

원전 세관 검사를 위한 배열와전류신호의 유한요소해석

김지호*, 임건규**, 이향범*

송실대학교 전기공학과*, 한국원자력안전기술원**

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

Ji-Ho Kim*, Geon-Gyu Lim**, Hyang-Beom Lee*

School of Electrical Engineering, Soong Sil University*, Korea Institute of Nuclear Safety**

Abstract - 본 논문에서는 전자기 유한요소 해석을 이용하여 원전 증기발생기 세관에서의 결함 변화에 따른 배열와전류프로브의 와전류탐상 특성을 해석하였다. 프로브의 전자기적 특성을 해석하기 위하여 3차원 전자기 유한요소법을 이용하였다. 해석 대상으로 FBH 결함이 있는 세관을 사용하였으며, 결함의 위치는 관의 외부 표면에 존재하게 하고 결함의 깊이는 세관 두께의 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 하였다. 결함의 크기를 변화시켰으며, 시험주파수는 100kHz, 300kHz, 400kHz를 사용하였다. 배열와전류프로브의 방향성에 대한 특성을 확인하기 위하여 축방향 및 원주방향 Notch 결함 신호의 차이를 비교하였다. 본 논문을 통하여 결함형상, 깊이 및 크기, 시험주파수의 변화에 따른 탐상신호의 변화를 확인할 수 있었으며, 본 논문의 결과는 배열와전류 프로브의 와전류탐상 신호 평가 시 도움이 될 것이다.

2. 본 론

2.1 배열와전류프로브

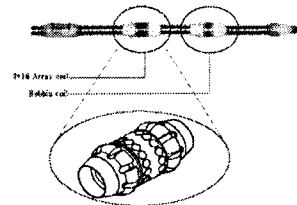
2.1.1 배열와전류프로브의 구조 및 원리

배열와전류프로브는 Transmit와 Receive 코일이 여러 개 배열된 형태로 구성되어 있다. <그림 1>에서 보는 것과 같이 각 코일들이 축방향과 원주방향으로 배열되어 있어 축방향 또는 원주방향 모두에 민감하게 반응하며, Volumetric flaws, IGA(Inter Granular Attack), 여러 방향으로 복잡하게 형성된 크랙성 결함도 식별이 가능하다. 이는 기존의 보빈프로브나 RPC 프로브에 비해 결함 검출능력이 뛰어나고 U-bend나 튜브 시트에서의 신호 대 잡음(S/N)비 또한 5~10배 정도 향상되었다[3,4].

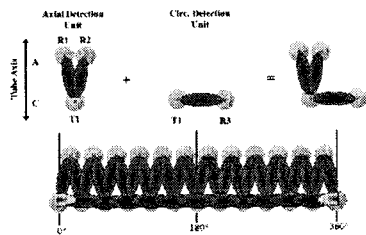
1. 서 론

원자력발전소의 증기발생기(SG, Steam Generator) 세관은 원자로에 발생된 열을 증기로 바꾸어 주는 열 교환 장치로서 원자로와 증기터빈 사이에서 열전달뿐 아니라, 1차 및 2차 계통을 분리하여 방사능을 차단하는 역할을 하는 중요한 부분이다. 따라서 원전 SG세관 검사의 건전성 유지는 원전의 안전에 아주 중요하다. SG세관의 비파괴검사에는 와전류탐상(ECT, Eddy Current Testing) 방법이 주로 적용된다. 현재 원전 SG세관의 결함 검출을 위해 보빈프로브와 RPC(Rotating Pancake Coil)프로브를 사용한 ECT 방법이 널리 이용되고 있다. 보빈프로브는 검사속도가 빠르고 세관 전 영역에 대한 검사가 가능하지만, 원주방향 결함검출이 곤란하다는 단점이 있다. RPC 프로브는 축방향 및 원주방향의 결함 검출 성능이 우수하지만 검사 속도가 느려, 결함의 의심부위에 대해서만 검사를 수행하고 있다[1]. 이에 검사성능 및 검사시간의 단축을 위해 배열와전류프로브가 개발되었다. 배열와전류프로브는 여러 개의 Pancake 코일로 구성되어 있으며, Pancake 코일은 Transmit 코일과 Receive 코일로 나뉜다. Transmit 코일은 자장을 발생시켜 피검사체에 와전류를 유기기키는 역할을 하고, Receive 코일은 결함에 의해서 발생한 자장을 검출하여 결함신호를 받아들인다. 배열와전류프로브는 보빈프로브의 장점인 빠른 검사속도와 RPC프로브의 장점인 정밀검사를 한 번에 수행할 수 있으며, 세관 전 영역을 검사하는 것이 가능하다[2].

본 논문에서는 이러한 배열와전류프로브를 이용하여 원전 SG세관의 FBH(Flat Bottomed Hole) 결함 및 Notch 결함에 대하여 3차원 유한요소 해석을 수행하여 탐상신호를 획득하였다. FBH 결함의 크기, 깊이 및 시험주파수를 변화시키며 해석하였다. 또한 배열와전류프로브의 결함에 대한 방향성을 확인하기 위하여 축방향 및 원주방향 Notch 결함에 대한 신호 비교하였다.



<그림 1> 배열와전류프로브



<그림 2> 배열와전류프로브의 원리

배열와전류프로브의 원리는 <그림 2>에 나타나 있다. Transmit 코일 T1은 시변자계를 발생시키고, Receive 코일 R1, R2, R3는 결함신호를 받아들이는 역할을 한다. 배열와전류프로브를 이용한 ECT 방법은 18°/39 [in/sec]의 빠른 속도로 축방향 및 원주방향의 결함을 검출할 수 있기 때문에 한정된 시간 내에 검사를 해야 하는 원전 SG세관 검사에 적합하다.

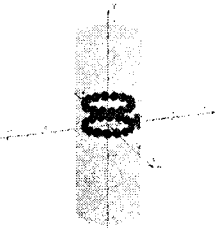
2.1.2 배열와전류프로브 해석 모델

본 논문에서는 이미 검증된 3차원 유한요소해석 프로그램인 OPERA 3D를 이용하여 해석대상에 대한 수치 해석을 수행하였다. 수치해석을 위해 사용된 도체관의

재질은 증기발생기 세관에 널리 사용되는 Inconel 600 도체관으로 하였다. 프로브는 배열와전류프로브를 사용하였으며, 해석대상인 도체관 및 프로브에 대한 제원은 <표 1>에 나타내었다. 그에 대한 해석모델은 <그림 3>과 같다.

<표 1> 해석모델의 제원

관 및 결합		
재 질	관 크기 mm (내경, 외경, 두께)	결합 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)	
300 kHz	2.0×3.0×1.0	



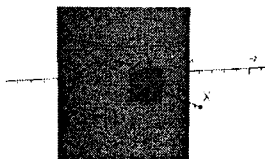
<그림 3> 해석 모델

해석결합은 ASME 표준시험편의 FBH 결합에 대해 3차원 유한요소 해석을 수행하여 탐상신호를 획득하였다. 해석시 FBH 결합의 깊이는 세관 두께의 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 하였다. 결합의 크기 변화 및 시험주파수를 100kHz, 300kHz, 400kHz로 변화시켜 해석하였다. 또한 배열와전류프로브의 방향성을 확인하기 위하여 축방향 및 원주방향 Notch 결합을 해석하였다. 결합의 깊이는 관 두께의 40%로 하였다.

2.2 해석결과

2.2.1 ASME 표준시험편의 결합 신호 비교

<그림 4>는 유한요소해석을 위해 전자기 유한요소 해석 프로그램으로 모델링 후 요소분할을 한 그림이며, 이때의 결합의 종류는 FBH, 결합의 크기는 4.8mm, 결합의 깊이는 관의 외부 표면으로부터 40% 깊이일 때이다. 해석시 요소망은 사면체 요소망을 사용하였으며, 요소망을 구성하는 절점의 수는 835,197개이며, 사면체 요소수는 1,226,569개이다.

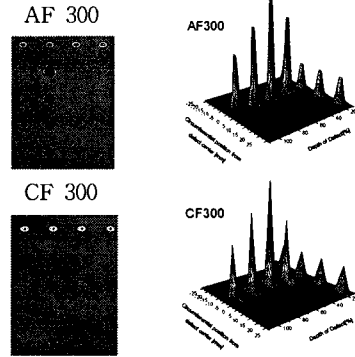


<그림 4> 해석모델의 요소 분할

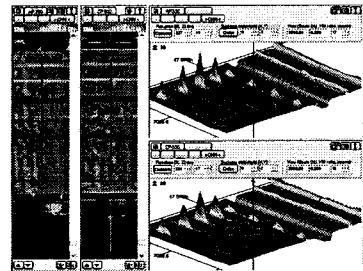
전자기 수치해석을 이용하여 얻은 결합신호와 배열와전류프로브와 탐상장비를 이용한 결합신호와 비교해 보았다. <그림 5>는 전자기 유한요소해석을 통해 얻은 결합신호이며, <그림 6>은 실제 배열와전류프로브를 이용하여 얻은 탐상신호이다.

결합신호는 축방향 채널과 원주방향 채널을 각각 나타내었으며 결합 부위에서 신호의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 결합의 깊이가 관두께의 20% 결합

의 경우 ASME 표준시험편에 90° 간격으로 결합이 4개가 존재하여 같은 크기의 결합신호가 4개가 발생되는 것을 확인할 수 있다. 또한 원주방향 채널의 경우 Transmit 코일과 Receive 코일이 축방향으로 같은 높이에 있지만 축방향 채널의 경우 Transmit 코일과 Receive 코일의 위치가 축방향으로 6.5mm 위쪽에 위치하고 있어 결합신호 발생 위치가 원주방향 채널보다 빠르게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.



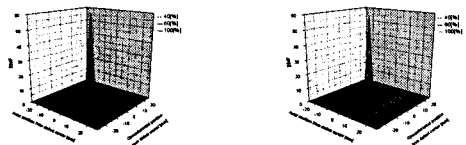
<그림 5> 전자기 유한요소 해석을 사용한 탐상신호



<그림 6> 탐상장비를 이용한 와전류탐상 측정신호

2.2.2 결합의 깊이 변화시 탐상신호 비교

<그림 7>은 시험주파수를 300kHz로 고정된 상태에서 결합의 깊이를 40%, 60%, 100%로 변화시켜 신호의 변화를 비교한 결과이다.



(a) 축방향 채널 신호 (b) 원주방향 채널 신호

<그림 7> 결합의 깊이 변화에 따른 와전류탐상신호

결합의 크기와 깊이가 변화하게 되면 센서의 이동에 따라 SG 세관에 발생되는 와전류의 위치 및 크기가 변화하게 되고 결국 탐상신호의 변화로 이어지게 된다. 해석결과 시험주파수를 일정하게 유지시킨 상태에서 결합의 깊이가 증가되면 신호의 크기가 증가하는 현상을 나타내었다. 결합신호의 최대값을 기준으로 축방향 채널의 경우 결합신호는 결합의 깊이를 40%에서 60%로 증가시 약 2.02배, 60%에서 100%로 증가시 약 3.05배, 40%에서 100%로 증가시 약 6.18배 신호가 증가하는 현상을 보였다. 원주방향의 결합신호는 결합의 깊이를 40%에서 60%로 증가시 약 1.98배, 60%에서 100%로 증가시 약 2.94배, 40%에서 100%로 증가시 5.82

배 신호가 증가하는 형상을 보였다.

2.2.3 결함의 크기 변화시 탐상신호 비교

<그림 8>은 시험주파수를 300kHz로 고정 한 상태에서 결함의 깊이를 1.2mm, 2.4mm, 4.8mm로 증가시켜 신호의 변화를 비교한 결과이다. 해석 결과 시험주파수를 일정하게 유지시킨 상태에서 결함의 크기가 증가되면 신호의 발생 위치 및 크기가 증가하는 형상을 나타내었다. 이는 결함의 크기가 증가할수록 결함신호의 발생 넓이가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 결함의 크기가 증가에 따른 신호의 변화는 <표 2>에 나타내었다.



(a) 축방향 채널 신호 (b) 원주방향 채널 신호
<그림 7> 결함의 크기 변화에 따른 와전류탐상신호

<표 2> 결함의 크기 변화에 따른 와전류탐상신호

결함깊이	40 %		
시험주파수	300 kHz		
결함크기	1.2mm	2.4mm	4.8mm
축방향채널	8.52	31.04	90.39
원주방향채널	8.97	32.81	92.13

2.2.4 시험주파수 변화시 탐상신호 비교

결함의 깊이를 일정하게 유지한 상태에서 시험주파수를 100kHz 및 400kHz 두 종류로 변화시켜 해석한 결과이다. 시험주파수의 변화시 침투깊이가 변화하게 되어 와전류탐상 시 결함신호의 크기가 변화하게 된다.

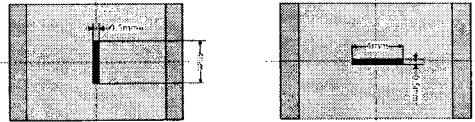
시험주파수가 100kHz에서 400kHz로 변화할 때 결함의 깊이 및 크기에 따라 결함신호의 증가량은 결함의 깊이 및 크기에 따라 다르게 나타났다. 시험주파수 변화에 따른 결함신호의 변화는 <표 3>에 나타내었다.

<표 3> 시험주파수 변화에 따른 와전류탐상신호

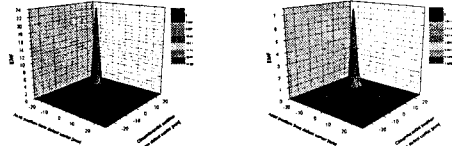
결함깊이	40%		60%		100%	
결함크기	4.8mm		2.8mm		1.3mm	
시험주파수 kHz	100	400	100	400	100	400
축방향 채널	33.1	104.7	49.7	147.2	20.2	82.9
원주방향 채널	35.9	103.1	61.1	154.5	21.3	81.2

2.2.5 방향성이 있는 Notch 결함의 탐상신호 비교

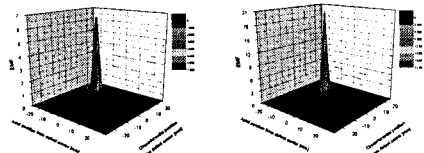
배열와전류프로브의 결함에 대한 방향성을 확인하기 위하여 축방향 및 원주방향 Notch 결함에 대하여 해석을 수행하였다. 결함은 <그림 9>와 같고, 이때 결함의 깊이는 관 두께의 40%로 하였다. <그림 10>과 <그림 11>은 각각 축방향 및 원주방향 Notch 결함에 대한 탐상신호이다. 해석결과 축방향 Notch 결함의 경우 축방향 채널 결함신호가 크게 발생하였고, 원주방향 Notch 결함의 경우 원주방향 채널의 결함 신호가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 배열와전류프로브를 이용하여 결함 검사를 할 경우 결함의 방향성 역시 검출할 수 있다는 것을 수치해석 결과를 통하여 확인할 수 있었다.



(a) 축방향 Notch 결함 (b) 원주방향 Notch 결함
<그림 9> Notch 결함 제원



(a) 축방향 채널 결함신호 (b) 원주방향 채널 결함신호
<그림 10> 축방향 Notch 결함의 탐상신호



(a) 축방향 채널 결함신호 (b) 원주방향 채널 결함신호
<그림 11> 원주방향 Notch 결함의 탐상신호

3. 결 론

본 논문에서는 원전 SG세관의 결함신호의 특성을 확인하기 위하여 배열와전류프로브의 와전류탐상 유한요소 해석을 수행하여 탐상신호를 획득하고 분석하였다. 해석 대상으로는 원전 SG세관으로 널리 사용되는 Inconel 600 도체관을 사용하였다. 해석 모델인 FBH 결함에 대하여 결함의 깊이, 크기 및 시험주파수를 변화시키며 해석한 결과 결함의 깊이가 증가할수록, 시험주파수가 증가할수록, 결함의 크기가 증가할수록 신호의 크기가 증가하였다. 또한 배열와전류프로브의 결함에 대한 방향성을 살펴보기 위하여 축방향 및 원주방향 Notch결함에 대한 신호를 분석하였다. 본 논문에서 연구된 결과는 앞으로 원전 SG세관 검사시 도입될 것으로 예상되는 배열와전류프로브의 ECT 신호 평가에 도움이 될 것으로 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] Hyang-beom Lee, "Eddy Current Signal Analysis for Transmit Receive Pancake Coil on ECT Array Probe", Journal of The Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 26, No. 1, pp.25-29, February,(2006)
 [3] Obrutsky, L.S., Cecco, V.S., Sullivan, S.P., Humphrey, D., "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)
 [4] Sullivan, S.P., Cecco, V.S., Obrutsky, L.S., Humphrey, D., Smith, S.P. and Emde, K.A., "Computer Modeling of Eddy Current Transmit-Receive Probes for Tube Inspection" Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 17, pp. 283-289. Ed., D.O. Thompson and D.E. Chimenti, Plenum Press, New York, (1998)