

와전류 검사법에 의한 중수로 압력관의
garter spring 위치 탐지

Garter Spring Location of Pressure Tube for PHWR using Eddy Current
Testing Methods

이윤상, 양동주, 정현규

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중수로 압력관과 calandria 관 사이에는 garter spring이 일정한 간격으로 배열되어 있는데, 이 garter spring의 위치가 변하면, 압력관이 처지게 되고 압력관과 calandria 관이 접촉하게 되어 파손이 일어나게 된다. 따라서 압력관에 위치한 garter spring의 위치를 비파괴검사 방법을 사용하여 주기적으로 검사하도록 되어있다. 캐나다의 AECL에서는 send-receive 탐촉자를 사용한 와전류검사법을 적용하여 검사하고 있으나, 이 연구에서는 bobbin differential 형태의 탐촉자를 사용한 와전류검사법을 적용하여, 검사주파수에 따른 신호 진폭을 조사하여 보았으며, 또한 VIC-3D simulation 코드를 사용하여 신호를 모사하여 실험 결과와 비교하여 보았다. 검사주파수 1 kHz에서 11 kHz를 사용하여 실험한 결과, 모든 주파수에서 garter spring 신호가 잘 검출되었으며, 5 kHz에서 최대의 진폭을 얻을 수 있었다.

Abstract

There are garter springs between pressure tube and calandria tube for PHWR. If the space of these garter springs become to be changed, the sagging of tube is caused and the contact between the pressure tube and calandria tube will cause the tube to be failed. AECL has applied the eddy current testing methods using send-receive type probe for this purpose, but this study apply eddy current testing methods using bobbin differential type probe to detection of garter spring location. And we did the computer simulation using VIC-3D code and compared it with experiments results for inspection frequency 1 ~ 11 kHz. The results was that the garter spring signal was successfully detected for every frequency, and 5 kHz was best.

1. 서론

중수로 원자력발전소의 원자로에는 핵연료를 장입할 수 있는 압력관이 있고, 이 압력관의 외부에는 calandria tube가 둘러 쌓여 있는데, 압력관과 calandria tube 사이에는 두 관 사이의 간격을 일정하게 해 주기 위해 설치된 garter spring spacer가 끼워져 있다. 가동 년 수가 증가함에 따라 수소 및 수소동위원소 축적, 그리고 방사선조사 및 경년 열화에 따른 재료의 물성이 변하여, 결함 및 압력관의 처짐과 내경의 변화 등이 발생하게 된다. 또한 일정한 간격으로 설치된 garter spring의 위치가 이동하게 되면, 압력관과 calandria tube에 변위가 발생하여 두 관이 접촉할 수 있다. 따라서 가동중검사 시 비파괴검사 방법을 사용하여 garter spring의 위치를 점검해야 한다. 압력관의 검사는 캐나다 code인 CSA-N285.4에 따라 주기적으로 검사해야 하며 검사 항목에는 초음파 또는 와전류를 이용한 체적검사, 압력관의 처짐상태, garter spring 위치측정, 압력관 두께, 압력관 수소농도 측정 등이 있다.

gartner spring의 위치 측정에는 초음파 또는 와전류를 사용하여 측정할 수 있으나, 초음파 검사법은 와전류검사법(ECT: Eddy Current Testing)에 비해 세밀하나 시간이 많이 걸리고, 압력관의 재질(Zr-2.5% Nb) 및 calandria tube의 재질(Zircaloy-2), garter spring의 재질(Zr-2.5% Nb-0.5% Cu)이 모두 비자성체[1]이므로, 와전류검사 방법을 적용하여 검사하는 것이 유리하다. 캐나다의 AECL에서는 send-receive 탐촉자를 사용한 와전류검사법을 적용하여 검사하고 있으나[2], 이 연구에서는 bobbin differential 형태의 탐촉자를 사용한 와전류 검사법을 적용하기 위하여 탐촉자를 제작하고, 실험과 수치해석을 통하여 최적의 검사 조건을 조사하였다.

2. 와전류검사법의 원리

교류가 흐르는 코일에 전도체를 가까이 하면 코일 주위에 발생된 자계가 도체에 작용하게 된다. 코일의 자계는 교류에 의해 발생된 것이므로 도체를 관통하는 자속의 방향은 시간적으로 변화한다. 이 때 도체에는 도체를 관통하는 자속의 변화를 방해하려는 기전력인 전자기유도 현상이 발생하며 이 기전력에 의해 도체에 형성된 와전류(eddy current)를 이용하여 검사하게 된다. 와전류검사법은 금속 표면의 결함 탐지에 우수한 능력을 갖추고 있기 때문에 많은 분야에서 이용되고 있으며 특히, tube 검사에 많이 활용되고 있어 발전소, 화학 플랜트 등의 tube의 검사에 적용하고 있다. 도체에 형성된 와전류는 와전류의 크기와 주파수, 도체의 전기전도도와 투자율, 시험체의 크기와 형상, 균열과 같은 결함에 의해 변화한다. 따라서 시험체에 흐르는 와전류의 변화를 검출함으로써 시험체에 존재하는 결함의 유무, 재질 평가 등의 시험이 가능해진다.

그러나, 도체에 흐르는 교류 또는 와전류는 도체의 표면층에 집중하는 표피효과가 있어 내부로 들어갈수록 급격히 감소한다. 그 감소의 정도는 주파수, 시험체의 전기 전도도, 투자율 등이 크면 현저히 증가한다. 침투되는 와전류의 표준 침투 깊이(standard depth of penetration)를 나타내는 식은 다음과 같다. [3]

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

여기서, f 는 주파수(Hz), μ 는 투자율, σ 는 전도율, δ 는 침투깊이를 나타낸다. 이 식에서 시험체가 정해지면 표준 침투 깊이는 주파수의 함수이다. 따라서 주파수를 변화시킴으로써 와전류 침투 깊이를 인위적으로 조정할 수 있다.

3. 실험 방법 및 결과

3.1 장비 및 탐촉자

본 연구에 이용된 와전류검사 장치는 tube 검사에 많이 쓰이는 캐나다 R/D Tech 사의 TC5700이며 Fig. 1과 같이 구성되어 있다.

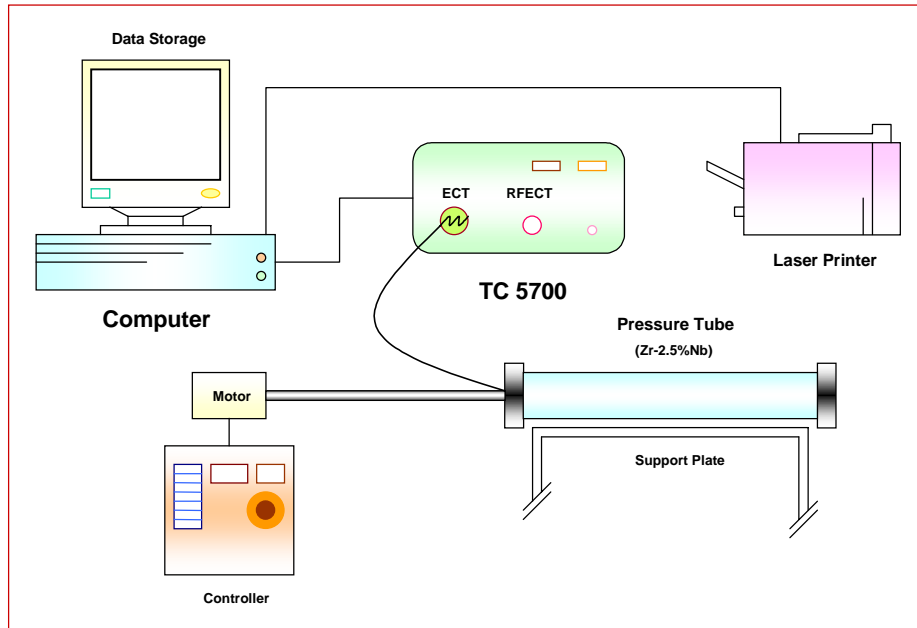


Fig. 1 Schematic diagram of eddy current testing system

탐촉자 몸체는 Fig. 2와 같이 여러 종류의 coil을 갖도록 제작하였다. 이 탐촉자에는 ECT용 coil(Lead coil, Trail coil-2개)을 포함하였고, 탐촉자의 외경은 90 mm로 제작되었다.

이 실험에 사용된 압력관의 치수는 길이 3025mm, 내경이 103mm, 두께가 4.2mm이며, 재질은 Zr-2.5%Nb이다. garter spring의 재질은 Zr-2.5% Nb-0.5% Cu이고, 지름은 5.5mm이다.

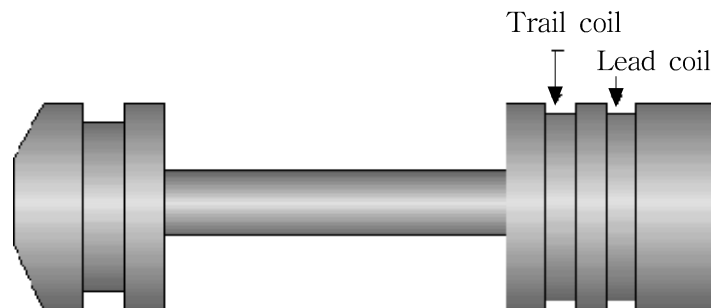


Fig. 2 Probe Schematic

3.2 검사 주파수 및 위상각

garter spring의 신호의 위상각을 맞추기 위해 필요한 기준을 설정하기 위하여, 관 축과 수직으로 지름 3mm의 관통 hole을 압력관 가장자리로부터 400mm의 위치에 뚫었고, garter spring은 압력관 가장자리로부터 600mm 떨어진 곳에 위치시켰다. 시스템의 multi-channel과 multi-frequency set-up 기능을 이용하여 여러 주파수에 대한 신호를 동시에 출력할 수 있도록 설정하였다. 탐상 속도는 500mm/s로 일정하게 유지하였다. 일반적으로 결함을 검출하기 위한 기본주파수는 다음의 식으로 계산을 계산하며[4]. 압력관의 비저항 값인 $56 \mu\Omega$ -cm를 넣고 계산하면,

$$f = \frac{3\rho}{T^2} = \frac{3 \times 56}{(4.2)^2} = 9.5 \text{ kHz} \approx 10 \text{ kHz}$$

약 10 kHz가 되나, garter spring과 같이 외부에 있는 구조물을 검출하기 위한 주파수는 더 낮춰야 한다. 따라서 1, 3, 5, 7, 9, 10, 11 kHz의 주파수에 대해 garter spring의 위치 측정 신호를 수집하였다. hole 신호를 40° 의 위상각을 갖도록 맞춘 후 garter spring의 신호를 100% hole 신호의 위상각을 40° 로 정하기 위해 변환시켜준 위상각과 동일한 위상 값만큼 변환시켰다. 이렇게 위상각을 조절한 후 각 주파수의 신호에 대해 신호의 진폭과 위상각을 측정하였다.

3.3 실험 결과

Fig. 3 및 Fig. 4는 5 kHz 및 10 kHz, 그리고 1 kHz 및 9 kHz에서의 hole 및 garter spring 신호로, 각 주파수에서 위상각은 hole의 신호가 40도가 되도록 조정하였다. 10 kHz에서 garter spring 신호의 진폭은 약 0.76 V로 5 kHz의 신호 진폭 1.28에 비해 60%로 작게 검출되었다. 또한 1 kHz에서는 약 0.65 V로 다시 작게 나타나므로, 5 kHz에서 garter spring 신호가 가장 잘 검출됨을 알 수 있었다.

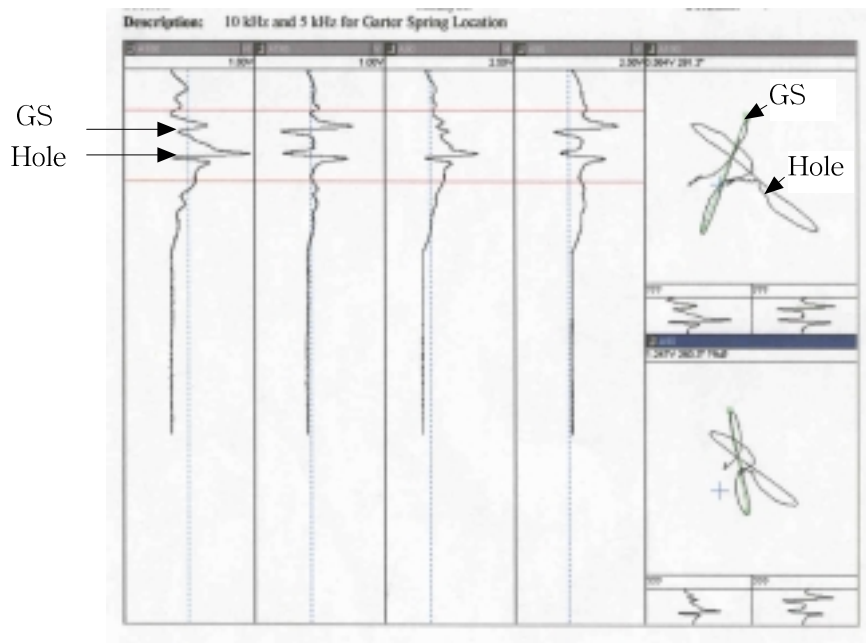


Fig. 3 Hole and garter spring signal for 5 and 10 kHz.

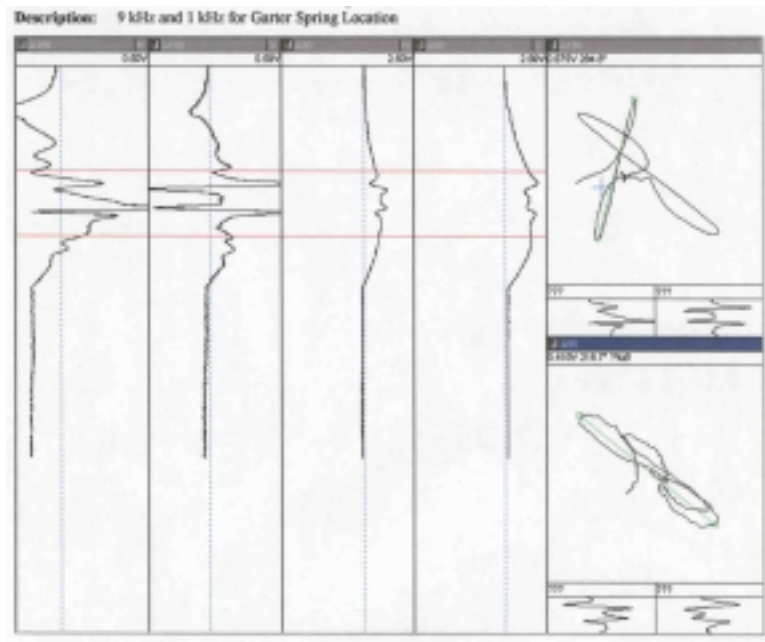


Fig. 4. Hole and garter spring signal for 1 and 9 kHz.

3.4 computer simulation

VIC-3D computer simulation 코드를 사용하여, garter spring의 신호를 1kHz~11kHz에 대해 계산하였다. VIC-3D 코드는 와전류 탐촉자와 결함과의 반응을 체적-적분법으로 계산하는 프로그램으로 간단한 형상을 지닌 문제뿐만 아니라 보다 복잡한 형상에 대하여도 경계-적분법을 추가로 도입하여 와전류 신호를 예측하고 해석할 수 있는 프로그램이다.[5]

본 논문에서는 압력관의 garter spring에 대한 와전류 신호에 대한 모델링 작업을 다음 절차에 따라 수행하였다. Table 1과 같이 매질의 재료와 특성 값 및 압력관의 치수와 와전류 탐촉자의 코일 치수와 위치 및 turn 수를 입력하였다. garter spring 대한 모델은 직경이 5.5 mm인 환봉으로 가정하였다. 이와 같은 입력자료를 사용하여 코일 표면에서의 상호작용을 계산한 결과, 거리에 대한 임피던스 변화를 주파수를 변수로 하여 Fig. 5에 나타내었고, 임피던스 평면에서의 와전류신호는 Fig. 6에 나타내었다.

Table 1. Input parameter for modeling

	pressure tube	calandria tube	garter spring
재 질	Zr-2.5% Nb	Zircaloy-2	Zr-2.5% Nb-0.5% Cu
전도율	1.78×10^6 S/m	1.43×10^6 S/m	1.43×10^6 S/m
외 경	112.4 mm	133 mm	5.5 mm
내 경	104 mm	130 mm	

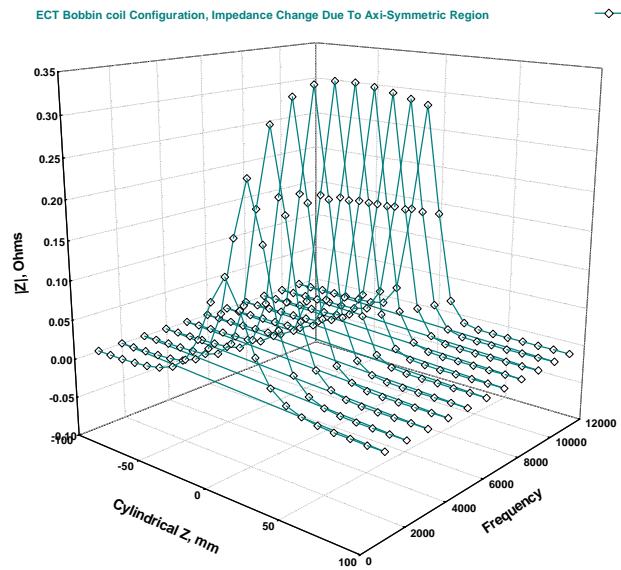


Fig. 5 Simulated Impedance changes in variance with frequency.

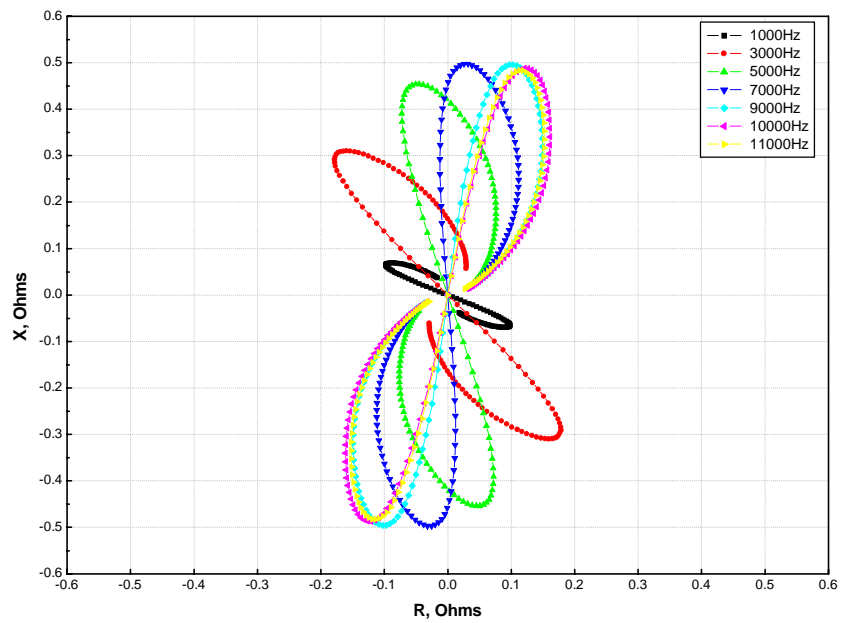


Fig. 6 Garter spring signal from calculation results

3.5 실험결과와 simulation 결과의 비교

garter spring 신호는 주파수를 변경시켰을 때, hole 신호를 기준으로 보면, 주파수에 따라 다른 각도로 돌아간다. 실험에서 측정된 신호 진폭과 위상각의 값을 simulation 결과의 값과 비교해 보았다. Fig. 7에서 주파수에 따른 신호의 위상각의 변화를 보면, 5 kHz에서의 실험 결과 위상각은 약 260도이며, simulation 신호의 위상각을 이 값을 기준으로 맞추어주고, 실험값과 계산값의 위상각의 변화를 살펴보면, 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8에서 주파수에 따른 진폭의 변화를 보면 실험에서는 5 kHz에서 최대 진폭을 얻었으나, 계산 결과 7 kHz에서 최대 진폭을 얻었다. 실험 또는 계산 결과 최대 감도의 주파수 범위는 3 ~ 7 kHz 사이인 것으로 추정된다.

따라서 VIC-3D 코드를 사용하여 와전류의 변화에 따른 코일의 임피던스 값을 계산하면, 실제 실험 값을 추정할 수 있음을 확인하였다.

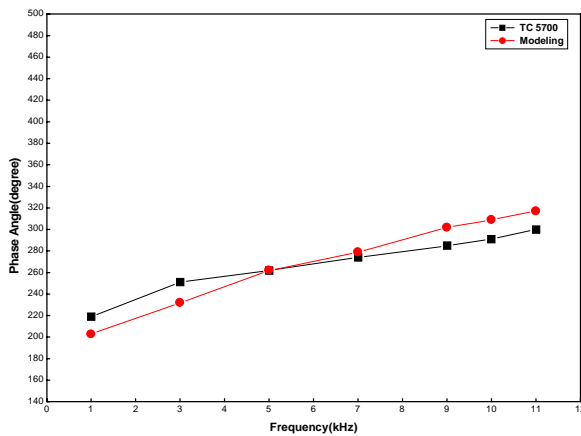


Fig. 7 Comparison of phase variation between experiment and simulated results.

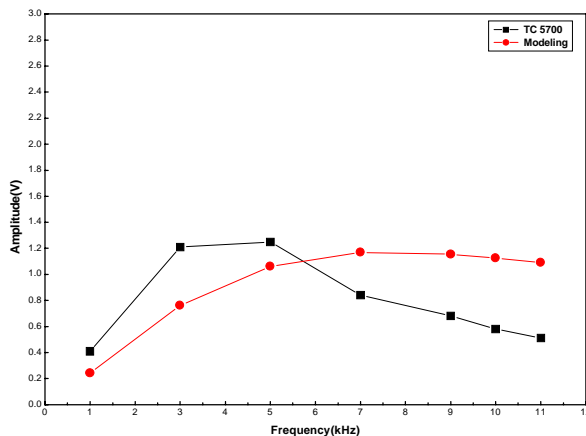


Fig. 8 Comparison of amplitude variation between experiment and simulated results.

4. 결론

중수로압력관의 garter spring의 위치를 탐지하기 위하여 일반적으로 비자성체 검사에 사용되는 와전류검사법을 적용하여 시험해본 결과, 시험주파수 1 ~ 11 kHz 영역에서 잘 검출되었다. 보다 높은 주파수 또는 낮은 주파수에 대해 시험은 하지 않았지만, 시험 결과 얻은 신호 진폭의 변화로 보면 이 범위의 주파수를 사용하면 적절할 것으로 판단된다.

앞으로 send-receive 형태의 탐촉자를 사용한 와전류검사법, 또는 원거리장 와전류검사법도 연구한 후, 서로 비교함으로써, 가장 좋은 검사 방법을 선택하는 것이 바람직할 것이다.

감사의 글: 본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 중장기사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌:

- [1] E.F. Abramhim, "Examination of Garter Springs from CANDU Reactors", AECL-8767, p7, 1985. Nov.
- [2] M.P Dolbey, et al, "Developments in Nondestructive Evaluation of Fuel Channels", Ontario Hydro Research Review, No. 8, pp58-70, 1993. Aug.
- [3] Hugo. L. Libby, "Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods", John Wiley&Sons, p25, 1971.
- [4] Nondestructive Testing Handbook, 2nd Ed. Vol. 4 Electromagnetic Testing , ASNT 1986 pp440
- [5] Kim Murphy and Harold A. Sabbagh, "A Boundary Integral Code for Electromagnetic Nondestructive Evaluation," 12th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, Mar. 18-22, 1996.