

사용후핵연료봉의 와전류 신호특성 및 결함검사에 관한 연구

Analysis of Eddy Current Signal for the Detection of Defects in Spent Nuclear Fuel Rods

양송열, 이형권, 이은표, 서항석, 전용범, 주준식

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

멤돌이전류 시험 검사법에 의한 원자로 조사 핵연료봉의 결함검사를 위하여 먼저 차동 환상형 프로브와 미조사 표준 핵연료봉을 제작하여 결함형태에 따른 시험주파수에 대한 멤돌이전류의 저항·리액턴스 성분을 분석하여 주파수와 신호크기 및 위상에 대한 상관 관계를 구하였다. 최적주파수 400 kHz에서 결함에 대한 멤돌이전류 신호크기가 최대였으며 결함형태에 의한 신호위상도 뚜렷하여 내부, 외부 및 관통결함의 판별이 가능하였다. 실제 원자로 조사 핵연료봉의 결함검사에 멤돌이전류 시험법을 적용하여 얻은 결과는 파괴적 금속조직시험결과와 잘 일치하였으며, 또한 핵연료봉 등성이(Ridge)분석도 가능하였다.

Abstract

The differential encircling coil-type probe and the unirradiated standard fuel rod were fabricated. In order to investigate defects of irradiated fuel rods by eddy current examination, The correlation among the frequency, the phase and amplitude of the eddy current signal was derived by analyzing the resistance and the reactance components. The maximum amplitude of the eddy current signal was shown at an optimum frequency of 400 kHz. Therefore it is possible to distinguish such defect shapes as external, internal and through-hole defects. The results of the eddy current examination coincide with that of the nondestructive metallographic examination. Also, the ridge of the fuel rod was analyzed by eddy current examination.

1. 서론

멤돌이전류 시험은 전자기유도법칙을 이용하여 시험체에 대한 결함을 검사하는 비파괴적 방법으로 이용되어 왔다. 특히 핵연료봉 피복관의 결함, 산화층 두께, 피복관 두께, 피복관의 수소화, 핵연료봉의 등성이(Ridge)등에 대한 멤돌이전류 검사시험법이^[1-5] 연구되고 있다. 멤돌이전류 시험용 프로브에는 차동환상형과 탐촉자형이 있는데^[6-7] 전자는 한번에 시험체 전체에 대한 결함검사를 수행할 수 있는 반면 후자는 국소영역의 결함을 검사할 수 있다.

본 연구에서는 먼저 미조사 핵연료봉과 멤돌이전류 시험용 차동환상형 프로브를 제작하였으며, 방사능을 띤 시편을 스캐닝할 수 있는 훑음 대(Scanning Bench) 및 시험체를 움직일 수 있는 원격조종장치와 콘크리트 벽, 납 유리창 등의 방사선 차폐체를 설치하였다. 방사능을 띤 원자로 조사 핵연료봉에 대한 결함검사는 충분한 측정감도, 정확한 위치 판별, 결함유형 등을 판별할 수 있어야 하므로 우선 방사선이 나오지 않는 미 조사 핵연료봉에 대하여 예비시험을 수행하여 멤돌이전류 신호특성을 분석하였다. 분석된 멤돌이전류 신호를 토대로 원자로 조사 핵연료봉에 멤돌이전류 시험 검사법을 적용하여 핵연료봉에 존재하는 결함을 검사한 결과 관통결함과 내부결함을 판별하였는데, 이를 파괴하여 금속조직시험으로 실증한 결과 잘 일치하였다. 또한 조사 핵연료봉에 대한 멤돌이전류 저항성분과 리액턴스 성분을 임피던스 평면에서 분석한 결과 핵연료봉 등성이 신호가 검출되었으며 사용후핵연료봉의 직경 측정시험 결과와 잘 일치하였다.

2. 측정원리

특정주파수의 교류가 코일에 흐를 때 코일 근방에 일차 자기장이 생성되고 이에 따라 코일 근접의 도체에 반대방향의 유도전류가 흐르게 되는데 이것이 멤돌이전류이다. 도체에 멤돌이전류가 흐르게 되면 렌즈 법칙에 따라 도체근방에 일차 자기장이 형성되고, 반대 방향에 이차 자기장이 형성된다. 그러면 일, 이차 자기장의 차가 임피던스로 나타나게 된다. 이는 도체의 결함에 의하여 임피던스와 위상이 변하게 되며 임피던스 Z 는 $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, 임피던스의 위상 θ 는 $\theta = \arctan \omega L / R$ 으로 나타내어진다. 이로부터 도체의 결함유무 및 형태를 판별하게 된다. 여기서 R 은 저항, L 은 인덕턴스 및 ω 는 각 진동수이다. 임의의 매질에서 전자기장의 전파는 맥스웰방정식 $\nabla \times E = -\mu \partial J / \partial t$ 에 curl을 취하면 $\nabla \cdot (\nabla \cdot E) - \nabla^2 E = -\mu \partial J / \partial t$ 이 되는데 만약 도체가 동종이고 등방성인 경우 즉 도체에 축적되는 전하가 없고 도체에 흐르는 전류의 변위가 무시될 때 $\nabla \cdot E = 0$, $\sigma E = J$ 을 대입하면 도체에 흐르는 전류밀도에 대한 방정식은

$$\nabla^2 J = \sigma \mu \partial J / \partial t \quad (1)$$

이 된다. 여기서 σ , μ 는 각각 도체의 전기 전도도와 투자율이다. 반무한(Semi-Infinite)

도체에서 (1)의 해는 도체표면으로부터 x 깊이에서 유도되는 전류밀도 크기를 J_x 라하면 다음과 같이 주어진다.

$$J_x = J_0 \exp(-x \sqrt{\pi f \mu \gamma \mu_0 \sigma}) \quad (2)$$

여기서 f :주파수(Hz), μ_v :비 투자율, μ_0 :도체표면에서의 전류밀도 크기(A/m²)이다. 전류밀도가 표면에서의 값의 $1/e$ 배 즉 37%로 감쇄하는 깊이를 표준 침투깊이라 하며 이를 δ 로 두었을 때 식 (2)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J_x = J_0 \exp(-x/\delta) \quad (3)$$

여기서 δ 는

$$\delta = 1/\sqrt{\rho/\pi f \mu \gamma \mu_0} \quad (4)$$

이다. 여기서 ρ 는 도체의 전기저항이다. 따라서 전류밀도 크기 J_x 는 침투깊이에 따라 지수 함수적으로 감소하며, 표준침투깊이 δ 는 껍질효과에 의해 주파수 f 의 제곱근에 반비례함을 알 수 있다.

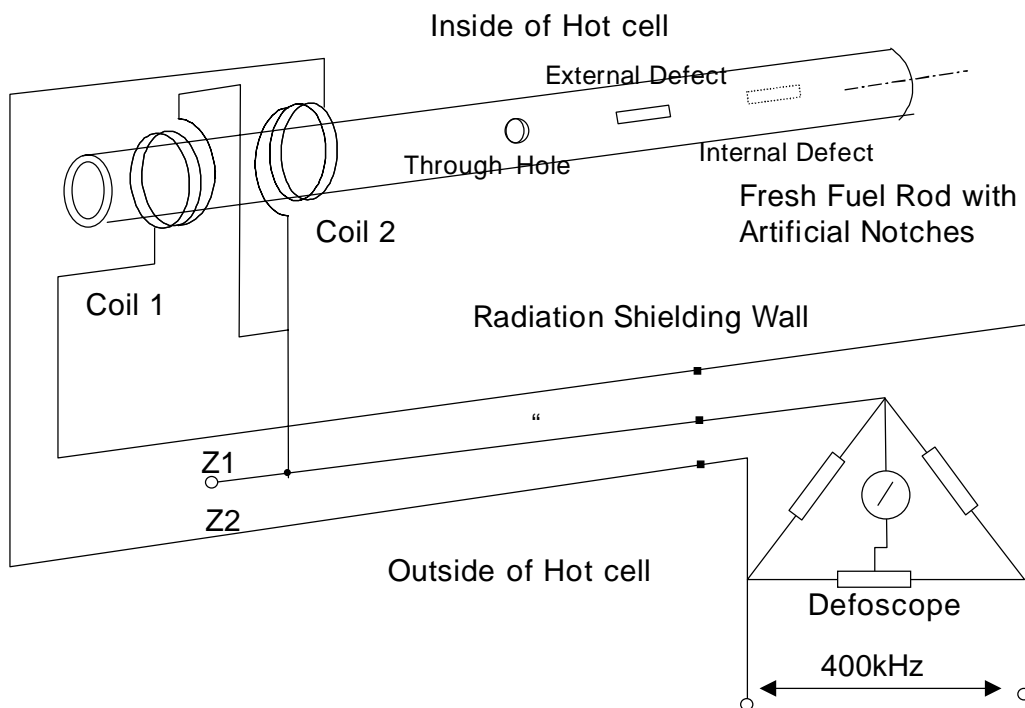


그림1. Schematic Diagram of Differential Encircling Probe and Standard Specimen.

3. 실험 및 신호특성분석

멤돌이전류 시험장치는 멤돌이전류 시험 프로브, 멤돌이전류 시험장치본체 및 신호처리 부분으로 구성되어 있다. 멤돌이전류 프로브는 차동환상형으로 설계·제작하였으며,

핵연료봉 외경 10.72 mm 피복관 두께 0.6 mm인 시험체에 적합한 맴돌이전류 검사 프로브 제원의 직경은 11.3 mm 이고 코일-시험체 간격(Lift-Off)은 0.6 mm로 하였다. 사용한 프로브 구조는 그림1의 차동환상형 프로브 측정장치 계통도에 나타내었으며, 측정방법은 차동환상형 코일에 핵연료봉을 삽입하여 스텝모터 구동에 의하여 아래로 움직이면서 데이터를 컴퓨터에 입력함과 동시에 기록기에 임피던스 신호를 기록하였다. 맴돌이전류 시험장비의 주파수 발생 영역은 1.2 kHz에서 5 kHz사이이며 떠뜸(Drift)이 0.02%이하인 ECT 회사의 MAD 2를 사용하였다. 맴돌이전류 신호관독 모니터는 Tektronics 회사제품을 사용하여 실험하였으며, 실험결과는 2채널 기록기에 기록함과 동시에 A/D변환기를 통하여 입력된 데이터에 대하여 컴퓨터에 의한 자료처리를 수행하여 시험체 결함의 임피던스 신호를 분석하여 결함유무 및 형태를 판별하였다. 사용후핵연료봉에 대한 맴돌이전류 시험장치의 최적시험 주파수 영역은 200~400 kHz 정도이며, 이 영역으로부터 최적시험 주파수를 결정하기 위하여 100~500 kHz에서 본 실험을 수행하였다.

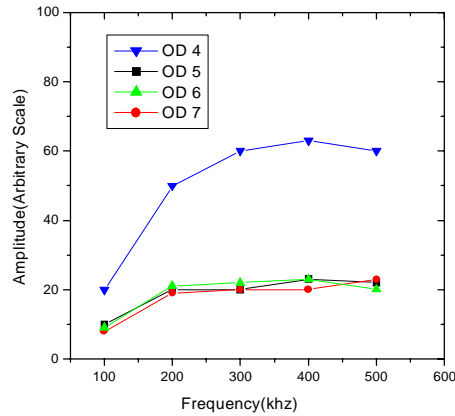
표1. Dimension and Type of Standard Defects.

Defect No.	Length(mm)	Width(mm)	Depth(mm)	Direction	Type
1		$\Phi 0.62 \pm 0.02$		Hole	TH
2		$\Phi 0.45 \pm 0.02$		Hole	TH
3		$\Phi 0.33 \pm 0.02$		Hole	TH
4	2.1 ± 0.1	0.28 ± 0.01	0.24 ± 0.01	Long	OD
5	2.1 ± 0.1	0.25 ± 0.01	0.24 ± 0.01	Trans	OD
6	2.0 ± 0.1	0.24 ± 0.01	0.12 ± 0.01	Long	OD
7	3.2 ± 0.1	0.24 ± 0.01	0.12 ± 0.01	Long	OD
8	2.0 ± 0.1	0.25 ± 0.01	0.12 ± 0.01	Long	ID
9	2.1 ± 0.1	0.36 ± 0.01	0.12 ± 0.01	Long	ID
10	3.2 ± 0.1	0.24 ± 0.01	0.12 ± 0.01	Long	ID

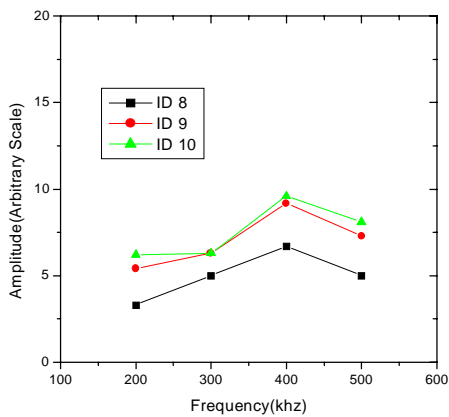
Note : TH(Through Hole), OD(Outer Defect), ID(Inner Defect),
Long(Longitudinal), Trans(Transverse).

신호특성분석을 위하여 핵연료봉 피복관에 표 1과 같이 원주방향과 축방향으로 내부, 외부 및 관통결함을 EDM(Electron Discharge Machine)법으로 가공하여 표준시편을 제작하여 일반실험실에서 시험을 수행한 결과 그림2의 (a)에서 시험주파수가 증가함에 따

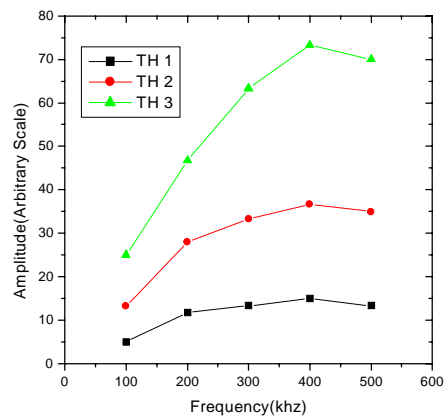
라 외부결함의 맴돌이전류 신호크기는 증가하다가 400 kHz에서 최대값을 나타내었다. 외부결함의 경우 원주방향 결함보다 축방향 결함의 맴돌이전류 신호크기는 증가하다가 400 kHz에서 최대값을 나타내었다. 외부결함의 경우 원주방향 결함보다 축방향 결함의 맴돌이전류 신호가 크게 나타났으며, 이는 맴돌이전류가 신호 특성상 원주방향보다 축방향으로 영향을 크게 받기 때문이다.



(a)



(b)

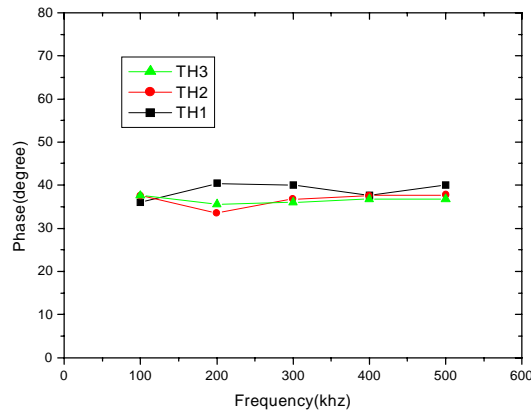


(c)

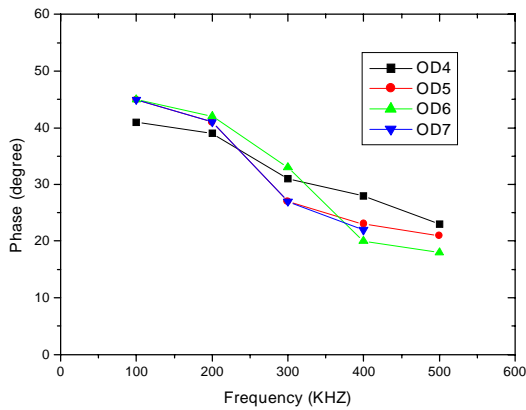
그림 2. Amplitude of Eddy Current Versus Frequency at (a) External, (b) Internal Defect and (c) Through-Hole.

그림2의 (b)는 축방향의 내부결함에 대한 맴돌이전류 신호진폭을 나타낸 것인데 식(3)

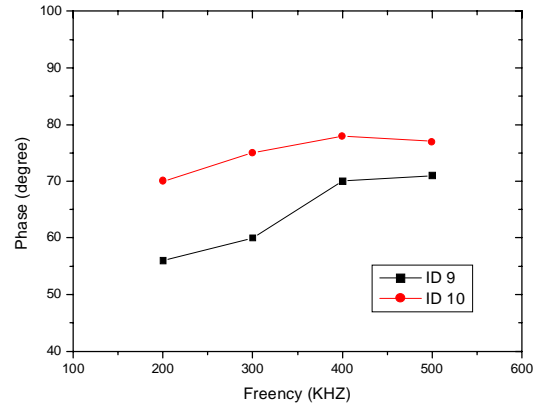
에 따르면 피복관 내부의 전류 밀도 크기가 외부의 전류 밀도 크기보다 작기 때문에 (b)의 내부결함 신호진폭이 (a)의 외부결함 신호진폭보다 훨씬 작게 나타났다. 또한 식(4)에서 핵연료봉 투자율 $\mu = \mu_0\mu_r = 1$, 핵연료봉 전기저항 $\rho = 40\mu\Omega.cm$ 및 시험주파수 $f = 100 \sim 500$ kHz을 대입하여 계산하면 껍질효과 [8]에 의한 맴돌이전류의 표준 침투깊이는 시험주파수가 변함에 따라 0.4~1.0 mm 정도로 나타났다. 그림2의 (c)는 관통결함에 대한 맴돌이전류 신호진폭을 나타낸 것인데 관통직경이 증가함에 따라 신호도 증가하여 나타났으며, 시험주파수 400 kHz에서 최대 값을 나타내었다.



(a)



(b)



(c)

그림 3. Phase of Eddy Current Versus Frequency (a) Through-Hole, (b) External Defect and (c) Internal Defect.

동일한 크기의 관통결함에 대하여는 관통결함의 개수가 증가함에 따라 와전류 신호가 비례하여 커졌으며 결과를 그림에 나타내었다. 그림3의 (a)는 관통결함에 대한 맴돌이전류 임피던스위상을 나타낸 것인데 관통직경의 크기와 상관없이 모든 위상이 45. 근방에서 ± 5 . 변화를 나타내었다. 그림3의 (b)는 외부결함에 대한 맴돌이전류 임피던스의 위상을 나타낸 것인데 시험주파수가 증가함에 따라 감소하였다. 400kHz 이상에서 관통결함의 임피던스의 위상과 뚜렷이 구분되었다. 아울러 그림3의 (c)는 내부결함에 대한 맴돌이전류 임피던스의 신호위상을 나타낸 것인데 시험주파수에 대하여 증가하는 경향을 나타내었으며, 300kHz 이상에서 관통결함의 임피던스의 위상과 구분이 뚜렷하였다. 이는 시험장치의 케이블길이, 코일조건 및 측정장비의 떠뜸(Drift)에 의하여 결정된 최적주파수 400kHz에서 핵연료봉의 각 결함형태에 대한 맴돌이전류 신호진폭이 최대였다. 여기서 시료는 같은 재질을 사용함에 따라 전기전도도 변화에 의한 영향은 시료의 결함에 의한 것보다 아주 미미하여 무시하였다. 아울러 결함형태에 따른 맴돌이전류 임피던스의 위상이 뚜렷하여 결함형태에 대한 분석이 가능하였으며, 신호진폭에 따른 시험체의 상대적인 결함크기를 추정할 수 있었다.

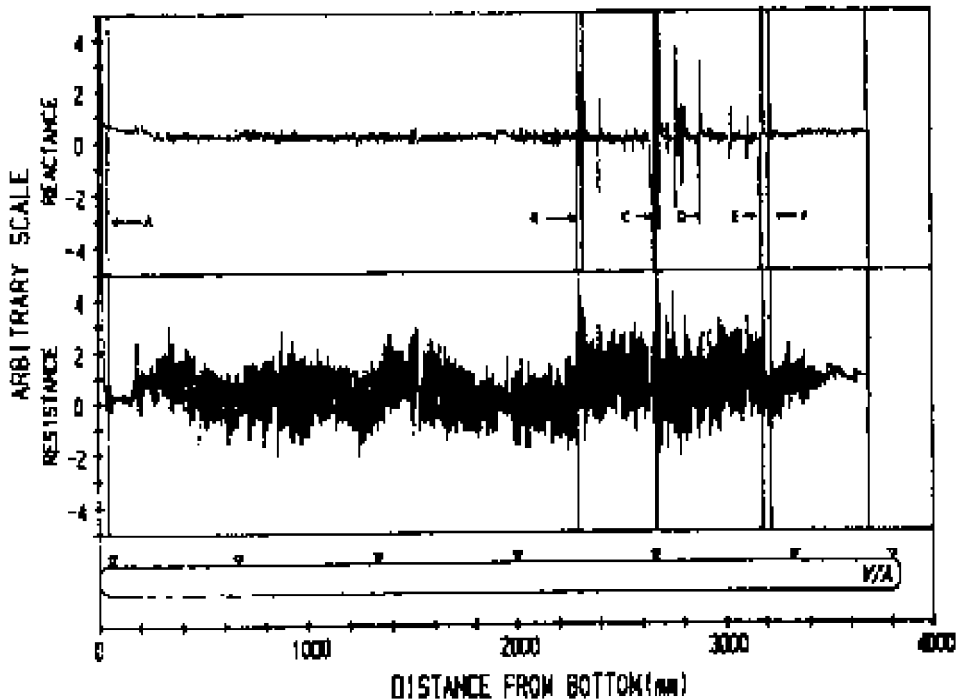


그림 4. Eddy Current Signals of Irradiated Fuel Rod.

표 2. The Defects of Fuel Rod Predicted by Eddy Current Examination

Item	Location (mm)	Amplitude of ECT (Arbit. Scale)			Phase of ECT (degree)	Prediction of Defect Type	Remark
		Reactance (Ω)	Resistance (Ω)	Impedance (Ω)			
A	42	4.0	5.2	6.6	38	TH	*
B	2290	17	16	23.3	47	TH	
C	2650	32	32	45.3	45	TH	
E	3171	60	80	100.0	37	TH	
F	3214	37	42	56.0	41	TH	
D	2278	2.2	0.4	2.2	80	ID	*

Note: * : Comparison of the Results of Eddy Current Examination with those of Metallographic Examination TH : Through-Hole ID : Internal Defect

4. 사용후핵연료봉 결함검사에 적용

분석된 맴돌이전류 신호특성을 원자로 조사 핵연료봉의 결함검사에 적용하여 그림4와 같은 뚜렷한 6개의 결함신호를 얻었는데 결함신호 (A~F)를 제외한 맴돌이전류의 잡음신호는 결함이 없는 경우를 나타낸다. 이러한 맴돌이전류 저항성분과 리액턴스 성분을 컴퓨터 프로그램으로 임피던스 평면에서 분석한 결과 표2에서 A, B, C, E, F,는 관통결함, D는 내부결함으로 분석되었다. 맴돌이전류 결함검사의 신뢰성을 조사하기 위하여 맴돌이전류 시험법으로 예측한 결함 위치를 절단하여 금속조직을 현미경사진으로 확인한 결과 그림5에서 관통결함을 관찰할 수 있었으며, 또한 그림6에서 피복관 내면에 미세 결함이 존재함을 알 수 있는데 그림 5, 6의 맴돌이전류 신호에서 수평 및 수직성분은 각각 저항성분과 리액턴스 성분을 표현한 것인데 투자율, 전기저항, 시험주파수 및 핵연료의 결함에 의하여 출력신호가 변화한다. 그러나 본 실험에서는 같은 재질을 사용함에 따라 투자율과 전기저항은 일정하고 시험주파수 및 핵연료봉의 결함이 내재적인 변수로써 저항과 리액턴스 변화를 일으킨다. 측정방법은 맴돌이전류 시험장비에서 저항 및 리액턴스 신호가 전압으로 출력되며 이 신호를 컴퓨터로써 데이터를 처리하여 나타내었다.

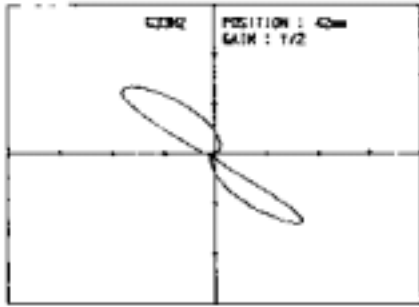


그림 5. Eddy Current Signal and Photography of Macro-Structure at 42 mm from of G33-N2 Fuel Rod.

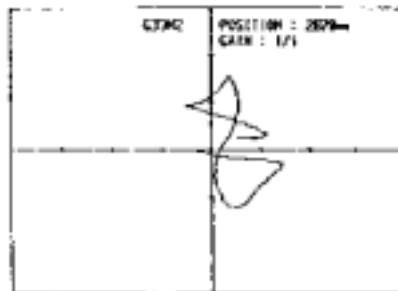


그림 6. Eddy Current Signal and Photography of macro-structure at 2878 mm from Bottom of G33-N2 Fuel Rod.

표3. Compararision of Eddy Current Signal with Diameter Variation due to Ridge of Fuel Rod.

Location (mm)	Amplitude of ECT (Arbit. Scale)				Prediction	Dia. Variation due to Ridge(mm)
	Reactance (Ω)	Resistance (Ω)	Impedance (Ω)	Phase of ECT (degree)		
2460	0.3	2	2.0	9		0.01
2475	0.3	3	3.0	6		0.01
2390	0.3	2	2.0	9		0.02
2505	0.3	3	3.0	6		0.01
2520	0.3	2	2.0	9	Ridge	0.01
2535	0.2	3	3.0	4		0.01
2550	0	2	2.0	0		0.01
2565	0	2	2.0	0		0.02
2580	0	2	2.0	0		0.01
2595	0	2	2.0	0		0.01
Mean	0.07	2.3	2.30	4.3		0.012
Stan. Dev.	0.15	0.5	0.48	4.0		0.004

표3은 핵연료봉 등성이에서 핵연료봉 직경변화를 맴돌이전류 저항성분과 리액턴스 성분을 분석하여 맴돌이전류 등성이 신호를 나타낸 것이다. 또한 핵연료봉 직경측정시험결과에서 핵연료봉 등성의 직경이 평균 0.012 mm 증가되었음을 확인하였다. 따라서 맴돌이전류 신호특성을 분석한 것을 토대로 원자로 조사 핵연료봉에 맴돌이전류 시험법을 적용한 결과 파괴적 금속조직 시험결과 만큼 신뢰성이 양호한 결과를 얻었으며, 또한 핵연료봉 등성에 대한 정보도 얻을 수 있었다.

5. 결론

1. 차동환상형 프로브 및 핵연료봉 표준시편을 제작하여 맴돌이전류 신호특성을 분석하였다. 그 결과 결함형태 및 위치를 판별하였고, 맴돌이전류 임피던스 진폭으로서 결함크기를 상대적으로 측정하였다.
2. 분석된 맴돌이전류 신호특성을 이용하여 원자로 조사 핵연료봉에 맴돌이전류 시험 검사법을 적용하여 얻은 결과는 연료봉 결함부위를 파괴하여 찍은 금속조직시험결과와 잘 일치하였다.
3. 원자로 조사 핵연료봉에 대하여 파괴시험을 수행하지 않고 비파괴 맴돌이전류 시험법으로 결함검사를 수행할 수 있음을 실증하였다.

참고 문헌

1. M. Iwasaki, al., Nuclear Engineering and Design
한국물리학회지 “응용물리” Volume9, Number 4, 1996년 7월 94, 447(1986)
2. J. B. Hallet, V. S. Cecco and D. G. Van, Mat. Eval. 42, 1276 (1984)
3. R. Yin, K. Sekine and H. Shimizu and Atsuryoku Gijutsu 27, 140 (1989)
4. M. T. Cross and P. C. Watson, Engineering Materials Advisory Services Ltd., 549
(1987)
5. J. B. Hallett, et al., Mat. Eval. 42, 1276 (1984)
6. K. Tsukui, et al., Proceedings of 26th Conference on Remote Systems Technology
(1978), p. 35.
7. J. H. Flora, et al., Proceedings of 25th Conference on Remote Systems Technology
(1977), p. 264
8. V. S. Cecco, G. V. Drunen and F. L. Sharp, Eddy Current Manual (AECL-7523
Rev. 1, Chalk River, 1983), Vol. 1, Chap. 2.
9. 노성기 외 “가압경수로 핵연료 조사후 시험연구,” KAERI/RR-585/86(1986),
P.P. 49-50.
10. 이기순 외, “고리원자력1호기 핵연료봉 파손원인 규명연구(I),”
KAERI/RR-814/88(1988), P.P 31-32, 86-89.
11. 노성기 외 “가압경수로 핵연료 조사후 시험연구,” KAERI/RR-708/87(1987),
P.P. 84-85.