

# 원전 증기발생기세관 진단을 위한 와전류탐상 수치해석

## Numerical Analysis of ECT for Investigation of SG Tube in NPP

임 건 규\*, 이 향 범

(Geon-Gyu Lim and Hyang-Beom Lee)

**Abstract :** 본 논문에서는 원전 증기발생기세관 진단을 위한 와전류탐상의 전자기 수치해석을 수행하였다. 전자기적 특성을 해석하기 위하여 맥스웰 방정식을 이용하여 지배방정식을 유도하였고, 3차원 전자기 유한요소 프로그램인 OPERA 3D를 이용하여 전자기 수치 해석을 수행하였다. 신호해석을 위해 사용된 프로브의 종류는 배열와전류프로브이며, FBH 결함의 신호를 해석하였다. 결함의 깊이는 세관 두께의 40[%], 60[%] 및 100[%]로 하였다. 시험주파수는 100[kHz], 300[kHz], 400[kHz]를 사용하였고, 각각의 결함 및 시험주파수에 대한 결과를 비교 분석하였다. 본 논문의 결과는 앞으로 배열와전류프로브를 이용하여 원전 증기발생기세관 진단을 할 경우 신호 해석에 도움이 될 것으로 사료된다.

**Keywords:** Eddy current test, FEM, Steam generator tube, Numerical analysis, EC Array probe, T/R coil

### I. 서 론

원자력발전소는 2008년 6월을 기준으로 전체 발전량의 23.6[%]를 차지하고 있고, 현재 신고리 1-4호기, 신월성 1, 2호기등 6기가 건설중에 있다[1]. 이는 전력에너지의 관점에서 원자력 발전소가 우리나라의 전력산업 및 경제에 미치는 영향은 실로 지대하다고 할 수 있다. 원자력발전소 설비 중 하나인 증기발생기(Steam Generator: SG)세관은 1차 계통인 원자로에서 2차 계통인 터빈발전기부분에 열을 전달하는 중간역할을 하는 동시에 방사능을 차단하는 역할을 하는 중요한 부분이다. SG세관 검사는 제품의 제작과정과 운전중에 수행되며, 그 수행 시점에 따라 가동 전 검사와 가동 중 검사로 나눌 수 있다. SG세관을 검사하는 방법으로는 주로 비파괴 검사의 한 종류인 와전류탐상(Eddy Current Test : ECT)이 사용된다. ECT는 종류로 도전성 검사체에 와전류를 유도시켜 센서코일의 임피던스 변화 및 유도기전력의 변화를 관찰하여 피 검사체의 결함 존재 유무 및 물질특성의 변화를 탐지해 내는 검사방법이다. 현재 원전 SG세관의 진단은 보빈프로브와 RPC(Rotating Pancake Coil)프로브를 사용한 방법이 주를 이루고 있다. 보빈 프로브는 검사속도가 빠르고 세관 전 영역에 대한 검사가 가능하지만 SG세관의 원주방향 결함검출이 곤란하다는 단점이 있고, RPC프로브는 축방향 및 원주방향의 결함 검출 성능이 우수하지만 검사속도가 느려 정해진 기간내에 SG세관을 검사하기가 곤란하다는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 검사성능 및 검사시간의 단축을 위해 개발된 배열와전류프로브(EC Array Probe)를 모델링하여 전자기 수치해석을 수행하였다. 전자기 수치해석을 수행하기 위해

맥스웰 방정식(Maxwell's Equation)을 이용하여 지배방정 식을 유도하였고, 모델을 해석하는데 사용된 미지수 변수 로는 자기벡터포텐셜 (Magn-etic Vector Potential ; MVP)  $\vec{A}$  및 전기스칼라포텐셜 (Electric Scalar Potential ; ESP)  $V$ , 리듀스드자기스칼라포텐셜 (Reduced Magnetic Scalar Potential ; RMSp)  $\phi$ , 토탈자기스칼라포텐셜 (Total Magnetic Scalar Potential ; TMSp)  $\psi$  를 사용하였다

### II. 해석이론

#### 2.1 문제 해석을 위한 맥스웰방정식

와전류 문제를 해석하기 위해 맥스웰 방정식중 관련 수식을 정리하면 아래와 같다[2].

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5)$$

여기서  $\vec{H}, \vec{B}, \vec{E}$ 는 각각 자계의 세기, 자속밀도, 전계의 세기이며,  $\vec{J}_s, \vec{J}_e$ 는 각각 전원전류밀도, 와전류밀도이다. 또한  $\mu, \sigma$ 는 각각 자기투자율, 전기전도율이다.

#### 2.2 각 영역별 유한요소해석을 위한 지배방정식

와전류 문제 해석시 3차원 모델링의 경우 도체내부에서 자기벡터포텐셜(Magnetic Vector Potential : MVP)의 X, Y, Z 세방향 성분 및 전기스칼라포텐셜(Electric Scalar Potential : ESP)을 미지수로 잡아야 하기 때문에

\* 책임저자(Corresponding Author)

임건규, 이향범: 숭실대학교 전기공학과

(fortune79@ssu.ac.kr, hyang@ssu.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 주관기관 기초전력 연구원 과제번호 R-2005-7-073 연구비 지원으로 이루어졌음.

자유도(Degree of Freedom)가 4가 된다. 이 경우 암페르 법칙(Ampere's Law)에서 유도되는 지배방정식만으로는 식이 부족하기 때문에 전류연속조건을 추가하여 해석하게 된다. 공간의 요소분할에 따른 요소수 증가로 자유도 역시 증가하여 계산량이 아주 많아진다. 따라서 문제 해석시 미지수를 줄이기 위하여 와전류가 흐르는 도체를 제외한 영역에서는 자유도가 1인 자기스칼라포텐셜(Magnetic Scalar Potential : MSP)을 적용하여 모델을 해석하였다[3]. 문제를 해석하기 위해서 그림1과 같이 영역을 3부분으로 분할하였다.

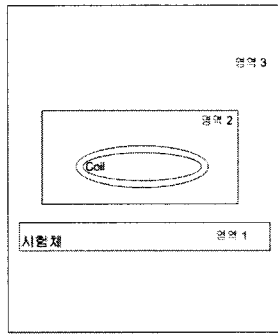


그림 1. 영역설정  
Fig. 1. Domain setting

첫 번째 영역은 도체가 존재하여 와전류( $\vec{J}_e$ )가 유도되는 영역으로 변수는 MVP  $\vec{A}$  와 ESP  $V$ 를 사용하여 지배방정식을 유도하면

$$\nabla \cdot \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + \sigma \left( \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V \right) = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \vec{A} = 0 \quad (7)$$

이 된다.

두 번째 영역은 외부에 전원전류( $\vec{J}_s$ )가 존재하는 영역으로 RMSP  $\phi$ 를 사용하여 지배방정식을 유도하면

$$\mu \nabla^2 \phi = \mu \nabla \cdot \vec{H}_s \quad (8)$$

이 된다.

세 번째 영역은 전원전류( $\vec{J}_s$ )가 존재하지 않는 영역으로 TMSP  $\psi$ 를 이용하여 지배방정식을 유도하면

$$\nabla \cdot \mu \nabla \psi = 0 \quad (9)$$

이 된다.

매질 경계조건은 세 영역이 모두 독립적이지 않고, 서로의 경계를 공유하면서 연결되어 있으므로 식 10 및 식 11로 표현 할 수 있다.

$$\vec{B}_1 \cdot \vec{n}_1 + \vec{B}_2 \cdot \vec{n}_2 = 0 \quad (10)$$

$$\vec{H}_1 \times \vec{n}_1 + \vec{H}_2 \times \vec{n}_2 = 0 \quad (11)$$

### III. 배열와전류프로브

배열와전류프로브는 Transmit 와 Receive 코일이 여러 개 배열된 형태로 구성되어 있다. 그림 2 는 앞부분이 Bobbin 코일, 뒷부분이 Array 코일로 이루어진 배열와전류프로브이다. 배열와전류 프로브는 각 코일들이 축 방향과 원주 방향으로 배열되어 있어 축 방향 또는 원주 방향 모두에 민감 하게 반응하며, 방향성이 없는 결합 즉, 여러 방향으로 복잡하게 형성된 크랙성 결합도 식별이 가능하다[4].

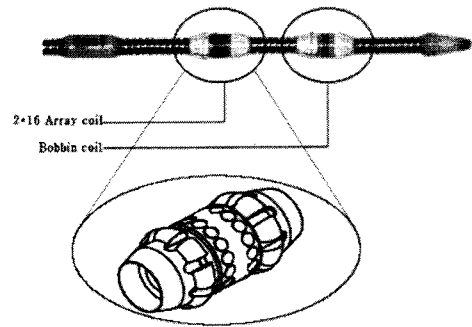


그림 2. 배열와전류프로브  
Fig. 2. EC Array Probe

배열와전류프로브의 원리는 그림 3 에 나타나 있다. Transmit 코일 T1 은 시변자계를 발생시키고, Receive 코일 R1, R2, R3 는 결합 신호를 받아들이는 역할을 하게 된다[5].

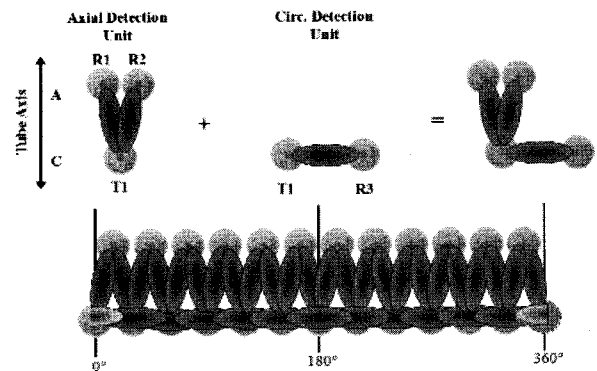


그림 3. 배열와전류프로브의 원리  
Fig. 3. Principle of ECT Array Probe

### IV. 모델해석

본 논문에서는 전자기유한요소 해석방법을 이용하여 원전 증기발생기세관의 FBH(Flat Bottom Hole)결함 신호를 해석하였다. 해석모델은 표 1 및 그림 4와 같다. 결함의 깊이는 관 두께의 40[%], 60[%], 100[%]로 하였으며, 이때 시험주파수는 100[kHZ], 300[kHz], 400[kHz]로 하였다. 피검사체의 재질은 원전 SG세관 재질로 사용되는 Inconel

600을 사용하였고, 재료의 도전율은 9.7087e5[S/m]이다.

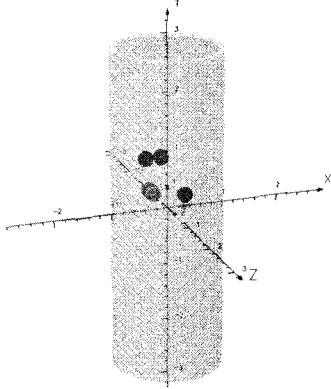


그림 4. 해석모델  
Fig. 4.analysis Model

표 1. 해석모델 제원

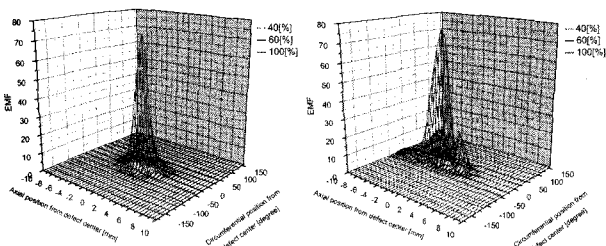
Table 1. Specification of Analysis Model

세관 및 결함		
세관재료	세관 크기 (내경, 외경, 두께)	결함 크기
Inconel 600	16.92*19.06*1.07[mm]	1.3, 2.8, 4.8[mm]
코일		
시험주파수	크기 (내경, 외경, 높이)	
100, 300, 400[kHz]	1.0*5.0*1.0[mm]	

해석시 사용한 프로그램은 전자기 유한요소 해석 프로그램인 OPERA 3D 이며, 해석을 통하여 얻은 결함신호는 시험주파수가 300[kHz]로 유지한 상태에서 결함의 깊이 변화에 대해 비교 분석해 보았으며, 결함의 깊이 및 크기를 일정하게 유지한 상태에서 시험주파수를 변화시켜 침투깊이 변화에 따른 결함 신호의 크기 및 형상 변화를 비교 분석해 보았다.

V. 해석결과

전자기 유한요소해석을 이용하여 배열와전류프로브의 원전 SG세관에 대한 결함신호를 해석하였다. 그림 5는 시험주파수를 300[kHz]로 고정한 상태에서 결함의 깊이를

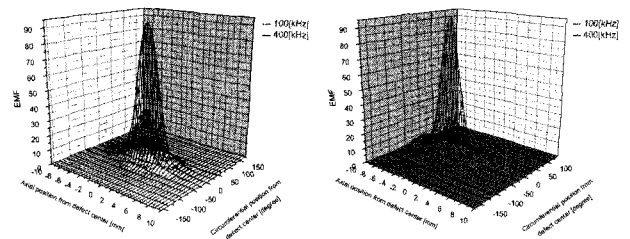


(a) 원주방향채널 (a) Circumferential Channel  
(b) 축방향채널 (b) Axial Channel

그림 5. 시험주파수 300[kHz], 결함크기 1.3[mm]일 때 결함의 깊이 변화시 결함신호비교

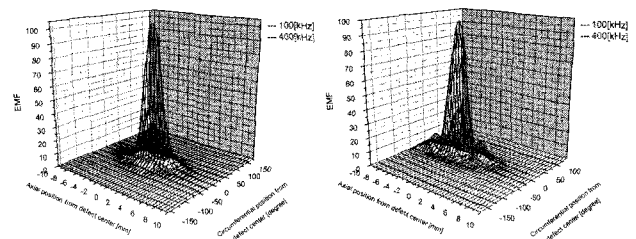
Fig. 5. Comparison of Defect Signal Change Depth of Defect 40[%], 60[%], 100[%]로 증가시켜 신호의 변화를 비교해 보았다. 이때 시험주파수에 대한 침투깊이는 0.933[mm]이다. 결함의 깊이가 변화하게 되면 SG세관에 발생하는 와전류의 크기가 변화하게 되고 결국 탐상 신호의 변화로 이어지게 된다. 해석결과 시험주파수를 일정하게 유지시킨 상태에서 결함의 깊이가 증가되면 신호의 크기가 증가하는 형상을 나타내었다. 결함신호의 증가는 결함의 깊이를 40[%]에서 60[%]로 증가시킬 경우 약 1.98배, 60[%]에서 100[%]로 증가시킬 경우 약 3.61배 증가하는 형상을 보였다.

그림 6 은 결함의 깊이를 일정하게 유지한 상태에서 시험주파수를 100[kHz] 및 400[kHz] 두 종류로 변화시켜 해석한 결과이다. 이때 시험 주파수에 대한 침투깊이는 100[kHz]의 경우 약 1.615[mm]이며, 400[kHz]의 경우 약 0.807[mm]이다.



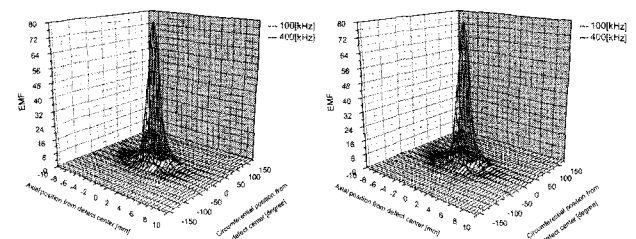
(a) 원주방향채널 (a) Circumferential Channel  
(b) 축방향채널 (b) Axial Channel

A. 결함의 깊이 40[%], 결함크기 4.8[mm]  
A. Depth of Defect 40[%] and Defect Diameter 4.8[mm]



(a) 원주방향채널 (a) Circumferential Channel  
(b) 축방향채널 (b) Axial Channel

B. 결함의 깊이 60[%], 결함크기 2.8[mm]  
B. Depth of Defect 60[%] and Defect Diameter 2.8[mm]



(a) 원주방향채널 (a) Circumferential Channel  
(b) 축방향채널 (b) Axial Channel

C. 결함의 깊이 100[%], 결함크기 1.3[mm]  
C. Depth of Defect 100[%] and Defect Diameter 1.3[mm]

그림 6. 시험주파수 변화시 결함신호비교  
Fig. 6. Comparison of Defect Signal Change of Operation Frequency

시험주파수의 변화시 침투깊이가 변화하게 되어 와전류

탐상시 결합신호의 크기가 변화하게 된다. 결합크기의 증가량은 결합의 깊이 및 크기에 따라 다르게 나타났다. 시험주파수가 100[kHz]에서 400[kHz]로 변화할 때 결합의 깊이가 40[%], 결합의 크기가 4.8[mm]의 경우 결합신호의 크기가 약 2.59배 증가하였으며, 결합의 깊이가 60[%], 결합의 크기가 2.8[mm]의 경우 약 2.35배 증가하였다. 결합의 깊이가 100[%], 결합의 크기가 1.3[mm]일때는 결합의 약 3.82배 증가하였다.

**VI. 결 론**

본 논문에서는 원전 SG세관의 진단을 위한 방법으로 배열와전류프로브를 이용한 와전류 탐상을 전자기 수치해석을 통하여 해석하였다. 해석시에 3차원 전자기 유한요소해석 프로그램인 Opera 3D를 이용하여 해석하였으며 맥스웰 방정식과 각 영역별로 미지수 변수를 다르게 하여 해석해 보았다. 해석결과 결합의 깊이와 시험주파수에 따라 결합신호의 크기가 변화하는 것을 확인할 수 있었으며, 결합의 크기 및 시험주파수를 일정하게 하고 결합의 깊이를 40[%], 60[%], 100[%]로 증가시킬 경우 결합신호의 크기는 선형적으로 증가하지 않고 1.98~3.61배 까지 증가 하였다. 해석시에 결합의 깊이 및 크기를 일정하게 유지한 상태에서 시험 주파수를 100[kHz]~400[kHz]로 증가시키면 결합의 깊이 및 크기에 따라 다르게 나타났으나 2.35~3.82배까지 증가하였다. 본 논문의 결과는 앞으로 배열와전류프로브를 이용하여 원전 증기발생기 세관 진단을 할 경우 신호해석에 도움이 될 것으로 사료된다.

**참고문헌**

- [1] “전력통계속보”, 한국전력공사, 2008-0459-정0001, 제 356호, pp. 7-22, 2008
- [2] 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.
- [3] 이항범 “3차원 와전류 문제의 유한요소해석에서 쿨롱 게이지조건과 전류 연속조건의 영향” 대한전기학회, Vol. 54B-10-5, 2005.
- [4] 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.
- [5] “배열와전류프로브를 이용한 원전 SG 세관신호의 진단기술개발”, 기초전력연구원, R-2005-7-073, 2 차년 중간보고서, 2007.



**임 건 규**  
 2007년 숭실대학교 전기공학부 졸업.  
 2007년~현재 숭실대학교 대학원 전기 공학과 재학(석사과정).  
 관심분야: 전자기 유한요소해석, 비파괴 검사.



**이 항 범**  
 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업  
 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)  
 1995년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사)  
 1995년 기초전력공학공동연구소 선임 연구원  
 1998년~현재 숭실대학교 전기공학부교수  
 관심분야: 전자기기, 비파괴검사, 전자장 수치해석 및 설계, 전자기 센서 설계 및 개발