

증기발생기 전열관의 비파괴 탐상용 차등형 와전류 탐촉자 개발

정선영 · 손대락*

한남대학교 광·전자물리학과, 대전시 대덕구 오정동 133, 306-791

유권상

표준과학연구원, 대전시 유성구 도룡동 1번지, 305-600

박덕근

한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150번지, 305-353

(2005년 8월 1일 받음, 2005년 10월 14일 최종수정본 받음)

원자력 발전소 증기발생기의 전열관은 전열면으로서의 역할과 방사능 차단벽의 역할로서 중요하며, 증기발생기 튜브의 폭발은 원자력 발전소 사고에 관계된다. 증기발생기 전열관 재료로는 Inconel600이 사용되고 있으며, 이 재료가 금속이면서 비자성이기 때문에 와전류 탐상법으로 전열관의 결함을 탐지하고 있다. 본 연구에서는 탐상 감도를 향상시키기 위하여 차등형 와전류 탐촉자를 개발하였으며, 개발된 차등형 와전류 탐촉자의 성능검사를 위해 Inconel600과 자기적 성질이 비슷하고 구하기 쉬운 SUS304로 가로 100 mm, 세로 100 mm, 그리고 두께 10 mm인 평판에 선형결합과 원형결합을 가공하여 기준시편으로 제작하였다. 제작된 차등형 와전류 탐촉자를 사용하여, 자화주파수 50 kHz, lift-off 0.4 mm에서 직경이 0.25 mm이고, 깊이가 0.2 mm 크기의 결함까지 측정이 가능하였다.

주제어 : 비파괴탐상, 와전류 탐상, 원자력발전소, 증기발생기, Inconel600, 전열관

I. 서 론

최근 산업고도화가 진행됨에 따라 구조물과 공업제품 등이 대형화 되고, 복잡화 되는 추세이며, 이에 따라 안전기동과 재해방지를 위해 안전관리가 요구되고 있다. 따라서 대형사고를 미연에 예방하고 구조물의 안정성 확보를 위해 비파괴 시험에 대한 관심이 증대되고 있다[1].

특히 원자력 발전소의 증기발생기 전열관은 1차 핵증기 발생계통으로부터 2차 터빈 계통에 열을 전달하는 전열면으로서의 역할 및 방사능 차단벽으로서의 중요한 기능을 동시에 가지고 있기 때문에 발전소의 안전성 및 가동성의 확보를 위해서는 증기발생기 튜브의 건전성 확보가 필수적이다. 따라서 발전소 현장에서는 와전류탐상검사를 통한 비파괴 검사방법이 사용되고 있다[2-7].

현재 증기발생기 전열관의 결함 탐상 목적으로 이용되는 와전류 방법으로는 증기발생기 전열관의 축 방향 결함 탐지를 위해 bobbin probe로 1차 검사를 하며, 원주방향 결함 탐지를 위해 MRPC(Motorized Rotating Pancake Coil) 방법으로 2차 검사를 하고 있다[8-10].

본 연구에서는 현재 사용되고 있는 와전류 비파괴 검사보

다 분해능을 향상하며 현재의 분해능으로 탐지가 어려운 더 작은 결함을 탐지할 수 있는 센서의 원리를 개발하는데 있다.

II. 센서의 측정 원리

코일에 교류전류를 흘려주어 발생된 자기장을 도체에 적용하면, 자기선속의 시간적 변화율에 비례하여 Faraday 전자기 유도법칙에 의하여 도체 내에 기전력이 발생되고 이 기전력에 의하여 발생하는 도체내의 전류를 와전류라 한다. 이 와전류에 의한 자기장은 외부에서 인가하는 자기장을 방해하는 방향으로 발생하게 되며 이를 렌쯔의 법칙이라 한다. 따라서 결함 등에 의하여 와전류 생성의 변화가 생기게 되며, 이 변화를 측정하는 것이 와전류탐상이다. 맥스웰 방정식으로부터 와전류는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{\nabla} \times \vec{J} = -\sigma \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, J 는 전류밀도, B 는 자속밀도이다. 와전류 탐상의 원리는 결함에 의한 유효 전기전도도 σ 의 변화나 시험 대상체의 변형력이나 상변화 등에 의한 투자율 $\mu=B/H$ 의 변화에 따른 와전류의 변화를 측정한다.

본 연구에서는 3개의 코일을 사용하여 차등형 와전류 탐촉

*Tel: (042) 629-7512, E-mail: deracson@mail.hannam.ac.kr

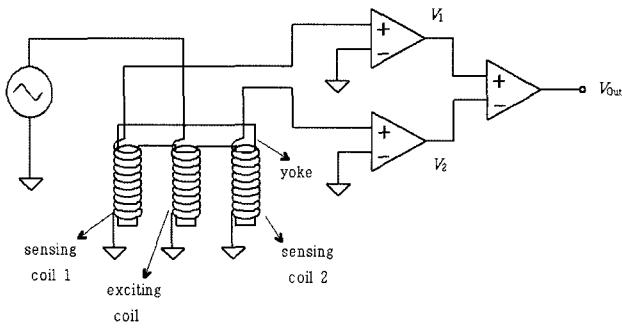


Fig. 1. Block diagram of the differential type eddy current probe.

자를 제작하였다. 이 중 가운데 위치한 코일은 여자코일 (exciting coil)로써 자기장을 발생시키며, 양 바깥쪽의 코일은 감지코일(sensing coil)로써 두 감지코일의 자속변화 차이를 비교 검출한 방법이다[Fig. 1].

만일, 결함이 없는 부분에서 차등형 와전류 탐촉자가 위치한다면, 양 바깥쪽의 감지코일에서는 동일한 크기의 기전력이 유도되고, 그 차이는 '0'이 된다. 그리고, 결함이 자화코일 부분에 존재할 때도, 감지코일에서는 동일한 크기의 기전력이 유도되어 그 차이는 '0'이 된다. 그러나 만일, 두 감지코일 중 어느 하나의 감지코일 부분에 결함이 존재한다면 양쪽 감지코일에서는 유도된 기전력의 차이가 발생되어 그 차이만큼 출력신호를 발생하도록 하였다. 그리고 두 감지코일 중 어느 부분에 결함이 위치하였는지에 따라 그 위상은 180도 위상 차이가 난다.

III. 측정 장치 구성

3.1. 기준시편 제작

본 연구에서는 증기발생기 전열관의 비파괴 탐상을 위한 목적으로 기준시편을 제작하였다. 증기발생기 전열관의 재료는 Inconel600으로써, 스테인리스 스틸강이며, 자기적 특성은 투자율이 1.01인 상자성체이다. Inconel600의 화학조성은 Ni이 74.55%로써, Table I과 같다. 기준시편 제작에 있어서, Inconel600의 평판시편 구입에 어려움이 있어서 Inconel600과 자기적 성질이 비슷한 비자성체인 SUS304를 사용하였다. SUS304는 Inconel600과 마찬가지로 스테인리스 스틸이며, 그 투자율은 1.02로써 비자성이다.

SUS304로 제작한 기준시편의 크기는 가로 100 mm, 세로

Table I. Chemical composition of the Inconel600 alloy.

Element	Cu	Mn	Si	C	Fe	Cr	Ni	P	S
Inconel 600	0.05	0.32	0.31	0.009	8.15	16.5	74.55	-	-

Table II. Dimensions of artificial defects of the reference specimen.

	Length (mm)	Width (mm)	Depth (mm)
A1	4	0.2	0.4
A2	4	0.2	0.3
A3	4	0.1	0.2
A4	4	0.1	0.1
B1	2	0.2	0.4
B2	2	0.2	0.3
B3	2	0.1	0.2
B4	2	0.1	0.1
C1	0.5 ϕ	-	0.4
C2	0.5 ϕ	-	0.3
C3	0.5 ϕ	-	0.2
C4	0.5 ϕ	-	0.1
D1	0.25 ϕ	-	0.4
D2	0.25 ϕ	-	0.3
D3	0.25 ϕ	-	0.2
D4	0.25 ϕ	-	0.1

100 mm, 두께, 10 mm로써 인공결함은 선형결함과 원형결함으로 하였으며, 그 결함의 치수는 Table II와 같다. 각 결함의 간격은 각각 20 mm 간격으로 하였다. 그리고 가공된 기준시편의 가공정밀상태를 확인하기 위해 stereo zoom scope (OSM-1U)를 가지고 20배 확대하여 육안으로 확인해 보았다.

3.2. 차등형 와전류 탐촉자 제작

센서의 크기는 와전류의 발생 범위와 관련 있으며, 만일 센서의 크기가 크다면, 발생하는 와전류의 범위도 넓다. 즉, 여자코일에서는 발생된 와전류의 범위가 넓기 때문에 넓은 영역의 측정이 가능하다. 그러나 상대적으로 분해능은 낮아지게 된다. 본 연구에서 센서의 크기는 Fig. 2와 같이 8.5 mm×12 mm×6 mm으로 제작하였다. 코일은 규소강판(PN-18)을 적층한 후 방전 가공하여 "E"자형으로 제작하였으며, 각 풀마다 직경 0.15 mm의 코일을 100회 권선하였다.

3.3. 탐촉자의 전자회로 설계

차등형 와전류 탐촉자에서 가운데 코일은 여자코일로써, 함

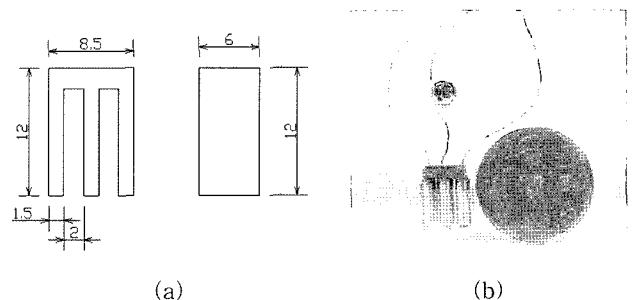


Fig. 2. Differential type of eddy current probe; (a) schematic diagram, (b) photograph.

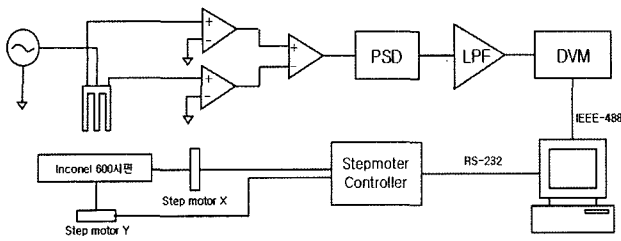


Fig. 3. Block diagram of the measuring system.

수발생기를 사용하여 교류자기장을 발생시켰으며, 감지코일은 양 바깥쪽의 코일로써 기전력 차이를 측정하기 위한 회로에 연결시켰다. 그러나 감지코일은 결함이 없는 상태에서 동일한 출력신호를 얻어야 하므로 가변저항을 사용하여 증폭기의 이득을 조절할 수 있도록 하였다.

두 감지코일에서 측정된 신호는 버퍼 앰프를 통과하도록 하였으며, 양 감지코일에서의 전압차이를 측정할 수 있도록 연산증폭기를 이용하여 차등증폭기 회로로 구성하였다. 차등증폭기 출력전압은 결함 위치가 어느 감지코일에 위치하였느냐에 따라 180도 위상차를 보이게 되는데, 이를 측정하기 위해 같은 주파수에서, 같은 위상의 신호만을 얻는 lock-in 증폭기 회로를 구성하였다. 여기에서 측정된 전압값은 저대역필터 (Low-Pass-Filter)를 통해 DC 전압으로 출력되도록 하였으며, 이 전압값은 DVM (HP3457A)으로 측정하였다.

Fig. 3는 측정 장치의 계략도이다.

3.4. X-Y 탐상대 및 VEE 프로그램

본 연구에서는 기준시편의 인공결함을 스캔하기 위한 목적으로 X-Y 탐상대를 사용하였으며, 와전류를 이용한 비파괴 탐상 실험에서 lift-off 효과에 대한 측정오차가 발생할 수 있기 때문에 측정하는 동안 탐상면과 측정 탐촉자 간의 lift-off는 일정하게 유지되어야 한다. 따라서 탐상대에서 탐상면과 탐촉자 간의 간격을 두께 게이지를 사용하였으며, 측정 전 면

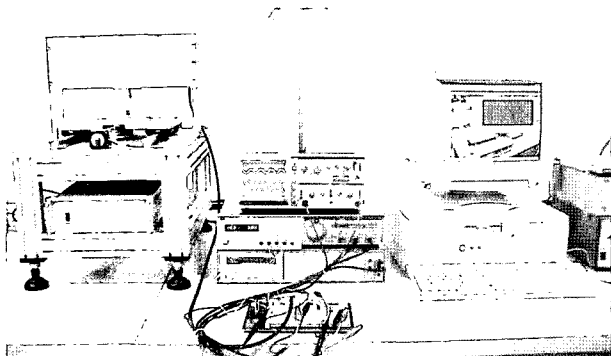


Fig. 4. Photograph of the constructed measuring system.

적에서 편차가 0.05 mm 이하가 되도록 조절을 하였다.

그리고, X-Y 스캔을 하고 측정 데이터의 기록을 위해 Agilent VEE 프로그램을 사용하였다. 이는 스텝모터를 제어하고, DVM으로부터 측정된 신호를 엑셀 시트에 저장시켜 주기 위한 목적으로 개발된 프로그램이다. 본 연구에서 구성한 측정 장치는 Fig. 4와 같다.

IV. 실험 및 측정결과

4.1. 주파수 변화에 따른 차등형 와전류 탐촉자의 성능검사

와전류는 표피효과로 인하여 주파수에 대하여 자속밀도가 침투되는 와전류의 깊이가 다르다. 이는 결함 깊이를 측정하는 데 있어서 중요한 요소이며, 동일한 시험체일 경우, 와전류의 침투깊이는

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2)$$

와 같이 주파수에 관련된다. Table III은 주파수 1 kHz, 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz 및 50 kHz에 대해, SUS304에서 $\mu=1.02$, $\sigma=0.014 \Omega^{-1} m^{-1}$ 일때 skin depth를 계산한 결과이다. 계산된 결과에 의하면, 주파수 50 kHz 일때, δ 는 0.21 mm로써, 본 실험에서 제작된 기준시편의 결함 깊이가 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm 및 0.4 mm에 대해 결함 깊이가 0.1 mm와 0.2 mm가 측정가능한 주파수이다. 측정 주파수 범위는 1 kHz~50 kHz에서 기준시편의 A-형을 측정해 보았으며, 그에 대한 결과는 Fig. 5이다. 측정 감도는 50 kHz에서 좋았으며, 주파수가 증가할수록 작은 깊이 결함 측정이 용이한 것을 알 수 있었다.

4.2. Lift-off 변화에 대한 차등형 와전류 탐촉자의 성능검사

와전류 측정에 있어서 측정에 영향을 주는 또 다른 요인은 lift-off 효과가 있다. 즉, 자기장 발생장치로부터 거리가 멀어질수록 자기장의 세기는 r^2 로 반비례 한다. 이는 탐촉자와 측정시편의 간격에 따라 탐촉자에 유도되는 기전력이 달라지기 때문이며, 즉 탐촉자와 측정시편의 간격이 좁을수록 유도 기전력의 크기는 크고 탐상분해능이 좋아진다.

Table III. Skin depth of the SUS304 material.

주파수 (f)	δ (skin depth)
1 kHz	1.5 mm
2 kHz	1.05 mm
5 kHz	0.7 mm
10 kHz	0.47 mm
20 kHz	0.43 mm
50 kHz	0.21 mm

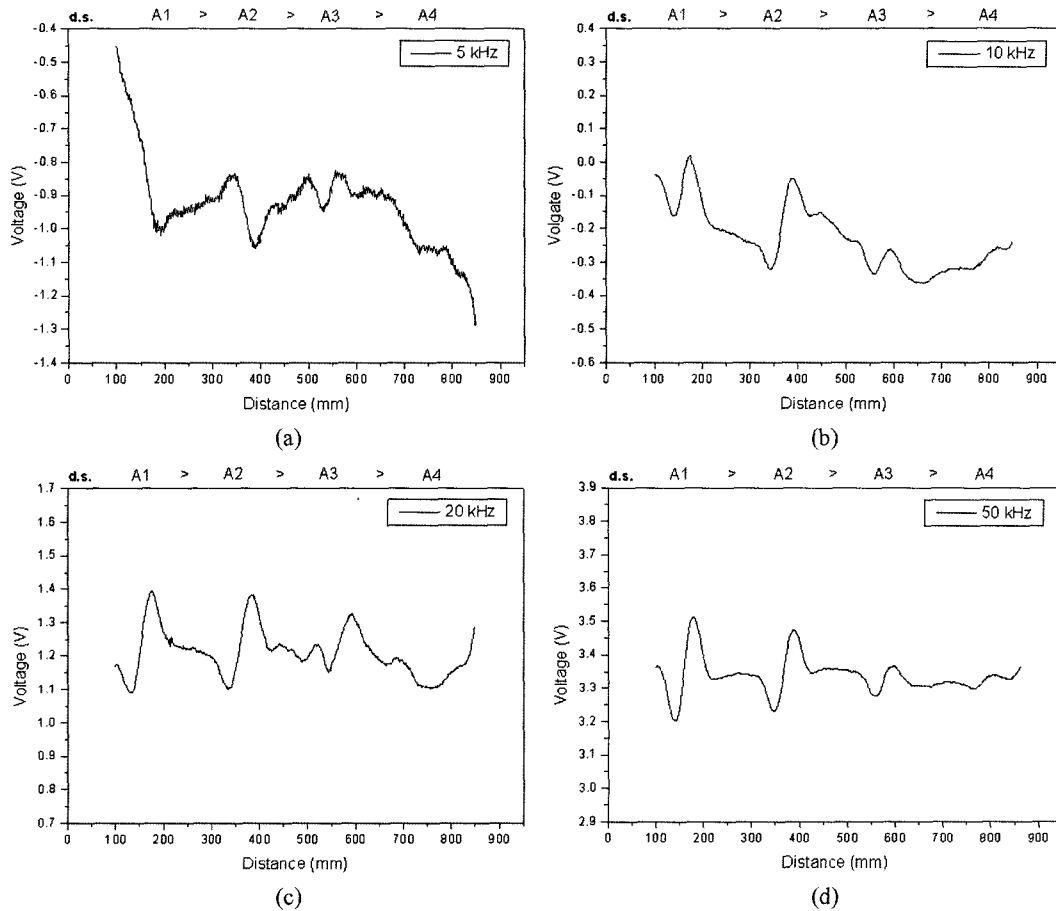


Fig. 5. Output voltage of A-type defect at (a) 5 kHz, (b) 10 kHz, (c) 20 kHz, (d) 50 kHz.

따라서 본 연구에서 차등형 와전류 탐촉자를 이용하여 기준시편의 인공결함 중 A-형 결함에 대하여 lift-off를 0.1 mm~5 mm의 범위에서 변화시켜 측정해 보았다. 측정결과, lift-off가 증가함에 따라, 즉, 탐촉자와 기준시편과의 간격이

멀어짐에 따라 신호가 감소하는 경향을 보였으며, Fig. 6은 A-1형 결함에 대해 lift-off에 따른 유도전압을 측정된 결과이다.

4.3. 결함크기에 대한 차등형 와전류 탐촉자의 성능검사

본 연구에서 제작된 차등형 와전류 탐촉자를 가지고 주파수 및 lift-off에 따른 결함탐상 측정 결과, 주파수는 50 kHz 이고, lift-off는 0.5 mm 이하에서 측정 감도가 좋다는 결론을 얻었다.

기준시편의 인공결함 측정은 차등형 와전류 탐촉자를 가지고 그 감도를 측정하였다. 주파수가 50 kHz로 하였으며, lift-off를 0.4 mm로 고정하고 서로 다른 결함크기에 대한 측정 결과는 Fig. 7이다. Fig. 7에서 보면, 원형결함인 D-3결함 (0.25 mmΦ, 0.2 mm depth)까지 검출할 수 있음을 알 수 있다.

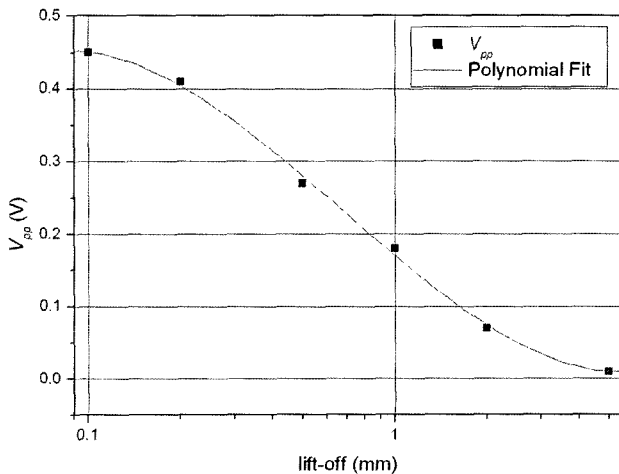


Fig. 6. Output voltage depending on the lift-off.

V. 결 론

본 연구는 원자력발전소에서 1차 핵증기 발생계통으로부터

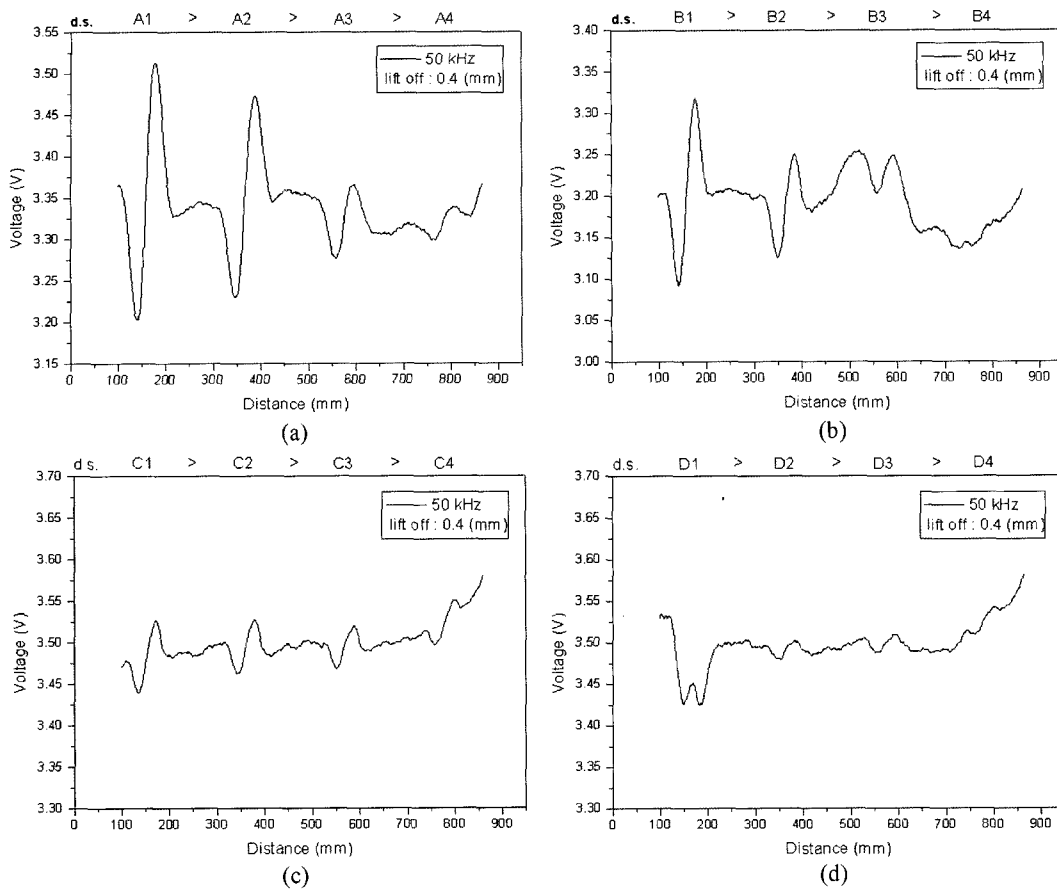


Fig. 7. Output voltage for the different artificial defect of (a) A-type, (b) B-type, (c) C-type, (d) D-type.

2차 터빈 계통에 열을 전달하는 전열면으로서의 역할과 방사능 차단벽으로서의 기능을 가지고 있는 증기발생기의 건전성 확보를 위하여, 현재 실시되고 있는 기존의 와전류 비파괴 탐상보다 더 성능이 우수한 와전류 탐촉자에 관한 연구로 차등형 와전류 탐촉자를 고안하고 제작한 후 성능검사를 하였다. 차등형 와전류 탐촉자의 크기는 8.5 mm×12 mm×6 mm로써 소형으로 제작하였다.

또한 개발한 차등형 와전류 탐촉자의 성능검사를 위해 기준시편을 제작하였다. 기준시편은 Inconel600과 자기적 특성이 비슷한 SUS304를 가지고 인공결함을 가공하였다.

제작된 차등형 와전류 탐촉자의 경우 주파수가 증가할수록 표면결함의 탐상능력은 향상되었으며, 또한 lift-off가 낮을수록 측정감도가 향상되는 경향을 보였다.

주파수 50 kHz, 및 lift-off 0.4 mm 일때, 결함의 크기가 0.25 mm이고 깊이가 0.2 mm인 결함까지 측정 가능하였다.

본 연구에서 제작된 차등형 와전류 탐촉자의 원리를 이용하여 현장 적용 가능한 장치가 제작될 경우 원자력 발전소의 증기발생기 전열관의 비파괴검사에 적용 가능 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] Yushi Sun, ISO press. 145(1998).
- [2] 이준현, 제영수, 대한기계학회논문집 A권, 23, 512(1999).
- [3] T. Takagi, M. Hashimoto, H. Fukutomi, M. Kurokawa, K. Miya, H. Tsuboi, M. Tanaka, J. Tani, T. Serizawa, Y. Harada, E. Okano, and R. Murakami, Int. J. Appl. Electromagn. Mater., 5, 145(1994).
- [4] H. A. Sabbagh, R. K. Murphy, J. C. Treece, and L. W. Woo, Rev. Prog. Quantitative Nondestructive Eval, 14, 285(1995).
- [5] S. Kumano, N. Kawase, K. Kawata, and A. Kurokawa, In Proc. 13th Int. Conf. NDE in the Nucl. Pressure Vessel Industries, Kyoto, Japan, 413(1995).
- [6] G. Chen and A. Yamaguchi, in Proc. 2nd Int. Workshop Electromagn. NED, Tokyo, Japan, 140(1996).
- [7] B. S. Wong and K. S. Tan, Insight, 37, 87(1995).
- [8] D. Horne, S. Udupa, and W. Lord, Materials Evaluation, 42, 930(1983).
- [9] N. Ida, K. Betzold, and W. Lord, Journal of Nondestructive Evaluation, 3, 147(1982).
- [10] L. Udupa and W. Lore, IEEE Trans. on Magnetics, 21(6), 2267(1985).

Development of Differential Type Eddy Current Probe for NDT Evaluation of the Steam Generator Tube

S. Y. Jung and D. Son*

Dept. of Physics, Hannam University, 133 Ojung-dong, Daeduk-gu, Daejeon 306-791, Korea

K. S. Ryu

KRISS, P.O.Box 102, Yuseong, Daejeon 305-600, Korea

D. K. Park

KAERI, P.O.Box 105, Yuseong, Daejeon 305-353, Korea

(Received 1 August 2005, in final form 14 October 2005)

Steam generator of a nuclear power plant has important rolls for the heat transfer and the isolation of radioactive materials. So bursting of the steam generator tube is directly related to the accident of nuclear power plants. Inconel600 has been used for the steam generator tube material. The material shows non-magnetic and metallic properties, eddy current NDT method has been employed for defects detection. In this work, a differential type of eddy current probe was developed to improve resolution of defect detection. To verify properties of the developed differential type eddy current probe, we have made reference material with SUS304 which has similar magnetic and electrical properties of Inconel600. Using the developed differential type eddy current probe, we can detect defect size of 0.25 mm in diameter and 0.2 mm in depth (volume of $1 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$) with the reference material.

Key words : NDT, ECT, nuclear power plant, steam generator, Inconel600, heat pipe