

## 사용후 핵연료봉의 결함탐상 탐촉자 개발 및 시험 평가

### Development and Test Evaluation of ECT Probe to Detect Defects in Spent Nuclear Fuel Rods

양송열, 이형권, 서항석, 전용범, 김은가

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

#### 요 약

사용후 핵연료봉의 결함탐상을 위하여 차동환상형 와전류시험 탐촉자를 설계·제작하여 사용후 핵연료봉 시험을 위한 최적의 시험조건을 구하였다. 관통결함, 내부결함, 외부결함을 전기 방전 가공한 표준시편에 대하여 와전류시험을 수행함으로써 시험주파수와 출력신호의 위상 및 크기에 대한 상관 관계를 구하였다. 이를 토대로 하여 울진 원자력 2호기에서 연소한 사용후 핵연료봉 J09-L01에 대하여 와전류시험을 수행하여 관통결함과 외부결함 신호를 얻었다. 관통결함 및 외부결함으로 예측된 위치에서 금속조직시험을 수행하여 얻은 결과는 와전류시험 결과와 잘 일치하였다. 따라서 와전류시험법은 사용후 핵연료봉의 피복관에 대한 건전성을 평가하는 도구로써 그 신뢰성이 양호함을 실증하였다.

#### Abstract

The Eddy Current Test(ECT) probe of differential encircling coil type was designed and fabricated, and the optimum condition of ECT was evaluated by the examination of the spent nuclear fuel rod. The correlation between ECT frequency and phase & amplitude was derived from performing the test of the standard rig that includes inner notches, outer notches and through-holes. The defect of through-hole was predicted by ECT at the J09-L01 spent nuclear fuel rod in the Urchin-2 nuclear power reactor. The result of metallographic examination on the J09-L01 fuel rod was performed at the defect location predicted by ECT. The result of metallographic examination for the J09-L01 fuel rod was in good agreement with that of ECT. This proves that the evaluation for integrity of fuel rod by ECT is reliable.

#### 1. 서론

원자로의 핵연료 결함은 원자력발전의 안전성에 영향을 주게 되는데 핵연료 피복관의 건전성에 대한 시험 및 평가의 한가지 방법으로 와전류시험법을 이용하고 있다. 와전류시험은 전자기 유도 법칙을 이용하여 핵연료봉 피복관의 결함유형, 결함크기 및 결함위치에 대한 정보를 얻는 효율적인 방법으로<sup>(1~10)</sup> 외국에서는 일찍부터 이용되어 왔다.

일반 실험실의 와전류시험과는 달리 원자로에서 중성자 조사 후 방사능을 띤 핵연료봉에 대한

와전류시험을 수행하기 위해서는 원자로에서 조사한 핵연료봉을 운반하여야 하고, 방사능을 차폐할 수 있는 차폐시설 그리고 핵연료봉을 움직일 수 있는 원격조종 장치가 설치되어야 하며, 방사선에 견딜 수 있는 탐촉자 제작 등의 제약조건 때문에 핵연료 봉에 대한 와전류시험의 적용이 지체되었다. 이를 해결하기 위하여 시편을 관찰할 수 있는 납 유리창과 연료봉을 움직일 수 있는 원격조종장치 등 차폐장치를 설치하였으며, 핫셀 차폐시설 내에 4m 길이의 핵연료봉을 스캐닝할 수 있는 스캐닝 벤치를 설치하였다. 또한 방사선에 잘 견디는 테프론 재질을 사용하여 탐촉자를 설계·제작하였다. 그리고 이와같은 시설을 이용하여 원자로에서 조사시킨 사용후 핵연료봉에 대하여 핵연료봉의 결함유형, 결함형태, 결함위치를 결정하는데 와전류검사법을<sup>(11~13)</sup> 이용하였다.

방사능을 띤 사용후 핵연료봉에 대한 결함 탐상은 충분한 측정 감도, 정확한 결함 위치 판별, 결함 유형 등을 판별할 수 있어야 하므로, 방사선이 나오지 않는 미조사 핵연료봉에 대하여 전기방전 가공으로 표준 결함을 가공하고 예비 실험을 수행하여 최적의 시험조건을 구하였다. 이 시험조건을 바탕으로 방사선 차폐시설인 핫셀에서 사용후 핵연료봉에 대한 비파괴 와전류시험을 수행하고 시험결과를 토대로 결함부분의 핵연료봉을 절단하여 금속조직시험을 수행하였다. 와전류 시험 결과와 금속조직시험결과를 비교하고 분석함으로써 와전류시험에 의한 사용후 핵연료봉의 건전성 평가에 대한 신뢰성을 연구하였다.

## 2. 시험장치

와전류시험 장치는 핫셀 내부에 설치되어 있는 주사장치, 와전류시험 탐촉자 그리고 핫셀 외부에 설치되어 있는 와전류시험 장치 본체 및 신호 처리 부분으로 구성되어 있으며, 와전류시험 장치 본체는 프랑스의 Intercontrole 사에서 제작한 Defoscope 이며 주파수 범위는 1kHz~1MHz로서 연속적으로 가변 할 수 있다. 와전류시험 장치는 차동 환상형 코일에 최적 주파수를 여기, 인가함으로써 핵연료봉에 와전류신호가 발생하게 된다. 이 미세 신호를 증폭하고 위상 및 진폭을 조절하여 필요한 임피던스 신호가 CRT에 나타나도록 한다. 와전류시험의 본체에서 나오는 임피던스 신호는 저항성분과 리액턴스 성분으로 분리하여 A/D 컨버터로 접속하여 개인용 컴퓨터에 연결하였다. A/D 컨버터는 12비트의 해상도를 가지고 있으며, 와전류신호 수집 및 분석용 프로그램은 C언어로 작성하였다. 핵연료봉의 구동은 스텝 모터에 의해 상하 및 회전이동이 가능하도록 스텝 모터 제어장치를 제작하였으며, 핵연료봉 시험위치가 실시간으로 나타나게 하였다.

와전류시험 탐촉자는 Fig. 1 과 같이 차동 환상형(differential encircling type)으로 설계·제작하였으며, 탐촉자 설계 사양은 Table 1에 나타내었다.

시험체에 대한 와전류의 skin effect에 의한 표준 침투 깊이  $\delta$ 는  $\delta = 50 \sqrt{\rho / f \cdot \mu \gamma}$  으로부터 계산하면 0.7mm 정도가 된다.

Items	Design Spec
Outer Diameter of Fresh Fuel Rod	10.72mm
Lift-off between Coil and Fresh Fuel Rod	0.6mm
Wire Diameter	0.08mm
Width of Coil 1 and Coil 2	0.6mm
Number of Coil Winding	50 Turns
Coil to Coil Spacing	0.6mm

Table 1. Design specification of ECT probe

핵연료봉이 원자로에서 중성자 조사를 받으면 핵연료봉 직경 변화가 생기는데 와전류신호위상을 관찰하여 핵연료봉의 직경 증감을 알 수 있다. 탐촉자는 방사선에 비교적 강하고 가공하기가 쉬운 테프론을 사용하였으며, 와전류시험 표준 시료는 외경 10.72mm, 두께 0.6mm의 Zircaloy-4 미조사핵연료봉에 인공결함을 방전 가공하여 만들어 사용하였다.

### 3. 최적시험조건 결정

최적시험조건을 결정하기 위하여 미조사핵연료봉의 피복관을 사용하여 전기방전가공법으로 표준시편을 제작하였다. 표준시편은 Fig. 1과 같이 관통결함, 외부결함, 내부결함으로 구성되어 있으며, 결함유무 및 형태를 알 수 있는 시험조건을 찾기 위하여 위상 및 감도특성시험을 수행하였다.

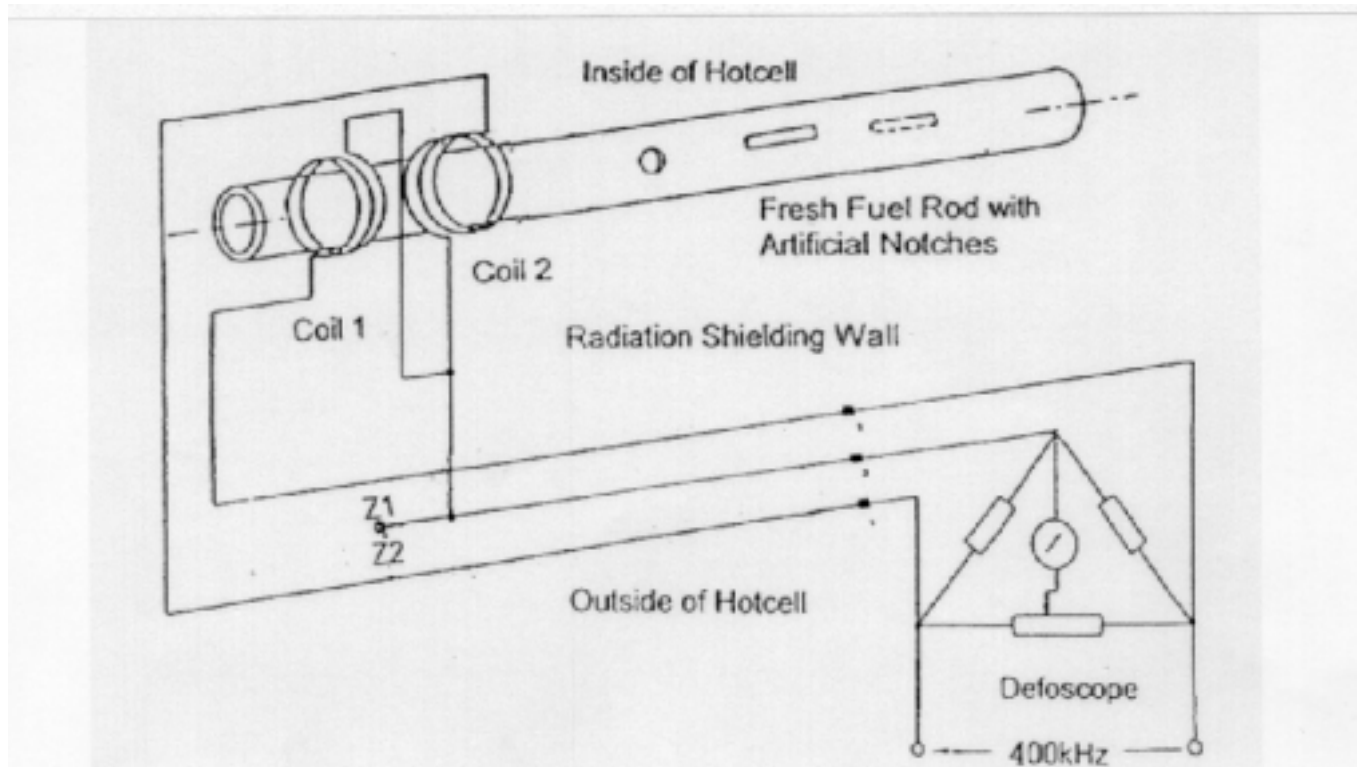


Fig. 1. Schematic diagram of probe and standard specimen

제작된 시편에 대한 위상특성시험을 수행하기 위하여 와전류시험 주파수를 100kHz에서 500kHz까지 변화시키면서 관통결함에 대한 와전류신호를 측정하여 Fig. 2에 나타내었으며, 시험 주파수가 증가함에 따라 와전류신호의 위상이 커짐을 알 수 있다. 결함유형에 따른 위상특성을 구하기 위하여 관통결함에 대하여는 시험 주파수와는 무관하게 위상 45° 로 고정한 상태에서 내부결함 및 외부결함에 대한 위상특성시험을 수행하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 위상특성시험결과는 내부결함의 경우에는 시험 주파수가 커짐에 따라 위상이 증가하고, 외부결함의 경우에는 감소하였으며, 200kHz 이상에서 외부결함의 위상과 내부결함의 위상이 뚜렷이 구분됨을 알 수 있었다. 또한 결함유무 및 크기 판단을 위한 감도특성시험을 수행하였으며, 결과를 Fig. 4에 나타내었는데 200kHz에서 감도가 가장 우수하였다. 따라서 위상이 뚜렷이 구분되는 조건을 만족하면서 감도가

우수한 최적 주파수는 200kHz 였다.

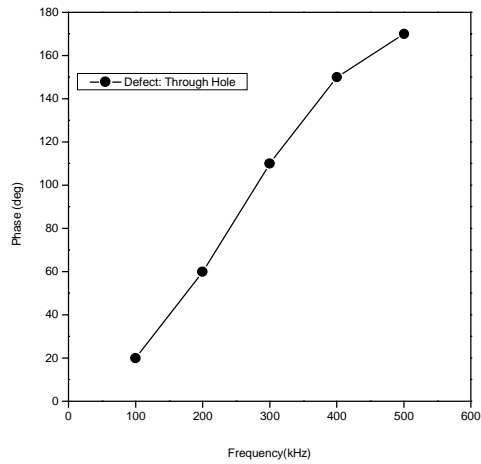


Fig. 2. Phase characteristic of through-hole defect.

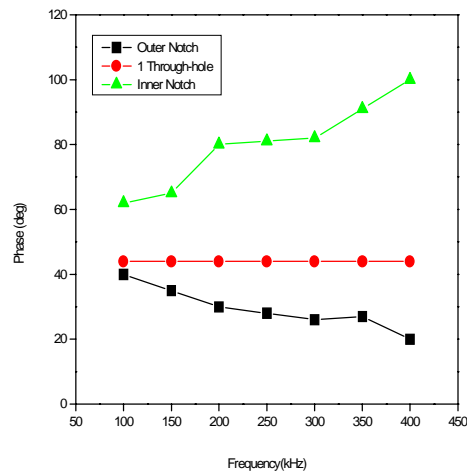


Fig. 3. Phase characteristic at fixed phase of through

동일한 크기의 관통결함에 대하여는 관통결함의 개수가 증가함에 따라 와전류신호가 비례하여 커졌으며 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 이를 통하여 조사핵연료봉 시험을 위한 와전류시험 장치에 대한 신뢰성을 확인하였다. 표준시편에 대하여 최적 시험 주파수 200kHz에서 와전류시험을 수행하여 Fig. 6에 나타내었는데, 내부결함, 관통결함, 외부결함간의 위상이 뚜렷이 구분되었으며, 결함 유무 판독에 충분할 만큼 진폭도 크게 나타났다.

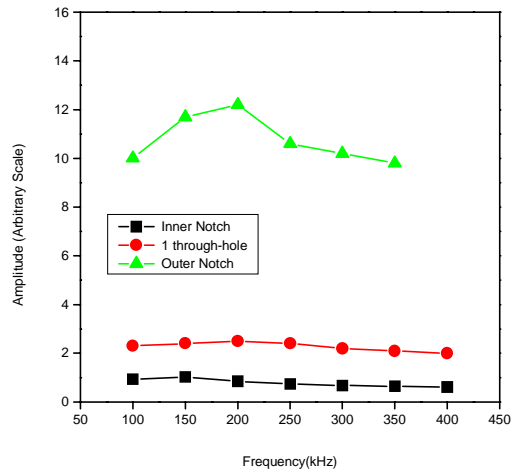


Fig 4. Amplitude characteristic of defects.

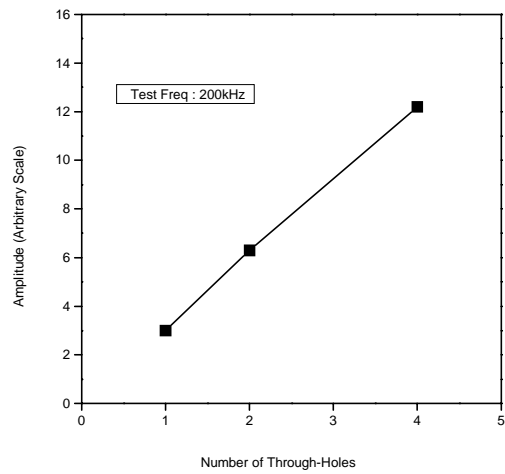


Fig. 5. Amplitude versus number of through-hole

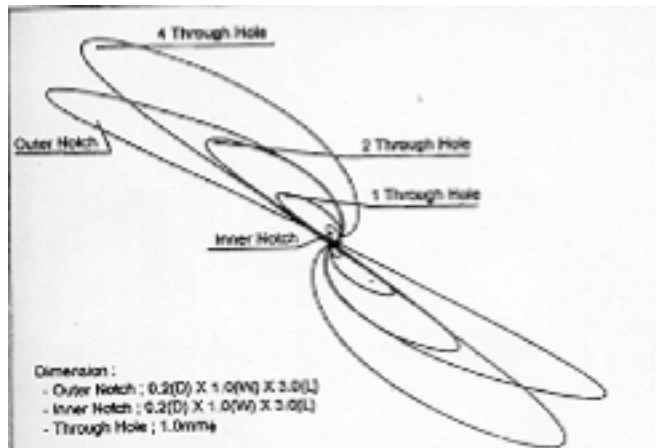


Fig. 6. signals at test frequency 200kHz.

#### 4. 조사핵연료봉에 대한 결함탐상 시험

조사핵연료봉에 대하여 와전류시험을 수행하였으며, 시험결과 관통결함과 외부결함이라고 예측한 위치에서 금속조직시험을 수행하여 그 시험결과를 8배의 현미경 사진으로 나타내었다.

울진원자력 2호기 조사핵연료봉 J09-L01에 대한 와전류시험을 핫셀에서 수행한결과 다수의 결함이 발견되었다. Fig. 7은 와전류시험으로 얻은 핵연료봉에 대한 관통결함 신호와 핵연료봉 횡단면 금속조직 사진을 대비하여 나타낸 것이다. 결함위치는 핵연료봉 하단으로부터 1140mm와 1169mm이었고, 저항성분 신호와 리액턴스 성분 신호를 시간영역 및 임피던스 영역에서 나타내었다. 임피던스 영역에서의 와전류신호는 위상으로보아 관통결함과 외부결함으로 예측할 수 있었으며, 피복관 관통결함 및 외부결함을 금속조직시험 사진에서 확인할 수 있었다. 따라서 와전류시험으로 조사핵연료봉의 건전성을 평가함에 있어서, 핵연료봉 피복관에 존재하는 결함유형, 결함크기 및 결함위치에 대하여 신뢰성이 높은 정보를 제공할 수 있음을 실증하였다.

#### 5. 결론

- (1) 와전류시험용으로 차동 환상형 탐촉자를 설계 및 제작하여 결함 형태에 대한 신호특성시험을 수행한 결과 와전류시험 장치의 신호 신뢰성이 양호함을 확인하였다.
- (2) 위상특성 및 감도특성시험을 수행한 결과 조사핵연료봉에 대한 최적 주파수는 200kHz였다.
- (3) 울진 원자력 2호기에서 연소한 J09-L01, 핵연료봉에 대하여 와전류시험을 수행하여 핵연료봉 하단으로부터 1169mm의 위치에서 관통결함을 검출 및 판독할 수 있었고, J09-L01 핵연료봉에 대하여 와전류시험을 수행하여 핵연료봉 하단으로부터 1140mm의 위치에서 외부결함을 검출 및 판독할 수 있었으며, 금속조직시험을 수행하여 얻은 결과는 와전류시험 결과와 잘 일치하였다. 따라서 와전류시험법이 조사핵연료봉 피복관에 대한 건전성 평가에 효율적인 방법임을 실증하였다.

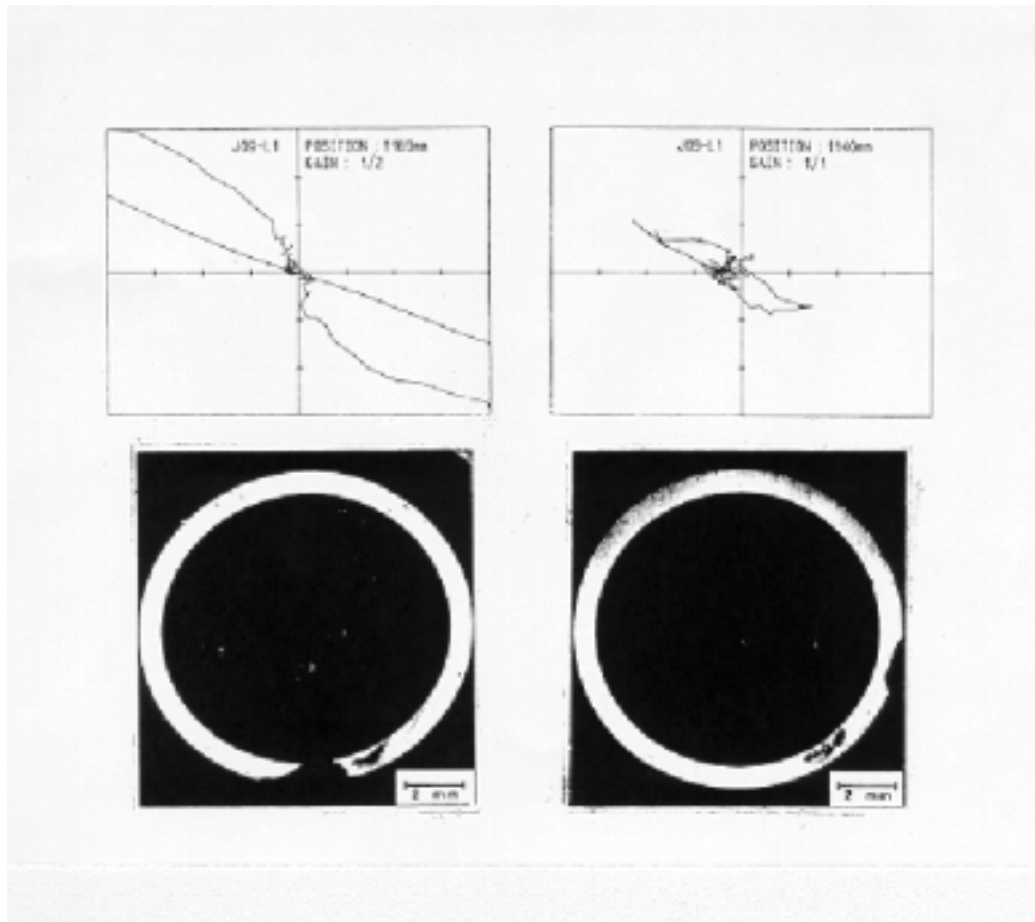


Fig.7. ECT signal(impedance and time domain) and photograph of macro-structure

#### 참고 문헌

1. D. J. Hagemmaier, "Eddy Current Impedance Plane Analysis," Mat. Eval. Vol. 41(1983), pp 211-218.
2. E. M. Frankin, R. D. Phipps, " Eddy-Current Cladding Integrity Testing and Data Analysis," Hot Cell Examination and Maintenance Equipment, ANS, Vol. 33, No. 11-15(1979), pp. 906-907.
3. G. V. Drunen, V. S. Cecco, "Recognition Limitation in eddy -Current Testing," NDTInter., Vol. 17, No1(1975), pp. 210-213.
4. F. R. Bareham, B.Sc. and Inst. P., "Choice of Frequency for Eddy-Current Tube Testin g," Brtish J. Appl. Phys., Vol. 11(1960), pp. 218-222.
5. J. H. Smith, C. V. Dodd, "Optimization of Eddy Current Measurement of Coil-to-Conductor Spacing," Mat. Eval. Vol. 33(1975), pp. 279-292.
6. D. J. Hagemaoer, "Application of Eddy Current Impedance Plane Testing," Mat. Eval. Vol. 42(1984), pp. 1035-1040.
7. R. Spal., A. H. Kahn, "Eddy Currents in a Conducting Cylinder with a Crack," J. Appl.

Phys.(1979), pp. 6135-6138.

8. J. H. Flora, et al., "Nondestructive Examination of Irradiated Fuel Rods using Encircling and Probe Eddy-Current Systems," Proc. 25th Conference on Remote Systems Technology (1977), pp.264-271.

9. J. B. Hallett, et al, "An Eddy Current Probe for Separating Defects from Resistivity Variations in Zirconium Alloy Tubes," Mat. Eval. Vol. 42(1984), pp. 1276-1280.

10. R. D. Phipps, et al., "Eddy-Current Examination of Irradiated Fuel Elements at the Hot Fuel Examination Facility," Proc. 25th Conference on Remote Systems Technology(1977), pp.245-250.

11. 노성기외, "가압경수로 핵연료 조사후 시험연구," KAERI/RR-585/86(1986), PP49-50.

12. 이기순외, "고리원자력1호기 핵연료봉 파손원인 규명연구( I )," KAERI/RR-814/88(1988), PP.31-32, 86-89.

13 노성기외, "가압경수로 핵연료 조사후 시험연구," KAERI/RR-708/87(1987), PP.84.