

원전SG세관의 결합크기에 따른 MRPC 프로브의 신호 해석

김지호, 송호준, 임건규, 이향범

송실대학교 전기공학과

Analysis of MRPC Probe Signal According to Defect Size Variation for S/G Tube in Nuclear Power Plant

Ji-Ho Kim, Ho-Jun Song, Keon-Gyu Lim and Hyang-beom Lee

Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University

Abstract - In the examination of steam generator (SG) tube in nuclear power plant, eddy current testing probes play an important role in detecting the defects. Bobbin probe and MRPC probe is usually used for the inspection of SG tube. Bobbin probe is good at high speed inspection, but ability of detection of circumferential defect is very weak. On the contrary MRPC probe, which moves for inspection in the direction of axial and circumferential simultaneously, has very slow inspection speed, but it has excellent detection capability for small cracks, which is hardly detected by bobbin probe. In this paper, for the accurate analysis of experimental ECT signals, construction of MRPC probe signals database according to the variation of defect size is the main purpose. Using 3-D finite element method, ECT signals are analyzed, and signals analysis add according to frequency ingredient. The results, which are analysis and characteristics abstraction of electromagnetism simulation signals, is databased.

1. 서 론

원자력 발전소의 증기발생기(Steam Generator: SG)는 가동 특성상 결합 발생 가능성이 매우 높으며, 실제로 원전 수명관리에 큰 영향을 미치고 있다. 원전의 노후화가 진행됨에 따라 발생하는 다양한 세관의 결합을 검출하기 위한 신뢰할 수 있는 검사 방법의 확보가 필요하다. 이에 따라 원자력 발전소에서는 비파괴검사(Non-Destructive Testing : NDT)를 실시하고 있다. 이 중 세관의 재료나 형상, 그리고 특성에 따라 가장 적합한 와전류탐상(Eddy Current Testing : ECT) 기법이 주로 사용되고 있다.

와전류 탐상신호는 교류전류가 인가된 프로브를 결합이 있는 도체판을 관통하여 지날 때 프로브의 임피던스 변화를 이용하여 얻어지고, 이 신호는 결합의 크기, 모양, 위치, 재료의 불균질성 등에 따라 달라지게 되므로, 이 신호의 크기 및 모양에 따라 결합의 위험 정도를 판별할 수 있다. 일반적으로 원전 증기발생기 세관의 검사에는 검사 속도가 빠른 보빈(bobbin)형 프로브로 일차검사가 수행되고, 지지대와 tube sheet 근처와 같은 취약부, 그리고 일차검사 결과 판정이 애매한 부위에 대해서는 정밀검사를 위해 MRPC(MotORIZED Rotating Pancake Coil) 프로브를 사용한다.

본 논문에서는 MRPC 프로브를 사용하여 증기발생기 세관에 발생할 수 있는 결합에 대해 와전류탐상 유한요소 수치해석을 통한 데이터베이스를 구축하였다. MRPC 프로브는 증기발생기 세관을 회전하면서 검사하기 때문에 3차원 모델링을 통하여 수치해석을 수행하였다. 증기발생기 세관에 발생할 수 있는 결합 형태는 다양하게 나

타날 수 있지만, 도체판 축방향으로 발생빈도가 높아 축방향 결합에 대해 결합폭을 일정하게 유지시키고 결합의 길이와 깊이를 변화하여 탐상신호에 대한 데이터베이스를 구축하였다. 외부 결합(OD : outer diameter)과 내부 결합(ID : inner diameter)의 탐상신호를 계산하여 결합에 따른 신호의 변화를 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 MRPC 해석을 위한 3차원 유한요소 해석

모든 전자기 현상을 기술하는 맥스웰방정식으로부터 와전류문제의 해석에 적합한 지배방정식을 구한 후, 주어진 문제에 유한요소정식화를 수행하여 결과를 얻을 수 있다. 맥스웰 방정식 중에서 와전류 문제에 관련된 방정식은 다음과 같다.

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

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

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

전기자기장을 표현하는 제량 사이의 상호관계는 다음과 같다.

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

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

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

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (6)$$

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

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

$$\vec{E} = - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (8)$$

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

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

자기벡터포텐셜 \vec{A} 가 유일하게 정의되기 위해서는 회전(Curl) 및 발산(Divergence)가 정의되어야 한다. 여기서는 쿨롱게이지조건을 이용하여 다음과 같이 정의하였다.

$$\nabla \times \nu \nabla \times \vec{A} - \nabla \times \nu \nabla \cdot \vec{A} + \sigma \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \nabla V \right) = 0 \quad (10)$$

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

$$\nabla \times \vec{H}_s = \vec{J}_s \quad (12)$$

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

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

식 (4) 및 식 (13)을 식 (3)에 대입하면 다음과 같은 포아송정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \mu \nabla \Phi = \nabla \cdot \mu \vec{H}_s \quad (14)$$

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

$$\vec{H} = -\nabla \psi \quad (15)$$

식 (15) 및 (4)를 식 (3)에 대입하여 정리하면 지배방정식을 구할 수 있다.

$$\nabla \cdot \mu \nabla \psi = 0 \quad (16)$$

2.2 탐상코일의 임피던스의 계산

와전류탐상법에서 실질적으로 구하고자 하는 양은 탐상코일의 임피던스이며 이 임피던스는 주어진 전류에 대하여 에너지를 계산하여 구할 수 있다. 공간에 저장된 에너지는 리액턴스성분을 의미하고, 와전류에 의해서 발생되는 열 손실은 저항성분을 의미한다.

$$W_m = \int_v \frac{B^2}{2\mu} dv = \frac{1}{2} LI^2 \quad (17)$$

$$P_d = \int_v \frac{J_e}{\sigma} dv = I^2 R \quad (18)$$

$$Z = R + jwL = \frac{1}{I^2} (P_d + ju2W_m) \quad (19)$$

위 수식을 이용하여 임피던스를 계산할 수 있다. 하지만, 본 해석결과에서는 결합이 있는 경우의 에너지를 계산하는 경우 요소망에 의한 수치오차가 발생하게 된다. 이는 사면체 요소망을 사용하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 요소망에 의한 오차를 상쇄시키기 위하여 결합이 없는 경우의 해석결과를 이용하여 요소망에 오차를 최소화하였다.

2.3 MRPC 프로브를 이용한 결합 해석

2.2.1 모델링을 위한 +Point MRPC Probe의 제원

본 논문에서는 상용프로그램인 Opera-3D를 이용하여 MRPC 프로브에 의한 신호 데이터베이스를 구축하였다. 상용프로그램을 통해 계산된 신호와 실제 신호와의 일치를 위해서는 모델의 정확한 제원이 필요하였다. MRPC 프로브의 코일 및 측정 세관의 사양은 표1과 같다.

표 1. 결합 해석을 위한 사양

Item	Value	Item	Value
Pipe Outer Diameter	19.0500 [mm]	Pipe Inner Diameter	16.9164 [mm]
Conductivity of Pipe	0.1E6 [S/m]	Pipe Thickness	1.0668 [mm]
Material of Pipe	INCONEL600HTMA		
Probe Type	Pan Cake Coil Probe	Coil Thickness	1.0000 [mm]
Coil Outer Diameter	3.0000 [mm]	Coil Inner Diameter	1.0000 [mm]
Operating Frequency	300[kHz]	Skin Depth	1.5175 [mm]

2.2.2 결합크기 변화에 따른 신호변화 분석

그림 1은 수치해석 대상의 모델을 보여주고 있다. MRPC 프로브는 결합의 중심을 기준으로 원주방향으로 1.5도 씩 15도까지 회전하였으며, 축방향으로 0.2[mm]씩 결합에 대하여 이동하면서 계산을 수행하였다. 사용된 주파수는 300[kHz]이다. 결합의 크기에 대한 모델은 원주방향의 결합 크기는 고정시키고 축방향의 결합의 길이와 결합의 깊이를 변형시키면서 신호를 해석하였다. 그림 2는 와전류 분포를 나타내었다. 프로브에 흐르는 전류는 시계방향으로 정의되었으며, 그림에 보이는 와전류는 반시계방향으로 흐르고 있음을 알 수 있다.



그림 1. 해석모델

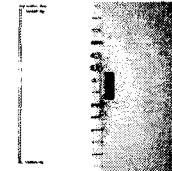
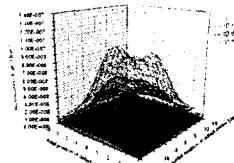
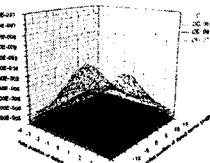


그림 2. 와전류분포

그림 3부터 그림 5까지는 내부결합과 외부결합의 축방향 결합의 길이를 고정시키고 결합의 깊이가 증가함에 따라 나타나는 저항 및 리액턴스 그리고 임피던스 성분을 나타낸 것이다. 아래에서부터 결합의 크기는 18%, 38%, 56%, 75%의 순으로 나타내었다. 결합의 크기가 증가함에 따라서 공간에 발생하는 열손실과 저장되는 에너지도 증가하므로 저항성분과 리액턴스 성분이 증가하는 것을 볼 수 있다. 와전류가 내부결합보다 외부결합일 때 작게 흐르기 때문에 외부결합은 내부결합에 비해 작은 값을 갖는다.

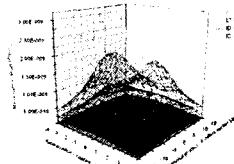


(a) 내부결합

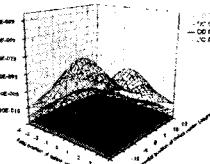


(b) 외부결합

그림 3 축방향 3mm 결합에서의 저항성분

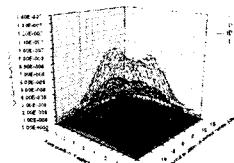


(a) 내부결합

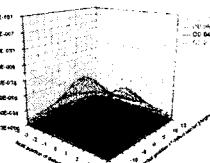


(b) 외부결합

그림 4 축방향 3mm 결합에서의 리액턴스성분



(a) 내부결합

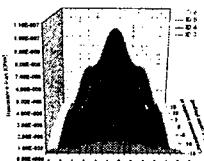


(b) 외부결합

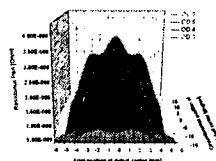
그림 5 축방향 3mm 결합에서의 임피던스성분

그림 6부터 그림 8까지는 내부결합과 외부결합의 결합의 깊이를 고정시키고 축방향 결합의 길이를 증가시킴에 따라 나타나는 저항, 리액턴스 및 임피던스 성분을 나타내었다. 결합의 중심에서 프로브가 멀어질수록 저항, 리액턴스 및 임피던스 성분이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 저항의 증가 비율보다 리액턴스의 증가 비율이 조금 더 큰 것으로 보아 위상이 증가하는 것을 확인할

수 있었다. 또한 코일이 결합의 중심에서 가장 큰 임피던스의 크기를 갖으며 축방향으로 움직일수록 감소하다 코일이 결합의 끝부분을 지나서 이동하는 구간에서는 임피던스가 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다.

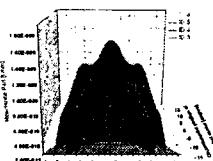


(a) 내부결합

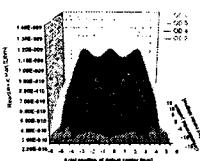


(b) 외부결합

그림 6 결합의 깊이 38[%]에서의 저항성분

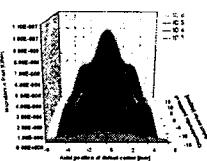


(a) 내부결합

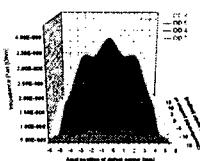


(b) 외부결합

그림 7 결합의 깊이 38[%]에서의 리액턴스성분



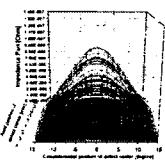
(a) 내부결합



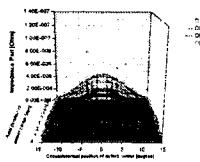
(b) 외부결합

그림 8 결합의 깊이 38[%]에서의 임피던스성분

그림 9는 코일이 원주방향으로 움직일 때 내부결합과 외부결합을 나타낸 것이다. 결합의 중심에서 멀어짐에 따라서 임피던스의 크기가 작아지며 내부결합의 임피던스 크기에 비해서 외부결합의 임피던스 크기의 변화의 비율이 다소 완만함을 볼 수 있다.



(a) 내부결합



(b) 외부결합

그림 9 각 결합의 원주방향의 임피던스성분

그림 10, 12, 14는 내부결합(ID) 38%일 때 주파수의 변화에 따른 저항, 리액턴스 및 임피던스 성분을 나타낸 것이다. 그림 11, 13, 15는 외부결합(OD) 38%일 때의 성분을 나타낸 것이다. 신호의 크기를 살펴보면 주파수가 증가함에 따라 탐상신호의 크기도 증가하는 것을 알 수 있었다. 그림 16, 17에서처럼 신호의 크기를 살펴보면 내부결합이 외부결합에 비하여 신호의 크기가 훨씬 크게 나타난다. 이는 결합의 크기를 증가시켰을 경우와 동일하게 나타났다. 이는 주파수를 증가시키면 코일에 발생되는 자속들이 도체의 표면에 집중하여 흐르려는 성질이 있기 때문에 내부결합에 서 신호의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있었다. 이에 반해 결합이 외부에 있으면 코일에서 발생하는 자속들이 도체 내부로 충분히 관통하지 못하여 내부결합에 비해 작게 나타난다.

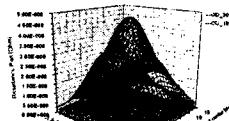


그림 10 ID 저항성분

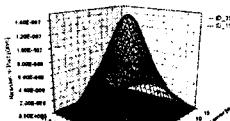


그림 11 OD 저항성분

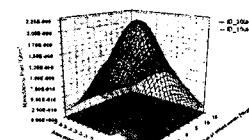


그림 12 ID 리액턴스성분

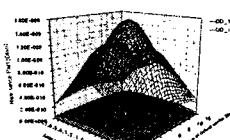


그림 13 OD 리액턴스 성분

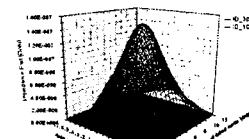


그림 14 ID 임피던스 성분

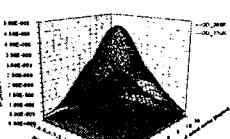


그림 15 OD 임피던스 성분

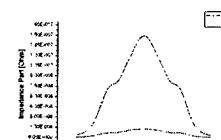


그림 16 ID 주파수 변화

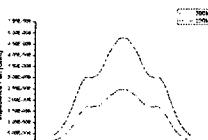


그림 17 OD 주파수 변화

3. 결론

본 논문에서는 3차원 유한요소법을 이용하여 원전 증기발생기 세관 검사에 사용하는 MRPC 프로브에 대한 신호 해석을 하였다. 결합은 세관에 대해 내부와 외부의 결합으로 구분하였고, 축방향으로 3mm부터 6mm까지 변화시키면서 수행하였다. 그 결과 결합의 크기가 증가함에 따라 저항, 리액턴스 및 임피던스의 크기가 모두 증가하는 것을 살펴볼 수 있었으며, 이 중 리액턴스의 변화량이 큰 것을 볼 수 있었는데, 이는 결합의 크기에 따라 위상이 변화함을 볼 수 있었다. 또한 내부 결합에 비하여 외부 결합의 임피던스는 현저하게 적게 나오는 것을 알 수 있었다. 특히 외부결합의 경우는 리액턴스의 변화가 크게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이것으로 외부 결합이 내부결합보다 위상의 변화가 크다는 것을 알 수 있었다. 전류의 주파수를 100kHz에서 300kHz로 변화시키면서 각 성분을 계산하였을 때 동일 결합에 대해서 주파수를 증가시키면 각 성분이 증가하는 것을 볼 수 있었다. 본 논문에서의 연구 결과는 현장에서 MRPC 프로브를 사용함에 있어서 발생할 수 있는 이상신호 및 잡음 등에 대하여 효과적으로 해석할 수 있는 자료가 될 것이다. 이러한 데이터의 축적은 결합신호를 이해하고 예측하는데 큰 도움이 될 것이다.

[참고 문헌]

- [1] 이향범, “비파괴검사 신뢰도 개선연구”, 한국원자력안전기술원 쪽총보고서, 2002
- [2] “원전 SG세관 진단을 위한 MRPC프로브 신호의 데이터베이스 구축 및 고장진단”, 산업자원부, 2005
- [3] 이의종 역, “와류탐상시험”, 도서출판 골드, 1999
- [4] “Innovations in Eddy Current Testing”, 한국원자력연구소, 2003
- [5] 임달호, “전기계의 유한요소법”, 동명사, 1996