

와전류시험에 의한 조사핵연료봉의 결함 검사

구대서, 박윤규, 김은가
한국원자력연구소

요 약 핵연료봉의 결함 탐상을 위하여 차동환상형 와전류시험 탐촉자를 설계 및 제작하여, 핵연료봉 시험을 위한 최적 시험 조건을 구하였다. 관통결함, 내부결함, 외부결함을 낸 표준시편에 대하여 와전류시험을 수행함으로써 시험 주파수와 출력 신호의 위상 및 크기에 대한 상관 관계를 구하였다. 이를 토대로 하여 고리원자력 1호기에서 연소한 핵연료봉 G33-N2에 대하여 와전류시험을 수행하여 관통결함 신호를 얻었다. 와전류시험에서 관통결함으로 예측된 위치에서 금속조직시험을 수행하여 얻은 결과는 와전류시험결과와 잘 일치하였다. 따라서 와전류시험법은 조사핵연료봉의 피복관에 대한 건전성을 평가하는 도구으로써 그 신뢰성이 양호함을 실증하였다.

1. 서론

원자로의 핵연료 결함은 원자력발전의 안전성에 영향을 주게 되는데 핵연료 건전성에 대한 시험 및 평가의 한 가지 방법으로 와전류시험법을 이용하고 있다. 와전류시험은 전자기유도법칙을 이용하여 핵연료봉 피복관의 결함 유형, 결함 크기 및 결함 위치에 대한 정보를 얻는 효율적인 방법으로^{1~10)} 외국에서는 일찍부터 이용되어 왔다.

일반 실험실의 와전류시험과는 달리 원자로에서 중성자 조사후 방사능을 띤 핵연료봉에 대한 와전류시험을 수행하기 위해서는 원자로에서 조사한 핵연료봉이 마련되어야 하며 이를 차폐할 수 있는 차폐 장치 그리고 시편을 움직일 수 있는 원격 조정 장치가 설치되어야 하며 방사선에 견디는 탐촉자 제작 등의 제약 조건 때문에 핵연료봉에 대한 와전류시험 적용이 지체되었으며 이를 해결하기 위하여 시편을 관찰할 수 있는 납유리창과 시편을 움직일 수 있는 원격 조정 장치 등 차폐 장치를 설치하였으며, 핫셀 차폐 시설내에 핵연료봉 4m를 스캐닝할 수 있는 스캐닝 벤치를 설치하였다. 또한 방사

선에 잘 견디는 테프론을 써서 탐촉자를 설계·제작하여 원자로에서 사용한 조사핵연료봉(irradiated fuel rod)에 대하여 핵연료봉의 결함 형태 및 결함 위치를 결정하는데 와전류검사법을^{11~13)} 이용하였다.

방사능을 띤 조사핵연료봉에 대한 결함 탐상은 충분한 측정 감도, 정확한 결함 위치 판별, 결함 유형 등을 판별할 수 있어야 하므로, 방사선이 나오지 않는 미조사핵연료봉(fresh fuel rod)에 대하여 예비실험을 수행하여 최적 시험 조건을 구하였다. 이 시험 조건을 바탕으로 방사선 차폐 장치가 되어있는 핫셀(hot cell)에서 조사핵연료봉에 대한 비파괴 와전류시험과 동시에 금속 조직 시험을 수행하여 그 결과를 비교하고 분석함으로써 와전류시험에 의한 조사핵연료봉의 건전성 평가에 대한 신뢰성을 연구하였다.

2. 시험 장치

와전류시험 장치는 핫셀 내부에 설치되어 있는 주사 장치, 와전류시험 탐촉자 그리고 핫셀 외부에 설치되어 있는 와전류시험 장치 본체 및 신호 처리 부분으로 구성

되어 있으며 와전류시험 장치 본체는 프랑스의 Intercontrol 사에서 제작한 Defoscope 이며 주파수 범위는 1kHz~1MHz로써 연속적으로 가변할 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 저항 성분과 리액턴스 성분으로 분리하여 A/D(analog to digital) 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 회전 이동이 가능하도록 스텝 모터 제어장치를 제작하였으며, 핵연료봉 시험 위치가 실시간으로 나타나게 하였다.

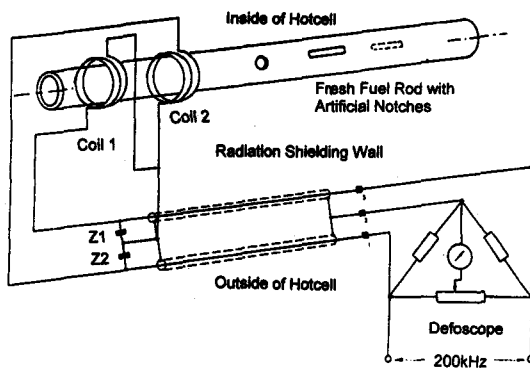


Fig. 1. Schematic diagram of probe and standard specimen.

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

Table 1. Design specification of ECT probe.

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

에 대한 와전류의 skin effect에 의한 표준 침투 깊이 δ 는 $\delta = 50\sqrt{\rho/f \cdot \mu_r}$ 으로부터 계산하면 0.7mm 정도가 된다. 핵연료봉이 원자로에서 중성자 조사를 받으면 핵연료봉 직경 변화가 생기는데 와전류신호위상을 관찰하여 핵연료봉의 직경 증감을 알 수 있다. 탐촉자는 방사선에 비교적 강하고 가공이 쉬운 테프론을 사용하였으며, 와전류시험 표준 시료는 외경 10.72mm, 두께 0.6mm의 Zircaloy-4 미조사핵연료봉에 인공결함을 만들어 사용하였다.

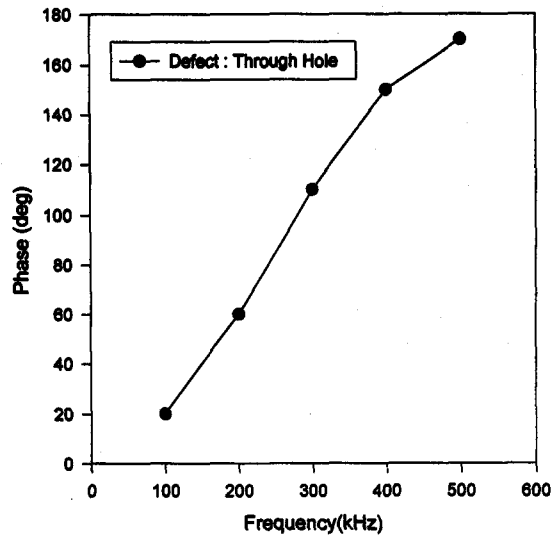


Fig. 2. Phase characteristic of through-hole defect.

3. 최적 시험 조건 결정

최적 시험 조건을 결정하기 위하여 미조사핵연료봉의 피복관을 사용하여 전기방전가공법으로 표준 시편을 제작하였다. 표준 시편은 Fig. 1과 같이 관통결함, 외부결함, 내부결함에 구성되어 있으며, 결함유무 및 형태를 알 수 있는 시험 조건을 찾기 위하여 위상 및 감도특성시험을 수행하였다.

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. 결함 유형에 따른 위상 특성을 구하기 위하여, 관통결함에 대하여는

시험 주파수와는 무관하게 위상 45° 로 고정된 상태에서, 내부결함 및 외부결함에 대한 위상특성시험을 수행하여 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 위상특성시험 결과는 내부결함의 경우에는 시험 주파수가 커짐에 따라 위상이 증가하고, 외부결함의 경우에는 감소하였으며, 200kHz 이상에서 외부결함의 위상과 내부결함의 위상이 뚜렷이 구분됨을 알 수 있었다. 또한 결함유무

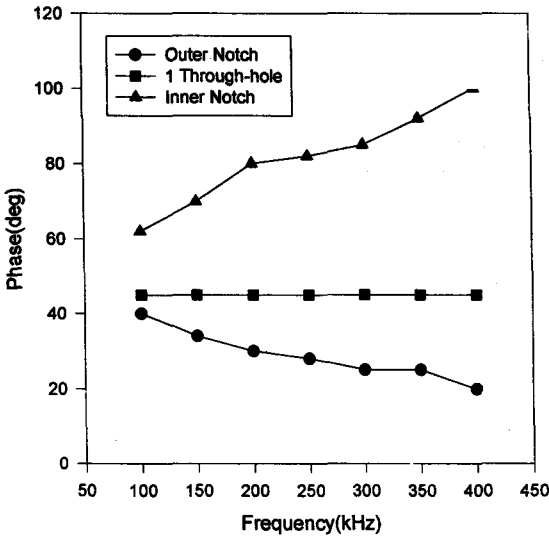


Fig. 3. Phase characteristic at fixed phase of through-hole.

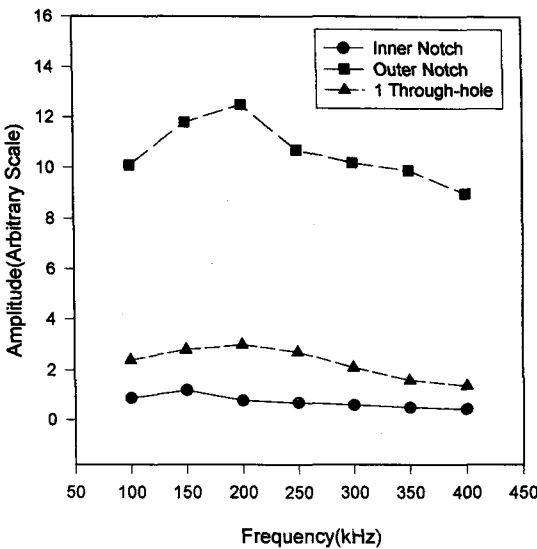


Fig. 4. Amplitude characteristic of defects.

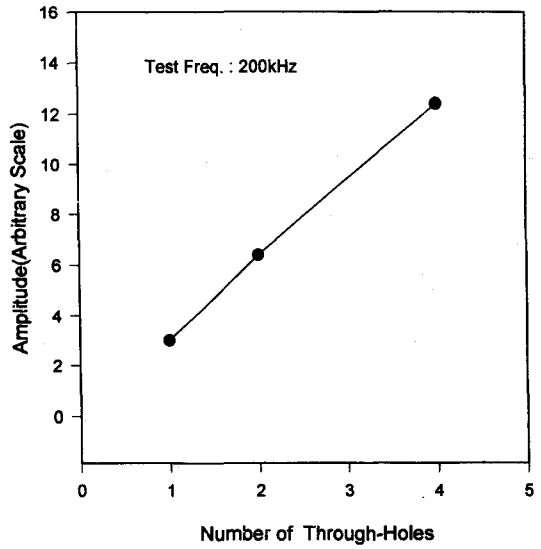


Fig. 5. Amplitude versus number of through-hole.

및 크기 판단을 위한 감도특성시험을 수행하였으며, 결과를 Fig. 4에 나타내었는데, 역시 200kHz에서 감도가 가장 우수하였다. 따라서 위상이 뚜렷이 구분되는 조건을 만족하면서 감도가 우수한 최적 주파수는 200kHz였다.

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. 표준 시편에 대하여 최적 시험 주파수 200kHz에서 와전류시험을 수행하여 Fig. 6에 나타내었는데,

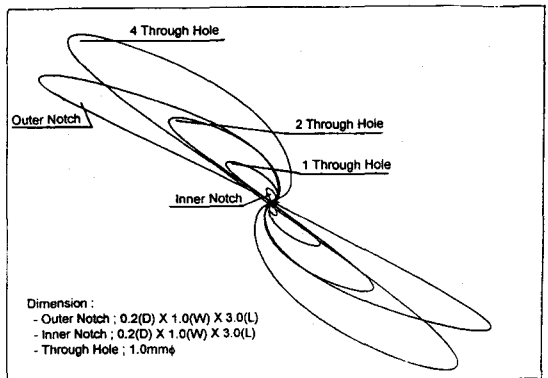


Fig. 6. ECT signals at test frequency 200kHz.

내부결함, 관통결함, 외부결함간의 위상이 뚜렷이 구분되었으며, 결함 유무 판독에 충분할 만큼 진폭도 크게 나타났다.

4. 조사핵연료봉에 대한 결함 탐상 시험

조사핵연료봉에 대하여 와전류시험을 수행하였으며, 시험 결과 관통결함이라고 예측한 위치에서 금속 조직 시험을 수행하여 그 시험 결과를 8배의 현미경 사진으로 나타내었다.

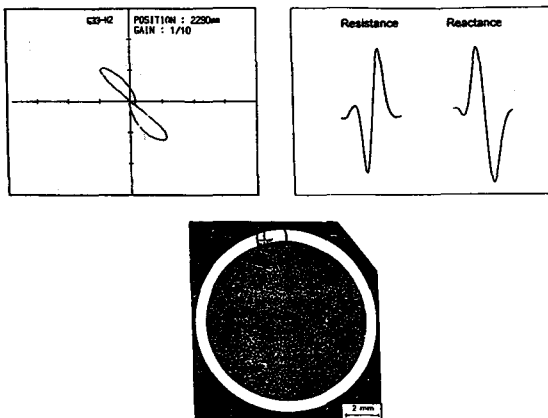


Fig. 7. ECT signal(impedance and time domain) and photograph of macro-structure.

고리원자력 1호기 조사핵연료봉 G33-N2에 대한 와전류시험을 핫셀에서 수행한 결과 다수의 결함이 발견되었다. Fig. 7은 와전류시험으로 얻은 핵연료봉에 대한 관통결함 신호와 핵연료봉 횡단면 금속 조직 사진을 대비하여 나타낸 것이다. 결함 위치는 핵연료봉 하단으로부터 2290mm 이었고, 저항 성분 신호와 리액턴스 성분 신호를 시간 영역 및 임피던스 영역에서 나타내었다. 임피던스 영역에서의 와전류신호는 위상으로 보아 관통결함으로 예측할 수 있었으며, 이 결함(원 내부)을 금속 조직 시험 사진에서 확인할 수 있었다.

따라서 와전류시험으로 조사핵연료봉의 건전성을 평가함에 있어서, 핵연료봉 피복관에 존재하는 결함 유형, 결함 크기 및 결함 위치에 대하여 신뢰성이 높은 정보를 제공할 수 있음을 실증하였다.

5. 결론

- (1) 와전류시험용으로 차동 환상형 탐촉자를 설계 및 제작하여 결함 형태에 대한 신호 특성 시험을 수행한 결과 와전류시험 장치의 신호 신뢰성이 양호함을 확인하였다.
- (2) 위상 특성 및 감도 특성 시험을 수행한 결과 조사핵연료봉에 대한 최적 주파수는 200kHz였다.
- (3) 고리원자력 1호기에서 연소한 G33-N2 핵연료봉에 대하여 와전류시험을 수행하여 핵연료봉 하단으로부터 2290mm의 위치에서 관통결함을 검출 및 판독할 수 있었으며, 금속 조직 시험을 수행하여 얻은 결과는 와전류시험 결과와 잘 일치하였다. 따라서 와전류시험법이 조사핵연료봉 피복관에 대한 건전성 평가에 효율적인 방법임을 실증하였다.

참고 문헌

- 1) 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.
- 2) G. V. Drunen, V. S. Cecco, "Recognition Limitation in Eddy-Current Testing," NDT Inter., Vol. 17, No.1(1975), pp.210~213.
- 3) D. J. Hagemaiier, "Eddy Current Impedance Plane Analysis," Mat. Eval. Vol. 41(1983), pp.211~218.
- 4) F. R. Bareham, B. Sc., and A. Inst. P., "Choice of Frequency for Eddy-Current Tube Testing," British 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) R. Spal, A. H. Kahn, "Eddy Currents in a Conducting Cylinder with a Crack," J. Appl. Phys.(1979), pp. 6135~6138.
- 7) D. J. Hagemaiier, "Application of Eddy Current Impedance Plane Testing," Mat. Eval.

- Vol. 42(1984), pp. 1035~1040.
- 8) 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.
 - 9) 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.
 - 10) 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.
 - 11) 노성기외, "가압경수로 핵연료 조사후 시험연구," *KAERI/RR-585/86(1986)*, pp.49~50.
 - 12) 노성기외, "가압경수로 핵연료 조사후 시험연구," *KAERI/RR-708/87(1987)*, pp.84.
 - 13) 이기순외, "고리원자력1호기 핵연료봉 파손원인 규명연구(I)," *KAERI/RR-814/88(1988)*, pp.31~32, 86~89.

The Defect Inspection on the Irradiated Fuel Rod by Eddy Current Test

D. S. Koo, Y. K. Park and E. K. Kim
Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract The eddy current test(ECT) probe of differential encircling coil type was designed and fabricated, and the optimum condition of ECT was derived for the examination of the irradiated fuel rod. The correlation between ECT test frequency and phase & amplitude was derived by 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 G33-N2 fuel rod irradiated in the Kori-1 nuclear power reactor. The metallographic examination on the G33-N2 fuel rod was performed at the defect location predicted by ECT. The result of metallographic examination for the G33-N2 fuel rod was in good agreement with that of ECT. This proves that the evaluation for integrity of irradiated fuel rod by ECT is reliable.

(Received : September 18, 1995)