

# 배열와전류프로브를 이용한 증기발생기 세관의 결함 변화에 따른 유한요소해석

## Finite Element Method Analysis of Eddy Current Array Probe According to Defects Variation of Steam Generator

김 지 호\*, 이 향 범\*\*

Ji-Ho Kim, Hyang-Beom Lee

### Abstract

In this paper, the ECT(eddy current testing) signal analysis of eddy current array probe for inspection of SG(steam generator) tube in NPP(nuclear power plant) using electromagnetic FEM(finite element method) was performed. To obtain the electromagnetic characteristics of probes, the governing equation was derived from Maxwell's equation, and the problem was solved by using the 3-dimensional FEM. The types of defects were FBH(flat bottomed hole) and OD groove, Spiral groove, natural defects(pitting, SCC, multiple SCC, wear). The depth of FBH defects were 20%, 40%, 60%, 80%, 100 of SG tube thickness, and it was assumed that the defects were located on the tube outside. And the operation frequency of 100kHz, 300kHz and 400kHz were used. Material of specimen was Inconel 600 which is usually used for SG tubes in NPP. The signal difference could be observed according to the variation of size and depth on FBH defects and operation frequencies. The results in this paper can be helpful when the ECT signals from EC array probe are evaluated and analyzed.

**Keywords** : ECT(eddy current testing), SG(steam generator) tube, FEM(finite element method), EC array probe

### 1. 서 론

최근 산업고도화가 진행됨에 따라 구조물과 공업제품 등이 대형화 되고, 복잡화 되는 추세이며, 이에 따라 안전가동과 제해방지를 위하여 안전관리가 요구되고 있다. 따라서 대형사고를 미연에 예방하고 구조물의 안정성 확보를 위해 비파괴 시험에 대한 관심이 증대되고 있다.

특히 원자력 발전소의 증기발생기(Steam Generator ; SG) 세관은 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 세관의 건전성 확보가 필수적이다. 그래서 SG 세관의 신뢰성을 유지하기 위해 비파괴 검사의 하나의 방법 중 와전류 탐상검사(Eddy Current Testing ; ECT)는 매우 중요하고 정기적으로 수행해야 할 검사이다[1].

SG 세관의 검사를 위해 널리 사용되고 있는 ECT의 방법 중 보빈프로브(bobbin probe)는 관의 검사를 빠른 속도로 진행하고 방대한 데이터를 축적하게 된다. 그러나 보빈프로브의 평형코일 축은 SG 세관의 축과 유사하기 때문에 원주방향의 결함을 검출하기 어렵다. 그래서 더 정확한 SG 세관의 검사를 위해 RPC 프로브(Rotating Pancake

Coil probe)를 사용하게 된다. 그것은 서로 다른 축에 3개 또는 더 많은 코일을 가지고 있으면서 더 정확한 결함신호를 판별할 수 있다. 그러나 RPC 프로브는 저속의 검사 속도와 한정된 지역을 검사하는 장점을 가지고 있다. 이는 프로브가 세관을 회전하며 움직이기 때문에 검사 속도는 매우 느리다[2].

이러한 제한된 부분을 해소하기 위해 새로운 ECT 장비가 개발되어졌다. 그것은 많은 pancake coil을 가지고 있고 이 코일들은 그것의 조작 모드에 따라 2가지 종류의 코일로 나누어진다. 하나의 그룹은 transmit coil로 자장을 발생시키고 와전류를 유도한다. 또 하나의 그룹은 receive coil로 자장의 신호와 결함을 포함한 신호를 받아들인다. 배열와전류프로브는 탐상 속도가 매우 빠르고 결함 검출 능력이 매우 우수하다. 배열와전류프로브는 RPC프로브의 탐상 속도보다 약 40배 정도 빠르며 U-bend, tube sheet 및 tube support를 포함한 파이프의 전 영역의 탐상을 가능케 하였다[3]. 현장의 배열와전류프로브의 데이터를 분석하기 위하여, 다양한 결함에 따른 ECT 신호의 데이터베이스를 구축하여야 한다. 이는 실물크기의 결함 모형을 통하여 실험에 의하여 ECT 신호를 얻는 것이 최적이라 할 수 있겠지만 다양한 결함과 실물 크기의 모형을 만드는 것이 매우 어렵고 그 비용이 많이 든다. 이에 반해 유한요소법과 같은 수치해석 기법은 기기의 설계 및 이론적인 결과를 위하여 공학분야에서 널리 사용되고 있는 매우 능률적인 방법이다. 그래서 본 연구는 전자기 수치해석 기법을 이용한 배열와전류프로브의 신호해석을 제안한다.

접수일자 : 2009년 8월 14일

최종완료 : 2009년 8월 20일

\*숭실대학교 전기공학과 대학원

\*\*숭실대학교 전기공학과

교신지자, E-mail : hyang@ssu.ac.kr

## II. 배열와전류프로브

### 1. 배열와전류프로브의 구조 및 원리

배열와전류프로브(EC array probe)는 transmit coil과 receive coil이 여러 개 배열된 형태로 구성되어 있다. 각 코일들이 축방향과 원주방향으로 배열되어 있어 축방향 또는 원주방향 모두에 민감하게 반응하며, 체적성 결함, IGA(Inter Granular attack), 여러 방향으로 복잡하게 형성된 크랙성 결함도 식별이 가능하다. 이는 기존의 보빈프로브나 RPC 프로브에 비해 결함 검출능력이 뛰어나고 U-bend나 튜브 시트에서의 신호 대 잡음(S/N)비 또한 5~10배 정도 향상되었다.

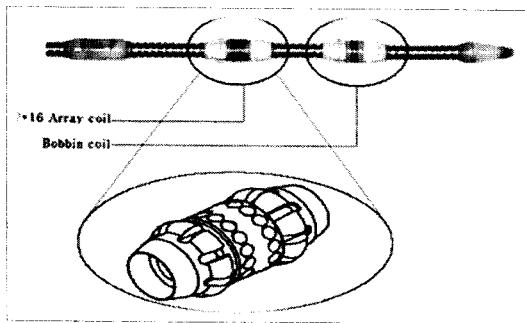


그림 1. 2×16 배열와전류프로브  
Fig. 1 2×16 EC Array Probe

배열와전류프로브의 원리는 그림 2에 나타나 있는 것과 같이 transmit coil T1은 시변자계를 발생시키고, receive coil R1, R2, R3는 결함신호를 받아들이는 역할을 한다. 배열와전류프로브를 이용한 ECT 방법은 18~39 inch/sec의 빠른 속도로 축방향 및 원주방향의 결함을 검출할 수 있기 때문에 한정된 시간 내에 많은 량의 검사를 해야 하는 원전 SG 세관 검사에 적합하다.

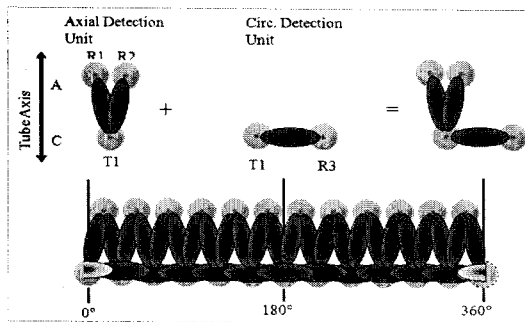


그림 2. 배열와전류프로브의 원리  
Fig. 2 Principle of ECT Array Probe

### 2. 배열와전류프로브 해석 모델

본 논문에서는 이미 검증된 3차원 유한요소해석 프로그램인 OPERA 3D를 이용하여 해석대상에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 위해 사용된 도체관의 재질은 SG 세관으로 사용되는 Inconel 600 도체관으로 하였다. 프로브는 배열와전류프로브를 사용하였으며, 해석대상인 도체관 미 프로브에 대한 제원은 표 1에 나타내었다. 그에 대한 해석모델은 그림 3과 같다.

해석결함은 ASME(American Society of Mechanical

표 1. 해석 모델의 사양

Table 1. Specification of analysis model

| 관 및 결함      |                         |                         |
|-------------|-------------------------|-------------------------|
| 재질          | 관 크기 mm<br>(내경, 외경, 두께) | 결함 크기 mm<br>(폭, 높이, 깊이) |
| Inconel 600 | 8.46×9.53×1.07          | 3.0×3.0×0.42672         |
| 코 일         |                         |                         |
| 시험 주파수      | 크기 mm<br>(내경, 외경, 높이)   |                         |
| 250 kHz     | 2.0×3.0×1.0             |                         |

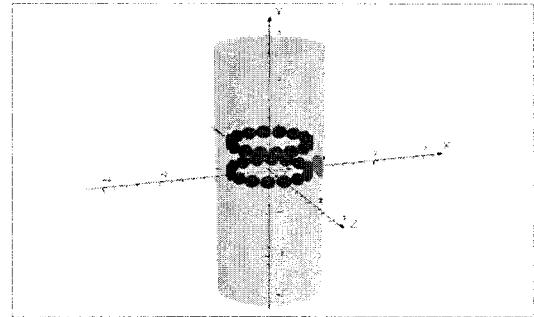


그림 3. 해석 모델  
Fig. 3 Analysis model

Engineers) 표준시험편의 평저공(Flat Bottomed Hole, FBH) 결함에 대하여 3차원 유한요소 해석을 수행하여 탐상신호를 획득하였다. 해석시 FBH 결함의 깊이는 세관의 두께의 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 하였다. 결함의 크기 변화 및 시험주파수를 100kHz, 300kHz, 400kHz로 변화시켜 해석하였다. 또한 X-probe용 표준보정시험편(Inline EXP/Spiral groove combo standard tube)의 10% OD(Outer Diameter) groove 결함에 대해 3차원 유한요소 해석을 수행하여 탐상신호를 획득하였다[4]. 또한 자연결함의 탐상을 수행하기 위하여 Pitting, SCC(Stress Corrosion Cracking), Multiple SCC, 삼각형 모양의 Wear를 선정환 후 등가결함으로 변환한 후 해석하였다. 그림 4는 해석결함에 대한 모사 등가결함으로 변환한 그림이다.

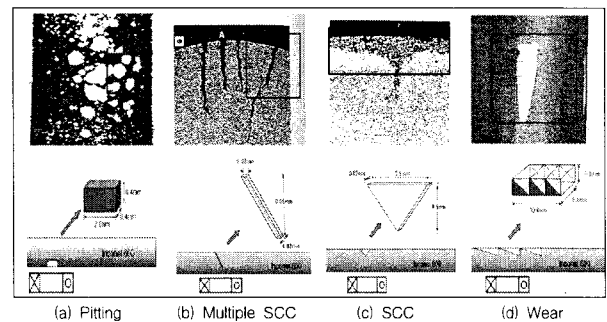


그림 4. 모사 등가결함  
Fig. 4 Equivalent defects

## III. 유한요소해석 결과

### 1. ASME 표준시험편의 결함신호 비교

그림 5는 유한요소해석을 위해 전자기 유한요소 해석 프로그램으로 모델링 후 요소분할을 한 그림이며, 이때의 결함의 종류는 FBH 결함, 결함의 크기는 4.8mm, 결함의 깊이는 관의 외부 표면으로부터 40% 깊이일 때이다. 해석

시 요소망은 사면체 요소망을 사용하였으며, 요소망을 구성하는 절점의 수는 835,197개이며, 사면체 요소수는 1,226,569개이다.

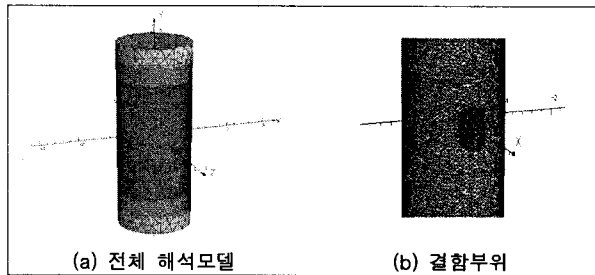


그림 5. 유한요소 해석을 위한 요소망  
Fig. 5. Mesh for Finite Element Analysis

전자기 수치해석을 이용하여 얻은 결합신호와 배열와전류 프로브와 탐상장비를 이용한 결합신호와 비교해 보았다. 그림 5은 전자기 유한요소 해석을 통해 얻은 결합신호이며, 그림 6은 실제 배열와전류프로브를 이용하여 얻은 탐상신호이다.

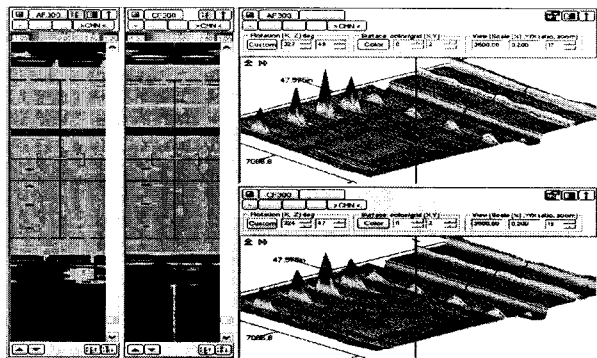


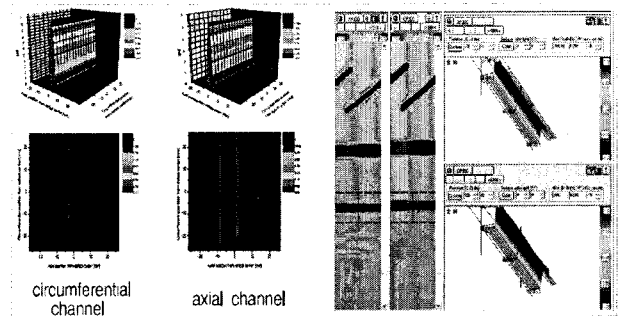
그림 6. 와전류탐상 측정신호  
Fig. 6. Measured ECT signals using testing equipment

결함신호는 축방향 채널과 원주방향 채널을 각각 나타내었으며 결함 부위에서 신호의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 결함의 깊이가 관두께의 20% 결함의 경우 ASME 표준시험편에 90° 간격으로 결함이 4개 존재하여 같은 크기의 결함신호가 4개가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 원주방향 채널의 경우 transmit coil과 receive coil이 축방향으로 같은 높이에 있지만 축방향 채널의 경우 transmit coil과 receive coil의 위치가 축방향으로 6.5mm 위쪽에 위치하고 있어 결함신호 발생 위치가 원주방향 채널보다 빠르게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

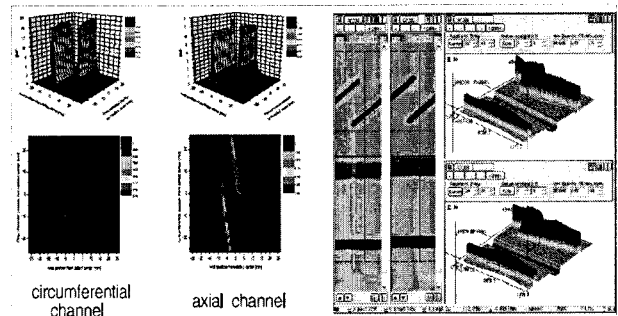
## 2. 결함의 종류에 따른 결함신호 비교

그림 7과 그림 8은 X-probe Combo 표준보정시험편에 있는 OD groove 결함에 대한 해석신호와 Spiral groove 결함을 해석한 결함신호이다.

OD groove 결함은 결함의 폭이 3.1mm이며, 결함의 깊이는 관 두께의 10%이고 Spiral groove 결함은 결함의 폭이 4.7 mm이며, 결함의 두께는 관두께의 40%이다. 해석 주파수는 300kHz일 때의 결함신호이다. OD groove 결함의 해석 결과 원주방향 전체에 대해서 결함신호가 결함의 형상과 같이 발생하였으며, 실제 결함신호와 비교 결과 유사한 형상의 결함신호를 확인할 수 있었다. 또한 축방향



(a) 유한요소 해석신호 (b) 측정신호  
그림 7. OD groove결함에 대한 와전류탐상신호  
Fig. 7 ECT signals at OD groove defects



(a) 유한요소 해석신호 (b) 측정신호  
그림 8. Spiral groove결함에 대한 와전류탐상신호  
Fig. 8 ECT signals at Spiral groove defects

채널의 신호보다 원주방향 채널의 신호가 최대값을 기준으로 약 2배 정도 크게 발생하였으며 이는 OD groove 결함의 경우 결함의 방향이 원주방향 결함으로 축방향 채널보다 원주방향 채널의 신호가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Spiral groove 결함의 해석 결과 원주방향으로 Spiral 형태 즉 나선형태로 결함신호가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 실제 결함신호와 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 축방향 채널의 신호보다 원주방향채널의 신호가 최대값을 기준으로 약 2.5배 정도 크게 발생하였으며 이는 OD groove 결함과 동일한 신호 특성을 파악할 수 있었다. 실제 Spiral groove 결함은 배열와전류프로브를 구성하고 있는 pancake coil의 상태를 확인할 수 있는 중요한 표준결함이다.

그림 9는 모사등가결함을 전자기 유한요소 해석을 통하여 얻은 결함신호이다. 해석 결과 각각의 결함별 특징을 확인할 수 있었다. Wear를 제외한 Pitting, Multiple SCC, SCC 결함은 모두 축방향 결함으로 해석 결과 축방향 채널의 신호가 원주방향 채널의 신호보다 더 크게 발생한 것을 확인할 수 있었다.

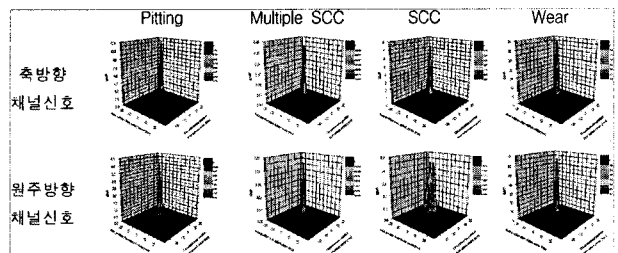


그림 9 모사등가 결함에 와전류탐상 신호해석  
Fig. 9. ECT signals analysis at Equivalent defects

### 3. 결함의 깊이, 크기, 시험주파수 변화시 탐상 신호의 비교

그림 10은 시험주파수를 300kHz로 고정한 상태에서 결함의 깊이를 40%, 60%, 100%로 변화시켜 신호의 변화를 비교한 그래프이다. 결함의 크기와 깊이가 변화하게 되면 센서의 이동에 따라 SG 세관에 발생하는 와전류의 위치 및 크기가 변화하게 되고 결국 탐상 신호의 변화로 이어지게 된다. 해석 결과 시험주파수를 일정하게 유지시킨 상태에서 결함의 깊이가 증가되면 신호의 크기가 증가하는 현상을 나타내었다. 결함신호의 증가는 표 2와 같다. 결함깊이 40%일 때 결함신호의 최대값을 기준으로 축방향 채널의 겨우 결함신호는 결함의 깊이를 40%에서 60%로 증가시 약 2.02배, 60%에서 100%로 증가시 약 3.05배, 40%에서 100%로 증가시 6.18배 신호가 증가하는 현상을 보였다. 원주방향 채널의 결함신호는 결함의 깊이를 40%에서 60%로 증가시 약 1.98배, 60%에서 100%로 증가시 약 2.94배, 40%에서 100%로 증가시 5.82배 신호가 증가하는 현상을 보였다.

그림 11와 12은 시험주파수를 300kHz로 고정한 상태에서 결함의 깊이를 1.2mm, 2.4mm, 4.8mm로 증가시켜 신호의 변화를 비교한 결과이다. 해석결과 시험주파수를 일정하게 유지시킨 상태에서 결함의 크기가 증가되면 신호의 발생 위치 및 크기가 증가하는 현상을 나타내었다. 그림 13은 결함신호를 2차원 C-scan으로 나타낸 그림이다. 그림에서 보이는 것과 같이 결함의 크기가 증가할수록 결함신호의 발생 넓이가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 결함 크기 증가에 따른 신호의 변화는 표 3과 같다.

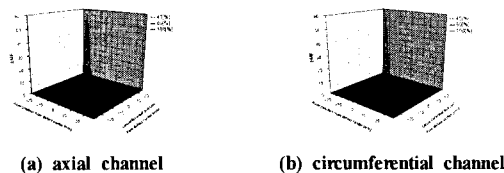
그림 13에서 그림 16은 결함 깊이를 일정하게 유지한 상태에서 시험주파수를 100kHz 및 400kHz 두 종류로 변화시켜 해석한 결과이다. 시험주파수 변화에 따른 결함신호의 증가량은 결함의 깊이 및 크기에 따라 다르게 나타났다. 표 4에서 시험주파수가 100kHz에서 400kHz로 변화할 때 결함의 깊이가 40%, 결함의 크기가 4.8mm의 경우 축방향 채널의 결함신호는 크기가 약 3.16배 증가하였으며, 원주방향 채널의 결함신호는 약 2.87배 증가하였다. 결함의 깊이가 60%, 결함의 크기가 2.8mm의 경우 축방향 채널의 결함신호는 크기가 약 2.96배 증가하였으며, 원주방향 채널의

표 2. 깊이 변화에 따른 와전류탐상 신호결과  
Table 2 ECT signals according to depth variation

|        |         |       |       |
|--------|---------|-------|-------|
| 결함크기   | 1.3 mm  |       |       |
| 시험주파수  | 300 kHz |       |       |
| 결함깊이   | 40%     | 60%   | 100%  |
| 축방향채널  | 9.83    | 19.90 | 60.61 |
| 원주방향채널 | 10.29   | 20.45 | 59.00 |

표 3. 크기 변화에 따른 와전류탐상 신호결과  
Table 3 ECT signals according to size variation

|        |         |       |       |
|--------|---------|-------|-------|
| 결함깊이   | 40 %    |       |       |
| 시험주파수  | 300 kHz |       |       |
| 결함크기   | 1.2mm   | 2.4mm | 4.8mm |
| 축방향채널  | 8.52    | 31.04 | 90.39 |
| 원주방향채널 | 8.97    | 32.81 | 92.13 |



(a) axial channel (b) circumferential channel

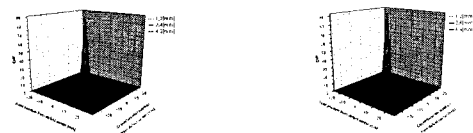
그림 10. 깊이 변화에 따른 와전류탐상 신호

Fig. 10 ECT signals according to depth variation



(a) axial channel (b) circumferential channel

그림 11. 크기 변화에 따른 와전류탐상 신호(2D C-scan)  
Fig. 11 ECT signals according to size variation(2D C-scan)



(a) axial channel (b) circumferential channel

그림 12. 크기 변화에 따른 와전류탐상 신호

Fig. 12 ECT signals according to size variation

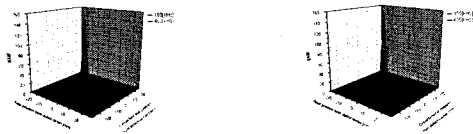
결함신호는 약 2.53배 증가하였다. 결함의 깊이가 100%, 결함의 크기가 1.3mm일 때는 결함의 축방향 채널의 결함신호는 크기가 약 4.11배 증가하였으며, 원주방향 채널의 결함신호는 약 3.82배 증가하였다.



(a) axial channel (b) circumferential channel

그림 13. 시험주파수 변화시 와전류탐상신호(결함깊이 : 40%, 결함크기 : 4.8mm)

Fig. 13. ECT signals according to frequency variation (depth of defect : 40%, size of defect: 4.8mm)



(a) axial channel (b) circumferential channel

그림 14. 시험주파수 변화시 와전류탐상신호(결함깊이 : 60%, 결함크기 : 2.8mm)

Fig. 14. ECT signals according to frequency variation (depth of defect : 60%, size of defect: 2.8mm)



(a) axial channel (b) circumferential channel

그림 15. 시험주파수 변화시 와전류탐상신호(결함깊이 : 100%, 결함크기 : 1.3mm)

Fig. 15. ECT signals according to frequency variation(depth of defect : 100%, size of defect : 1.3mm)

표 4. 시험주파수 변화에 따른 와전류탐상 신호  
Table 4 ECT signals according to frequency variation

| 결함깊이      | 40%    |       | 60%    |       | 100%   |      |
|-----------|--------|-------|--------|-------|--------|------|
| 결함크기      | 4.8 mm |       | 2.8 mm |       | 1.3 mm |      |
| 시험주파수 kHz | 100    | 400   | 100    | 400   | 100    | 400  |
| 측방향 채널    | 33.1   | 104.7 | 49.7   | 147.2 | 20.2   | 82.9 |
| 원주방향 채널   | 35.9   | 103.1 | 61.1   | 154.5 | 21.3   | 81.2 |

## VI. 결 론

본 논문에서는 원전 SG세관의 결함검출을 위한 배열와전류프로브의 와전류탐상 유한요소해석을 수행하여 탐상신호를 획득하고 분석하였다. 전자기 유한요소해석을 수행하기 위해 이미 검증된 3차원 유한요소 해석프로그램인 OPERA 3D를 이용하였고, 해석대상으로는 원자력발전소 증기발생기 세관으로 널리 사용되는 Inconel 600 도체관을 사용하였다. 결함의 위치를 외부 표면에 존재하게 하고 결함의 깊이는 세관 두께의 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 하였다. 또한 시험주파수를 100 kHz, 300 kHz, 400 kHz로 변화시켜 해석한 결과 결함의 깊이가 증가할수록, 시험주파수가 증가할수록, 결함의 크기가 증가할수록 신호의 크기가 증가하였다. 그리고 결함의 종류를 표준결함인 ASME 표준시험편과 X-probe용 표준보정시험편의 결함을 선택하여 해석하고, 자연결함의 탐상을 위하여 Pitting, Multiple SCC, SCC, 삼각형 모양의 Wear을 선정한 후 등가결함으로 변환한 뒤 해석하였다. 해석결과 유한요소탐상신호와 측정신호가 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 배열와전류프로브가 측방향 결함과 원주방향 결함에 대하여 모두 반응하여 결함의 진행방향에 상관없이 결함의 탐상을 원활하게 할 수 있었다. 본 논문에서의 연구결과는 현장에서 배열와전류프로브를 사용함에 있어서 결함신호를 이해하고 예측하는데 필요한 자료가 될 것이며, 이는 궁극적으로 증기발생기 세관의 건전성을 높여 원자력발전소 안정성 확보에 큰 도움이 될 것이라 사료된다.

## [ 참고 문헌 ]

- [1] Young-Kil Shin, "Design of encircling remote field eddy-current probe," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 2, March, 2002
- [2] Hyang-beom Lee, "Eddy current signal analysis for transmit receive pancake coil on ECT array probe," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, vol. 26, no. 1, pp. 25-29, February, 2006
- [3] L. S. Obrutsky, V. S. Cecco, S. P. Sullivan and D. Humphrey, "Transmit-receive eddy current probes for circumferential cracks in heat exchanger tubes," *Materials Evaluation*, vol. 54, no 1, pp. 93-98. The American Society for Nondestructive Testing, Inc., January, 1996)
- [4] Covers Inconel 600 (tm) Super Alloy in Pipe and Tube, ASTM Code, ASTM B163, no. 110

- [5] O. Biro and K. Preis, "Finite element analysis of 3-D eddy currents," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 26, no. 2, pp. 418-423, 1990



김 지 호

2004년 숭실대학교 전기공학과 졸업  
2006년 숭실대학교 전기공학과(공학석사)  
2008년 숭실대학교 전기공학과(박사수료)  
<관심분야> 전기기기, 비파괴검사, 전자기 센서 설계 및 개발, 전자기 수치해석  
<e-mail> [magnetic1@ssu.ac.kr](mailto:magnetic1@ssu.ac.kr)



이 향 범

1989년 서울대학교 전기공학과 졸업  
1991년 서울대학교 전기공학과(공학석사)  
1995년 서울대학교 전기공학과(공학박사)  
1995년 기초전력공학공동연구소 선임연구원  
1995년~현재 숭실대학교 전기공학부 교수  
<관심분야> 전기기기, 비파괴검사, 전자장 수치해석 및 설계, 전자기 센서 설계 및 개발, 최적 설계  
<e-mail> [hyang@ssu.ac.kr](mailto:hyang@ssu.ac.kr)