

원전 증기발생기 세관의 결함 변화에 대한 배열와전류프로브의 유한요소해석

김지호*, 이항범*
 송실대학교 전기공학과*

Finite Element Analysis of Eddy Current Array Probe for Defect Variation of Steam Generator Tubes in Nuclear Power Plant

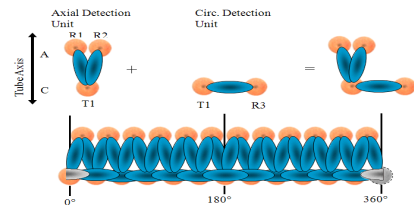
Ji-Ho Kim*, Hyang-Beom Lee*
 School of Electrical Engineering, Soong Sil University*

Abstract - 본 논문에서는 전자기 유한요소 해석을 통하여 원전 증기발생기(SG, Steam Generator) 세관의 결함 변화에 따른 배열와전류프로브의 와전류탐상 특성을 해석하였다. 프로브의 전자기적 특성을 위해 맥스웰 방정식을 이용하여 지배방정식을 유도하였고, 이를 3차원 전자기 유한요소법을 이용하여 문제를 해석하였다. 해석을 위한 선정된 결함은 프로브의 특성파악을 위한 표준시험편과 원전 SG세관에 발생 가능한 결함인 Pitting, SCC, Wear, Multi SCC 결함을 선정하였다. 해석 대상으로는 원자력발전소 증기발생기 세관으로 사용되고 있는 Inconel 600 도체관을 사용하였다. 본 논문으로 통하여 결함의 형상, 크기, 시험주파수의 변화에 따른 탐상신호의 변화를 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과는 배열와전류프로브의 와전류탐상 신호 평가시 도움이 될 것이다.

5~10배 정도 향상되었다[3, 4]. 배열와전류프로브의 원리는 <그림 1>에 나타나 있는 것과 같이 Transmit 코일 T1은 시변자계를 발생시키고, Receive 코일 R1, R2, R3는 결합신호를 받아들이는 역할을 한다. 배열와전류프로브를 이용한 ECT 방법은 18~39 inch/sec의 빠른 속도로 축방향 및 원주방향의 결함을 검출할 수 있기 때문에 한정된 시간 내에 검사를 해야 하는 원전 SG세관 검사에 적합하다.

1. 서 론

원자력발전소의 증기발생기(SG, Steam Generator)세관은 원자로에서 발생된 열을 증기로 바꾸어주는 열교환장치로서 원자로와 증기터빈 사이에서 열전달 뿐 아니라 1차 계통과 2차 계통의 압력 경계를 이루고 있으며 얇은 관으로 이루어져 있어 매우 중요하게 취급되고 있다. 증기발생기 세관에 결함이 발생하게 되면 냉각재 유실 사고까지 발생할 수 있기 때문에 증기발생기 세관의 건전성 확보는 아무리 강조하여도 지나치지 않는다. 따라서 증기발생기 세관의 건전성 확보가 원자력발전소 전체의 안전성 확보에서 차지하는 비중이 매우 크기 때문에 비파괴검사가 주기적으로 수행되고 있다. 증기발생기 하나에는 수 천 개에 이르는 세관들이 있어 검사 시간의 단축을 위한 고속 검사가 필수적이다. 이러한 필요성 때문에 비접속의 고속 검사가 가능한 와전류탐상 시험을 실시하고 있으며, 그 결과를 토대로 세관의 건전성을 평가하고 있다[1].



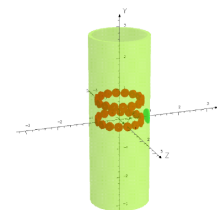
<그림 1> Principle of ECT Array Probe

2.2 해석 모델

본 논문에서는 이미 검증된 3차원 유한요소 해석프로그램인 OPERA-3D를 이용하여 해석 대상에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 위해 사용된 도체관의 재질은 SG세관으로 사용되는 Inconel 600 도체관으로 하였다. 프로브는 배열와전류프로브를 사용하였으며, 해석대상인 도체관 미 프로브에 대한 제원은 <표 1>에 나타내었다. 그에 대한 해석 모델은 <그림 2>와 같다.

<표 1> 해석모델의 사양

관 및 결함		
재 질	관 크기 mm (내경, 외경, 두께)	결함 크기 mm (폭, 높이, 깊이)
Inconel 600	8.46×9.53×1.07	3.0×3.0×0.42672
코 일		
시험 주파수	크 기 mm (내경, 외경, 높이)	
250 kHz	2.0×3.0×1.0	



<그림 2>해석 모델

현재 원전 SG세관의 결함 검출을 위해 보빈프로브(Bobbin Probe)와 RPC(Rotating Pancake Coil) 프로브를 사용한 와전류탐상법이 널리 이용되고 있다. 하지만 검사 성능 미 검사 시간의 단축을 위해 배열와전류프로브가 개발되었다. 배열와전류프로브는 여러 개의 Pancake 코일로 구성되어 있다. 배열와전류프로브의 Pancake 코일은 Transmit 코일과 Receive 코일로 나뉜다. Transmit 코일은 자장을 발생시켜 피 검사체에 와전류를 유기기시키는 역할을 하고, Receive 코일은 결함에 의해서 발생된 자장을 검출하여 결합신호를 받아들인다. 배열와전류프로브는 보빈프로브의 장점인 빠른 검사속도와 RPC 프로브의 장점인 정밀검사를 한번에 수행할 수 있으며, 한정된 지역이 아닌 전 영역을 검사하는 것이 가능하다[2].

본 논문은 이러한 배열와전류프로브를 이용하여 원전 SG세관의 표준결함과 자연결함에 대하여 3차원 유한요소 해석을 수행하여 탐상신호를 획득하였다. 표준결함의 탐상을 위하여 ASME 표준시험편(ASME standard tube, American Society of Mechanical Engineers standard tube)의 FBH(flat bottomed hole) 결함 및 X-probe용 표준보정시험편(Inline EXP/Spiral groove combo standard tube)의 결함을 선택하여 해석하였고, 자연결함의 탐상을 위하여 Pitting, Multiple SCC, SCC(Stress Corrosion Cracking), 삼각형 모양의 Wear을 선정된 후 등가결함으로 변환한 뒤 해석하였다.

2. 본 론

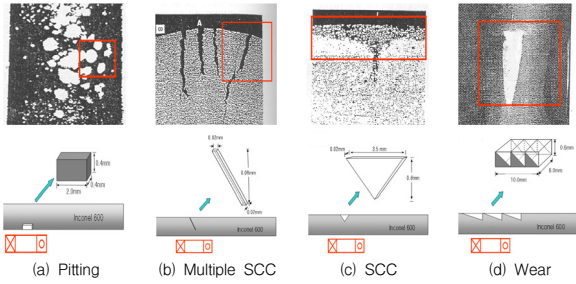
2.1 배열와전류프로브의 구조 및 원리

배열와전류프로브(EC Array Probe)는 Transmit 코일과 Receive 코일 여러개 배열된 형태로 구성되어 있다. 각 코일들이 축방향과 원주방향으로 배열되어 있어 축방향 또는 원주방향으로 배열되어 있어 축방향 또는 원주방향 모두에 민감하게 반응하며, 제작성 결함, IGA(Inter Granular Attack), 여러 방향으로 복잡하게 형성된 크랙성 결함도 식별이 가능하다. 이는 기존의 보빈프로브나 RPC 프로브에 비해 결함 검출 능력이 뛰어나고 U-Bend나 튜브 시트에서의 신호 대 잡음(S/N)비 또한

배열와전류프로브를 이용한 표준결함의 해석을 위하여 ASME 표준시험편의 FBH 결함에 대해 3차원 유한요소 해석을 수행하여 탐상신호를 획득하였다. 해석시 FBH 결함의 깊이는 세관 두께의 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 하였다. 시험주파수는 300kHz로 사용하였다. 그리고 X-probe용 표준보정시험편의 10% OD groove 결함과 40% Spiral groove 결함에 대해서도 해석하였다. 유한요소해석을 위해 전자기 유한요소 해석프로그램으로 모델링 후 요소분할을 한 결과 해석시 요소망은 사면체 요소망을 사용하였으며, 요소망을 구성하는 절점의 수는 835,197개이며, 사면체 요소수는 1,226,569개이다.

자연결함에 대한 해석을 위한 실제 원전에서 발생하는 결함을 등가

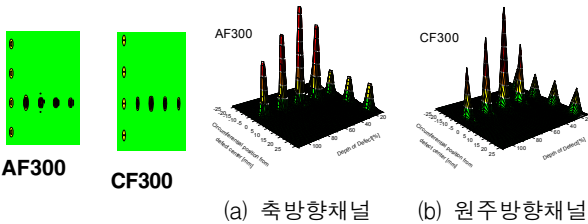
결함으로 변환한 뒤 해석하였다. 해석결함은 Pitting, SCC(Stress Corrosion Cracking), Multiple SCC, Wear이다. <그림 3>은 해석결함을 모사 등가결함으로 변환한 그림이다.



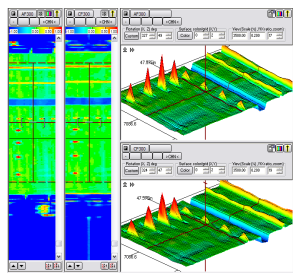
<그림 3> 자연결함에 대한 모사등가결함

2.3 유한요소해석결과

ASME 표준시험편의 결함신호를 비교하기 위하여 전자기 수치해석을 이용하여 얻은 결함신호와 배열와전류프로브와 탐상장비를 이용한 결함신호와 비교해 보았다. <그림 4>는 전자기 유한요소해석을 통해 얻은 결함신호이며, <그림 5>는 실제 배열와전류프로브를 이용하여 얻은 탐상신호이다. 결함신호는 축방향 채널과 원주방향채널을 각각 나타내었으며 결함 부위에서 신호의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 결함의 깊이가 관두께의 20% 결함의 경우 ASME 표준시험편에 90° 간격으로 결함의 4개가 존재하여 같은 크기의 결함신호가 4개가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 원주방향 채널의 경우 Transmit 코일과 Receive 코일이 축방향으로 같은 높이에 있지만 축방향 채널의 경우 Transmit 코일과 Receive 코일의 위치가 축방향으로 6.5 mm 위쪽에 위치하고 있어 결함신호 발생 위치가 원주방향 채널보다 빠르게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

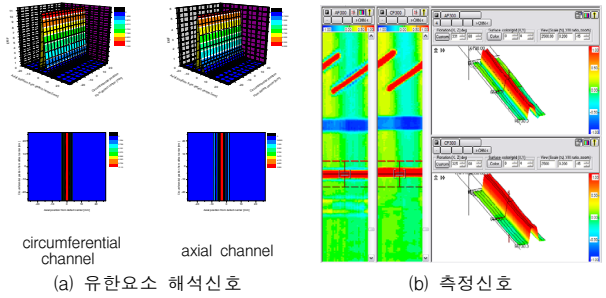


<그림 4> ASME 표준시험편의 와전류탐상 유한요소 해석신호

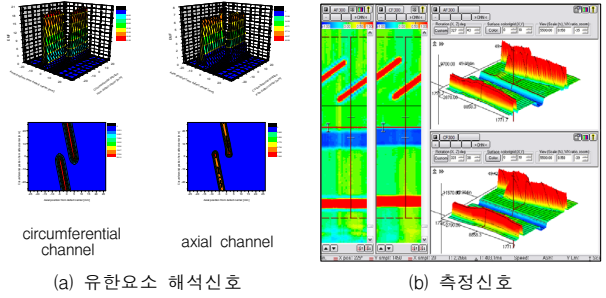


<그림 5> ASME 표준시험편의 와전류탐상 측정신호

<그림 6>과 <그림 7>은 X-probe Combo 표준보정시험편의 OD Groove 결함에 대한 해석신호와 Spiral groove 결함을 해석한 결함신호이다. OD groove 결함은 결함의 폭이 3.1 mm이며, 결함의 깊이는 관두께의 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 결함신호가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 축방향 채널의 신호가 최대값을 기준으로 약 2배 정도 크게 발생하였으며 이는 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 원주방향 채널의 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 코일의 상태를 확인할 수 있는 중요한 표준결함이다.

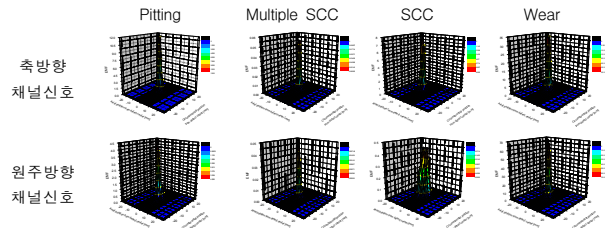


<그림 6> OD groove 결함에 대한 와전류탐상 신호해석



<그림 7> Spiral groove 결함에 대한 와전류탐상 신호해석

<그림 8>은 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 8> 모사등가 결함에 와전류탐상 신호해석

3. 결 론

본 논문에서는 원전 SG세관의 결함검출을 위한 배열와전류프로브의 와전류탐상 유한요소해석을 수행하여 탐상신호를 획득하고 탐상신호를 분석하였다. 전자기 유한요소해석을 수행하기 위해 이미 검증된 3차원 유한요소 해석프로그램인 OPERA 3D를 이용하였고 해석대상으로는 원자력발전소 증기발생기 세관으로 널리 사용되는 Inconel 600 도체관을 사용하였다. 해석 모델의 결함의 종류는 표준결함인 ASME 표준시험편과 X-probe용 표준보정시험편의 결함을 선택하여 해석하고, 자연결함의 탐상을 위하여 Pitting, Multiple SCC, SCC, 삼각형 모양의 Wear을 선정 후 등가결함으로 변환한 뒤 해석하였다. 해석결과 유한요소탐상신호와 측정신호가 일치하는 것을 확인할 수 있었으며, 배열와전류프로브가 축방향 결함과 원주방향 결함에 대하여 모두 반응하여 결함의 진행 방향에 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.

[참 고 문 헌]

[1] Young-Kil Shin, "Design of encircling remote field eddy-current probe," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 2, March (2002)
 [2] 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)