

핵연료 채널과 액체주입노즐의 간격 측정을 위한 전자기 모델링

Electromagnetic Modeling for Gap Measurement between Nuclear Fuel Channel and Liquid Injection Nozzle

이동훈, 허형, 정현규

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

가압중수로(PHWR : Pressurized Heavy Water Reactor)의 핵연료 채널은 압력관 (PT : Pressure Tubes)과 칼란드리아관 (CT : Calandria Tubes)로 구성되어 있으며 중요한 안전관련 부품 중 하나이다. 원자로 가동시간이 증가에 따라 열 및 방사능 조사량이 증가하게 되므로 핵연료 채널의 처짐이 발생하게 된다. 이 처짐으로 인하여 액체 주입 노즐 (LIN : Liquid Injection Nozzle)과의 접촉가능성은 발전소 안전성에 문제점을 야기할 수 있다.

이러한 문제점을 해결할 목적으로 기존의 초음파 기술을 보완하기 위하여 전자기장 기술을 적용하였다. 본 논문은 우선 CT와 LIN의 주변의 전자기장 분포를 알기위해 컴퓨터 모델링을 이용하여 전자기장 요소들 즉 자속 밀도와 전류 밀도에 대하여 계산하였고 또한 수신코일에 인가되는 임피던스, 위상각을 계산함으로써 주파수, 코일간의 간격, 코일크기, 코일 배치와 같은 최적 검사 조건들을 도출하였다. CT와 LIN의 간격에 따른 와전류 신호를 예측하였고 그 결과를 향후 실험적 전자기장 측정기술 개발에 기본 자료로 활용할 예정이다.

Abstract

Fuel channels including pressure tube(PT) and calandria tube(CT) are important components of pressurized heavy water reactor(PHWR). A sagging for fuel channel increases by heat and radiation exposure with the increasing operating time. The possibility of contact to liquid injection nozzle(LIN) is thus a critical issue in power plant safety.

In order to solve this safety issue, electromagnetic technique was applied to

compliment the ultrasonic technology. Electromagnetic fields were investigated for the gap measurement between CT and LIN using computer modeling. We calculated the electromagnetic fields, such as, magnetic flux density, current density near the fuel channel and simulated an impedance and a phase angle in receiving coil for obtaining the optimal inspection parameters, such as, frequency, inter-coil spacing, coil size and configuration. This paper shows that the simulated eddy current signals in variance with the CT/LIN gap can be used for baseline data of experimental electromagnetic technique.

1. 서 론

CANDU 원전내의 핵연료 채널은 약 6m 길이의 수평한 압력관(Zr-2.5% Nb 합금)에 핵연료가 채워져 있고 이 압력관과 동일한 중심축 상에 칼란드리아관 (Zicaloy-2)이 존재하는 이중관(coaxial tubes)의 형태로 존재하고 있다. 또한 원자로 내에는 원자로 안전정지물질 주입관(Liquid Injection Nozzle, LIN)을 비롯한 많은 튜브들이 배치되어 있다. 특히 중수로 안전 현안으로 관심있는 내용은 CT와 LIN의 접촉여부를 확인하는 것으로 이들은 서로 90도로 수평교차 배열되어 있으며 원자로 내의 열, 방사능, 하중에 의해 creep 현상이 발생되며 처짐이 일어난다. CT와 LIN은 동일 재료이나 운전온도와 방사능 조사량이 CT가 LIN에 비해서 상당히 열악한 조건에 있으므로 처짐이 심각할 것으로 예상되며 실제 자료도 이를 입증하고 있다. 만약 두 관의 접촉이 발생되면 원전 안전성에 심각한 영향을 미칠 것이므로 두 관 사이의 간격 측정은 필요하다.[1]

캐나다 중수로 원전에서는 수평 중성자속 계측관(Horizontal Flux Detector, HFD) 예비 안내관이나 LIN을 통하여 초음파 탐촉자를 삽입하여 간격을 측정하였다. 그러나 국내 원전의 경우 여타 다른 CANDU Unit들과 설계구조가 달라서 관측공을 이용하여 초음파 탐촉자를 통해 간격 측정을 수행한 것으로 보고되고 있다[2]. 이러한 경우 관측공이 지나가는 근방에서의 처짐과 튜브 간격만 측정되므로 가장 많은 처짐이 예상되는 중앙부의 처짐량을 직접 측정할 수 없는 단점이 있다. 이러한 경우의 보완책으로 CT와 LIN 처짐량을 모델링하여 중앙부에 대한 처짐량을 예측하는 연구가 진행되고 있다.[3]

따라서 본 연구에서는 유한요소 방법을 이용한 Maxwell 3D/2D와 체적 적분법을 이용한 VIC 3D 프로그램을 이용하여 핵연료 채널 주위의 전자기장 분포를 해석하고 실제적으로 탐사를 하기 위한 탐촉자의 설계 조건을 설정함으로써 핵연료 채널에 있는 CT와 LIN의 간격 측정을 위한 원격장 와전류 탐상(RFECT : Remort Field Eddy Current Testing) 센서의 최적값을 도출 하고자 하였다. 이를 위하여 PT와 CT를 지나 외부에 있는 LIN에 의해 영향을 받은 전자기장의 분포를 도출하고 이 변화를 가장 잘 감지할 수

있는 Detector coil의 설계변수를 결정하고자 하였다.

2. 본론

2. 1 핵연료 채널 주위의 전자기장 분포 해석

중수로 원전의 핵연료 채널인 압력관과 칼란드리아 관은 이중관(Coaxial Tubes) 형태로 구성되어 있고 그 위에 90도로 LIN이 약 50mm 떨어진 위치에서 그림 1과 같이 수평 교차되어 있다. 그러나 이중관에 대한 원격장 와전류 에너지 전달 경로에 대한 연구에서 에너지는 두 관 사이의 공간을 따라서 흐르는 것이 아니라 단일 튜브의 경우와 마찬가지로 외측 튜브의 외면을 따라 흐른 후 원격장 영역에서 외·내관 내부로 투과한다는 것을 수치해석과 실험으로 확인되었다.[3]

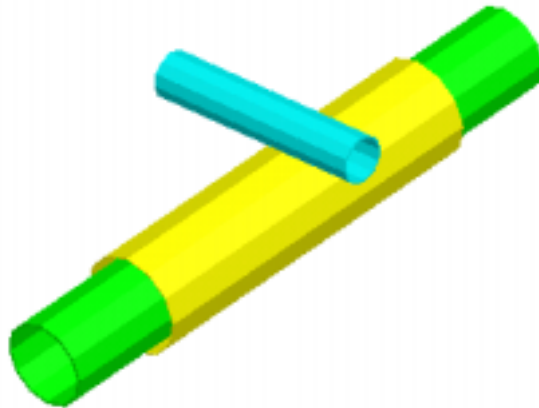


그림 1. 핵연료 채널 주변의 관들에 대한 3D model

이 결과는 이중관 외부에 존재하는 다른 관에 대한 측정 가능성을 제시하였고 본 연구에서는 이 가능성을 바탕으로 LIN 간격에 따라 핵연료 채널 주위의 전자기장 분포가 다를 것이고 이러한 분포의 변화로 인하여 수신되는 신호가 달라지는 것을 확인하여 LIN과 CT와의 간격을 측정하고자 하였다.

핵연료 채널 주위의 전자기장 분포를 도출하기 위하여 Ansoft사의 Maxwell 3D/2D 프로그램을 이용하였다. 이 코드는 exciter coil로부터 형성된 전자기장에 의해 주위 대상체의 반응을 유한요소법으로 계산하는 상용 프로그램으로 전자기장 분포를 보다 정확하게 해석할 수 있다.

유한 요소 해석을 위한 핵연료 채널 주위의 재원은 표 1과 같다.

표 1. 핵연료 주위의 전자기장 특성 및 제원

	압력관(PT)	칼란드리아관 (CT)	LIN	Air
재질	Zr-2.5%Nb	Zircaloy-2	Zr-2.5%Nb	air
OD	112.4	133.0	62.0	
ID	104.0	130.0	56.4	
Thickness	4.2	1.5	2.8	
OR	56.2	66.5	31.0	
IR	52.0	65.0	28.2	
중심으로부터거리	52.0	65.0	97.5+높이간격	
Rel. Permeability	1	1	1	1.0000004
Rel. Permittivity	1	1	1	1.0006
Conductivity	1.96 E+6	1.43 E+6	1.43 E+6	0

모델링의 원활한 구동을 위하여 주어진 형상외의 조건은 임의로 결정할 필요가 있다. 우선적으로 탐상에 사용하게될 주파수를 결정하여야 하는데 전 주파수 범위를 모두 해석하는 것은 방대한 시간 및 노력이 요구되므로 적정 값을 도출한 후 해당 주파수에서 그 주위의 값을 상세하게 작성하고 동떨어진 주파수 범위에서는 몇 부분에 대해서만 계산하였다.

일반적인 ECT에서 사용하는 주파수 결정을 위해서는 침투깊이를 고려하여 계산한다. 식 (1)과 같은 ECT 주파수 결정을 사용하였다.

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

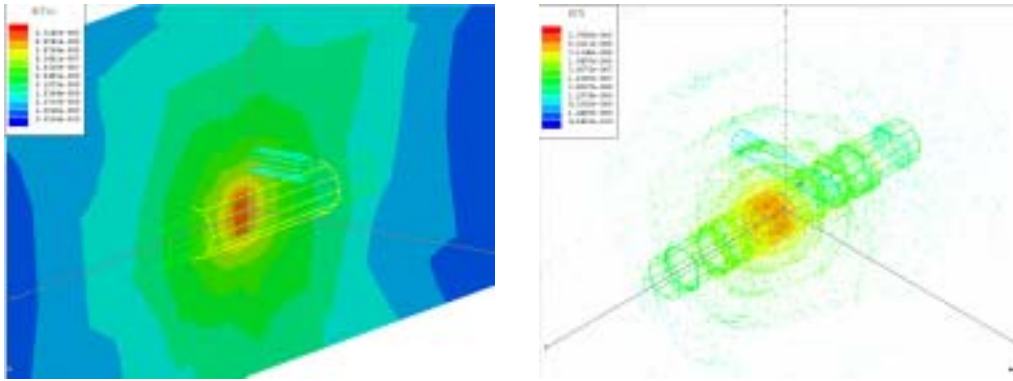
여기서 $\delta =$ 침투깊이, $f =$ 주파수, $\mu = permeability$, $\sigma = conductivity$ 이고 침투 깊이는 관을 투과해 나가서 다시 투과해 들어 와야 하므로 각 두께의 2배인 11.4 mm이고 투자율(permeability) 값은 비 투자율(relative permeability)값에 공기중의 투자율 값인 $4 \pi 10^{-7}$ 값을 사용하고 전도도 값은 PT와 CT의 두께 비에 따라 계산하여 대입하면 약 1 KHz가 된다. 따라서 모델링에서 사용될 주파수는 1KHz로 결정하였다.

탐촉자의 형태는 Bobbin 형으로 가정하였고 exciter와 detector의 크기는 관내에 삽입될때의 여유를 고려해서 표 2와 같이 설정하였다.

표 2. Probe의 제원

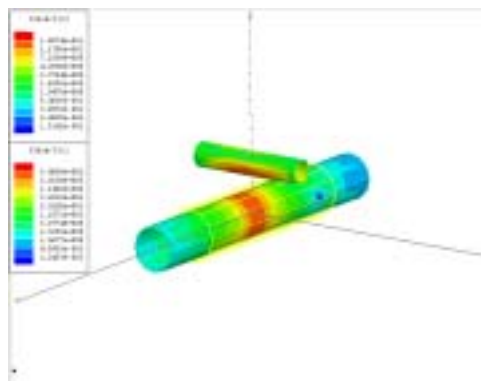
구분	IR	OR	Height
exciter coil	35	44	30
detector coil	35	44	10

이와 같은 입력자료를 이용하여 전자기장 주변에 대한 3차원 전자기장 분포는 그림 2와 같다.



(a)

(b)



(c)

그림 2. 핵연료 채널 주위의 전자기장 분포

(a) Magnetic Flux Density (Plane), (b) Magnetic Flux Density (3D)

(c) Current Density

그림 3은 LIN 간격에 따른 자속밀도 분포를 2차원으로 나타낸 결과이다.

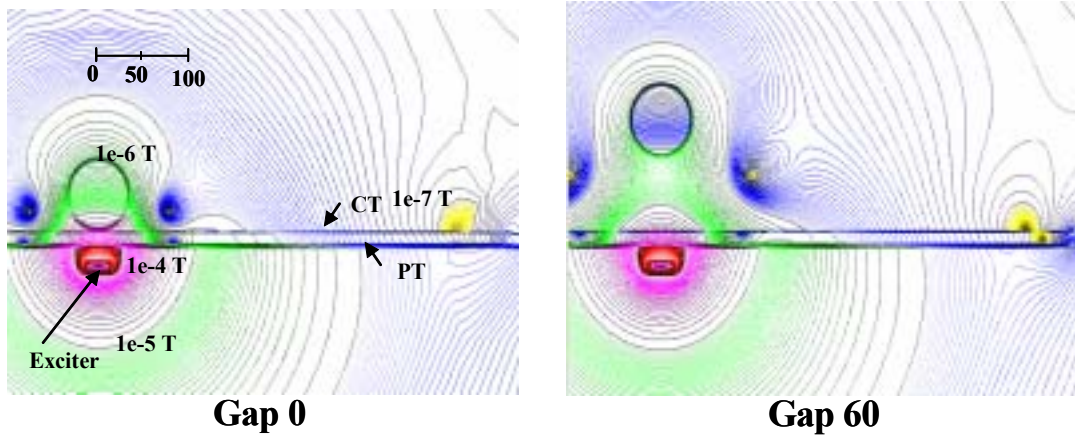


그림 3. LIN 간격에 따른 자속 밀도 분포

2. 2 LIN 간격 측정을 위한 수신 신호 모델링

발전 코일로부터 발전된 원격장 와전류 신호는 압력관과 칼란드리아관을 통과하고 외부에 있는 LIN의 영향을 받고 다시 칼란드리아관과 압력관을 지나 detector coil에 수신된다. 이러한 신호를 모사하기 위해서 본 논문에서는 VIC-3D 프로그램을 이용하였다.

VIC-3D 코드는 와전류 신호의 모델링을 위하여 개발되었으며 전자기학 문제를 식 (2)와 같은 체적적분법을 이용하여 해석하며, 이러한 방법은 빠른 시간에 해석이 가능한 장점이 있다.

$$E_i(\vec{x}) = E_i^0(\vec{x}) - q^2 \sum_j \int_V G_{ij}(\vec{x}, \vec{x}') E_j(\vec{x}') dv'$$

E_i^0 : The i 'th component of the field in the absence of a flaw
 $q^2 = 2s/\delta$ where δ is the skin depth of the material
 G_{ij} : a component of the electric field Green's tensor for the unflawed part.
 The integral is over the flaw volume V .

(2)

LIN과 CT와의 간격 측정을 위한 센서를 설계하기 위하여 각종 설계 변수에 따른 수신 신호의 변화를 살펴보면서 최적의 설계 조건을 보았다.

2. 2. 1 Exciter coil과 detector coil 간의 간격에 따른 신호의 변화

그림 4.는 발전 코일과 수신 코일간의 간격을 결정하기 위하여 수신 코일의 위치를 변화 시켜 가면서 계산한 결과이다.

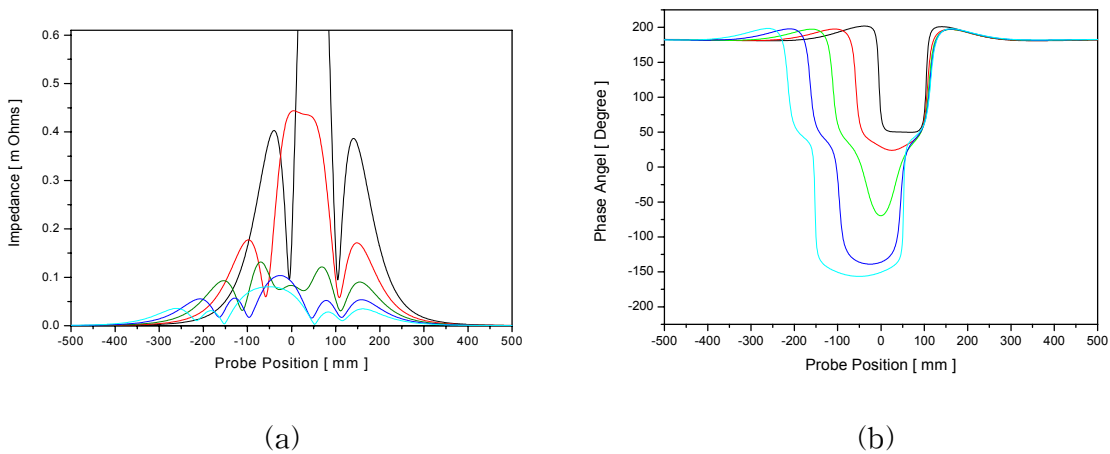


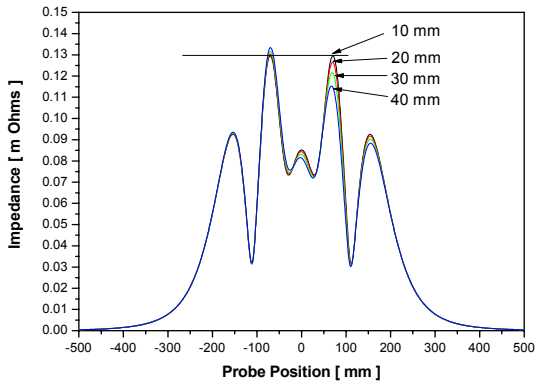
그림 4. 발진코일과 수신코일의 간격변화에 따른 신호 (a) Impedance (b) Phase

원격장 와전류 센서는 송신코일(Exciter coil)과 수신 코일(Detector coil)로 크게 구분 지을 수 있다. 원격장 와전류는 일반적으로 송신 코일로부터 직경 거리만큼 떨어 진부분 부터 발생하는 것으로 알려져 있다.[2] 따라서 본 연구의 대상체중 최외곽에 위치하여 있는 CT관을 기준으로 하여 볼 때 송신 코일로부터 약 100mm 떨어진 부분에서부터 관 외부에 있는 LIN의 영향을 잘 받을 것으로 판단된다. 그림 4에서 보여주는 결과와 같이 두 코일간의 간격이 100mm 일때는 수신 신호는 매우 크게 작용 하지만 LIN의 간격을 예측 하기 위해서는 부적절한 것으로 보이며 300mm의 경우는 LIN의 위치와 상당히 떨어진 부분에서부터 신호가 나오는 것을 알 수 있다. 이렇게 넓은 부분에 걸쳐서 신호가 나오면 우선적으로 신호가 작다는 조건을 감안하더라도 노이즈의 영향을 많이 받을 수 있다. 따라서 양 코일간의 간격은 150~200 mm정도가 적절하다고 판단된다.

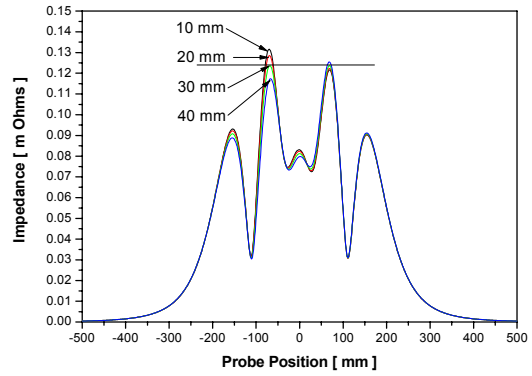
2. 2. 2 송·수신 코일부의 사이즈에 따른 신호 특성 평가

각각의 코일 부에 대해서는 여러 가지 설계 변수가 있을 수 있다. 일반 동선(銅線)을 사용한다고 가정하고 코일의 직경과 전체 코일의 크기가 고려되어야 한다. 하지만 가해주는 전류 등을 고려한다면 코일의 직경도 어느 정도 결정되므로 따라서 코일 전체 크기에 대해서 고려하여야 한다.

그림 5와 그림 6은 송·수신 코일의 크기에 따른 수신 신호를 나타내고 있다.



(a) 송신 코일



(b) 수신 코일

그림 5. 송수신 코일의 크기에 따른 수신 신호

그림 5 (a) (b)에서와 같이 송신코일과 수신코일의 크기는 신호에 큰 영향을 미치지 않으며 다만 송신 코일과 수신코일의 크기가 동일하면 완벽한 대칭형 신호를 나타낸다. 따라서 CT와 LIN의 간격 측정을 위한 센서의 폭은 동일한 사이즈로 20~30 mm가 적절할 것으로 판단된다.

2. 2. 3. LIN 간격에 따른 와전류 모델링 신호

코일의 크기와 코일간의 간격이 결정되면 원격장 와전류 센서 외형의 설계가 가능해진다. 그림 6은 이렇게 결정된 센서사양으로 CT와 LIN 간격에 따른 와전류 신호의 모델링 결과이다.

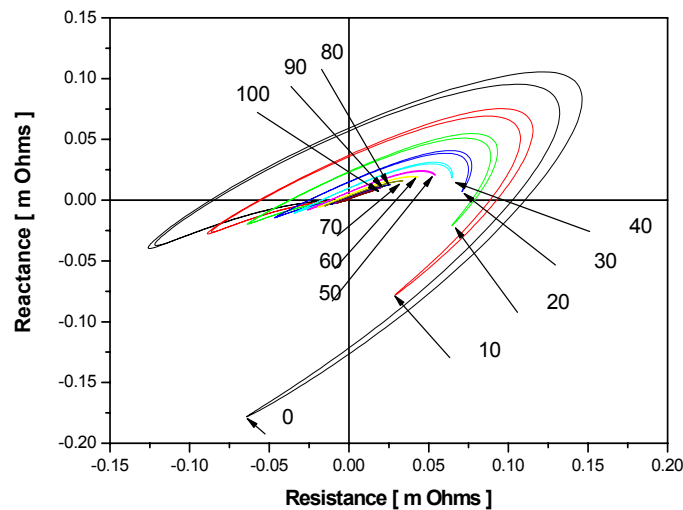


그림 6. CT와 LIN의 거리에 따른 수신신호 모델

3. 결과 분석

본 연구에서는 CT와 LIN 간격을 측정할 수 있는 원격장 와전류 센서의 제원을 도출하고자 하였다. 모델링을 이용하여 exciter coil과 detector coil간의 간격에 따른 신호를 제시하였고 각 coil의 크기에 따른 신호의 변화도 모사 하였다. 이렇게 설계된 센서를 이용하여 실험 수행 시 최종적인 목표는 수신되는 신호로부터 CT와 LIN의 간격을 도출해 내는 것이다. 이를 위해서는 그림 6에 나타난 신호로부터 CT와 LIN의 간격에 따라 발생하는 신호의 특징을 추출해 내야 할 것이다. 그 중 본 연구에서는 CT와 LIN의 간격에 따라 최대 임피던스의 변화를 계산하여 그림 7에 나타내었다.

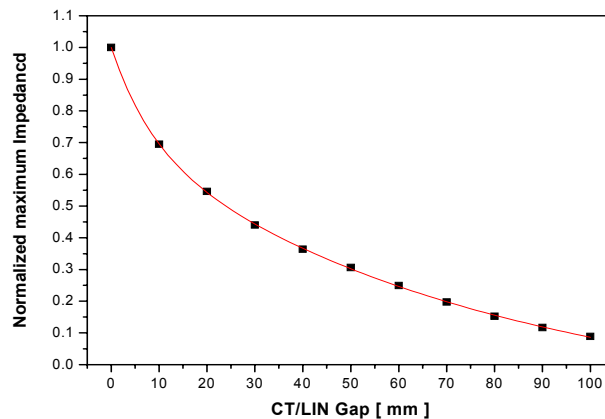


그림 7. CT와 LIN의 거리에 따른 최대임피던스의 변화

그림 7에서는 CT와 LIN의 거리가 가까워질수록 최대 임피던스의 변화 폭이 지수함수의 형태로 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

핵연료 채널의 CT와 LIN 사이의 간격을 측정하기 위하여 이중관 투과성이 우수한 원격장 와전류 기술을 선택하였고, 핵연료 채널 주변의 전자기장 분포 계산과 수신 코일에서의 임피던스를 모델링 함으로 CT/LIN 간격 신호를 정밀하게 검출할 수 있는 최적의 와전류 탐촉자를 설계하기 위해 모델링을 이용하여 기술 사양을 도출하였다.

전자기장 분포와 수신신호의 임피던스 변화 패턴이 해당 위치에 따라 잘 일치하는 것으로 나타나 서로 다른 프로그램간의 상호 유효성을 확인되었다. 와전류 탐촉자를 설계

내용으로는 송신 코일과 수신코일의 간격은 신호 특징을 잘 나타내면서 비교적 큰 신호를 나타내는 영역은 두 코일간의 간격이 150mm에서 200mm 사이로 적합한 것으로 판정하였고 송수신 코일의 크기는 수신신호에는 큰 영향이 없는 것으로 확인하였다. 그리고 CT와 LIN의 간격에 따른 최대 임피던스는 가까워질수록 큰 차이를 보이고 멀수록 그 차이가 점점 작아지는 지수 함수의 형태를 보였다. 따라서 CT와 LIN 사이의 간격 측정 시에는 가까울수록 정밀한 값을 도출해 낼 수 있을 것으로 사료된다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 정현규, 이운상, 이동훈, 허형, 정용무, “교차 배열된 지르코늄관 간격 측정을 위한 전압 평면에서의 신호해석” 한국 비파괴검사학회 2002 춘계학술대회 논문집, pp 173~176, 2003.
2. T.R Kim et al., “Ultrasonic Measurement of Sagging of Calandria Tubes and Liquid Injection Shutdown System Tubes Using Newly Developed Device” 15th world conference of NDT, Rome, Oct 15-21, 2000.
3. 이재경, “비자성체 이중관의 원격장 에너지 전달 경로” 한국 비파괴검사학회지 Vol 21, No. 5, pp 526~531, 2001.
4. 이종포, 박철훈, 엄병국, 김태룡, 손석만, 이준신, “중수로 칼란드리아 처짐 측정을 위한 자동 초음파 계측장비” 한국비파괴검사학회 2000춘계학술발표집, pp 19~28, 2000
5. D.J. Hagemaiier, “Eddy Current Impedance Plane” Materials Evaluation, Vol. 41, pp 211~218, 1983.
6. Y.s Sun, “Modeling Remote Field Eddy Current Effect”, 14th World Conference on Non Destructive Testing, New Delhi, India, December 8~13, 1996.
7. D. L. Atherton et al., “ Finite element calculations for RFEC inspection tools”, Electrosoft, Vol. 2, pp. 157~174, 1991.
8. 이재경, “와전류 및 원거리장 와전류 기술”, 배관안전진단기술, pp 171~189, 도서출판 창조, 2000.