

## 원격장와전류 효과를 이용한 봉 구조물 탐상용 외부탐촉자 설계

신영길  
군산대학교 공과대학 전자전자제어공학부

### Design of an Encircling-type Probe for the Inspection of Rods using Remote Field Eddy Current Effects

Shin, Young-Kil  
School of Electrical Engineering, Kunsan National University

**Abstract** - 핵연료봉이나 제어봉과 같은 봉구조물의 검사를 위하여 원격장와전류 효과를 별 수 있는 탐촉자를 설계하고 탐상주파수를 유한요소해석을 통해 설정하였다. 핵연료봉을 대상으로 한 해석에서 exciter coil 주변을 차폐하고 500kHz의 주파수를 사용한 결과 전위계곡과 위상매듭의 존재가 나타나 원격장와전류 효과가 구현되었음을 확인하였다. exciter와 sensor coil로 이루어진 탐촉자를 이동시키면서 예측한 탐상신호에서는 센서를 원격장 위치에 고정시켰을 때, 결합이 센서를 지날 때의 위상신호와 결합이 exciter를 지날 때의 위상신호가 서로 달리 나타났다. 또한, 외부결합과 내부결합이 센서를 지날 때의 위상지연은 작지만 서로 반대의 경향으로 나타났으며, 두 종류의 결합이 exciter를 지날 때는 위상지연이 상대적으로 크게 줄어들고 외부/내부 결합에 상관없이 신호가 비슷하게 나타남을 볼 수 있었다. 이러한 신호형태는 자성체 관의 탐상에서 내, 외부 결합 신호가 구별이 안되고, 동일한 위상신호가 항상 쌍으로 나타나는 것과 비교할 때, 신호해석을 훨씬 수월하게 해줄 수 있을 것이라고 판단된다.

#### 1. 서 론

원자로의 핵연료는 원자력 발전의 핵심인 동시에 안전을 고려하여 완벽한 품질관리가 요구되는 부품이다. 따라서 핵연료 침합체 세조과정에서 엄격한 헬륨 누설검사가 실시되고 있다. 그러나 헬륨 누설검사를 통한 핵연료봉에서도 가끔 원자로내에서 연소중에 결합이 발견되고 있다 [1-3]. 한편, 제어봉은 원자로 노심의 반응도 제어 및 정지 기능을 가진 기기로, 원자로 운전중 용기내 냉각재 흐름에 의한 진동으로 인해 안내 카드와 접촉하여 피복관이 마모될 수 있으며 중성자 조사에 의한 균열이 발생되기도 한다 [4].

본 연구에서는 원격장와전류(RFEC) 효과를 이용하여 봉 구조물을 검사할 수 있는 탐촉자를 설계하였다. 원격장와전류 탐상은 송유관이나 개스관등의 자성체 관검사에 주로 사용되어 왔다 [5,6]. 일반적인 와전류 탐상(ECT)은 자성체에 적용할 경우 표피효과로 인해 탐상깊이가 제한되며, 땅속에 묻힌 관을 검사하려면 관내부로 탐촉자를 삽입하여 검사해야만 하므로 관 외부의 결합을 발견하기가 쉽지 않다. 이에 반해 원격장와전류 신호는 관 내부 결합이나 관 외부 결합에 대해 거의 동일한 민감도로 반응하므로 표피효과의 제한을 거의 받지 않는다. 또한, 와전류 탐상에서 민감하게 신호를 변화시키는 Lift-off도 원격장와전류 탐상에서는 신호에 미치는 영향이 거의 없는 것으로 알려져 있다 [7]. 최근에는 관에서뿐만 아니라 평판에서도 원격장와전류 효과가 나타날 수 있도록 차폐장치가 개발된 바 있다 [8,9].

원격장와전류 탐상을 봉 구조물의 탐상에 적용하려면 봉의 구조상 외부에서의 접근만 가능하므로 탐촉자는 봉을 외부에서 들러싸는 형태의 코일을 사용하였고, 코일 외부를 차폐하여 자기에너지자를 관 내부로 집중시킴으로써 원격장와전류 효과를 구현하였다. 또한 그 과정에서

이 효과가 나타날 수 있는 탐상 주파수의 선정이 중요한데, 핵연료봉이 zircaloy로 만들어진 비자성체이므로 자성체 관 검사에 사용되어 오던 20-400 Hz의 주파수는 사용이 부적절하여 유한요소 해석을 수행, 적절한 탐상 주파수를 찾았다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 유한요소 정식화 및 신호 계산

원격장와전류 탐상의 지배방정식은 일반 와전류 탐상과 동일하며 다음과 같다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \overline{A} = \overline{J_s} - j\omega\sigma\overline{A} \quad (1)$$

이 식의 축 대칭형 표현에 weak formulation을 적용하면 다음과 같은 요소당 행렬식이 구해진다.

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

여기서 각 행렬의 요소는 다음과 같이 계산된다.

$$S_{ii} = \int_{\Omega} \frac{1}{\mu} \left\{ \left( \frac{N_i}{r} + \frac{\partial N_i}{\partial r} \right) \left( \frac{N_i}{r} + \frac{\partial N_i}{\partial r} \right) \right\} 2\pi r dr dz + \int_{\Omega} \frac{1}{\mu} \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_i}{\partial z} 2\pi r dr dz \quad (3)$$

$$C_{ii} = \int_{\Omega} \omega\sigma N_i N_i 2\pi r dr dz \quad (4)$$

$$Q_i^e = \int_{\Omega} J_s N_i 2\pi r dr dz \quad (5)$$

이와 같은 요소당 행렬식은 전 요소에서의 기여분들을 합하여 하나의 행렬식을 형성하고, 그 행렬식을 풀면 각 절점에서의 자기포텐셜 값이 구해진다.

원격장와전류 탐상에서의 신호는 센서코일의 기전력이며, 특히 기전력의 위상이 신호로써 많이 사용된다. 따라서 센서코일에 해당되는 영역에서의 절점당 자기포텐셜 값으로부터 다음과 같이 기전력을 구할 수 있다.

$$V = -j\omega\phi = -j\omega \oint_c \overline{A} \cdot d\overline{l} = -j\omega 2\pi r A \quad (6)$$

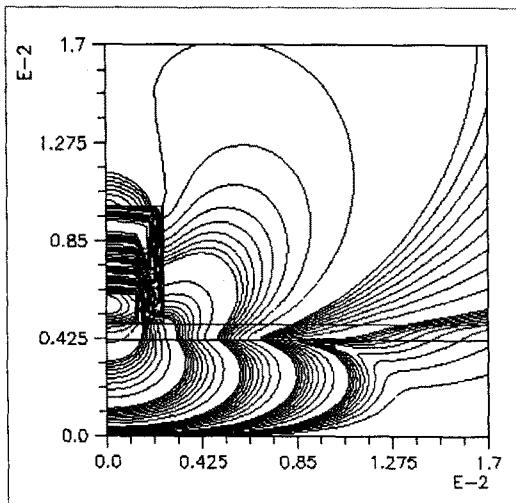
여기서  $r$ 과  $A$ 는 센서코일을 형성하는 요소들의 중심에서의 값이다. 이 기전력은 복소수 폐이저로 표현된 값이므로 계산된 기전력의 실수부와 헤수부로부터 위상을 계산할 수 있다.

##### 2.2 해석 모델 및 원격장와전류 효과의 구현

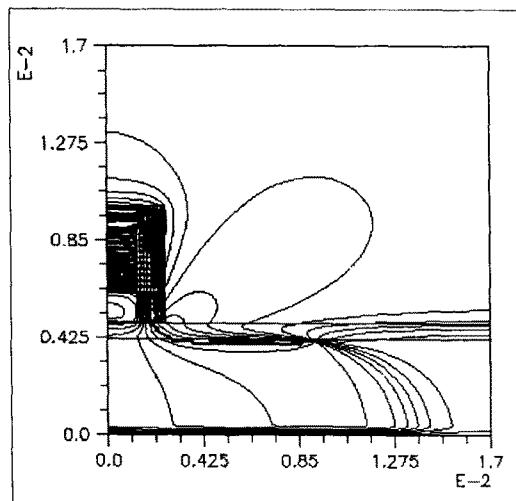
해석 모델은 핵연료봉을 대상으로 하였으며, zircaloy

피복판은 비자성체로 전도도  $1.4 \times 10^6$  [mhos/m], 외경 9.7 mm, 내경 8.43 mm, 봉 두께 0.635 mm의 제원을 갖고 있다. 이 봉의 외부에 봉을 감싸는 코일을 두고 그 코일 외부를 steel로 차폐하였다. 코일 외경은 12.45 mm, 내경 9.9 mm, 폭 2.54 mm 이었으며, 차폐에의 외경은 20.1 mm, 폭 5.09 mm, 비투자율 70, 전도도  $0.7 \times 10^7$  [mhos/m]를 사용하였다.

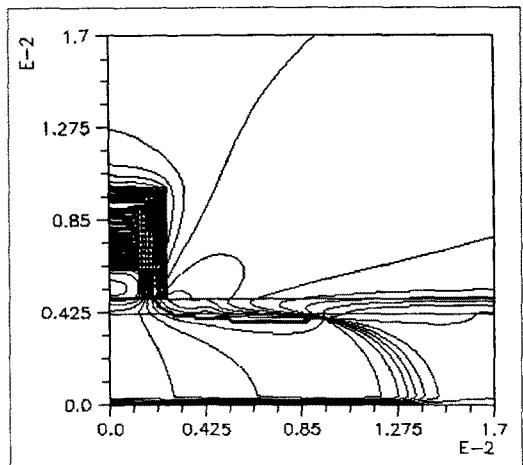
Fig. 1 a), b)는 각각 500kHz의 탐상주파수를 사용하였을 때 나타나는 potential valley와 phase knot을 보여주고 있다. 이들은 봉 외부로 나가는 에너지와 외부로 나갔다가 다시 봉 내부로 들어오는 에너지가 만나는 곳에서 나타나며, potential 값은 같으나 위상이 180도 차이가 나게되어 potential valley에서는 그 값이 거의 0이고 phase knot에서는 위상값이 여러 개가 되는 지점을 의미한다. 따라서, 이들의 존재는 원격장과 전류 효과가 사용된 탐상주파수(500kHz)에서 나타남을 입증하고 있다.



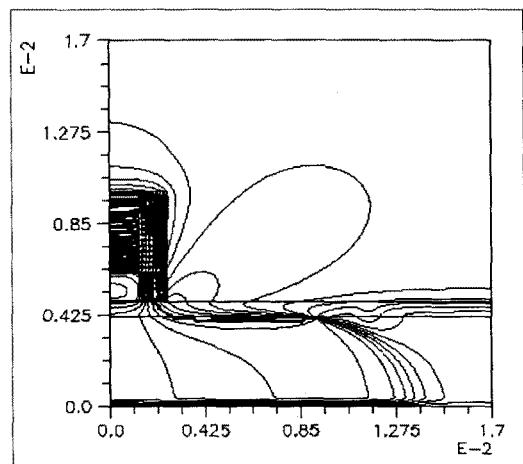
(a)



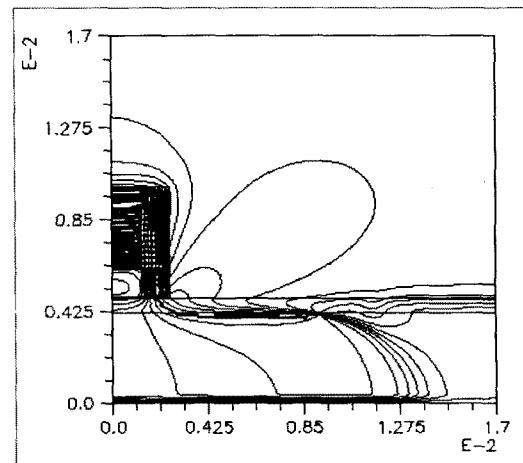
(b)



(a)



(b)



(c)

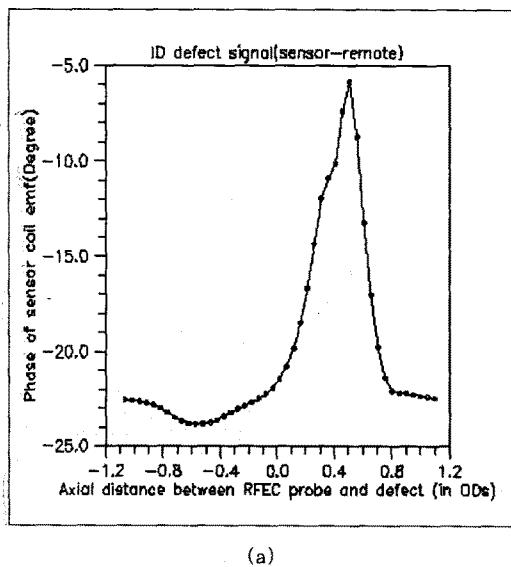
Fig. 1. a) Potential valley formed in an log scaled equipotential plot b)phase knot formed in an equiphasé plot.

Fig. 2. Equiphasé distribution when a 0.8 mm wide, 75% depth groove is located a) inside the rod and near the exciter, b) inside the rod and far from the exciter, c) outside the rod and far from the exciter.

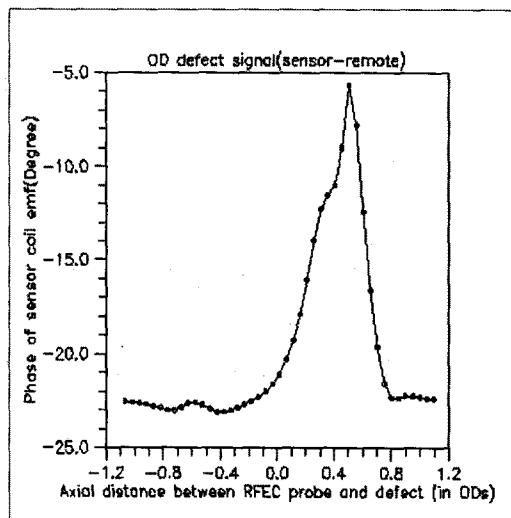
### 2.3 탐상신호 예측 및 결과 분석

결합이 있을 때의 등위상선 분포변화를 Fig. 2에 보였다. 여기서 결합은 축대칭 해석이므로 groove 형태이며 폭은 0.8 mm, 깊이는 봉 두께의 75% 였다. (a)는 결합이 exciter coil로부터 약 4.37 mm 떨어진, 봉 내부에 위치할 때를 보인 것이다. 봉 외부의 위상선 분포가 크게 변화하는 것을 볼 수 있다. (b)와 (c)는 결합이 exciter로부터 약 11.69 mm 떨어져 있고 각각 봉 내부와 봉 외부에 위치하는 경우의 위상선 분포를 보인 것이다. 두 경우 모두 위상선 분포의 변화가 봉 내부를 향하고 있음을 볼 수 있다.

그러나, exciter와 sensor coil로 이루어진 탐촉자를 scanning하면서 센서코일에 유도되는 기전력의 위상을 예측한 결과, 내부결합과 외부결합은 구별될 수 있음을 알 수 있었다. 이 때, 센서코일은 exciter로부터 11.93 mm 떨어진 원격장 위치에 고정시켰다. Fig. 3 (a), (b)에 각각 내부결합에 의한 신호와 외부결합에 의한 신호를 보였다.



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Inner diameter defect signal, (b) Outer diameter defect signal.

이 그림들에서 왼쪽의 작은 신호는 결합이 센서를 지날 때 얻어진 것이며 오른쪽의 큰 신호는 결합이 exciter를 지날 때 얻어진 것이다. 내부결합이 센서를 지날 때에는 위상지연이 커지며, 외부결합이 센서를 지날 때는 위상지연이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 따라서, 이 부분을 보면 내부결합인지 외부결합인지를 판별할 수 있을 것이다. 반면에 두 종류의 결합이 exciter를 지날 때에는 내, 외부 결합 구별없이 큰 신호가 비슷한 형태로 나타나므로 결합의 크기를 판정할 때 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 또한, 이 결과는 결합이 흔히 발생되는 봉단부위를 검사할 때, exciter를 봉단에 놓아도 센서에서 봉단의 결합유무를 판정할 수 있을 정도의 큰 신호를 얻을 수 있어 앞으로의 봉 구조물 탐상 연구에 효과적으로 사용될 수 있을 것이다. 결합이 센서를 지날 때, 신호가 작게 나오는 것을 극복하기 위하여 센서 주변에도 차폐를 시켜서 그 결과가 개선되는지 가까운 시일내에 확인할 예정이다.

### 3. 결 론

원격장와전류 효과를 이용하여 봉 구조물을 탐상할 수 있는 탐촉자를 설계하고 탐상주파수를 결정하였으며, 탐상신호를 수치해석적으로 예측하였다. 예측결과는 자성체 관의 탐상시 내, 외부결합에 의한 신호가 비슷하여 구별이 어렵고 또 동일한 신호가 항상 쌍으로 나타나는 것과 비교하면, 신호를 보고 결합의 종류나 크기 등을 판정할 때 훨씬 유리한 조건을 갖추었다고 판단된다.

앞으로 이 연구는 센서 주변도 차폐시켜 신호의 변화를 살펴보고 개선할 것이며, 봉단에 발생되는 결합의 탐상을 목표로 효과적인 탐상방법을 모색 할 예정이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 이기순 외, “고리원자력 1호기 핵연료봉 파손원인 규명연구(I)”, KAERI/RR-814/88, pp.31-32, 86-89, 1988.
- [2] 구대서, 박윤규, 김은가, “와전류시험에 의한 조사핵연료봉의 결합 검사”, 비파괴검사학회지, Vol. 16, No. 1, pp.29-33, 1996.
- [3] 서동만, 심기섭, 권우주, 김정하, 박춘호, “봉단 용접부 와전류탐상의 기초적인 연구”, 비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 2, pp.85-91, 1998.
- [4] 이희종, 남민우, 정계조, “원자로 제어봉 End-Tip 원주방향균열 와전류 검사”, 비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 6, pp.455-463, 1998.
- [5] T. R. Schmidt, “The remote field eddy current inspection technique”, Materials Evaluation, Vol. 42, No. 2, pp.225-230, 1984.
- [6] W. Lord, Y. S. Sun, S. S. Udupa, and S. Nath, “A finite element study of the remote field eddy current phenomena”, IEEE Trans. Mag., Vol. 24, No. 1, pp.435-438, 1988.
- [7] D. L. Atherton, W. M. Czura, and D. D. Mackintosh, “Remote field eddy current defect interactions: effects on the external field”, Materials Evaluation, Vol. 52, No. 11, pp. 1288-1291, 1994.
- [8] S. Nath, Y. S. Sun, and M. Mina, “Design considerations for the remote field eddy current probe for inspecting ferromagnetic flat structures”, Review of Progress in NDE, Vol. 16, D. O. Thompson and D. A. Chimenti, Eds., New York: Plenum Press, pp.1061-1066, 1997.
- [9] Y. S. Sun, W. Lord, L. Udupa, S. Udupa, S. K. Lua and K. H. Ng, “Expanding the remote field eddy current techniques to thick-walled aluminum plate inspection”, ENDE, T. Takagi et al. Eds., IOS Press, pp. 145-152, 1997.