

T/R코일프로브를 이용한 원전 SG세관 검사의 와전류탐상 신호해석

(Signal Analysis of Eddy Current Test Using T/R Coil Probe for Inspection of Steam Generator Tube in NPP)

임건규* · 이향범**

(Geon-Gyu Lim · Hyang-Beom Lee)

요 약

본 논문에서는 전자기 유한요소 해석을 통하여 배열와전류프로브의 T/R 코일의 와전류탐상 특성을 해석하였다. 신호해석을 위해 사용된 결함은 Notch 결함이며, 결함의 깊이는 관두께를 기준으로 40[%]로 하였으며, 결함의 위치는 관의 내부 및 외부에 있는 것으로 하였다. Transmit 코일을 중심으로 Receive 코일의 위치를 원주방향으로 0[°], 30[°], 60[°], 90[°]에 위치시키면서 신호해석을 수행하였다. 프로브의 전자기적 특성을 해석하기 위하여 맥스웰 방정식을 이용하여 지배방정식을 유도하였고, 이를 3차원 유한요소법을 이용하여 수치 해석을 수행하였다. 두 종류 결함의 수치해석 비교 결과 내부결함의 신호가 외부결함보다 크게 발생하였고, Transmit 코일에 대한 Receive 코일의 각도 및 위치 변화시 결함신호의 차이를 확인할 수 있었다. ASME 표준 시험편을 이용한 배열와전류 프로브의 와전류탐상 실험신호와 비교결과 유사한 신호를 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과는 배열와전류 프로브의 와전류탐상 신호 평가시 도움이 될 것이다.

Abstract

In this paper the signal analysis of eddy current test using transmit-receive(T/R) pancake coil of ECT array probe using electromagnetic finite element method(FEM) is performed. For characteristics analysis, the notch defect is used. The depth of defect is 40[%] of steam generator tube thickness, and inside defect and outside defect are used as simulation examples. The signal analysis is performed according to the variation of receive coil position. The receive coil is positioned 0[°], 30[°], 60[°], 90[°] of circumferential position of transmit coil. To obtain the electromagnetic characteristics of probes, the governing equation is derived from Maxwell's equations, and the problem is solved using the 3-dimensional finite element method. The signal magnitude of inside defect is bigger than that of outside defect, and the signal difference can be seen according to the variation of position of receive coil. The experimental signal and numerical signal of ASME standard tube show similar results. The results in this paper can be helpful when the ECT signals from ECT array probe are evaluated and analyzed.

Key Words : ECT array probe, Eddy current test, FEM, T/R coil, Steam generator tube

* 주저자 : 숭실대학교 전기공학과 석사과정

** 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수

Tel : 02-817-9228, Fax : 02-817-7961, E-mail : fortune79@ssu.ac.kr

접수일자 : 2008년 2월 19일, 1차심사 : 2008년 2월 21일, 2차심사 : 2008년 3월 11일, 심사완료 : 2008년 3월 14일

1. 서 론

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 세관은 정기적으로 점검을 수행하게 되는데 이때 비파괴검사(Non-Destructive Testing : NDT)의 한 종류인 와전류탐상(Eddy Current Test : ECT)을 이용하여 점검을 수행한다. ECT 방법은 도전성 물체를 파괴하지 않고 센서코일의 임피던스 변화 및 유도기전력의 변화를 관찰하여 피검사체의 결함이나 물질특성의 변화를 탐지해 내는 검사방법이다. 현재 원전 SG 세관의 결함 검출을 위해 보빈프로브(Bobbin Probe)와 RPC(Rotating Pancake Coil)프로브를 사용한 ECT 방법이 널리 이용되고 있다. 보빈프로브는 검사 속도가 40[in/sec]로 빠르고 세관 전 영역에 대한 검사가 가능하지만 결함의 검출이 축 방향 결함 검출에 한정되어 원주 방향 결함검출이 곤란하다는 단점이 있다. RPC 프로브는 축 방향 및 원주 방향의 결함 검출 성능이 우수하지만 검사 속도가 0.2~0.8 [in/sec]로 매우 느려 정해진 기간 내에 SG 세관을 검사하기가 힘들어 결함 의심부위에 대해서만 검사를 수행하고 있다. 이에 검사성능 및 검사시간의 단축을 위해 배열와전류프로브(ECT Array Probe)가 개발되었다. 배열와전류 프로브는 여러 개의 Pancake 코일로 구성되어 있다. 배열와전류프로브의 코일은 Transmit 코일과, Receive 코일로 나뉜다. Transmit 코일은 자장을 발생시켜 피 검사 체에 와전류를 유기시키는 역할을 하고, Receive 코일은 Transmit 코일에 의해서 발생한 자장을 검출하여 결함신호를 받아들이는 역할을 하게 된다. 배열와전류프로브는 보빈프로브와 RPC 프로브와는 다르게 검사 속도가 빠르고 정밀검사를 수행할 수 있으며, 한정된 지역이 아닌 전 영역을 검사하는 것이 가능하다[1]. 본 논문에서는 전자기 유한요소 해석을 통하여 배열와전류프로브의 T/R 코일을 해석 및 실제 배열와전류프로브의 ASME(American Society of Mechanical Engineers) 표준시험편 검사신호와 비

교해 보았다. 해석 시에 결함의 형상은 Notch 결함을 해석하였으며, 결함의 깊이는 세관의 두께에 40[%]로 관 내부결함과, 외부결함에 대해 Receive 코일의 각도를 변화하면서 해석을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 배열와전류프로브

배열와전류프로브는 Transmit 와 Receive 코일이 여러 개 배열된 형태로 구성되어 있다. 그림 1에서는 앞부분이 Bobbin 코일, 뒷부분이 Array 코일로 이루어진 배열와전류프로브를 볼 수 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 크랙형 결함도 식별이 가능하다.

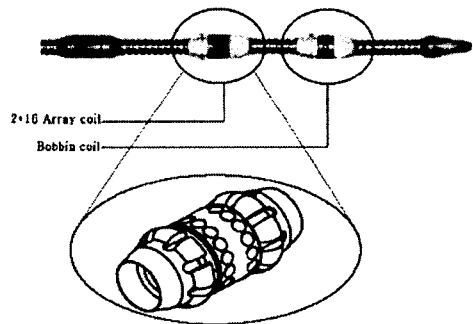


그림 1. 배열와전류프로브
Fig. 1. ECT Array Probe

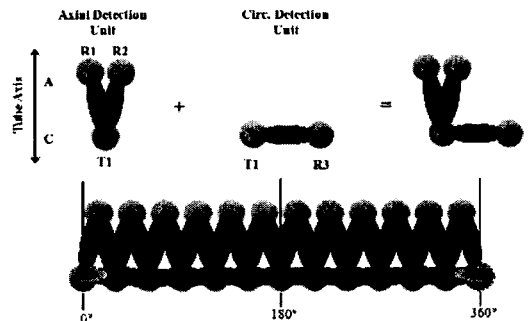


그림 2. 배열와전류프로브의 원리
Fig. 2. Principle of ECT Array Probe

배열와전류프로브의 원리는 그림 2에 나타나 있다. Transmit 코일 T1은 시변자계를 발생시키고, Receive 코일 R1, R2, R3는 결합 신호를 받아들이는 역할을 하게 된다.

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 3은 실제 배열와전류프로브를 이용하여 ASME 표준시험편에 대한 ECT 결과이다[2]. 원주방향 Receive 코일과 축 방향 Receive 코일의 탐상신호가 C-Scan으로 분리되어 나타나 있다[3].

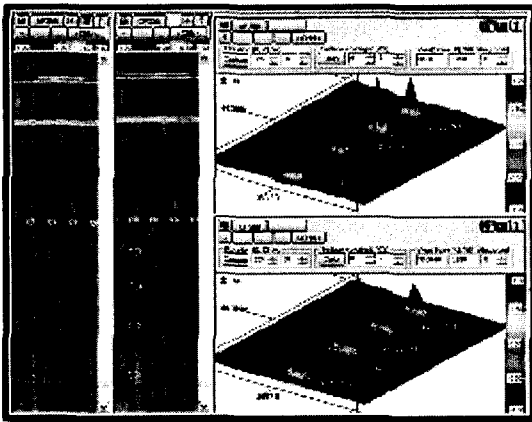


그림 3. 배열와전류프로브를 이용한 신호
Fig. 3. Signal from ECT Array Probe

2.2 맥스웰 방정식

와전류 문제를 해석하기 위해 맥스웰 방정식중 관련 수식을 정리하면 아래와 같다[4].

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

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (2)$$

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

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5)$$

여기서 \vec{H} , \vec{B} , \vec{E} 는 각각 자계의 세기, 자속밀도, 전기장의 세기이며, \vec{J}_s , \vec{J}_e 는 각각 전원전류밀도, 와전류밀도이다. 또한 μ , σ 는 각각 자기투자율, 전기전도율이다.

2.3 각 영역별 유한요소해석

와전류 문제 분야에서 3차원 모델링의 경우 도체내부에서 자기벡터포텐셜(Magnetic Vector Potential : MVP)의 X, Y, Z 세방향 성분 및 전기스칼라포텐셜(Electric Scalar Potential : ESP)을 미지수로 잡아야 하기 때문에 자유도(Degree of Freedom)가 4가 된다. 이 경우 암페르 법칙(Ampere's Law)에서 유도되는 지배방정식만으로는 식이 부족하기 때문에 전류연속조건을 추가하여 해석하게 된다. 공간의 요소분할에 따른 요소수 증가로 자유도 역시 증가하여 계산량이 아주 많아진다. 따라서 문제 해석시 미지수를 줄이기 위하여 와전류가 흐르는 도체를 제외한 영역에서는 자유도가 1인 자기스칼라포텐셜(Magnetic Scalar Potential : MSP)을 적용하여 모델을 해석하였다[5].

문제를 해석하기 위해서 영역을 3부분으로 분할하였다. 첫 번째 영역은 도체가 존재하여 와전류(\vec{J}_e)가 유기되는 영역으로 변수는 MVP \vec{A} 와 ESP V 를 사용하였다. MVP \vec{A} 와 ESP V 는 식 (6), 식 (7)로 표현할 수 있다.

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

$$\vec{E} = -j\omega \vec{A} - \nabla V \quad (7)$$

관련 수식을 정리하면 첫 번째 영역에서 지배방정식은 식 (8) 및 식 (9)와 같다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + \sigma(j\omega \vec{A} + \nabla V) = \vec{J}_s \quad (8)$$

$$-\nabla \cdot \sigma(j\omega \vec{A} + \nabla V) = 0 \quad (9)$$

두 번째 영역은 외부에 전류원 즉 전원전류(\vec{J}_s)가 존재하는 영역으로 변수는 리두스드자기스칼라

포텐셜(Reduced Magnetic Scalar Potential : RMSP) ϕ 를 사용하여 지배방정식을 유도할 수 있다. 식 (1)로부터 자계의 세기 \vec{H} 는 아래와 같이 정의된다.

$$\vec{H} = \vec{H}_s + \vec{H}_m \quad (10)$$

$$\nabla \times \vec{H}_s = \vec{J}_s \quad (11)$$

$$\nabla \times \vec{H}_m = 0 \quad (12)$$

여기서 \vec{H}_s 는 공급되는 전류에 의한 자장의 세기로서 그 값은 비오사바르 법칙(Biot-Savart's Law)에 의하여 계산한다. 또한 \vec{H}_m 은 자화에 의한 자계의 세기로 식 (13)과 같이 정의 할 수 있다.

$$\vec{H}_m = -\nabla \phi \quad (13)$$

관련 수식을 정리하면 두 번째 영역에서 지배방정식은 식 (14)와 같다.

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

세 번째 영역은 전원전류(\vec{J}_s)가 존재하지 않는 영역으로 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \quad (15)$$

식 (15)로부터 토탈자기스칼라포텐셜(Total Magnetic Scalar Potential : TMSP) ψ 은 식 (16)과 같이 정의된다.

$$\vec{H} = -\nabla \psi \quad (16)$$

관련 수식을 유도하면 영역 3에서 지배방정식은 식 (17)과 같다.

$$\nabla \cdot \mu \nabla \psi = 0 \quad (17)$$

매질 경계조건은 세 영역이 모두 독립적이지 않고, 서로의 경계를 공유하면서 연결되어 있으므로 식

(18) 및 식 (19)로 표현 할 수 있다.

$$\vec{B}_1 \cdot \vec{n}_1 + \vec{B}_2 \cdot \vec{n}_2 = 0 \quad (18)$$

$$\vec{H}_1 \times \vec{n}_1 + \vec{H}_2 \times \vec{n}_2 = 0 \quad (19)$$

2.4 모델 해석

2.4.1 모델 제한

본 논문에서는 3차원 전자기 유한요소 수치해석프로그램인 OPERA 3D를 이용하여 T/R 프로브를 시뮬레이션 하였다[6]. 그림 4에서 보이는 것과 같이 1개의 Transmit 코일과, Receive 코일의 각도를 변화시키고, 원주방향 및 축 방향으로 이동시키면서 해석을 수행하였다. 피검사체의 재질은 원자력발전소 SG 세관으로 널리 사용되는 Inconel 600으로 하였다 [7]. 해석 모델의 제한은 표 1과 같다. 시험주파수는 250[kHz]이며 재질의 도전율은 9.7087e5[S/m]이다. 이때 시험주파수에 대한 침투깊이는 1.022[mm]이다.

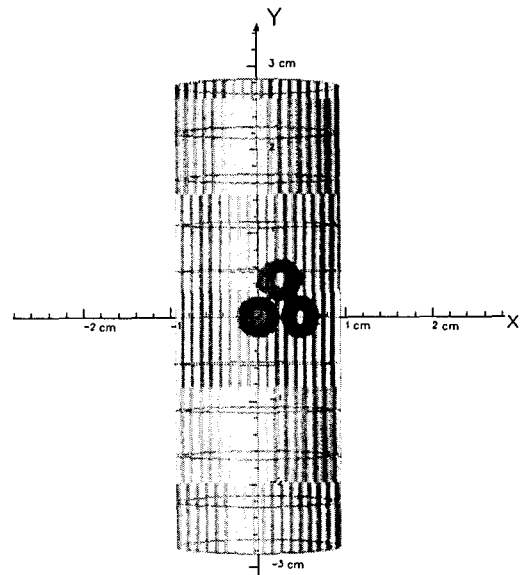


그림 4. 해석모델
Fig. 4. Analysis Model

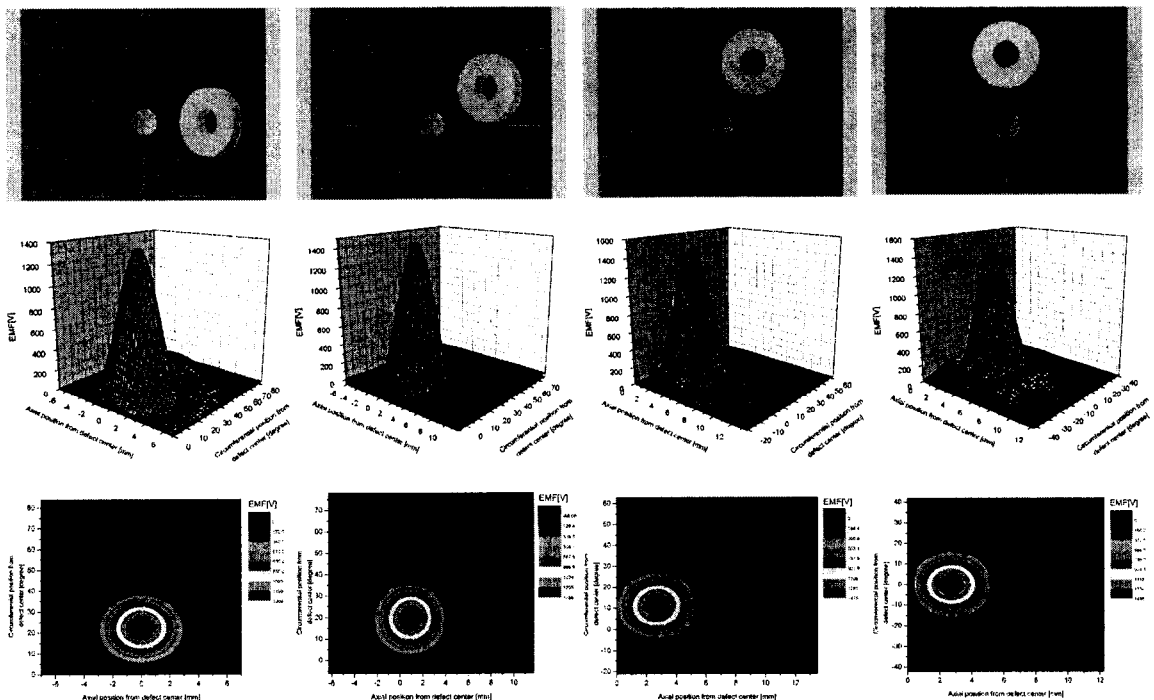
표 1. 해석모델 제원
Table 1. Specification of Analysis Model

관 및 결함		
재 질	관 크기 (내경, 외경, 두께)	결함 크기 (폭, 높이, 깊이)
Inconel 600	8.46*9.53*1.07[mm]	3.0*3.0*0.42672[mm]
코 일		
시험주파수	크 기 (내경, 외경, 높이)	
250[kHz]	2.0*3.0*1.0[mm]	

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

2.4.2 해석 결과

모델 해석시 결함의 종류는 ASME 표준 시험편과 비교를 위해 Notch 결함으로 하였으며 결함의 깊이는 관두께의 40[%] 결함으로 내부결함(Inner Diameter Defect)과 외부결함(Outer Diameter Defect)을 해석하였다. 이 상태에서 T/R 코일의 간격은 일정하게 유지하고, 코일을 원주방향과 축 방향으로 이동시키면서 해석을 수행하였으며 Receive 코일의 각도를 Transmit 코일 원주방향을 기준으로 0[°], 30[°], 60[°], 90[°]로 변화시켜 Receive 코일의 감도를 비교분석해 보았다. 해석결과는 그림 5, 그림 6과 같다. 그림 5에서 맨 위의 그림은 해석 시에 T/R 코일의 위치를 나타내었으며, 가운데 그림은 해석결과 신호를 3차원으로 나타내었다. 맨 아래 그림은 가운데 그림을 위에서 본 C-Scan 그림이다. 해석결과



(a) 0[°] Receive 코일 (a) 30[°] Receive 코일 (a) 60[°] Receive 코일 (a) 90[°] Receive 코일
(a) 0[°] Receive coil (a) 30[°] Receive coil (a) 60[°] Receive coil (a) 90[°] Receive coil

그림 5. 40[%] 외부결함 신호
Fig. 5. Signal of 40[%] Outer Diameter Defect

T/R코일프로브를 이용한 원전 SG세관 검사의 와전류탐상 신호해석

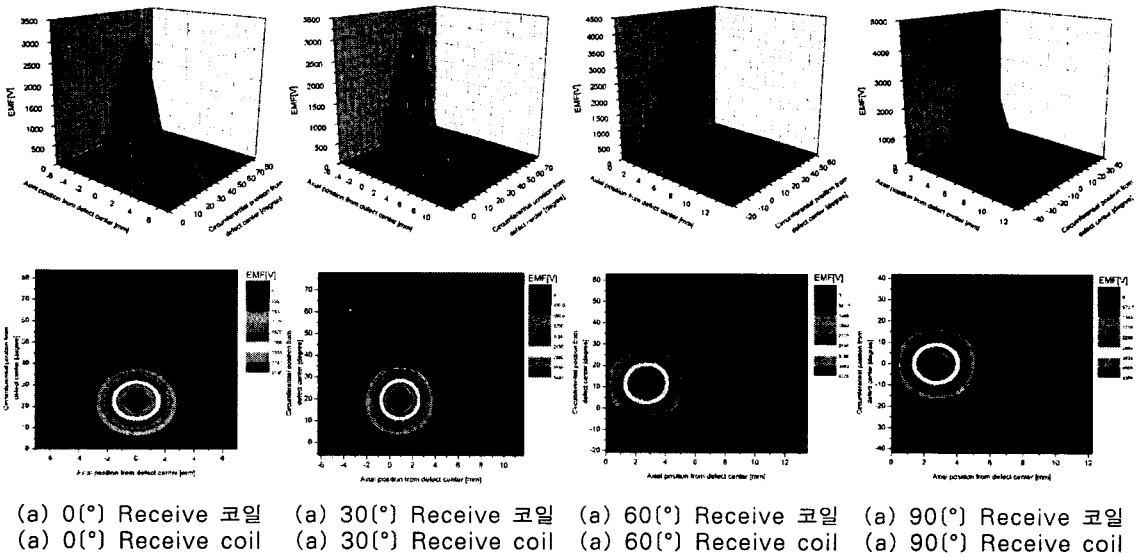


그림 6. 40[%] 내부결함 신호
Fig. 6. Signal of 40[%] Inner Diameter Defect

결함부분에서 신호의 크기가 증가하였으며 Receive 코일의 각도 변화시 결함 신호의 크기가 조금씩 변화하였다. 결함 위치는 Transmit 코일과 Receive 코일의 각도 차이만큼 결함신호가 실제 결함의 위치와 차이가 발생하였다. 결과신호는 데이터 처리 과정에서 보정을 통하여 실제 결함의 위치를 파악할 수 있다. 내부 결함과 외부결함의 신호를 비교해보면 내부 결함의 경우 외부결함보다 센서 코일측 표면의 와전류 변화폭이 커지게 되고 탐상 코일에 대한 영향도 커지게 된다. 이러한 이유로 내부결함시 Receive코일의 총 쇄교 자속이 증가해 탐상신호가 증가하게 된다. 두 결과를 비교해 보면 신호의 크기는 Receive 코일의 각도에 따라 2.2~3배 정도 내부결함이 외부결함보다 크게 발생되었다. 그림 3의 ASME 표준 시험편을 이용한 배열와전류프로브 신호와 비교결과 비슷한 형상의 C-Scan 이미지를 확인할 수 있었다. 실제 배열와전류프로브 신호와 차이는 전자기 유한요소 해석시 배열와전류프로브의 한정된 T/R 코일만 해석 후 실제 탐상신호와 비교해서 발생하는 오차로 예상된다.

3. 결 론

원자력발전소 SG 세관의 경우 ECT 방법이 효과적인 검사방법이며, 주로 사용되고 있다. 현재 원자력발전소의 SG 세관 검사의 경우 보빈프로브와 RPC 프로브를 주로 사용하고 있다. 하지만 원자력발전소 1기당 10,000개에서 16,000개 정도의 세관을 정해진 기간 동안 정밀검사를 통해 결함을 판별하기에는 미약하다. 하지만 배열와전류프로브를 이용하면 고속검사와 정밀검사가 가능하다. 이에 본 논문에서는 3차원 전자기해석프로그램을 이용하여 배열와전류프로브의 T/R 코일을 해석해 실제 탐상결과와 비교분석해 보았다. 외부결함과 내부결함 비교분석결과 내부결함의 결함신호의 크기가 증가하였으며 Receive 코일의 각도를 변화시켜 감도 비교시 각도에 따라서 결함신호의 차이를 확인할 수 있었으나 그 값의 차이가 미미해 Receive 코일의 각도 변화시 결함신호에 큰 영향은 없을 것으로 생각된다. 또한 실제 ASME 표준시험편을 이용한 배열와전류프로브의 탐상신호와 비교분석결과 실제 탐상신호와 유사한 탐상신호를 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과

는 앞으로 원자력발전소 SG 세관 검사시 도입이 필요할 것으로 예상되는 배열와전류프로브의 ECT 신호 평가에 도움이 될 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

References

- [1] 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.
- [2] "Non-Destructive Examination", ASME CODE, Section. V.
- [3] "배열와전류프로브를 이용한 원전 SG 세관신호의 진단 기술개발", 기초전력연구원, R-2005-7-073, 2차년도 중간보고서, 2007.
- [4] O. Biro and K. Preis, "Finite Element Alalysis of 3-D Eddy Currents", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 26, No. 2, pp.418-423, 1990.
- [5] 이항범, "3차원 와전류 문제의 유한요소해석에서 쿨롱계 이치조건과 전류연속조건의 영향", 대한전기학회논문지, 54B (10), pp.483-491, 2005.
- [6] <http://www.vectorfields.com>
- [7] "Covers Inconel 600 (tm) Super Alloy in Pipe and Tube", ASTM CODE, ASTM B163, No. 1105.

◇ **저자소개** ◇

임건규 (林建圭)

1979년 5월 26일생. 2007년 숭실대학교 전기공학부 졸업. 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 재학(석사과정).

이항범 (李亨範)

1967년 10월 21일생. 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 기초전력공학공동연구소 선임연구원. 현재 숭실대학교 전기공학부 교수.