

증기발생기 세관 검사를 위한 RPC 프로브의 신호 해석

송호준, 서희정, 이향범
 송실대학교 전기공학과

Analysis of RPC Probe Signal for Examination of Steam Generator Tube

Ho-Jun Song, Hee-Jeong Seo and Hyang-beom Lee
 Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University

Abstract - This paper presents an analysis of RPC probe signal in steam generator tube with defect using finite element method. Impedance signal is calculated according to the depth variation of defect in tube and change of frequency in same defect. As the depth of the defect and the operating frequency is increased, the magnitude of the signal is increased. From the result of this paper, we can obtain the information by the effect of defect and frequency.

2. 본 론

1. 서 론

2003년 말 기준으로 원자력 발전소의 발전설비는 전체 발전설비의 28.1%이며 전체 발전량의 40.2%를 차지하고 있다. 하지만 1970년대 이후 집중적으로 건설되어 운전하고 있는 원자력발전소의 운전연한이 증가함에 따라 노후로 인한 사고의 위험성이 증가되고 있다. 실제로 2002년 4월 5일 울진원자력 발전소 4호기에서는 2년 반 사용 후 증기발생기(SG, Steam Generator)세관 파단사고가 있었다. 이와 같은 사고를 미연에 방지하기 위하여 현재 원자력 발전소에서는 비파괴검사를 실시하고 있다. 비파괴검사 방법에는 여러 종류가 있지만 와전류탐상(Eddy Current Test: ECT)방법과 초음파탐상(Ultrasonic Testing: UT)방법이 주로 사용되고 있다 [1].

와전류탐상방법은 금속 표면의 결함 탐지에 우수한 기능을 발휘하기 때문에 원자력 발전설비, 항공기, 송유관과 같은 분야 등 각종 도체구조물에 널리 상용된다. 특히 원전 수명관리에 큰 영향을 주는 SG 전열관에 정기적으로 안전 검사를 실시하고 있다[2]. 와전류검사에 사용되는 프로브로는 Bobbin 프로브와 RPC(Rotating Pancake Coil) 프로브가 있다. 현재 원자력 발전소에는 1기 당 대략 10,000개에서 16,000개의 많은 세관이 있기 때문에 먼저 속도가 빠른 Bobbin 프로브를 축 방향으로 이동시키면서 검사를 한 후, 결함 유무의 판단이 불확실한 부분에 대해서는 정밀검사가 가능한 RPC 프로브로 검사를 수행하고 있다. 하지만 현재 Bobbin 프로브에 대한 연구는 많이 이루어져서 폭넓은 데이터를 축적하고 있지만 RPC 프로브에 대한 연구는 Bobbin 프로브의 연구에 비해 기초적인 수준이다.

본 논문에서는 상용프로그램인 Opera-3D를 이용하여 RPC 프로브에 의한 신호 데이터베이스를 구축하였다. RPC 프로브는 증기발생기의 세관을 회전하면서 검사하므로 3차원으로 모델링 하여 수치해석을 수행하였다. 결함은 외부결함(OD: outer diameter)과 내부결함(ID: inner diameter)으로 나누었으며 ASME 표준결함에 대한 탐상신호를 계산하여 결함에 따른 신호의 변화를 살펴보았다. 또 같은 결함에 대하여 주파수를 100kHz, 200kHz, 400kHz로 변화시키면서 그에 따른 임피던스의 변화를 확인하였다.

2.1 지배 방정식

와전류 탐상 검사과정을 모델링하려면 전자기 현상을 기술하는 맥스웰 방정식으로부터 출발할 필요가 있다. 맥스웰 방정식 중에서 와전류 문제에 관련된 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_e \tag{1}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{3}$$

식 (1)은 암페어의 법칙, 식 (2)는 패러데이의 법칙, 식 (3)은 가우스의 법칙이다. 여기서 \vec{H} 는 자기장의 세기[A/m], \vec{B} 는 자속밀도[Wb/m²], \vec{E} 는 전기장의 세기[V/m], \vec{J}_s 는 외부에서 공급된 전류밀도 [A/m²], \vec{J}_e 는 와전류밀도 [A/m²]이다. 전기·자기장을 표현하는 제량 사이의 상호관계는 다음과 같다.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{4}$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \tag{5}$$

여기서 μ 는 투자율[H/m], σ 는 전기 도전율[S/m]이다.

와전류 문제에서 해석하고자 하는 영역은 세 개의 영역으로 구분하여 아래와 같이 표현 할 수 있다.

첫 번째 영역으로 전기 도전율(σ)이 영이 아닌 영역으로 와전류(\vec{J}_e)가 흐를 수 있는 도체 영역이다. 따라서 \vec{J}_s 는 0이다. 자장 문제를 풀기 위해서 식 (3)에서 자기벡터 포텐셜(\vec{A})을 이용하면

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{6}$$

식 (6)을 전기 스칼라 포텐셜(V)를 이용하여 식 (2)에 대입한 후 정리하면 다음과 같이 구성된다.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{A}) \tag{7}$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V \tag{8}$$

식 (1)에 식 (4), (5), (6), (8) 식을 대입하면 다음과 같은 지배 방정식이 완성된다.

$$\nabla \times \nu \nabla \times \vec{A} + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \nabla V = 0 \quad (9)$$

두 번째 영역으로 외부 공기가 있는 곳에 전원 전류가 존재하는 영역이다. 따라서 식 (1)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \vec{H}_s = \vec{J}_s \quad (10)$$

여기서, \vec{H}_s 는 공급되는 전류에 의한 자장의 세기로서, \vec{H}_s 값은 Biot-Savart Law에 의하여 계산한다. 리두스드 자기스칼라포텐셜(reduced magnetic scalar potential) ϕ 를 이용하여 \vec{H} 를 구하면

$$\vec{H} = \vec{H}_s - \nabla \phi \quad (11)$$

식 (4) 및 식 (11)을 식 (3)에 대입하면 다음과 같은 포아송방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \nabla \phi = \nabla \cdot \mu \vec{H}_s \quad (12)$$

세 번째 영역은 공기 영역으로 와전류 전류밀도(\vec{J}_e)와 외부에서 공급되는 전류밀도(\vec{J}_s)가 존재하지 않으므로 식 (1)의 우변은 영이므로 토탈 자기스칼라포텐셜(total magnetic scalar potential) ψ 를 이용하면

$$\vec{H} = -\nabla \psi \quad (13)$$

식 (13) 및 (4)을 식 (3)에 대입하여 정리하면 지배방정식을 구할 수 있다.

$$\nabla \cdot \mu \nabla \psi = 0 \quad (14)$$

2.2 임피던스 계산

와전류탐상법에서 실질적으로 구하고자 하는 데이터는 임피던스이다. 본 논문에서는 공간에 저장된 에너지와 열손실을 계산하여 임피던스를 구하였다. 공간에 저장된 에너지는 리액턴스성분을 의미하고, 와전류에 의해서 발생하는 열손실은 저항성분을 의미한다.

$$W_s = \frac{1}{2} L I^2 \quad (15)$$

$$P_d = I^2 R \quad (16)$$

$$Z = (R + j\omega L) \quad (17)$$

식 (15)에서 리액턴스(ωL)를 구하고 식 (16)에서 저항(R)을 구하였다. 최종적으로 구하고자 하는 임피던스 값은 식 (17)에서 얻을 수 있었다. 요소망에 의한 오차를 상쇄시키기 위하여 결합이 없는 경우의 해석결과를 이용하였다.

2.3 사례 연구

본 논문에서는 내·외부결합의 크기변화와 주파수에 따른 와전류탐상신호의 변화를 살펴보기 위하여 수치해석을 수행하였고 해석대상의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 해석 대상의 사양

항목	값	항목	값
관 외경	19.0500[mm]	관 내경	16.9164[mm]
관두께	1.0668[mm]	관 재질	Inconel 600
프로브 외경	3.00[mm]	프로브 내경	1.00[mm]
프로브 높이	1.00[mm]	프로브 종류	RPC

그림 1은 수치해석 대상의 모델을 보여주고 있다. RPC 프로브는 Y축 방향으로 0.03cm씩 0.3cm까지 진행하면서 Y축을 중심축으로 15° 씩 360° 를 회전하도록 모델링 하였다. 도체관의 결합 형상은 Y축 방향으로 0.1cm, Z축 방향으로 0.04cm 이며 X방향으로는 18%, 38%, 56%, 75%, 100%로 각각 변화 시키며 결합 신호를 생성하였다. 그림 2는 RPC 프로브의 코일에 전류를 흘려주고 결합(ID38%)이 코일의 중심에 있을 때의 와전류 분포를 나타내고 있다. 그림 3은 코일을 회전시켰을 때 임피던스 신호를 보여주고 있다.

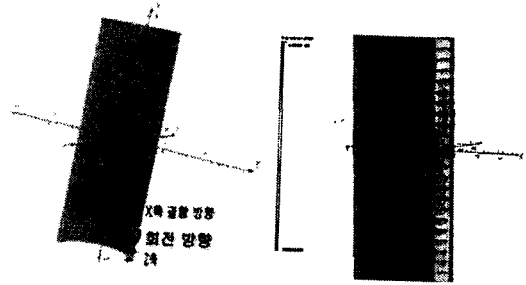


그림 1. 해석 모델

그림 2. 와전류 분포

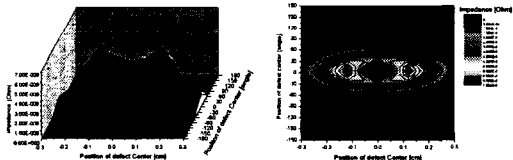


그림 3. 해석 결과

그림 4부터 그림 7까지는 내부결합의 깊이가 증가함에 따라 나타나는 임피던스이며 그림 8부터 그림 11까지는 외부결합의 깊이가 증가함에 따라 나타나는 임피던스이다. 결합의 깊이가 깊을수록 임피던스 신호의 크기가 커지는 것을 알 수 있었다. 또한 외부결합의 임피던스는 내부결합보다 낮은 임피던스를 나타내었다. 그러나 임피던스의 크기는 결합의 크기에 비례하여 증가하지는 않는다는 것을 알 수 있었다.

그림 12는 내부결합 38% 일때 주파수의 변화에 따른 임피던스 신호이며 그림 13은 38% 외부결합인 경우를 나타내고 있다. 동일한 결합에 대하여 주파수가 증가함에 따라 탐상신호의 크기도 증가하는 것을 알 수 있었다. 신호의 크기를 살펴보면 결합의 크기변화와 같이 내부결합이 외부결합에 비해 신호의 크기가 훨씬 크게 나타난다. 이는 주파수를 증가 시키면 코일에 발생하는 자속들이 도체의 표면에 집중하여 흐르려는 성질이 있기 때문에 내부의 결합에서는 신호의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 결합이 외부에 있으면 코일에서 발생하는 자속들이 도체 내부로 충분히 관통하지 못하여 내부결합들에 비해 작게 나타난다.

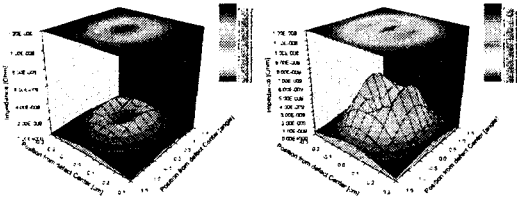


그림 4. ID 18% 임피던스

그림 5. ID 38% 임피던스

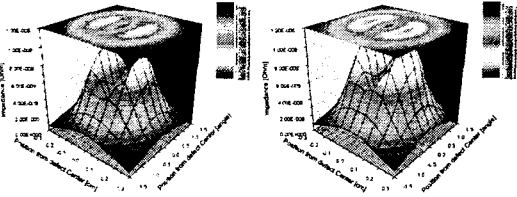


그림 6. ID 56% 임피던스

그림 7. ID 75% 임피던스

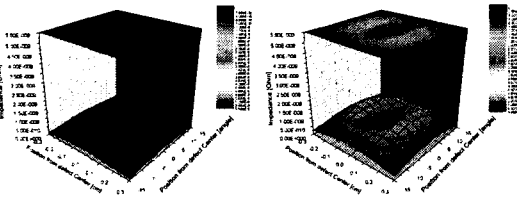


그림 8. OD 18% 임피던스

그림 9. OD 38% 임피던스

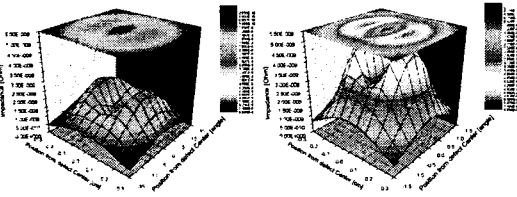


그림 10. OD 56% 임피던스

그림 11. OD 75% 임피던스

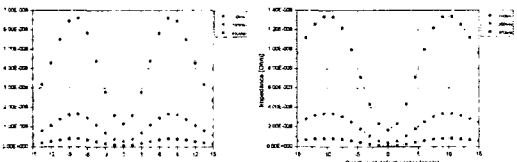


그림 12. 내부결함(ID) 주파수 변화

그림 13. 외부결함(OD) 주파수 변화

그림 14에서 그림 17까지는 내·외부결함에 대하여 저항 성분과 리액턴스 성분을 비교하여 나타내었다. 아래에서부터 결함의 크기는 각각 18%, 38%, 56%, 75%, 100% 순으로 나타내었다. 결함이 증가함에 따라서 저항성분과 리액턴스 성분이 증가하는 것을 볼 수 있다. 결국 결함이 중심에 있을 때 임피던스 값이 가장 낮게 나왔으며 Y축으로 진행할수록 점점 증가하는 것을 알 수 있었다. 즉, 결함에서 프로브가 멀어질수록 저항, 리액턴스, 임피던스 값이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 저항 값의 증가분에 비해 리액턴스 값의 증가분이 조금 더 큰 것으로 보아 위상이 조금씩 증가하는 것을 확인할 수 있다. 내부 결함은 결함의 깊이에 따라서 위상의 변화가 크지 않았으나, 외부결함의 경우에는 내부 결함보다 위상의 변화가 큰 것을 알 수 있었다.

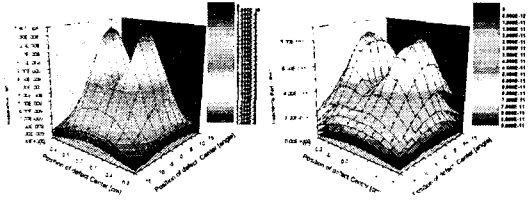


그림 14. 내부결함 저항값

그림 15. 내부결함 리액턴스값

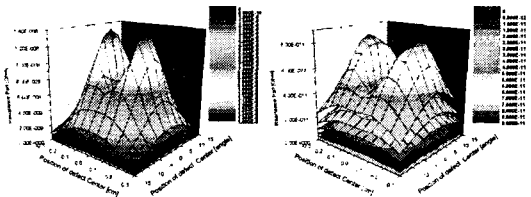


그림 16. 외부결함 저항값

그림 17. 외부결함 리액턴스값

3. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 증기 발생기 세관 검사에 사용하는 RPC 프로브에 대한 신호를 해석하였다. 결함은 육면체 모양으로 세관에 대해 내부와 외부로 구분 하였으며, X축 방향으로 0.02cm에서 0.08cm까지 변화 시키면 수행하였다. 그 결과 결함 크기의 증가에 따라서 임피던스가 증가하는 것을 살펴볼 수 있었으며 내부결함에 비해 외부결함의 임피던스는 현저하게 작게 나오는 것을 알 수 있었다. 또한 내부결함 보다 외부결함의 위상의 변화가 크다는 것을 확인할 수 있었다. 전류의 주파수를 100kHz에서 400kHz로 변화 시키면서 임피던스를 계산 하였으며 동일 결함에 대해서 주파수를 증가시키면 임피던스가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 연구 결과는 현장에서 RPC 프로브에 생기는 이상신호, 잡음 등에 대하여 효과적으로 해석하거나 식별하는데 도움을 줄 것이다. 또 해석결과를 축적하여 데이터베이스를 구축한다면 정확한 해석의 밑거름이 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 비파괴검사 신뢰도개선 연구, 한국원자력안전기술 [KINS] 2002.
- [2] 이항범, 김창욱, 서장원, 정태연. "열교환기 전열관에서 축대칭 결함에 대한 ECT 유한요소해석", 한국비파괴검사학회춘계학술발표회 논문집, p157 168, 2000
- [3] Vectorfields, "OPERA 3d Reference Manual". Vectorfields, v9.0, 2004
- [4] 2004 Probe Catalog, Zetec, 1 April 2004.