

## 원자력발전소 증기발생기 전열관의 결합발생 예방을 위한 전자기 비파괴 검사방법 개발

신영길  
군산대학교 전기공학과

### Development of an Electromagnetic Nondestructive Testing Method for the Prevention of Defects in Steam Generator Tubes at Nuclear Power Plant

Young-Kil Shin  
Dept. of Electrical Engineering, Kunsan National University

**Abstract** — Major cause of defects in steam generator tubes at nuclear power plant is the accumulation of magnetite and other byproducts of corrosion in the crevice gap between support plates and tubes. Since damaged tubes result in contamination of the secondary coolant by the radioactive primary coolant, they represent a safety hazard. Early detection of magnetite buildup is, therefore, imperative in order to take remedial measures such as chemical flushing. Although the eddy current testing is being used for the inspection of steam generator tubes, the interpretation of resulting signals is generally a difficult task. This paper uses the phase of sensor coil emf as the test signal to find a way of easier signal interpretation. Numerical study using FEM shows that the shape of resulting signal is good for identifying the relative position of the probe to the support plate, and for discriminating the different shapes and degrees of magnetite buildup in the crevice gap region.

### 1. 서 론

증기발생기는 원자력 발전소에서 1차측 금수계통과 2차측 금수계통을 연결하는 중요한 부분으로, 1차측 금수는 원자로에서 발생된 열을 흡수하여 증기발생기내의 인코넬(Inconel 600)로 만들어진 수천개의 전열관 안을 순환한다. 전열관의 열은 다시 전열관 외부를 순환하는 2차측 금수의 고압 증기와 물에 전달되며, 이렇게 발생된 증기가 터빈을 돌려 발전기를 가동시킨다.

인코넬 전열관은 탄소강으로 만들어진 지지대(Support Plate)에 의해 일정한 간격으로 지지된다. 이 지지대는 2차측 금수계통의 증기와 물에 항상 접촉하고 있어 시간이 지남에 따라 부식되게 되며, 이로 인해 전열관과 지지대 사이의 름새에는 부식으로 인한 물질(대부분 치철광)이 채워지게 된다. 한편, 전열관은 유체흐름으로 인해 진동하게 되는데, 름새가 부식물로 채워지게 되면 진동의 충격이 전달되어 전열관과 지지대 모두에 결합이 발생할 가능성이 높아진다. 즉, 지지대의 안전도가 저하될 뿐만 아니라, 전열관은 놀려 들어가거나, 판 두개가 암아지는 현상이 생기게 되며, 나아가 판이 깨질 수도 있다[1]. 결합이 발생되었거나, 예상되는 전열관은 판을 막아 방사능의 누출 가능성을 사전에 통제하고 있는데, 이는 결국 발전의 효율을 떨어뜨리게 하므로 미봉책에 불과하다. 따라서, 름새에 부식물이 측적되는 것을 조기에 발견하는 것이 무엇보다 중요하며, 이러한 예방 차원의 검사는 화학적으로 부식물을 씻어내일(Chemical Flushing) 시기를 결정하는데 도움을 준다[2].

증기발생기내의 전열관 외부에서 부식물 측적정도를 검사한다는 것은 지지대 등의 주변 여전장 연속적인 검사가 불가능하다. 따라서 판 내부에 탐촉자를 삽입하여 검사해야 한다. 름새의 간격과 부식물의 측적정도를 파악하기 위한 검사방법 연구로는 가변 자기 저항 탐촉자를 이용한 방법[1]이 있으나, 전열관의 재료인 인코넬이 결합과 같은 비자성재이므로 전열관 자체의 결합탐지는 불가능하다는 단점이 있다.

일반적으로 증기발생기 전열관 검사에 흔히 사용되는 방법은 외전류탐상법[3, 4]인데, 탐촉자 코일의 임피던스를 탐상신호로 하는 이 방법을 사용하여 름새의 부식물을 파악할 때는 지지대와 부

식물로 인한 신호가 겹쳐져 신호해석이 어렵게 될 것이다. 이러한 어려움을 극복하고자 본 연구에서는 석유시추공, 송유관등의 외부 결합 탐상에 효과적이었던 원격장와전류 탐상법에서와 같이, 센서 코일의 유도기전력을 탐상신호로 사용하였다. 원격장와전류 탐상법은 개스판 및 송유관 검사등 지하에 묻혀 있거나 판 외부 검사가 어려운 경우에 많이 사용되고 있다[5, 6]. 대부분 자성체 판의 검사에 사용되어 온 이 탐상법은 일반적인 외전류 탐상법과 같은 물리적 법칙(전자기 유도)에 의존한다. 기존의 차동와전류 탐상법과의 차이점은, 차동와전류 탐상법에서는 두 개의 인접한 코일에 서로 반대 방향의 전류가 흐르도록 하여 두 코일간의 임피던스차를 탐상신호로 사용하는 데 반해, 원격장와전류 탐상법에서는 여자코일과 센서코일사이의 거리가 판 외경의 3배 정도가 되도록 하며, 센서코일의 기전력을 탐상신호로 사용한다는 점이다. 그런데, 여자코일로부터 판 외경의 3배정도 떨어진 원거리에서는 기전력의 크기가 수マイ크로 볼트 정도로 매우 낮아, 위상을 주로 사용한다.

본 연구에서는 코일간격을 판 외부에 발생되는 름새 부식물의 측적정도를 파악하는 데 유리하도록 조정하였다. 결과적으로 선택된 코일간격은 차동와전류 탐상에서의 두 코일간 거리와 비슷하였으며, 이는 본 검사방법이 원거리와전류 현상을 이용하는 것은 아님을 뜻한다. 본 연구에서는 축대칭 문제의 유한요소 해석을 통해 부식물의 여러 분포상황에 따른 탐상신호들을 구하였고, 이들이 서로 다른 부식물 측적상태에 대해 변별력이 있는가를 알아 보았다.

### 2. 유한요소 모델링

외전류 탐상의 기본 원리는 전자기 유도 현상이다. 축대칭 문제에서의 자매방정식은 페이저 표현법을 사용하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left\{ \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial r} (rA) \right\} + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial z} (rA) \right\} = -J_z + j\omega A \quad (1)$$

여기서 전류밀도,  $J_z$  와 벡터자위,  $A$ 는 페이저양이므로 복소수이며, 회전성분만을 의미하므로 벡터표시를 하지 않았다. 이 자매방정식에 weak formulation을 적용하여 유한요소 정식화를 행하면 다음과 같이 요소당의 행렬식이 구해진다.

$$([S]_e + [C]_e)(A)_e = \{Q\}_e \quad (2)$$

여기서

$$[S]_e = \int_{v_e} \frac{1}{\mu} [\nabla N]^T [\nabla N] \mu dV \quad (3)$$

$$[C]_e = \int_{v_e} \omega \sigma \{N\} [N] dV \quad (4)$$

$$\{Q\}_e = \int_{v_e} \{N\} J_z dV \quad (5)$$

이다. 식 (2)에서 구한 각 요소에서의 기여분은 모두 합쳐져 하나의 행렬식이 형성된다. 이때 계수행렬은 대칭형이며, 띠 모양의 형태를 갖는다. 이를 이용한 가우스 소거법이 행렬 계산에 이용되었다. 경계조건을 만족시키기 위한 방법으로는 경계로 지정된 점에 해당하는 계수행렬의 대각요소를 매우 큰 수로 곱하고, 그 점에 해당되는 우변항에는 큰수가 곱해진 대각요소를 곱해 주었다. 이는 같은 행의 다른 항들을 0으로 취급하는 효과가 있으며, 이미 주어진 경계값이 그 점의 값이 되도록 해 준다.

### 3. 센서코일의 유도기전력 계산

유한요소법을 사용하여 구한 결과는 각 절점에서의 백터자위이므로, 이로부터 센서코일의 기전력을 계산하여야 한다. 유도기전력은 Faraday 의 법칙에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$V = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

여기서 N은 센서코일의 감진(turn) 수이며  $\phi$ 는 센서코일을 지나는 총 자속이다. 이 총 자속은 정의와 stoke 의 정리를 사용하면

$$\phi = \iiint_s \bar{B} \cdot d\bar{S} = \iiint_s (\nabla \times \bar{A}) \cdot d\bar{S} = \oint_c \bar{A} \cdot d\bar{l} \quad (7)$$

이 된다. 따라서 반경  $\rho$  인 센서코일에서는

$$\phi = \int_0^{2\pi} \bar{A} \cdot \rho d\bar{\phi} = 2\pi\rho A \quad (8)$$

로 쓸 수 있고, 유도기전력은

$$V = -j\omega N 2\pi\rho A \quad (9)$$

가 된다. 여기서  $\omega$ 는 정상교류의 각주파수이며,  $\rho$  와  $A$  는 센서코일에 해당되는 요소의 중심에서의 해당값이다. 백터자위와 유도기전력은 모두 복소수 페이이저이므로

$$V = A + jB \quad (10)$$

의 형태로 표현될 수 있으며, 시간축에서는

$$V = \sqrt{A^2 + B^2} \sin\left(\omega t + \tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)\right) \quad (11)$$

로 쓸 수 있다. 따라서, 유도기전력의 크기는  $\sqrt{A^2 + B^2}$  이며, 위상은  $\tan^{-1}\left(\frac{B}{A}\right)$  이다.

### 4. Simulation 결과 및 고찰

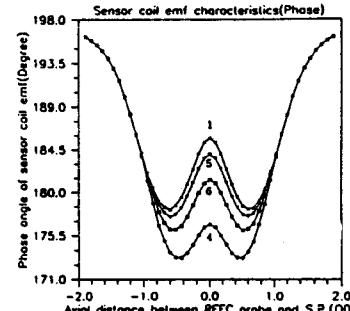
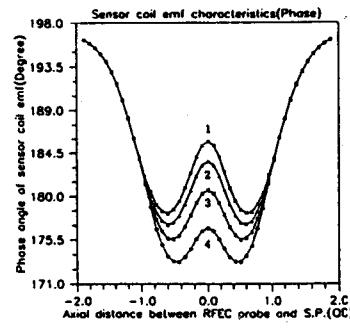
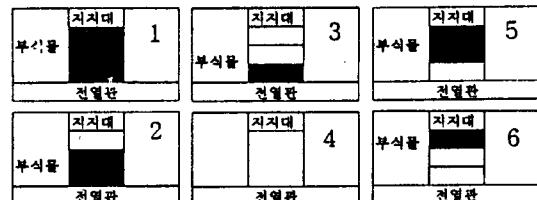
본 연구의 목적은 지지대와 판 사이의 틈새에 자침팡이 끼었을 때, 탐상신호가 이를 알려줄 수 있는지, 또한 다른 축적정도에 대해 신호들이 변별력을 갖고 있는지를 알아보는 것이다. 따라서, 가장 큰 차이가 날 것으로 예상되는, 틈새에 자침팡이 꽉 차 있을 때와 전혀 없을 때의 신호들을 비교하였다.

먼저 코일간격을 외경의 3 배, 2 배, 1 배 (이때는 지지대의 두께와 거의 같음)로 변화시키며, 각각의 코일간격에서 두 신호 사이의 신호차를 가장 크게 하는 주파수를 조사하였다. 그 결과, 코일간격이 외경의 3 배 및 2 배일 때는 공히 13 KHz 에서, 지지대 두께만큼의 간격에서는 10 KHz ~ 13 KHz 사이에서 신호차가 가장 커다. 이와 같은 결과를 종합하여, 사용주파수는 13 KHz 로 정하였다.

코일간격은 최대 신호차가 전체 신호에서 차지하는 비율과 신호형태를 고려하여 결정되었다. 코일간격이 외경의 3 배일 경우, 최대 위상신호자는 10.4258도로 전체 신호의 6.94 % 이었으며, 코일간격이 외경의 2 배일 때의 최대 위상신호자는 10.5795도로 전체 신호의 11.14 % 이었다. 코일간격이 지지대의 두께와 같을 경우의 최대 위상신호자는 9.044도로 앞서의 두 경우에 비해 그 절대치가 줄기는 하였으나, 전체 신호와의 비는 38.5 %로 증가하였다. 이는 정

상신호에 비해 부식물이 있을 때의 신호가 큰 차이를 나타낸다는 것을 의미하므로, 검사자가 부식물의 존재를 쉽게 인식할 수 있을 것이라고 판단되었다. 또한, 이 경우의 위상신호에서는 앞서의 경우에서는 볼 수 없었던 두 개의 계곡 모양이 생겼다. 이들은 센서코일이 지지대 부위를 지날 때, 그리고 여자코일이 지지대 부위를 지날 때, 각각 발생된 것이다. 본 논문의 결과로써 보여진 그림들에서 이를 확인할 수 있다. 이 그림들에서 가로축은 지지대의 중심과 탐촉자의 중심사이의 거리를 판 외경의 배수로 나타냈으며, 탐촉자가 지지대에 도달하지 않았을 때의 거리를 음수로 표시하였다. 따라서 이 신호는 지지대와 탐촉자사이의 상대적 거리를 파악하는데 유리할 뿐만 아니라 부식물의 편중된 분포상황에 대하여 더 많은 정보를 줄 수 있을 것이라고 판단되었다. 자침팡 부식물이 축적되었을 때 위상신호에 차이가 나는 이유는 자침팡 부위에서 표피효과가 일어나고, 이 효과로 인한 위상지연 현상이 발생했기 때문이다. 따라서 부식물로 인한 위상지연을 민감하게 채취하기 위해서는 센서코일이 여자코일로부터 지지대의 두께(부식물의 축적은 이 범위에서만 발생되므로) 만큼 멀어져 있을 필요가 있다.

위와 같이 사용 주파수와 코일간격이 결정된 후, 여러가지 부식물의 분포상황에 대한 탐상신호의 변별력을 시험해 보았다. 먼저 부식물이 판과 평행하게 틈새에 축적되어 있을 때의 신호들을 조사하였다. 그림 1에 여러 부식물의 축적상황과 그러한 상황에서 채취되는 위상신호들을 보았다. 또한, 부식물이 판과 직각으로 축적되어 있을 때의 여러가지 상황에 대한 위상신호들을 그림 2에 보였다. 이 결과들을 보면, 이 위상신호는 여러가지 부식물의 축적상황에 대하여 변별력이 있으며, 특히 그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 부식물이 틈새의 입구나 출구쪽에 몰려있는 상황에서는 더욱 우수한 변별력을 가지고 있음을 알 수 있다.



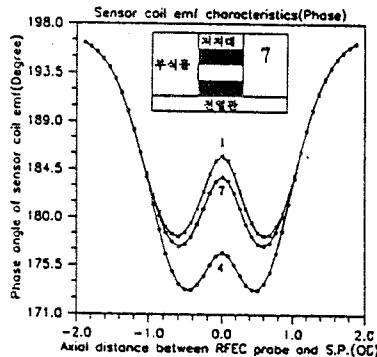


그림 1. 부식물이 판과 평행하게 축적되어 있을 때, 여러 축적상황과 그에 따른 위상신호

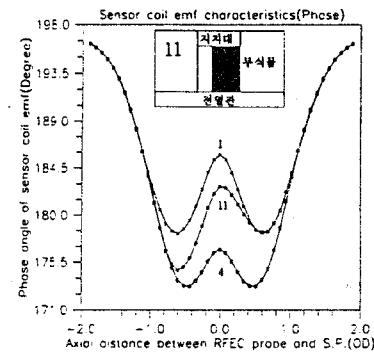
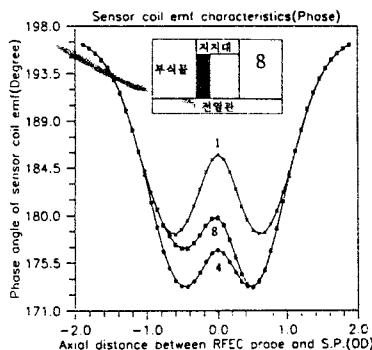


그림 2. 부식물이 판과 수직하게 축적되어 있을 때, 여러 축적상황과 그에 따른 위상신호



#### 4. 결 론

증기발생기 전열판과 지지대사이의 틈새에 축적되어 결합발생의 원인을 제공하는, 틈새 부식물을 발견해내기 위한 비파괴검사 방법을 연구하였다. 기존의 외전류 탐상법이 이 경우 신호해석에 어려움을 겪는 점을 감안, 탐촉자를 여자코일과 센서코일로 분리하고, 센서코일에 유도되는 기전력의 위상을 탐상신호로 사용하였다.

부식물이 틈새에 꽉 차 있을 때와 전혀 없을 때의 신호를 비교하여 가장 큰 신호차를 주는 주파수(13 KHz)와 코일간격(지지대의 두께)을 결정하였다. 이를 이용, 부식물의 여러가지 축적상황에 따른 위상신호들을 비교한 결과, 이 위상신호는 각 부식물 축적상황에 대해 변별력이 있으며, 특히 부식물이 틈새의 입구나 출구쪽에 몰려있을 때에는 더욱 우수한 변별력을 갖고 있음을 알게 되었다.

본 연구는 한국과학재단 '95핵심전문연구과제 (과제번호: 951-0912-032-1) 연구비 지원에 의한 결과 중 일부입니다.

#### 인 용 문 현

- [1] W. Lord, "Magnetic Flux Leakage for Measurement of Crevice Gap Clearance and Tube Support Plate Inspection," EPRI NP-1427, Project SI25-1, Final Report, June 1980.
- [2] S. R. Satish, *Parametric Signal Processing for Eddy Current NDT*, Ph.D. Dissertation, Colorado State University, 1983.
- [3] 고규근, "발전설비에 대한 비파괴검사 현황," 한국비파괴검사 학회 추계학술발표회 논문집, pp. 56-78, 1993.
- [4] 이의환, "국내 원자력발전 현황과 가동전/가동중 검사," 한국비파괴검사학회 추계학술발표회 논문집, pp. 39-49, 1994.
- [5] W. Lord, Y. S. Sun, S. S. Udupa and S. Nath, "A Finite Element Study of the Remote Field Eddy Current Phenomenon," *IEEE Trans. Mag.*, vol. 24, pp. 435-438, 1988.
- [6] T. R. Schmidt, "History of the Remote Field Eddy Current Inspection Technique," *Materials Evaluation*, vol. 47, pp. 14-22, 1989.

