

## 원격장 와전류 기술을 이용한 인접 배관의 간격 측정

이동훈\*, 박교식\*, 조영도\*, 김형호\*, 정현규\*\*

\*한국가스안전공사, \*\*한국원자력연구소

### Gap Measurement of Neighboring Tube using Remote Field Eddy Current Technique

D.H Lee\*, K.S Park\*, Y.D Jo\*, H.H Kim\*, H.K Jung\*\*

\*Korea Gas Safety Corporation, \*\*Korea Atomic Energy Research Institute

#### 1. 서론

산업설비 혹은 지하에 매설되어 있는 배관들 주위에는 대부분 다른 관들이 존재 하게 된다. 이러한 인접된 배관이 다른 관과 접촉되는 경우에는 접촉면에서 부식이 발생하거나 작동능력에 영향을 주게 된다. 따라서 이러한 배관들은 설계나 시공당시에는 안전성을 고려하여 충분한 이격거리를 두고 제작하도록 되어있다. 그러나 사용시간이 증가함에 따라 설비같은 경우에는 열 혹은 방사능과 같은 재료에 변형을 초래하는 외부 영향을 받게 된다. 특히 수평으로 배치되어 있는 긴 배관의 경우 자중에 의한 처짐으로 인접되어 있는 배관과의 접촉 가능성이 매우 높으며, 지하에 매설되어있는 배관과 같은 경우에는 산업설비와는 달리 처짐이나 이동과 같은 변형은 비교적 크기 않으나, 추가매설이나 다른 용도의 관이 주위에 매설되는 경우에는 설계초기에 고려된 간격을 유지할 수 없는 경우가 발생한다. 이러한 인접된 배관이 다른 관과 접촉되는 경우에는 접촉면에서 부식을 초래 하므로, 관심배관과 인접한 배관의 간격을 측정하여 과도하게 근접하였을 경우에는 사전에 확인하여야 한다.

본 논문에서는 중수로발전소의 핵연료 채널과 그 주위에 교차 배열되어 있는 중성자속 측정 안내관에 대해 고려하였다. CANDU 원전내의 핵연료 채널은 약 6m 길이의 수평한 압력관(Zr-2.5%Nb 합금)에 핵연료가 채워져 있고 이 압력관과 동일한 중심축 상에 칼란드리아관(Zircaloy-2)이 존재하는 이중관(coaxial tubes)의 형태로 존재하고 있다. 또한 원자로 내에는 원자로 안전정지물질 주입관(Liquid Injection Nozzle, LIN), 수평 중성자속 측정 안내관(Horizontal Flux Detector guide tube, HFD), 수직 중성자속 측정 안내관(Vertical Flux Detector guide tube, VFD)등 많은 종류의 튜브들이 배치되어 있다.

중수로 원자로 내부의 핵연료 채널은 수평 배열되어 있으며 원자로 내의 열, 방사능, 하중에 의해 creep현상이 발생되며 처짐이 일어난다. 채널내의 CT는 HFD에 비하여 운전온도와 방사능 조사량이 CT가 HFD에 비해서 상당히 열악한 조건에 있으므로 처짐이 심각한 것으로 파악되고 있다. 이러한 두 관의 접촉은 HFD의 기능상실 뿐만이 아니라 CT의 마모에 의한 결함 발생이 예상되므로 원전의 안전성에 중대한 영향을 미치게 되므로 두 관사이의 간격 측정은 필요하다.

Fig. 1은 중수로 원전 핵연료 채널 내부의 구조를 나타낸 것으로 380개의 압력관과 칼란드리아관, 관측공(View port), 지지구조물 그리고 원자로 안전정지물질 주입관인 LIN, 중성자속 측정 안내관 등으로 구성되어 있다.

Fig. 2는 중수로 원자로 내부를 수직단면으로 보았을 때 원자로 내부에 수평으로 설치되어 있는 LIN과 HFD의 배치를 나타내고 있다.

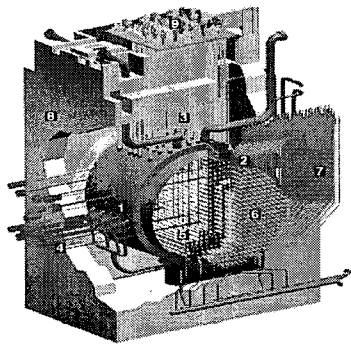


Fig. 1 중수로 원자로 내부구조

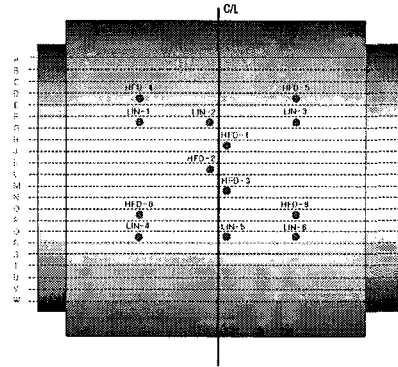


Fig. 2 원자로 내의 HFD 및 LIN 배치도

## 2. 신호 모델링

### 2.1 HFD 안내관 및 핵연료채널의 제원 및 전자기적 특성

중수로 원전의 핵연료 채널인 압력관과 칼란드리아관은 이중관(Coaxial Tubes) 형태로 구성되어 있고 그 위에 90도로 HFD 안내관이 약 70 mm 떨어진 위치에서 수평 교차되어 있다. 각관의 형상 및 전기적 특성은 Table 1과 같다.

Table 1 핵연료채널 주변의 전자기장 특성상수 및 크기

	압력관(PT)	칼란드리아관 (CT)	HFD
재질	Zr-2.5%Nb	Zircaloy-2	Zircaloy-2
Thickness	4.2	1.5	0.5
외경	112.4	133.0	17.5
내경	104.0	130.0	16.5
Rel. Permeability	1	1	1
Rel. Permittivity	1	1	1
Conductivity	1.96 E+6	1.43 E+6	1.43 E+6

### 2.2 체적적분법을 이용한 HFD 안내관 신호 모델링

VIC-3D 코드는 와전류 신호의 모델링을 위하여 개발되었으며 전자기학 문제를 식 (1)과 같은 체적적분법을 이용하여 해석하며, 이러한 방법은 단시간에 해석이 가능한 장점이 있다.

$$E_i(\vec{x}) = E_i^0(\vec{x}) - q^2 \sum_j \int_{V'} G_{ij}(\vec{x}, \vec{x}') E_j(\vec{x}') dv' \quad (1)$$

여기서  $E_i^0$ 는 공간내의 전자기장의 1차 성분을 나타내고,  $q^2$ 은 재질내의 침투깊이와 전류의 비를 나타내며,  $G_{ij}$ 는 체적 및 방향에 대한 전자기장 Green's tensor항을 나타낸다.

본 연구에서는 체적적분법을 이용한 임피던스 계산 프로그램인 VICTOR software사의 VIC-3D를 사용하였다. 체적적분법은 FEM tool들과는 달리 다양한 Post processing을 할 수는 없지만 수신되는 신호의 예측에는 정확하면서 빠른 결과를 도출해 주는 장점이 있다. 따라서 센서의 개발 및 최적의 실험 조건 도출에 널리 사용되고 있다.

CT와 HFD의 간격 측정을 위한 센서를 설계하기 위하여 각종 설계 변수에 따른 수신 신호의 변화를 살펴보면서 최적의 실험 조건을 도출 하고자 하였다.

### 2.2.1 주파수에 따른 신호진폭 변화

HFD의 간격을 측정하기 위해서는 우선적으로 HFD에 의한 신호가 수신되어야 하며, 가장 그 변화를 잘 나타낼 수 있는 주파수를 선정하여야 한다.

간격에 따라 변화하는 신호를 파악하기 위해서는 일반적으로 수신신호의 크기가 커야 한다. HFD 안내판 모델링 신호는 저항과 리액턴스로 나타내는 임피던스 평면에 나타난다. 그러나, RFEC probe에 수신되는 신호는 발생한 전자기력에 의하여 인접판에 영향을 받은 변화된 전자기력 값이다. 전자기력 값은 수신코일에 변화하는 임피던스와 코일내에 흐르는 전류값의 곱으로 분리할 수 있으나, 실험적 결과에서는 유도된 전자기력으로 표현하는 것이 바람직하다. 따라서 모델링 결과와 실험결과를 비교하기 위해서는 모델링 결과에서 나오는 임피던스 값에 모델링에서 사용된 전류값 1 암페어(A)를 곱하여 전압평면으로 나타내어 모델링 결과와 실험결과를 비교하기에 용이 하도록 하였다. Fig. 3은 HFD간격이 10mm인 경우에 주파수에 따른 수신 전압의 변화를 나타내고 있다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 작동 주파수 3 kHz인 경우에 HFD신호가 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 최적의 신호 도출을 위해서는 저항, 리액턴스, 위상 등을 비교하여 그 변화량이 가장 큰 주파수를 선정하였다.

### 2.2.2 주파수에 따른 위상(Phase)의 변화

위상의 분석은 전자기 검사법에서 신호의 특성을 분석하는데 매우 중요하게 사용된다. 그 이유는 신호의 크기는 주변의 영향을 매우 많이 받지만, 위상의 경우는 각각의 결합 특성들의 정보를 그대로 가지고 있기 때문이다. Fig. 4는 HFD 간격이 10mm인 경우 주파수에 따른 위상의 변화를 나타내고 있다. Fig. 4에서 보이는 바와 같이 위상의 변화는 주파수가 높아짐에 따라 매우 크게 변화함을 알 수 있다. 따라서 HFD 신호는 작동 주파수가 높을수록 위상의 변화가 큼을 알 수 있다.

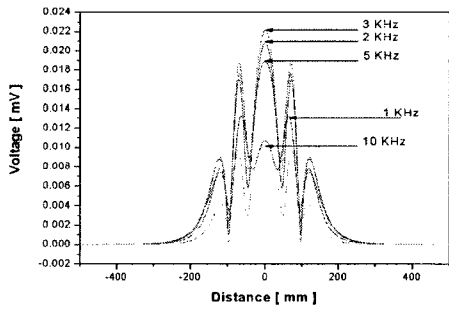


Fig. 3 작동 주파수에 따른 수신 전압

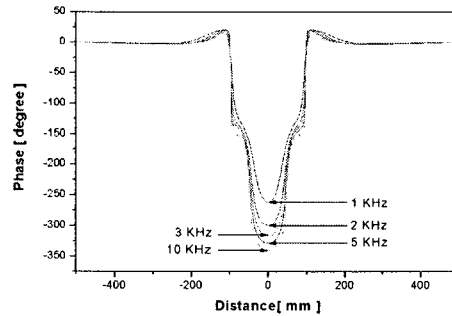


Fig. 4 주파수에 따른 위상 변화

### 2.2.3 주파수 변화에 의한 전압평면에서의 신호 형상

앞절에서는 위치에 따른 전압의 크기와 위상의 변화를 살펴보았고, 여기서는 이러한 값을 동시에 표현할 수 있는 전압평면에서 최적의 탐상조건을 살펴보려고 한다. 전압 평면에서의 주파수에 따른 결과는 Fig. 5와 같다.

전압평면에서는 신호의 변화 방향 및 신호의 형상을 알 수 있다. 이러한 신호의 형상은 차후에 신호 분석에 활용될 수 있으며, Fig. 5에서 HFD의 신호는 360° 전영역에 걸쳐 나타나는 특징을 보여주고 있다.

### 2.2.4 최적 주파수 및 간격에 따른 신호

전압크기와 위상, 그리고 전압평면에서의 신호를 고려해본 결과 위상은 크게 변화가 없

으며 그 중 신호의 크기가 큰 3 kHz를 선택하는 것이 바람직하다. 따라서 최적 주파수는 3 kHz로 선택하였으며, Fig. 6은 간격에 따른 HFD신호를 모델링 한 결과를 나타내었다.

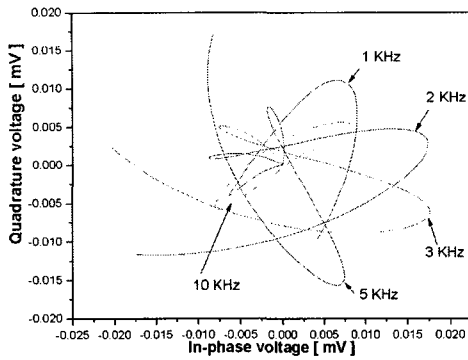


Fig. 5 주파수에 따른 전압평면에서의 RFEC신호

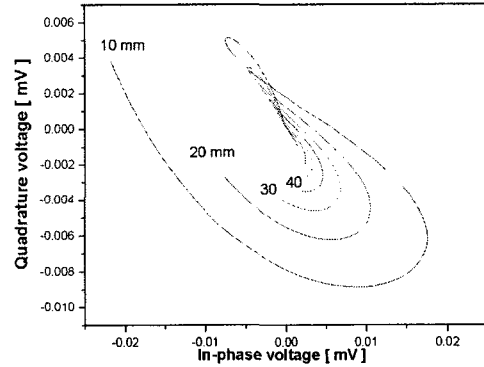


Fig. 6 간격에 따른 HFD 모델링 신호

### 3. 실험

#### 3.1 간격 측정을 위한 센서

최적의 신호를 수신하기 위해서는 핵연료 채널 주위의 전자기장 분포를 확인하고 전자기장의 영향을 받은 각종 분포- 자속밀도 분포, 전류 밀도, 에너지 Vector, 위상분포 등을 고려하여야 한다. 이러한 일련의 작업을 거쳐서 주위에 형성되는 전자기장의 흐름을 파악하고 간격에 따라 민감하게 변화하는 요소 및 검출 위치 등을 고려해야 하고, 도출된 결과로부터 프로브의 크기, 폭, 두께 등 센서를 설계하여야 한다. 또한 도출한 설계 제원을 바탕으로 하여 센서를 제작하고, 다시 검사조건을 결정하는 일련의 작업을 수행해야 한다. 본 연구에서는 현재 LIN간격 측정을 위하여 선행연구에서 개발된 RFEC Probe를 이용하여 LIN에 비하여 직경이 28% 정도인 HFD의 신호의 수신여부 및 수신가능 시 최적의 검사조건을 결정하고자 한다.

Fig. 7은 본 연구에서 사용된 RFEC Probe이다. 이 센서는 LIN관의 간격측정을 위하여 최적화된 센서이다. 본 연구에서는 이 센서를 이용하였으나, 측정하고자 하는 배관의 크기 및 전자기 물성에 따라 각기 다른 센서를 제작하여 사용하면 보다 나은 결과를 얻을 수 있다.

#### 3.2 HFD 간격 측정 실험

최적의 검사 조건과 Fig. 7의 RFEC probe를 이용하여 HFD 신호를 탐상 하고자 하였다. Fig. 8은 실험장치 및 데이터의 흐름을 나타내고 있다.

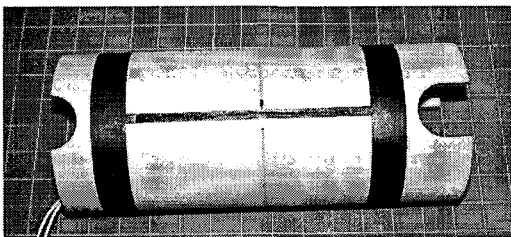


Fig. 7 LIN 간격 측정용 RFEC 센서

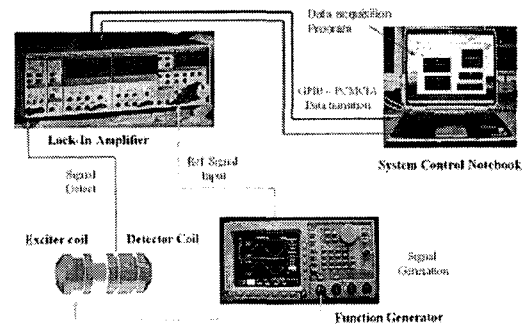


Fig. 8 실험장치 Setup

여기서, 사용된 Lock-in 증폭기는 SRS-830이며, 제어 PC와 IEEE-488.2 표준 통신 프로토콜을 이용하여 통신한다. 또한 제어 PC에서 데이터 수집 프로그램은 Labview 7.1을 이용하여 제작되었으며 Lock-in 증폭기로부터 데이터를 수신하고 Offset 조절이 가능하도록 제작되었다.

함수발생기에서는 가진 주파수인 3 kHz의 Sine wave를 발생시켰으며 송신 전압은 5 Volt로 수신신호를 최대화 하고자 하였다. Lock-in 증폭기의 입력단에서는 수신신호를 증폭하기 위하여 20 dB 전치 증폭기를 이용하였다. Fig. 9는 HFD관을 10 mm부터 50 mm 까지 변화시켜 가면서 측정한 결과를 나타내고 있다.

이것은 모델링을 통하여 예측된 신호와 동일한 형태를 가지며 그 전압 크기 및 궤적으로 간격 평가가 가능하다. Fig. 10은 간격에 따른 최대 전압의 관계식을 나타내고 있고, 간격과 전압의 상관관계 곡선은 수신되는 신호로부터 그 전압의 변화량만 계산하면 간격을 예측할 수 있게 된다.

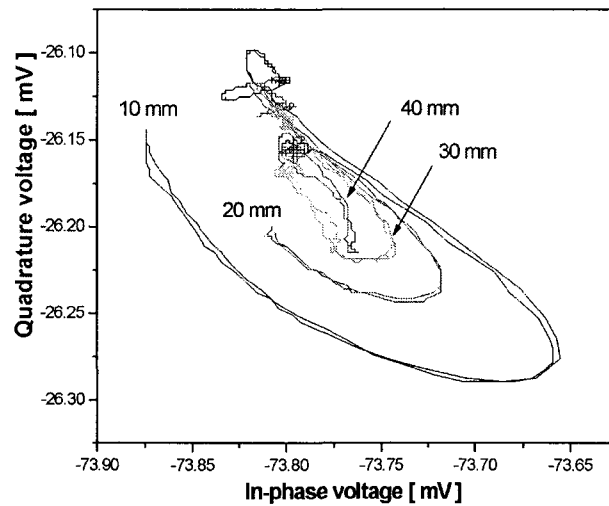


Fig. 9 HFD 간격에 따른 RFEC신호

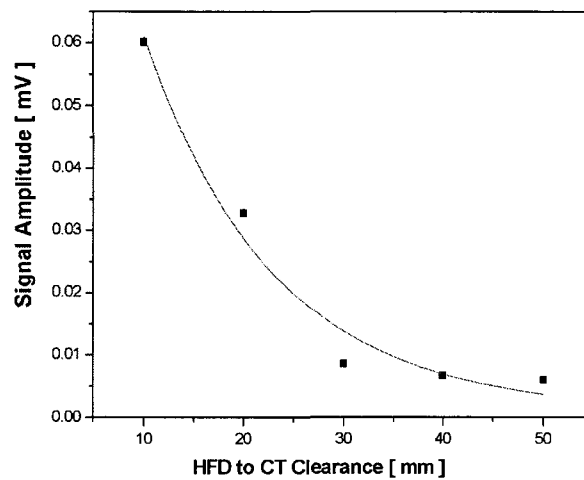


Fig. 10 HFD/CT 거리에 따른 최대 전압의 변화

#### 4. 결론

본 논문에서는 중수로 원전에 배열되어 있는 인접관의 간격을 RFECT 기술을 이용하여 측정할 수 있음을 확인 하였다. HFD 안내관의 신호를 예측하기 위하여, 체적적분법을 이용하여 모델링한 결과는 실험과 매우 유사한 결과를 얻었고, 특히 주파수의 영향은 주어진 탐촉자와 실험 조건에서는 3 kHz에서 가장 큰 진폭을 얻었다. RFEC 탐촉자와 측정장치로서 HFD 안내관 간격을 측정한 결과 거리에 따른 전압 값은 지수함수적으로 감소함을 확인하였다.

본 연구에서는 중수로 HFD관 간격 측정을 위하여 전자기 모델링을 수행하고 그 결과를 바탕으로 최적의 센서를 제작하고 실험을 수행하여 관 내부에서 관의 외부에 존재하는 간격을 측정하는 기술을 확보하였다. 이러한 인접배관의 간격측정 기술은 이론적으로 교차배열되어 있는 모든 배관에 적용 가능하며, 본 논문에서 사용된 HFD 안내관은 직경이 17.5mm에 불과한 매우 작은 관이므로 일반적으로 산업설비에 사용되는 배관의 경우에는 더욱 먼 거리도 측정할 수 있다. 선행연구에서 수행한 LIN 관의 간격측정의 경우에는 50mm 이하로 가까울 때에는 약 0.5mm의 정밀도로 간격을 평가 할 수 있었다.

이러한 LIN과 HFD의 간격측정 기술을 바탕으로 지하에 매설되어있거나, 산업설비에 다양한 형태로 존재하는 배관들에 대하여 수신신호 시뮬레이션을 통하여 각종 배관에 대한 최적화된 센서를 설계 하고, 인접한 배관의 간격을 측정할 수 있는 범위를 확대해 나가고자 한다.

#### 5. 참고문헌

1. 정현규, 이동훈, 이윤상, 허형, 정용무, "중수로 핵연료 채널 인접관의 간격측정을 위한 원거리장 와전류검사 기술개발", 한국비파괴검사학회, Vol. 24, No. 2, pp 164~170, 2004
2. 정현규, 이윤상, 이동훈, 허형, 정용무, "교차 배열된 지르코늄관 간격 측정을 위한 전압 평면에서의 신호해석" 한국 비파괴검사학회 2002 춘계학술대회 논문집, pp 173~176, 2003.
3. 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.
4. 이재경, "비자성체 이중관의 원격장 에너지 전달 경로" 한국 비파괴검사학회지 Vol 21, No. 5, pp 526~531, 2001.
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.