

전자기 수치 해석을 이용한 Combo 표준 보정 시험편의 MRPC Probe 와전류 신호 모사 및 평가

Simulation and Evaluation of ECT Signals from MRPC Probe in Combo Calibration Standard Tube Using Electromagnetic Numerical Analysis

유주영*, 송성진**†, 정희준*, 공영배*

Joo-Young Yoo*, Sung-Jin Song**†, Hee-Jun Jung* and Young-Bae Kong*

초 록 원전 증기 발생기 세관의 MRPC probe 신호를 검사하고 평가하기 위해서는 일반적으로 Combo 표준 보정 시험편 신호가 신호 보정을 위해 사용된다. 이렇듯 Combo 표준 보정 시험편 신호는 신호 평가에 중요한 영향을 미치지만, probe 상태나 관 주위의 여러 요소에 의해 쉽게 영향을 받기 때문에 결합 평가 요소인 신호의 크기 값과 위상각을 왜곡시킬 수 있다. 따라서 본 연구는 이런 문제점을 극복하기 위해 Combo 표준 보정 시험편의 실제 신호를 모사 신호로 대체하는 가능성을 알아 보기 위해 실험을 해 보았다. 이를 위해 MRPC probe와 Combo 표준 보정 시험편의 특성을 조사하였으며 계산 수행을 위해 체적 적분 방법으로 계산되는 상용 전자기 해석 프로그램인 VIC-3D를 사용하였고 모사 신호를 생성한 후 실험 신호와 비교를 통해 신호의 정확성을 확인하였다. 마지막으로, 모사 신호를 이용한 결합 평가를 위하여 실제 결합과 가공 결합에 대해 위상각과 크기값의 항목으로 평가하여 실제 결합 평가자에 의한 결과와 비교하였다.

주요용어: 와전류 탐상, MRPC, Combo 표준 보정 시험편, 신호 모사, 신호 평가

Abstract Signals captured from a Combo calibration standard tube play a crucial role in the evaluation of motorized rotating pancake coil (MRPC) probe signals from steam generator (SG) tubes in nuclear power plants (NPPs). Therefore, the Combo tube signals should be consistent and accurate. However, MRPC probe signals are very easily affected by various factors around the tubes so that they can be distorted in their amplitudes and phase angles which are the values specifically used in the evaluation. To overcome this problem, in this study, we explored possibility of simulation to be used as a practical calibration tool for the evaluation of real field signals. For this purpose, we investigated the characteristics of a MRPC probe and a Combo tube. And then using commercial software (VIC-3D) we simulated a set of calibration signals and compared to the experimental signals. From this comparison, we verified the accuracy of the simulated signals. Finally, we evaluated two defects using the simulated Combo tube signals, and the results were compared with those obtained using the actual field calibration signals.

Keywords: ECT, MRPC, Combo Calibration Standard Tube, Simulation, Signal Evaluation

1. 서 론

원전 증기 발생기 세관의 건진성 유지는 원전 압 력기기를 안정적이고 경제적으로 사용할 수 있도록 하는 가장 중요한 사항이다. 이 중에서 증기 발생기 세관에 발생한 결함의 검사와 평가가 원전 수명

에 관련하여 매우 중요하며, 이를 위해 원전 증기 발생기 세관에서는 bobbin probe를 사용한 와전류 탐상 검사가 가장 널리 쓰이고 있다. 그러나 결함이 많이 발생하는 지역인 튜브 시트 상단이나 구조물 주변의 결함 검사의 경우 bobbin probe를 이용한 와전류 탐상 검사는 결함 평가 결과의 정확도가 저하되는 단점을 가지고 있다. 이런 어려움을 극복하기 위해 실제 현장에서는 의심가는 지역이나 결함 발생 빈도가 잦은 곳에 motorized rotating pancake coil (MRPC) probe가 쓰이도록 규정하고 있다.

MRPC probe를 이용한 증기 발생기 세관의 검사는 probe head가 관내를 회전하며 검사하기 때문에 일반적으로 bobbin probe보다 검사속도가 훨씬 느리다. 그러나 회전에 의한 3차원 데이터와 여러 가지 코일로부터 형성되는 다양한 신호를 사용하기 때문에 bobbin probe 검사로는 검출이 어려운 작은 균열성 결함, 튜브 시트 상단의 확관 부위, 구조물 주변의 이물질 검출에 뛰어나며, bobbin probe 검사 후 검출된 결함에 대한 보다 정밀한 평가를 위해 사용된다[1].

MRPC probe를 이용한 증기 발생기 세관 신호의 결함 평가는 위상각과 크기값의 기본적인 요소에 의해 평가되는데, 이 두 가지 요소는 와전류 평가 지침서에 따라 표준 보정 시험편 신호의 특정결함에 증기 발생기 세관 신호가 보정이 된 후에 수행된다[2]. 따라서 보정신호로 사용되는 표준 보정 시험편 신호는 신호 평가를 하는데 있어 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 불행히도 표준 보정 시험편 신호 역시 probe의 상태나 마모, 검사 장비 및 관 주변의 여러 요소에 의해 쉽게 영향을 받기 때문에 신호 취득시 정확도가 떨어질 수 있다. 이는 잘못된 표준 보정 시험편을 이용하여 증기 발생기 세관 신호를 보정할 경우 결함 판정시 오판을 가져올 요소가 생기게 된다. 그러므로 와전류 검사의 신뢰성을 높이기 위해서는 표준 보정 시험편 신호의 취득에 세심한 관리가 필요하다.

이번 연구에서는 결함 평가에 쓰이는 실제 표준 보정 시험편 신호를 전자기 수치해석으로 모사한 신호로 대체하여 신호 평가에 일관성을 주는 방안을 검토하였고, 나아가 모사 신호를 이용한 결함 평가를 수행하였다. 이를 위해 MRPC 표준 보정 시험편 중에서 가장 일반적으로 사용되는 Combo 표준 보정 시험편을 이용하였고, 직관용 +point

MRPC probe에 대하여 전자기 수치 해석 기법을 이용한 상용 프로그램인 VIC-3D[3,4]로 와전류 신호를 모사하였다. 그 후 생성된 모사 신호와 실제 신호를 신호평가 지침서에 따라 보정한 후 각각의 신호를 B-scan, C-scan으로 비교하여 모사 신호의 정확성 여부를 비교하였다. 모사한 Combo 표준 보정 시험편의 MRPC probe 신호를 이용하여 실제 결함 평가 과정과 동일한 방법으로 교정과정을 거친 후 결함 평가를 수행하였다. 결함 평가는 원전의 증기 발생기 세관에 발생한 실제결함과 실험을 위해 제작한 가공 결함을 통하여 수행하였으며, 모사 신호를 이용한 결과와 실제 결함 평가자에 의해 수행된 평가 결과를 위상각과 크기값의 항목으로 비교하였다.

2. MRPC Probe

2.1. MRPC Probe의 구성

MRPC probe는 그 용도에 따라 쓰이는 종류가 여러 가지가 있는데, 본 연구에서는 3개의 코일을 가지고 있는 직관부용 +point MRPC probe를 선택하였다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 (a) +point MRPC probe는 세 가지 종류((b) primary pancake coil, (c) +point coil, (d) high frequency shielded pancake coil)의 코일이 동일 원주 방향에 120° 간격으로 위치해 있다.

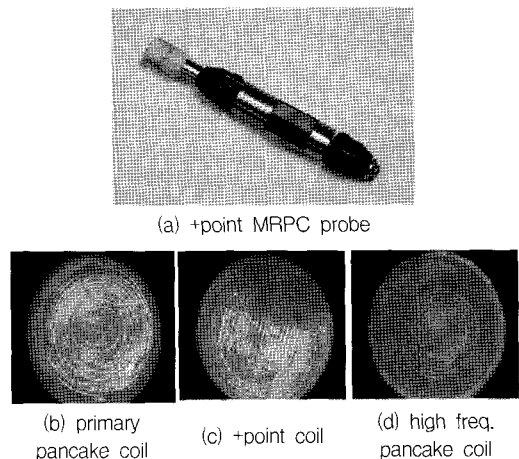


Fig. 1 An example of the head of a +point MRPC probe adopted for inspecting a straight pipe

MRPC probe의 신호 모사를 위해서는 무엇보다도 MRPC probe coil의 구조와 각 코일에 따른 와전류의 생성 원리를 알아야 한다. 광학 현미경 사진을 통한 측정을 토대로 분석한 결과 코일의 크기, 체적 및 코일턴수 등의 probe coil의 재원을 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Parameters of coils

	Primary pancake coil	+Point coil	High freq. shielded coil
코일턴수	210	85	46
코일내경	1.0mm	단경: 1.0mm 장경: 1.6mm	1.0mm
코일외경	3.0mm	단경: 1.8mm 장경: 2.4mm	1.5mm
코일높이	1.5mm	1.3mm	1.5mm
코일폭	1.0mm	0.4mm	0.25mm
코어의경	1.0mm		1.0mm
코어의높이	2.0mm		3.0mm
기타특징		동근사각형 코일의 십자교차	실드외경 : 3.6mm 실드두께 : 0.3mm 실드높이 : 3.0mm

2.2. MRPC Probe의 특성

MRPC probe는 전/후진과 회전을 동시에 하며 검사를 하기 때문에 3차원 이미지의 정보를 제공하고, 각 코일마다 3~4개의 주파수 대역(20kHz~700kHz)을 가지고 있어서 한번의 증기 발생기 세관 검사에 10개 채널 이상의 신호를 획득할 수 있다. 이는 반지대가 있는 복합 구조물 지역이나 튜브 시트 상단과 같은 지역에서 형성된 복잡한 신호의 경우, 풍부한 정보의 제공으로 보다 정확한 결함 평가를 할 수 있게 해 준다. 또한 MRPC probe에 존재하는 3개의 코일은 각각 다른 특성을 가지고 있기 때문에 증기 발생기 세관의 결함이나 감육 및 열화를 검사할 때 다양한 판단 근거들을 제공한다.

Fig. 2는 primary pancake coil로서 시험과 평행하게 위치되어 있다. 따라서 코일과 평행한 원형의 와전류가 시험면에 형성된다. 그렇기 때문에 primary pancake coil은 세관측에 수직이거나 수평인 결함에 좋은 감도를 나타낼 뿐만 아니라 결함을 포함한 주변의 신호에도 민감하다. 특히 관내의 체적적 결함에 대해 효과적으로 검출한다. Fig. 3의 +point coil

은 증기 세관의 결함 검사에서 MRPC probe의 코일 중 가장 주된 역할을 한다. 이 코일은 축방향 코일과 원주 방향 코일이 서로 수직하게 십자 코일을 구성하고 있기 때문에 각각의 수직한 와전류를 형성한다. 이때 차동의 원리로 두 신호의 선형적인 차에 의해 +point coil 특유의 신호가 형성하게 된다. 때문에 코일이 놓여진 종축이나 횡축방향에서의 결함 탐지 능력이 극대화되고 신호의 차에 의한 원리로 lift-off, 슬러지, 관의 형상 변형 등 결함 외적인 신호는 최소화할 수 있게 된다. 특히 +point coil은 미소 균열 결함을 검사할 때 검출 결과가 탁월하다.

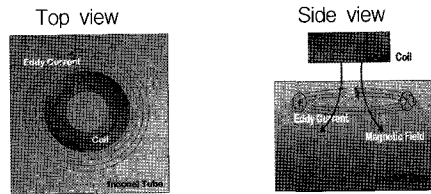
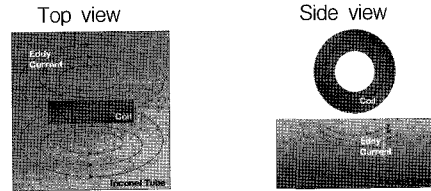
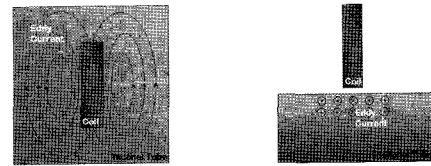


Fig. 2 Operating characteristics of a primary pancake coil



(a) Axial coil



(b) Circumferential coil

Fig. 3 Operating characteristics of a +point coil

Fig. 4의 high frequency shielded pancake coil은 코일의 외경에 강자성 금속으로 차폐시켜 고주파 와전류에 의한 자기장을 시험편에 집중할 수 있게 하였다. 따라서 시험편 표면에는 고주파의 와전류가 잘 형성되므로 표면 결함을 검출하는데 매우 유리하게 된다.

3. Combo 표준 보정 시험편

MRPC probe를 이용하여 증기 발생기 세관으로부터 획득한 와전류 신호를 평가하기 위해서는 표준 보정 시험편 신호를 이용한 신호의 보정 과정을 거친다. +point MRPC probe 신호의 보정은 Fig. 5

의 Combo 표준 보정 시험편 신호를 이용하여 보정되는데 특정 결함에 대해 신호의 위상각과 크기 값을 조정하기 때문에 Combo 표준 보정 시험편 신호의 정확성과 일관성은 신호 평가를 하는데 있어 매우 중요하다.

Table 2에 정리된 바와 같이 Combo 표준 보정 시험편은 through-wall hole (TWH), 깊이가 다른 두 개의 flat-bottom hole (FBH), 다양한 깊이의 OD/ID electro-discharge machined (EDM) notch의 결함이 형성되어 있으며 강자성체인 tube support ring (TSR)이 관 외경에 삽입 되어 총 14개의 가공된 결함으로 구성되어 있다. 즉 Combo 표준 보정 시험편은 bobbin probe 신호를 보정할 때 사용하는 ASME 표준 보정 시험편의 일부 결함과 다양한 EDM 노치들로 구성되어 있기 때문에 +point MRPC probe를 위한 ASME 시험편의 확장된 표준 보정 시험편으로 볼 수 있다.

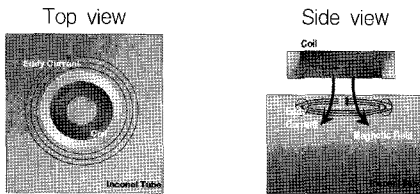


Fig. 4 Operating characteristics of a high frequency shielded pancake coil

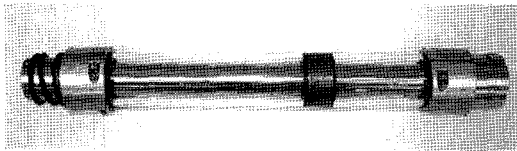


Fig. 5 A Combo calibration standard tube for +point MRPC probes

Combo 표준 보정 시험편 재료의 물성은 비자성체인 Inconel 시험편과 강자성체의 TSR로 구성되어 있다. Table 3은 Combo 표준 보정 시험편의 재료의 특성을 나타내고 있다.

4. Combo 표준 보정 시험편의 MRPC 신호 모사

Combo 표준 보정 시험편 신호의 와전류 모사 신호 생성을 위해 체적 적분 함수로 계산되는 상용 프로그램인 VIC-3D를 사용하였다. 이 프로그램은 체적 적분 방정식을 사용하여 검사체의 전자기 문제에 대해 효율적으로 풀기 위해 설계되었다. 결함 또는 불연속부와 소스 사이의 거리에 따른 Green 함수를 이용하여 공간이나 체적의 소스 효과를 모든 점에 대해 합산하여 계산하여 자계 강도의 변화에 의해 코일에 인가되는 전압이 계산되면 임피던스 값을 얻게 된다. 그리하여 신호 형성을 위해 probe를 이동시켜 가면 와전류 신호를 모사할 수 있게 된다. 이 방법을 사용하는 VIC-3D는 신호 모사를 하는데 있어 타 프로그램보다 계산수행 소요 시간을 월등히 줄여 줄 수 있으나 복잡한 형상의 모델링에 한계가 있고 투자율이 비선형인 문제를 풀 때 정확도가 떨어질 수 있다.

VIC-3D를 이용하여 Combo 표준 보정 시험편의 모사 신호 생성을 위해서 Table 1에 정리되어 있는 3종류의 MRPC probe coil 정보와 Table 2와 Table 3에 정리되어 있는 Combo 표준 보정 시험편 정보를 입력한 뒤 현장에서 실제로 쓰이고 있는 20kHz ~ 700kHz 범위의 주파수 대역을 모사하였다.

Table 2 Deliberated flaws in the combo calibration standard tube

Deliberated Defect	TWH(A)	FBH(B)	FBH(C)	Axial(D)	OD Axial(F)	OD Circ.(H)	TSR(J)	ID Axial(K)	ID Circ.(M)
				Circ.(E)	OD Axial(G)	OD Circ.(I)		ID Axial(L)	ID Circ.(N)
% Depth	100 %	60 %	20 %	100 %	60 %	60 %	TSR	40 %	40 %
				100 %	40 %	40 %			20 %

Table 3 Material properties of the combo calibration tube

Material	Conductivity (S/m)	Rel. Permeability	Rel. Permittivity	Inner radius (mm)	Outer radius (mm)	Thickness (mm)	Length (mm)
Inconel Combo Tube	1.1E6	1	1	8.433	9.525	1.092	275.05
Tube Support Ring (TSR)	6.7E6	50	1	9.525	15.875	6.35	19.05

5. 신호 모사 및 정확성 검증

VIC-3D로 계산된 데이터로부터 probe 이동거리에 따라 resistance값과 reactance값을 재구성하여 MRPC probe의 Combo 표준 보정 시험편 신호를 형성하였다. 그 후 모사 신호의 정확성을 검증하기 위해 원전 검사 장비인 MIZ 검사 장비로부터 취득한 실제 Combo 표준 보정 시험편 신호와 비교하였다. 신호의 비교는 각각의 결함마다 B-scan 및 C-scan을 통하여 비교하였는데 두 신호 모두 동일 조건으로 신호평가 지침서[2]에서 규정하고 있는 Combo 표준 보정 시험편의 교정과정을 적용하였다.

Matlab 프로그램을 사용하여 신호를 보정하였는데, resistance값과 reactance값에 대한 위상각과 크기값은 서로 독립적이라는 원리를 기초로 하여 다음 식 (1,2,3)을 이용하였다.

$$Z = (X^2 + Y^2)^{1/2} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} X' &= Z \cdot \mu \times \cos(\tan^{-1}(Y/X)) \\ Y' &= Z \cdot \mu \times \sin(\tan^{-1}(Y/X)) \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} X'' &= Z' \times \cos(\tan^{-1}(Y'/X') \cdot \nu) \\ Y'' &= Z' \times \sin(\tan^{-1}(Y'/X') \cdot \nu) \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 X 는 resistance, Y 는 reactance, Z 는 impedance 이고 μ 는 20V와 결함 D, E 에 대한 크기의 보정 계수이며, ν 는 15°와 결함 K, L, M 에 대한 위상각의 보정 계수이다. 초기의 데이터 값이 식 (1)과 같은 기본 식에 의해 변화되어 식 (2)를 통해 크기값이 보정되고, 식 (3)을 통해 위상각이 보정된다.

위상각과 크기값은 독립이므로 식 (2)와 식 (3)의 계산 순서는 어느 식을 먼저 수행해도 상관없이, 신호 보정으로 사용되는 표준 보정 시험편의 결함 D, E, K, L, M은 증기 발생기 세관에서 생성된 결함의 종류나 MRPC probe 코일의 채널에 따라 선택적으로 사용된다.

5.1. Primary pancake coil

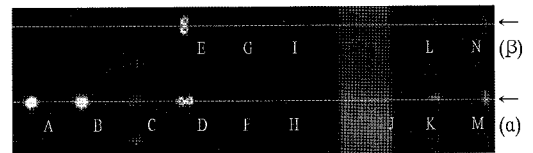
Fig. 6은 primary pancake coil의 Combo 표준 보정 시험편에 대한 C-scan 이미지이다. 주파수는

해석한 주파수중 300kHz이며, 결함신호 D를 이용하여 크기를 20V로 맞추고, K를 이용하여 위상각을 15°로 맞추어 양 신호 모두 신호 변환 과정을 통해 결함 신호 전체를 보정하였다. 결함에 따라 등고선의 모양이 다른 것을 볼 수 있는데 이는 결함 형상에 따라 데이터 특성이 다르기 때문이다.

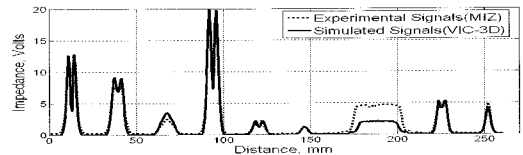
Fig. 6(a)는 VIC-3D로부터 계산한 Combo 표준 보정 시험편의 이론적인 신호이므로 14 종류의 결함 신호들이 뚜렷하게 형성되어 있음을 볼 수 있다. 반면, Fig. 6(b)는 MIZ 검사 장비로부터 획득한 Combo 표준 보정 시험편의 실험 신호이다. 그림에 나타난 바와 같이 관내에 배경 잡음신호들이 존재한다는 것을 알 수 있다. 모사 신호인 Fig. 6(a)를 실제 신호인 Fig. 6(b)와 비교하여 볼 때 상당히 유사함을 확인 할 수 있다.



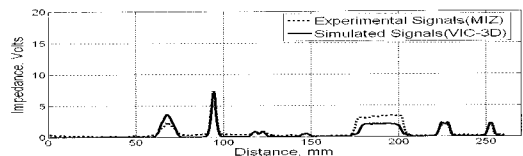
(a) Simulated C-scan image



(b) Experimental C-scan image



(c) Comparison of B-scan curves along the center α line of the defects



(d) Comparison of B-scan curves along the center β line of the defects

Fig. 6 C-scan images and B-scan curves for the primary pancake coil of Combo tube in 300kHz

실제 신호와 모사 신호의 결합에 대한 신호 크기값의 일치 여부를 알아보기 위해 Fig. 6(c)와 Fig. 6(d)에 결합 중심선을 지나는 프로브 이동 거리에 따른 두 데이터를 B-scan으로 겹쳐 나타내었다. 비교 결과 각 결합에 대한 크기값이 상당히 유사함을 볼 수 있다. 그러나 강자성체 구조물인 결합 J는 실험 신호가 모사 신호보다 약간 크게 나타났다. 이의 가장 큰 원인은 신호 모사시 B-H 곡선의 비선형성을 적절히 고려하지 못하였기 때문으로 판단된다.

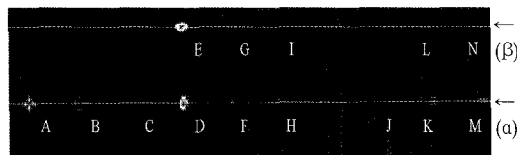
5.2. +Point coil

Fig. 7은 +point coil의 300kHz 신호를 보인 것이고 Combo 표준 보정 시험편의 결합신호인 D를 이용하여 크기를 20V로 맞추고 K를 이용하여 위상각을 15°로 맞추어 결합신호 전체를 보정하였다.

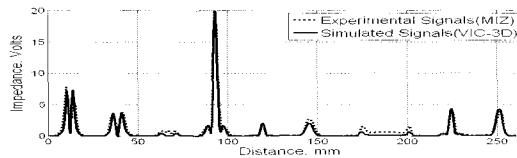
3종류의 코일 중 가장 깨끗한 신호를 보이고 있



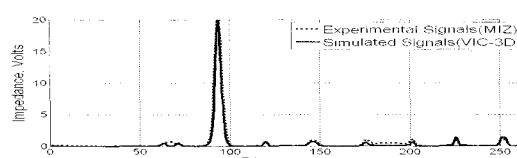
(a) Simulated C-scan image



(b) Experimental C-scan image



(c) Comparison of B-scan curves along the center α line of the defects



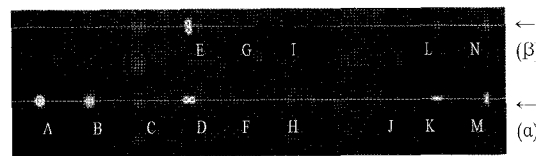
(d) Comparison of B-scan curves along the center β line of the defects

Fig. 7 C-scan images and B-scan curves for the +point coil of Combo tube in 300kHz

는 이유는 +point coil의 직교하는 코일에 차동의 원리가 적용되어 신호를 형성하기 때문에 중첩되는 결합신호나 배경잡음 신호가 감소되어 pancake coil보다 뚜렷한 결합신호를 보이고 있다. 또한 원형결합은 +point coil에 의해 십자신호가 형성됨을 볼 수 있다.

5.3. High frequency shielded pancake coil

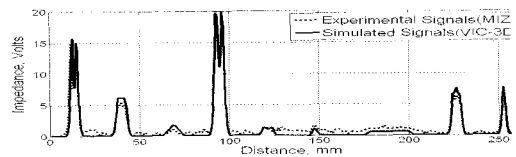
Fig. 8의 high frequency shielded pancake coil은 700kHz의 고주파수 신호를 보인 것이고 Combo 시험편의 결합 신호 D를 이용하여 크기를 20V로 맞추고 L을 이용하여 위상각을 15°로 맞추어 결합 신호 전체를 보정하였다. Fig. 8(b)에 보인 바와 같이, 이 코일의 실제 신호를 보면 배경 잡음 신호가 상당히 많은 것을 알 수 있다. 이는 고주파 와전류가 코일을 둘러싼 차폐 금속에 의해 Combo 표준 보



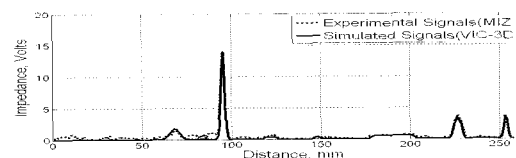
(a) Simulated C-scan image



(b) Experimental C-scan image



(c) Comparison of B-scan curves along the center α line of the defects



(d) Comparison of B-scan curves along the center β line of the defects

Fig. 8 C-scan images and B-scan curves for the high frequency shielded pancake coil of Combo tube in 300kHz

정 시험편 표면에 집중적으로 형성되어 주위 표면 잡음 요소에 민감하게 반응하기 때문이다. 반면 VIC-3D로 계산된 모사 신호인 Fig. 8(a)는 잡음요소가 없으므로 깨끗한 신호를 볼 수 있다. 또한 Fig. 8(c)와 Fig. 8(d)에서 보듯이, 고주파의 와전류에 의한 얇은 표면 침투 깊이로 인해 코일로부터 가까운 결함 K와 M은 동일결함의 코일로부터 먼 결함 G와 I 보다 신호의 크기가 확실히 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

6. 신호평가

MRPC probe를 이용한 증기 발생기 세관 신호의 결함 평가는 위상각과 크기값(볼트값)에 의해 평가 되는데, 이 두 가지 값은 와전류 평가 지침서에 따라 Combo 표준 보정 시험편 신호의 특정 결함에 증기 발생기 세관 신호 전체가 보정이 된 후에 평가된다. 따라서 보정 시험편으로 사용되는 Combo 표준 보정 시험편 신호의 일관성과 정확성은 신호 평가를 하는데 있어 매우 큰 영향을 미치고 있다.

그러나 실제 표준 보정 시험편 신호들은 동일규격의 시험편이라 하더라도 신호를 취득하는 상황에 따라 결함에 대한 위상각과 크기값들의 차이가 크게 날 경우가 있다. 이는 신호를 취득하는 프로브의 마모나, 시험편의 불균일, 취득 시스템의 잡음 등에 의한 원인으로 볼 수 있는데, 표준 보정 시험편 신호의 격차가 취득할 때 마다 크다면 문제가 생길 수 있다. 왜냐하면, 차이가 큰 신호를 이용하여 보정을 수행하고 신호 평가를 할 경우, 결함 신호가 큰 결함일 경우에는 그리 큰 문제가 될 수 없지만 신호의 분간이 쉽지 않은 미세한 결함일 경우에는 자칫 결함 신호를 배경 신호로 오판할 수 있는 위험성이 존재한다.

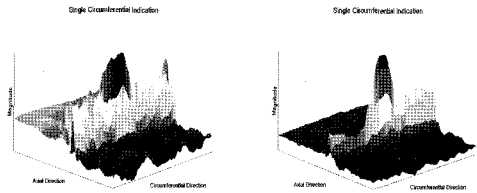
본 연구에서는 이러한 가능성을 확인하기 위해 Combo 표준 보정 시험편의 모사 신호를 이용하여

원전에서 발생한 실제결함과 실험을 위해 제작한 가공결함을 통하여 수행하였으며, 그 결과를 실제 Combo 표준 보정 시험편 신호를 이용한 결함 평가 결과와 비교하였다.

6.1. 실제결함 신호평가

Fig. 9에 나타난 바와 같은 실제 원전 증기 발생기 세관의 결함 신호인 단일 원주 방향 지시(single circumferential indication, SCI)에 대해서 모사 Combo 표준 보정 시험편 신호를 이용하여 결함 평가를 수행하였다.

이 결함은 hot leg 지역의 튜브 시트 부위에서 발생한 결함으로 원주 방향으로 형성된 단일 응력 부식 균열성 결함이다. 원주 방향의 균열성 결함이 증기 발생기 세관에 존재하면 증기 발생기가 가동 중일 때 고온, 고압하에 노출 되어 급격하게 파단 될 가능성이 높다. 따라서 이런 종류의 결함은 결함 깊이의 높낮이를 떠나 발견되기만 하면 즉시 세관을 막아야 하는 결함으로 분류되어 있다.



(a) A single circumferential indication 1 (b) A single circumferential indication 2

Fig. 9 Real defect signals in steam generator tubes of nuclear power plants

결함 평가는 Matlab을 이용하여 수행하였으며 실제 결함 평가 결과와 같은 조건으로 +point coil의 300kHz 주파수의 Combo 표준 보정 시험편 신호를 이용하였고 교정 과정을 실제 신호처리 절차에 맞

Table 4 Comparison of signal evaluation results using real defects

Defect types	Flaw for normalization	Flaw for calibration	Real Combo signals (Calibration)→		Simulated Combo signals (Calibration)→		Discrepancy	
			Real SCI signals		Real SCI signals			
			Volts	Phase angle	Volts	Phase angle	Volts	Phase angle
SCI 1	A	E:20V, M:15°	9.76V	96°	9.84V	94.3°	0.08V	1.7°
SCI 1	D	E:20V, M:15°	9.76V	96°	9.53V	91°	0.23V	5°
SCI 2	A	E:20V, M:15°	2.55V	96°	2.57V	94.3°	0.02V	1.7°
SCI 2	D	E:20V, M:15°	2.55V	96°	2.49V	91°	0.06V	5°

계 원주 방향의 결함 신호인 E를 이용하여 크기를 20V로 맞추고 M을 이용하여 위상각을 15°로 맞추어 전체 신호를 보정한 후 수행하였다.

각각 다른 방법으로부터 생성된 모사 신호와 실제 신호의 크기 차이를 정규화하기 위해 두 가지 방법에 대해 수행하였다.

즉, Combo 표준 보정 시험편내에 형성되어 있는 원형 관통 결함인 A를 이용한 경우와 노치 관통 결함인 D를 이용한 경우를 통하여 정규화하였고, 실제 결함 평가에서 사용되고 있는 정량적인 수치인 결함 신호의 크기값과 위상각을 측정하였다. Table 4는 모사 신호와 실제 신호를 이용한 결함 평가 결과를 비교한 것이다. 두 가지 평가 결과 모두 결함 A를 정규화하였을 때 모사 신호를 이용한 평가결과가 결함 D를 정규화 하였을 때 보다 실제 평가결과와 유사하다는 것을 알 수 있다. 이는 앞으로 모사 Combo 표준 보정 시험편 신호를 이용하여 결함 평가를 할 경우 결함 A를 이용하여 정규화하는 것이 실제 결함 평가에 근접한 결과를 도출할 수 있다는 것을 말해 준다.

6.2. 가공 결함 신호 평가

모사 Combo 표준 보정 시험편 신호를 이용하여 가공한 결함에 대한 신호평가를 위해서 Fig. 10에 나타난 바와 같은 0.2mm×4.0mm의 면적을 가지며 일정 깊이로 형성된 원주 방향의 미세한 균열성 결함 5개를 EDM 가공법을 사용하여 제작하였다. 결함이 가공된 Inconel 600 세관은 본 연구에서 모사한 Combo 표준 보정 시험편과 물성 및 직경이 동일하다.

가공 결함에 대한 결함 평가도 역시 신호 평가 지침서에 의해 수행되었는데, 원주 방향성 결함의 +point coil의 300kHz 신호를 평가 지침서에 따라 Combo 시험편 결함 E의 신호 크기를 20V로 보정하고 결함 M으로 위상각을 15°로 보정하여 전체 신호를 보정하였다.

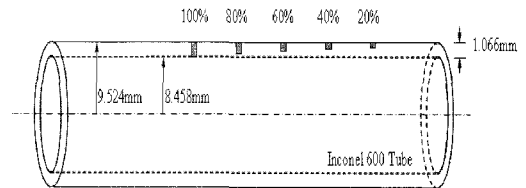


Fig. 10 Deliberated defects in an Inconel 600 tube

결함 평가는 총 3가지 경우에 대해서 수행을 한 후 비교를 하였다. 즉, 실제 Combo 표준 보정 시험편 신호를 이용하여 신호 평가자에 의해 수행된 가공 결함의 평가 결과와 모사 Combo 표준 보정 시험편 신호를 이용하여 가공 결함에 대한 평가 결과와 모사 Combo 표준 보정 시험편 신호를 이용하여 모사 결함에 대한 평가 결과를 비교하였다. 신호의 정규화는 Table 4에서 언급한 바와 같이 원전 결함 평가로부터 보다 실제 평가 결과에 근접하기 위해 결함 A를 이용하였다.

Table 5는 3가지 경우의 결함 평가 결과를 나타낸다.

전체적으로 결함 신호의 크기값과 위상각은 결함의 깊이 변화에 따라 3가지 경우 모두 유사한 경향을 보이고 있으나 몇몇 결함은 그 격차가 좀 더 큰데 그 주요 원인은 가공 결함의 경우 제작할 때 미

Table 5 Comparison of signal evaluation results using deliberate defects

Defect types, % OD depth	Flaw for normalization	Flaw for calibration	Real Combo signals (Calibration)→ Deliberated defect signals		Simulated Combo signals (Calibration)→ Deliberated defect signals		Simulated Combo signals (Calibration)→ Simulated defect signals	
			Volts	Phase angle	Volts	Phase angle	Volts	Phase angle
			SCI, 20%	A	E:20V, M:15°	0.23V	96°	0.22V
SCI, 40%	A	E:20V, M:15°	0.79V	87°	0.74V	96°	0.70V	78°
SCI, 60%	A	E:20V, M:15°	2.80V	75°	2.64V	84°	2.15V	65°
SCI, 80%	A	E:20V, M:15°	6.59V	64°	6.21V	73°	5.46V	58°
SCI, 100%	A	E:20V, M:15°	33.74V	29°	31.76V	38°	29.68V	28°

세하고 정확한 EDM 가공이 요구되어지나 정확하게 결함을 가공하지 못한 것이 큰 원인으로 판단된다.

실제 Combo 표준 보정 시험편 신호를 이용한 경우와 모사 Combo 표준 보정 시험편 신호를 이용하여 가공결함에 대해 평가한 경우 위상각의 차이가 모두 9° 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 결함 A를 이용하여 정규화할 때 모사 신호와 실제 신호간에 결함 A의 위상각의 차이가 9°가 되었기 때문에 나타난 결과로 볼 수 있다.

7. 결 론

MRPC probe는 원전 증기 발생기의 결함을 검사하고 평가하는데 있어 다른 종류의 probe보다 탁월하지만 여전히 잘못된 결함 평가를 할 수 있는 가능성이 상존한다. 결함 평가의 신뢰성을 좌우하는 주요 요인은 정확한 결함 신호가 가장 중요하고 이에 못지않게 표준 보정 시험편 신호가 중요하다. 왜냐하면 결함 평가를 하는데 있어서 표준 보정 시험편 신호는 증기 발생기 세관으로부터 측정된 전체신호를 보정 하는 역할을 하고 검사 시스템 전체의 이상 유무를 확인하는 척도로 사용되기 때문에 표준 보정 시험편의 일관적이고 정확한 신호는 올바른 평가를 하는데 있어 매우 중요하다.

본 논문은 MRPC probe를 이용하여 증기 발생기 세관에 발생하는 결함에 대한 와전류 탐상을 수행할 때 얻게 되는 신호를 전자기 수치해석 소프트웨어를 이용하여 신호를 예측하고 평가하는 것의 정확성을 검증하기 위한 목적으로 연구가 수행되었다. 본 연구에서는 신뢰성있고 정확한 와전류 신호의 예측과 평가를 위하여 상용 전자기 수치 해석 소프트웨어를 이용하여 MRPC probe 신호를 모사하였고, 오차가 존재하는 실제 표준 보정 시험편 대신 신뢰성이 검증된 모사 표준 보정 시험편 신호를 이용하여 신호평가할 수 있는 가능성을 알아보았다.

이를 위해 MRPC probe 및 표준 보정 시험편의 특징 및 신호형성 원리를 분석하였으며, 이를 바탕으로 상용프로그램으로 와전류탐상 신호를 모사하였으며, 모사한 데이터의 타당성 여부를 실제신호와와의 B-scan 및 C-scan의 비교를 통해 확인하였다.

끝으로 모사한 Combo 표준 보정 시험편 신호를 이용하여 실제 원전 결함과 인위적으로 제작한 가공 결함에 대해 신호 평가를 수행하였다. 평가를 위해 현장에서 쓰이는 결함 평가 절차인 교정 과정을 적용하였으며, 위상각과 크기값의 데이터를 취득하여 동일 조건의 실제 결함 평가 결과와 비교하였다.

그 결과 모사 신호를 이용한 위상각과 크기값에 대한 결함 평가 결과가 실제 평가 결과와 상당히 유사하였으며 신호 평가를 하는데 있어 모사 신호가 실질적인 표준 보정 신호로 사용될 수 있는 가능성이 있다는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 기초전력연구원(Korea Electrical Engineering & Science Research Institute)으로부터 연구비를 지원받아 연구를 수행하였기에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Sung Jin Song, Chang Hwan Kim, Deok Hyun Lee, Myung Sik Choi, Do Haeng Hur and Jung Ho Han, "An Automated System for System for Detection of Through-wall Cracks in Steam Generator Tubes," Key Engineering Materials, Vols. 297-300, pp. 2071-2076, (2005)
- [2] Electric Power Research Institute, PWR Steam Generator Examination Guidelines: Revision 6, EPRI, Nuclear Power Group, Palo Alto, California, (2002)
- [3] VIC-3D User Manual, Victor Technologies, Bloomington, Indianapolis, (2005)
- [4] W. Scott Dunbar, "The volume integral method of eddy current modeling," Journal of Nondestructive Evaluation, Vol. 5, No. 1, pp. 9-14, (1985)