

## 증기발생기 전열관의 입계부식에 대한 와전류검사 신호특성

Signal Characteristics of Eddy Current Test for Intergranular Attack  
of Steam Generator Tubes

최명식\*, 허도행\*<sup>†</sup>, 이덕현\*, 조세곤\*\*, 임창재\*\*, 한정호\*  
Myung Sik Choi\*, Do Haeng Hur\*<sup>†</sup>, Deok Hyun Lee\*, Se Gon Cho\*\*,  
Chang Jae Yim\*\* and Jung Ho Han\*

**초 록** 가동중인 증기발생기 전열관에서 발생하는 결함 유형 중의 하나인 입계부식은 방전가공에 의한 모의 시편 제작이 불가능하므로 입계부식에 대한 와전류검사 신호의 특성이 잘 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 0.1 M sodium tetrathionate 용액에서 비확관 전열관에 입계부식을 형성시키고 와전류검사 신호를 수집하여 평가하였다. 이를 통하여 탐촉자의 종류와 주파수에 따른 신호 특성 및 입계부식의 깊이 변화에 따른 검출능을 비교하였다.

**주요용어:** 입계부식, 검출능, 탐촉자, 와전류검사, 증기발생기 전열관

**Abstract** Because intergranular attack (IGA), one of the localized corrosion forms occurring on steam generator tubes, can not be fabricated by an electric discharge machining method, there are few data for the eddy current test (ECT) characteristics of IGA. In this paper, the characteristics of eddy current signals are evaluated using nonexpanded tubes with IGA defects formed in 0.1 M sodium tetrathionate solution at 40°C. The detectability and sizing accuracy of IGA were discussed in terms of the coil type and frequency of the ECT probes.

**Keywords:** intergranular attack, detectability, probe, eddy current, steam generator tube

## 1. 서 론

원자력발전소 증기발생기 전열관은 가동 중 1차측 응력부식균열, 2차측 응력부식균열, 입계부식(intergranular attack, IGA), 핏팅, 두께감소, 마모 등 여러 유형의 부식 및 기계적 손상을 겪고 있다. 이러한 손상은 전열관의 유지 보수를 위한 경제적 손실을 야기할 뿐만 아니라 가동 안전성 및 효율을 저하시키게 된다. 따라서 각 원자력발전소에서는 매 주기마다 와전류검사(eddy current test, ECT)를 실시하여 전열관 손상 정도를 감시하고 그 결과

를 전열관 보수 및 안전성 평가 자료로 활용하고 있다. 이와 같이 ECT 검사의 중요성이 증대되고 있으므로 검사중 인적 실수를 감소시키고 검사 신뢰도를 높이기 위하여 제 3 자 평가제도를 도입하여 시행하고 있다.

ECT 검사의 신뢰성은 재료내에 생성된 결함을 정확히 검출하고 그 크기를 정밀하게 측정, 평가할 수 있는 탐지능과 정밀도에 따라 크게 좌우된다. 그러나 방전가공(electric discharge machining, EDM)에 의한 노치(notch) 또는 드릴 홀(drill hole)을 가공하여 사용하는 현재의 표준결함 시편으로는 실제 결함을 정확히 모사할 수 없기 때문에 재료의 정확한 손상평가에 한계점을 갖고 있다[1].

ECT의 검출능과 검사 신뢰도를 평가하기 위해서는 가동 중인 증기발생기 또는 교체 증기발생기에서 인출한 실제의 결함을 이용하는 것이 가장 바람직하다. 그러나 실제 전열관은 방사능 준위가 높아 취급이 어렵고, 인출비용이 막대하며, 인출시 결함의 변형이 예상되며, 따라서 활용할 결함 전열관 갯수가 제한되므로 통계적인 접근이 곤란한 단점이 있다. 이에 대한 해결책으로써 증기발생기 전열관에서 발생하는 것과 동일한 기구에 의하여 자연결함을 형성시키고, 여기서 얻어지는 ECT 신호를 해석, 평가하여 보다 정확하게 재료의 손상을 평가할 수 있는 기술개발이 제안되었다[1]. 이 방법으로 1차측 내면균열, 2차측 용력부식균열, 입계부식, 팻팅 결함을 전열관에 형성시킬 수 있는 제어기술을 개발하고, 이렇게 얻어진 시험편을 활용하여 ECT의 검출능, 평가오차, 탐촉자에 따른 신호 특성 등을 규명하고자 하는 것이다. 따라서 이 기술은 다양한 결함 형상을 모의할 수 있고 다량의 시험편을 저렴한 비용으로 제작 활용할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서는 원전 증기발생기 전열관에서 발생하는 여러 유형의 결함 중 방전 가공에 의하여 모의가 불가능한 입계부식 시험편을 실험실적으로 제작하고 실제 결함과의 유사성을 비교하였다. 또한 제작된 입계부식 시험편을 이용하여 각 탐촉자 종류에 따른 검출능, 입계부식의 깊이의 변화에 따른 신호특성 및 주파수 변화에 따른 신호특성을 파괴검사 결과와 비교하여 평가하였다.

**2. 실험방법**

재료는 외경 19.05 mm 두께 1.07 mm의 Alloy 600 전열관을 사용하였으며 화학조성을 Table. 1에 나타내었다. 전열관은 확관이나 곡관 처리하지 않은 직관 형태로 사용하였다. 전열관을 8 cm 길이로 절단한 다음 산화가 일어나지 않도록 진공에서 예민화 열처리를 하였다. 이 때의 열처리 조건은 700℃, 3 시간이었다. 예민화 처리한 시험편은 40℃의 0.1 M sodium tetrathionate(Na<sub>2</sub>S<sub>4</sub>O<sub>6</sub>) 용액에서 침지하여 입계부식을 형성시켰다. 이 때 결함의 형태는 전열관 외면에서의 직경이 4 mm가 되도록 결함

을 형성시킬 부분을 제외한 나머지 부분을 masking 하였으며, 침지시간을 조절하여 결함의 깊이를 조절하였다. 결함 형성 후 증기발생기 검사에 널리 사용되고 있는 Zetec 사의 상용 bobbin 탐촉자 (A-610-M/ULC)와 모터 구동 회전형 탐촉자 (+Point-610-115/36/S80)를 이용하여 입계부식에 대한 신호를 수집하였다. 특히 모터구동 회전형 탐촉자에는 세 종류의 coil, 즉 primary pancake test coil, plus coil, high frequency shielded coil이 탐촉자의 원주방향으로 120도 간격으로 설치되어 있다.

입계부식의 깊이에 대한 정량적 평가를 위하여 표준시험편은 100%, 80%, 60%, 40% 및 20% 깊이의 flat bottom hole을 갖는 ASME defect standard tube를 사용하였다. 신호의 위상각은 모든 채널에서 100% hole 인공결함 신호의 위상각이 -X축으로부터 시계방향으로 40°가 되도록 조절하고 신호의 크기는 CRT 화면의 50%가 되도록 조절하였다. 또한 신호진폭은 주파수 550 kHz에서 20% 깊이의 인공결함 신호를 5.0 volt가 되도록 설정하고 다른 주파수에서는 상대적인 값을 갖도록 설정하였다. ECT 검사를 마친 후 결함을 전열관 두께방향으로 절단한 다음 연마하여 단면에서의 결함형태를 관찰하고 최대깊이를 측정하였다.

**3. 결과 및 고찰**

Fig. 1은 생성된 입계부식에 대한 전열관 표면 및 횡단면 방향에서의 양상을 나타낸 것이다. 특히 횡단면에서의 형상은 시험편을 전열관의 두께방향으로 절단하여 polishing 한 후 관찰하였다. 입계부식이 발생한 지역은 에칭을 하지 않은 상태에서도 결정립계가 관찰되었다. 5% nital 용액에서 전체 에칭할 경우 그림에서와 같이 입계부식 영역을 보다 선명히 구분할 수 있었으며, 입계부식에 의한 thinning 현상은 관찰되지 않았다. 노출된 표면의 모든 결정립계에서 부식이 발생한다는 점에서 가동중 증기발생기 전열관에서 발견되는 결함 형태와 매우 유사함을 알 수 있다[2]. 한편 입계부식 선단의 깊이는 위치에 따라서 다소 차이를 나타내었으므로 최대 깊이를 결함의 깊이로 규

Table 1 Chemical composition of Alloy 600 (wt %)

C	Si	Mn	Ni	Cr	P	S	Co	Al	Ti	N	Cu	Fe	B
0.025	0.16	0.23	75.14	15.46	0.008	0.001	0.31	0.21	0.29	0.0042	0.011	8.42	0.0039

정하여 평가하였다.

깊이가 서로 다른 4 개의 결함을 대상으로 탐촉자의 종류에 따른 ECT 신호를 평가한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이 때 각 coil의 주파수는 300 kHz로 동일하였다. 그림에서 입계부식 결함 #1은 파괴검사 결과 실제 깊이가 14%, #2는 33%, #3는 34%, #4는 44%였다. Bobbin coil의 경우 미약하지만 #1 결함에 대한 신호를 보여주고 있으며 나머지 3개 결함에 대하여는 뚜렷하게 검출하고 있다. 그러나 pancake과 plus coil은 #1에 대한 결함신호를 전혀 검출하지 못하였다. 또한 #3 결함에 대하여 pancake coil은 약간의 신호를 나타내었으나 plus coil의 경우는 거의 신호를 보여주지 못하고 있다. 즉, 입계부식에 대한 검출능은 bobbin coil이 가장 우수하였으며 pancake coil, plus coil의 순서로 검출능이 저하하였다. 이와 같은 결과는 모든 결함에서 일관되게 관찰되었다. 이는 일반적으로 pancake과 plus coil이 균열성 결함의 검출에 용이하다는 점과는 상반되는데, 입계부식이 체적성 결함이기 때문에 기인된 결과로 생각된다. 입계부식에 대한 검출능이 bobbin coil에서 가장 우수하였으므로 깊이에 대한 정량적인 평가는 bobbin coil의 결과만을 제시하기로 한다.

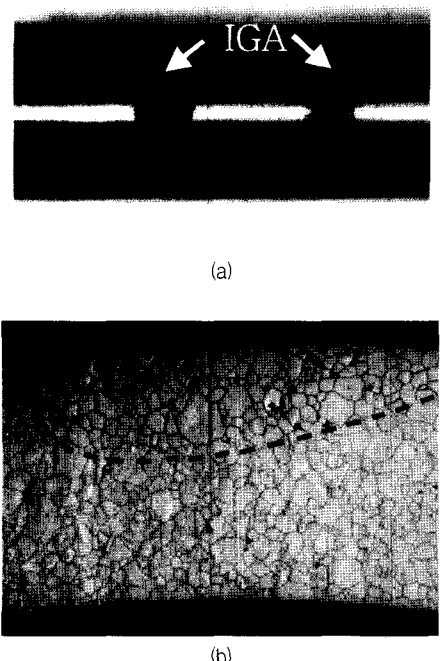


Fig. 1 IGA morphology; (a) outer diameter surface (b) cross section

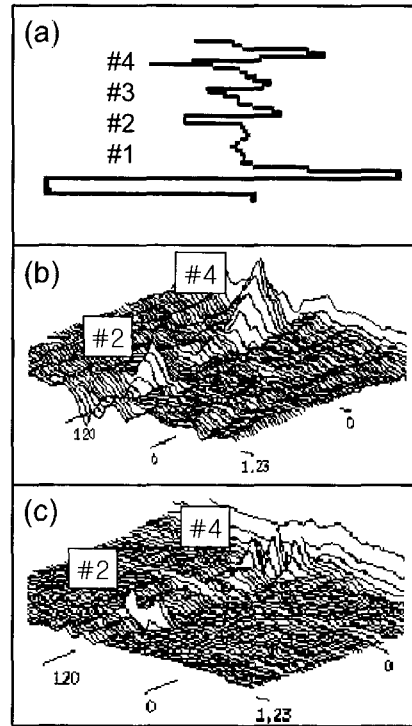
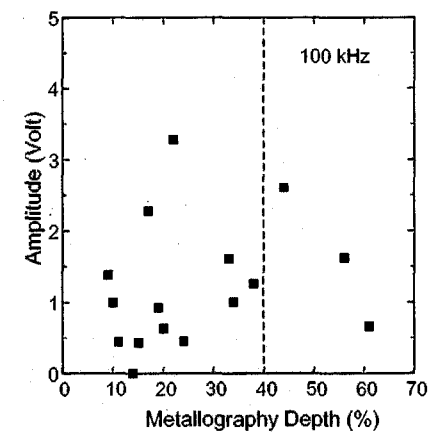


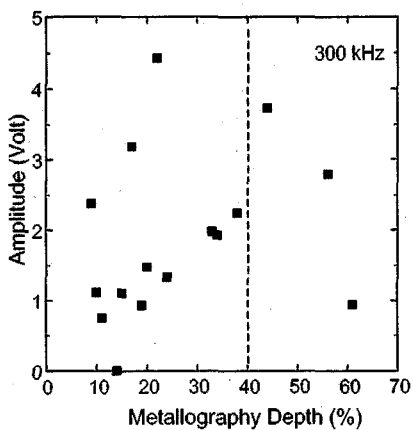
Fig. 2 Comparison of the eddy current signals obtained from IGA ; (a) bobbin coil (b)pancake pancake coil (c) plus coil

Fig. 3은 결함의 깊이에 따른 bobbin coil의 진폭변화를 주파수별로 나타낸 것이다. 결함의 크기에 관계없이 동일한 결함에 대하여 300 kHz에서 진폭값이 가장 크게 나타났으며 100, 550 kHz의 순서로 진폭값이 작게 나타났다. 이는 300 kHz에서 입계부식에 대한 검출능이 가장 우수함을 의미한다. 그러나 전체적으로 data의 분산이 비교적 크게 나타났다.

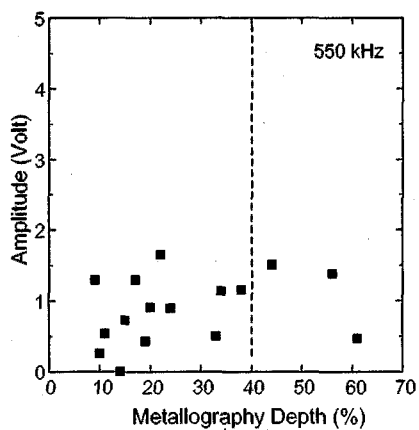
파괴검사에 의하여 측정된 결함의 실제깊이와 bobbin coil로 평가한 ECT 깊이와의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 음(-)의 깊이는 위상각으로부터 내면 결함으로 판정된 것을 의미한다. 실제의 깊이가 40% 이하인 결함의 경우 ECT 예측 결과가 매우 분산되어 나타났다. 40% 이상의 깊이를 갖는 결함에 대해서도 그 숫자가 3개에 불과하나 매우 과소평가 하는 것으로 볼 수 있다. 특히 실제의 깊이가 50~60%인 경우에도 ECT로 20% 미만으로 평가



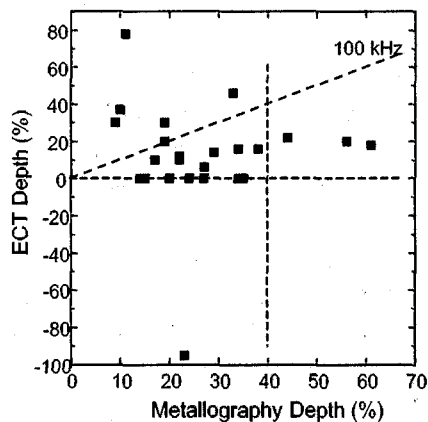
(a)



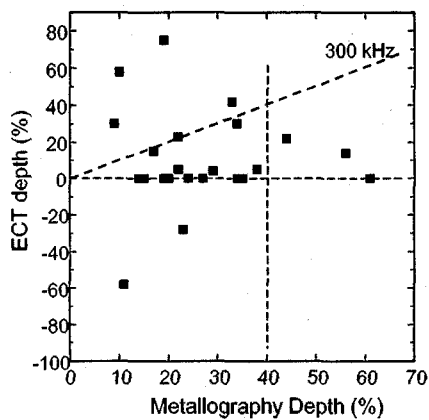
(b)



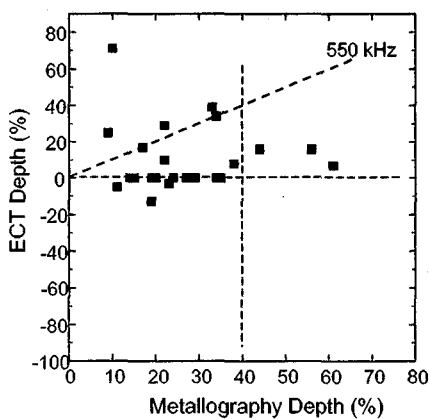
(c)



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Variation of ECT signal amplitude with IGA depth measured by bobbin differential coil ; (a) 100kHz (b) 300kHz (c) 550kHz

Fig. 4 Comparison of actual IGA depth and ECT depth measured by bobbin differential coil ; (a) 100kHz (b) 300kHz (c) 550kHz

되었다. 판막음 기준이 40%이므로 40%이상의 깊이를 갖는 결함을 추가로 제작하여 이에 대한 보다 분명한 결론을 도출할 필요가 있을 것이다. 이상의 결과로부터 ECT를 이용한 입계부식 결함의 깊이에 대한 정량적인 평가는 매우 어려움을 알 수 있다. 따라서 입계부식의 경우 결함의 검출여부 그 자체에 의미가 있으며, 검출 확률을 제고할 수 있는 탐촉자 및 주파수를 사용하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

본 논문에서 제시한 결과는 sludge가 전혀 없는 깨끗한 전열관의 free span 위치에 형성된 입계부식으로부터 얻어진 것이다. 입계부식은 free span 위치 뿐만 아니라 sludge가 침적된 확관 부위에서도 발생한다. 확관에 의한 기하학적 형상 변화는 ECT 신호의 왜곡을 유발하며 bobbin coil이 가장 큰 영향을 받게 된다. 그러나 plus coil은 두 coil이 한 층씩 직각으로 교차되게 +자 형태로 감겨 있고 두 코일이 서로 비교하는 차동법을 적용하기 때문에 전열관의 형상 변화, lift-off 변화 및 sludge 신호 등 결함 외적인 신호를 최소화하는 것으로 알려져 있다[3]. 따라서 사용하는 coil의 종류별로 입계부식에 대한 검출능은 확관/비확관 위치에 따라 달라질 가능성이 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

한편 주목할 점의 하나로는 결함신호가 뚜렷하게 검출은 되지만 결함깊이가 0%로 평가된 경우가 많았다는 것이다. 이는 ASME의 flat bottom drill hole을 표준시편으로 사용함에 따른 결과로 해석할 수 있다. 즉 입계부식은 결정립계만 부식이 되고 나머지 결정립 내부는 전혀 부식되지 않고 그대로 남아 있으므로 내부가 완전히 비어 있는 drill hole에 비하여 매우 작은 저항 값을 나타낼 것이다. 또한 표준시편은 결함의 바닥이 편평하고 각이 진 형태인 반면에 입계부식은 Fig. 1에 보인 바와 같이 곡선형태로서 불규칙하다. 그러므로 표준시편으로 사용한 drill hole의 위상은 입계부식 결함에서 나오는 위상과는 다를 것으로 추정된다. 즉 결함깊이 대 위상각의 상관곡선이 drill hole의 경우는 기울기가 크게 나타나지만 입계부식의 경우는 보다 완만하게 나타날 것이다.

#### 4. 결 론

(1) 직관형 비확관 전열관에 형성된 입계부식에 대한 검출능은 bobbin coil이 가장 우수하였으며 pancake coil, plus coil의 순서로 검출능이 저하하였다.

(2) 입계부식에 대한 bobbin coil의 주파수별 신호특성은 550, 100, 300 kHz의 순서로 진폭이 크게 나타났으므로 300 kHz에서 검출능이 가장 우수함을 알 수 있었다. 특히 300 kHz의 경우 550 kHz에 비하여 약 2배 이상 우수하게 나타났다.

(3) Bobbin coil에 의한 입계부식의 깊이평가는 40% 이하의 결함에 대하여는 매우 분산된 경향을, 40% 이상의 결함은 매우 과소평가하는 경향을 나타내었다. 결론적으로 입계부식의 깊이에 대한 정량적인 ECT 평가는 신뢰도가 매우 낮았다. 따라서 입계부식에 대하여는 결함의 검출여부가 더 중요한 의미를 갖는 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부에서 주관하는 원자력연구개발 중장기사업으로 수행된 것입니다.

#### 참고문헌

- [1] D. H. Hur, M. S. Choi, D. H. Lee, J. A. Park, J. H. Han, "Fabrication and use of corrosion defect specimens for enhancement of ECT reliability for nuclear steam generator tubing", J. Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 20, No. 5, pp. 451-456, (2000)
- [2] A. P. L. Turner, J. P. N. Paine, in Steam Generator Reference Book, Volume 2/3, pp. 13-1, EPRI Report TR-103824, EPRI, (1994)
- [3] J. Siegel, "Detecting SG tube cracks in difficult places", Nuclear Engineering International, Vol. 41, No. 498, pp. 18-19, (1996)