

비자성체 이중관의 원격장 와전류 에너지 분포 해석

Remote Field Eddy Current Distribution to Nonferromagnetic Coaxial Tubes

허 형, 정현규, 정용무

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

CANDU형 핵연료채널 압력관(Zr-2.5%Nb)과 calandria관(Zircaloy-2)에 대한 원격장 와전류의 자체분포특성을 파악하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 압력관과 칼란드리아관의 전자기장 분포와 위상각 해석을 통하여 최적 검사 주파수와 감지코일의 위치를 평가하였다. 또한 축대칭 구조물(Al-ring과 Al-block)이 공존시 파라미터해석을 통하여 원격장 와전류의 특성을 평가하였다.

Abstract

A FEM model of the remote-field eddy current effect is presented for zirconium- 2.5percent niobium(Zr-2.5%Nb) nuclear reactor pressure tubes to demonstrate the important electromagnetic field phenomena that describe this effect. This model is applied to evaluate the optimum operating frequency and detector position. There are many ambiguous experimental results connected with this technique. Finite element calculations can be used in the interpretation of these experimental results even though the electromagnetic fields measured in the remote-field technique are very small.

1. 서론

원격장 와전류탐상기술의 역사를 살펴보면 1951년 미국에서 W.R. McLean이 원격장 와전류탐상법에 대한 특허를 출원하였으나 그당시에는 그다지 주목을 받지 못하였다. 1957년도에 미국의 Shell Development사에서 Schmidt가 석유시추관의 외면 부식현상을 검사하기 위하여 원격장 와전류탐상법을 적용하는 연구를 수행한 바 있다. 당시에 배관 외면의 부식상태를 탐지할 수 있는 방법이 없었으며 초음파탐상법이 가장 유력한 방법이였으나 접촉매질적용의 문제점과 검사환경이 열악하여 실제 적용하기는 어려웠다. 이후 1960년대 들어서면서 배관검사에 적용하는 것이 시도되었다.

당시에는 far field 효과라고 말하기도 하였으나 초음파탐상에서 사용되는 용어와 유사하여 의도적으로 remote field 효과라고 부르게 되었다. 비슷한 시기에 Shell사에서는 Ferrog라는 열교환기의 소구경 자성재료 배관을 검사하는 장비를 개발하여 탐지코일의 신호진폭을 이용하여 관 두께를 측정하고자 하였으나 상용화되지는 않았다. 이후 1970년대까지 특별한 연구의 진전은 없었는데 이것은 원격장 와전류효과가 실제로 존재함이 몇몇 산업체에서 이용되기는 하였으나 이론적인 근거가 희박하여 학계에서는 잘 받아 들여지지 않았기 때문이다. 1978년부터 원격장 와전류효과가 체계적인 실험, 연구결과가 이루어지기 시작하여 본격적인 발전이 이루어졌다. 소구경탐지코일을 사용하여 강자성체 배관의 내면 및 외면에서의 자장분포를 측정된 뒤 이 결과에 따라 두가지의 기본적인 에너지 결합모델이 제안되었다. 첫 번째 모델인 직접결합이론은 관내면에서 단순 변압기원리와 같은 것으로써 거리에 따라 전자기장이 급격하게 감쇠하는데 적어도 관직경의 1.8배 거리까지 적용될 수 있다는 것이고, 두 번째 이론은 간접결합이론으로써 발전코일 근바에 내면에서 외면쪽으로 급격하게 확산하는 원주방향의 강한 와전류 때문에 나타나는 전자기장효과인데 빠르게 외면을 빠져 나가면서 원주방향 와전류가 유도되는데 이 와전류가 다시 내면으로 재확산하여 수신코일에 감지되는 현상을 설명하며 관직경의 1.8배 이상의 거리에 적용된다는 것이다. 이러한 연구결과에 따라 실험도 병행되었으며 컴퓨터시스템을 이용하여 검사장비를 제작할 수 있게 되었다. 1984년에 원격장 와전류현상에 대한 이론적 해석이 처음으로 수행된 이래 1986년에는 비교적 간단한 유한요소 해석모델이 개발되었으며, 1986년 이후 미국의 콜로라도주립대, SwRI, TIMKEN사, 캐나다의 퀸즈대, Cyberscope사 등에서 다수의 기초 연구논문이 발표되었다. 그 중 콜로라도주립대에서는 유한요소법을 이용한 원격장 와전류현상에 관한 연구가 수행되었다. 이차원 축대칭구조에 대해 mesh를 작성하여 관벽 내부에서의 전자기장 분포를 그려냈으며 여기서 직접장 영역과 원격장 영역사이에서 전위계곡(potential vally)이 존재함이 밝혀졌다. 이러한 연구결과에서 종래의 가설들이 실제로 확인되었으며 검사체 관의 직경, 두께, 코일 간격등에 대한 정량적인 해석결과를 얻을 수 있었다. 퀸즈대의 응용자기학그룹에서는 비자성체 재료인 지르코늄관에 대해 원격장 와전류기법을 적용하여 와전류 차단효과에 대한 연구를 수행하였는데 원격장 와전류는 관 외면을 타고 전달된다는 현상을 확인하였다. 1986년 미국SwRI에서는 소구경 가스분산시스템 및 보일러관을 검사하는 탐촉자를 개발하였다. 초기에는 이차원 축대칭구조에 대한 적분방정식을 기초로 하여 해석적인 해를 구하였으며 그 결과를 유한요소법 결과와 연계하여 보다 정확한 해를 구하고자 하였다. 캐나다 Cyberscope사에서는 8채널, segmented-detector를 장착한 소구경철관 검사장비를 상용화하였다. TIMKEN사에서도 원격장 영역에 원주방향의 groove가 내면 및 외면에 있을 경우를 모사하여 유한요소법으로 해석하였다. 일본의 경우 1985년부터 대관가스, 동경가스, 동방가스 등에서 도시용 가스용 배설관(외경 50.8mm, 관두께 3.8mm의 탄소강관)을 검사하기 위한 실용 시스템인 개발된 바 있으며 일본대에서는 유한요소법 해석을 통하여 도시가스관에 원격장 와전류효과에 대해 기초 연구를 수행한 바 있다.

또한 도시 가스관을 검사하는 데 특수 이동로봇을 개발하여 가스를 차단하지 않고 공급상태에서 탐촉자와 케이블을 배관 내면에 삽입하여 검사하는 장비도 개발하여 성공적으로 적용되었다. 현재는 원격장 와전류탐상법을 실용화하는 연구를 수행하는 데 캐나다의 Russel Technology사에 판매하는 Ferroscope 라는 장비가 개발된 바 있고 미국의 Zetec, Texas 등에서 다중주파수 원격장 와전류탐상 기술을 적용한 장비가 시판되고 있으며 캐나다의 CANDU형 원전의 압력관 검사를 위한 장비가 개발된 바 있다. 그밖에 캐나다의 Queens 대학에서는 대구경관(약 32") 및 평관의 원격장 와전류기술에 대한 연구가 진행되고 있다. 대구경관에서 발생하는 응력부식균열 결함을 원격장 와전류탐상법으로 탐지하기 위한 가능성을 연구한 결과 원주방향 notch나 체적손실 결함보다 축방향 결함에 대해 민감도가 낮았으나 crack은 다른 결함들과 비교할 수 있었다. 최근에는 원격장 와전류탐상의 기술표준을 확립하기 위해서 2000년 12월에 ASTM E-2096-00, "Standard Practice for In-situ Examination of Ferromagnetic Heat-exchanger Tubes using Remote Field Testing" 규격이 발간되어 표준화작업을 진행하고 있다[1].

CANDU형 원자로는 대략 6m 길이의 수평한 압력관(Zr-2.5% Nb 합금)에 핵연료가 채워져 있고 이 압력관과 칼란드리아관(Zircaloy-2)은 서로 동심원상에 두 중심축이 위치하여야 한다. 이를 위해 압력관과 칼란드리아관 사이에는 garter spring spacer가 끼워져 있으나 가동년수가 증가함에 따라 spacer의 위치가 이동하고 이에 따라 불균일한 creep현상과 압력관 처짐(sagging)이 발생하며 심할 경우에는 칼란드리아관이 압력관과 접촉하는 경우가 발생한다. 이러한 문제점으로 인하여 garter spring의 위치를 정확히 측정할 필요성이 있다. 이를 위하여 유한요소법을 이용하여 압력관과 칼란드리아관에 대한 원격장 와전류특성을 파악하고 전자기장분포와 위상각해석을 통하여 최적 검사주파수와 감지코일의 간격을 평가하였다. 또한 parametric 해석을 통하여 축대칭 구조물에 따른 원격장 와전류 특성변화를 평가하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 원격장 와전류 이론

원격장 와전류탐상 기술은 배관형상의 검사체에 있어서 축방향으로 감은 와전류 여자기는 원주방향의 와전류를 생성시킨다. 여기서 생성된 와전류 밀도는 전자기 표피효과에 의해 관 두께 방향으로의 거리에 따라 급격히 감소한다.

보통 일반적인 와전류탐상시에 대략 표준 침투깊이가 배관두께의 0.6~1.0배 정도가 되도록 주파수를 설정하는데 표준 침투깊이가 배관두께보다 클 경우 와전류밀도가 배관의 외벽에도 상당량 존재한다.

배관구조에서는 이렇게 생성된 유도 와전류가 관 내부에서 여자기에 의한 일차 자장과 급격히 상쇄되나 위치에 따라서는 관 외면에 유도된 와전류에 의한 자장을 완전히 제거하지는 못한다. 따라서 두 종류의 자속이 관 내부에 생성될 수 있는 데 그림 1에 보인 바와 같이 그 첫 번째 코일 자체에 의한 자속이며 두 번째는 관벽의 와전류에 의해 생성된 자속이다. 관 내면에 여자기 근처에서는 물론 첫 번째 원인에 의한 자속이 대부분이나 여자기 코일로부터 거리를 증가시킴에 따라 관벽 와전류에 의한 자속이 대부분을 차지하게 된다. 수신 코일은 이러한 두 번째 원인에 의한 즉 원격장 영역에서의 자속을 감지하여 전류를 생성하게 된다. 수신 코일에 감지된 전압과 위상각은 관 두께, 검사 대상 재료의 자기투자율, 전기전도도, 그리고 관벽에 존재하는 결함에 따라 변화하게 된다. 원격장 효과는 두 가지 뚜렷한 효과로 대별되는 데 그 첫 번째 효과는 송신코일의 direct coupling 효과를 차단하는 shielding 효과이며 이것은 마치 전자파를 원통형 도파관 내에서 차단주파수 훨씬 아래에서 작동하는 상태와 같다. 이론적으로 데시벨로 표현되는 감쇠 현상은 거리에 선형적으로 비례함을 예측할 수 있다. 두 번째 효과는 원격장으로 표현되는 원주방향 와전류 현상인 데 이는 관벽과 코일 사이에 변압기 원리와 유사한 작용으로 인하여 원주 방향 와전류가 발생하고 관 외벽으로 빠르게 확산되면서 감쇠와 위상 지연이 발생한다. 이 경우 거리에 따른 감쇠 정도는 직접장보다 상당히 완만하게 감쇄한다. 원격장을 관 내면과 관 외면에 대해 비교해 보면 외면이 약 10 배 정도 강하며 관직경의 약 1.8 배 거리에서 신호 강도가 최소화되는 것은 직접장과 원거리장이 거의 비슷하나 그 위상은 정반대이므로 서로 상쇄 현상이 발생하는 데 이때 직접장과 원거리장이 교차하여 위상각의 반전이 발생한다[2].

피검체를 통과할 때의 자기장의 크기와 위상변화는 아래 식과 같은 1차원 표피효과 모델로 묘사할 수 있다.

$$B = B_0 \exp[-d(\pi f \mu \sigma)^{1/2}] \sin[2\pi ft - d(\pi f \mu \sigma)^{1/2}]$$

여기서,  $B$  는 깊이  $d$  에서의 자속 밀도,  $B_0$  는 표면에서의 자속 밀도,  $d$  는 깊이,  $f$  는 주파수,  $\mu$  는 자기 투자율,  $\sigma$  는 전기 전도도,  $t$  는 시간이다. 침투 깊이,  $\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma \mu}}$  이고, 위상각 지연은  $d(\pi f \sigma \mu)^{1/2}$  로 주어진다.

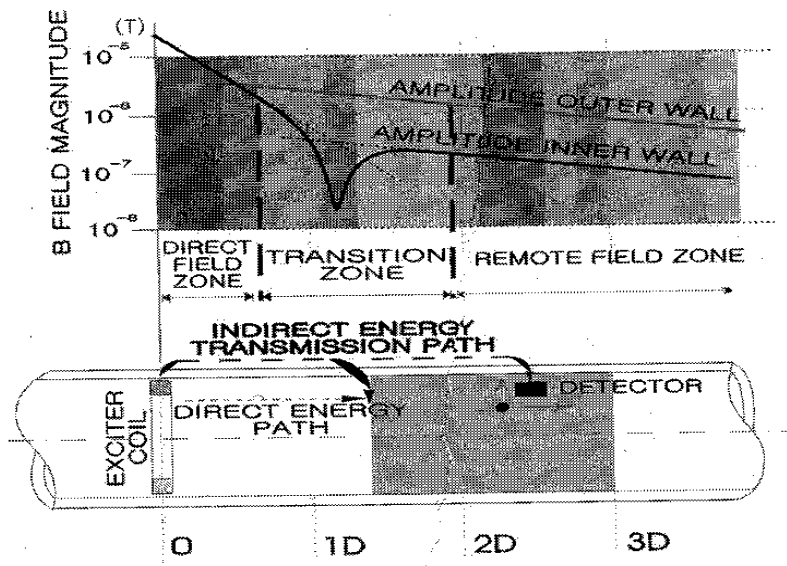


그림 1 관의 축방향 자속밀도분포

## 2.2 원거리장 와전류 유한요소해석

Ansoft사의 전자기장 해석프로그램인 Maxwell을 사용하여 해석하였다. 그림 1은 2D 해석모델로 제원 및 특성값은 표1과 같다[3].

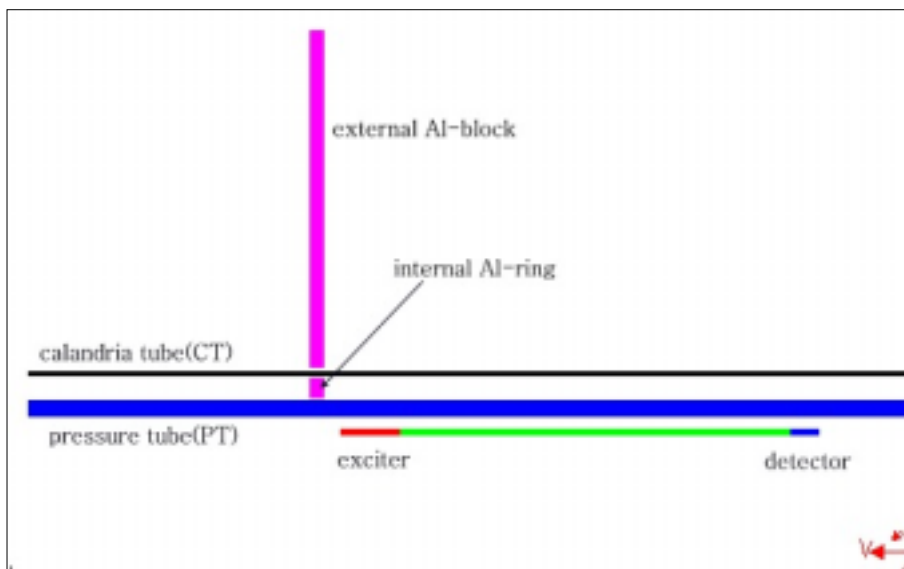


그림 2 2차원 해석모델

표 1 해석사양

항 목		해석값
pressure tube	재질	Zr-2.5%Nb
	도전률	$1.89 \times 10^6 \Omega^{-1} m^{-1}$
	투자율	1.0
	OD	114mm
	ID	104mm
calandria tube	재질	Zircaloy-2
	도전률	$1.43 \times 10^6 \Omega^{-1} m^{-1}$
	투자율	1.0
	OD	133mm
	ID	130mm
external Al-block	OD	350mm
	ID	135mm
	도전률	$3.82 \times 10^7 \Omega^{-1} m^{-1}$
	투자율	1.0
internal Al-ring	OD	128mm
	ID	116mm
	도전률	$3.82 \times 10^7 \Omega^{-1} m^{-1}$
	투자율	1.0
Source	전류값	50A
	주파수	1~10kHz

그림 3은 표 2와 같은 해석변수들을 이용하여 얻은 결과로 여자전류를 1kHz와 10kHz로 입력한 결과로 potential vally를 확인할 수 있다. 주파수가 낮아지면 potential vally의 각도가 둔화됨을 알 수 있다.

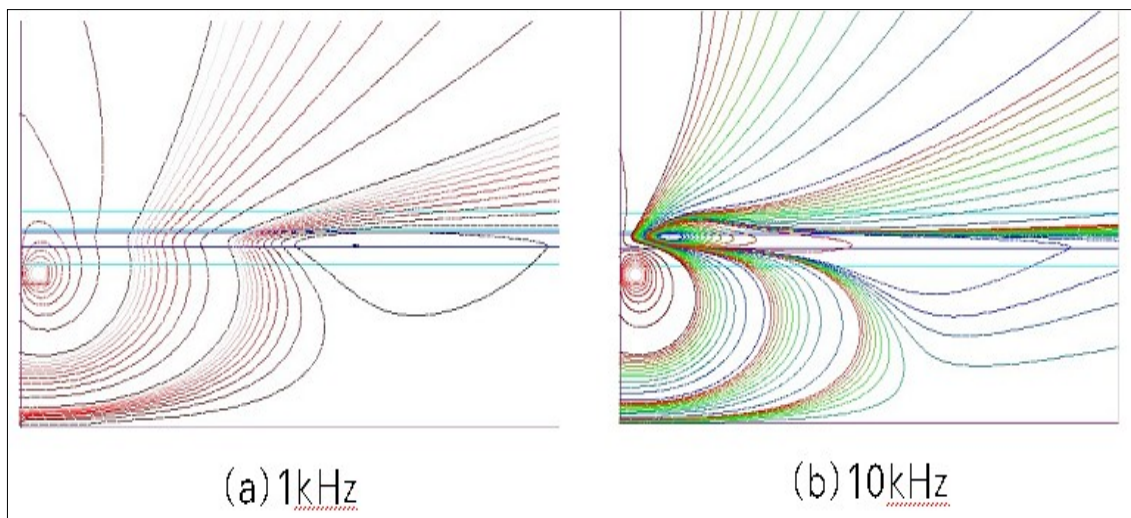


그림 3 주파수에 따른 등전위선

그림 4는 2차원 해석결과 얻은 자기벡터포텐셜의 equiphase 선들로 phase knot를 확인할 수 있다. 주파수가 낮아지면 위상매듭의 각도도 둔화됨을 알 수 있다. 그림 2 해석모델에 3개의 해석선을 다음과 같이 설정하여 각 해석선에서의 자속밀도분포를 나타낸 것이다.

- ① 압력관 내부로 2mm 이동지역
- ② 압력관과 칼란드리아관 사이의 갭 중앙지역
- ③ 칼란드리아관 외부 2mm 이동지역

그림 5는 미리 설정한 3가지 해석영역에서의 자속밀도분포로 exciter가 있는 PT 내부보다 CT 외부가 와전류에 의한 자속밀도가 10배 정도 더 높은 것으로 나타났다.

그림 6은 3차원 해석결과로 자속밀도분포도를 보여주고 있는데, 직접자기장지역, 천이지역, 원거리장지역이 구분됨을 알 수 있다.

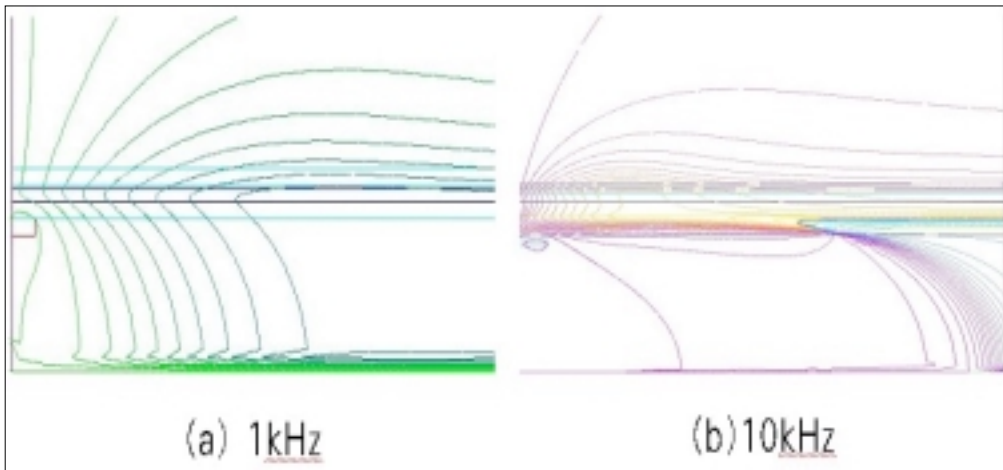


그림 4 주파수에 따른 등위상선

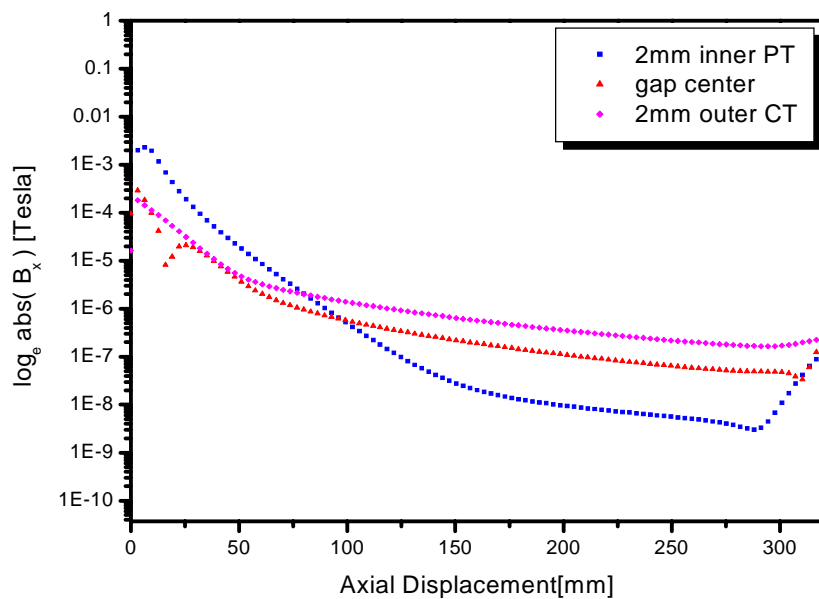


그림 5 radial logarithmic MFD profile

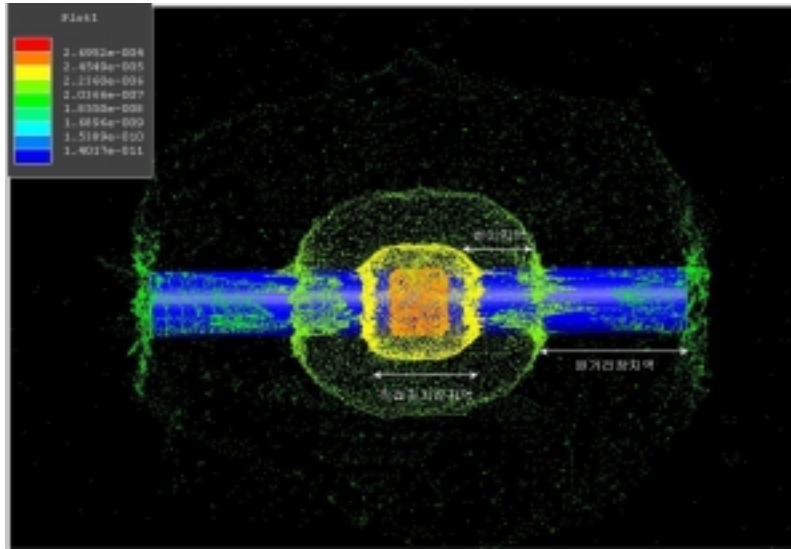


그림 6 3D plot of MFD

### 2.2.1 Parametric 해석

그림 7은 2D-parametric 해석모델로 중간에 gap을 주어 gap 거리를 단계별로 주면서 전자기장을 계산하는 방법으로 코일을 움직이는 대신에 구조물(압력관, 칼란드리아관, Al-ring, Al-block)을 Z 축방향으로 이동시키면서 주파수에 따른 detector의 임피던스와 power loss를 계산하였다.

그림 8은 코일을 고정시키고 구조물들을 이동시키면서 detector에 감지되는 임피던스변화를 계산한 것으로 주파수가 높아짐에 따라 임피던스변화가 커짐을 알 수 있다. 그림 9는 impedance값의 phase lag를 계산한 것으로 주파수가 증가함에 따라 phase값도 커짐을 알 수 있다. 그리고 저주파수 대역에서 구조물에 따른 변화가 현저함을 알 수 있다. 그림 10은 detector에서 감지되는 주파수별 power loss를 계산한 것이다. 주파수가 증가함에 따라 power loss도 증가함을 알 수 있다.

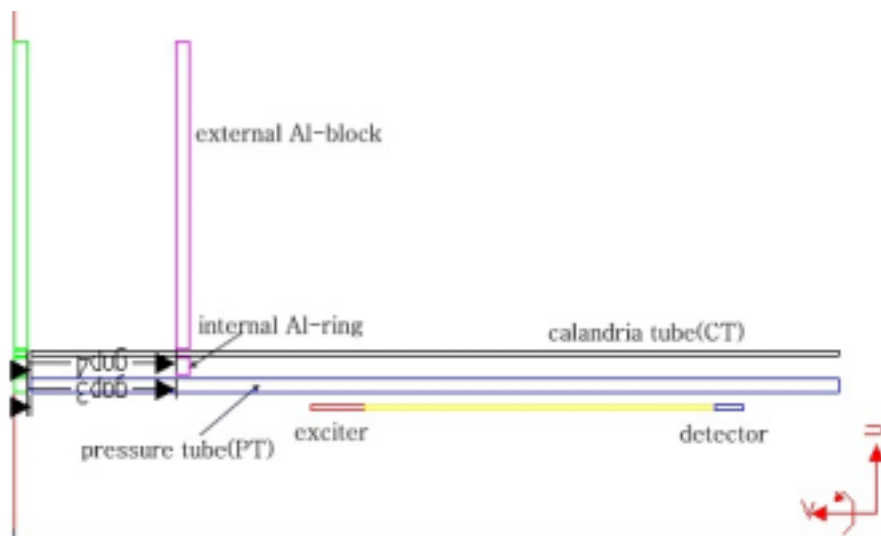


그림 7 2D parametric model



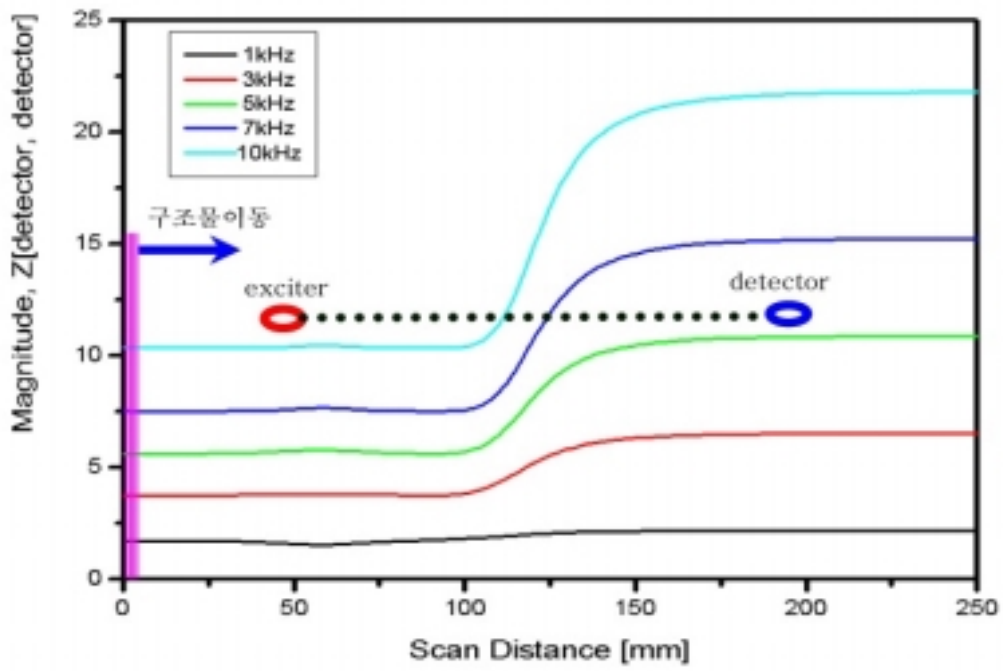


그림 8 radial impedance profile

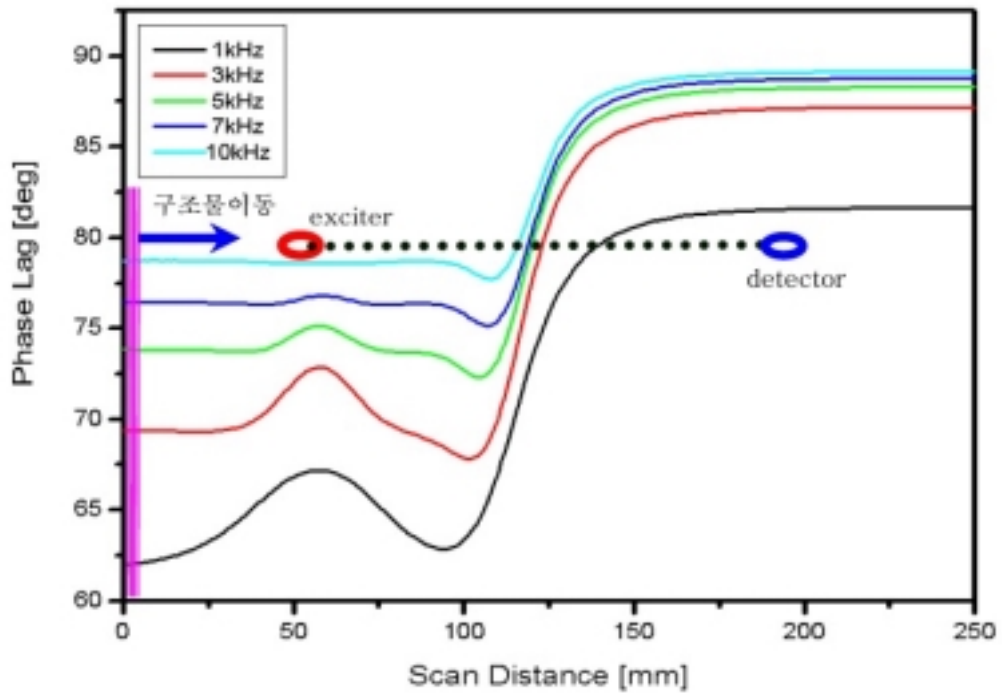


그림 9 radial phase lag profile

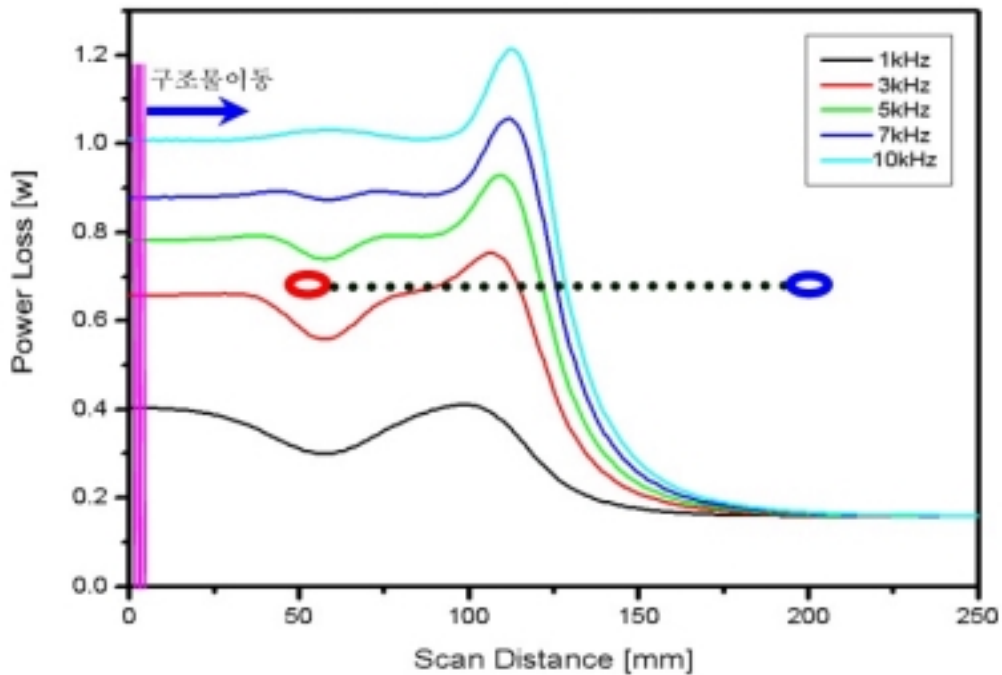


그림 10 radial power-loss profile

### 3. 결 론

CANDU형 핵연료채널 압력관에 대한 원거리장 와전류현상을 파악하기 위하여 유한요소법을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) exciter 여자전류의 주파수가 10kHz일 때 가장 potential vally와 phase knot가 뚜렷하였다.
- 2) 자속밀도의 분포의 경우 압력관 내부보다 칼란드리아관 외부가 약 10배 정도 높은 것으로 계산되었다.
- 3) AI 구조물이 있는 경우 parametric 해석결과 detector에서 계산된 임피던스, phase lag, power loss는 주파수가 높아짐에 따라 각각 높아짐을 알 수 있으며 최적의 detector 위치도 결정할 수 있다.

### 후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1]Y. shindo, T. Yamagishi, and H. Hoshikawa, "The trend of Remote Field Eddy Current Technique in the World, 일본비파괴학회지, 39 (1)(平成 2年 1月, 1990)
- [2]J. L. Fisher, Metals Handbook, 9th ed., Vol. 17, pp195-201, ASM International (1989)
- [3]Ansoft, Maxwell 2/3D Ver. 2.0 User's Guide, 1999