

비자성체 이중관의 원격장 에너지 전달 경로

Remote Field Energy Flow Path at Nonmagnetic Coaxial Tubes

이재경*

Jae-Kyung Yi*

초 록 공통축 형태로 배치된 비자성체 이중관에 있어서 유한요소해석 상용 소프트웨어와 실험적인 방법을 각각 이용하여 원격장 와전류 에너지의 전달 경로를 연구하였다. 연구결과 이중관에 있어서 원격장 와전류 에너지는 두 관 사이의 공간을 따라 흐르는 것이 아니라, 단일 튜브의 경우와 마찬가지로 외측 튜브의 외면을 따라 흐름을 확인하였다. 이는 원격장 와전류 효과의 관벽투과 특성이 이중관에 있어서도 유효함을 보여주는 것이다. 따라서, 중수로형 핵연료 채널과 같은 이중관 형태를 대상으로 내관 및 외관의 내·외부 결함 탐상, gap 분포 및 지지대의 위치 확인 등에 원격장 와전류 방법의 관벽투과 특성이 응용될 수 있음을 보였다.

주요어: 원격장 와전류 검사, 에너지 흐름, 수치해석, 포인팅 벡터, 이중관, 핵연료 채널

Abstract: The flow of remote field eddy current energy is studied at nonmagnetic coaxial tubes by using both experiments and finite element calculations based on commercial software package. The results showed that remote field eddy current energy at coaxial tubes flow along over the outer surface of external tube, not through the gap between internal and external tubes. This means that the through wall transmission characteristic of remote field eddy current testing (RFECT) is still valid at tube in tube configurations and the RFECT could be potential nondestructive technique for crack detection, spacer location and gap sizing at the coaxial CANDU fuel channel tubes.

Keywords: remote field eddy current testing (RFECT), energy flow, finite element analysis, poynting vector, coaxial tubes, nuclear fuel channel

1. 서 론

배관 형상의 전도성 피검체를 대상으로 관벽투과(through-wall transmission) 특성을 이용하는 원격장 와전류 검사(remote field eddy current testing, RFECT) 기술은 1980년대에 그 원리가 알려진 후 다양한 분야로 응용 연구가 이루어지고 있다[1].

CANDU 원전의 핵연료 채널은 내부의 압력관과 외부의 칼란드리아관으로 구성된 Fig. 1과 같은 이중관

(coaxial tubes) 형태이다. 압력관과 칼란드리아관의 치수 및 재질 특성은 Table 1에 기술되어 있다. Zr-2.5Nb 합금으로 제작되어 핵연료다발과 냉각재를 관 내부에 가진 CANDU 압력관은 중성자속(neutron flux)에 의한 조사(irradiation) 크리프, 중수 냉각재에 의한 부식, 연료하중 지지에 의한 응력 그리고 핵연료 교체 작업 중에 발생되는 압력관 내벽의 마모 등과 같은 극한적인 환경에서 사용되고 있다. 특히, 수평으로 배치된 이중관 핵연료 채널의 고질적인 문제점은 압력관의 처짐(sagging)에 의한 압

력관 누설 및 파열 사고이다[2,3]. 이로 인한 방사선 누출을 방지하기 위해서는 처짐에 기인되는 두 관사이의 간격(gap) 변화와 두 관사이의 간격을 유지시키는 지지대(garter spring)의 위치 변화를 비파괴적으로 정밀히 평가할 필요가 있다.

CANDU 원전의 핵연료 채널과 같이 이중관에 대해서 원격장 와전류 검사 기술의 고유한 특징인 관벽투과 특성이 적용된다면, 내·외관 사이의 gap 측정으로 처짐 정도를 평가할 수 있을 뿐만 아니라 garter spring의 위치 탐지와 내·외관의 내·외부에 존재하는 결함을 효과적으로 평가할 수 있는 유용한 도구가 될 수 있을 것이다 [4,5].

이에 따라, 본 연구는 실험적 방법과 유한요소해석을 이용한 계산적 방법으로 비자성체 이중관에 있어서 원격장 와전류 에너지의 전달 경로를 규명하여, 이중관 핵연료채널 검사에 원격장 와전류 검사 기술의 응용 기반을 제공하고자 시도되었다. 즉, 이중관에서 원격장 와전류 에너지가 내부관인 압력관 내의 여자기에서 내·외관의 관벽을 투과하여 외부관 외측을 따라 흐른 후, 원거리장 영역에서 외·내관 내부로 투과해 전달되는 관벽투과 특성을 확인하고자 하였다.

2. 본 론

이중관 구조에서 원격장 와전류의 관벽투과 특성을 확인하기 위하여, 먼저 유한요소해석을 이용한 수치해석적 계산으로 포인팅(poynting) 벡터를 구하여 원격장 와전류 에너지의 흐름을 가시적으로 표현하였고, 이중관의 내·외부관 상에 각각 에너지의 흐름을 방해하는 전도성 블록을 설치하여 실험적으로 원격장 와전류 에너지의 전달 경로를 확인하였다.

2.1. 수치해석적 원격장 와전류 연구

1970년대 초에 Colorado 대학의 Lord 등에 의하여 자성체 모델을 대상으로 전자기장에 대한 유한 요소해석이 시도되었다. 1980년대 중반에는 RFECT 비파괴검사 방법에 유한요소해석을 적용하였는데, 여자기에서 일정 거리 떨어진 위치에서 전위계곡(potential valley) 및 위상매듭(phase knot)이 형성됨을 발견하여 천이영역의 존재를 보였다. 아울러 전위밀도인 포인팅 벡터를 계산하여 도시함으로써 RFECT의 관벽투과 현상을 가시적으로 보여주었

다. 현재, 유한요소 해석법을 이용한 다양한 종류의 상용 전자기장 계산 프로그램은 원격장 와전류 검사에 있어서 여자기 및 탐지 코일류와 원거리장 계산 등에 유용하게 활용되고 있다.

본 연구는 상용 전자기장 해석 프로그램의 하나인 캐나다 Infolytica사의 MagNet를 이용하여 수행되었다[6]. Fig. 1에 도시된 CANDU 핵연료채널을 대상으로 자기장 해석을 수행하기 위하여 Fig. 2의 (a)와 같은 해석영역을 설정하였다. 여자코일은 배관 축에 일치하는 보빈형으로 외경 96mm 및 길이 30mm이며, 권선수는 20 AWG 규격의 구리선을 두 겹으로 감아 50회로 하였다. Dirichlet 경계조건 설정을 위하여 외관외경(calandria tube outer diameter, CTOD)의 4배 구역까지 모델 영역을 설정하였다. 이러한 원격장 와전류 계산 문제는 축 대칭의 간단한 형상을 대상으로 수행되지만, 해석 부위인 배관 두께 너비가 좁고 길이가 길어서 적절한 mesh의 설계 및 생성이 중요하다. 따라서, Fig. 2의 (b)와 같이 해석 대상인 벽체 내부에서 최소한 2겹 이상의 조밀한 mesh를 생성시키고, 이들이 상호 대칭성을 지니면서 연속적으로 크기가 변화되도록 하였다. 유한요소해석에 사용된 계산모듈(solver)은 TH2D로서, 자기벡터 포텐셜 (magnetic vector potential, **A**)로 표시된 다음과 같은 확산방정식의 해를 풀었다.

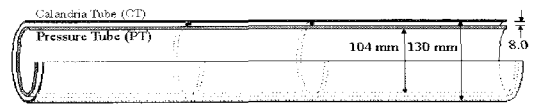
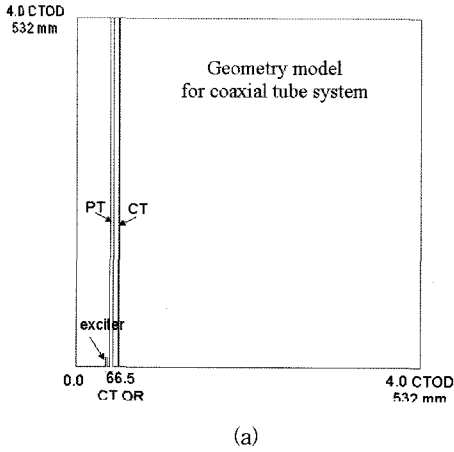


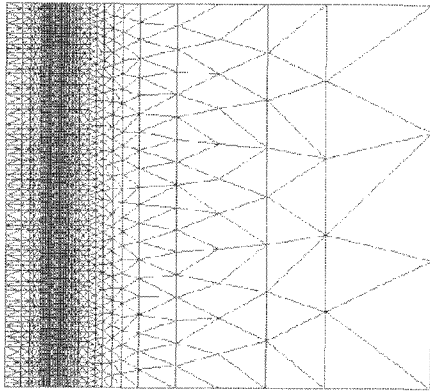
Fig. 1 Typical coaxial CANDU nuclear fuel channel tubes

Table 1 Specifications of coaxial tubes

	pressure tube	calandria tube
material	Zr-2.5%Nb	Zircaloy-2
conductivity ($\sigma, \Omega^{-1}m^{-1}$)	1.89×10^6	1.43×10^6
relative permeability (μ_0)	1.0	1.0
dimensions (mm)	$\varphi_i = 104$ $\varphi_o = 114$ $t = 5.0$	$\varphi_i = 130$ $\varphi_o = 133$ $t = 1.5$



(a)



(b)

Fig. 2 (a) geometry model and (b) mesh generation for coaxial tubes

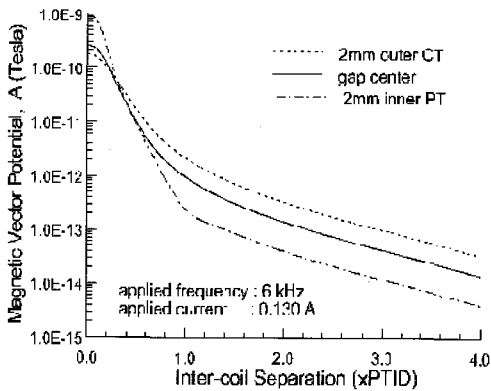
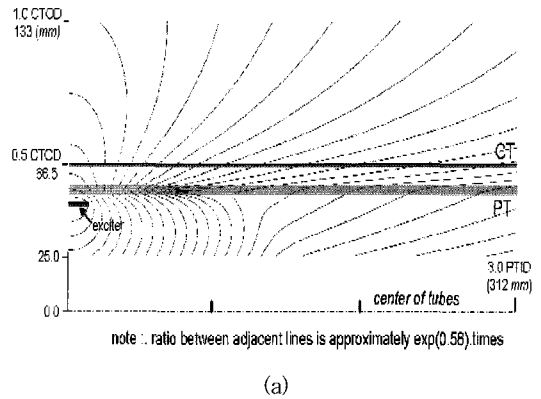


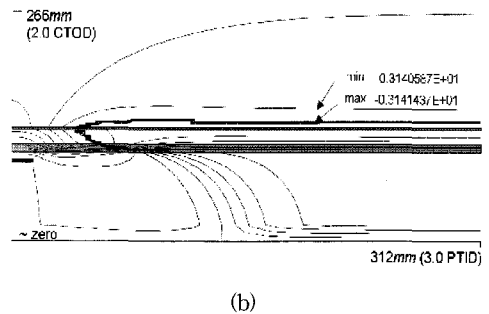
Fig. 3 Magnitude of magnetic vector potential along inter-coil distance between exciter and sensor coils

$$\nabla^2 \mathbf{A} - j\omega \sigma \mu_0 \mathbf{A} = -\mu_0 \mathbf{J} \quad (1)$$

Fig. 1의 이중관 모델을 대상으로 Table 1의 물질 상수를 이용하여 계산한 자기벡터 포텐셜 \mathbf{A} 의 크기와 위상각의 변화를 Fig. 3과 4에 각각 도시하였다. 원격장 형성 영역을 확인하기 위하여 여자기와 탐지기 사이의 거리 (inter-coil separation)를 변화시키면서 이중관의 내부, 중심 그리고 외부를 따라 계산한 자기벡터 포텐셜의 크기를 Fig. 3에 보였다. 6kHz 주파수에서 원거리장은 내관내경 (pressure tube inner diameter, PTID)의 약 1.0배정도 떨어진 거리에서부터 확연히 형성됨을 알 수 있다. Fig. 4의 (a)와 (b)는 각각 이중관의 축 단면에서 벡터 포텐셜의 크기 분포와 등위상각 분포 계산 결과이다. 6kHz 주파수에서는 축을 따라 약 0.75 PTID 정도의 거리에서 원격장 와 전류의 천이영역 특징인 전위계곡(potential valley)과 위상 매듭(phase knot)이 형성되었음을 볼 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 4 Distribution of magnetic vector potential at nonmagnetic coaxial tubes, (a) logarithmic magnitude profile(logA) and (b) equipotential lines of magnetic vector potential

전자기장 계산에서 power의 흐름을 보여주는 시간평균 (time averaged) 포인팅 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$S_{avg} = 1/2 \times \text{real}\{\mathbf{E} \times \mathbf{H}^*\} \quad (2)$$

Fig. 5는 이중관을 대상으로 계산한 포인팅 벡터의 결과이다. 포인팅 벡터의 크기와 방향을 쐐기형(wedge) 화살표를 사용하여 나타내었다. 쐐기형 화살표 폭은 포인팅 벡터 크기의 로그(log₁₀) 값을 갖도록 도시하여 축 방향을 따라 상대적인 power 크기를 비교할 수 있도록 하였다. Fig. 3과 4의 결과에서 유추할 수 있듯이, 축 방향을 따라 천이영역을 거친 후 1.0PTID 이후의 원격장 와전류 형성 영역에서 에너지가 외관 외부에서 내관 내부로 흐름을 Fig. 5에서 볼 수 있다. 이로부터 이중관에서도 원격장 와전류 검사의 관벽투과 특성이 유효함을 확인 할 수 있다.

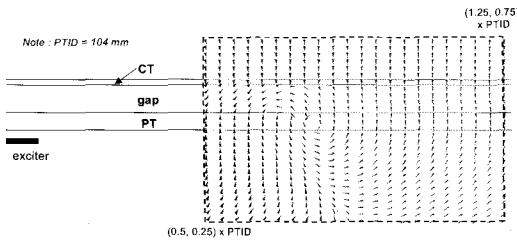


Fig. 5 Time averaged pointing vector which shows power flow at coaxial tubes

2.2. 실험적 원격장 와전류 연구

이중관에 있어서 원격장 와전류를 형성시키는 자기장의 흐름을 실험적으로 확인하기 위하여 원격장 와전류 효과 측정 실험을 수행하였다. 고 출력의 교류 전원을 여자기 코일에 공급하여 원격장 와전류 효과를 발생시킨 후, 방사방향의 자기장(radial direction)을 측정할 수 있는 소형(spot type) 탐지코일과 전단증폭기 및 lock-in amplifier를 이용하여 원격장 와전류 신호의 크기와 위상차를 획득했다. 여자코일은 배관 축에 일치하는 보빈형으로 수치해석 모델링에 사용된 사양으로 제작하였다. 탐촉자 코일은 47 AWG 구리선을 5000회 감은 방사방향 탐촉자 코일로서, 내경 8.0mm, 외경 5.0mm 그리고 길이 5.0mm였다. 탐자 코일이 원격장 영역에 위치하도록 여자기와 탐지코일 사이의 간격은 2.0 PTID로 하였다. 상세

한 실험 장비 및 방법에 대해서는 Yi 및 Atherton에 의해 발표된 논문에 기술되어 있다[4,5]. 자기 에너지의 흐름을 방해 할 수 있는 알루미늄제의 전도성 블록을 Table 2와 같이 제작하여 활용하였다. 이중관 사이와 관내·외부에 전도성 블록을 다양한 조합으로 배치하여 블록의 설치 위치에 따른 원격장 와전류 신호의 변화를 관찰했다. Fig. 6은 블록 배치의 한 예를 보여 준다.

Fig. 7의 (a)와 (b)는 여자기와 탐지코일 사이의 외관(calandria tube) 외면에 전도성 블록을 거치하여 획득한 원격장 와전류 신호의 크기와 위상차 변화이다. 실험에 사용된 4kHz에서 10kHz에 이르는 주파수 범위에서 측정된 RFECT 신호를 보면, 여자기와 탐지코일 사이에서 외관 외부에 위치시킨 전도성 블록이 외관 외부를 따라 축 방향으로 흐르는 자기장의 흐름을 방해하였음을 알 수 있다. 즉, RFECT의 크기신호와 위상차 신호가 모두 외관 외부에 존재하는 전도성 블록 때문에 축 방향으로 코일간(inter-coil) 거리만큼 계곡(valley)을 형성하였음을 알 수 있다. 이는 원격장 와전류 현상에서 배관 외부를 따라 흐르는 자기 에너지의 흐름을 전도성 블록이 방해하여, 원격장에서 신호를 발생시키는 자기에너지의 근원인 간접자기장(indirect field)의 형성을 방해했기 때문이다.

Table 2 Dimensions of Al ring and block

	block shape	ring shape
outer diameter(φ _o , mm)	350	128
inner diameter(φ _i , mm)	135	116
thickness(t, mm)	4.7	4.7

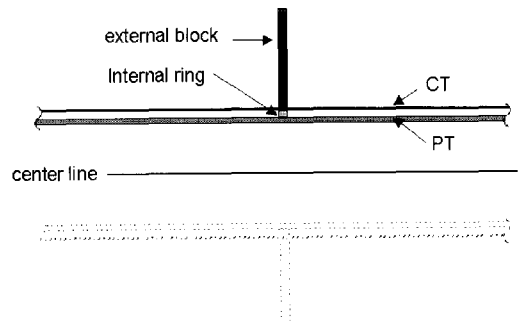


Fig. 6 Experimental design with an external block over an outer tube and an internal ring between two tubes

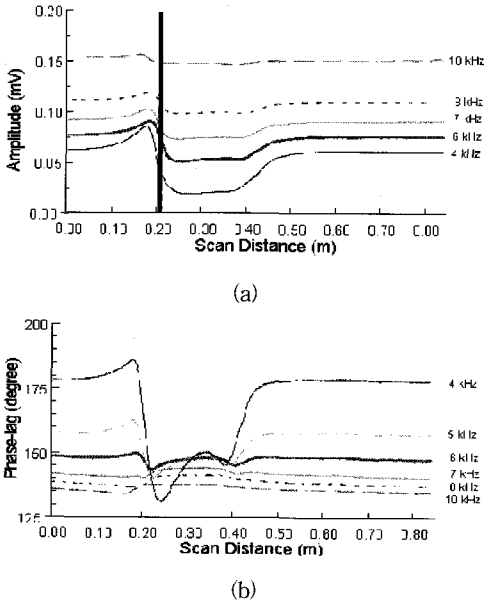


Fig. 7 Remote field eddy current signal with an external block over an outer tube, (a) radial amplitude and (b) radial phase-lag profiles

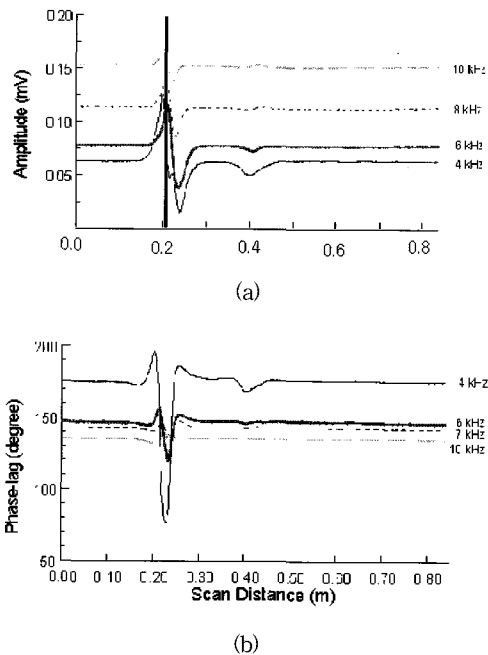


Fig. 8 Remote field eddy current signal with an internal ring between inner and outer tubes, (a) radial amplitude and (b) radial phase-lag profiles

Fig. 8의 (a)와 (b)는 여자기와 탐지코일 사이의 내관 (pressure tube)과 외관(calandria tube) 사이의 공간(gap)에 환형(ring type)의 전도성 블록을 설치하여 획득한 원격장 와전류 신호의 크기와 위상각 변화를 각각 보여준다. 원격장 와전류 검사는 관벽투과 특성을 이용하므로 피검 배관의 두께 변화에 매우 민감하다. 즉, 배관의 두께 변화가 있는 위치를 탐지코일과 여자코일이 각각 통과하게 되면 원격장 와전류의 진폭과 위상차 신호에 변화가 측정된다[7,8]. 본 연구에서는 소형 방사형 탐지코일을 사용하였으므로, 여자코일이 지날 때 보다 탐지코일이 지날 때에 상대적으로 큰 변화가 측정된다. Fig. 8의 (a)와 (b)에 나타난 신호 패턴은 배관 두께 변화에 의한 원격장 와전류 신호의 전형적인 형태와 같다. 즉, 여자기에서 형성된 자기장이 인근의 배관 벽을 포피효과를 극복하여 투과한 후 외부를 따라 흐르다가, 원격장 영역에서 내부로 들어오는 과정에서 환형의 전도성 물체와 상호작용하여 나타난 - 배관 두께 변화에 의하여 나타나는 - 원격장 와전류 신호이다. 이는 원격장 와전류를 형성하는 간접자기장(indirect magnetic field)이 내관과 외관 사이의 공간을 따라 전파되는 것이 아니라, 단일 관에서와 마찬가지로 외관 외부를 따라 흐름을 보여주고 있다.

3. 결 론

이중관 핵연료채널 검사에 원격장 와전류 기술의 관벽투과 특성을 응용할 수 있는 기반을 제공하고자, 실험적 방법과 수치해석적 계산 방법을 각각 이용하여 비자성체 이중관에 있어서 원격장 와전류 에너지의 전달 경로를 연구하였다. 수치해석적 계산으로 포인팅 벡터를 구하여 원격장 와전류 에너지의 흐름을 가시적으로 표현하였고, 이중관의 내·외부관에 에너지의 흐름을 방해하는 전도성 블록을 각각 설치하여 실험적으로 원격장 와전류 에너지의 전달 경로를 확인하였다. 연구 결과 이중관에서도 원격장 와전류 에너지는 내부관인 압력관 내의 여자기에서 내·외관의 관벽을 투과하여 외부관 외측을 따라 흐른 후, 원거리장 영역에서 외·내관 내부로 투과해 전달되는 관벽투과 특성을 지님을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] 이재경, “제 10장, 와전류 및 원거리장 와전류 기술”,

- 배관안전진단기술, pp. 171-189, 창조 과학과 기술사, (2000)
- [2] C. A. Wallis, "Nondestructive examination plays key role in reactor rehabilitation program", CSNDT Journal, January/February, pp. 18-24, (1995)
- [3] P. J. Richinson, H. W. Wong and P. J. Ellis, "Pressure tube life management through proactive maintenance", Proceedings of 4-th Technical Committee Meeting on Exchange of Operational Safety Experience of PHWR, Kyong-Ju, Korea, April 22-27, (1996)
- [4] Jae K. Yi and David L. Atherton, "Remote field gap evaluation for nuclear fuel channel tubes", Materials Evaluation, Vol. 56, No. 6, pp. 771-773, (1998)
- [5] Jae-Kyung Yi and David L. Atherton, "RFEC inspection for coaxial CANDU fuel channel tubes", Proceedings of 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15), Seoul, Korea, August 15-20, (1999)
- [6] D. L. Atherton et al., "Finite element calculations for RFEC inspection tools", Electrosoft, Vol. 2, pp. 157-174, (1991)
- [7] D. L. Atherton and S. Sullivan, "The remote-field through-wall electromagnetic inspection technique for pressure tubes", Materials Evaluation, Vol. 44, pp. 1544-1550, (1986)
- [8] 정진오, 이재경, 김형진, "배관 결함부 원거리장 와전류 신호 정량화 연구", 비파괴검사학회지, 20권, 6호, pp. 555-561, (2000)