to increase the measurement accuracy of the sectional profiling EC testing of tube. As a result, we would like to propose the application of 8×1 multi-array EC probe for the measurement of size and shape of profile change on steam generator tube in OPR-1000 nuclear power plant.

**Keywords:** Steam Generator, Eddy Current Testing, 8×1 Multi-Array Probe, Calibration Standard, Lift-off

1. 서론

원전 1차계통의 압력경계중 가장 취약한 부분인 증기발생기 전열관은 계획예방정비기간중에 건전성을 확인하기 위해 와전류검사를 수행하고 있으며, 현재 증기발생기 전열관 와전류검사에 적용되고 있는 검사기법은 크게 두 가지로 구분된다. 먼저 보빈탐촉자 검사는 매 계획예방정비기간에 기본검사로 증기발생기 전열관 전량에 대하여 수행되며, 모터구동팬케이크코일 탐촉자는 균열결함이 발생할 가능성이 큰 전열관 곡관 부위나 튜브시트상단 확관부위를 추가적으로 검사한다. 원전 증기발생기 전열관 설치 공정과정 혹은 운전중에 전열관에 덴트(dent) 및 벌지(bulge)가 형성될 수 있으며, 와전류검사에서 이러한 지시는 결함으로 간주하지 않기 때문에 일정 크기 이상의 지시만 검사보고서에 기록하여 관리하고 있다. 이러한 지시는 보빈탐촉자에 의한 검사시 쉽게 검출이 가능하고 보빈단면형상검사에 의해 대략적인 크기의 측정이 가능하지만 정확한 크기 및 형상은 알 수는 없다. 증기발생기 전열관 튜브시트 확관천이 영역에 발생한 덴트 및 벌지부위에 균열결함이 발생할 가능성이 크기 때문에 관리가 필요하다. 본 연구에서는 8×1 배열형 탐촉자를 설계·제작하여 인공적으로 가공한 덴트시험편을 사용하여 단면형상검사의 정확도를 분석하였으며, 또한 원전 증기발생기 전열관 현장 검사에 적용하여 덴트 및 벌지 등과 같은 형상변화를 더욱 정확하게 검출이 가능하며 크기측정이 가능함을 확인하였다. 이러한 검사 기술을 활용하면 원전 증기발생기 전열관 튜브시트 확관 천이영역에 발생하는 균열과 덴트와의 연관성 분석에 유용하게 사용되리라 판단된다.

2. 실험 준비

2.1. 8×1 다중코일탐촉자 설계 제작

2.1.1. 탐촉자 설계 이론

리프트-오프(lift-off)효과를 이용한 브리지형 와전류 단면 형상 검사 탐촉자는 Fig. 1과 같은 휘스톤브릿지 회로로 구성된다. 탐촉자 원주방향으로 8개의 표면코일을 배치하여 시험체와 탐촉자간의 리프트-오프에 의한 코일 임피던스 변화를 측정하여

원주형 튜브 내면에 발생한 단면변화를 검사한다. 탐촉자 코일이 공기중에 있는 상태에서는 회로가 평형상태를 이루고 있다가(A, C점 사이의 전위차가 없음,  $V=0$ ) 코일에 튜브를 접근시키면 임피던스  $Z$ 가 변하게 되어 평형이 깨져 전류가 흐르게 된다. 즉, 회로가 평형상태에서  $I_1 Z_1 = I_2 Z_2$ ,  $I_1 Z_3 = I_2 Z_4$ 가 되어 다음식이 얻어진다.

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \tag{1}$$

식 (1)에서 인접한 한쌍 팔의 임피던스비는 평형되어야 할 다른 인접한 팔의 임피던스 비와 같아야 되고 이때 브릿지 회로는 평형이 이루어진다.

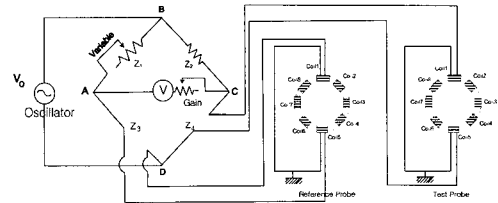


Fig. 1 Bridge circuit of 8×1 multi-coil probe

만약  $\frac{Z_1}{Z_2} > \frac{Z_3}{Z_4}$  이면 "C"점의 전위는 "A"점의 전위보다 높다. 이것은  $Z_1, Z_2, Z_3$ 가 일정하고  $Z_4$ 가 증가할 경우 (즉 코일이 결함을 통과할 때) 브릿지 회로의 불평형량은 증가하게 되고, 반대로  $Z_2$ 가 증가하면 불평형량은 감소한다. 이와 같은 불평형 브릿지 회로의 특성에 따라 탐촉자가 국부 결함을 통과하게 될 때 와전류신호가 생성되게 된다. 또한, 검사 코일이 고주파수(100 kHz 이상)에서 사용되거나 긴 탐촉자 케이블을 사용해야 하는 원격검사에는 검사코일과 케이블간의 공진을 고려해야 하는데 일반적으로 공진주파수에서 최대의 진폭이 얻어지고 위상각이 180° 반전된다. 공진은 아래 식 (2)에서와 같이 코일의 유도성 리액턴스가 케이블의 용량성 리액턴스와 동일하게 될 때 발생한다.

$$\omega L = 1/\omega C \tag{2}$$

$\omega$  : angular frequency, rad/sec

L : 코일 인덕턴스(H)

C : 케이블 총 정전용량(F)

식 (2)에서 각주파수  $\omega$ 는 식 (3)으로 표현된다.

$$\omega = 2\pi f \tag{3}$$

f : 주파수(Hz)

식 (3)을 식 (1)에 대입하여 탐촉자-케이블 공진 주파수 계산식은 (4)가 된다[1].

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

탐촉자 성능은 공진점 이상에서는 용량성 리액턴스가 감소하여 더욱 악화되고 전류는 코일보다 케이블을 더 흐르게 된다. 따라서, 탐촉자 공진주파수를 높게 유지하여 유도성결합이 넓은 주파수범위에서 이루어지도록 하는 것이 바람직하다.

2.1.2. 탐촉자 코일 설계 제작

단면 형상 검사용 탐촉자는 탐촉자 몸체 내부 원주방향으로 8개의 표면코일을 배치해야 되기 때문에 8개 코일의 외경 크기가 제한될 수 밖에 없다. 따라서, 제한된 코일 크기에서 가능한한 큰 인덕턴스를 발생시키기 위해 미국 Pyroferric사의 페라이트코어를 코일내부에 삽입하였으며, 코일의 충진율은 84%를 적용하여 탐촉자 외경을 설계하였다. 탐촉자 케이블은 원격검사에 필요한 길이로 약 15.24 m의 RG 174 동축 케이블(C값 : 101 pF/m)을 사용하였다. 시험 주파수는 계산식 (5)을 이용하여 구하였다[2].

$$f = 1.6 \rho / t^2 \cdot \text{kHz} \quad (5)$$

t : 시험체 두께(mm),

ρ : 전기 저항치(μΩ · cm), f : 주파수(kHz)

위의 식에 증기발생기 전열관재질인 인코넬 600의 벽두께 t = 1.067 mm, ρ = 98 μΩ · cm을 대입하여 탐촉자 연장케이블이 연결되지 않은 상태에서의 시험주파수를 구하면

f = (1.6 × 98) / (1.067)<sup>2</sup> = 138 kHz가 된다. 탐촉자에 연장케이블을 연결하여 사용할 때 공진주파수는 평형을 고려하여 보통 시험주파수의 약 1.25배가 되도록 탐촉자를 설계하므로 공진주파수(f<sub>res</sub>)는 다음과 같이 선정하였다.

$$f_{res} = 1.25 \cdot f = 1.25 \times 138 = 172.5 \text{ kHz}$$

상기의 이론 공진주파수(172 kHz)와 케이블의 정용량(C)을 식 (2)에 대입하여 인덕턴스(L)를 구한 다음 이에 상응한 코일 내외반경, 두께를 결정하고 다음 식 (6)을 사용하여 권선수를 계산하였다 [3,4].

$$L = \frac{0.8(N\ell)^2}{6r+9\ell+10b} \quad (6)$$

L= 자기 인덕턴스(μH)

N= 총 권선수

r= 평균 반경(inch)

b= 코일 굵기(inch)

본 연구에서 계산된 권선수에 따라 air core 표면코일과 ferrite core 표면코일을 설계 제작하였으며, Fig. 2에 ferrite core 표면코일의 단면도를 나타냈다.

상기의 두가지 표면코일의 공진주파수를 측정하여 그 결과를 Table 1에 나타냈다. 즉 코어를 삽입한 표면코일은 코어가 삽입되지 않은 코일보다 공진주파수가 약 2배로 증가됨을 알 수 있었다.

Fig. 3에 8×1 단면형상검사용 탐촉자 구조를 나타내는 형상을 나타냈다. 이 그림에서 탐촉자 중심화 장치(F-Guide)는 전열관 내부에서 탐촉자가 이동할 때 편심되지 않고 동심을 유지하도록 하는 부품이다. Fig. 4는 제작 완성된 탐촉자이다.

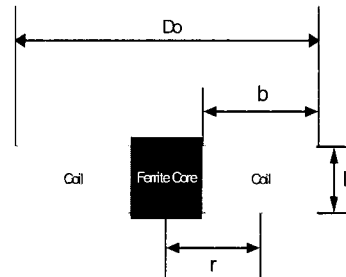


Fig. 2 Cross section of ferrite-core probe coil

Table 1 Probe coil characteristics

Coil Type	Diameter (D <sub>o</sub> , mm)	Length (ℓ, mm)	공진주파수 (kHz)
Air Core	3.7	2.1	212
Ferrite Core	4.1	2.1	398



Fig. 3 Detailed design of 8×1 multi-coil probe head

2.2. 시험편 설계 제작

실험용 단면형상검사 교정표준시험편은 인코넬 600 재질로 제작한 미국 Zetec사의 시험편을 사용하였다. 탐촉자의 정확도 분석을 위해서 건전한 전열관에 여러 가지 크기 및 형상별 덴트를 가공한 덴트 시험편을 제작하였다. 덴트 시험편은 8개의 덴트를 가공하여 다중코일 단면 형상 검사의 크기 측정 정확도 실험에 사용하였다. Fig. 5에 단면형상 검사용 교정표준시험편의 도면을 나타냈고, Fig. 6에 덴트 시험편 도면을 나타냈다. 실험 및 현장 검사에 사용된 건전 전열관 사양을 Table 2에 나타냈다.

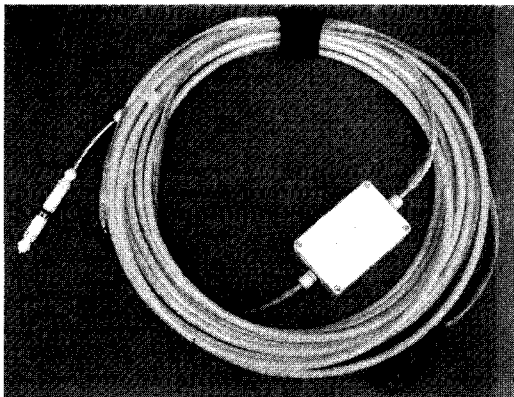


Fig. 4 Prototype of 8x1 multi-coil probe

Table 2 Characteristics of test tube

(Unit : mm)

Material	Tube OD	Tube Thickness	Tube ID
Inconel 600	19.05	1.0668	16.916

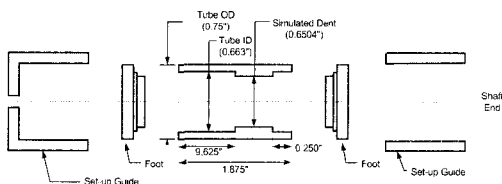


Fig. 5 Configuration of profile test-jig

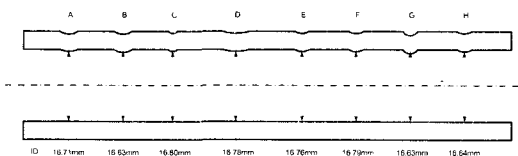


Fig. 6 Drawing of dent specimen

3. 실험 방법

3.1. 단면형상검사의 정확도 실험

단면형상검사의 정확도 시험에 사용된 주파수 발생장치는 64채널 용량으로 주파수 대역이 10 kHz~1 MHz인 미국 Zetec사의 Miz-30을, 신호수집 및 분석장치로는 Zetec사의 EddyNet 프로그램의 다중코일 단면형상 모듈을 사용하여 Fig. 7과 같은 검사 시스템을 구성하였다[4,5]. 먼저 단면형상검사용 교정표준시험편의 신호를 취득하여 신호설정을 수행한 후 덴트 시험편의 8개 덴트 신호의 실측치와 와전류신호평가 결과를 비교 분석하였다. 또한 현재 원전 증기발생기 전열관 튜브시트 환관권이 영역의 검사에 사용중인 보빈 단면형상검사 결과와 다중코일 단면형상검사와 정확도를 비교 분석하였다. 본 실험에 사용된 주파수는 기본주파수로 600 kHz를 사용하였다. 신호평가를 위한 신호 설정은 Fig. 8처럼 덴트 신호를 수직으로 조정하고 신호의 크기는 8개 코일이 일정한 크기가 되도록 조절하였다. 탐촉자 제작시 8개 코일의 전기적 특성을 일정하게 제작하기 어렵기 때문에 각 코일에 가

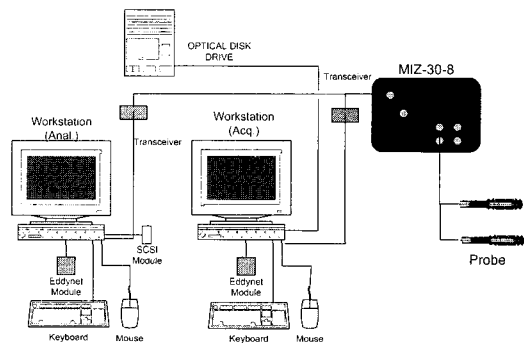


Fig. 7 Eddy current test system configuration for multi-coil probe

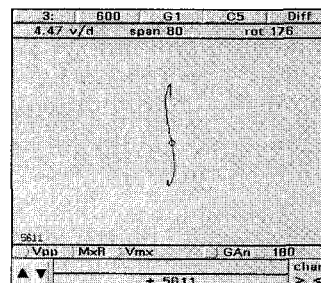


Fig. 8 Dent signal of profile setup standard

변저항을 설치하여 조절하지만 와전류신호의 민감성으로 약간의 차이가 발생한다. 따라서 디스플레이 화면에서 8개 코일의 신호 크기를 다시 일정한 정도로 조절하면 신호크기 측정의 정확도를 향상시킬 수 있다.

### 3.2. 현장 적용 검사

8×1 다중코일을 사용한 현장 검사는 보빈탐촉자에 의한 현장검사에서 검출된 덴트 및 벌지 신호를 대상으로 단면형상검사를 수행하였다. 현장검사에 사용된 교정표준시험편도 정확도 실험에 사용된 동일한 시험편을 사용하였다. 증기발생기 전열관 단면형상검사는 총 20개 전열관을 선정하여 고온관 1번 튜브지시편까지 검사하였으며, 검사에 사용된 장비는 미국 Zetec 사의 Miz-70과 Eddytest 프로그램을 사용하였다.

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1. 단면형상검사의 정확도 실험

단면형상검사용 교정표준시험편의 덴트 신호를 사용하여 신호설정을 수행한 후 덴트 시험편의 8개 가공 덴트에 대한 단면형상 신호를 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9에서 알 수 있듯이 8×1 다중 코일에 의한 단면형상검사는 형상을 3차원으로 나타낼 수 있으며, 국부적으로 단면의 최소, 평균 및 최대 외경을 표시할 수 있으므로 기하학적 변화를 정확하게 표현할 수 있다.

Table 3에 덴트 시험편의 측정치와 단면형상검사 결과를 나타냈으며, Fig. 10에 덴트 크기 측정의 회귀선도를 나타냈다. Table 3에서 덴트 시험편의 각각의 덴트에 대한 실제 측정외경과 단면형상검사의 측정 외경에 대한 평균 오차는 ±0.03 mm의 정확도를 나타냈다. Fig. 10에 회귀선도에서 덴트가 작을 경우 약간 과소 측정되었지만, 큰 덴트에 대해서는 측정 오차가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한 회귀선도에 대한 상관계수는 0.916로 양호함을 나타냈다.

8×1 다중코일 단면형상검사와 증기발생기 전열관 단면형상검사에 일반적으로 적용되고 있는 보빈코일에 의한 단면형상검사 결과를 비교하기 위해 덴트 시험편을 사용하여 실험하였다. Fig. 11에 보

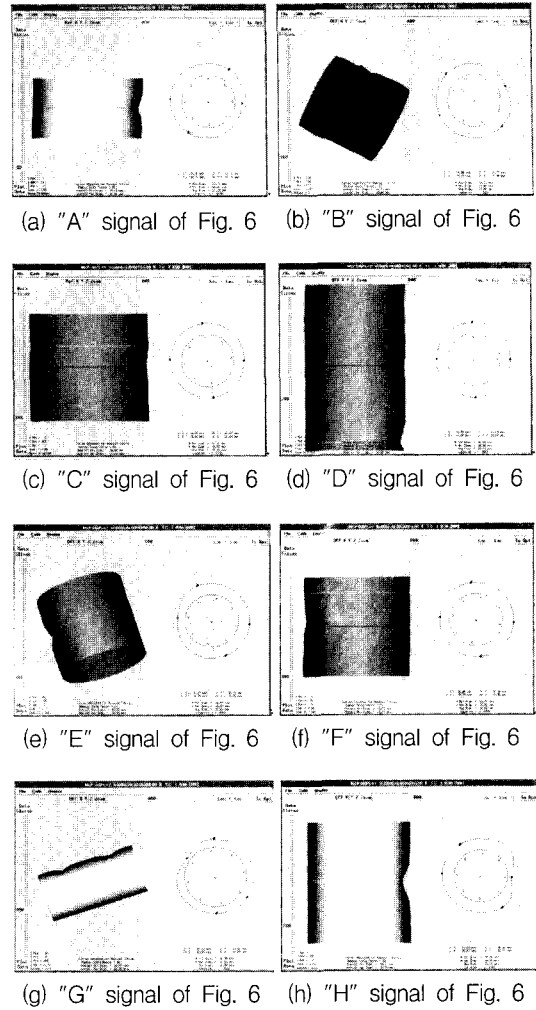


Fig. 9 Profile signals of dent specimen using prototype multi-coil probe

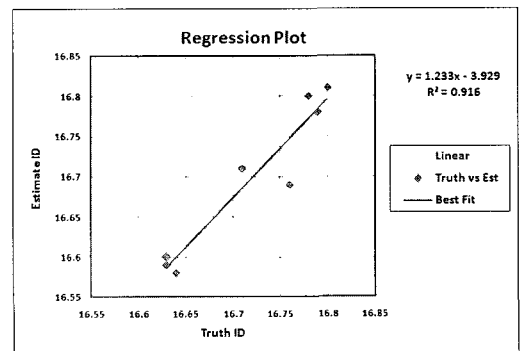


Fig. 10 Regression plot showing dent sizing capability for the dent specimen using prototype multi-coil probe

빈코일에 의한 덴트 시험편의 단면형상검사 신호를 나타냈고, Table 3에 측정 결과를 나타냈다. Fig. 11에서 보빈코일에 의한 단면형상검사는 시험편의 8개 덴트에 대하여 명확히 검출이 가능하지만 국부적인 덴트 크기 측정은 불가능하다. 다만 Table 4에 검사 측정 외경은 덴트 부위의 평균치를 나타낸다. 8×1 다중코일은 8개 각각의 코일이 검사체와 코일 사이의 리프트 오프를 측정하지만 보빈코일은

원주방향으로 1개 코일이 측정에 사용되기 때문에 평균치를 측정한다. 따라서 현장 증기발생기 전열관 검사에서 보빈코일에 의한 단면형상검사는 형상변화를 검출하고 대략적인 크기를 파악할 수 있고, 국부적인 형상이나 정확한 크기를 측정하기 위해서는 다중코일에 의한 단면검사가 이루어지는 것이 바람직하다.

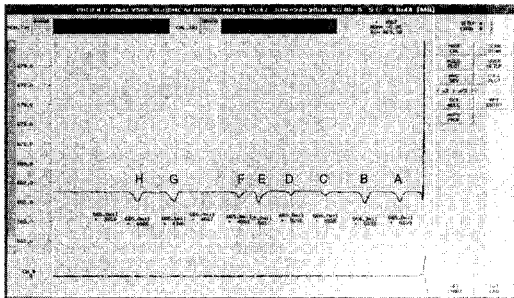


Fig. 11 Profile signals of dent specimen using bobbin probe

#### 4.2 현장 적용 검사

8×1 다중코일 단면 형상 검사 기술의 현장 적용 검사를 OPR-1000형 증기발생기 전열관 20개를 선정하여 수행하였다. 보빈코일 검사 결과 전열관 튜브시트 내부 및 확관 천이영역에 벌지 및 덴트가 발생한 10개 전열관과 진전 전열관 10개를 선정하여 검사를 수행하였다. 형상변화가 발생한 10개 세관에 대한 보빈코일 단면 형상 검사와 8×1 다중코일 단면형상검사 결과를 Table 5에 나타냈다. 보

Table 3 The results of profile measurement for the dent specimen using prototype multi-coil probe (Unit: mm)

Dent No.	A	B	C	D	E	F	G	H
Real inside diameter	16.71	16.63	16.80	16.78	16.76	16.79	16.63	16.64
Measured inside diameter	16.71	16.60	16.81	16.80	16.69	16.78	16.59	16.58

Table 4 The results of profile measurement for the dent specimen using bobbin probe

(Unit: mm)

Dent No.	A	B	C	D	E	F	G	H
Inside diameter measured by multi coil(mean)	16.79	16.80	16.83	16.83	16.80	16.82	16.80	16.79
Inside diameter measured by bobbin coil(mean)	16.89	16.86	16.90	16.90	16.89	16.90	16.89	16.89

Table 5 The results of profile measurement for bobbin probe and 8×1 multi-coil probe

(Unit : mm)

S/G No	Row	Col	Results by bobbin coil	Results by 8×1 multi coil		Flaw type
			Average I.D.	Average I.D.	Min./max. ID	
1	45	55	17.22	17.39	17.50	Bulge
1	64	98	16.80	16.62	16.43	Dent
1	66	98	16.88	16.83	16.70	Dent
1	63	99	16.85	16.74	16.63	Dent
1	65	99	16.87	16.81	16.60	Dent
1	64	100	16.84	16.74	16.63	Dent
2	57	51	17.28	17.46	17.51	Bulge
2	56	54	17.35	17.46	17.53	Bulge
2	69	89	16.89	16.86	16.73	Dent
2	68	94	16.88	16.84	16.73	Dent

빈 코일 검사 결과 10개의 건전한 전열관은 8×1 다중코일 검사에서도 모두 건전하였다. Table 5의 벌지 지시는 튜브시트 내부에 발생하였고, 덴트 지시는 확관천이 영역에 발생한 지시이다. 보빈코일 단면 형상 검사는 전열관의 국부적인 평균 내경을 나타내고, 8×1 다중코일 단면 형상 검사는 평균, 최소 및 최대 내경을 측정할 수 있다. 벌지는 최대 직경을 나타냈고, 덴트는 최소 직경을 나타냈다. 검사 결과 8×1 다중코일 단면 형상 검사에 비해 보빈코일 단면 형상검사의 경우 벌지와 같이 전열관 외부로 돌출된 지시는 평균 내경이 작게 측정되고, 덴트와 같이 전열관 내부로 눌린 지시는 오히려 평균 내경이 크게 측정됨을 알 수 있다. 지시의 검출은 두 가지 검사에서 모두 동일하게 검출이 가능함을 알 수 있었고, 국부적인 정확한 형상 및 크기측정을 위해서는 8×1 다중코일 검사를 수행해야 한다.

Fig. 12에 8×1 다중코일 검사 신호 형상을 나타냈고, (a) 와 (b)는 튜브시트 확관부위에 발생한 덴트 형상이며, (b)와 (c)는 튜브시트 내부에 발생한 벌지 신호 형상이다. (a)의 형상은 전열관 양측에 덴트가 형성되었고, (b)의 형상은 한쪽 방향으로 덴트가 형성되었다. (c)의 벌지 형상은 한쪽 방향으로 돌출되었고, (d)의 벌지 형상은 전열관 원주방향 전체적으로 돌출한 것을 알 수 있다. 이러한 벌지 신호는 튜브시트 가공과정에서 불균일 가공으로 발생한 것으로 추정된다.

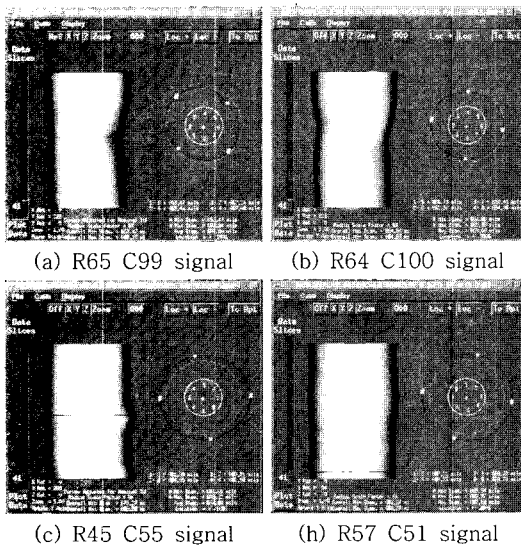


Fig. 12 Profile signals of S/G tubes using prototype multi-coil probe

## 5. 결론

본 연구는 원전 증기발생기 전열관 튜브시트에 발생한 덴트 및 벌지의 국부적인 형상 및 크기측정을 위한 8×1 다중코일 단면 형상용 와전류탐촉자를 설계 개발하였다. 원주방향으로 8개의 코일을 부착하기 위해서는 팬케이크 코일의 크기를 작게 해야 한다. 작은 코일로 임피던스의 크기를 증가시키기 위해 팬케이크 코일의 중심에 페라이트 코어를 삽입하여 설계 제작하였다. 8개의 덴트를 임의로 가공한 덴트 시험편을 사용하여 실측치와 개발한 8×1 다중코일 탐촉자 검사 지시를 비교하여 크기측정 정확도 실험을 수행하였다. 정확도 측정결과 덴트의 경우  $\pm 0.03$  mm의 평균 오차를 나타냈다. 또한 현재 현장 검사에 적용하고 있는 보빈코일 단면 형상 검사 결과와 비교 검토하였으며, 실제 현장 검사를 수행하였다. 보빈코일에 의한 단면 형상검사는 전열관에 발생한 덴트 및 벌지와 같은 형상변화 지시의 검출은 가능하지만 정확한 3차원 형상 및 국부적인 정확한 측정은 불가능하다. 따라서 현장에서 기본적으로 전체 전열관 검사에 적용되고 있는 보빈검사 결과 결합이 아닌 왜곡된 지시의 검출시 8×1 다중코일 단면 형상 검사를 수행하면 정확한 형상 변화를 측정할 수 있다. 이러한 검사 기술을 활용하면 원전 증기발생기 전열관 튜브시트 확관 부위에 발생하는 균열과 덴트와의 연관성 분석에 유용하게 사용되리라 판단된다.

## 참고문헌

- [1] CGSB, Advanced Manual for : Eddy Current Test Method, pp. 74, (1986)
- [2] EPRI, Electromagnetic NDE Guide for Balance-of-Plant Heat Exchangers, Rev. 1, pp. 4-12, (1995)
- [3] ASNT, Level III Study Guide, pp. 1-2, (1983)
- [4] 이희중, 남민우, 김용식, "원자력발전소 제어봉 상태진단 기술개발", 최종연구보고서, 전력연구원, 1997
- [5] Zetec Inc., EddyNet 98 Analysis User Guide, (2002)
- [6] Zetec Inc., EddyNet 98 Acquisition Control Includes MIZ-70 & PM-3A User Guide, (2002)