[논 문] - 비 파 괴 검 사 학 회 지
Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing
Vol. 21, No. 5 (2001. 10)

비자성 증기발생기 전열관의 원격장와전류 탐상 가능성 연구

Feasibility Study of Remote Field Eddy Current Testing for Nonmagnetic Steam Generator Tubes

신 영 길*
Young-Kil Shin*

초 록 증기발생기 전열관이 노후화됨에 따라 새롭고 판단이 애매한 결함이 발생되기 시작하고 있다. 대부분의 결함은 전열관 외부에서 발생되어 진전된다. 일반 와전류탐상에서는 외부결함으로부터의 신호가 표피효과로 인해 내부결함으로부터의 신호보다 매우 약하기 때문에, 본 논문에서는 자성체 관 검사에서 내부 및 외부결함에 거의 같은 민감도를 보인 바 있는 원격장와전류 탐상을 비자성체인 전열관의 검사에 적용하기 위한 연구를 수행하였다. 유한요소 모델링을 통한 연구결과는 비자성체인 전열관에서 원격장와전류 효과가 나타나려면 탐상주파수가 수백 kHz가 되어야 하며, 여자코일과 센서코일간의 간격은 자성 관 검사시의 절반인 관 외경의 1.5배 정도가 되어야 함을 보였다. 이렇게 설계된 탐촉자를 사용하여 예측한 결함신호들은 이 검사방법이 내부 및 외부결함에 동일하게 민감하며, 위상신호의 세기와 결함깊이간에는 선형적인 비례관계가 존재함을 보여 주었다. 이러한 결과들은 비자성 증기발생기 전열관이라 할지라도 원격장와전류 탐상이 가능함을 말해 주고 있다.

주요용어: 증기발생기 전열관, 원격장와전류 탐상, 유한요소 모델링, 탐상주파수

Abstract: As steam generator (SG) tubes have aged, new and subtle flaws have appeared. Most of them start growing from outside the tubes. Since signals from outer diameter (OD) defects are very weak compared to those from inner diameter (ID) defects in the conventional eddy current testing due to skin effect, this paper studies the feasibility of using remote field eddy current (RFEC) technique, which has shown equal sensitivity to ID and OD defects in the ferromagnetic pipe inspection. Finite element modeling studies show that the operating frequency needs to be increased up to a few hundred kHz in order for RFEC effects to occur in the nonmagnetic SG tube. The proper distance between exciter and sensor coils is also found to be about 1.5 OD, which is half the distance used in the ferromagnetic pipe inspection. Defect signals obtained by the designed RFEC probe show equal sensitivity to ID and OD defects and the existence of linear relationship between defect depth and phase signal strength. These results tell us that RFEC inspection is feasible even in nonmagnetic steam generator tubes.

Keywords: steam generator tube, remote field eddy current testing, finite element modeling, operating frequency

(접수: 2001. 6. 27) * 군산대학교 전자정보공학부(School of Electronic & Information Engineering, Kunsan National University, Kunsan 573-701)

1. 서 론

증기발생기가 노후화 됨에 따라 새롭고 판별이 애매한 결함이 생겨나기 시작했고, 그 결과 결함의 발견 및 크기 파악이 어려워지고 있다. 증기발생기 전열관에서 대부분의 결함들은 관 외부에서부터 발생되는 경우가 많다 [1]. 전 세계적으로 증기발생기 전열관 보수의 주요 원인은 외부 응력부식 결함 때문이며 또한 전 세계 원전의 절반 이상에서 전열관 외부에 발생하는 마모로 인한 손상이 발생되고 있다[2]. 와전류 탐상법(ECT)은 빠르고 효과적으로 전열관을 검사하기는 하지만, 외부결함으로부터의 신호는 내부결함으로부터의 신호와 비교하였을 때 무척 미약하다. 따라서 검사초기에 사용되는 차동 와전류검사법은 단일 주파수를 사용할 경우 외부결함을 발견하는데 실패할 수도 있다. 물론 +포인트 회전 탐촉자를 사용하는 정밀한 검사 방법을 쓰면 외부결함을 놓치지 않겠지만, 이 검사법은 속도가 느려서 초기의 차동 검사에서 발견된 이상 부위를 정밀하게 검사하기 위한 목적으로 사용된다[3]. 따라서 초기 검사단계에서 외부결함을 빠르고 신뢰할 만 하게 검사할 수 있는 방법이 요구된다. 이러한 목적을 위해 본 연구에서는 자성관 검사에서 내부(inner diameter; ID) 결함뿐만 아니라 외부(outer diameter; OD) 결함도 민감하게 발견해 낸다고 알려진 원격장와전류(RFEC) 탐상법을 비자성체인 증기발생기 전열관의 탐상에도 적용할 수 있는지를 조사하였다.

원격장와전류 탐상은 대부분 자성체 파이프의 검사에 적용되어 왔다[4-6]. 그러나 와전류는 자성체 또는 비자성체에 상관없이 도체이기만 하면 유도될 수 있으므로, 이 검사법은 어떤 도체 관이든지 적용될 수 있다[6,7]. 이 검사법의 특징은 자기에너지가 원격장에 위치한 센서에 도달하기 전에 관을 두 번 관통한다는 점이다. 관통이 일어나는 두 영역의 사이에는 천이영역(transition region)이 존재하는데 이 영역에서 자위계곡(potential valley)과 위상매듭(phase knot)이 유한요소 해석에 의해 발견된 바 있다[5]. 자성체 관의 검사에서는 여자코일과 센서코일사이의 간격이 대개 관 직경의 3배 정도가 되며, 대부분 매우 낮은 주파수(10Hz to 400Hz)를 사용한다. 탐상신호로는 센서코일에 유도되는 기전력의 크기와 위상이 사용된다. 위상신호는 실험시 Phase Lock-In Amplifier를 사용하여 입력과 출력을 비교하게 되므로 여자코일과 센서코일의 위상 차가 된다. 원격장와전류 탐상에서의 신호는 관 벽의 상태, 두께, 투자율, 전도도 등과 밀접하게 연관되어 있으며, 일반 와전류 탐상신호와 비교할 때 몇 가지 특이한 점들이 있다. 즉, 원격장와전류 탐상신호는 내부결함과 외부결함을 거의 같은 민감도로 발견해 내고, 위상신호와 결함의 깊이간에 선형적인 관계가 있으며, 하나의 결함에 대해 두 번의 결함지시를 하는 특징이 있다. 두 번의 결함지시는 하나의 탐촉자로 같이 움직이는 센서코일과 여자코일이 각각 결함부위를 지날 때 나타나며, 따라서 신호상의 두 결함지시 사이의 간격은 두 코일 사이의 거리에 비례한다. 또한, 두 코일의 크기가 같으면 결함지시의 크기도 같게 나타난다.

이러한 원격장와전류 탐상의 장점을 비자성체인 증기발생기 전열관의 검사에 이용하려는 목적으로 본 연구에서는 축대칭 유한요소 모델링을 통한 연구를 수행하였다. 먼저, 비자성체인 전열관에서 원격장와전류 효과가 나타날 수 있도록 적절한 탐상주파수를 찾았다. 그리고, 수치해석 결과의 그림들과 여러 결함에 대한 예측 신호들을 조사하여 두 코일간의 간격을 결정하였다. 탐상주파수와 탐촉자의 형태를 결정한 후에는 깊이와 폭이 다른 결함들로부터의 신호들을 예측하고, 내부결함과 외부결함으로부터의 신호들을 비교하였다. 그 결과, 신호들은 결함 크기의 변화에 변별력이 있다고 판단되었으며, 또한 외부결함 신호는 내부결함 신호와 거의 구분이 안 될 정도로 같게 나타남을 볼 수 있었다. 이러한 결과들은 비자성체인 전열관에서도 원격장와전류 탐상이 가능하며, 전열관 외부의 결함을 발견하는데 매우 유용할 것이라는 점을 말해 주었다.

2. 유한요소 모델링

원격장와전류 탐상의 지배방정식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times \overline{A} = \overline{J_S} - \sigma \frac{\partial \overline{A}}{\partial t} \quad \cdots\cdots (1)$$

이 식에서 $\overline{A}$, $\overline{J_s}$, μ, σ 는 각각 벡터자위(magnetic vector potential), 입력전류밀도, 투자율, 전도도를 의미한다. 교류 정상상태와 관, 코일, 결함의 축대칭을 가정하면 지배방정식은 원통좌표계로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{1}{\mu}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left\{\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rA)\right\} + \frac{\partial}{\partial z}\left\{\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial z}(rA)\right\}\right] \quad \cdots\cdots (2)$$
$$-j\omega\sigma A + J_S = 0$$

여기서 A와 J_s는 각 해당벡터의 회전성분이며, ω는 각주파수이다.

Galerkin 가중잔차법을 윗 식에 적용하고 유한요소법으로 공식화하면 다음과 같은 요소당 행렬식을 얻게 된다.

$$([S]) + j[C])\{A\} = \{Q\} \quad \cdots\cdots (3)$$

각각의 행렬에서 요소들은 다음과 같이 표현된다.

$$S_{ij} = \int_{\Omega^e} \frac{1}{\mu} \left\{ \left(\frac{N_i}{r} + \frac{\partial N_i}{\partial r} \right) \left(\frac{N_j}{r} + \frac{\partial N_j}{\partial r} \right) + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right\} 2\pi r dr dz \quad \cdots\cdots (4)$$

$$C_{ij} = \int_{\Omega^e} \frac{1}{\mu} \omega \sigma N_i N_j 2\pi r dr dz \quad \cdots\cdots (5)$$

$$Q_i^e = \int_{\Omega^e} \frac{1}{\mu} J_s N_i \, 2\pi r dr dz \quad \cdots\cdots (6)$$

여기서 Ni 와 Nj 는 한 요소의 각 절점에서의 형상함수이다. 식 (3)은 모든 요소들에서의 기여분들이 합쳐져서 하나의 대형 행렬식을 형성하게 되는데, 이를 풀면 해석영역내 각 절점에서의 벡터자위 값들이 구해진다. 원격장와전류 신호는 센서코일의 기전력이므로 센서코일 영역 절점에서의 값들을 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_{emf} = -j\omega \oint_c \overline{A} \cdot d\bar{l} = -j\omega A_c \, 2\pi r_c \quad \cdots\cdots (7)$$

여기서 A_c와 r_c는 각각 요소중심에서의 벡터자위 값과 중심 축으로부터의 거리이다. 기전력은 복소수 페이저 형태로 표현되었으므로, 신호의 크기와 위상을 계산할 수 있다.

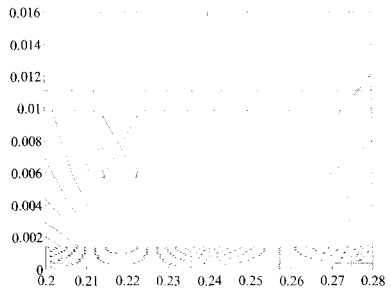
3. 비자성 전열관에서의 원격장와전류 효과 구현

모델링에 사용된 재질 특성 및 크기를 Table 1에 보였으며 인코넬 600 전열관을 대상으로 하였다. Fig. 1은 10, 100, 200, 300 kHz의 주파수를 사용하였을 때 등자위선을 Log 스케일로 그린 것이다. 주파수가 높아짐에 따라 자위계곡이 형성되는 것을 볼 수 있다. Fig. 2는 앞서와 같은 주파수들을 사용하였을 때 등위상선을 그린 것으로, 주파수가 증가함에 따라 위상매듭이 형성되는 것을 볼 수 있다. 이러한 독특한 패턴들은 두 개의 다른 방향의 에너지가 다시 만남으로 인해 발생된다. 여자코일에서 발생한 에너지는 두 개의 경로를 갖는데, 그 중 하나는 여자코일 부근에서 관 내부를 약간 진행하다가 관 외부로 나가려고 하며, 다른 하나는 여자코일에서 바로 관을 관통하여 나가서 관 외부에서 확산되다가 원격장 영역에서 또 다시 관을 관통하여 내부로 들어오게 된다. 이러한 두 방향의 에너지들이 만나 서로 상쇄되는 영역을 천이영역이라 하며, 바로 이 영역에서 자위계곡과 위상매듭이 형성되게 된다.

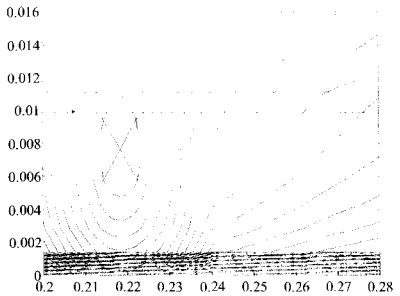
원격장와전류 효과가 구현되었음을 보여주는 또 다른 증거를 Fig. 3에 보였다. 이것은 여자코일이 고정되어 있고 센서코일이 여자코일로부터 멀어져 갈 때 센서코일에 유도되는 기전력의 크기와 위상을 보인 것이다. 여기서 기전력의 크기는 너무 작아 Log 스케일로 표시하였다. 크기와 위상이 여자코일로부터 관 직경의 0.5 ~ 1배 되는 곳에서 급격히 변화함을 볼 수 있는데, 이 위치가 바로 자위계곡과 위상매듭이 형성되는 위치와 일치한다. 천이영역에서의 이러한 기전력의 급격한 변화는 원격장와전류 효과의 기본 특성이다. 다만, 자성 관의 원격장와전류 탐상에서는 천이영역의 위치가 여자코일로부터 관 직경의 1.5 내지 2배정도 되는 곳에서 형성되는데 반해, 비자성 관인 전열관에서는 그 거리가 거의 절반 정도로 줄어들었다는 점이 다를 뿐이다.

Table 1 Material properties and dimensions used in the numerical modeling

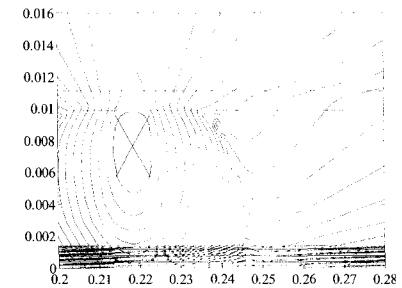
Conductivity of SG tube	1.1×10^6
Relative permeability of SG tube	1
Outer diameter of SG tube	22.225[mm]
Inner diameter of SG tube	19.685[mm]
Wall thickness of SG tube	1.27[mm]
Outer diameter of coils	19.05[mm]
Inner diameter of coils	11.43[mm]
Width of coils	6.35[mm]
Number of turns in coils	500
Current density in the exciter coil	1.27×10^6[A/m^2]



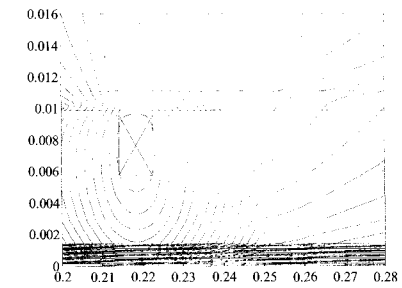
(a) f = 10 kHz



(b) f = 100 kHz

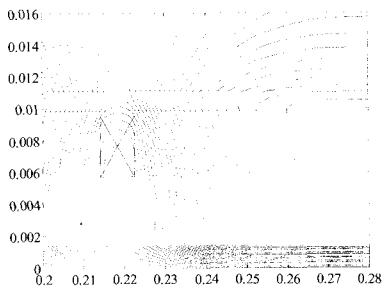


(c) f = 200 kHz

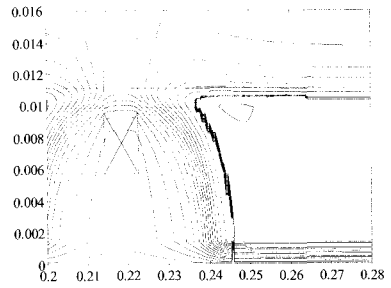


(d) f = 300 kHz

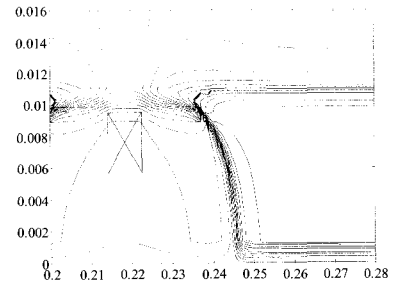
Fig. 1 Formation of potential valley in log scaled equipotential plots as the operating frequency is increased



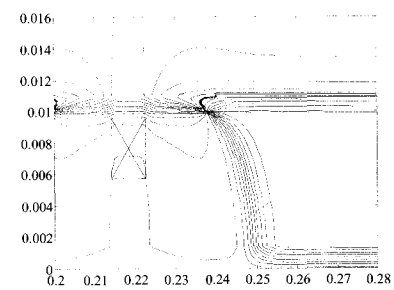
(a) f = 10 kHz



(b) f = 100 kHz



(c) f = 200 kHz

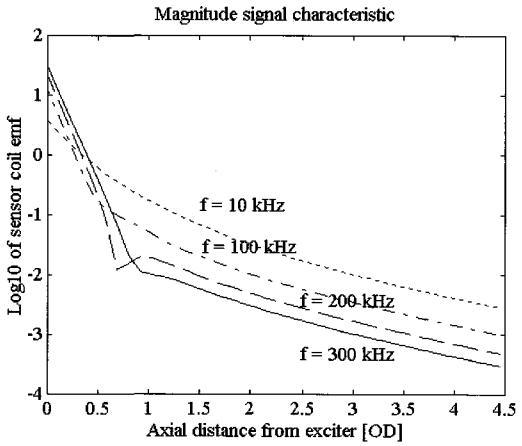


(d) f = 300 kHz

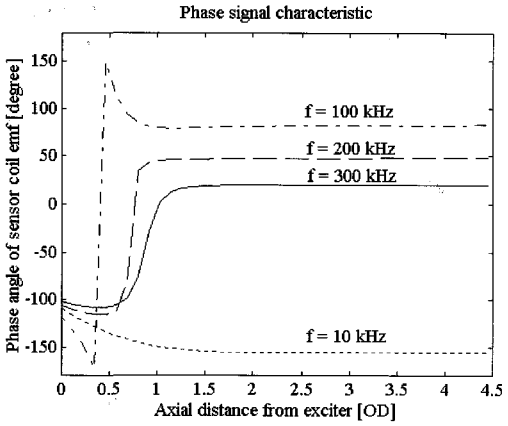
Fig. 2 Formation of phase knot in equiphase plots as the operating frequency is increased

4. 센서코일의 위치 결정

Fig. 3의 기본 특성을 보면 100 내지 300kHz의 주파수에서 원격장와전류 효과가 나타남을 알 수 있는데, 자위계곡이나 위상매듭의 형성과정을 보면 300kHz를 사용했을 때 완벽한 형태가 갖추어 지는 것을 볼 수 있다. 300 kHz보다 다소 낮거나 높아도 원격장와전류 효과는 나타나지만, 본 연구에서는 자위계곡과 위상매듭의 형태가 완전히 갖춰지는 이 주파수를 탐상주파수로 선정하였다. 이 경우 표피두께는 관 두께의 69%에 해당된다.



(a) Magnitude signal characteristic



(b) Phase signal characteristic

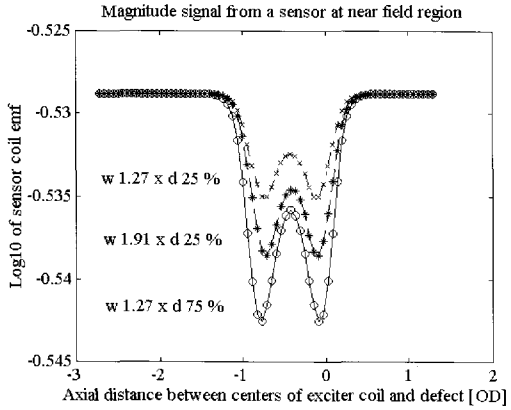
Fig. 3 Basic characteristics of RFEC effects obtained in the nonmagnetic SG tube

앞서 살펴 본 바와 같이 천이영역이 자성 관 검사에 비해 여자코일에 좀 더 가까이에 형성되므로, 센서코일의 새로운 위치를 결정할 필요가 있다. 본 연구에서는 세 가지 위치를 조사하였는데, 각각 여자코일로부터 0.86 OD, 1.14 OD, 1.43 OD 떨어진 곳에 센서코일을 위치시키고 조사하였다. 이들은 각각 근접영역, 천이영역, 원격장 영역에 해당되는 위치들이다. 또한, 결함도 세 가지 groove 형태의 외부결함(1.27mm width × 25% depth, 1.91mm width × 25% depth, 1.27mm width × 75% depth)을 사용하여 비교하였다. Fig. 4는 상기의 위치들에 센서코일이 있을 경우, 외부결함 신호를 수치해석을 통해 예측한 결과이다. 크기 및 위상신호 모두 두 번의 동일한 결함지시가 나타나는 것을 볼 수 있다. 첫 번째 결함지시는 센서코일이 결함을 지날 때 나타난 것이고, 두 번째 결함지시는 여자코일이 결함을 지날 때 나타난 것이다. 따라서 두 지시 사이의 거리는 두 코일간의 거리에 비례하게 된다. 일반적으로 원격장와전류 탐상에서는 크기신호가 너무 작아 과도한 증폭이 요구되고 이때 잡음신호도 함께 증폭되어 어려움이 발생하므로, 위상신호를 사용하는 것이 좀 더 편리하다. Fig. 4의 위상신호들을 비교해 보면 가장 큰 결함지시는 센서코일이 원격장 영역에 위치할 때 나타난다. 그러므로 코일간의 간격을 약 1.5 OD로 하여 센서코일의 위치를 결정하는 것이 좋을 것이다. 이 간격은 자성체 관의 검사에서 사용되는 코일 간격의 약 절반에 해당된다. 그밖에 크기가 다른 세 결함을 사용해 본 결과, 위상신호는 결함의 폭 및 깊이의 변화를 잘 반영하고 있음을 알 수 있었다.

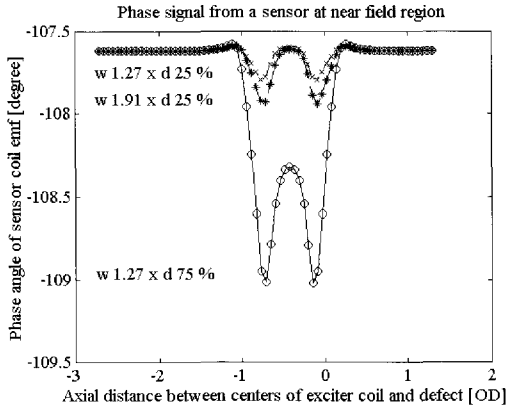
5. 내, 외부 결함에 대한 동일 민감도 및 위상신호와 결함 깊이간의 선형적 비례 관계 확인

설계된 탐촉자가 외부결함을 과연 잘 발견할 수 있는지를 알아보기 위해 내부 결함신호와 외부 결함신호를 비교해 보았다. 결함의 크기는 내, 외부 결함 모두 폭은 1.27mm, 깊이는 관 두께의 50% 이었다. 센서코일의 위치가 천이영역과 원격장 영역에 있을 때의 신호를 함께 조사하였고, 그 결과를 Fig. 5에 보였다.

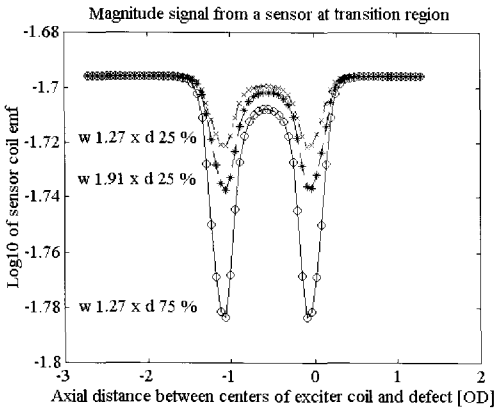
센서가 천이영역에 있으면 내부 및 외부 결함신호의 차이가 커서 구별은 용이하다는 것을 알 수 있다. 이 때문에 Fukutomi 등은 센서가 천이영역에 있는 것을 선호하는 결론을 내렸지만[7], 신호의 세기는 센서가 원격장



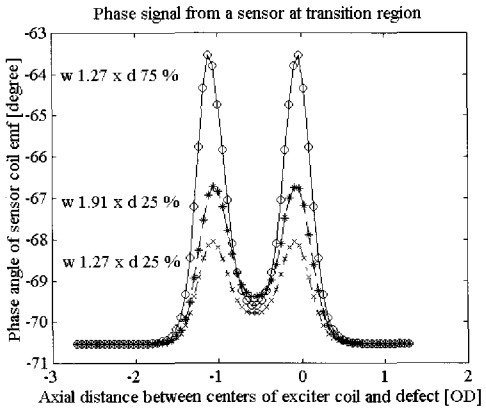
(a) Magnitude signal, spacing=0.86 OD



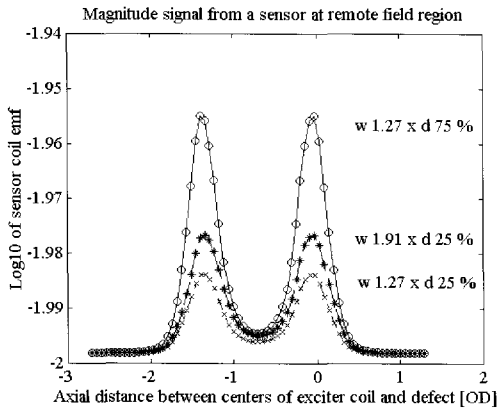
(b) Phase signal, spacing=0.86 OD



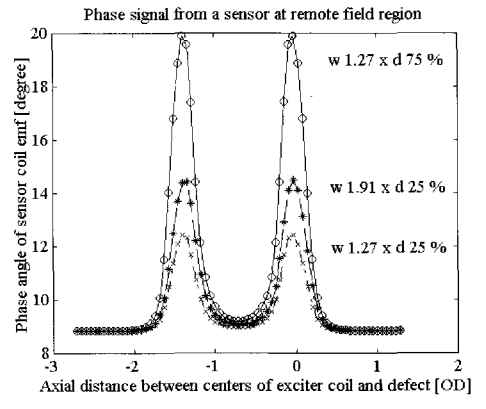
(c) Magnitude signal, spacing=1.14 OD



(d) Phase signal, spacing=1.14 OD

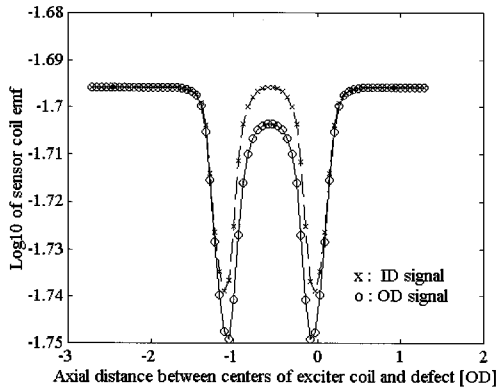


(e) Magnitude signal, spacing=1.43 OD

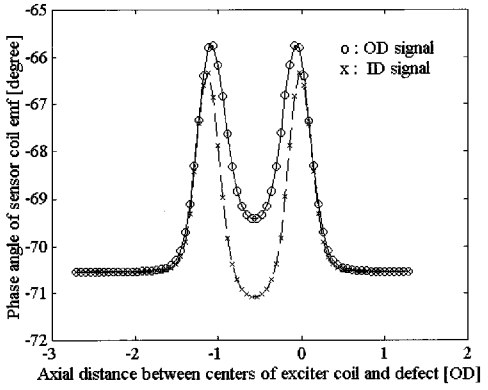


(f) Phase signal, spacing=1.43 OD

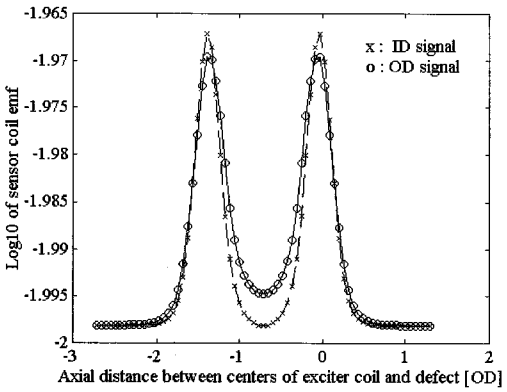
Fig. 4 Comparison of OD defect signals obtained from different exciter to sensor coil spacings



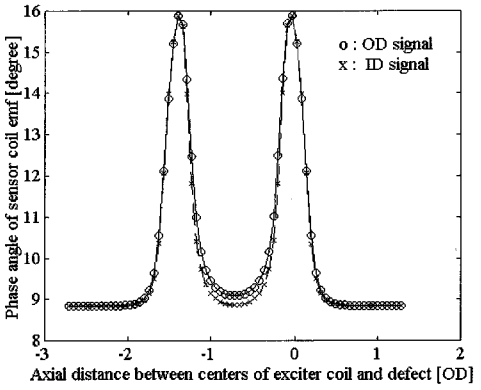
(a) Magnitude signal, spacing=1.14 OD



(b) Phase signal, spacing=1.14 OD

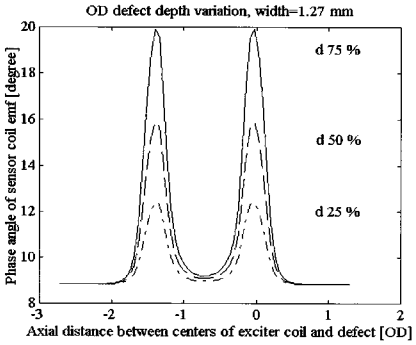


(c) Magnitude signal, spacing=1.43 OD

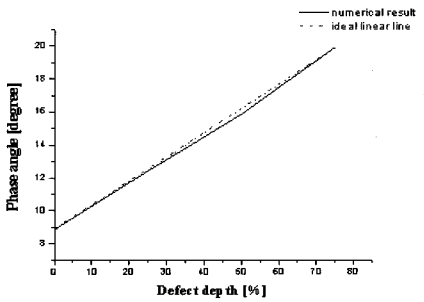


(d) Phase signal, spacing=1.43 OD

Fig. 5 Comparison of ID and OD defect signals with sensor located at transition region(1.14 OD) and remote field region(1.43 OD)



(a) Comparison of phase signals from 25, 50, and 75% depth defects



(b) Phase signal strength variation as the defect depth is increased.

Fig. 6 Linear relationship between phase signal strength and defect depth

영역에 있을 때에 비해 더 작다. 초기단계 검사의 주목적은 결함의 발견에 있으므로 큰 신호가 나올수록 더 좋을 것이다. Fig. 5의 수치해석 결과를 보면 원격장 영역에 센서를 위치시킨 탐촉자는 내부결함과 외부결함에 거의 동일하게 민감한 것을 알 수 있다. 이는 외부결함을 발견하는데 있어 차동와전류 탐촉자에 비해 본 연구에서 설계된 원격장와전류 탐촉자가 더 유리할 것이라는 것을 의미한다.

또 한 가지 확인된 사실은 비자성 관의 원격장와전류 탐상에서도 위상신호의 세기와 결함의 깊이간에는 선형적인 비례관계가 존재한다는 점이다. Fig. 6(a)에 결함의 깊이가 25 %, 50 %, 75 %로 변할 때의 위상신호들을 보였고, Fig. 6(b)에서는 위상신호의 세기와 결함 깊이와의 관계를 보였다. 이 결과를 보면 둘 사이의 관계가 거의 선형적이라는 것을 확인할 수 있으며 위상신호로부터 결함의 깊이를 평가하는데 편리한 특성이라 할 수 있을 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 수치해석 모델링을 통해 비자성체인 증기발생기 전열관에서도 원격장와전류 탐상이 가능함을 보였으며, 이를 위해서는 수백 kHz대의 탐상 주파수를 사용하여야 함을 보였다. 또한 본 연구에서는 비자성 관의 검사에서 여자코일과 센서코일간의 간격을 자성 관 검사 시에 비해 절반 정도로 줄일 수 있음을 보였다. 이러한 결과들을 잘 활용하면 자성체와 비자성체 관을 동시에 검사할 수 있는 원격장와전류 탐상장비를 제작할 수 있을 것이다. 본 연구에서 얻어진 결과들은 전열관의 원격장와전류 탐상이 외부결함의 발견에 탁월한 능력을 발휘할 수 있을 것이며, 결함 깊이와 위상신호가 비례 관계에 있어 결함의 깊이 평가에도 편리할 것이라는 점을 말해 주고 있다.

후 기

이 논문은 1999년도 한국학술진흥재단의 대학교수 해외파견 연구지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

[1] C. V. Dodd, J. R. Pate, and J. D. Allen, "Advancement in eddy current test technology for steam generator tube inspection," Materials Evaluation, Vol. 53, pp. 49-54, (1995)

[2] 송명호, "S/G 세관 관련 국내 현황", 원전 수명연장 관련 주요기기 건전성 평가 세미나, KINS/AR 696, pp. 57-90, (1999)

[3] 임창재, "S/G 세관 ECT 검사 경험", 원전 수명연장 관련 주요기기 건전성 평가 세미나, KINS/AR 696, pp. 91-116, (1999)

[4] T. R. Schmidt, "The Remote Field Eddy Current Inspection Technique," Materials Evaluation, Vol. 42, pp. 225-230, (1984)

[5] W. Lord, Y. S. Sun, S. S. Udpa, and S. Nath, "A Finite Element Study of the Remote Field Eddy Current Phenomenon," IEEE Trans. Magn., Vol. 24, pp. 435-438, (1988)

[6] D. L. Atherton, W. M. Czura, and D. D. Mackintosh, "Remote Field Eddy Current Defect Interaction: Effects on the External Field," Materials Evaluation, Vol. 52, pp. 1288-1291, (1994)

[7] H. Fukutomi, T. Takagi, and T. Aizawa, "Remote Field Eddy Current Technique Applied to Steam Generator Tubes," Electromagnetic Nondestructive Evaluation (III), D. Lesselier and A. Razek, Ed., pp. 292-299, IOS Press 15, Amsterdam, Netherlands, (1999)