

증기발생기 전열관의 투자율 변화신호 분리를 위한 신형 탐촉자 개발

Development of New ECT Probe Separating the Permeability Variation Signal in the SG Tube

박덕근*[†], 유권상**, 이정기***, 손대락****

Duck-Gun Park*[†], Kwonsang Ryu**, Jeong-Kee Lee*** and Derac Son****

초 록 증기발생기 전열관에 생성되는 투자율변화에 의해 야기되는 신호왜곡 문제를 해결하기 위한 새로운 탐촉자를 개발하였다. 고리 1 호기 폐전열관에 생성된 자성상을 분리하여 자기이력곡선을 측정하였으며, 자성상이 생성되는 원인을 규명하기 위하여 고온 인장 시험을 수행하였다. 전산모사를 이용하여 탐촉자의 자성상 탐지조건을 결정하였으며, 디지털 신호전송을 위하여 신호처리용 전자회로를 소형화 하여 탐촉자 속에 삽입하였다. 본 연구에서 개발된 신형 탐촉자를 이용하여 PVC 신호와 니켈 슬리빙 부위의 결함을 측정하였다. 신형 탐촉자는 보빈 탐촉자와 같이 고속으로 결함을 측정 할 수 있으며, 증기발생기 전열관의 탐상속도와 결함 탐지의 신뢰성을 증진 시킬 수 있다.

주요어: 증기발생기 전열관, 와전류, 투자율변화, magbias 탐촉자, 자성상

Abstract A new ECT probe to separate the ECT signal distortion due to PVC (permeability variation clusters) and ordinary defects created in SG tubes has been developed. The hysteresis loops of PVC which are extracted from retired SG (steam generator) tubes of Kori-1 NNP were measured. The tensile tests were performed to identify the mechanism of PVC creation. The conditions detecting the PVC created in SG tubes were investigated using computer simulation, and the signal processing circuits were inserted in the probe for the digital signal transmission. The new probe can measure and separate the PVC signal which is created in the SG tubes, and also measures the defects in Ni-sleeving part of SG tubes. Furthermore the new ECT probe can measure the defects as fast as bobbin probe, and enhance the testing speed as well as reliability of the defect detection of SG tubes.

Keywords: SG Tube, Eddy Current, Permeability Variation, Magbias Probe, Magnetic Phase

1. 서 론

원자력 발전소의 증기발생기 전열관은 니켈합금인 인코넬로 구성되어 있으며, 인코넬에는 인코넬 600과 니켈함량을 높여 부식 저항성을 향상시킨 인코넬 690으로 구성되어 있다. 원전 전열관은 주기적인 안전감시에도 불구하고 고온 고압의 환경과 계통수와의 상호작용, 그리고 진동 등에 의하여 전

열관의 내 외벽에 부식 손상 혹은 흠집 등의 손상을 일으켜 대형 안전사고의 유발 원인이 되고 있다. 이에 따라 증기발생기의 건전성은 법에 의하여 와전류 검사를 위주로 주기적인 건전성 평가를 하게 되어 있다[1].

대표적인 전자기 유도 검사의 일종인 와전류탐상법(eddy current test, ECT)은 전자기 유도의 원리를 기초로 하여 전도성 자성 재료 또는 비자성 재

료의 다양한 물리적, 구조적, 또는 금속학적인 특성을 측정하거나 구분하는데 활용된다. 전도성 시험체에 교류전류가 흐르는 코일을 접근시키면 시간에 따라 변화하는 자계가 발생되어 도체에 작용된다. 도체를 투과하는 자속의 방향은 시간적으로 변화하므로 전자기 유도 현상에 의하여 도체에는 자속의 변화를 방해하려는 기전력이 생긴다. 이에 따라 도체에는 와전류가 형성된다. 유도된 와전류의 크기 및 분포는 주파수, 도체의 전기 전도도와 투자율, 시험체의 크기와 형상, 균열과 같은 결함 등에 의해 변화한다. 이와 같이 시험체 내에 유도된 와전류가 재료의 특성이나 결함 등에 의해 변화되는 현상을 이용하여 결함 및 재질 평가를 수행하는 와전류 탐상법은 비접촉식으로 표면결함에 대해 검출 능력이 우수하고 유지비가 저렴한 특징을 지니고 있으므로 여러 분야에서 이용되고 있다. 그러나 와전류 검사는 시험체가 비자성이어야 하며, 결함의 위치와 크기를 정확하게 탐지하기 어려우며 신호해석이 어려운 단점들이 있다. 이에 따라 검사 결과에 오류를 포함할 가능성이 상존하고 있으며, 2002년도의 울진 원자력 발전소 전열관 사고도 검사결과를 잘못 해석하여 일어난 경우로 알려져 있다[2].

특히 자성체의 경우는 와전류 신호를 크게 왜곡시키기 때문에 주의가 필요하다[3]. 따라서 증기발생기의 tube sheet 위치 또는 니켈로 슬리빙한 부위 등에는 와전류를 적용할 수 없다[4]. 그러나 원자력 발전소의 전열관은 가동 환경에 의하여 국소적으로 자성체가 형성되며 이를 투자율변화(permeability variation clusters, PVC)라 부르고 있다. 증기발생기 전열관에 자성체가 형성되는 이유는 명확하게 알려져 있지 않으나, 1차계통수에 포함되어 있는 자성입자들이 침착되어 일어나는 경우와 고온 고압의 환경 하에서 인코넬의 일부가 조직변화를 일으켜 자성상으로 변화하는 경우가 있다[5]. 전열관 검사에서는 이와 같은 PVC에 의한 신호를 제거하기 위하여 탐촉자 코일 주위에 영구자석을 부착한 magbias 탐촉자를 사용하고 있다. 자성 입자들이 침착되어 PVC가 형성되는 경우는 투자율 변화가 크지 않기 때문에 대부분 magbias 탐촉자로 제거할 수 있으나, 조직변화의 경우에는 생성되는 조직의 투자율이 크며 이에 따라 magbias 탐촉자로 신호왜곡을 제거하기 힘든 경우가 많다.

본 연구는 고리 1호기 폐전열관을 이용하여 전열관에서 생성되는 PVC의 자기특성을 분석 하였으

며, PVC가 생성되는 기구에 대하여 연구하였다. 또한 원전 증기발생기 전열관을 검사에 문제가 되는 PVC신호를 선택적으로 분리하며, 동시에 니켈 슬리빙 부위나 튜브 쉬트 부위의 결함도 탐상할 수 있는 신형 탐촉자 개발하여 결함탐지능력을 시험하였다.

2. 자성상에 위한 신호제거 및 자성상 측정의 원리

자성체란 투자율이 1 보다 큰 물체를 말하며 그 특징은 자기이력곡선에 의하여 표시된다. 증기발생기 전열관은 정상상태에서는 비투자율이 1 이며, 따라서 자기적 성질을 가지지 않는다. 그러나 PVC의 경우 투자율이 수십에서 수백 이상이 되며 자기이력곡선이 형성된다. 와전류 탐상은 원리적으로 투자율이 고정된 상태에서 전기전도도의 변화를 임

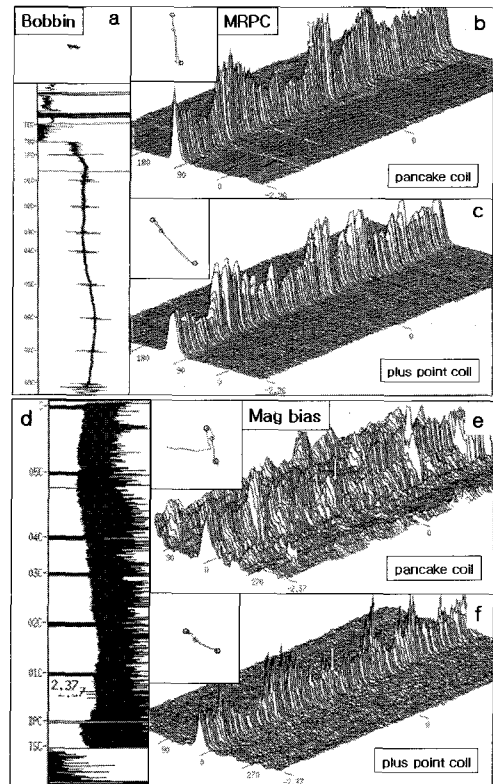


Fig. 1 ECT signal by PV in the SG tube of NPP. The signal from (a) bobbin probe, (b) pancake coil (c) plus point coil, and (d), (e), (f) represent the corresponding signals by magbias probe

피던스 변화로 환산하여 측정하는 것이기 때문에 만일 피 검사체의 투자율이 변화 한다면 결함의 존재여부를 구별하기 힘들다[6]. 증기발생기 전열관의 경우는 와전류 탐촉자에 영구자석을 삽입하여 자성체를 포화시킴으로서 PVC신호를 제거하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 이 경우 생성된 자성체의 투자율이 커서 영구자석으로 포화시킬 수 없을 경우에는 PVC에 의하여 생성된 자기장과 탐촉자의 와전류와의 상호작용으로 인하여 오히려 PVC신호가 증폭되는 문제가 발생하게 된다. Fig. 1은 원전 전열관의 가동중검사 (inservice inspection, ISI) 시험결과 중 PVC 에 의한 신호왜곡을 보여준다. Fig. 1(a)는 보빈 탐촉자의 결과이고 (b)는 MRPC 결과이며 (c) plus point coil의 결과이다. (d) (e) (f)는 magbias 탐촉자로 탐상한 결과이다. 그림에서 보듯이 magbias 탐촉자로 탐상한 결과 와전류 신호의 잡음이 증가하였다는 것을 알 수 있다. 이는 PVC에 의한 신호왜곡을 제거하고자 사용한 magbias 탐촉자가 오히려 신호왜곡을 심화시킨 결과를 초래하였기 때문이다. 이는 magbias 탐촉자에 부착되어 있는 영구자석이 PVC를 포화시키지 못하고 영구자석의 자기장과 결함의 와전류 신호가 상호 작용하여 잡음신호가 증폭되었기 때문인 것으로 생각된다. 만일 전열관에 생성된 PVC의 투자율이 magbias 탐촉자에 부착된 영구자석으로 포화시킬 수 없을 정도로 경우에는 magbias 탐촉자가 오히려 신호왜곡을 심화 시킨다. 따라서 현재의 와전류 탐촉자로는 전열관에 생성된 자성상에 의한 신호왜곡을 제거하기 힘들다. 그러나 자성체의 투자율이 비자성체에 비하여 매우 크며, 또한 자성체와 비자성체의 위상이 서로 차이가 나는 점을 이용하여 순수한 결함신호와 PVC에 의한 유사 신호를 분리할 수 있다.

3. 실험

자성상은 자석에 붙는 성질을 이용하여 PVC 신호를 초래하는 자성상을 추출하였다. Fig. 2는 고리 1호기 폐전열관에 영구자석이 붙은 모양을 나타낸다. 이 부분을 잘라서 VSM(vibrating sample magnetometer)을 이용하여 자기이력곡선을 측정하였다. 자성상 생성 기구를 연구하기 위하여 인코넬 600을 인장시편 형태로 가공하여 인장시험을 하였다. 가동조건에 의한 영향을 모사하기 위하여 하

나의 시편은 상온에서 인장시험을 하였으며, 다른 하나는 열처리로의 온도를 600 °C로 고정하고 그 속에서 인장시험을 하였으며 인장시험이 끝난 후 시험편을 잘라 각 부위의 변형률을 계산한 후 VSM 으로 자기이력곡선을 측정 하였다.

전열관에 생성된 자성상을 탐상하기위한 조건을 결정하기 위하여 전자기해석코드인 MAXWELL 을

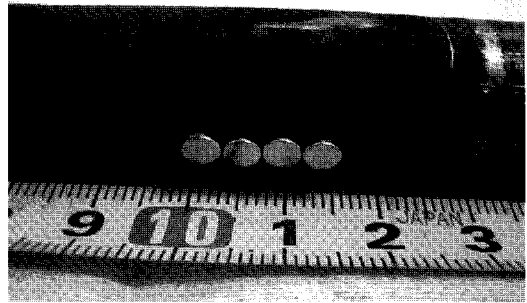
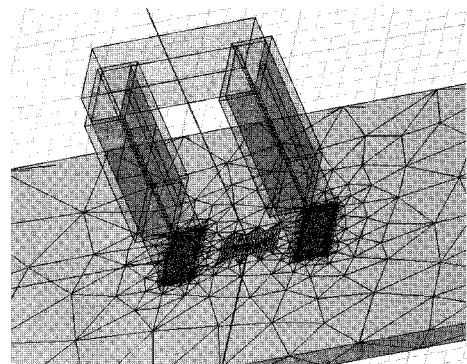
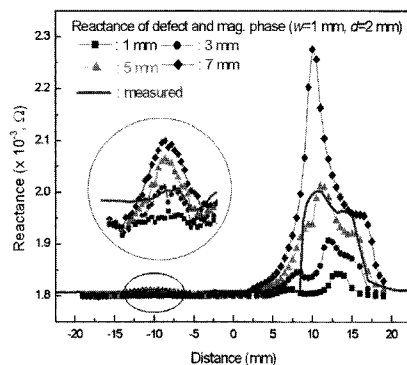


Fig. 2 The picture showing the substance of magnetic phase (PVC) in the SG tube. The sample was extracted from the retired SG tube of Kori-1 NPP



(a)



(b)

Fig. 3 (a) Calculation model of defect and PVC, and (b) calculation result (the reactance is proportional to the size of magnetic phase)

이용하여 최적 주파수와 유도자속의 크기를 계산하였다[7]. 결합과 자성상에 대한 와전류의 변화를 유한요소법으로 계산하기 위한 모델은 인코넬 판에 자성상이 생성된 것을 가정하여 Fig. 3(a)와 같이 구성하였으며, 계산 결과는 Fig. 3(b)에 주어져 있다. 전체 요소(mesh)의 수는 약 56,000개이고, 결합 및 자성상의 크기는 $1\text{ mm}(W) \times 3\text{ mm}(L) \times 1\text{ mm}(D)$ 이다[8]. 실험에 사용된 인공 자성상의 비투자율은 780이고, 전도도는 $4.0 \times 10^5\text{ S/m}$ 이다. 계산결과에서 보듯이 결합에 비하여 자성상의 신호는 매우 크며, 자성상의 크기에 비례하여 리액턴스가 증가함을 알 수 있다. 실험결과와 비교해 보면 자성상의 길이가 5 mm 일 경우 실험결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 자성상 탐상을 위한 신형탐촉자 제작

본 연구에서 개발한 신형 탐촉자는 이상에서 기술한 신호왜곡문제를 해결하기 위한 것으로, 현재 국내에서 적용되고 있는 전열관의 크기인 내경이 3/4"와 내경이 7/8" 인 전열관을 기준으로 하였다. 결합과 자성상을 동시에 측정하기 위하여는 두가지 신호를 분리하여야만 한다. Fig. 3의 전산모사 결과에서 보듯이 결합 신호의 크기는 자성상에 비하여 매우 크기 때문에 이 둘을 동시에 측정하기 위하여는 탐촉자 내부에서 측정신호를 증폭하여 신호처리까지 하여야 한다. 센서와 신호처리용 전자회로를 탐촉자 내부에 삽입하기 위하여 전자회로의 크기를 $16.5 \times 100\text{ mm}$ 크기의 PCB 판에 배치하였다. 시편의 자기적 특성을 측정하는 방법은 시편의 감자 인자(demagnetizing factor)가 0일 경우 시편에 코일을 직접 권선하여 일차 코일에 흐르는 전류로부터 자화력 H 를 측정하고 이차코일에 유도되는 기전력을 적분하여 파라데이의 전자기유도법칙으로부터 자속밀도 B 를 계산하여 시편의 자기이력 특성을 측정할 수 있다. 그러나 대부분의 경우 시편의 크기가 유한하여 감자 효과 때문에 위의 방법으로는 시편의 자기특성을 측정하는 방법이 불가능하다. 또한 비 접촉으로 시편의 자기적 특성을 측정하는 방법은 요크를 사용하여 시편을 자화시킴으로써 자기적인 폐회로를 구성하는 것이 일반적인 측정방법이다[9]. 자화력 H 의 측정은 일차코일에 흐르는 전류로부터 측정하는 방법과 자기장 탐지코일(H-코일)에 유도되는 기전력을 적분하여 측정하는

방법이 있는데 lift-off가 변화에 의한 영향을 줄이기 위하여 본 연구에서는 H-코일 방법을 사용하였으며, 그 구조는 Fig. 4와 같다.

자성상과 결합을 분리하기 위하여는 10 kHz의 저주파를 사용하였으며, 신호 대 잡음 비를 높이기 위하여, 탐촉자 속에 센서를 자화시키고 유도되는 기전력을 측정하기 위한 전자회로 및 신호처리용 전자회로를 탐촉자 내부에 삽입 하였다. 또한 증폭과 필터링 과정을 거친 아날로그 신호는 탐촉자 내부에 삽입된 전자회로에 의하여 디지털 신호로 출력되게 하였다[10]. 센서로부터 유도된 기전력은 이차코일에 유도되는 기전력에서 light-off에 따른 공기자속 효과를 보정한 값을 사용하였다. 아날로그 신호를 디지털로 변환시키기 위한 장치는 4-채널 16비트 아날로그-디지털 변환기(ADC)를 사용하였으며 ADC의 조절은 8 비트 미세조절기 89C4051을 사용하였고 추출 된 신호는 RS232C 접속장치를 통하여 컴퓨터에 전달할 수 있게 하였다. 탐상 주파수는 전산모사 결과를 바탕으로 10 kHz로 하였다. 우선 H 코일방법을 사용한 탐촉자의 제작과 평판형 기준시편을 제작하여 H 코일방법에 의한 자성상 탐지능력을 시험 하였으며, 이 결과를 바탕으로 자성상 탐지를 위한 센서를 실제의 증기 발생관에 적용하기 위하여 내경이 19.69 mm 외경이 22.23 mm인 Inconel 판에 적용될 수 있는 센서를 설계, 제작하고 그 특성을 조사하였다. 완성된 탐촉자의 모양은 Fig. 5에 나타난 것처럼 탐촉자의 머리부분의 자기장을 탐지하는 센서와 몸통부분의 신호처리용 전자회로로 이루어져 있다.

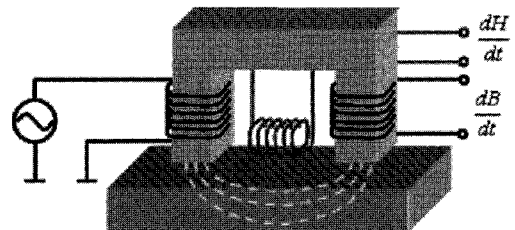


Fig. 4 Schematic diagram measuring the magnetic phase created in the SG tube



Fig. 5 Developed probe separating defects and PVC

5. 결과 및 검토

Fig. 6은 고리 1호기 구 증기발생기 전열관에 생성된 자성상(PVC)의 자기이력곡선의 모양을 보여 준다. 그림에서 보듯이 전열관에 생성된 자성상은 전형적인 강자성체 특성을 보여주고 있다. 생성된 자성상의 보자력은 0.2 kA/m로서 자성상 모사에 사용된 1018강의 보자력인 0.44 kA/m의 절반 수준이다. 이 정도 크기의 자성상은 magbias 탐촉자에 부착된 영구자석으로 포화시킬 수 있는 범위를 훨씬 초과한다. 이 결과 탐촉자의 영구자석에 의한 자속은 와전류 신호와 상호작용 함으로서 와전류 신호를 크게 증폭하는 역할을 하게 되며, 결과적으

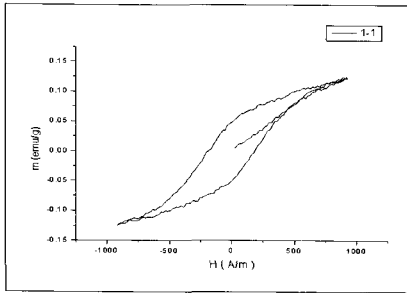
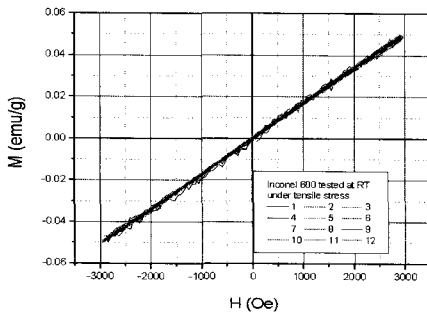
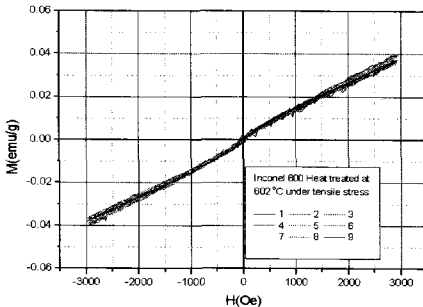


Fig. 6 The hysteresis loop of PVC created in the retired SG tube of Kori-1 NPP



(a)

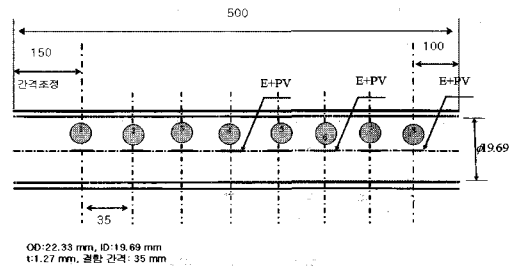


(b)

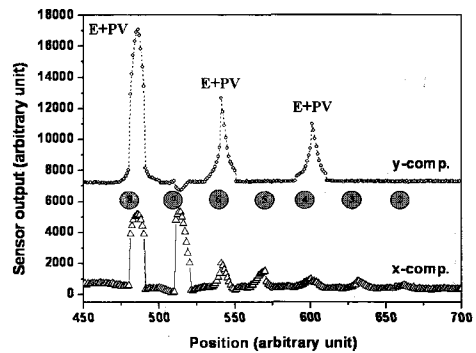
Fig. 7 The hysteresis loop of (a) cold worked at RT, and (b) cold worked at 600 °C

로 그림과 같이 잡음을 증가 시킨다. 증기발생기 가동 환경에 의한 자성상 생성 모사실험 결과는 Fig. 7 (a) (b)에서 나타나 있다. 상온에서 인장시험만 한 시편의 자기이력곡선은 비자성체의 모양 그대로이지만, 고온에서 인장 시험한 시편은 전형적인 강자성체의 특성을 보여주고 있다. 따라서 온도와 압력이 동시에 가해질 경우에 강자성상이 생성된다는 것을 알 수 있다. 이는 증기발생기 전열관의 손상 기구인 용력부식균열[11,12]과 원인과 같은 것으로서 결합부위에 주로 자성상이 많이 발견된다는 경험적 사실과도 일치하고 있다.

개발된 탐촉자의 특성을 조사하기 위하여 내경이 19.69 mm, 두께 (t) 1.067 mm 인 Inconel 판에 결합간격이 33.3 mm 간격으로 EDM 가공으로 기준 시편을 제작하였다. 결합의 폭은 0.2 mm 이며 결합 깊이는 각각 관두께의 20, 40, 60, 80% 로 하였으며, 자성상을 모사하기 위하여 저탄소강인 강자성체를 삽입하였다. Fig. 8(a)는 제작된 기준 시편을 보여주며, Fig. 8(b)은 제작된 기준시편을 사용



(a)



(b)

Fig. 8 (a) Artificial defects and PV in the SG tube, and measurement result by new probe. Fure defects are in the 1, 2, 3, 5, 7 positions, and (b) magnetic phases are inserted in the 4, 6, 8 positions

하여 탐상한 결과이다. Fig. 8(b)에서 보면 x-성분의 신호는 결함과 자성상이 모두 나타나 있으나, y-성분에는 자성상만 나타나 있다. 또한 결함의 깊이가 깊을수록 신호의 크기도 큼을 알 수 있다. 1번 결함은 결함의 위치가 판의 끝에서 멀지가 않아 측정이 불가능 하였다. Fig. 8(b)의 y-성분을 보면 강자성상이 있는 부분에 S/N 비가 아주 좋게 잘 검출됨을 알 수 있다. Fig. 9는 현재 증기발생기 보수기술로 사용되고 있는 니켈 슬리빙 부위에 생성된 결함을 검출하기 위한 시편과 검출결과를 보여주고 있다. 니켈 슬리빙은 증기발생기 전열관의 결함을 보수하기 위한 유망한 기술이지만, 니켈이 강자성체 이므로 보수부위에 와전류 탐상을 적용할 수 없어 보수 유무를 확인할 수 없다는 단점이 있다. 그러나 실험결과에서 보듯이 니켈 슬리빙 부위의 결함도 탐지할 수 있음을 알 수 있다. 결함 탐지용 시편은 내경이 19.69 mm, 두께(t)가 1.27 mm 인 전열관에 0.3 mm로 니켈을 도금한 후, 각각 폭이 0.2 mm, 깊이가 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 t 인 인공결함을 시편의 내 외부에 EDM으로 Fig. 9(a)처럼 가공하였다. 시험편의 두께를 전열관 두께와 일치시키기 위하여 니켈을 도금할 때 시험편 내부를 균일하게

0.3 mm 제거 한후 도금 하였다. Fig. 9(b) 는 실험 결과를 보여 주며, 그림의 아래부분(A)는 결함에서의 신호를 보여주며, 위 부분(B)는 니켈이 강자성체 이므로 위상이 반대로 나타나 있다. 거리가 5200에 보이는 신호가 결함깊이 0.4t에서 나오는 신호이며, 5250과 5300에 보이는 신호는 각각 0.6, 0.8인 결함 깊이에 해당한다. 결함 깊이가 0.2t 인 결함 신호는 나타나지 않았다.

6. 결론

증기발생기 전열관의 와전류 탐상결과를 분석하여 현재의 magbias 탐촉자로는 PVC에 의한 신호 왜곡을 모두 제거할 수 없으며, PVC의 투자율이 큰경우 오히려 신호왜곡을 심화 시킨다는 것을 발견 하였다. 전열관에 생성된 PVC의 크기를 알기 위하여 고리 1호기 폐전열관에 생성된 자성상을 분리하여 자기이력곡선을 측정하였으며, 강한 PVC의 투자율이 철의 절반정도에 해당한다는 것을 확인 하였다. 자성상이 생성되는 원인을 규명하기 위하여 고온 인장 시험을 수행하여 자성상이 고온에서 응력이 집중할 경우 생성되며, PVC의 발생 원인이 증기발생기 주 손상 원인인 응력부식 균열과 일치 한다는 것을 알았다. PVC를 탐지하기 위한 신형탐촉자를 개발하였으며, 탐촉자 개발을 위하여 전산모사를 이용하여 탐촉자의 자성상 탐지조건을 결정 하였다. 신호왜곡을 제거하고 탐지효율을 증가시키기 위하여 신호처리용 전자회로를 소형화 하여 탐촉자 속에 삽입하여 디지털 신호전송이 이루어지도록 하였다. 본 연구에서 개발된 신형 탐촉자를 이용하여 인공결함을 측정된 결과 본 탐촉자는 PVC 신호를 분리 할 수 있으며, 니켈 슬리빙 부위의 결함도 측정 가능하다는 것을 확인 하였다. 본 신형 탐촉자는 보빈 탐촉자와 같이 고속으로 결함을 측정 할 수 있으며, 증기발생기 전열관의 탐상속도와 결함탐지의 신뢰성을 증진 시킬 수 있다.

감사의 글

본 연구는 "전력산업기반조성사업"과제로 수행 되었으며, 니켈슬리빙 부위를 모사할 수 있는 시편을 제공해주신 한국원자력연구원의 김정수 박사님과 김동진 박사님에게 감사를 드립니다.

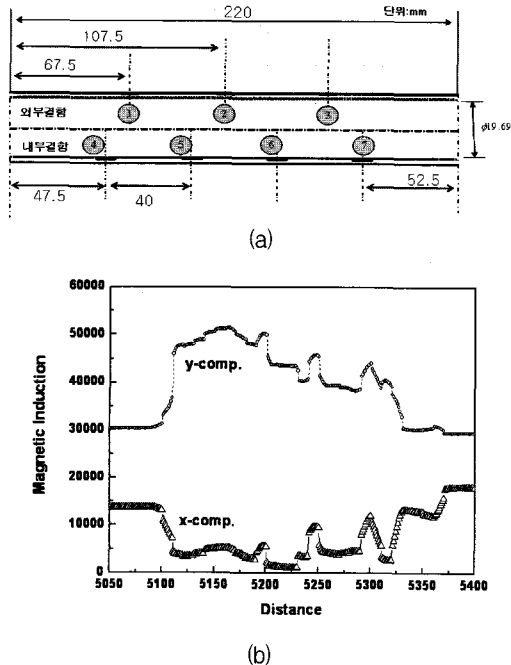


Fig. 9 (a) Artificial defects created in the Ni-sleeving part of SG tubes, and (b) measurement result by new probe

참고문헌

- [1] Youn Park and Jin Ho Lee, "Safety review on recent steam generator tube failure in Korea and lessons learned," Transactions of the 17th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT17), Prague, Czech Republic, August 17-22, (2003)
- [2] 증기발생기 연구협의회, "울진4호기 SGTR 원인 평가 및 대책", 증기발생기 안전성 Workshop, Nov. 6, (2002)
- [3] Young-Kil Shin, Yun-Tai Lee and Myung-Ho Song, "Comparison of absolute and differential ECT signals and tube support plate in steam generator," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 25, No. 3, pp. 201-208, (2005)
- [4] ASTM E572, Standard practice for electromagnetic examination of nickel and nickel alloy tubular products, pp. 331, (1985)
- [5] S. Takahashi, Y. Sato, Y. Kamada and T. Abe, "Study of chromium depletion by magnetic methods in Ni-based alloys," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 269, P. 139, (2004)
- [6] R. Palanisamy and W. Lord, "Prediction of eddy current signals for nondestructive testing of condenser tubing," IEEE-Trans on Mag., Vol. Mag-19, No. 5, pp. 2213, (1983)
- [7] Ansoft Corp., 225 West Station Square, Suite 200, Pittsburg, PA 15219, USA; web site www.ansoft.com
- [8] 정선영, 손대락, 유권상, 박덕근, "증기발생기 전열관의 비파괴 탐상용 차등형 와전류 탐촉자 개발", 한국자기학회지, Vol. 15, No. 5, pp. 292-297, (2005)
- [9] E. L. Hall and C. L. Briant, "The microstructural response of mill-annealed and solution annealed Inconel 600 to heat treatment," Metall. Trans. A, 16A, 1225, (1985)
- [10] 정선영, 손대락, 유권상, 박덕근, "Inconel 600의 강자성상 비파괴 검사에 관한 연구", 한국자기학회 2004년도 동계연구발표회 논문개요집, pp. 40-42, (2005. 12)
- [11] J. J. Kai, C. H. Jsai, T. A. Hwang and M. M. Liu, "The effects of heat Treatment on the sensitization and SCC behavior of Inconel 600 Alloy," Metallurgical Trans. V. 20A, pp. 1077, (1989)
- [12] Dh. Berge, J. R. Panati, "Materials requirements for pressurized water reactor steam generator tubing," Nucl. Technology, Vol. 55, pp. 88, (1981)