

전자기 수치해석을 이용한 표준보정시험편의 배열형 와전류 탐촉자 신호 특성 해석

Characteristic Analysis of Eddy Current Array Probe Signal in Combo Calibration Standard Tube Using Electromagnetic Numerical Analysis

김지호*, 이향범*†

Ji-Ho Kim* and Hyang-Beom Lee*†

초 록 본 논문은 원전 증기발생기(SG, steam generator) 세관의 정밀 진단을 위한 차세대 탐촉자인 배열형 와전류 탐촉자의 특성 해석에 대한 3차원 전자기 수치해석을 수행하였다. 다양한 결함 해석을 위해 ASME(American Society of Mechanical Engineers) 표준시험편과 X-probe combo 표준보정시험편 (inline EXP/spiral groove combo standard)을 선정하여 탐상신호를 획득하고, 실제 실험 신호와 비교하여 결과의 타당성을 검증하였다. 표준 보정 시험편의 해석 결과를 바탕으로 원전 SG 세관에서 주로 발생하고 있는 pitting, SCC(stress corrosion cracking), multiple SCC, wear 결함에 대하여 탐상신호를 획득하였다. 해석 대상으로는 원자력발전소 SG 세관으로 사용하고 있는 Inconel 600 도체관을 사용하였고, 이때의 시험주파수는 300 kHz이다. 본 논문을 통하여 각각의 결함에 대한 신호 특성을 파악하여 배열형 와전류 탐촉자의 결함의 종류에 따른 신호 특성을 확인할 수 있었다. 본 논문의 결과는 배열형 와전류 탐촉자의 와전류 탐상 신호 평가시 도움이 될 것이다.

주요용어: 와전류탐상시험, 원전 SG 세관, 결함, 배열형 와전류 탐촉자, 유한요소법, 표준보정시험편

Abstract In this paper, 3-dimensional electromagnetic numerical analysis is performed about the eddy current(EC) array probe characteristic which is the next generation probe for accurate diagnosis of steam generator(SG) in nuclear power plants(NPPs). ASME(American Society of Mechanical Engineers) Standard and X-probe combo calibration standard tube are selected for acquisition of eddy current testing(ECT) signals and this result of compared with the real test signals for reasonability of result. Based on the analysis result of calibration standard tube, ECT signals that are about the defects of pitting, stress corrosion cracking(SCC), multiple SCC and wear is obtained. Material of specimen was Inconel 600 which is usually used for SG tubes in NPPs. The operation frequency of 300 kHz were used. The signal characteristics could be observed according to the various defects. The results in this paper can be helpful when the ECT signals from EC array probe are evaluated and analyzed.

Keywords: Eddy Current Testing(ECT), Steam Generator(SG) Tube, EC Array Probe, Finite Element Method, Calibration Standard Tube

1. 서 론

원자력발전소의 증기발생기(steam generator; SG)

세관의 건전성 유지는 원전 압력기기를 안정적이고 경제적으로 사용할 수 있도록 하는 가장 중요한 사항이다. 이 중에서 SG 세관에 발생한 결함의 검사

와 평가는 원전 수명에 관련하여 매우 중요하며, 이를 위해 원전 SG 세관에서는 보빈 탐촉자(bobbin probe)와 rotating pancake coil(RPC) 탐촉자를 사용한 와전류 탐상 검사가 가장 널리 쓰이고 있다. 하지만 정해진 기간 내에 정확한 검사 성능과 검사시간의 단축을 위해 배열형 와전류 탐촉자가 개발되었다.

배열형 와전류 탐촉자(EC array probe)는 여러 개의 pancake 코일로 구성되어 있다. 배열형 와전류 탐촉자의 pancake 코일은 송신코일(transmit coil)과 수신코일(receive coil)로 나뉜다. 송신코일은 자장을 발생시켜 피 검사체에 와전류를 유기기키는 역할을 하고, 수신코일은 결함에 의해서 발생한 자장을 검출하여 결함신호를 받아들인다. 배열형 와전류 탐촉자는 보빈 탐촉자의 장점인 빠른 검사속도와 RPC 탐촉자의 장점인 정밀검사를 한번에 수행할 수 있으며, 한정된 지역이 아닌 전 영역을 검사하는 것이 가능하다[1,8].

본 논문은 원전 SG 세관의 정밀 진단을 위한 차세대 탐촉자인 배열형 와전류 탐촉자의 3차원 유한요소 해석이론을 바탕으로 원자력 발전소 SG 세관의 결함 검출을 위한 와전류탐상 전자기 수치해석을 수행하여 탐상신호를 획득하고 신호를 분석하였다. 전자기 수치해석 기법을 이용한 상용 프로그램인 OPERA-3D를 이용하였고 해석 대상으로는 원자력 발전소 SG 세관으로 널리 사용되는 Inconel 600 도체관을 사용하였다.

다양한 결함 해석을 위해 ASME(American Society of Mechanical Engineers) 표준시험편과 X-probe용 표준 보정 시험편(iInline EXP/spiral groove combo standard)을 선정하여 탐상신호를 획득하고, 실제 실험 신호와 비교하여 결과의 타당성을 검증하였다. 표준 보정 시험편의 해석 결과를 바탕으로 원전 SG 세관에서 주로 발생하고 있는 pitting, SCC(stress corrosion cracking), multiple SCC, wear 결함에 대하여 탐상신호를 획득하였다.

2. 배열형 와전류 탐촉자 및 표준보정시험편

2.1. 배열형 와전류 탐촉자의 구조 및 원리

본 논문에서는 여러 가지 배열형 와전류 탐촉자 종류 중에서 한국형 증기발생기 세관에 맞게 설계된 2×16 개의 코일이 원주방향으로 배치되어 있는

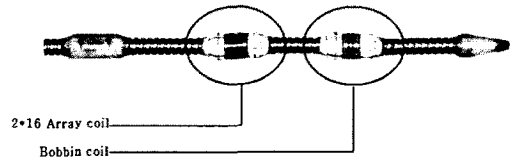


Fig. 1 Structure of ECT array probe

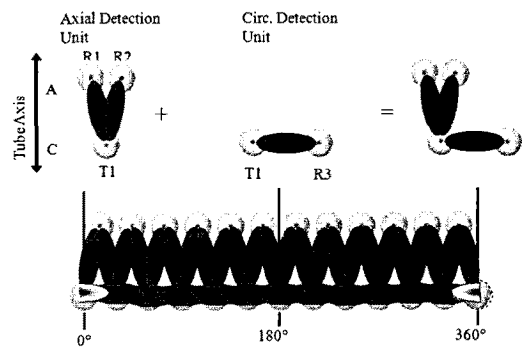


Fig. 2 Principle of ECT array probe

X-probe를 선택하였다. Fig. 1은 U-bend를 포함한 TS(Tubesheet), TTS(top of tubesheet)와 세관의 전 영역을 검사하는 X-probe(model XP/SBB-MR/M-610(.644)-216-(3/8T)110036)를 나타내고 있다. 이 프로브에는 모두 32개의 코일이 16개씩 2열로 배열되어 있다. 이 X-probe는 송신코일과 수신 코일들의 여러 가지 배열된 절대코일로 구성되어 있다[8].

Fig. 2와 같이 배열형 와전류 탐촉자의 코일들은 서로 신호를 보내고 받는 역할을 분담하게 되는데, T1의 송신코일은 여러 주파수를 주기적으로 발생시키고, R1, R2, R3의 수신코일은 코일에서 신호를 수신해서 모니터에 전압 값을 보여주게 된다. 특히 축방향 채널과 원주방향의 채널에서 동시에 검사를 수행하므로 축방향 결함, 원주방향 결함의 검출에 탁월하다[2].

2.2. 표준보정시험편

본 논문에서는 크게 두 종류의 표준시험편에 있는 결함에 대하여 해석하였다. 표준보정시험편의 특정 결함에 대한 신호의 위상각과 크기 값을 사용하여 전체 신호를 보정한다. 이렇게 획득된 와전류 신호가 보정되면 주위 배경에 대한 잡음 신호가 상당히 제거되고 결함신호는 더욱 뚜렷하게 보이기 때문에 신호 평가가 훨씬 수월해진다. 이처럼, 표준

보정시험편의 신호는 SG 세관의 신호평가에 중요한 영향을 미치기 때문에 표준보정시험편 신호의 정확성과 일관성은 신호평가를 하는데 있어 매우 중요하다. 해석한 결과는 실제 TC-7700 탐상 장비와 X-probe를 이용하여 측정된 실험 결과와 비교하였다.

2.2.1. ASME 표준시험편의 결함 종류

ASME 표준시험편은 ASME Section V, Article 8에 따라 만들어진 보정표준시험편이며, 인공결함 깊이는 20%, 40%, 60%, 80%, 100 관통결함을 포함하며, 결함은 평저공(flat bottomed drill hole)이고, 10% 외면 groove와 20% 내면 groove 및 dent를 포함하는 경우도 있다. ASME 표준시험편은 pitting 형태의 결함 평가에 유용하게 쓰인다. Fig. 3과 Table 1은 ASME 표준시험편에 있는 결함을 나타내었다.

2.2.2. X-probe용 표준보정시험편의 결함 종류

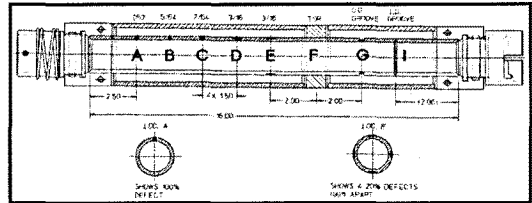
X-probe용 표준 보정시험편(inline EXP/spiral groove combo standard)은 재료의 물성이 비자성체인 Inconel 600 시험편과 강자성체 구조물(tube support ring, TSR)로 구성되어 있고 결함의 종류는 7 radial expansion(확관 부분의 천이영역) 가공, 30%의 외면 groove와 스크류 모형의 spiral notch로 구성되어 있다. Fig. 4는 X-probe용 표준보정시험편의 실제 모형과 결함의 위치를 나타내었다. Table 2는 X-probe용 표준보정시험편과 ASME 표준시험편의 물성과 시험편에 부착되어 있는 강자성체 구조물의 물성 값을 제시하고 있다.

3. 해석 모델

본 논문에서는 이미 검증된 3차원 유한요소해석 프로그램인 OPERA 3D를 이용하여 해석대상에 대한 수치해석을 수행하였다. 수치해석을 위해 사용된 도체관의 재질은 증기발생기 세관에 널리 사용되는 Inconel 600 도체관으로 하였다. 탐촉자는 Fig. 5와 같은 배열형 와전류 탐촉자를 사용하였으며, 해석대상인 도체관 및 프로브에 대한 제원은 Fig. 6과 같다.



(a) Actual model



(b) Detail drawings

Fig. 3 ASME calibration standard tube

Table 1 Deliberated flaws in the ASME calibration standard tube

Kind of Defects	TWH	FBH	FBH	FBH	FBH	TSR	OD	ID
	(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	Groove (G)	Groove (I)
% Depth	100%	80%	60%	40%	20%	TSR	10%	20%



(a) Actual model



(b) Detail Drawings

Fig. 4 A combo calibration standard tube for X-probe

Table 2 Material properties of the calibration tube

Material	Conductivity (S/m)	Rel. Permeability	Inner radius (mm)	Outer radius (mm)	Thickness (mm)	Length (mm)
Inconel Tube	9.7087E5	1	8.433	9.525	1.092	275.05
Support Ring	6.7E6	50	9.525	15.875	6.35	19.05

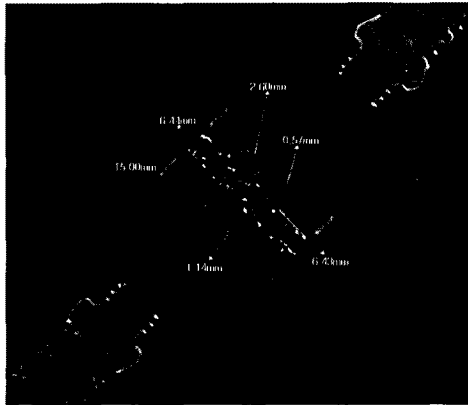
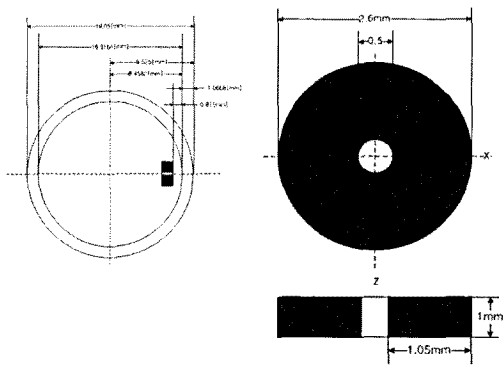


Fig. 5 Skiagram of X-probe



(a) Specification of tube (b) Specification of coil

Fig. 6 Specification of analysis model

3.1. ASME 표준시험편의 결함 신호 비교

Fig. 7은 유한요소해석을 위해 전자기 유한요소 해석 프로그램으로 모델링 후 요소분할을 한 그림이며, 이때 결함의 종류는 FBH, 결함의 크기는 4.8 mm, 결함의 깊이는 관의 외부 표면으로부터 40% 깊이일 때이다. 해석시 요소망은 사면체 요소망을 사용하였으며 요소망을 구성하는 절점의 수는 835,197개이며, 사면체 요소수는 1,226,569개이다. 결함의 깊이에 따른 신호 해석을 위해 사용된 결함은 ASME 표준시험편에 있는 결함이다. 시험주파수는 300 kHz를 사용하였다.

Fig. 8은 전자기 유한요소해석을 통해 얻은 결함 신호이며, Fig. 9는 실제 배열형 와전류 탐촉자를 이용하여 얻은 탐상신호이다. 두 가지 신호를 비교 결과 실제 탐상신호와 유한요소 해석 결함신호가 유사한 결과를 확인할 수 있었다[2].

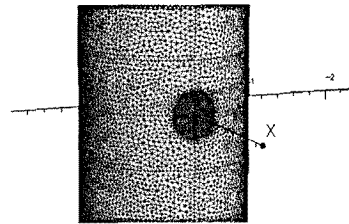


Fig. 7 Finite element mesh

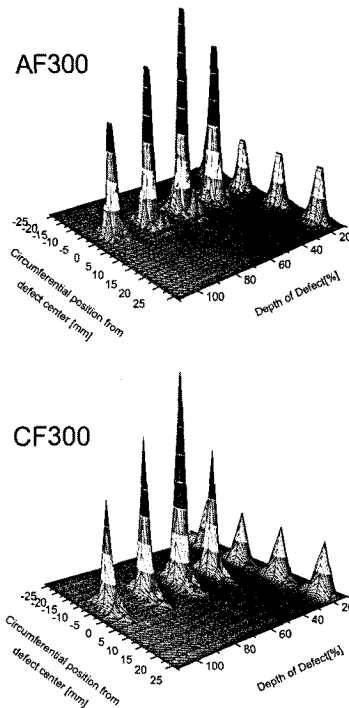


Fig. 8 Simulated ECT signals using FEM analysis of ASME standard tube

Fig. 8과 같이 결함신호는 축방향 채널과 원주방향 채널을 각각 나타내었으며 결함부위에서 신호의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 결함의 깊이가 관두께의 20% 결함의 경우 ASME 표준시험편에 90° 간격으로 결함이 4개가 존재하여 같은 크기의 결함신호가 4개가 발생되는 것을 확인할 수 있다. 또한 원주방향 채널의 경우 송신코일과 수신코일이 축방향으로 같은 높이에 있지만 축방향 채널의 경우 송신코일과 수신코일의 위치가 축방향으로 6.5 mm 위쪽에 위치하고 있어 결함신호 발생 위치가 원주방향 채널보다 빠르게 발생하는 것을 확인할 수 있다[2].

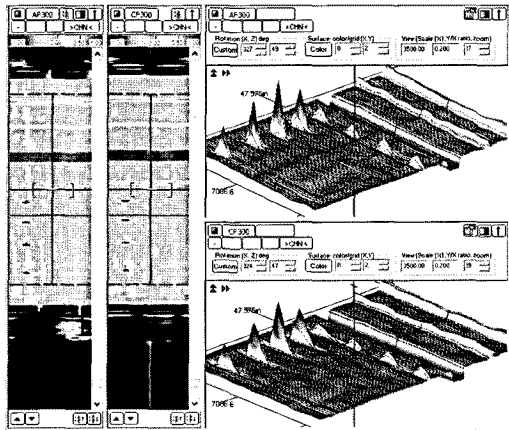
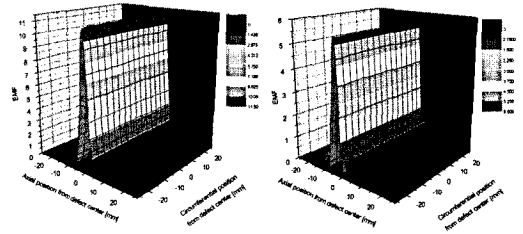
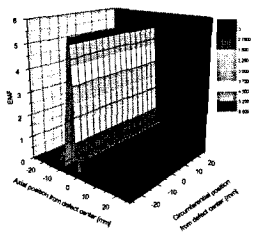


Fig. 9 Measured ECT signals using testing equipment of ASME standard tube



(a) Circumferential channel signal



(b) Axial channel signal

Fig. 10 Simulated ECT signals using FEM analysis of OD groove defect

3.2. X-probe용 표준보정시험편의 결함 신호 비교

Fig. 10은 ASME 표준시험편과 X-probe용 표준보정시험편에 있는 OD groove 결함을 전자기 유한요소해석을 통해 얻은 결함신호이며, Fig. 11은 실제 배열 와전류 프로브를 이용하여 얻은 탐상신호이다. 결함의 폭은 3.1 mm이며, 결함의 깊이는 판 두께의 10%, 해석주파수는 300 kHz를 사용하였다.

해석 결과 원주방향 전체에 대해서 결함신호가 결함의 형상과 같이 발생하였으며 실제 결함신호와 비교 결과 유사한 형상의 결함신호를 확인할 수 있었다. 또한 축방향 채널의 신호보다 원주방향 채널의 신호가 최대값을 기준으로 약 2배 정도 크게 발생하였으며 이는 groove 결함의 경우 결함의 방향이 원주방향성 결함으로 축방향 채널의 결함신호보다 원주방향 채널의 결함신호가 크게 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

X-probe 표준보정시험편의 spiral notch 결함은 배열형 와전류 탐촉자의 성능을 파악하기 위한 결함이다. spiral notch 결함의 신호를 파악하기 전에 배열형 와전류 탐촉자의 방향성 결함에 대한 신호 특성을 파악하기 위하여 축방향 및 원주방향 notch 결함에 대하여 해석하였다. 결함은 Fig. 12와 같이 결함의 크기는 동일하게 축방향과 원주방향으로 배열하였다. 이때의 결함 깊이는 판 두께의 40%로 하였다. Fig. 13은 축방향 notch 결함의 탐상신호이고, Fig. 14는 원주방향 notch 결함의 탐상신호이다.

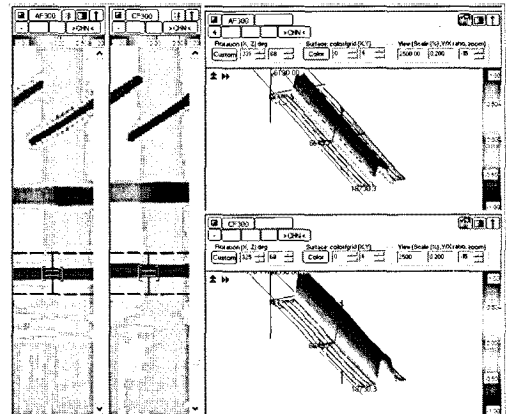
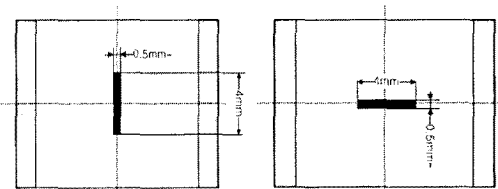


Fig. 11 Measured ECT signals using testing equipment of OD groove defect



(a) Axial defect

(b) Circumferential defect

Fig. 12 Directionality notch defects

해석결과 축방향 notch 결함에 대해서는 축방향 채널의 결함신호가 원주방향의 결함신호보다 약 3.4배 정도 크게 발생하였고, 원주방향 notch 결함에 대해서는 원주방향의 결함신호가 축방향의 결함신호보다 약 3배 정도 크게 발생하였다. 이는 배열형 와전류 탐촉자는 축방향 및 원주방향의 결함 모두에서 방향성에 상관없이 우수한 결함 탐상 성능을 보여주고 있다.

Fig. 15는 X-probe용 표준보정시험편의 spiral notch 결함에 대한 전자기 유한요소해석을 통해 얻은 결함신호이며, Fig. 16은 실제 배열형 와전류 탐촉자를 이용하여 얻은 탐상신호이다. 결함의 폭은 4.7 mm이며, 결함의 깊이는 관두계의 40%, 해석주파수는 300 kHz일 때의 결함신호이다.

해석결과 원주방향으로 spiral 형태 즉 나선 형태로 결함신호가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 실제 결함신호와 비교시에도 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 축방향 채널의 신호보다 원주방향 채널의 신호가 최대값을 기준으로 약 2.5배 정도 크게 발생하였으며 이는 spiral 결함의 경우 결함의 방향이 원주방향성 결함으로 축방향 채널의 결함신호보다 원주방향 채널의 결함신호가 크게 발생하였다.

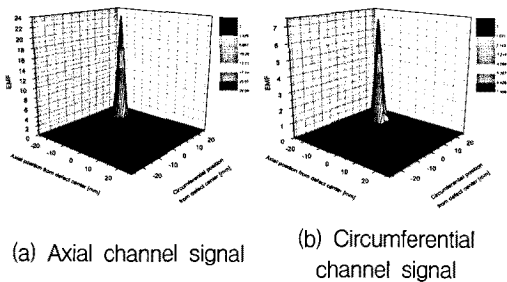


Fig. 13 Simulated ECT signals using FEM analysis of axial notch defect

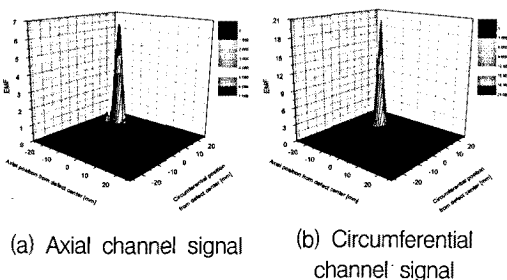


Fig. 14 Simulated ECT signals using FEM analysis of circumferential notch defect

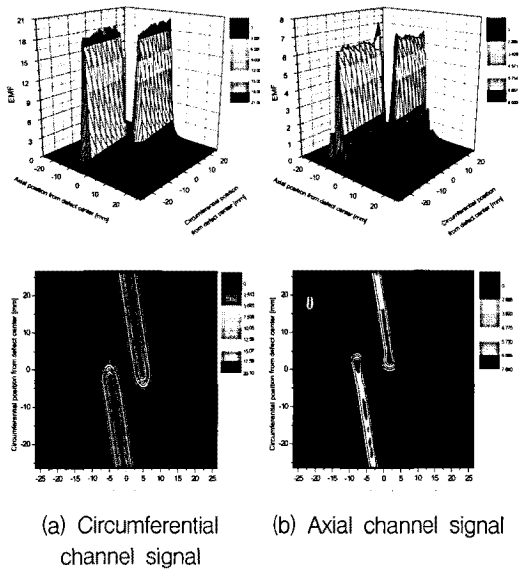


Fig. 15 Simulated ECT signals using FEM analysis of spiral notch defect

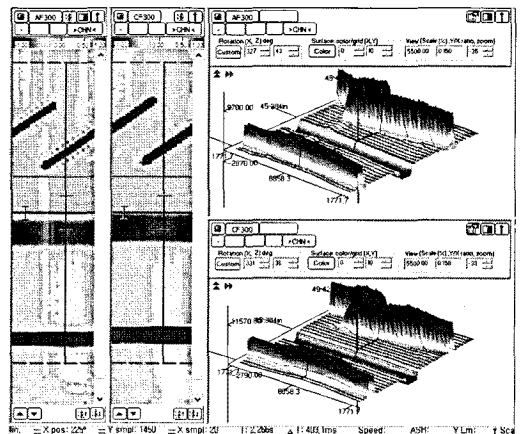


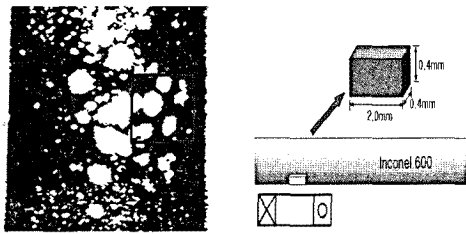
Fig. 16 Measured ECT signals using testing equipment of spiral notch defect

3.3. 실제 원전의 발생 가능한 결함 신호 해석

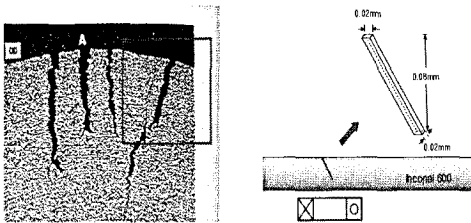
원전 증기발생기에서 발생할 수 있는 결함은 크게 기계적 작용에 의한 결함과 화학적 작용에 의해 발생되는 결함으로 나눌 수 있다. 신호평가를 위해서는 결함의 종류에 따라 이에 맞는 검교정 시험편을 적용하여야 하기 때문에 주요 발생결함에 대한 정확한 이해는 필수적이다. 주로 발생하는 결함 중 본 논문에서는 pitting, SCC(stress corrosion

cracking), multiple SCC, wear 결함을 등가결함으로 변환한 뒤 해석하였다. Fig. 17은 해석결함을 모사 등가결함으로 변환한 그림이다.

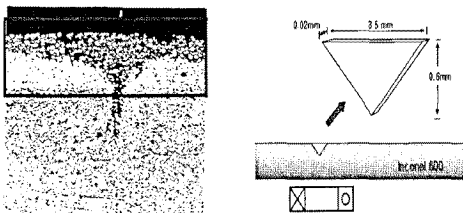
Fig. 18에서부터 Fig. 21은 Fig. 17의 모사 등가결함을 전자기 유한요소 해석을 통하여 얻은 결함신호이다. 시험주파수는 300 kHz를 사용하였다. 해석 결과 각각의 결함별 특징을 확인할 수 있었다. Wear를 제외한 pitting, SCC, multiple SCC 결함을 모두 축방향 결함으로 해석 결과 축방향 채널의 신호가 원주방향 채널의 신호보다 더 크게 발생한 것을 확인할 수 있었다.



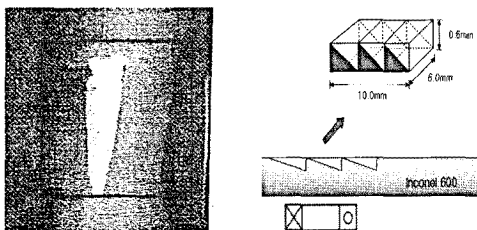
(a) Pitting



(b) Multiple SCC



(c) SCC



(d) Wear

Fig. 17 Equivalent simulation defects

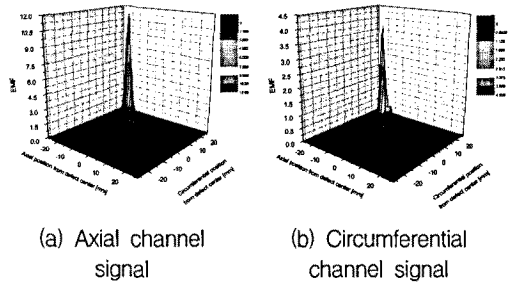


Fig. 18 Simulated ECT signals using FEM analysis of pitting

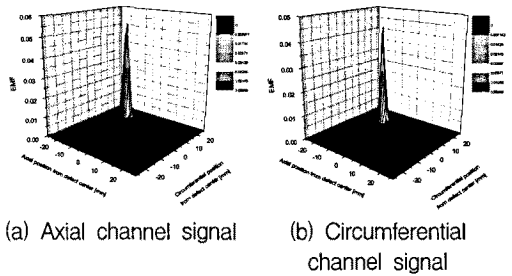


Fig. 19 Simulated ECT signals using FEM analysis of multiple SCC

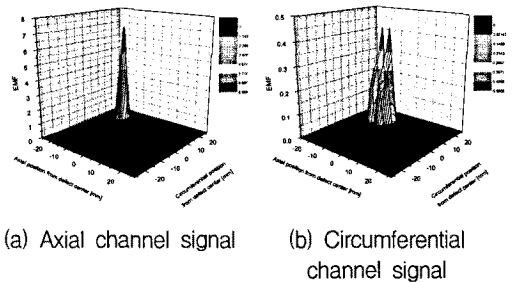


Fig. 20 Simulated ECT signals using FEM analysis of SCC

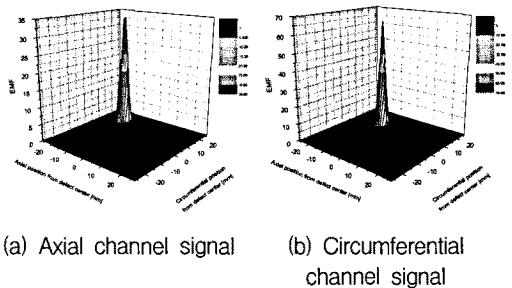


Fig. 21 Simulated ECT signals using FEM analysis of wear

4. 결론

본 논문은 배열형 와전류 탐촉자를 이용하여 SG 세관에 발생하는 결함에 대한 와전류 탐상을 수행할 때 얻게 되는 신호를 3차원 유한요소해석 프로그램을 이용하여 신호를 예측하고 실험 신호와 비교시 정확성을 검증하기 위한 목적으로 연구를 수행하였다. 본 연구를 통해 신뢰성 있고 정확한 와전류 신호의 예측과 평가를 위하여 상용 전자기 수치해석프로그램인 OPERA-3D를 이용하여 배열형 와전류 탐촉자를 모사하였고, 다양한 결함의 표준 보정시험편의 신호를 모사하였다. 이를 위해 배열형 와전류 탐촉자 및 표준 보정 시험편의 특징 및 신호 형성 원리를 분석하였으며, 이를 바탕으로 상용프로그램으로 와전류탐상 신호를 모사하였으며, 모사한 데이터의 타당성 여부를 실제 신호와의 C-scan의 비교를 통해 확인하였다. 그 결과 모사 신호를 이용한 결함 평가 결과가 실제 평가 결과와 상당히 유사한 결과를 확인할 수 있었다. 본 논문에서의 연구결과는 현장에서의 배열형 와전류 탐촉자를 사용함에 있어서 결함신호를 이해하고 예측하는데 필요한 자료가 될 것이며, 이는 증기발생기 세관의 건전성을 높여 궁극적으로 원자력발전소 안정성 확보에 큰 도움이 될 것이라 사료된다.

후 기

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2009-0089686)

참고문헌

- [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 (2006)
- [2] Ji-Ho Kim, Geon-Gyu Lim and Hyang-Beom Lee, "Signal analysis of eddy current array probe according to size variation of FBH defects", Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol. 29, No. 2, pp. 137-144 (2009)
- [3] O. Biro and K. Preis, "Finite element analysis of 3-D eddy currents," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 26, No. 2, pp. 418-423 (1990)
- [4] 이항범, "3차원 와전류 문제의 유한요소해석에서 쿨롱 게이지 조건과 전류연속조건의 영향", 대한전기학회 논문지, 54B (10), pp. 483-491 (2005)
- [5] Covers Inconel 600 (tm) Super Alloy in Pipe and Tube, ASTM Code, ASTM B163, No. 110
- [6] H. Huang and T. Takgi, "Inverse analysis for natural and multicrack using signals from a differential transmit/receive ECT probe," IEEE Trans. Mag. Vol. 38, pp. 1009-1012 (2002)
- [7] Kavitha Arunachalam and Satish S Udpa, "Automated algorithms for the analysis of eddy current array probe data," IEEE Sensors Applications Symposium Houston, Texas USA, 7-9 February, pp. 111-114 (2006)
- [8] Automated Analysis of Rotating Probe Eddy Current Data, EPRI Technical Report, EPRI, Palo Alto, CA (2005)