‘99 년도 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

와전류 신호에 미치는 탐촉자 설계 변수 영향평가 및 조사핵연료 검사용 와전류 탐촉자 개발

Evaluation of the Effect of Probe Design Parameters on ECT Signal and Development of Eddy Current Probe for Irradiated Fuel Rods

곽성우, 한용구, 우상균, 김대욱, 박종열, 김봉조, 박진영

한전원자력연료주식회사 설계기술원
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

와전류검사는 결함핵연료 수리시 결함핵연료와 주변핵연료 검사, 초음파검사와 육안검사로는 예측할 수 없는 내부결함을 검사하는데 사용되거나, 결함핵연료 손상원인 규명을 위한 자료 수집에 이용되기도 한다. 본 연구에서는 난해한 와전류 신호 평가의 어려움을 줄이기 위해 검사체 핵연료의 특성 변수가 임피던스에 미치는 영향을 분석평가하였다. 또한 경험적 실험식을 이용하여 조사핵연료 검사용 와전류 탐촉자 개발을 위한 최적 설계 조건을 도출하였고, 도출된 설계 조건에 따라 와전류 탐촉자를 설계·제작하여 외국전문업체로부터 구매한 탐촉자와의 특성 및 성능 비교실험을 실시하여 개발된 와전류 탐촉자 성능을 비교평가하였고 본 연구에서 제시하는 조사핵연료 검사용 와전류 탐촉자의 최적설계 조건을 검증하였다.

Abstract

Eddy current test(ECT) is used to inspect not only the failed fuel rods but also peripheral rods during repairing of the failed fuel rods, to detect internal defects in irradiated fuel rods which could not be detected by ultrasonic test and visual test, and to obtain the data for determining the root cause of fuel rod failure. This study evaluates the effect of properties of test article, irradiated fuel rods, on the impedance diagram in order to reduce the difficulty of ECT signal analysis. The optimum eddy current probe design conditions for inspecting the irradiated fuel rods, is estimate by using experimental equations and the probe is manufactured based on the estimated conditions. The performance of developed eddy current probe and the optimum conditions is proved through characteristic comparison experiment with the probe purchased from the foreign vendor.

1. 서론

와전류란 교류 자장 속에 전도체를 놓았을 때 전도체에 유도되는 와류 모양의 전류를 말하고, 와전류탐상검사는 검사체에 와전류를 발생시켜 시험체 내외부의 특성변화를 예측하는 비파괴검사 기술중 하나이다. 원자력발전소 운전중 외부 유입물인 debris 나 피보관 부식, 빠른 유속으로 인한 핵연료 진동등에 의해 핵연료가 손상되기도 한다. 경제성 평가후 이러한 손상핵연료를 수리하여 재사용하기도 하는데 손상핵연료 수리 과정중 손상핵연료의 결함 원인 규명과 주변핵연료의 건전성 평가를 위해 정밀검사가 필요하다. 육안검사와 초음파검사만으로는 핵연료 피복관의 결함정도나 내

부 결함를 탐상할 수 없으므로 Siemens, ABB-CE, Westinghouse와 같은 외국의 선진 원자력 산업체들은 일찍이 조사핵연료 검사에 와전류검사 기술을 이용하여 왔다. 본 연구에서는 난해한 와전류신호 평가의 어려움을 줄이기 위해 검사체 핵연료의 특성 변수가 임피던스에 미치는 영향을 분석 평가하였다. 또한 조사핵연료 검사용 와전류 탐촉자 개발을 위한 최적 설계 조건을 도출하였고, 도출된 설계 조건에 따라 와전류 탐촉자를 설계·제작하여 외국전문업체로부터 구매한 탐촉자와의 특성 및 성능 비교실험을 실시하여 개발된 와전류 탐촉자 성능과 본 연구에서 제시하는 와전류 탐촉자의 최적설계 조건을 검증하였다.

2. 이론적 원리

2.1 표피효과(Skin Effect)와 위상지연(Phase Lag)

반무한 도체(semi-infinite thickness conductor)에서 유도전류 흐름에 관한 방정식의 해는 식(2.1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{J_x}{J_0} = e^{-b}\sin(wt - b) \qquad (2.1)$$

여기서, J_x : 깊이 x에서의 와전류 밀도(A/m²)

J_0 : 도체표면(x=0)에서의 와전류 밀도(A/m²)

x : 도체 깊이

$\beta : x/\delta$

식 (2.1)에서 $\delta = (\pi f \mu \sigma)^{1/2}$ 로 표준침투깊이(SDP, Standard Depth of Penetration)라 정의되며 표면에서의 전류밀도가 1/e(36.78%)로 감쇄되는 깊이를 의미한다. 표준침투깊이는 검사 가이드로써 사용된다. 식(2.1) 우변의 첫번째 항으로부터 와전류 밀도는 주파수(frequency, Hz), 투자율(electric permeability, H/m), 전기전도도(electric conductivity, Mho/m)에 따라 지수적으로 감소함을 알 수 있는데 이를 표피효과(Skin Effect)라 한다. Fig.2.1은 표피효과를 도식한 그림이다. Fig.2.1에서 알 수 있듯이 주파수, 투자율, 전도도 증가에 따라 와전류 밀도가 투과할 수 있는 깊이는 감소한다. 작은 표면 결함과 내부 큰 결함은 비슷한 크기의 와전류 신호 진폭을 발생시킬 수 있다. 그러나 깊이에 따라 위상 지연의 차이 때문에 동일한 진폭에도 불구하고 결함 위치 예측이 가능하다. 식(2-1) 우변의 두번째식은 표면에서의 와전류와 표면아래 깊이 x에서의 와전류 사이에는 x/δ만큼의 위상각 차이가 존재함을 나타낸다. 만약 깊이가 표준침투깊이와 같다면 위상은 1 라디안(Radian) 혹은 57。 만큼 지연된다.

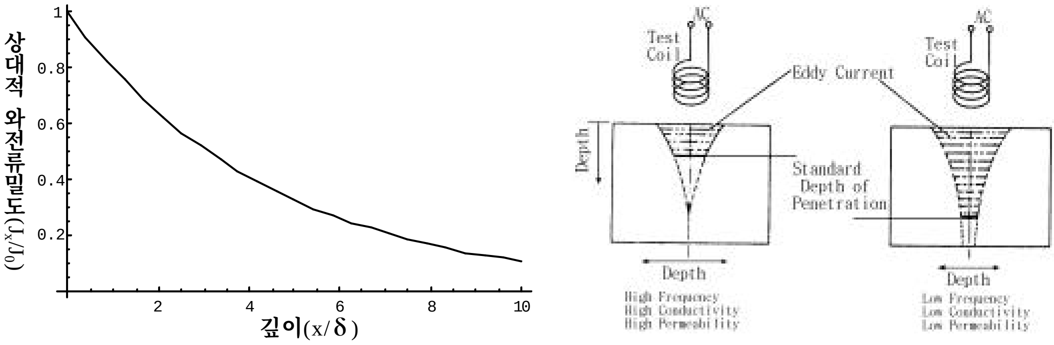


Fig.2.1 **표피효과**(Skin Effect)

2.2 핵연료 특성변수와 코일임피던스 상관관계

핵연료 검사시 발생되는 와전류 신호는 핵연료 특성 변수, 탐촉자 설계 변수, 장비 주파수, 부착된 이물질등과 같은 여러 인자들에 의해 영향을 받으므로 와전류 신호 해석이 어렵다. 만약 어떤 변수 변화가 와전류 신호 거동에 미치는 영향을 사전에 알고 있으면 유사한 신호 발생시 신호 발생원의 가능성을 줄일 수 있으므로 신호 평가가 용이할 것이다. 따라서 본 연구에서는 와전류 검사 장비에서 이용하고 있은 임피던스 커브를 이용하여 검사체 즉 핵연료 특성변수가 임피던스 변화에 어떤 영향을 미치는 가를 분석·평가하였다.

탐촉자와 검사체 핵연료는 각각 다중으로 연결된 1차 코일과 1회 감긴 2차 코일을 가진 transformer로 모델링할 수 있다. 이 등가회로에서 핵연료는 2차 코일로써 유도성 리액턴스(inductive reactance)와 병렬로 연결된 저항 성분으로 가정한다. 표피효과와 위상지연은 무시하였을 때, 결합된 등가회로에서 총 임피던스는 아래 식이 된다.

$$z_p = \frac{N_p^2 R_s X_0^2}{(N_p^2 R_s) + X_0^2} + j\frac{(N_p^2 R_s)^2 X_0}{(N_p^2 R_s) + X_0^2} \qquad (2.2)$$

여기서, X_0 :공기중에서의 코일 유도성 리액턴스(=ωL_0)

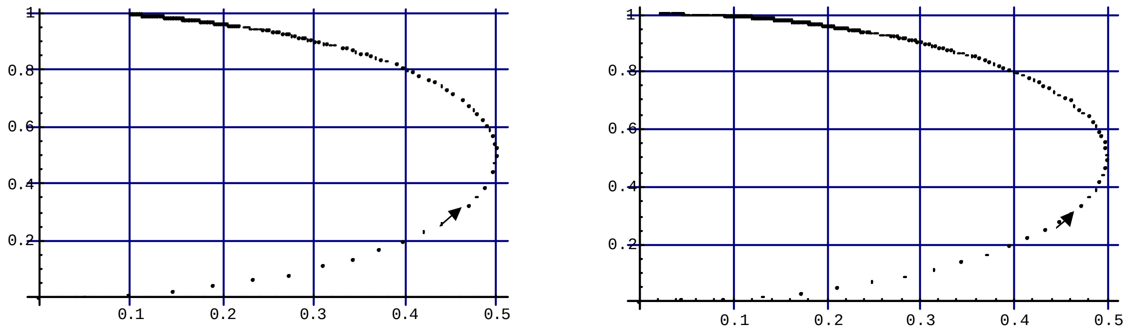
L_0 : 인덕턴스(inductance, H)

R_s : 2차 저항(secondary resistance, ohms)

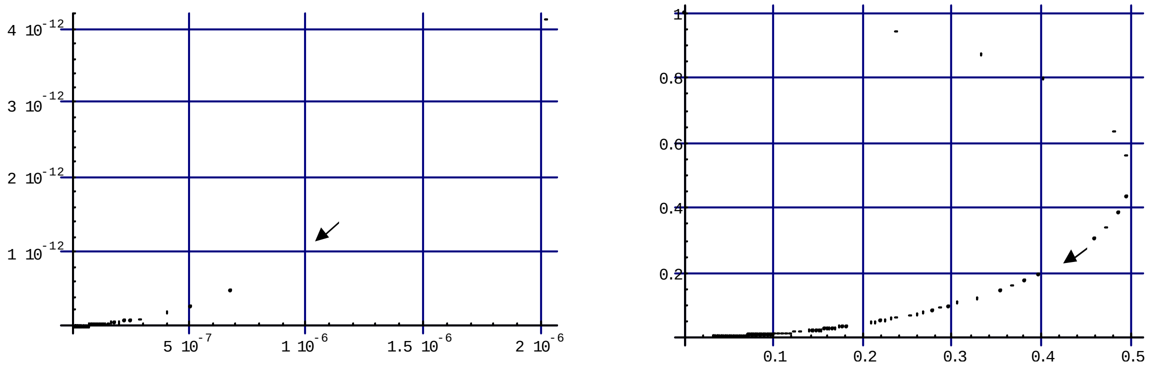
N_p : 권선수

식(2.2)을 이용하여 핵연료 특성 변수가 탐촉자 임피던스에 미치는 영향을 평가하고 또한 각 변수 거동을 분석하였다. Fig.2.2은 핵연료 특성 변수 변화가 탐촉자 인피던스 곡선에 어떤 영향을 미치는 가를 보여준다. Fig.2.2의 X-축은 ωL_0로 균일화된 저항(resistance) 성분이고, Y-축은 균일화된 리액턴스(reactance) 성분이다. Fig.2.2a,b에서 저항 증가에 따라 임피던스 곡선은 반원을 따라 윗쪽으로 움직인다. 핵연료에 표면 결함, 혹은 표면하 결함이 존재하면 와전류 흐름이 방해되므로 탐촉자와 핵연료 검사체 모델링 등가회로에서 저항을 증가시키는 효과와 동일한 효과를 발생시킨다. 따라서 임피던스 곡선 거동이 윗쪽으로 움직이면 와전류 신호 발생원중 하나가 결함일 가능성도 있다고 예측할 수 있다. 핵연료 피복관은 매우 얇은 튜브이므로 최대 두께 변화량을 0.1cm로 가정하에 Fig.2.2c를 얻었다. Fig.2.2c는 핵연료 두께가 증가하면 임피던스 운전점은 아래쪽으로 향함을 보여준다. 앞에서 언급하였듯이 와전류 신호는 여러 복합적 요인들로 인해 발생하므로 특정한 와

전류 신호가 특정한 원인에서 기인한 결과라고 명확히 결론지을 수는 없다. 여러 요인들중 가장 정확한 신호 발생 원인을 찾기 위한 방법중 하나로써 다중 주파수를 사용한다. 주파수가 신호에 미치는 영향을 사전에 파악하고 있어야만 신호평가에 활용할 수 있다. Fig.2.2d 로부터 주파수 증가에 따라 임피던스 운전점은 아래쪽으로 움직임을 알 수 있다.



(a) Resistance 의 영향(Rs : 0 ~ 1 (b) Resistivity 의 영향(ρ : 0 ~ 0.1 μΩ



(c) Thickness 의 영향(t: 0 ~ 0.1cm) (d) frequency 의 영향(f : 0 ~ 5 ㎒)

Fig.2.2 핵연료 특성변수의 영향

3. 핵연료검사용 와전류탐촉자 최적설계조건 도출 및 탐촉자 개발

3.1 핵연료검사용 와전류탐촉자 최적설계조건 도출

탐촉자 내경은 충진율(fill-factor)에 의해 결정된다. 충진율은 0 과 1 사이의 값을 가지고 1 에 가까울수록 결합에 대한 탐촉자 반응신호는 좋다. 그러나 단지 신호감도만 생각하고 충진율을 높이면 와전류 탐촉자에 핵연료 삽입시 문제가 발생할 여지가 있으므로 주의하여야 한다. 핵연료 검사용 탐촉자는 검사대상 핵연료봉이 휘거나 연소도 증가에 따라 핵분열 가스등으로 swelling 이 일어났을 때를 고려하여 탐촉자 충진율이 85%가 되도록 설계하였다. 따라서 탐촉자의 내경은 10.5mm 가 된

다. 시험주파수는 결함신호와 다른 원인으로 인한 신호는 잘 구별하면서 또한 내외부 결함에 대한 분별력도 좋아야 한다. lift-off 신호와 외부결함 신호가 수직(90°)을 이루는 주파수에서 분별력이 가장 좋은데 아래 경험식에 의해 결정된다.

$$f=\frac{3\,\boldsymbol{r}^{2}}{t^{2}} \tag{3.1}$$

본 연구의 1차적 적용 대상은 영광 3&4호기이므로 CE 16x16형를 설계 기준으로 하였다. CE 16x16형 핵연료 피복관 재질은 zircoloy-4 이지만 관련 자료 습득의 어려움으로 인하여 zircoloy-2 의 resistivity, 72 μΩ·cm 를 사용하였다. 국내외 관련 분야의 전문가들에게 자문의한 결과 zircoloy-2 와 zircoloy-4 의 resistivity 값은 거의 비슷할 것으로 예상하였고 또한 주파수 결정식에서도 resistivity 영향 정도도 미미하므로 위의 가정은 타당하다고 생각한다. CE 16x16형 핵연료 피복관의 resistivity(ρ)는 72 μΩ·cm, 두께는 0.635mm 이므로 식(3.1)에 의해 와전류검사를 위한 이론적 검사주파수는 약 530 kHz 이다. 탐촉자 설계시 100kHz 이상의 고주파수나 30m 이상 긴 전선을 사용할 때는 탐촉자와 케이블간 공진을 고려하여야 한다. 와전류 장비는 공진주파수(resonance frequency)를 이용하지 않고 공진주파수 보다 약간 낮거나($0.8f_{resonance}$) 높은($1.2f_{resonance}$) 주파수에서 운전되지만, 주파수 증가에 따라 검사장비의 민감도는 급격히 감소하므로 주로 공진주파수의 0.8 배되는 주파수를 시험주파수로 사용한다. 시험주파수가 536kHz 이면 공진주파수는 670kHz 이다. 탐촉자 제작에 사용한 탐촉자의 케이블은 방수성과 내방사성이 뛰어난 RG-174 를 사용하였는데 RG-174 케이블의 단위 길이당 capacitance 는 101.0pF/m이다. 따라서 25m 케이블의 전체 캐퍼시턴스는 2.525×10^{-9}F 이다. 탐촉자에서 공진은 코일의 유도성 리액턴스(reactance)와 케이블의 용량성 리액턴스(capacitive reactance)가 같을 때 일어나므로 공진주파수(resonance frequency)는 670kHz, 25m 케이블 전체 capacitance 는 2.525×10^{-9}F 이다면 탐촉자의 인덕턴스(inductance)는 0.022mH 이다.

탐촉자내에 자장을 발생시키기 위해 에나멜 구리선(enameled copper wire)를 테프론 봉에 감았다. 여러 겹의 와이어로 감긴 탐촉자 코일의 인덕턴스는 식(3.2)로 계산할 수 있다.

$$L=\frac{0.8(\bar{r}N)^{2}}{6\bar{r}+9l+10b} \tag{3.2}$$

여기서, L : 자기 인덕턴스(self-inductance, μH)

N : 권선수(total numbers of turns)

$\bar{r}$: 평균 반경(mean radius, inches)

l : 코일 길이(length of coil, inches)

b : 코일 깊이 혹은 두께(coil depth or thickness, inches)

지금까지의 결과에 의해 코일 깊이(b)는 0.5mm, 코일 길이(l)은 1.0mm, 평균 반경(¯)은 5.6mm, 인덕턴스(L)는 22 μH이므로 식(3.2)에 의해 탐촉자 권선수(N)는 33 회이다. 그런데 에나멜 구리선를 테프

론 봉에 감는 작업은 수작업으로 수행되기 때문에 아무리 세심한 주의를 해도 항상 코일 깊이(b) 값은 근원적으로 오차가 존재한다. 다른 인자들에 비해 오차 발생 가능성이 큰 코일 깊이 변화가 권선수에 미치는 영향을 알아보기 위해 b=0.8mm 로 가정하에 권선수를 계산한 결과 권선수는 32.24 회로, b=0.5mm 일 때와 차이는 작았다. 따라서 권선수에 대한 코일 깊이의 영향은 미미하므로 이 값을 상수로 가정하고 탐촉자 반지름과 코일 길이 변화에 따른 영향를 분석하였다. Fig.3.1 는 코일 깊이가 상수일 때 탐촉자 반지름과 코일 길이 변화에 따른 필요한 권선수를 보여준다. 먼저 탐촉자 반지름이 같다면 코일 길이가 증가할수록 권선수도 증가하는데 이는 자장의 집중력 차이로 기인한 것으로 생각한다. 반면 탐촉자 반경 증가 즉 충진율(fill-factor)이 감소함에 따라 권선수는 점점 감소한다. Fig.3.2 는 코일 길이, 코일 깊이 그리고 탐촉자 반경이 탐촉자 권선수와 어떤 관계를 가지고 있는가 보여준다. Fig.3.2 에서 x-축은 탐촉자 반경, y-축은 코일 길이, z-축은 권선수이고 아래 평판은 코일 깊이, b=0.5mm, 윗 평판은 b=1.0mm 일 때의 값이다. Fig.3.2 은 코일 깊이가 0.5mm 에서 1.0mm 로 두 배 증가하였음에도 불구하고 탐촉자 반경과 코일 길이 변화에 따른 전체적 권선수는 단지 1 회 내외로 증감하고 있음을 보여준다. 결국 85% 충진율(탐촉자 내경:10.5mm)을 가진 CE 16x16 형 핵연료 검사용 탐촉자는 코일길이는 1.0mm, 코일 간격은 0.6mm, 그리고 권선수는 33 회 일 때 최적 신호를 발생시킬 것이라는 것을 예측할 수 있었다.

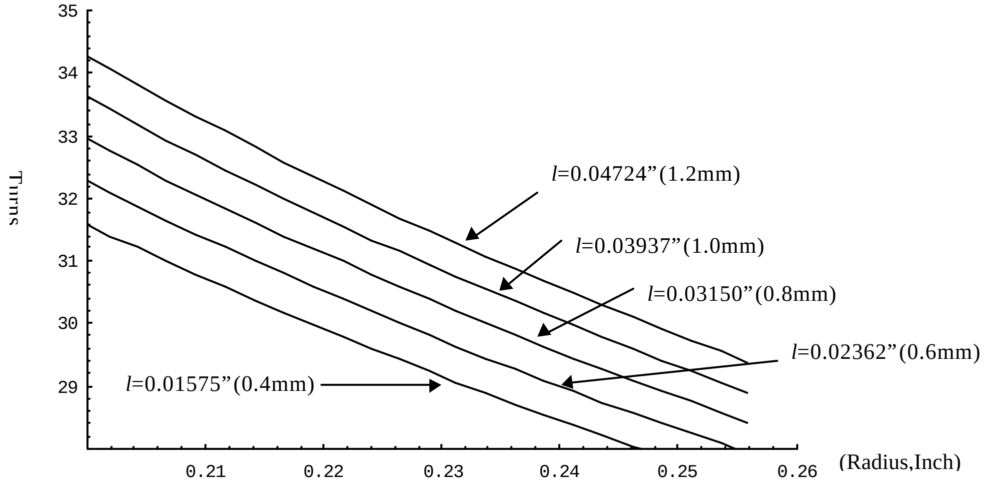


Fig.3.1 탐촉자 반지름($\bar{r}$)과 코일길이(l)에 따른 권선수

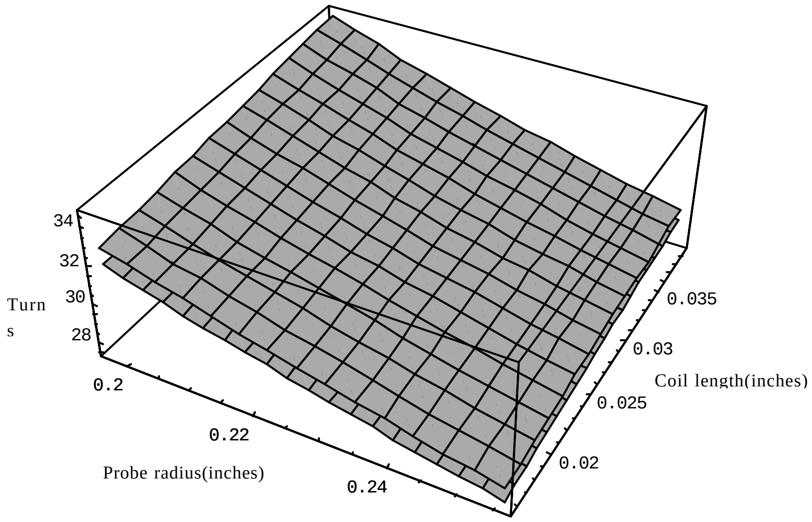


Fig.3.2 탐촉자 반경, 코일 깊이, 코일 길이의 영향

3.2 와전류 탐촉자 개발

3.1 절에서 도출한 최적 설계 조건에 따른 와전류 탐촉자 뿐만 아니라 또한 에나멜 구리선 직경과 권선수의 실질적 영향이 이론적 예측치와 어떤 차이를 보이는지 알아보기 위해 같은 치수를 가진 탐촉자 코아(probe core)에 0.1mm 와 0.14mm 와이어를 33 회, 60 회, 80 회 감아서 탐촉자를 제작하였다. Table 3-1 는 실제 제작된 11 종의 탐촉자 설계 자료이다. Table 3-1 에서 탐촉자 coil length 가 둘로 표시된 것은 제작된 탐촉자가 반대되는 방향을 가진 두개의 코일층으로 구성된 차동형이기 때문이다.

Table 3-1 탐촉자 설계치수

탐촉자 항목	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Probe I.D(mm)	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1
Wire Dia.(mm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.14	0.14	0.14	0.1	0.1	0.1
Coil Length	0.6	0.8	1.0	0.6	1.0	0.6	0.8	1.0	0.8	0.6	1.0
Coil Gap	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4
Coil Length	0.6	0.8	1.0	0.6	1.0	0.6	0.8	1.0	0.8	0.6	1.0
Turns	33	33	33	33	33	60	60	60	80	80	80

탐촉자 코아(probe core)에 반대 방향으로 감긴 두 코일은 정상적인 핵연료 검사시 임피던스 평형을 이루어야 한다. 따라서 에나멜 구리선을 지정된 횟수 만큼 감은 후 각각의 좌우 코일층에서 인덕턴스를 측정하여 인덕턴스 오차가 ±0.05mH 보다 작은 탐촉자만 사용하였다. 임피던스는 인덕턴스

와 저항의 함수이지만 와전류 탐촉자 임피던스은 주로 인덕턴스에 의해 결정되고 저항의 영향은 상대적으로 적은 것으로 나타났다.

4. 와전류탐촉자 특성 실험

와전류탐촉자 특성 실험은 본 연구를 통하여 설계·제작된 11종의 탐촉자와 대비시험편 그리고 미국 Zetec사 MIZ-27SI 와전류 검사장비를 이용하여 수행하였다. 대비시험편은 깊이와 직경이 다른 결함(원형 혹은 노치(Notch) 결함)과 반지름 방향의 결함을 CE 16x16형 피복관에 가공하여 제작하였다. 와전류 탐촉자 특성 실험은 결함에 대한 반응정도와 위상분해능을 비교평가하여 1차적으로 11개 탐촉자중 가장 뛰어난 성능을 가진 탐촉자를 결정하였다. 최적 탐촉자가 결정된 후, 최적 탐촉자 보다 충진율이 높은 탐촉자(충진율:92%)를 동일한 설계·제작 방법으로 추가로 하나 더 제작하였다. 본 연구의 최종 결과물인 충진율 85%와 92%을 가진 탐촉자 성능을 평가하고 또한 탐촉자 최적 설계 조건의 타당성을 검증하기 위해 외국 전문업체로부터 와전류 탐촉자를 구매하여 각 탐촉자들의 성능 비교 실험을 수행하였다. 실험에서 사용한 주파수는 600kHz, 530kHz, 400kHz, 100kHz를 사용하였다.

4.1 최적탐촉자 결정 실험

11종의 탐촉자를 와전류 검사장비에 연결하여 대비시험편 결함에 대한 탐촉자 반응 정도와 분해능을 비교 평가 하였다. 실험 결과, 3번 탐촉자의 와전류 신호 진폭이 가장 크면서 또한 위상 분해능도 가장 뛰어났다. 11개 탐촉자중 1 5번 탐촉자 성능은 대체적으로 우수했으나 그 외 6 11번 탐촉자들의 신호는 진폭이 좋지 않을 뿐만 아니라 위상 분해능도 현저히 떨어졌다. 각 탐촉자의 차이점을 분석한 결과 탐촉자 성능의 차이는 탐촉자의 총임피던스에서 기인함을 알 수 있었다. Table 3-1에 나타나 있는 탐촉자중 성능이 좋은 편에 속하는 1 5번 탐촉자는 낮으면서 100 ohms 근처의 임피던스를 가진 반면 그렇지 못하는 6 11번 탐촉자는 임피던스 값이 최소 230 ohms 이상이었다. 결국 탐촉자 임피던스가 100 ohms에서 벗어날수록 탐촉자의 성능은 떨어졌다.

4.2 신호진폭(Signal Amplitude) 특성 실험

본 연구를 통해 개발된 2종의 탐촉자와 외국전문업체로부터 구매한 탐촉자의 성능비교실험을 실시하였다. 와전류 신호중 Fig 번호 끝에 a가 붙은 것은 외국전문업체, 미국 Zetec사 탐촉자(충진율, η=85%)로부터 얻은 신호이고, b는 85%의 충진율을 가진 KNFC 탐촉자, c는 92%의 충진율을 가진 KNFC 탐촉자로부터 수집한 신호이다. Fig.4.1은 깊이와 직경이 다른 원형 결함이 가공된 대비시험편을 세 탐촉자로 검색하여 얻은 신호이다. Fig.4.1를 보면 알 수 있듯이 세 Fig중 동일한 결함에 대한 신호의 진폭은 Fig.4.1c> Fig.4.1b> Fig.4.1a의 순으로 나타난다. Fig.4.2는 내부 결함을 탐상하여 얻은 신호인데 와전류 신호 진폭의 크기는 Fig.4.1과 같은 동일한 순이었다. Fig.4.2 신호는 Fig.4.1 신호에 비해 큰 위상각 구역에 존재함을 발견할 수 있다. Fig.4.1c와 Fig.4.2c의 신호 진폭이 Fig.4.1b와 Fig.4.2b 보다 크게 나타난 원인은 충진율 증가 때문이다. 각 탐촉자를 이용하여 수집한 와전류 신호를 근거로 자체 개발된 와전류탐촉자의 결함 감지 능력이 외국전문업체로부터 구매한

탐촉자 보다 우수하였는데 특히 1mm 보다 작은 미세 결함이나 원주 방향성을 가진 결함과 같이 탐상하기 어려운 결함 검사시 탐촉자 성능의 차이는 더 확실히 나타났다. 다만 외국업체 와전류 탐촉자에서는 나타나지 않았지만 KNFC 탐촉자의 100kHz 주파수에서의 신호가 다른 주파수(600kHz, 530kHz, 400kHz) 신호에 비해 급격히 감소하는 특이한 현상을 보였다. 그런데 이러한 현상은 핵연료 피복관 두께가 매우 얇으므로 특별한 경우를 제외하고는 100kHz 주파수를 거의 사용하지 않으므로 100kHz 와 같은 저주파수에서의 급격한 감도 감소 현상은 실제 핵연료 검사시 특별한 문제가 되지 않을 것으로 사료된다.

4.3 위상각(Phase Angle) 특성실험

세 탐촉자로 내외부 결함이 가공된 대비시험편을 탐상하여 위상각 분해능 비교평가를 위해 보정곡선(correlation curve)를 작성하였다. 보정곡선에 나타나는 결함 신호의 위상각이 0°~ 40° 사이에 존재하면 debris, wear, fretting damage 와 같은 외부 결함, 40±5° 는 관통 결함, 40°~ 165° 사이는 hydrizing 과 같은 내부결함을 의미한다. 보정곡선상에서 위상각의 구별정도로 각 탐촉자의 분해능을 비교한 결과, 세 탐촉자 모두 전체적으로 비슷한 정도의 분해능을 가지고 있었다. 탐촉자 공통적으로 내부 결함에 대해서는 위상각 구분이 분명하지만 외부 결함은 내부 결함의 경우에 비해 위상 분해능이 떨어졌다. Zetec 탐촉자 보정곡선은 내부 결함 부분에서 위상각 증가에 따라 결함 깊이 감소율이 일정하지 않은 반면 KNFC 탐촉자 보정곡선은 균일한 감소율을 보였다. 충진율 증가에 따라 신호 진폭이 크게 증가되었던 앞의 실험결과와는 달리 충진율 변화는 위상각 분해능에 특이할 만한 영향을 미치지 못하는 것으로 나타났다.

5. 결과 및 향후 개선 사항

정확한 와전류 검사를 위해 사전에 사용하고자 하는 와전류 탐촉자 특성을 파악하고 또한 자체 개발된 탐촉자의 성능을 평가하기 위해 결함 반응 감도와 위상 분해능을 이용하여 탐촉자 특성실험을 수행하였다. 기본적 잡음 신호인 탐촉자 흔들림(wobbling)에 대해 세 탐촉자 모두 둔감한 편으로 Wobbling 에 의한 탐촉자 성능 저하 현상은 발생하지 않았다. 1mm 이상 크기의 결함에 대한 감도는 세 탐촉자 모두 대체적으로 우수하였으나 1mm 이하의 결함이나 원주방향성을 가진 결함에 대해서는 Zetec 탐촉자 결함 신호가 다른 잡음 신호에 섞어서 구별이 되지 않는 경향이 있었다. 그 외에 다른 결함에 대한 와전류 신호 진폭을 검토한 결과, 결함에 대한 감지능력은 전반적으로 KNFC 탐촉자가 Zetec 탐촉자 보다, KNFC 탐촉자중 충진율이 큰 탐촉자가 작은 탐촉자 보다 우수하였다. 탐촉자 성능 평가시 결함에 대한 반응 능력외에 중요한 사항은 위상 분해능이다. 위상 분해능 평가 결과에 의하면 세 탐촉자 모두 비슷하게 양호 하였고, 동일한 탐촉자라고 할지라도 저주파수보다 고주파수에서 위상각이 넓게 분포됨에 따라 결함깊이 평가시 기본주파수와 함께 고주파수를 사용하는 것이 유리할 것으로 예상되었다. 본 연구에서 결험적 실험식을 이용하여 핵연료 검사용 와전류 탐촉자 최적 설계 조건을 도출하였고, 그 결과에 따라 탐촉자를 설계·제작하여 외국전문업체로부터 구매한 탐촉자와 성능비교 평가 실험을 수행하였다. 실험 결과 개발된 탐촉자 성능이 외국업체 탐촉자 보다 우수한 것으로 판정되었다. 본 연구에서 도출된 핵연료 검사용 와전류 탐촉자의 최적 조건을 타당하다고 사료된다.

실험에 사용된 와전류 탐촉자는 ABB-CE 16x16 형 핵연료 검사용이므로 직경이 작은 17x17 형 핵연료(연료봉 외경:9.5mm)를 검사하면 결함 감도가 떨어지고, 14x14 형 핵연료(연료봉 외경:10.72mm)검사는 큰 직경 때문에 검사 자체가 불가능 하다. 따라서 정확하고 신뢰성 있는 검사결과를 얻기 위해서는 현재 국내 원전에서 사용하고 있는 핵연료 각각의 특징을 고려한 여러 형태의 탐촉자와 표준시험편 개발이 요구된다. 실제 핵연료 검사시 차동형과 절대형 탐촉자를 동시에 사용하면 두가지 형태의 탐촉자 장단점을 상호 보완할 수 있으므로 검사 결과 신뢰성 제고에 기여할 수 있다. 따라서 두 종류의 탐촉자를 함께 사용하기 위해 두 탐촉자 사이 임피던스 평형을 이룰 수 있는 탐촉자를 제작도 함께 필요하다.

6. 참고문헌

1. Hugo L. Libby, *Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods*, Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York(1979)
2. Edward M. Purcell, *Electricity and Magnetism*, McGraw-Hill(1985)
3. D.J. Hagemaier, *Eddy Current Standard Depth of Penetration*, Materials Evaluation, Vol.43, pp1438~1454(1985)
4. Chalk River Nuclear Laboratories, *Eddy Current Testing Manual on Eddy Current Method Volume 1*, AECL, AECL-7523(1981)
5. Jack Blitz, *Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing*, Atam Hilger(1991)
6. Robert C. McMaster, Paul Mcintire, Michael L. Mester, *Nondestructive Testing Handbook Vol.4 : Electromagnetic Testing*, ASNT(1986)
7. 이희종, 남민우, 이진황, *원형튜브 단면형상검사용 와전류탐촉자 개발*, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, Vol.17, No.4(1997)

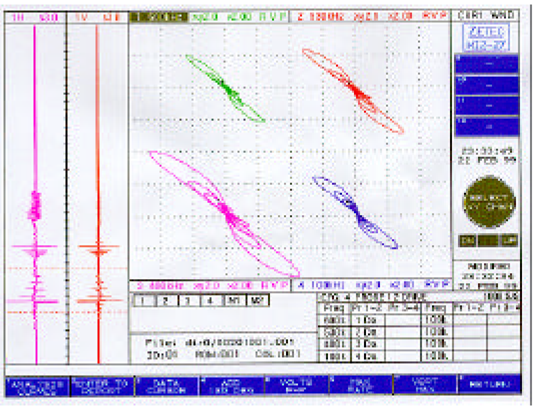


Fig.4.1a **외부 결함에 대한** Zetec probe($\eta = 85\%$) **와전류 신호**

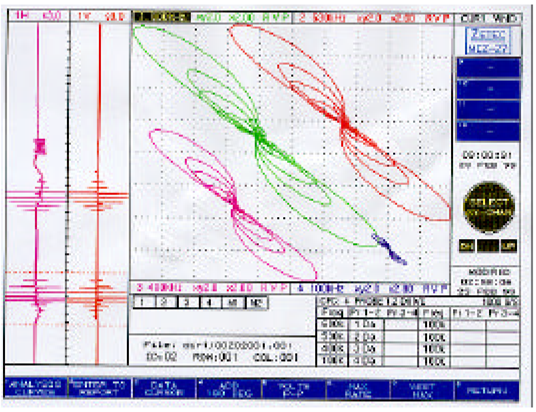


Fig.4.1b **외부 결함에 대한** KNFC probe($\eta = 85\%$) **와전류 신호**

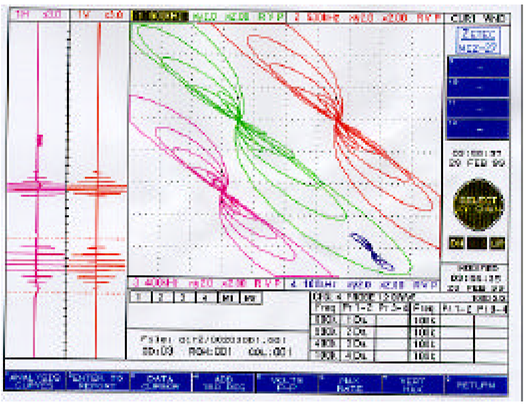


Fig.4.1c **외부 결함에 대한** KNFC probe($\eta = 92\%$) **와전류 신호**

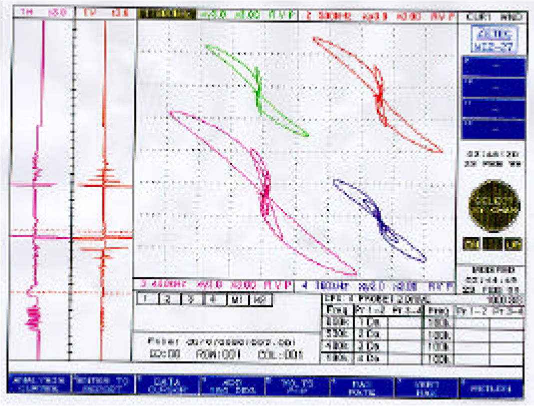


Fig.4.2a **내부 결함에 대한** Zetec probe($\eta = 85\%$) **와전류 신호**

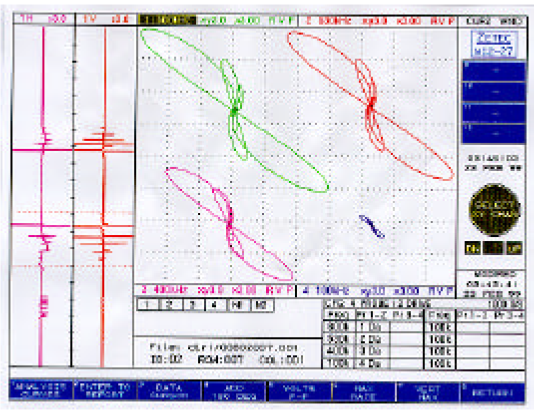


Fig.4.2b **내부 결함에 대한** KNFC probe($\eta = 85\%$) **와전류 신호**

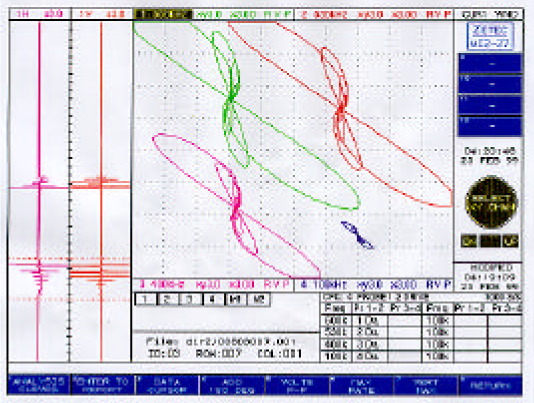


Fig.4.2c **내부 결함에 대한** KNFC probe($\eta = 92\%$) **와전류 신호**