

결함인자를 고려한 원전 SG세관에서 RPC 프로브의 신호 해석

김지호, 이향범
 숭실대학교 전기공학과

Analysis of RPC Probe Signal for S/G Tube in Nuclear Power Plant
 Considering Defect Factor

Ji-Ho Kim, Hyang-Beom Lee
 Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University

Abstract - The signals of the eddy current testing(ECT) for the examination of the steam generator(SG) tubes in the nuclear power plant(NPP) determine the existence, size, and kind of defects using the variation of impedance signals when a testing coil, driven by alternating current, passes through the SG tube contains defects. The aim of this paper is building a database of the RPC probe signals on the basis of the sizes variation of defects and frequency variation of probe. In this paper 3-D numerical analysis of the ECT signals using the finite element method is performed. Through this study, it is shown variation of magnitude and phase of impedance according to variation of defect size and frequency. From the result of this paper, we can obtain the information which is useful in defect discrimination of SG tube in nuclear power plant.

1. 서 론

원자력발전소 증기발생기(Steam Generator : SG) 세관은 핵증기 발생계통에서 터빈 계통에 열을 전달하는 중간 역할이자 방사능 차단벽으로서 중요한 기능을 가지고 있기 때문에 SG세관의 내부 손상 및 결함에 대한 비파괴검사(Non-Destructive Testing : NDT)가 대두되고 있다. 또한 원자력발전소의 안정성 및 가동성 확보를 위해서는 SG세관에 대한 건전성 확보가 필수적이다. 따라서, SG세관의 건전성 확보를 위하여 원전에서는 일반적으로 와전류탐상(Eddy Current Testing : ECT)기법을 주로 사용하고 있다.

와전류 탐상신호는 교류전류가 인가된 프로브를 결함이 있는 도체관을 지날 때 프로브의 임피던스 변화를 이용하여 얻어지고, 이 신호는 결함의 크기, 모양, 위치, 재료의 불균질성 등에 따라 달라지게 되므로, 이 신호의 크기 및 모양에 따라 결함의 위험 정도를 판별할 수 있다. 원전 증기발생기 세관을 검사하는데 사용되는 와전류 프로브는 BC(Bobbin coil) 프로브와 RPC(Rotating Pancake Coil) 프로브이다. BC 프로브는 검사속도를 빨리할 수 있는 장점이 있지만, 원주방향의 결함 검출도가 낮을 뿐만 아니라 검사의 신뢰도가 비교적 낮다는 단점이 있다. RPC 프로브는 검사정밀도가 높지만, 검사속도가 느린 단점이 있다. 따라서, BC 프로브로 일차적인 검사를 수행하고, 도체관 및 지지대 등과 같은 취약부, 일차검사 결과 판정이 애매한 부위에 대해서는 정밀한 검사를 위해서 RPC 프로브를 사용한다.

본 논문에서는 RPC 프로브를 사용하여 SG세관에 발생할 수 있는 결함에 대해 와전류탐상 유한요소 수치해석을 통한 신호 해석을 하였다. RPC 프로브는 SG세관을 회전하면서 검사하기 때문에 3차원 모델링을 통하여 수치해석하였다. SG세관에 발생할 수 있는 결함 형태는

다양하게 나타날 수 있지만, 도체관 축방향으로 발생빈도가 높기 때문에 축방향 결함에 대해 결함폭을 일정하게 유지시키고 결함의 길이와 깊이를 변화하여 탐상 신호를 해석하였다. 결함 신호의 해석에 대한 정확도를 높이기 위해 시험주파수를 선정하고 위상각에 대한 신호해석을 하였다. 외부결함(OD : outer diameter)과 내부결함(ID : inner diameter)의 탐상신호를 계산하여 결함에 따른 신호의 변화를 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 모델링을 위한 RPC 프로브

2.1.1 원전에서의 RPC 검사




RPC(Rotating Pancake Coil) 프로브는 전전과 회전을 동시에 하며 검사하는 탐촉자로, 검사의 용도는 Bobbin 프로브로 검사할 수 없는 작은 균열성 결함이나 둘레 방향의 결함 위치를 탐지하거나 Bobbin 검사에서 검출된 신호의 분석 및 확인을 하기 위해 보다 정밀한 평가를 위해 사용된다. RPC 탐촉자는 검사환경과 사용조건에 따라 쓰이는 종류가 다양한데 U-Bend 용 RPC 프로브, +Point RPC 프로브, 3-Coil RPC 프로브 등 그 종류가 현재 수십 가지로 개발되어져 있다. 현재 주로 사용되는 탐촉자는 +Point 코일 1개와 Pancake 코일 2개를 포함한 +Point RPC 프로브가 사용되고 있다.

+Point RPC 프로브의 검사특징은 튜브시트상단(TTS) 확관부위 검사, 축방향 및 원주방향 균열결함 검출, 지지물같은 발전동봉에 의한 전열관 마모검출, 잔류 응력부위의 응력부식균열검출, 이물질 검출, 슬리빙(Sleeving) 지역 검사, 기하학적 영향 최소화 및 결함 외적인 신호를 최소화하는데 사용되며, 특히 균열성 결함(Crack Indication)과 감육성 결함(Volumetric Indication)을 구분하는데 효과적이다.

2.1.2 모델링을 위한 +Point RPC 프로브의 계원

코일은 표 1과 같이 프로브의 동일 원주상에 120° 간격으로 감겨져 있으며 Pancake Coil(#1 primary pancake coil, #3 high frequency shielded pancake coil) 2종류와 +Point coil로 구성되어 있다.

표1. 측정된 코일의 형상 및 크기

#1 pancake coil - primary pancake coil	#2 +point coil	#3 pancake coil - high frequency shielded coil
		
<#1> pancake coil 외경 : 3mm 내경 및 높이 : 1mm 코일턴수 : 170~220	<#2> +point coil 두께 1.3mm 코일 교차	<#3> pancake coil 외경 : 1.5mm 내경 및 높이 : 1mm 코일턴수 : 40~50

본 논문에서는 RPC 프로브로 검출 가능한 결함의 신호 해석을 위하여 #1 primary pancake coil에 대한 연구를 하였다. 상용프로그램인 Opera-3D를 이용하여 RPC 프로브에 의한 신호 해석을 하였다. 상용프로그램을 통해 계산된 신호와 실제 신호와의 일치 여부를 위한 모델의 정확한 제원이 필요하였다. RPC 프로브의 코일 및 측정 세관의 사양은 표 2와 같다.

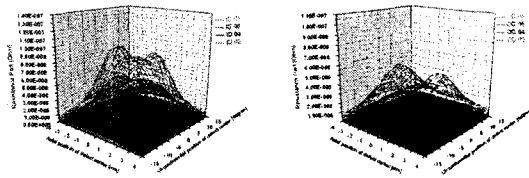
표 2. 결함 해석을 위한 사양

Item	Value	Item	Value
Pipe Outer Diameter	19.0500[mm]	Pipe Inner Diameter	16.9164[mm]
Conductivity of Pipe	1.1E6 [S/m]	Pipe Thickness	1.0668[mm]
Material of Pipe	INCONEL600HIMA		
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]

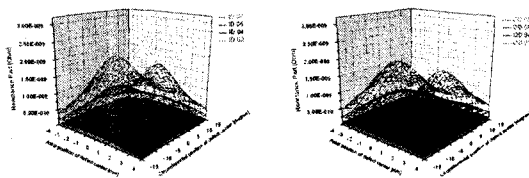
2.2 RPC 프로브를 이용한 결함 해석

MRPC 프로브는 결함의 중심을 기준으로 원주방향으로 1.5도씩 15도까지 회전하였으며, 축방향으로 0.2[mm]씩 결함에 대하여 이동하면서 계산을 수행하였다. 주로 사용된 주파수는 300[kHz]이고, 이 주파수에 결함 신호의 비교를 위해 100[kHz]에서의 결함 신호와 비교하였다. 축방향 결함에 의한 신호 해석을 위해 결함의 크기에 대한 모델은 원주방향의 결함크기는 고정시키고 축방향의 결함의 길이와 깊이를 변형시키면서 신호를 해석하였다.

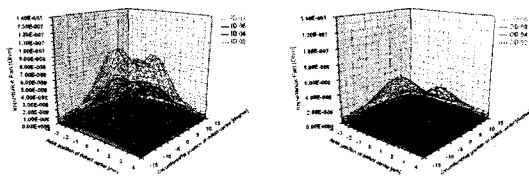
그림 1부터 그림 3까지는 내부결함과 외부결함의 축방향 결함의 길이를 고정시키고 결함의 깊이가 증가함에 따라 나타나는 저항 및 리액턴스 그리고 임피던스 성분을 나타낸 것이다. 아래에서부터 결함의 크기는 18%, 38%, 56%, 75%의 순으로 나타내었다. 결함의 크기가 증가함에 따라서 공간에 발생하는 열손실과 저장되는 에너지도 증가하므로 저항성분과 리액턴스 성분이 증가하는 것을 볼 수 있다. 와전류가 내부결함보다 외부결함일 때 작게 흐르기 때문에 외부결함은 내부결함에 비해 작은 값을 갖는다.



(a) 내부결함 (b) 외부결함
그림 1 축방향 3mm 결함에서의 저항성분

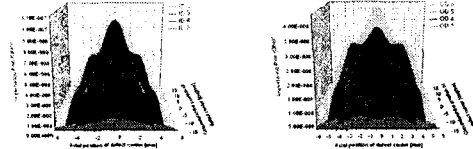


(a) 내부결함 (b) 외부결함
그림 2 축방향 3mm 결함에서의 리액턴스성분



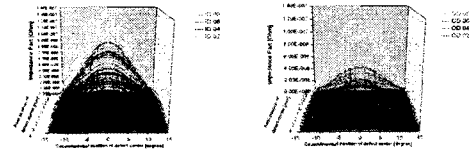
(a) 내부결함 (b) 외부결함
그림 3 축방향 3[mm] 결함에서의 임피던스성분

그림 4는 내부결함과 외부결함의 결함의 깊이를 고정시키고 축방향 결함의 길이를 증가시키며 따라 나타나는 임피던스 성분을 나타내었다. 결함의 중심에서 프로브가 멀어질수록 임피던스 성분이 증가하는 것을 알 수 있었다. 코일이 결함의 중심에서 가장 큰 임피던스의 크기를 갖으며 축방향으로 움직일수록 감소하다 코일이 결함의 끝부분을 지나서 이동하는 구간에서는 임피던스가 일정하게 유지되는 것을 볼 수 있다.



(a) 내부결함 (b) 외부결함
그림 4 결함의 깊이 38[%]에서의 임피던스성분

그림 5는 원주방향 결함에 대한 신호 해석을 위해 축방향의 결함 크기는 고정시키고 원주방향의 결함의 길이와 깊이를 변형시키면서 신호를 해석하였다. 코일이 원주방향으로 움직일 때 내부결함과 외부결함을 나타낸 것이다. 결함의 중심에서 멀어짐에 따라서 임피던스의 크기가 작아지며 내부결함의 임피던스 크기에 비해서 외부결함의 임피던스 크기의 변화 비율이 다소 완만함을 볼 수 있다.



(a) 내부결함 (b) 외부결함
그림 5 각 결함의 원주방향의 임피던스성분

그림 6과 그림 7은 내부결함 38%와 외부결함 38%일 때 주파수의 변화에 따른 임피던스 성분을 나타낸 것이다. 신호의 크기를 살펴보면 주파수가 증가함에 따라 탐상신호의 크기도 증가하는 것을 알 수 있었다. 내부결함의 신호의 크기가 외부 결함의 신호의 크기보다 훨씬 크게 증가됨을 볼 수 있다.

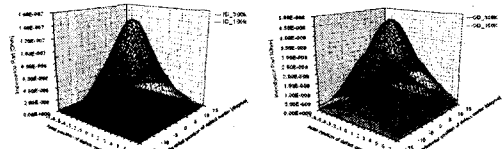


그림 6 ID 임피던스 성분 그림 7 OD 임피던스 성분

그림 8과 그림 9에서처럼 내부결함의 신호와 외부결함의 신호의 크기를 비교해보면 내부결함이 외부결함에 비하여 신호의 크기가 훨씬 크게 나타난다. 이는 결함의 크기를 증가시켰을 경우와 동일하게 나타났다. 이는 주파수를 증가시키면 코일에 발생하는 자속들이 도체의 표면에 집중하여 흐르려는 성질이 있기 때문에 내부결함에 있어 신호의 크기가 커지는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 결함이 외부에 있으면 코일에서 발생하는 자속들이 도체 내부로 충분히 관통하지 못하여 내부결함에 비해 작게 나타난다.

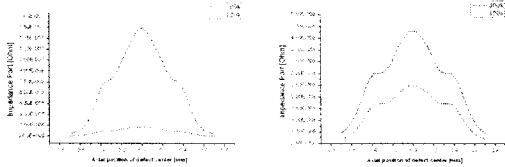


그림 8 ID 주파수 변화 그림 9 OD 주파수 변화

그림 10과 11은 내부결함과 외부결함의 깊이 변화에 따른 위상의 변화를 살펴볼 수 있다. 내부결함과 외부결함의 경우 결함이 깊어짐에 따라 임피던스의 크기 변화는 크기가 커지고, 그 값 또한 유사함을 보였다. 내부결함과 외부결함의 경우 위상의 변화 또한 결함의 깊이가 깊어질수록 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 결함의 깊이가 변화에 대한 위상의 변화는 차이가 크다. 내부 결함의 경우 결함의 깊이가 깊어짐에 따라 위상이 변화하지만 그 값의 차이가 작다. 하지만 외부결함에서 결함의 깊이가 깊어짐에 따라 위상의 변화폭이 크다.

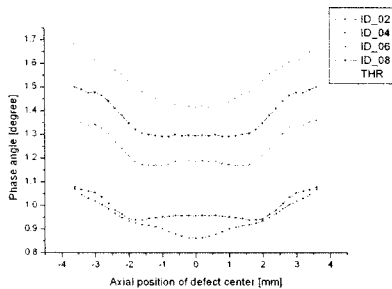


그림 10 내부결함에서의 위상 변화

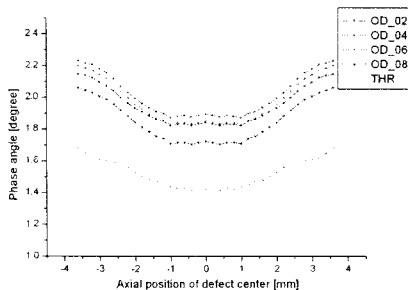


그림 11 외부결함에서의 위상 변화

그림 12와 13은 내부결함과 외부결함, 관통결함을 주파수를 변화시키며 위상각의 변화를 비교한 것이다. 위상각의 변화를 살펴보기 위해서는 주파수를 100kHz로 했을 때보다 300kHz로 했을 경우 결함에 따른 위상 차이를 확실하게 볼 수 있었다. 이것으로 내부결함과 외부결함에서 결함의 깊이 변화에 따른 임피던스의 변화는 비슷한 경향으로 변화하지만, 위상의 변화의 경우 외부결함의 위상차가 내부결함보다 위상차보다 크다는 것을 알 수 있었다. 이는 외부결함의 경우 리액턴스의 변화가 크게 나타나는 것으로 확인할 수 있었다.

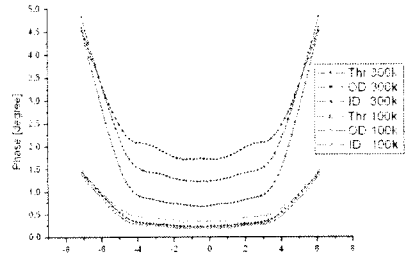


그림 12 결함의 깊이 38[%]에서의 phase angle의 변화

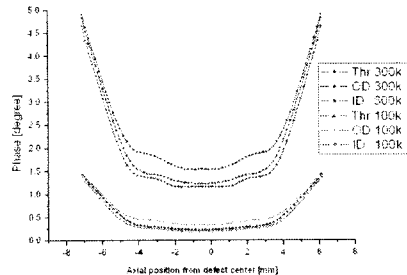


그림 13 결함의 깊이 75[%]에서의 phase angle의 변화

3. 결 론

본 논문에서는 3차원 유한요소법을 이용하여 원전 증기발생기 세관 검사에 사용하는 RPC 프로브에 대한 신호해석을 하였다. 결함은 세관에 대해 내부와 외부의 결함으로 구분하였고, 축방향으로 3[mm]부터 6[mm]까지 변화시키면서 수행하였다. 그 결과 결함의 크기가 증가함에 따라 저항, 리액턴스 및 임피던스의 크기가 모두 증가하는 것을 살펴볼 수 있었으며, 이 중 리액턴스의 변화량이 큰 것을 볼 수 있었는데, 이는 결함의 크기에 따라 위상이 변화함을 볼 수 있었다. 또한 내부결함에 비하여 외부 결함의 임피던스는 현저하게 작게 나오는 것을 알 수 있었다. 특히 외부결함의 경우 내부결함보다 위상변화가 크다는 것을 알 수 있었다. 이는 외부결함의 경우 리액턴스의 변화가 크게 나타나는 것으로 확인할 수 있었다. 전류의 주파수를 100kHz에서 300kHz로 변화시키면서 각 성분을 계산하였을 때 동일 결함에 대해서 주파수를 증가시키면 각 성분이 증가함을 볼 수 있었다.

본 논문에서의 연구결과는 현장에서 RPC 프로브를 사용함에 있어서 발생할 수 있는 이상신호 및 잡음 등에 대하여 효과적으로 해석함으로써 결함신호를 이해하고 예측하는데 필요한 자료가 될 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이항범, "비파괴검사 신뢰도 개선연구", 한국원자력안전기술원 최종보고서, 2002
- [2] "원전 SG세관 진단을 위한 MRPC프로브 신호의 데이터베이스 구축 및 고장진단", 산업자원부, 2005
- [3] 이의중 역, "와류탐상시험", 도서출판 월드, 1999
- [4] "Innovations in Eddy Current Testing", 한국원자력연구소, 2003
- [5] 임달호, "전기계의 유한요소법", 농명사, 1996
- [6] 신영길, "와전류 탐상신호 예측을 위한 3차원 수치해석 프로그램 확립", 기초전력공동연구소 최종보고서, 1996
- [7] Vectorfields, "OPERA 3d Reference Manual". Vecortech, v9.0, 2004