

ECT Array Probe를 이용한 원전 SG세관의 결함 신호해석

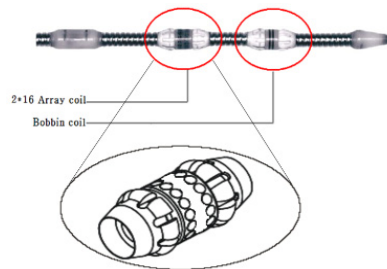
임건규, 김지호, 이향범
 송실대학교 전기공학부

Defect Signal Analysis of Steam Generator Tube in NPP Using ECT Array Probe

Geon-gyu Lim, Ji-Ho Kim and Hyang-Beom Lee
 Dept. of Electrical Engineering, SoongSil University

Abstract - 본 논문에서는 ECT Array Probe를 이용한 원자력 발전소의 SG세관의 결함 신호를 해석하였다. 프로브의 전자기적 특성을 해석하기 위하여 맥스웰 방정식을 이용하여 지배방정식을 유도하였고, 3차원 유한요소법을 이용하여 전자기 수치 해석을 수행하였다. 신호해석을 위해 사용된 결함의 종류는 FBH결함이며, 결함의 깊이는 세관 두께의 40[%] 및 100[%]로 하였다. 시험주파수는 300[kHz], 400[kHz]를 사용하였으며, 각각의 시험주파수에 대한 결과를 비교 분석하였다. 해석결과 결함부위에서 신호의 증가를 확인할 수 있었으며, 주파수 시험변화시 300[kHz]보다 400[kHz]일때 결함 신호가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 획득한 신호를 ASME 표준 시험편을 이용한 ECT Array Probe의 와전류탐상 실험신호와 비교하였다. 본 논문의 결과는 ECT Array Probe를 이용하여 원전 SG세관 검사시 결함신호해석에 도움이 될 것으로 사료된다.

또는 원주 방향 모두에 민감하게 반응하며, 방향성이 없는 결함 즉, 여러 방향으로 복잡하게 형성된 크랙성 결함도 식별이 가능하다[3].

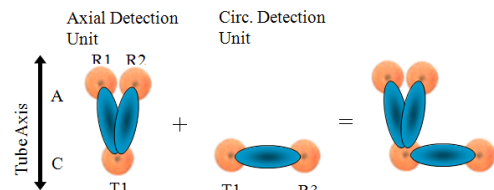


〈그림 1〉 ECT Array Probe

1. 서 론

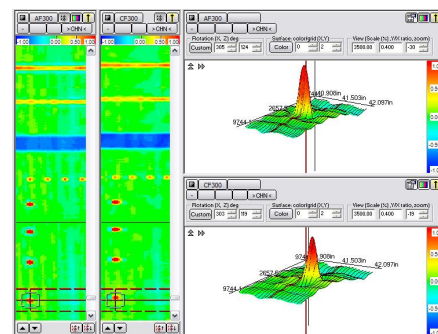
원자력 발전소 설비중 하나인 증기발전기(Steam Generator : SG)세관은 원자로와 증기터빈 사이에서 열전달뿐 아니라 1차 계통과 2차 계통을 분리하여 방사능을 차단하는 역할을 하는 중요한 부분이다. 2002년 울진 4호기의 SG세관 파단사고 이후 사전 점검이 좀 더 중요시 되었다. 비파괴검사(Non-Destructive Testing : NDT)는 검사대상에 손상을 가하지 않고 대상에 존재하는 결함이나 검사대상의 특성을 파악하는 기술로 그 중 SG세관의 검사는 주로 와전류 탐상(Eddy Current Test : ECT)방법을 이용한다. ECT Array Probe를 이용한 ECT 방법은 센서코일의 유도기전력의 변화를 관찰하여 피검사체의 결함이나 특성의 변화를 탐지해내는 방법이다. ECT Array Probe는 여러 개의 Pancake 코일로 구성되어 있고, 각각의 코일은 Transmit 코일과, Receive 코일로 나뉜다. Transmit 코일은 자장을 발생시켜 피 검사 체에 와전류를 유지시키는 역할을 하고, Receive 코일은 Transmit 코일에 의해서 발생된 자장을 검출하여 결함신호를 받아들이는 역할을 하게 된다. ECT Array Probe를 이용하면 18~39 [in/sec]의 빠른 속도로 정밀검사를 수행할 수 있어 한정된 시간 내에 검사를 해야 하는 원전 SG 세관 검사에 적합하다[1]. 본 논문에서는 전자기 유한요소 해석을 통하여 ECT Array Probe를 이용한 원전 SG세관의 결함신호를 해석하였다. 해석 시에 결함의 형상은 FBH(Flat Bottom Hole) 결함이며, 결함의 깊이는 세관의 두께에 40[%] 및 100[%]결함에 대하여 해석을 수행하였다. 시험 주파수는 300[kHz] 및 400[KHz] 두 종류를 사용하였다.

ECT Array Probe의 원리는 〈그림 2〉에서 볼 수 있듯이 Transmit 코일 T1은 시변자계를 발생시키고, 축방향 Receive 코일 R1, R2 및 원주방향 Receive 코일 R3는 결함 신호를 받아들이는 역할을 하게 된다 [4].



〈그림 2〉 ECT Array Probe 원리

〈그림 3〉은 ECT Array Probe를 이용하여 ASME Standard Tube의 FBH 100[%]일 때의 결함신호를 나타낸 것이다.



〈그림 3〉 ECT Array Probe를 이용한 FBH 100[%] 결함신호

2. 해석이론

2.1 문제 해석을 위한 맥스웰방정식

와전류 문제를 해석하기 위하여 맥스웰 방정식 중 관련 수식을 정리하면 아래와 같다[2].

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

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

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

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

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

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

2.2 ECT Array Probe

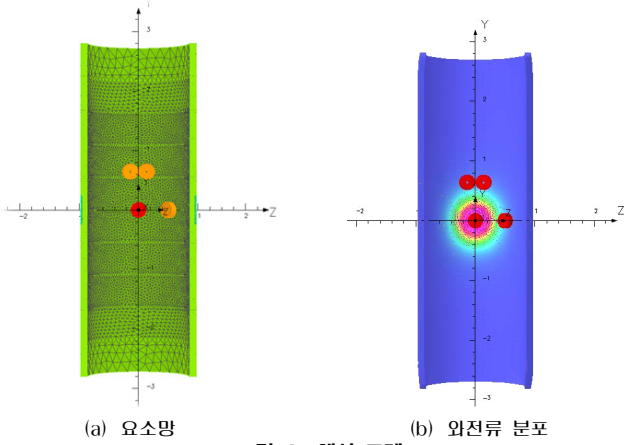
ECT Array Probe는 Transmit 코일과 Receive 코일이 여러 개 배열된 형태로 구성되어 있다. 〈그림 1〉은 ECT Array Probe이며, 축 방향

3. 해석 모델 및 해석결과

3.1 해석 모델

본 논문에서는 3차원 전자기 유한요소 수치해석프로그램인 OPERA 3D를 이용하여 ECT Array Probe를 해석하였다. 피검사체는 ASME Standard Tube와 같게 모델링하였다[5]. 재질은 Inconel 600으로 하였고, 결함의 종류는 FBH이며, 결함의 깊이는 세관 두께의 40[%] 및

100[%] 결함을 해석하였다. 40[%]결함의 크기는 4.8[mm]이고, 100[%]결함의 크기는 1.3[mm]이다. Inconel 600의 도전율은 $9.7087 \times 10^5 [S/m]$ 이다. 모델 해석시 시험주파수는 300[kHz] 및 400[kHz]이며, 이때 시험주파수에 대한 침투깊이는 각각 0.932[mm], 0.876[mm]이다.

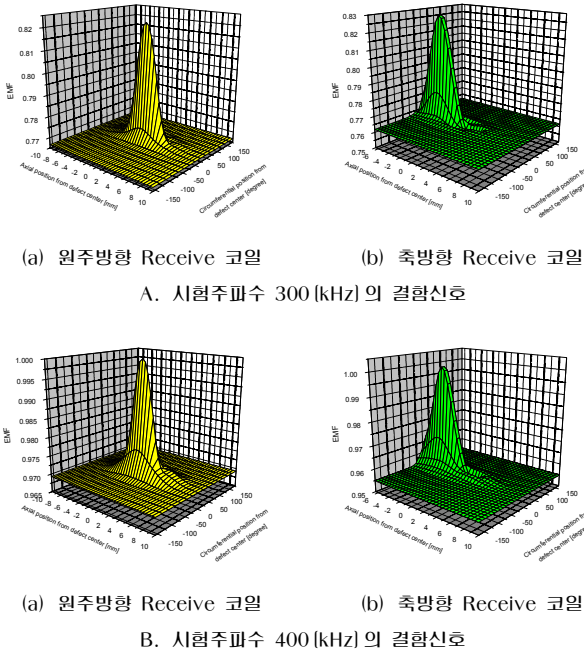


〈그림 4〉 해석 모델

해석모델은 <그림 4>와 같으며, 해석시 요소망은 사면체 요소망을 사용하였다. 요소망을 구성하는 절점의 수는 825,457개, 사면체 요소수는 1,015,066개 이다.

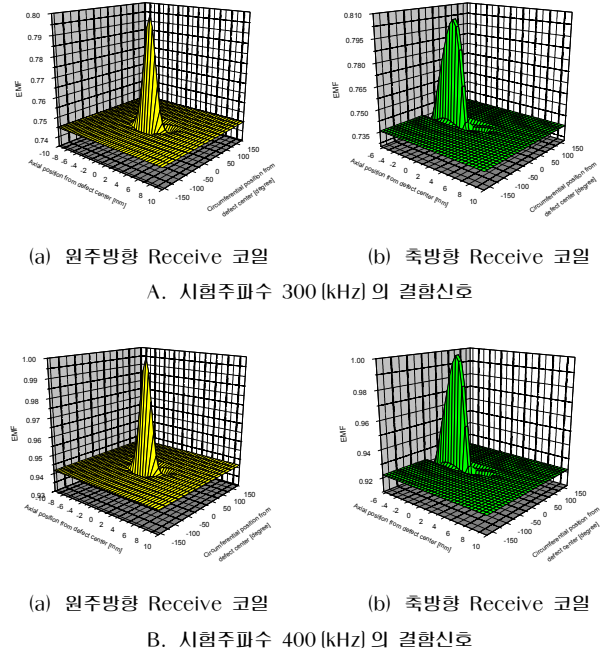
3.2 해석 결과

전자기 유한요소 해석을 통해 얻은 ECT Array Probe 결함 신호는 원주방향 Receive 코일과 축방향 Receive 코일을 분리해서 C-Scan으로 나타내었다.



〈그림 5〉 FBH 40[%] 결함

<그림 5>는 FBH 40[%], <그림 6>은 FBH 100[%]에서 시험주파수 300[kHz], 400[kHz]일 때 전자기 유한요소 해석을 통해 얻은 결함신호를 각각 C-Scan으로 나타낸 그림이다. 해석결과 시험 주파수 및 Receive코일의 방향에 따라 차이는 있었지만 FBH 40[%]의 경우 결함 부위에서 신호의 크기가 약 3~7[%]정도 상승하는 것을 확인할 수 있었으며, FBH 100[%]의 경우는 약 5~8[%]정도 상승하였다. 같은 결함에 서 시험주파수의 크기를 변경하였을 경우 300[kHz] 보다 400[kHz]에서 신호가 크게 발생하였다. 그 크기의 차이는 최대값을 기준으로 FBH 40[%]결함의 경우 400[kHz]일 때 원주방향 Receive코일은 약 17.8[%], 축방향 Receive 코일은 약 17.2[%]정도 신호의 크기가 증가하였으며,



〈그림 6〉 FBH 100[%] 결함

FBH 100[%] 결함의 경우 400[kHz]일 때 원주방향 Receive코일 약 20.1[%], 축방향 Receive코일은 약 19.6[%]정도 신호의 크기가 증가하였다. <그림 3>은 ECT Array Probe를 이용하여 ASME Standard Tube의 FBH 100[%], 시험주파수 300[kHz]일때의 결함신호이다. <그림 6>의 FBH 100[%]결함의 300[kHz]일 때의 신호와 비교해 보면 비슷한 형상의 C-Scan 결함신호를 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 ECT Array Probe를 이용한 원자력 발전소의 SG세관의 결함 신호해석을 위해 3차원 전자기 유한요소 해석을 수행하였다. 해석결과 결함부위에서 신호의 크기는 시험주파수 및 Receive 코일의 방향, 결함의 깊이에 따라 차이는 있었지만 약 3~8[%]정도 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 결함에 대해서 시험주파수를 증가 시킬 경우 300[kHz] 보다 400[kHz]에서 결함신호가 증가하였는데, 최대값을 기준으로 원주방향 Receive코일은 약 17.8~20.1[%], 축방향 Receive 코일은 약 17.8~19.6[%]정도 결함신호의 크기가 증가하였다. 또한 실제 ECT Array Probe를 이용한 ASME Standard Tube검사 신호와 비교결과 유사한 C-Scan 결함신호를 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과는 앞으로 국내 원전 SG세관 검사시 도입이 필요할 것으로 예상되는 ECT Array Probe를 이용한 SG세관 검사시 결함신호 해석에 도움이 될 것으로 사료된다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

- [1] 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.
- [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] L. Obrutsky, B. Lepine, J. Lu, R. Cassidy and J. Carter, "EDDY CURRENT TECHNOLOGY FOR HEAT EXCHANGER AND STEAM GENERATOR TUBE INSPECTION", WCNDT 2004 on Nuclear, 441, 2004
- [4] "배열와전류프로브를 이용한 원전 SG 세관신호의 진단기술개발", 기초전력연구원, R-2005-7-073, 2차년도 중간보고서, 2007.
- [5] "Non-Destructive Examination", ASME CODE, Section. V.