

원전설비검사를 위한 배열와전류프로브 특성해석

(Characteristic Analysis of the ECT Array Probe for Inspection of NPP)

임건규 · 이향범 · 김지호

(Geon-Gyu Lim · Hyang-Beom Lee · Ji-Ho Kim)

송실대학교

요 약

본 논문에서는 원자력 발전소의 SG세관 검사를 위한 배열와전류프로브의 와전류탐상 특성을 해석하였다. 신호해석을 위해 원자력발전소 SG 세관의 내부 및 외부결함을 모델링하였으며, 결함의 깊이는 세관 두께의 40[%]로 하였다. 해석방법은 3차원 유한요소법을 이용하여 전자기 수치 해석을 수행하였다. 두 종류 결함의 수치해석 비교 결과 내부결함의 신호가 외부결함 신호에 비해 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 또한 획득한 신호를 ASME 표준 시험편을 이용한 배열와전류 프로브의 와전류탐상 실험신호와 비교하였다. 본 논문의 결과는 원전설비검사를 위한 배열와전류프로브 신호의 특성해석에 도움이 될 것으로 사료된다.

1. 서 론

고도의 산업화와 경제 성장에 따라 각종 설비와 구조물에 대한 높은 안전성과 신뢰도가 요구되면서 진단과 수명을 파악하는 여러 가지 기술이 개발되었다. 원자력 발전소(Nuclear Power Plant : NPP)는 2008년 2월 현재 우리나라 발전설비의 25.9[%]를 부담하고 있고 현재도 6기가 건설 중에 있다[1]. NPP 증기발생기(Steam Generator : SG)세관은 원자로에서 발생된 열을 증기로 바꾸어주는 열 교환 장치로서 원자로와 증기터빈 사이에서 열전달뿐 아니라 1차 계통과 2차 계통을 분리하여 방사능을 차단하는 역할을 하는 중요한 부분이다. SG 세관의 검사는 비파괴검사(Non-Destructive Testing : NDT)의 한 종류인 와전류 탐상(Eddy Current Test : ECT)을 주로 사용한다. ECT는 도전성 물체를 파괴하지 않고 센서코일의 임피던스 변화 및 유기기전력의 변화를 관찰하여 피검사체의 결함이나 물질특성의 변화를 탐지해 내는 검사방법이다. NPP SG 세관의 결함 검출을 위해 사용되는 프로브의 종류는 보빈프로브(Bobbin Probe)와 RPC(Rotating Pancake Coil)프로브, 배열와전류프로브(ECT Array Probe)가 있는데, 그 중 배열와전류 프로브는 Bobbin코일 및 여러 개의 Pancake 코일로 구성되어 있다. 배열와전류프로브의 코일은 Transmit 코일과, 축방향 Receive 코일, 원주방향 Receive 코일로 나뉜다. Transmit 코일은 자장을 발생 시키는 역할을 하고, Receive 코일은 Transmit 코일에 의해서 발생한 자장을 검출하여 결함신호를 검출하는 역할을 하게 된다. 배열와전류프로브는 검사 속도가 빠르고 정밀검사를 수행

할 수 있으며, 한정된 지역이 아닌 전 영역을 검사하는 것이 가능하다[2]. 본 논문에서는 전자기 유한요소 해석을 통하여 배열와전류프로브의 T/R 코일을 해석 하였으며, 실제 배열와전류프로브의 ASME (American Society of Mechanical Engineers) 표준시험편 검사신호와도 비교해 보았다[3]. 결함의 깊이는 세관의 두께에 40[%]로 관 내부결함과, 외부결함에 대해 해석을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 배열와전류프로브

배열와전류프로브는 그림 1과 같이 앞부분이 Bobbin 코일, 뒷부분이 Array 코일로 이루어져 있고 Array 코일은 Transmit 와 Receive 코일이 여러 개 배열된 형태로 구성되어 있다. 배열와전류프로브는 각 코일들이 축 방향과 원주 방향으로 배열되어 있어 축 방향 또는 원주 방향 모두에 민감하게 반응하며, 방향성이 없는 결함 즉, 여러 방향으로 복잡하게 형성된 크랙성 결함도 식별이 가능하다.

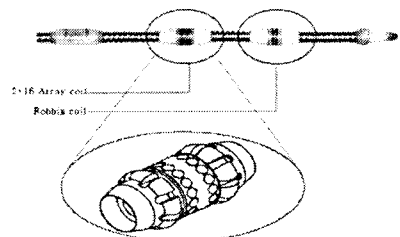


그림 1. 배열와전류프로브
Fig. 1. ECT Array Probe

배열와전류프로브를 이용한 ECT 방법은 18~39 [in/sec]의 빠른 속도로 축 방향 및 원주 방향의 결함을 검출할 수 있기 때문에 한정된 시간 내에 검사를 해야 하는 원전 SG 세관 검사에 적합하다.

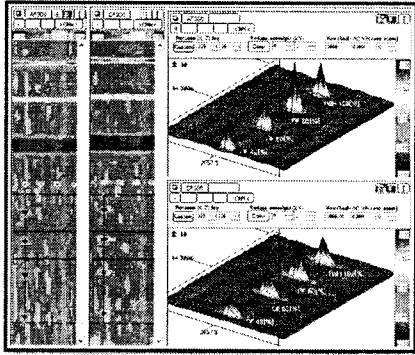


그림 2. 배열와전류프로브를 이용한 신호
Fig. 2. Signal from ECT Array Probe

그림 2 는 실제 배열와전류프로브를 이용하여 획득한 ASME 표준시험편에 대한 ECT 결과이다. 원주방향 Receive 코일과 축 방향 Receive 코일의 탐상신호가 C-Scan으로 분리되어 나타나 있다[4].

2.2 모델 해석

2.2.1 해석 방법

본 논문에서는 3차원 전자기 유한요소 수치해석프로그램인 OPERA 3D를 이용하여 배열와전류프로브의 T/R 코일을 시뮬레이션 하였다[5]. 피검사체의 재질은 NPP SG 세관으로 널리 사용되는 Inconel 600으로 하였다. Inconel 600의 도전율은 $9.7087e5[S/m]$ 이다. 모델 해석시 시험주파수는 250[kHz]이며, 이때 시험주파수에 대한 침투깊이를 계산하면 1.022[mm] 이다.

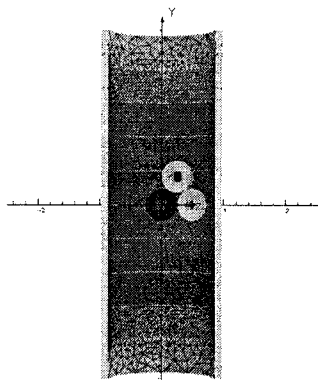
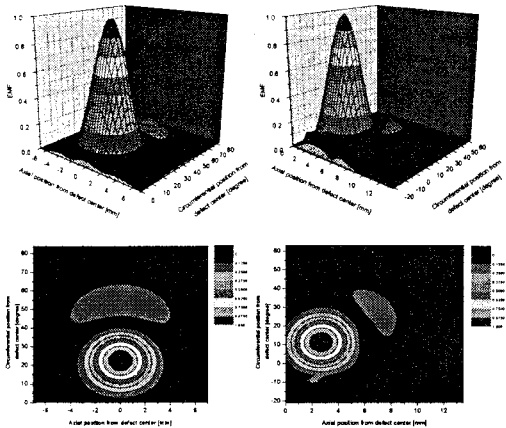


그림 3. 해석모델의 요소망
Fig. 3. Mesh of Analysis Model

해석시 요소망은 사면체 요소망을 사용하였으며, 요소망은 그림 3과 같다. 요소망을 구성하는 절점의 수는 835,197개이며 사면체 요소수는 1,226,569개이다.

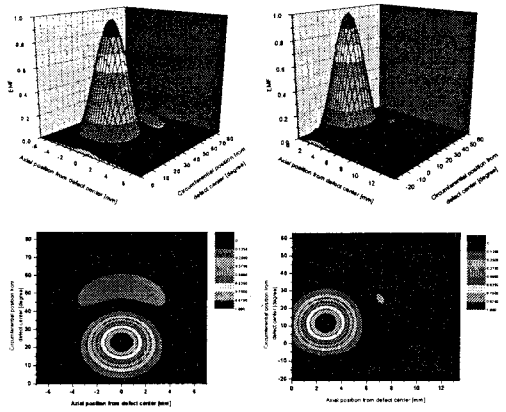
2.2.2 해석 결과

모델 해석시 결함의 깊이는 관두께의 40[%] 결합으로 외부결함(Outer Diameter Defect: ODD)과 내부결함(Inner Diameter Defect: IDD)을 해석하였다. 그림 4는 ODD의 해석결과이며, 그림 5는 IDD의 해석 결과이다.



(a) 원주방향 Receive 코일 (a) Circumferential Receive coil
(a) 축방향 Receive 코일 (a) Axial Receive coil

그림 4. 40[%] ODD 신호
Fig. 4. Signal of 40[%] ODD



(a) 원주방향 Receive 코일 (a) Circumferential Receive coil
(a) 축방향 Receive 코일 (a) Axial Receive coil

그림 5. 40[%] IDD 신호
Fig. 5. Signal of 40[%] IDD

위의 그림은 결함 신호를 3차원 C-Scan으로 나타낸 것이며 아래 그림은 2차원 C-Scan으로 나타낸 것이다. 해석결과 결함부분에서 신호의 크기가 증가하여

결합의 위치를 확인할 수 있었다. 그림 6은 ODD와 IDD의 신호크기를 나타낸 것으로 결합신호는 내부결합 신호를 기준으로 정규화 하여 나타내었다.

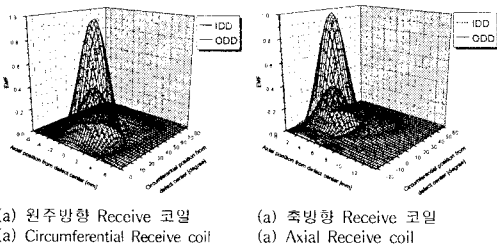


그림 6. 외부결합 및 내부결합 신호비교
Fig. 6. Compare ODD with IDD Signal

비교결과 IDD가 ODD에 비해 약 3~4배 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 위의 그래프를 통해서도 확인할 수 있다.

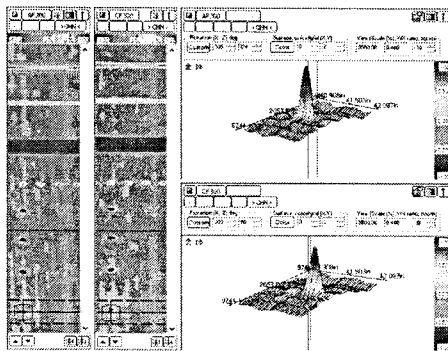


그림 7. 배열와전류프로브를 이용한 40% ODD 신호
Fig. 7. Signal of 40% ODD from ECT Array Probe

그림 7은 실제 배열와전류프로브를 이용해 측정된 ASME 표준 시험편의 40% ODD 신호이다. 그림 4의 신호와 비교해 보면 비슷한 형상의 C-Scan 이미지를 확인할 수 있다.

3. 결론

NPP SG 세관의 경우 ECT 방법이 효과적인 검사 방법이며, 주로 사용되고 있다. 현재 NPP SG 세관 검사의 경우 NPP 1기당 10,000개에서 16,000개 정도의 SG 세관이 있는데, 정해진 기간 동안 모든 세관의 검사를 위해서는 고속검사가 필요하다. 이에 본 논문에서는 3차원 전자기해석프로그램을 이용하여 고속 및 정밀검사가 가능한 배열와전류프로브의 T/R 코일을 해석해 실제 탐상결과와 비교분석해 보았다. 외부결합

과 내부결합 비교분석결과 내부결합 신호의 크기가 외부결합에 비해 크게 발생하였다. 또한 실제 ASME 표준시험편을 이용한 배열와전류프로브의 탐상신호와 비교분석결과 실제 탐상신호와 유사한 탐상신호를 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과는 앞으로 NPP의 중요 설비인 SG 세관 검사시 도입이 필요할 것으로 예상되는 배열와전류프로브의 특성해석에 도움이 될 것으로 사료된다.

감사의 글
본 연구는 산업자원부 지원에 의하여 주관기관 기초전력 연구원 과제번호 R-2005-7-073 연구비 지원으로 이루어졌음.

References

- (1) "진력통계속보", 한국진력공사, 2008-0459-정0001, 제 352호, pp.15-19, 2008.
- (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) "Non Destructive Examination", ASME CODE, Section. V.
- (4) "배열와전류프로브를 이용한 원전 SG 세관신호의 진단기술개발", 기초전력연구원, R-2005-7-073, 2차년도 중간보고서, 2007.
- (5) <http://www.vectorfields.com>