

핵연료 피복재 튜브의 원격장와전류 탐상을 위한 차폐된 관통형 탐촉자의 수치해석적 설계

Numerical Design of Shielded Encircling Probe for RFEC Testing of Nuclear Fuel Cladding Tube

신영길*, 신상호**

Young-Kil Shin* and Sang-Ho Shin**

초 록 본 논문에서는 핵연료 피복재 튜브를 검사하기 위한 차폐된 관통형 원격장와전류 탐촉자의 설계과정을 설명하고, 이 탐촉자에 의한 결합신호의 특성을 조사하였다. 먼저, 자기 에너지가 튜브 내부로 관통될 수 있도록 여자코일 외부를 전기적으로 절연된 얇은 철 박판을 적층시켜 차폐시켰다. 그리고 유한요소 해석을 통하여 차폐의 효과와 탐상 주파수를 연구하였으며, 센서코일의 위치를 결정하였다. 그러나 이렇게 설계된 탐촉자를 사용하여 예측된 결합신호는 센서코일이 결함을 지날 때의 결합지시가 명확하지 않았으며, 여자코일이 결함을 지날 때의 결합지시도 차폐체로부터의 영향이 나타나는 등 여자코일로부터 자속이 직접적으로 센서코일에 영향을 미친다는 사실을 알게 되었다. 따라서 센서코일도 여자코일과 같은 형태로 차폐시켰는데 이 차폐의 효과는 놀라운 정도로 결합신호의 특성을 향상시켰다. 최종적으로 설계된 탐촉자를 사용하여 수치 모델링을 수행한 결과는 관내삽입 원격장와전류 탐촉자를 사용하였을 때의 신호와 매우 흡사한 신호특성을 보였다. 즉, 위상신호는 내부결함과 외부결함에 대하여 거의 동일한 민감도를 보였으며, 위상신호의 세기와 결함의 깊이 사이에 선형적인 관계가 있음이 관찰되었다.

주요용어: 핵연료 피복재 튜브, 차폐된 관통형 탐촉자, 원격장와전류 효과, 유한요소 모델링

Abstract : This paper explains the process of designing a shielded encircling remote field eddy current (RFEC) probe to inspect nuclear fuel cladding tubes and investigates resulting signal characteristics. To force electromagnetic energy from exciter coil to penetrate into the tube, exciter coil is shielded outside by laminations of iron insulated electrically from each other. Effects of shielding and the proper operating frequency are studied by the finite element analysis and the location for sensor coil is decided. However, numerically simulated signals using the designed probe do not clearly show the defect indication when the sensor passes a defect and the other indication appeared as the exciter passes the defect is affected by the shape of shielding structure, which demonstrates that the sensor is directly affected by exciter fields. For this reason, the sensor is also shielded outside and this shielding dramatically improves signal characteristics. Numerical modeling with the finally designed probe shows very similar signal characteristics to those of inner diameter RFEC probe. That is, phase signals show almost equal sensitivity to inner diameter and outer diameter defects and the linear relationship between phase signal strength and defect depth is observed.

Keywords : nuclear fuel cladding tube, shielded encircling probe, remote field eddy current effect, finite element modeling

1. 서 론

핵연료가 들어있는 핵연료봉의 피복재 튜브는 치명적인 방사능 오염 방지를 위한 첫 번째 방어벽이다. 핵연료봉은 완벽한 안전성이 유지될 수 있도록 특별히 관리되고 있으며, 미국 Hanford Site에서는 사용을 마친 핵연료봉도 수십년간 5m 이상 되는 물 혹은 저장통 속에 보관해 오고 있는 등 특별한 차폐 시설 내에 보관해 오고 있다. 핵연료 피복재 튜브는 제조과정에서 엄격한 헬륨 누설검사가 실시되고 있으나 원자로 내에서 연소 중에 아주 작은 결함이 가끔 발견되기도 한다[1]. 헬륨 누설검사 이외의 방법으로는 초음파 탐상과 와전류 탐상[1-3]이 흔히 행해지고 있다. 본 연구에서는 원격장 와전류 효과를 이용하는 새로운 검사법을 개발하였다.

원격장과전류 탐상은 관내삽입 탐촉자를 사용하여 송유관이나 개수관과 같은 자성체 관의 검사에 적용되어 왔으며[4], 최근에는 비자성체 관의 검사를 위한 연구도 활발하게 진행되고 있다[5-7]. 자성체 관의 원격장과전류 탐상에서는 매우 낮은 주파수를 사용하는데, 자기에너지가 관을 관통하여 외부에서 축 방향으로 흐르다가 여자코일로부터 관 직경의 2 배 내지 3 배 정도 되는 곳에서 관 내부로 다시 들어오는 간접 경로와 관 내부에서 비교적 좁은 영역에서만 영향을 미치는 직접 경로가 존재한다[8,9]. 이 두 경로를 통해 전파되는 에너지들은 여자코일로부터 관 직경의 1 배 내지 1.5 배 정도 되는 곳에서 만나 서로 상쇄되는데, 이 천이영역(transition region)에서 '자유계곡(potential valley)'과 '위상매듭(phase knot)' 현상이 수치해석 결과의 그림 상에 나타나는 것이 확인된 바 있다[9]. 한편, 비자성체 관에서는 상대적으로 높은 주파수를 사용하여야 원격장과전류 효과가 나타나며, 천이영역은 여자코일로부터 관 직경의 약 0.75 배 정도 되는 곳에서 나타난다는 사실이 보고되었다[6,7]. 원격장과전류 탐상에서는 탐촉자가 여자코일과 센서코일로 구성되는데, 센서코일은 여자코일로부터의 직접적인 영향을 받지 않는 원격장 영역(remote field region)에 위치하여 관을 두 번 관통해 온 자속을 감지하며 탐상신호는 센서코일에 유도되는 기전력을 사용한다. 이러한 특성으로 인해 원격장과전류 탐상신호는 관 내부 및 외부의 결함들을 거의 동일한 민감도로 탐지해 낼 수 있으며, 하나의 탐촉자로 함께 움직이는 센서코일과 여자코일이 결함부위를 지날 때 각각 결함지시를 하여 한 개의 결함에 대해 두 번의 결함지시를 하게 된다. 또한, 여자코일과 센서코일의 위상차를 측정할 위상신호의 세기는 관 벽의

두께(즉, 결함의 깊이)와 비례관계에 있으며, 일반 와전류 탐상과는 달리 코일의 흔들림이나 lift-off 효과에 별 영향을 받지 않는다는 사실이 보고된 바 있다[4].

최근에는 관 구조물에서뿐만 아니라 평판에서도 원격장과전류 탐상이 가능해 졌는데, 이는 자속 혹은 자기 에너지를 피탐상체로 집중시키기 위해 코일 주변을 차폐시켜 주었기 때문이다[10-12]. 핵연료 피복재의 검사에서는 구조상 외부에서의 접근만 가능하므로 본 연구에서는 피복재 튜브를 외부에서 둘러싸는 형태의 관통형 코일(encircling coil)을 여자코일로 배치하고, 코일 외부를 차폐시켜 자기에너지가 튜브 내부로 집중되게 하였다. 또한, 핵연료 피복재의 재료인 지르칼로이(Zircaloy)가 비자성체이므로 원격장과전류 효과가 나타날 수 있는 적절한 탐상주파수를 선정할 필요가 있다. 차폐의 효과와 탐상주파수를 찾기 위해 본 연구에서는 축대칭 유한요소 모델링을 수행하였다. 본 논문에서는 이러한 착안사항으로 출발한 연구가 최종적으로 어떤 형태의 탐촉자를 설계하게 되었는지 그 과정을 보이고, 그 탐촉자를 사용한 검사에서 얻어진 결함신호의 특성이 관내삽입 탐촉자에 의한 원격장과전류 탐상신호의 특성과 거의 유사함을 보였다.

2. 지배방정식 및 유한요소 모델링

원격장과전류 탐상의 지배방정식을 교류정상상태와 관, 코일, 결함의 축대칭을 가정하면 원통좌표계로 다음과 같이 쓸 수 있다[13].

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

여기서 A , J_s , μ , σ , ω 는 각각 벡터자위 및 입력 전류밀도의 회전성분, 투자율, 전도도, 각주파수를 의미한다.

이 식에 weak formulation을 적용하여 유한요소 정칙화 과정[13]을 거치면 다음과 같은 대형 행렬식을 얻게 된다.

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

각 행렬의 요소당 표현식은 다음과 같다.

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

$$C_{ij}^e = \int_{\Omega^e} \frac{1}{\mu} \omega \sigma N_i N_j 2\pi r dr dz \dots\dots\dots (4)$$

$$Q_i^e = \int_{\Omega^e} \frac{1}{\mu} J_s N_i 2\pi r dr dz \dots\dots\dots (5)$$

여기서 N은 사각형 요소의 각 절점에서의 형상함수이다. 식 (2)는 모든 요소들에서의 기여분들을 합쳐서 하나의 행렬식으로 표현한 것으로, 이 식을 풀면 해석영역내 각 절점에서의 벡터자위 값들이 구해진다.

원격장와전류 신호는 센서코일에 유도되는 기전력이므로, 센서코일 영역에서의 절점값들과 Stokes 정리를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{emf} &= -j\omega N_t \int_S (\nabla \times \bar{A}) \cdot d\bar{S} = -j\omega N_t \oint_C \bar{A} \cdot d\bar{l} \\ &= -j\omega N_t A_c 2\pi r_c \end{aligned} \dots\dots\dots (6)$$

여기서 N_t 는 코일에 감긴 권선수이며, A_c 와 r_c 는 각각 요소중심에서의 벡터자위 값과 회전축으로부터의 거리이다. 기전력은 복소수로 계산되므로 크기와 위상을 계산하여 원격장와전류 신호로 사용한다.

3. 차폐된 여자코일의 설계

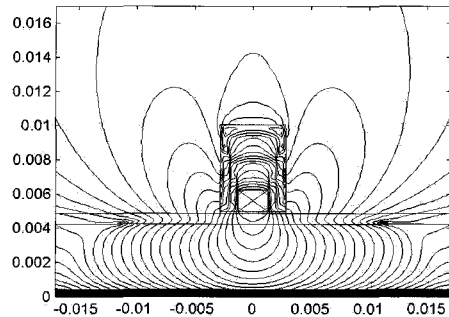
핵연료 피복재 튜브는 구조상 외부에서의 접근만 가능하므로 튜브를 외부에서 둘러싸는 형태의 관통형 코일(encircling coil)을 여자코일로 사용하고, 자기에너지가 튜브 내부로 집중되게 하기 위하여 코일 외부를 전기적으로 절연된 얇은 철 박판을 적층하여 차폐시켰다. 적층 형태를 사용한 이유는 차폐물에 와전류로 인한 열이 발생할 수도 있기 때문이었다. 수치 모델링에는 지르칼로이 튜브를 사용하였으며 모델링에 사용된 재질 특성 및 크기는 Table 1에 보인 바와 같다.

Table 1 Material properties and dimensions used in the numerical modeling

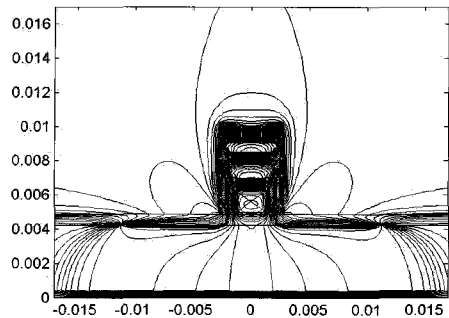
피복재 튜브 전도도	1.4×10^6 [mhos/m]	차폐체 전도도	1×10^7 [mhos/m]
피복재 튜브 비투자율	1	차폐체 비투자율	70
피복재 튜브 외경	9.7 [mm]	차폐체 외경	20.08 [mm]
피복재 튜브 두께	0.635 [mm]	차폐체 폭	5.724 [mm]
코일 외경	12.45 [mm]	코일 폭	2.544 [mm]
코일 내경	9.91 [mm]	코일 권선수	40

핵연료 피복재 튜브에서 원격장와전류 효과가 나타나도록 하기 위해 여러 주파수를 시험해 보고 700kHz의 탐상 주파수를 사용하기로 결정하였다. 이 경우, 표피두께는 튜브 두께의 80%에 해당한다. Fig. 1(a)는 700kHz의 주파수를 사용하였을 때 등자위선을 Log 스케일로 그린 것이고, (b)는 같은 주파수들을 사용하였을 때 등위상선을 그린 것이다. 각각의 그림에서 자위계곡과 위상매듭이 형성되는 것을 볼 수 있다. 이러한 독특한 패턴의 형성은 피복재 튜브에서 원격장와전류 효과가 나타났음을 의미한다.

Fig. 2는 튜브의 바깥과 안쪽 면에 분포된 벡터자위의 크기(a)와 위상(b)을 각각 비교한 것이다. 크기를 로그값으로 표시한 Fig. 2(a)를 보면 차폐된 여자코일 바로 아래에서는 벡터자위가 튜브 내부보다 외부에서 더 크며, 조금 떨어진 곳에서는 튜브 내부에서의 값이 더 크고, 아주 멀리 떨어진 곳에서는 다시 튜브 외부에서의 값이 더



(a) Log scaled equipotential plot



(b) Equiphas plot

Fig. 1 Potential valley and phase knot formed at the frequency of 700kHz. The dimensions are shown in meters

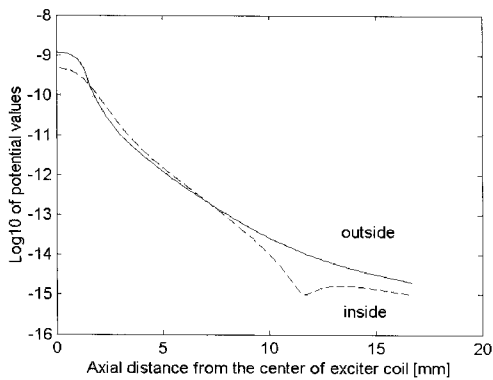
커지는 것을 볼 수 있다. 위상을 비교한 Fig. 2(b)에서도 위상의 급격한 변화가 두 위치에서 발생하여 두 개의 전이영역이 존재함을 알 수 있다. 이는 차폐를 통해 강제로 튜브 내부로 주입된 자기에너지가 차폐영역을 벗어나면 바로 튜브 외부로 나왔다가 관내삽입 탐촉자에 의한 원격장과전류 탐상에서와 같이 여자코일로부터 멀리 떨어진 곳에서는 다시 튜브 내부로 들어가는 것이라고 판단 된다.

4. 센서코일의 위치 결정

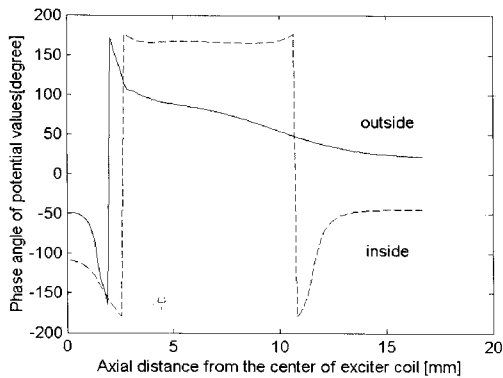
핵연료 피복재 튜브에서는 센서코일 또한 튜브 외부에 위치해야 한다. 따라서 튜브 내부에서의 자위 값이 외부

보다 더 큰 영역에 센서코일이 위치할 필요가 있으며, 그 위치는 Fig. 2에서 살펴 본 바와 같이 자기에너지가 관을 두 번 관통하여 관 외부로 나온 곳에 해당된다. 본 연구에서는 여러 번의 시행착오[14]를 거쳐 여자코일의 중심에서 9.54mm(관 외경의 0.984배) 떨어진 곳에 센서를 위치 시켰다. Fig. 2는 벡터자위의 크기와 위상 값을 도시한 것으로 코일 기전력과 약간의 차이가 있으며, 또한 본 연구에서는 위상정보의 활용에 더 많은 관심을 가졌기 때문에 센서코일의 위치가 이와 같이 결정된 것이다. 센서코일의 크기는 여자코일과 같은 것을 사용하였다.

Fig. 3은 폭 0.64mm, 깊이는 튜브 두께의 50%인 내부 결함과 외부결함을 사용하여 수치적으로 예측한 결함 신호의 크기 및 위상 신호를 보인 것이다. 앞서 소개한 대로 원격장과전류 탐상에서는 센서코일과 여자코일이 결

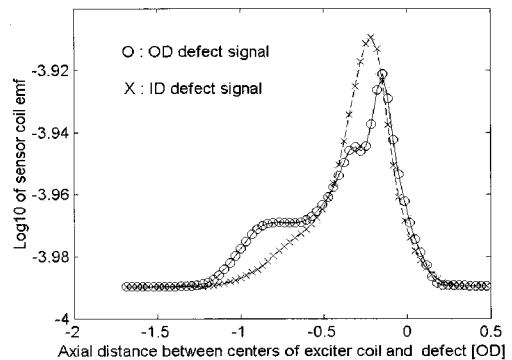


(a) Log scaled magnitude

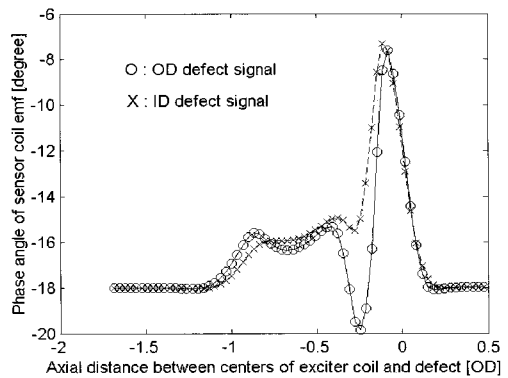


(b) Phase

Fig. 2 Comparison of magnetic vector potentials on the surface outside and inside the fuel cladding tube



(a) Log scaled magnitude signal



(b) Phase signal

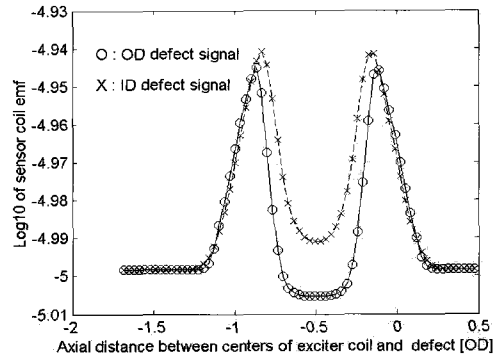
Fig. 3 OD and ID defect signals obtained by sensor coil

함을 지날 때 각각 결합지시가 나타난다. 그 결과 신호상의 두 결합지시 사이의 거리는 두 코일간의 간격에 비례하게 된다. Fig. 3에서 수평축은 여자코일과 결합의 중심간의 거리를 나타낸 것으로 튜브 외경(OD)을 단위로 표시한 것이다. 따라서 0 OD는 여자코일이 결합을 지나고 있다는 것을 뜻한다. 두 코일 사이의 간격을 0.984 OD로 하였고 센서코일을 여자코일 앞에 위치시켰으므로, 수평축상의 -0.984 OD 위치에 결합지시가 나타나야 하는데, Fig. 3에서는 크기신호와 위상신호 모두 결합지시가 명확히 나타나지 않았다. 또한 여자코일이 결합을 지날 때 나타나는 결합지시도 뜻밖의 큰 변화가 나타났다. 의외의 신호변화가 나타나는 위치(-0.29 OD)를 조사해 보니 여자코일의 차폐물 끝 부분인 것을 알 수 있었다. 이 결과들을 분석해 본 결과, 여자코일로부터의 자속이 센서코일에 직접적인 영향을 미치고 있다는 결론에 도달할 수 있었다.

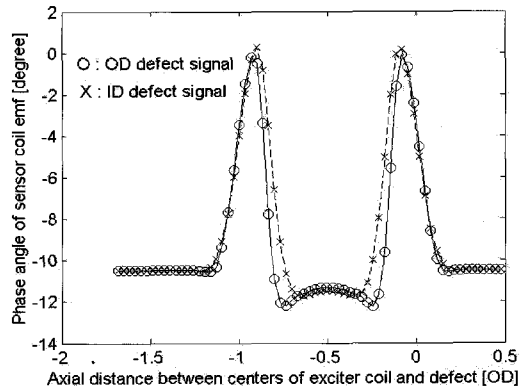
5. 센서코일 차폐를 통한 신호형태 개선 및 내부·외부 결합에 대한 동일 민감도

일반적으로 관내삽입 탐촉자를 통한 원격장과전류 탐상에서는 여자코일 자속의 직접적인 영향을 받지 않고, 관 외부부를 통해 두 번 관통해 온 간접경로의 자속을 감지하기 위해 센서코일을 원격장 영역에 위치시킨다. 핵연료 피복재에서의 센서코일은 여자코일로부터 매우 가까이 위치하기 때문에 여자코일로부터의 자속을 인위적으로 좀 더 철저히 막아줄 필요가 있다. 이러한 이유 때문에 센서코일도 여자코일에 해준 것과 같이 차폐를 하였다. 차폐된 센서로부터 얻어진 결합신호는 Fig. 4에 보인 바와 같이 그 특성이 놀라울 정도로 개선되었다. 첫 번째 결합지시가 명확히 나타났고, 두 번째 결합지시에서도 여자코일로부터의 영향이 제거되었다. 또한, 위상신호를 보면 내부결합과 외부결합이 거의 똑같이 나타났고, 크기신호에서도 약간의 차이는 있으나 결합지시의 세기는 비슷하였다.

차폐의 효과를 좀 더 개선시키기 위해 이번에는 여자코일 차폐체와 센서코일 차폐체 사이의 공간도 철로 차폐시켰다. Fig. 5에 Fig. 1과 마찬가지로 Log 스케일 등자위선과 등위상선을 보였고, Fig. 6에 Fig. 2와 비슷하게 튜브 내, 외부 백터자위의 크기와 위상을 비교하였다. 이 그림들을 비교해 보면 차폐로 인해 첫 번째 천이영역과 두 번째 천이영역 사이의 간격이 훨씬 넓어졌고 센서가



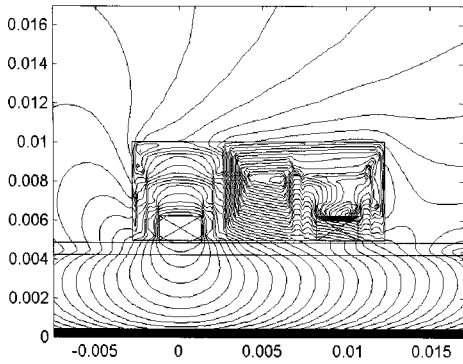
(a) Log scaled magnitude signal



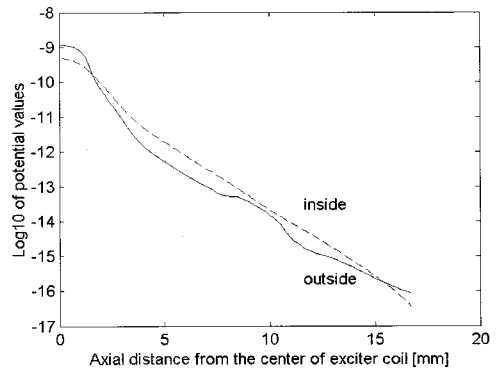
(b) Phase signal

Fig. 4 OD and ID defect signals obtained by shielded sensor coil.

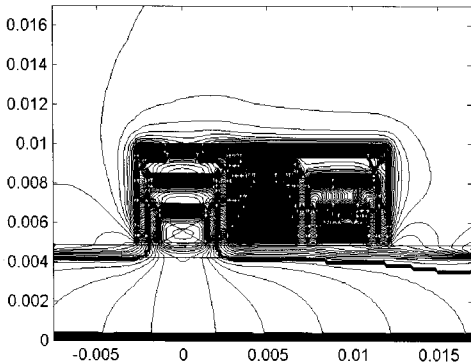
위치하는 지점도 완전히 포함된다는 것을 알 수 있다. 이렇게 설계된 탐촉자를 사용하여 결합신호를 조사하였더니 Fig. 7과 같은 결과를 얻었다. Fig. 4와 비교해 보면, 크기신호에서는 전체적으로 신호레벨이 증가하였고 위상신호에서는 전체적으로 두 코일간의 위상차가 증가하였다. 하지만 두 신호 모두 결합지시와 지시 사이의 신호가 개선되었고 결합지시의 세기 자체는 변화가 없었다. 이 경우에도 위상신호는 내부결합과 외부결합이 거의 똑같이 나타났고, 크기신호도 약간의 차이는 있으나 결합지시의 세기는 비슷하였다. 결합지시와 지시 사이의 신호형태는 내부결합과 외부결합이 다르게 나타났는데, 이 특성은 내부결합과 외부결합의 판별에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.



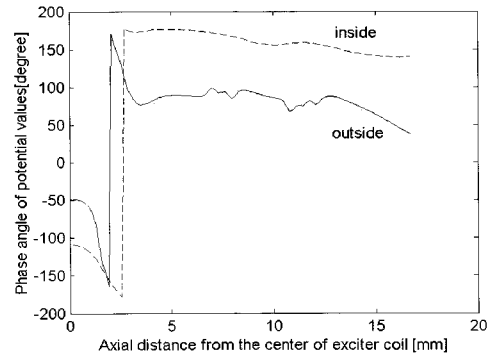
(a) Log scaled equipotential plot



(a) Log scaled magnitude



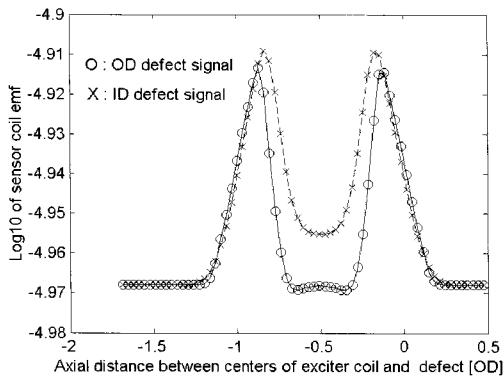
(b) Equipotential plot



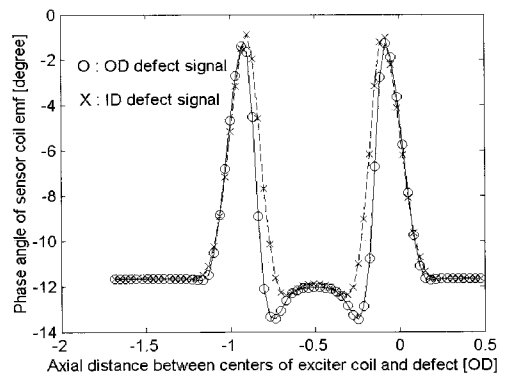
(b) Phase

Fig. 5 Log scaled equipotential plot and equipotential plot when both coils and the region between the two coils are totally shielded

Fig. 6 Comparison of magnetic vector potentials on the surface outside and inside the fuel cladding tube when the totally shielded probe is used.



(a) Log scaled magnitude signal

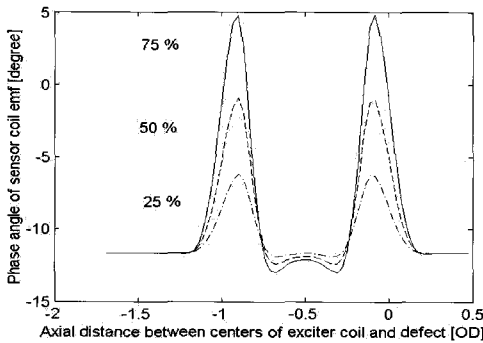


(b) Phase signal

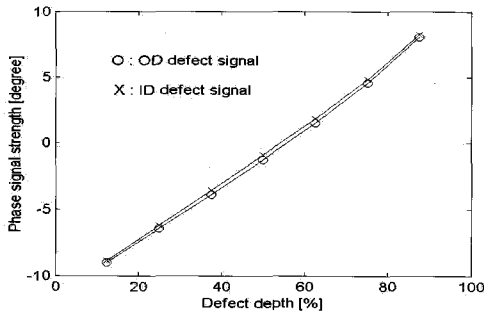
Fig. 7 OD and ID defect signals obtained by the totally shielded probe.

6. 위상신호의 세기와 결함깊이간의 선형적 비례관계

관내삽입 원격장와전류 탐상에서 알려진 유용한 특성이 본 연구에서 설계된 탐촉자를 사용하여 핵연료 피복재 튜브를 검사할 때에도 나타나는지 조사하였다. Fig. 8(a)는 폭이 0.64mm인 결함이 깊이가 25%, 50%, 75%로 변할 때의 위상신호들을 보였고, Fig. 8(b)에서는 같은 폭을 갖는 내부 및 외부결함의 깊이가 12.5%, 25%, 37.5%, 50%, 62.5%, 75%, 87.5%로 변할 때 위상신호 결함지시 세기의 변화를 보였다. 이 결과를 보면 둘 사이의 관계가 거의 선형적인 비례관계라는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성은 위상신호로부터 결함의 깊이를 평가하는데 편리한 특성이라고 할 수 있을 것이다.



(a) Phase signals from ID defects with different depths



(b) Phase signal strength variation as the defect depth changes from 12.5% to 87.5% of the tube wall thickness

Fig. 8 Linear relationship between phase signal strength and defect depth

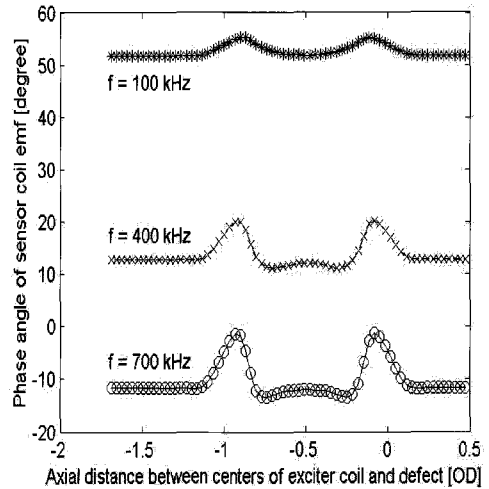


Fig. 9 Comparison of phase signals from an OD defect when different operating frequencies are used

7. 고 찰

본 연구에서는 두 가지 목적의 차폐가 사용되었는데, 하나는 여자코일에서 발생하는 자기에너지를 튜브 내부로 집중시키기 위해 여자코일 외부에 사용되었고, 다른 하나는 여자코일로부터 오는 직접적인 자속이 센서에 영향을 미치지 못하도록 센서코일 외부에 사용되었다. 비록 사용목적은 달랐지만 결함신호에 나타나는 두 결함지시는 동일하였다.

본 연구에서 사용된 탐상주파수는 700kHz로 일반적으로 사용되는 주파수보다 훨씬 높다. 이는 핵연료 피복재 튜브의 두께가 매우 얇고 비자성체이기 때문으로 판단된다. 사용된 탐상주파수의 선정을 정당화하기 위해 100 kHz와 400kHz를 사용하였을 때의 위상신호를 Fig. 9에 비교하였다. 결함지시의 세기가 700kHz일 때 가장 큰 것을 볼 수 있다.

8. 결 론

본 연구에서는 수치해석 모델링을 통해 차폐된 관통형 코일들을 사용한 원격장와전류 탐촉자를 설계하고, 이를 사용하여 핵연료 피복재 튜브의 원격장와전류 탐상이 가능함을 보였다. 본 연구에서 설계된 탐촉자를 사용하여

수치해석적으로 예측된 신호들은 내부결함과 외부결함에 동일한 민감도를 보여 주었고 위상신호의 세기와 결합깊이간에 선형적인 비례관계가 있음을 보여줌으로써, 관내 삽입 원격장와전류 탐상에서의 신호와 거의 비슷한 신호 특성을 가졌음을 입증하였다.

참고문헌

- [1] 서동만, 심기섭, 권우주, 김정하, 박춘호, "봉단 용접부 와전류탐상의 기초적인 연구", 비파괴검사학회지, Vol. 18, No. 2, pp. 85-91, (1998)
- [2] 구대서, 박윤규, 김은가, "와전류시험에 의한 조사핵연료봉의 결함 검사", 비파괴검사학회지, Vol. 16, No. 1, pp. 29-33, (1996)
- [3] J. B. Hallett, et al., "An eddy current probe for separating defects from resistivity variations in Zirconium alloy tube," *Materials Evaluation*, Vol. 42, No. 11, pp. 1276-1280, (1984)
- [4] T. R. Schmidt, "History of the remote field eddy current inspection technique," *Materials Evaluation*, Vol. 47, No. 1, pp. 14-22, (1989)
- [5] J. K. Yi and D. Atherton, "Remote field gap evaluation for nuclear fuel channel tubes," *Materials Evaluation*, Vol. 56, No. 6, pp. 771-773, (1998)
- [6] 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)
- [7] Y. K. Shin, T. E. Chung, and W. Lord, "Remote field eddy current technique applied to the inspection of nonmagnetic steam generator tubes," *Review of Progress in QNDE*, Vol. 20, D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Ed., pp. 392-399, American Institute of Physics, St. Louis, (2001)
- [8] T. R. Schmidt, "The remote field eddy current inspection technique," *Materials Evaluation*, Vol. 42, No. 2, pp. 225-230, (1984)
- [9] W. Lord, Y. S. Sun, S. S. Udpa, and S. Nath, "A finite element study of the remote field eddy current phenomena," *IEEE Trans. Magn.* Vol. 24, No. 1, pp. 435-438, (1988)
- [10] 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 QNDE*, Vol. 16, D. O. Thompson and D. E. Chimenti, Ed., pp. 1061-1066, Plenum Press, New York, (1997)
- [11] Y. S. Sun, W. Lord, L. Udpa, S. Udpa, S. K. Lua and K. H. Ng, "Expanding the remote field eddy current techniques to thick-walled aluminum plate inspection," *Electromagnetic Nondestructive Evaluation*, T. Takagi et al., Ed., pp. 145-152, IOS Press, Amsterdam, Netherlands, (1997)
- [12] Y. S. Sun, T. Ouang, and S. Udpa, "Remote field eddy current testing: One of the potential solutions for detecting deeply embedded discontinuities in thick and multilayer metallic structures," *Materials Evaluation*, Vol. 59, No. 5, pp. 632-637, (2001)
- [13] 신영길, "기전력의 위상측정을 통한 관과 지지대 사이의 부식물 축적정도 평가", 한국비파괴검사학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 181-201, (1996)
- [14] 신영길, "핵연료봉 검사를 위한 외부 원격장와전류 탐촉자 설계", 한국비파괴검사학회 추계학술발표회 논문집, pp. 204-211, (1999)