

## 와전류시험에 의한 조사핵연료봉의 건전성 평가

구대서, 박윤규, 김은가  
한국원자력연구소

### 요약

고리원자력1호기에서 각각 2주기, 4주기동안 연소한 핵연료봉 G33-N2(평균연소도: 34640MWD/MTU) 및 G23-I4(평균연소도: 13917MWD/MTU)에 대하여 와전류시험을 수행한 결과 G33-N2 핵연료봉 하단으로부터 각각 2290mm, 2878mm 위치에 관통결함신호와 내부결함신호를 얻었다. 또한 G23-I4 핵연료봉에서는 ridge 와전류신호를 획득하였다. 비파괴적 와전류시험을 통하여 관통결함 및 내부결함으로 예측된 위치에서 파괴적 금속조직시험을 수행하여 얻은 결과는 와전류시험결과와 잘 일치하였다. G23-I4핵연료봉에서 획득한 ridge 와전류신호는 직경측정시험결과와 비슷한 경향을 보여 주었다. 따라서 와전류시험을 통하여 핵연료봉에 대한 건전성 평가 도구로서의 그 신뢰성이 양호함을 실증하였으며 핵연료봉의 ridge 정보도 제공할 수 있음을 입증하였다.

### 1. 서론

원자로의 핵연료결함은 원자력 발전에 심대한 영향을 주게 되는데 핵연료 건전성에 대한 시험 및 평가의 일환으로 원자로에서 사용한 핵연료에 대한 와전류시험의 필요성이 대두되었다. 와전류시험은 주로 핵연료봉 피복관에 발생하는 결함유형, 결함 크기 및 결함위치에 대한 정보를 제공하며 이외에 와전류를 이용하여 산화층 두께 측정, 피복관 두께측정, 피복관 수소화현상 그리고 핵연료봉 ridge에 대한 정보를 획득 할 수 있는 비파괴 시험 방법으로[1-5] 원자력 선진국에서 일찍부터 수행되어 왔다. 환상형 코일(Encircling Coil)을 사용하여 와전류 시험을 수행하여 핵연료봉의 결함형태 및 위치를 결정하며 1980년 후반부터[6 7] 원자로에서 사용한

핵연료에 대하여 건전성 평가를 수행하였다. 본 연구는 고리 원자력 1호기의 손상 핵연료 G33-N2 핵연료봉에 대한 비파괴 와전류시험을 수행함과 동시에 금속조직 시험을 수행하여 그 결과를 비교하고 분석함으로써 와전류시험법이 사용후 핵연료봉의 건전성 평가도구로서의 신뢰성을 연구하였으며 G23-14 핵연료봉으로부터 얻은 ridge 정보도 분석하였다.

## II. 시험장치 및 방법

와전류시험장치는 핫셀 내부에 설치되어 있는 주사장치, 와전류시험 코일 그리고 핫셀전면에 설치되어 있는 와전류시험장치 본체 및 기록기로 구성되어 있다. 시험장치의 개통도는 그림1에 나타내었다. 와전류 프루브내의 환상형 와전류 시험코일은 내경이 11.3mm인 차동형으로써 14X14 PWR 핵연료봉시험용으로 제작한 것이다. 와전류 시험 장치의 본체는 프랑스의 Intercontrole사에서 제작한 Defoscope이며 시험주파수 범위는 1KHz-1MHz로서 연속적으로 가변시킬 수 있다. 기록기는 Yokogawa 제의 2 Channel  $\mu$ R250 Recorder를 사용하였다. Defoscope는 핵연료봉 피복관에 대한 와전류시험 최적주파수를 여기서 환상형 코일에 인가함으로써 와전류신호를 발생하게 된다. 이 미세신호를 증폭하고 위상 및 진폭을 조정하여 필요한 임피던스 신호가 CRT에 나타나도록 되어 있다. 와전류시험의 본체에서 나오는 임피던스신호를 저항성분과 리액턴스성분으로 분리하여 A/D 컨버터로 접속하여 개인용 컴퓨터에 연결하였다. A/D 컨버터는 12비트의 해상도를 가지고  $\pm 10V$ 의 신호를 변환할 수 있으며, LAB MASTER 제품을 사용하였다. 자료수집 및 처리프로그램은 C언어로 작성하였으며 와전류신호를 수집, 처리 및 분석하였다. 핵연료봉의 구동은 스텝모터에 의해 상하 및 회전이동이 가능하며 핵연료봉 시험위치가 실시간으로 나타난다. 스텝모터 컨트롤러와 와전류시험 프로그램을 연계함으로써 1mm 에 1개씩의 자료가 컴퓨터에 수집되도록 하였다. 결함신호가 발견된 부위에서는 0.1mm 에 1개씩의 자료를 수집하여 정밀측정을 수행하였다. 최적시험조건을 결정하기 위하여 미조사 핵연료봉의 피복관을 사용하여 표준시편을 제작하였다. 제작된 시편을 사용하여 감도를 1 에서 0.1 까지, 시험주파수는 100kHz 에서 1MHz까지 변화시키면서 관통결함위상  $45^\circ$  를 유지한 상태에서 저항성분, 리액턴스성분 신호를 측정하여 위상을 계산하였다. 시험주파수 200kHz로 시험한 결과는 내부결함위상  $90^\circ$ , 외부결함위상  $30^\circ$  로 위상이 뚜렷하게 나타났으며 진폭도 타 주파수보다 크게 나타났다. 설정된 최적시험조건은 최적시험주파수는 200kHz, 최대 감도(Gain 1)에서 장치의

위상은  $-15^\circ$  이었고, 10 배로 감쇠한 감도(Gain 0.1)에서 장치의 위상은  $-50^\circ$  이었다. 따라서 G33-N2 및 G23-14 핵연료봉에 대한 와전류 시험은 핫셀 비파괴 벤치와 기록기를 120mm/min으로 동기시켰으며 주파수는 200kHz, 감도는 1 그리고 장치의 위상  $-15^\circ$  에서 수행하였다. 그리고 G33-N2 핵연료봉에 대한 결함정밀시험은 감도를 0.1 및 장치의 위상  $-50^\circ$  에서 수행하였다. 그리고 같은 핵연료봉에 대하여 와전류시험을 통하여 관통결함 및 내부결함이라고 예측한 위치에서 핫셀 파괴금속조직시험을 수행하여 그 시험결과를 8배의 거시적 현미경 사진으로 나타내었다.

### III. 실험결과 및 논의

고리원자력 1호기 G33-N2핵연료봉에 대한 와전류 시험을 핫셀에서 수행하여 그림2와 같은 결과를 얻었다. 그림2에서 보면 핵연료봉하단으로부터 42mm, 2290mm, 2660mm, 2665mm, 2878mm, 3171mm 및 3214mm에서 결함신호가 검출되었다. G33-N2 핵연료봉하단으로부터 2290 mm에서 얻은 와전류신호는 와전류신호위상  $45^\circ$  로 관통결함 신호로 판단된다. 그림3(a)는 이 부분의 와전류시험 결과이고 그림3(b)는 같은 위치에서 파괴에 의한 금속조직시험을 수행하여 얻은 결과이다. 여기에서 그림3(b)는 핵연료봉의 횡단면을 나타낸 것으로 가장자리 흰테두리가 피복관으로써 피복관이 깨져 관통된것을 확인 할 수 있으며 흰테두리안의 소결체에는 크고 작은 균열이 존재 함을 알 수 있다. 그림4는 G33-N2핵연료봉에 대하여 와전류신호와 금속조직시험 결과를 대비시킨 것인데 G33-N2핵연료봉하단에서 2878mm위치에 와전류신호의 위상이  $90^\circ$  로 나타난 것으로 그 위치에서 핵연료봉의 피복관 내부결함에 예측되었다. 예측된 결함위치에서 금속조직시험을 수행하여 그림4의 (b)와 같이 핵연료봉의 횡단면을 나타내었다. 횡단면에서 화살표로 표시한 피복관내면을 자세히 관찰하면 미세한 결함이 존재함을 관찰 할 수 있다. 그림5는 G23-14핵연료봉에 대하여 직경측정결과와 와전류 신호의 저항성분과 리액턴스성분을 핵연료봉 길이에 대하여 나타낸 것인데 두 결과는 비슷한 경향을 보여 주었다. 이로써 비파괴적인 와전류시험으로 조사후 핵연료봉의 건전성을 평가함에 있어서 핵연료봉 피복관에 존재하는 결함유형, 결함크기 및 결함위치에 대한 신뢰성이 높은 정보를 제공할 뿐만 아니라 핵연료봉의 ridge도 확인 할 수 있다. 앞으로 와전류 시험법을 이용하여 핵연료봉의 산화층 두께측정시험을 수행할 계획이며 이 방법은 원자로에서 핵연료봉의 산화과정을 연구하는데 활용될 수 있을 것으로 본다.

### IV. 결 론

1. 고리원자력 1호기에서 4주기 연소하여 연소도가 34,640 MWD/MTU 인 G23-I4 핵연료봉과 2주기 연소하여 연소도가 13,917 MWD/MTU 인 G33-N2 핵연료봉에 대하여 비파괴적인 와전류시험을 수행하여 G33-N2 핵연료봉하단으로부터 2290mm, 2878mm 위치에서 관통결함신호와 내부결함신호를 검출하였으며 G23-I4 핵연료봉에서 ridge 와전류신호를 얻었다.
2. G33-N2 핵연료봉에 대하여 비파괴적 와전류시험을 통하여 예측한 결함위치에서 금속조직시험을 수행하여 얻은 결과는 와전류시험결과와 서로 잘 일치하였으며 G23-I4 핵연료봉에 대한 직경측정시험결과는 ridge 와전류신호와 비슷한 경향을 보여 주었다.
3. 조사후 핵연료봉에 대한 건전성 평가에 와전류시험법의 신뢰성이 양호함을 실증하였으며 와전류시험법으로 핵연료봉의 ridge 에 대한 정보도 얻을 수 있음을 입증하였다.

#### 참고문헌

- [1] E.M. Frankin, R.D. Phiss, " Eddy-Current Cladding Integrity Testing and Data Analysis," Hot Cell Examination and Maintenance Equipment, ANS, V.33, No.11-15, p. 906-907(1979).
- [2] R.D. Phipps, R.E. Kleiss, and J.B. Coughlan, " Eddy-Current Examination of irradiated Elements at HFEF," Proc. 25th Conf. Remote Syst. Technol., p.245(1977).
- [3] G.V. Drunen, V.S. Cecco, " Recognition Limitation in Eddy-Current Testing," NDT INTERNATIONAL, V.17, No.1, p.210-213(1975).
- [4] D.J. Hagemaiier, " Eddy Current Impedance Plane Analysis," Materials Evaluation, V.41, p.211-218(1983).
- [5] F.R. Bareham, B.Sc., and A.Inst. P., " Choice of Frequency for Eddy-Current Tube Testing," British Journal of Applied Phsics, V.11, p.218-222(1960).
- [6] 노성기외, " 가압경수로 핵연료 조사후 시험연구," KAERI/RR-585/86, p.49-50 (1986).
- [7] 노성기외, " 가압경수로 핵연료 조사후 시험연구," KAERI/RR-708/87, p.84 (1987).

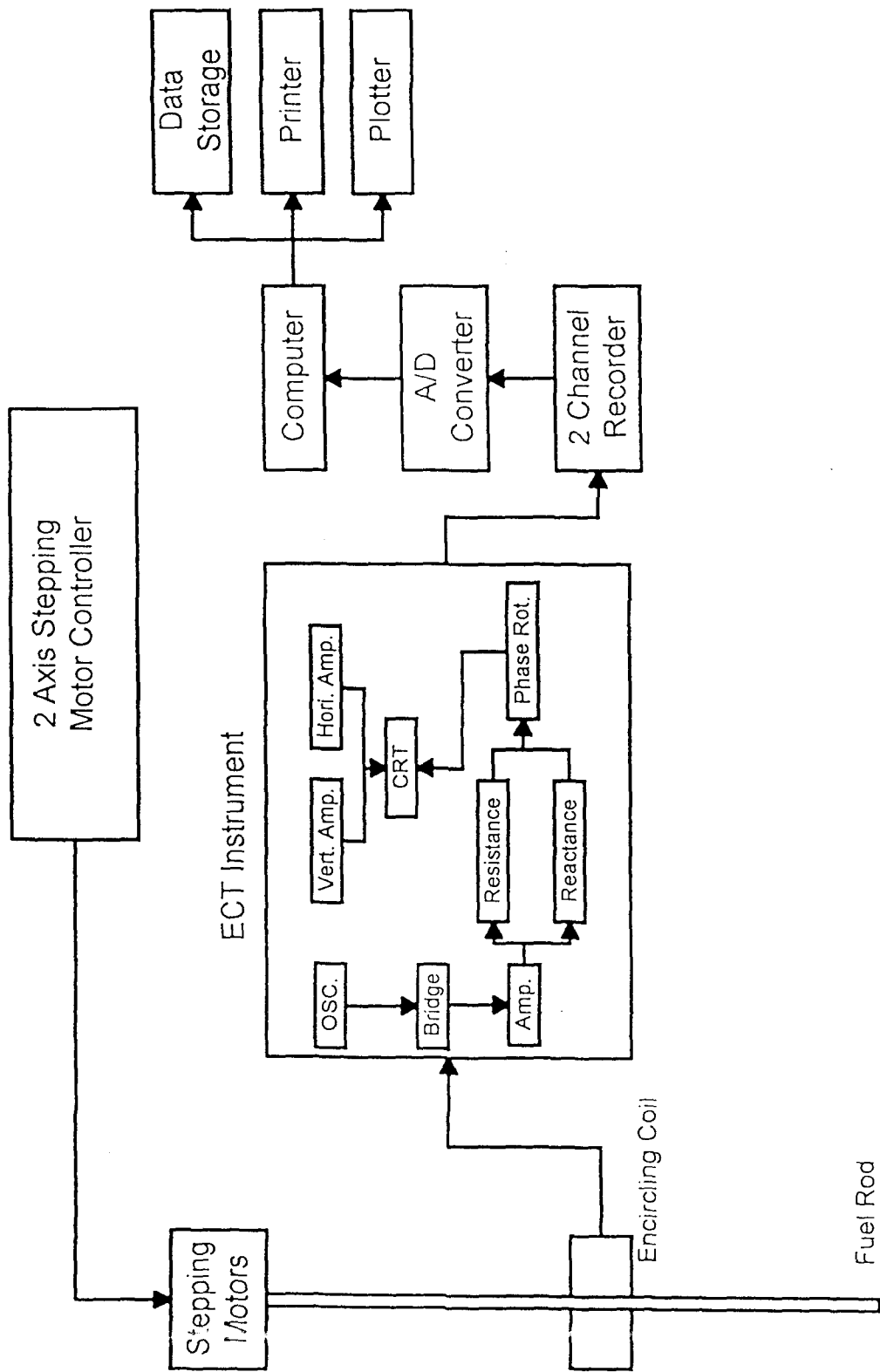


그림1. 핫셀 와전류시험 계통도.

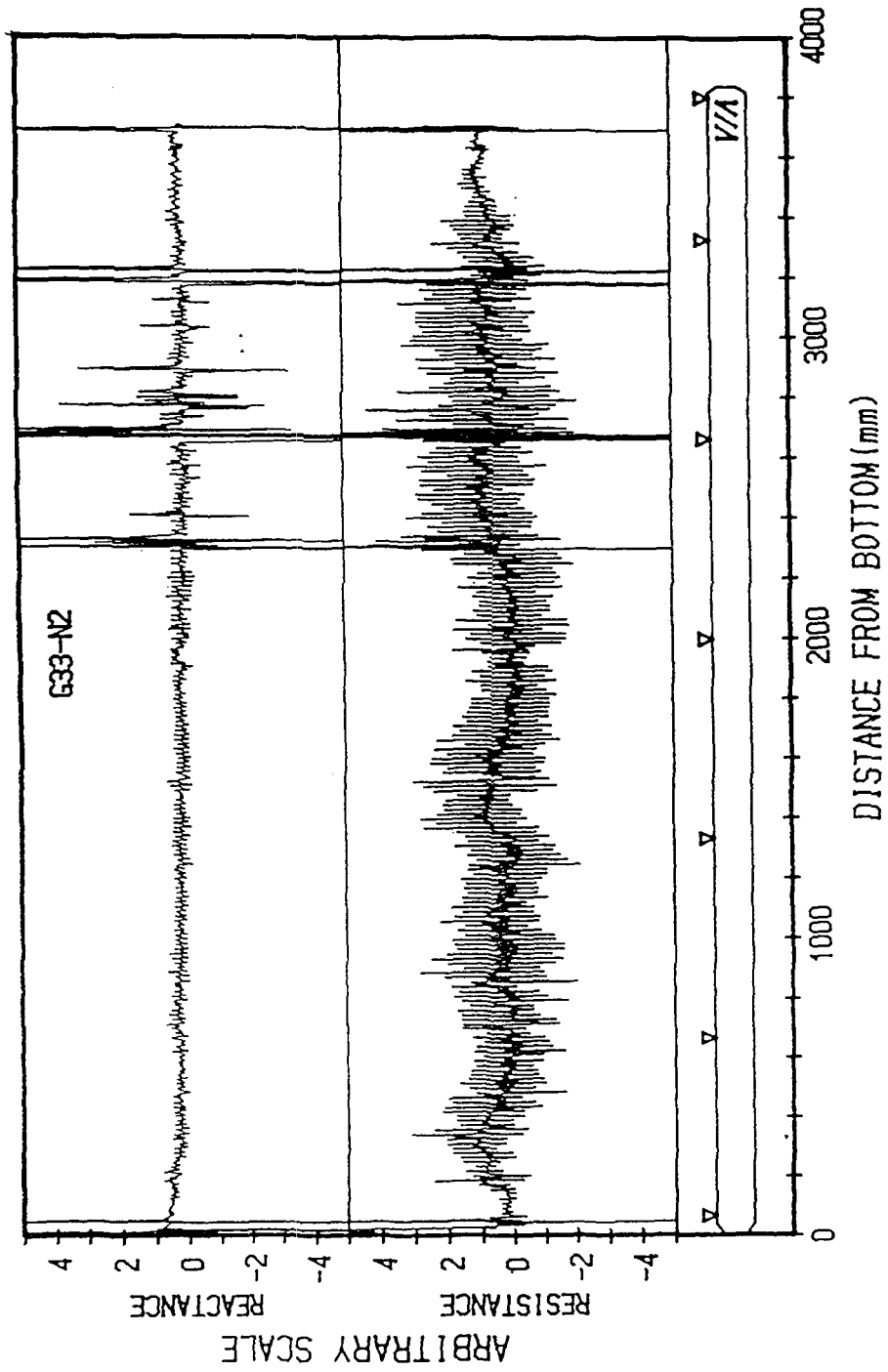
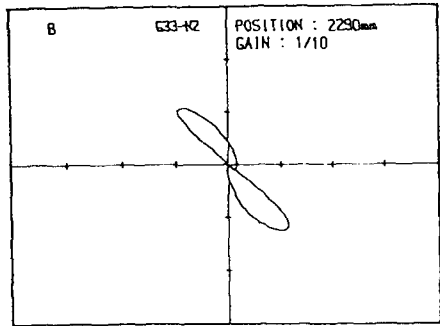
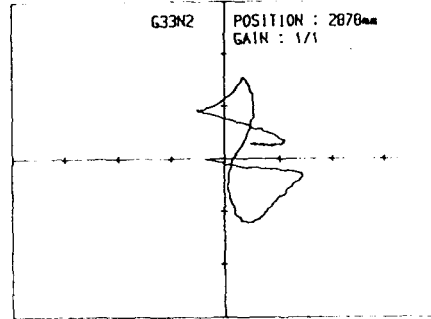


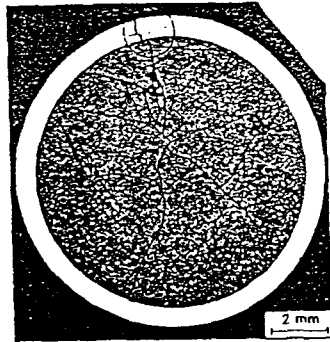
그림2. G33-N2 핵연료봉에 대한 와전류 시험결과



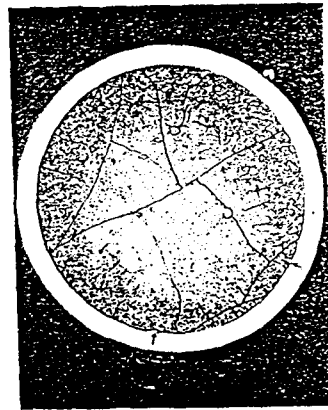
(a)



(a)



(b)



(b)

그림3. G33-N2핵연료봉하단2290mm에서 시험결과 (a)와전류결함신호 (b)금속조직시험결과. 그림4. G33-N2핵연료봉하단2878mm에서 시험결과 (a)와전류결함신호 (b)금속조직시험결과.

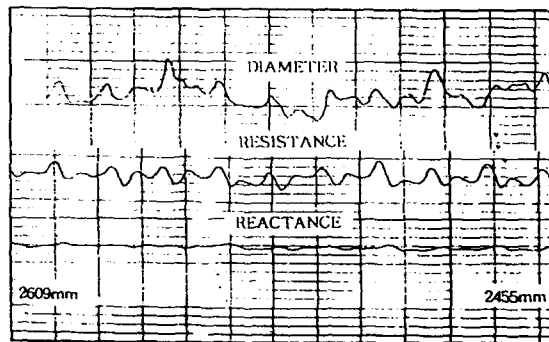


그림5. G23-14 핵연료봉의 직경측정결과와 와전류시험결과.