

## 중수로 핵연료채널과 인접관의 간격측정을 위한 원거리장 와전류검사 기술개발

### Remote Field Eddy Current Technique Development for Gap Measurement of Neighboring Tubes of Nuclear Fuel Channel in Pressurized Heavy Water Reactor

정현규\*<sup>†</sup>, 이동훈\*, 이운상\*, 허 형\*, 정용무\*

H. K. Jung\*<sup>†</sup>, D. H. Lee\*, Y. S. Lee\*, H. Huh\* and Y. M. Cheong\*

**초 록** 중수로 내부구조물 중 칼란드리아관(CT)와 액체주입노즐관(LIN)은 서로 수평으로 90도 교차되게 배열되어 있으며 원자로 내의 열, 방사선, 하중에 의해 creep 현상이 발생되어 처짐이 일어난다. 칼란드리아관은 액체주입노즐관과 동일 재료이나 운전 온도와 방사선 조사량으로 인해 액체주입노즐관에 비해 상당히 열악한 조건에 노출되어 있으므로 처짐이 심각할 것으로 예상된다. 만약 두 관의 접촉이 발생되면 원전 안전성에 영향을 미칠 것이므로 인접관에 대한 접촉여부 점검은 중수로 안전현안 중 하나이다. 이러한 접촉여부를 확인하기 위하여 핵연료채널 내부로 탐촉자를 삽입하여 인접관과의 교차점에서 간격을 직접측정하기 위한 방법으로 원거리장 와전류검사(RFECT) 기술을 적용하였다. 핵연료채널 인접관인 액체주입노즐관 신호 취득시 발생 가능한 잡음 신호(두께변화, Lift-off, 수축)에 대해 체적적분법에 의한 모델링으로 조사하였고, 신호와 잡음과의 분리가능한 조건을 확인하였다. 원거리장 와전류검사 적정 조건은 민감도와 투과력 그리고 잡음신호 등을 동시에 고려하여 주파수 1 kHz와 코일 간격 200 mm로서 결정하였다. 원거리장 와전류검사 실험 결과 칼란드리아관과 액체주입노즐관 사이의 간격 변화에 대한 신호 특성을 전압평면을 이용하여 상관관계를 도출하였다.

**주요용어:** 중수로, 핵연료채널, 인접관 간격측정, 원거리장 와전류검사, 체적적분법

**Abstract** Liquid Injection Nozzle(LIN) tube and Calandria tube(CT) in Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR) are cross-aligned horizontally. These neighboring tubes can contact each other due to the sag of the calandria tube resulting from the irradiation creep and thermal creep, and fuel load, etc. In order to judge the contact which might be the safety concern, the remote field eddy current (RFEC) technology is applied for the gap measurement in this paper. LIN can be detected by inserting the RFEC probe into pressure tube (PT) at the crossing point directly. To obtain the optimal conditions of the RFEC inspection, the sensitivity, penetration and noise signals are considered simultaneously. The optimal frequency and coil spacing are 1 kHz and 200 mm respectively. Possible noises during LIN signal acquisition are caused by lift-off, PT thickness variation, and gap variation between PT and CT. The simulated noise signals were investigated by the Volume Integral Method(VIM). Signal analysis on the voltage plane describes the amplitude and shape of LIN and possible defects at several frequencies. All the RFEC measurements in the laboratory were done in variance with the CT/LIN gap and showed the relationship between the LIN gap and the signal parameters by analyzing the voltage plane signals.

**keywords:** PHWR, fuel channel, gap measurement, RFECT, volume integral method

1. 서 론

CANDU형 원전의 원자로는 대략 6 m 길이의 수평한 압력관(Zr-2.5% Nb 합금)에 핵연료가 채워져 있고 이 압력관과 칼란드리아관(Zircaloy-2)은 서로 동심원상에 두 중심축이 위치하고 있다. 원자로 내에는 칼란드리아관(Calandria Tube, CT) 이외에 원자로 안전정지물질 주입관(Liquid Injection Nozzle, LIN)을 비롯한 많은 관들이 배치되어 있다. (Fig. 1 참조) 특히 중수로 안전현안으로 관심있는 내용은 CT와 LIN의 접촉여부를 확인하는 것으로 이들은 서로 90도로 수평 교차 배열되어 있으며 원자로 내의 열, 방사선, 하중에 의해 creep현상이 발생되며 처짐이 일어난다.

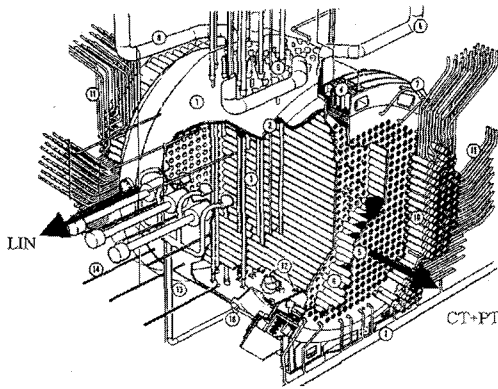


Fig. 1 Overview of internal structures in PWR reactor

CT는 LIN과 마찬가지로 동일 재료이나 운전 온도와 강한 방사선 조사로 인하여 LIN에 비해 상당히 열악한 조건에 있으므로 처짐이 심할 것으로 예상되고 있다. 만약 두 관의 접촉이 발생되면 원전 안전성에 심각한 영향을 미칠 것이므로 이에 대한 관심은 필요하다.

캐나다 중수로 원전의 경우 현재 두 관 사이의 간격측정은 수평 중성자속 계측관(Horizontal Flux Detector, HFD)의 예비 안내관이나 LIN을 통해 초음파 탐촉자를 삽입하여 간격을 측정하였다. 국내 원전에서는 캐나다와 설계와 제작조건이 다르기 때문에 초음파 탐촉자를 관측공을 통해 삽입하여 간격측정을 수행하고 있다[1]. 다만 이 경우 관측공이 지나는 근방에서의 핵연료채널 처짐과 LIN관 간격이 측정되므로 직접적으로 교차하는 지점에서의 간격 정보를 얻을 수 없는 단점이 있다. 이 경우 보

완책으로 CT와 LIN 관 처짐 모델링을 이용하여 교차점에서의 간격을 간접적으로 예측한 연구가 보고된 실정이다[2].

본 연구에서는 교차점에서 두 인접관 사이의 간격을 직접적으로 측정하기 위한 방법을 개발하기 위하여 실험실에 설치된 모의실험 핵연료채널로 부터 CT와 LIN 간격 측정 가능성에 대해 조사하고자 한다.

2. RFEC 기술

2.1. RFEC 기술 적용 현황

원거리장 와전류시험 (remote field eddy current testing, RFECT) 은 전기 전도성을 띤 관 형태의 시험체 내/외면에 탐촉자를 삽입시켜서 검사하는 전자기검사법의 일종으로써 원래 1951년 McLean이 특허를 출원한 이래로 약 40년 동안 별로 주목받지 못하다가 최근에 들어서야 강자성체 관의 비파괴검사 방법으로 각광을 받기 시작하고 있다. 이 방법은 원거리장 와전류 효과로 인하여 관 내면에 탐촉자를 장착하였더라도 관 두께 전체 부위를 검사할 수 있다. 또한 일반 와전류탐상법을 사용할 경우 기본적으로 비자성체 재료만 검사가 가능하며 특별히 강자성체 재료 또는 국부적으로 자성을 띤 재료는 자기포화 탐촉자를 사용하여 검사할 수 있는데 반해 원거리장 와전류검사법은 검사대상 재료가 자성체나 비자성체를 가리지 않으며, 또한 강자성체 관 시험체의 외면 결함에 대한 비파괴검사가 가능하므로 보다 유연하게 탐촉자를 설계할 수 있다는 강점이 있다. 한편 원거리장 와전류검사법은 강자성 재료에 대해 원주방향 결함과 축 방향 결함 모두 대략 비슷한 감도 (감도 차이가 대략 2 배 이내임)로 검사할 수 있으며 이 경우 부식에 의한 관두께 감육 및 점식(pitting)은 물론 균열까지도 검사 대상에 포함된다. 그러나 이 방법을 비자성 재료에 대해 적용할 경우, 전통적인 와전류 검사법에 비해 그 감도 또는 정밀성이 떨어지는 단점이 있기 때문에 자성체 재료로 구성된 관, 즉 대부분 탄소강 관을 탐상하는 데 매우 유리하다[3].

한편, 증기발생기 전열판이나 지르코늄 압력관의 경우 비자성체 재료이지만 RFEC 장점을 활용하기 위하여 적용된 사례가 있다. 특히 Atherton 등[4]은 압력관의 원거리장 와전류검사 특성에 대하여 연구

하였으며, 압력관 외부 결함과 외부 부착물 검출에 대하여 원거리장 와전류검사 적용 가능성을 조사하였다.

## 2.2. 핵연료 채널에서의 전압 평면 작성

일반적으로 와전류탐촉자 코일의 임피던스는 두 가지 종류의 전기적 특성으로 표현하며, 하나는 코일 인덕턴스에 관련한 리액턴스 ( $X_L = 2\pi fL$ ) 이고 다른 하나는 음 저항( $R$ )이다. 시험 코일의 임피던스( $Z$ )는 임피던스 평면의 종축에 리액턴스  $X_L$  을, 횡축에는 저항  $R$ 을 표현함으로써 임피던스는 한 점으로 나타난다. 임피던스는 두 성분의 벡터 합으로 진폭과 위상각을 가지며, 코일이 공기 중과 시험체 상에 위치할 때의 두 가지 값을 측정하여 공기 중에서의 리액턴스 값으로 정규화하여 나타낸다. 이 값은 시험체와 장비 특성에 따라 영향을 받으며 시험체의 주요 변수로는 전기 전도도( $\sigma$ ), 자기 투자율( $\mu$ )과 시편 두께( $t$ )이며 장비 변수로는 시험 주파수( $f$ ), 코일의 크기와 형태, 송수신 코일 간격, 시험체와 코일 사이 거리(Lift-off) 등이 있다[5].

일반적인 와전류검사 신호 해석은 하나의 코일로 전자기장을 송수신을 하므로 전류가 일정하여 임피던스 값으로 신호분석을 하는 대신 원거리장 와전류검사 신호는 송신 코일과 수신 코일이 분리되어 수신 코일에 발생한 유도기전력을 전압( $V = I \times Z$ )으로 표시한다. 이 전압 평면에서 공기 중과 핵연료채널 내부에서의 In-phase 성분(X축)과 Quadrature 성분(Y축)을 주파수 변화에 따라 측정 한 다음, 공기 중 Y축 성분으로 정규화하여 진폭과 위상각 변화를 알 수 있는 작동점을 궤적으로 나타내어 실험적인 전압 평면(voltage plane polar plot)을 Fig. 2와 같이 작성하였다. 주파수 변화는 신호의 진폭과 위상각에 동시에 영향을 미치기 때문에 전압 평면에서 효율적으로 신호 거동을 조사할 수 있다[6].

본 연구의 적용대상인 핵연료 채널은 이중관 형태로 안쪽에 압력관과 바깥쪽에 칼란드리아관이 존재하므로 코일에서 발진된 전자기장이 이중관을 통과해야하므로 투과 특성이 좋은 원거리장 와전류검사 방법을 적용하였다[7].

주파수는 ECT 기술 및 RFECT 기술에서 침투깊이 및 결함 탐지능력을 결정짓는 중요한 요소이다.

주파수가 너무 낮으면 침투는 잘하게 되나 탐지능력이 떨어지게 되고, 반대로 주파수가 너무 높으면 침투를 잘 하지 못하는 단점이 있으므로 최적의 주파수는 다음 식 (1.1)에서부터 결정지을 수 있다.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (1.1)$$

여기서  $\delta$ 는 침투 깊이를 나타내고,  $f$ 는 사용되는 주파수,  $\mu$ 는 투자율,  $\sigma$ 는 전도도를 나타낸다.

RFECT 기술은 발진부에서 형성된 자기장이 두 관을 통과한 뒤 다시 내부로 수신되어야 하므로 최종 침투 깊이는 두 관의 두께 2배로서 11.4 mm가 되고 투자율과 전기 전도도를 고려하여 식(1.1)에 대입하여 계산한 결과 적정 주파수는 약 1 kHz 이다.

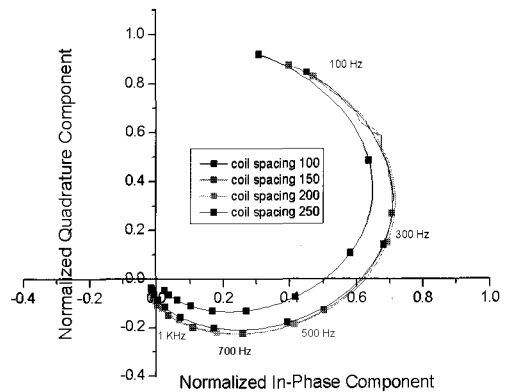


Fig. 2 Voltage plane diagram for RFEC probe in CANDU fuel channel

## 3. 신호 모델링

와전류검사 신호의 모델링을 위한 VIC-3D 코드는 와전류 탐촉자 코일과 결함과의 반응을 체적-적분법으로 계산하는 프로그램으로서 간단한 형상을 지닌 검사체를 포함한 보다 복잡한 형상에 대하여도 경계-적분법을 추가로 도입하므로써 와전류 신호를 예측하고 해석할 수 있게 해 준다[8].

본 논문에서는 중수로 액체주입노즐(LIN)에 대한 원거리장 와전류검사 신호에 대한 모델링 작업을 VIC-3D 코드를 이용하여 다음 절차에 의해 수행하였다. 우선 검사 대상 형상 모델은 Fig. 3과 같이 송수신 코일에 대하여 주변 매질을 압력관(PT), 칼란드리아관(CT)으로 크게 분류하였고, LIN은 매질

이 아닌 결함으로 가정하여 모델을 설정하였다. 이들에 대한 제원과 특성값은 Table 1과 같다.

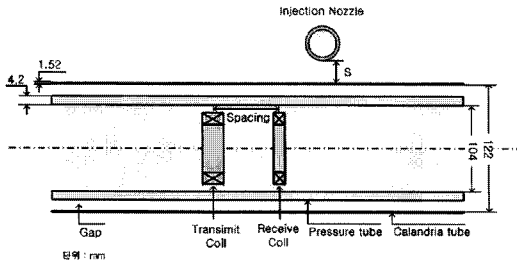


Fig. 3 Schematic arrangement of fuel channel and LIN for signal modeling

Table 4 Tube Dimensions and Properties

Components		Values
Pressure Tube	Material	Zr-2.5%Nb
	Conductivity	$1.78E6 \Omega^{-1}m^{-1}$
	Relative Permeability	1.0
	Outside Dia.	112.4 mm
	Inside Dia.	104 mm
Calandria Tube	Material	Zircaloy-2
	Conductivity	$1.43E6 \Omega^{-1}m^{-1}$
	Relative Permeability	1.0
	Outside Dia.	133 mm
	Inside Dia.	130 mm
LIN Tube	Material	Zircaloy-2
	Conductivity	$1.43E6 \Omega^{-1}m^{-1}$
	Relative Permeability	1.0
	Outside Dia.	62 mm
	Inside Dia.	56.4 mm

또한 RFEC 코일부는 송신코일의 경우 강한 전류를 흘려보내기 위하여 코일 홈을 폭 30 mm 깊이 9 mm로 가공하였고 여기에 wire gage #14의 코일로서 62 turn을 감았고, 수신코일은 감도를 높이기 위해 코일 홈을 폭 10 mm 깊이 9 mm 가공한 다음 wire gage #27로서 500 turn을 감았으므로 이러한 제작 사양을 LIN 신호 모델링을 위해 입력하였다.

모델링 결과를 정리해 보면 Fig. 4에서는 송수신 코일간격이 200mm이고 LIN이 CT에서 10mm 이격되어 있을 때, 주파수 영향에 대한 수신 코일의 신

호크기를 탐촉자 이동거리에 대해 계산한 결과를 보여주고 있는데 대략 1-2 kHz에서 감도가 좋은 것으로 나타났고, Fig. 5는 Fig. 4와 동일조건에서 위상각 변화를 탐촉자 이동거리에 대해 계산한 결과를 보여주고 있는데, 주파수 증가에 따라 위상각 변화가 크게 나타남을 알 수 있다. Fig. 6는 송신코일을 기준으로 압력관 길이방향으로 멀어질수록 근거리장과 원거리장 자속밀도를 나타내고 있으며[9] 수신 코일 거리가 150 mm 이상에서 원거리장이 근거리장에 비해 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있어 150-250 mm 코일 간격이면 원거리장 와전류검사 조건으로 적정함을 알 수 있었다. Fig. 7에서는 송수신 코일간격이 200 mm이고 주파수 1 kHz 시, CT와 LIN의 간격을 변수로 하여 전압 평면에서 절대형 신호 변화를 계산하여 나타내었는데 CT/LIN 간격이 적을수록 진폭이 크게 나타남을 보여주었다.

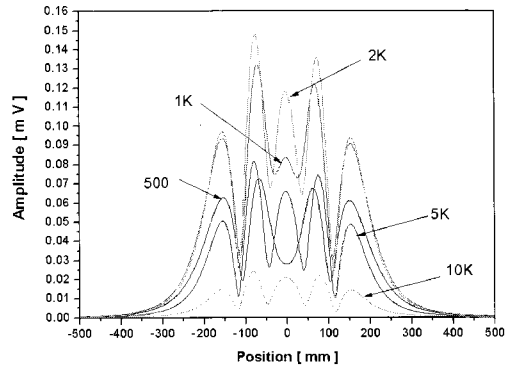


Fig. 4 Computed amplitude change with the different frequencies at 200 mm coil spacing and 10 mm CT/LIN gap distance

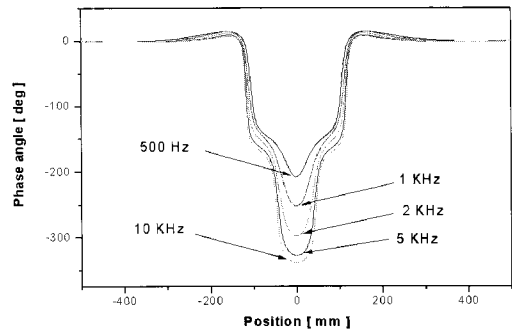


Fig. 5 Computed phase angle change with the different frequencies at 200 mm coil spacing and 10 mm CT/LIN gap distance

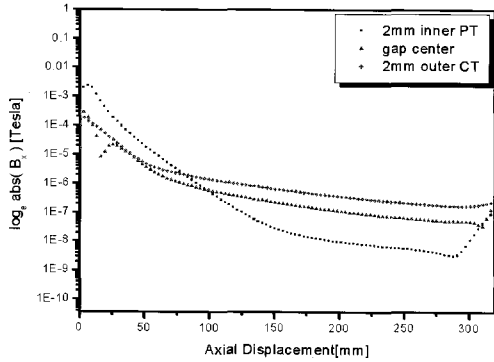


Fig. 6 Magnetic flux density profile along the axial displacement

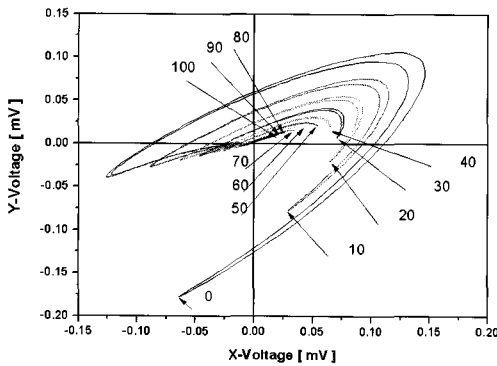


Fig. 7 Computed voltage plane signal in variance with CT/LIN gap distance at 200 mm coil spacing and 1 kHz frequency

실제 LIN 간격측정에 있어서 고려해야할 사항은 압력관의 두께변화, 수축부위, 확장부위 등에 의한 잡음발생을 고려할 수 있다. 이들 잡음신호에 대한 모델을 Fig. 8에 나타내었고, Fig. 9에서는 잡음신호와 LIN 신호를 체적적분법으로 모사하여 그 계산 결과를 나타내었다. 특히 잡음신호는 실험적으로 결과를 얻을 수 없는 여건이므로 모델링에 의한 신호모사는 의미가 있으며 두께 변화와 수축부 신호는 LIN 신호에 비해 진폭이 적게 나타났으며 직경 변화에 의한 fill factor 변화는 진폭은 크나 위상각이 다르게 발생되어 LIN 신호와 구별이 가능함을 보여주고 있다.

그러므로 신호 감도와 잡음신호와의 분리 가능성을 함께 고려하므로 LIN 신호 탐지와 간격변화를 잘 나타내는 본 검사에 필요한 적정 검사조건은 작동 주파수가 1-2 kHz이고 코일간격이 150-250 mm 임을 도출하였다[10].

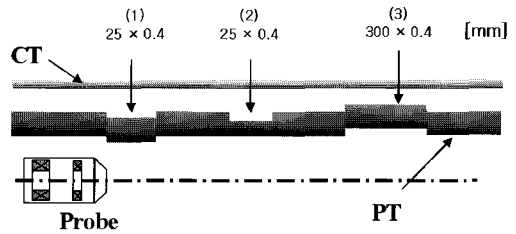


Fig. 8 Schematic drawings of possible noises. (1) relative constriction (2) local wall thickness variation (3) diameter change

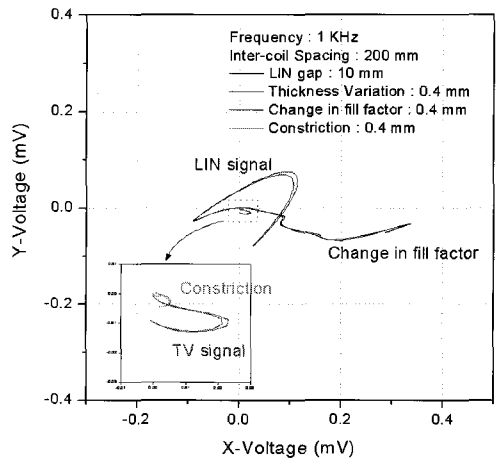


Fig. 9 LIN and noise signals in voltage plane

## 4. 실험

### 4.1. 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 10과 같은 실험장치로서 핵연료채널 내부에 원거리장 와전류검사 탐촉자를 삽입하여 얻어진 신호를 Lock-in 증폭기로 증폭하여 간격 변화에 따른 신호 진폭과 위상각 영향을 조사하므로써 원거리장 와전류검사기술의 칼란드리아관과 액체주입노즐관 사이의 간격 측정을 위한 적용 유효성을 확인코자 하였다. 본 실험에 사용된 모의 실험장치는 압력관, 칼란드리아관은 동축 이중관으로 액체주입노즐관은 칼란드리아관에 수평하게 직각으로 배열하였다.

간격 측정을 위한 탐촉자의 송수신 코일은 에너지 발생이 강력한 보빈형을 사용하였고, 수신 코일은 송신코일과 별도로 분리되어 있다. 송신코일에

가해진 전압은 코일 간격에 따라 0.5 - 5.0 Volt 범위이며 신호증폭은 전치증폭기의 이득을 40 dB로 설정하였다.

의 인접관 간격 평가를 위해 LIN 간격측정 교정곡선으로 적용이 가능할 것이다.

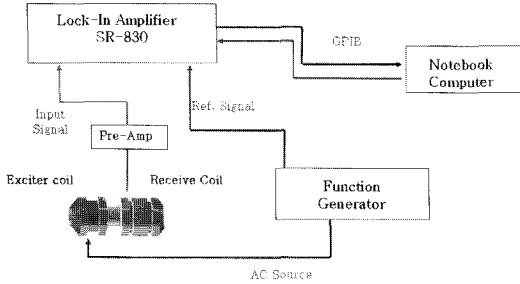


Fig. 10 Experimental setup for RFEC measurement

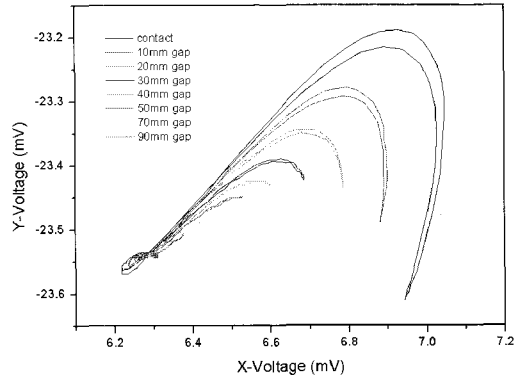


Fig. 11 LIN signals in voltage plane with the increment of CT/LIN gap distance

4.2. 간격측정 실험결과 및 토의

압력관에 있어서 RFEC 신호 특성은 3절의 모델링 결과를 고려하여 실험 기준조건으로 코일간격은 200 mm로, 작동 주파수로는 1 kHz로 설정하였고 장치는 인가전압을 1V, 이득 40 dB의 전치증폭기를 사용하여 실험함으로써 수집된 신호를 전압 평면에서 조사하였다.

CT와 LIN의 간격을 접촉 상태에서 10 mm 씩 증가함에 따라 각각 실험을 수행하였고 Fig. 11은 간격에 따른 LIN 신호들을 전압평면에 함께 보여 준다.

신호 특성으로는 Fig. 7의 모델링에 의한 신호 형태와도 유사한 절대형 신호양상을 지니고 있고 위상각이 45도 근방에서 일관성 있게 나타났다. 실험 결과 CT와 LIN 간격이 멀어질수록 위상각의 변화는 거의 없으나 진폭이 감소하는 양상을 보여주고 있으며 특이한 것은 두 사이가 인접한 경우 LIN 신호가 고리 모양으로 변함을 확인하였고 이것은 Fig. 12과 같이 스트립 차트 신호에서 주로 2중 피크로 나타내기 때문이다. 이의 발생 이유는 송신코일과 수신코일에 의해 LIN이 각각 감지되기 때문이다. 이 현상으로부터 간격 평가 기준으로 신호크기 뿐만 아니라 신호형태도 고려해야 함을 알 수 있다.

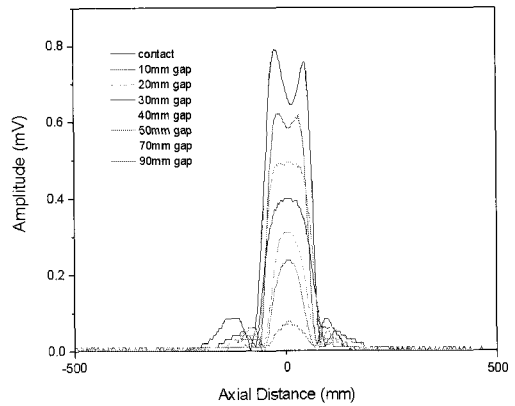


Fig. 12 LIN signals along the axial distance with the increment of CT/LIN gap distance

CT와 LIN의 간격에 따른 전압평면 신호에 대해 작동점에서의 최대거리를 측정하여 신호진폭으로 표시함으로 간격 변화와 신호진폭에 대한 상관관계를 Fig. 13에 나타내었다. 여기서 신호진폭은 CT와 LIN의 간격이 증가함에 따라 지수 함수적으로 감소함을 보여주고 있고, 이 결과는 중수로 현장에서

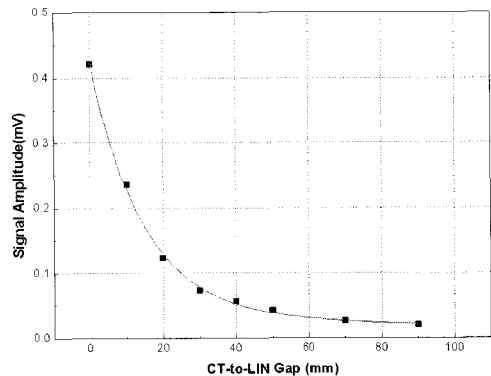


Fig. 13 Signal amplitude change in variance with CT/LIN gap

## 5. 결 론

중수로 핵연료채널 CT와 LIN 관 간격 측정에 있어서 기존 와전류검사법은 전도체 이중관을 투과해야하는 문제점이 있으므로 원거리장 와전류 검사로서 모의실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 제작된 원거리장 와전류검사 탐촉자를 이용하여 핵연료채널에서의 작동점에 대하여 주파수 변화에 따른 전압평면 궤적을 실험적으로 구하였고, 체적적분법을 이용하여 설계조건에 따른 LIN 신호와 잡음신호를 모사함으로써 모델링에 의한 검사조건을 제시할 수 있었다.
- 2) 모의실험 장치를 활용하여 전압 평면 궤적으로 LIN 신호를 측정하였다. CT와 LIN의 간격 변화에 대한 실험장치는 인가전압 1 Volt, Gain 40 dB로 설정하였고, 검사조건으로는 송신코일 작동 주파수가 1 kHz이고 송수신 코일 간격이 200 mm 일 때 최적 신호를 얻었다. 이 경우 위상이 45도 근방에서 LIN 신호가 나타나고 CT와의 간격에 따라 진폭 변화곡선을 기준으로 LIN 간격 측정에 있어서 활용 가능성을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] 이종포, 박철훈, 엄병국, 김태룡, 손석만, 이준신, "중수로 칼란드리아 처짐 측정을 위한 자동 초음파 계측장비", 한국비파괴검사학회 2000 춘계 학술대회 논문집, pp. 19-28, (2000)
- [2] T. R. Kim, S. M. Sohn, J. S. Lee, J. P. Lee, C. H. Park, K. C. Joo and B. G. Kim "Ultrasonic Measurement of Sagging of Calandria Tubes and Liquid Injection Shutdown System Tubes Using Newly Developed Device," 15th World Conference of NDT, Rome, (2000)
- [3] J. L. Fisher, Metals Handbook, 9th ed., Vol. 17, pp. 195-201, ASM International (1989)
- [4] D. L. Atherton and S. Sullivan, "The Remote Field Through-Wall Electromagnetic Inspection Technique for Pressure Tube," Materials Evaluation, Vol. 44, No. 13, pp. 1544-1550, (1986)
- [5] D. J. Hagemaiier, "Eddy Current Impedance Plane," Materials Evaluation, Vol. 41, No. 2, pp. 211-218, (1983)
- [6] V. S. Cecco, S. P. Sullivan, J. R. Carter, and L. S. Obrustsky, Innovations in Eddy Current Testing, AECL RC-1433, (1995)
- [7] 이재경, "비자성체 이중관의 원격장 에너지 전달 경로", 비파괴검사학회지, 21권, 5호, pp. 526-531, (2001)
- [8] Kim Murphy and Harold A. Sabbagh, "A Boundary Integral Code for Electromagnetic Nondestructive Evaluation," 12th Annual Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics, (1996)
- [9] 허형, 정현규, 김건중, "CANDU형 핵연료채널 압력관에 대한 원거리장 와전류의 자계분포 특성해석(I)", 비파괴검사학회지, 22권, 1호, pp. 59-64, (2002)
- [10] H. K. Jung, Y. S. Lee and D. H. Lee, "Voltage Plane Analysis for the Gap Measurement of Cross Aligned Zircaloy-2 Tubes," 11th Asia-Pacific Conference on NDT, Jeju Island, Korea, (2003)