

원자로 In-Core Flux Thimble 결함의 와전류 탐상 기술 개발

박 승 식* · 장 윤 영* · 임 창 재* · 박 광 희*

Development of Eddy Current Technique for Reactor In-Core Flux Thimble Wear

S. S. Park, Y. Y. Jang, C. J. Yim and K. H. Park

Abstract Since in-core flux thimble tube wear the due to flow-induced vibration could degrade the integrity of nuclear reactor, the effective detection and interpretation of the wear is important. In order to establish an inspection technique for thimble tubes, an eddy current experiment was performed to determine the optimum test frequency, defect sensitivity and evaluation accuracy. Eddy current probes were designed and fabricated with a theory. Specimens with artificial defects were fabricated using electro discharge machining method. The results from inspection technique developed and on-site inspection showed good applicability.

1. 서 론

원자력발전소의 원자로내의 중성자분포를 측정하기 위하여 이동형 중성자속 검출기(Neutron Flux Detector)가 드날들 수 있도록 밀봉테이블로부터 안내관(Guide Tube)을 통해 원자로내에 중성자속 검출기 이동관(In-Core Flux Thimble Tube)이 설치되어 있는데 원자로 냉각재 유량에 의한 진동으로 인하여 Lower Core Plate, Core Support Forging, Tie Plate 등에서 중성자속 검출기 이동관의 마모, 균열등이 일어날 수 있다. 이 현상이 더욱 진전되면 중성자속 검출기 이동관의 누설이 발생하여 로내 중성자속

분포측정 계통의 기능상실을 가져올 수 있다. 국내의 경우 고리 4호기에서 중성자속 검출기 이동관 누설 사고의 영향으로 인하여 로내 중성자속 분포 개통의 기능이 정지된 바 있으므로 효과적인 결함탐지 문제는 매우 중요하다.^{1,2,3,4,5} 본 실험에서는 로내 중성자속 검출기 이동관의 마모결함의 유형을 참고로 하여 이와 유사하게 방전가공에 의하여 표준시편을 제작하고 탐촉자를 설계하여 코일의 임피던스, 공진주파수, 결함검출감도 측정(Defect Sensitivity Test)등의 특성조사 및 결함평가 정밀도(Evaluation Accuracy)를 통하여^{6,7} 로내 중성자속 검출기 이동관의 결함탐상을 위한 검사조건을 확립하였다.

* 한국 원자력 연구소 비파괴 시험 연구실
접수: 1990년 6월 28일

2. 이 론

와전류 탐상(Eddy Current Testing, ECT)시 검사 코일이 100kHz 이상의 고주파수에서 사용되거나 30 m 이상의 긴 탐촉자 케이블을 사용할 때는 검사 코일과 케이블 간의 공진(Resonance)을 고려해야 되는데 공진주파수에서 최대의 신호진폭이 얻어진다.⁸⁾

Fig. 1과 같은 인덕턴스-커패시턴스(Inductance-Capacitance, L-C)의 병렬 공진회로의 경우 임피던스(Impedance)

$$Z = \frac{R X_c^2}{R^2 + (X_p - X_c)^2} \dots\dots\dots (1)$$

로 나타낼 수 있는데 R 값이 Xp 및 Xc 값에 비해 무시할 수 있을 정도의 값이면 Xp=Xc 즉 wL=1/wC, w=1/√LC 일때 Z는 최대값을 갖게 되며 공진주파수

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots (2a)$$

가 된다.

Xp : Inductive Reactance, Xc : Capacitive Reactance

L : Coil Inductance, henry, C : Cable Capacitance, farad

저항이 클 경우

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \left(\frac{Q^2}{1+Q^2} \right) \dots\dots\dots (2b)$$

$$Q = \frac{I^2 |X_p|}{I^2 R} = \frac{|X_p|}{R}$$

(Q : Quality factor)로 표시할 수 있다.

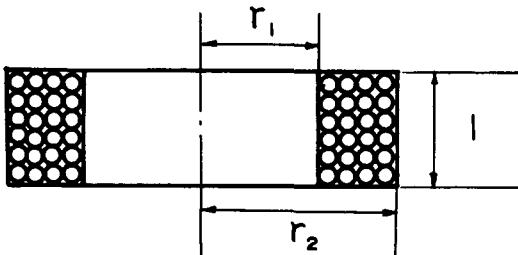


Fig. 1 Multilayer coils

Fig. 2와 같은 코일의 경우

$$\text{Self Inductance } L = K_n \frac{\pi^2 (r_1 + r_2)^2 n^2 \times 10^{-9}}{\ell}$$

$$K_n = \left[1.0 + 0.45 \left(\frac{r_1 + r_2}{\ell} \right) + 0.64 \left(\frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1} \right) + 0.84 \left(\frac{r_2 - r_1}{\ell} \right)^{-1} \right] \dots\dots\dots (3)$$

r1 : Coil 내반경, cm r2 : Coil 외반경, cm

ℓ : Coil 길이, cm n : Coil Turn 수

로 나타낼 수 있다.

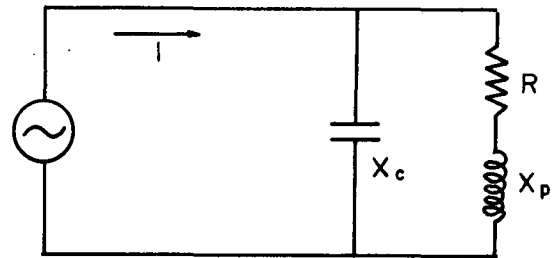


Fig. 2 Parallel LC circuit

3. 실 험

3.1 실험장치

제작된 코일의 특성조사를 위하여 Impedance Analyzer(HP 4192)와 Computer(HP 9836)를 연결하였다. 또 원자력발전소의 중성자속 검출기 이동관의 현장검사시 Photo 1과 같이 엔코더(Encoder)를 제작하여 Photo 2와 같이 검출기 이동관내에 삽입된 케이블의 길이를 알 수 있도록 하였으며 Computer에서 수집된 신호를 분석할 수 있도록 설치하였다.

3.2 시편 및 검사코일 제작

시험편으로는 Table 1과 같이 중성자속 검출기 이동관과 외경 및 재질이 비슷한 외경 8mm, 두께 1mm의 Seamless 스테인레스 스틸 316 튜브를 사용하였고, 안내관으로는 Table 2와 같은 외경 21mm, 두께 3mm의 스테인레스 스틸 304 튜브를 사용하였다. 마모결함(Fretting)의 형상 및 길이는 외국발전소의 검출기 이동관 마모경험을 참고하여 Table 3, Fig. 3

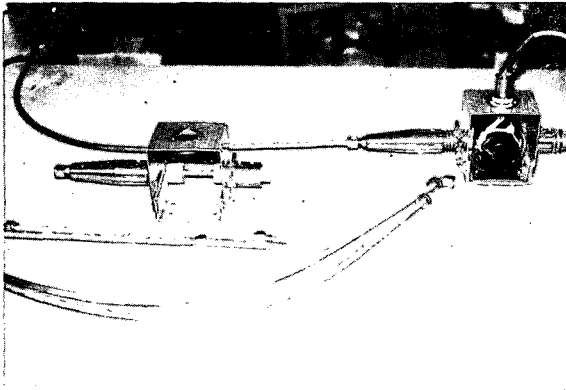


Photo 1. Encoder

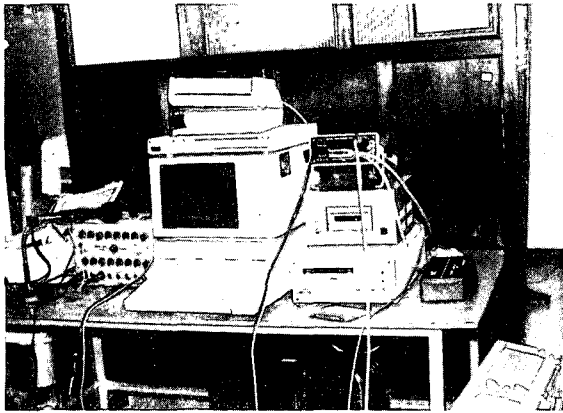


Photo 2. Test equipment

및 Photo 4와 같이 가공하였다. 발전소 현장 검사시는 실제 안내관과 동일 관을 사용하여 보정시험편을 가공하였다.

검사 코일은 내삽형으로 실제 검출기 이동관이 U자형으로 구부러져 있으므로 검사코일의 원활한 삽입을 위하여 충전률(Fill Factor)이 87%가 되도록 코일의 외경을 정하였다. 또 사용주파수가 공진주파수의 80%~120%가 될 수 있도록 식(2a)에서 L 값을 구하고 식(3)을 이용하여 코일의 길이, 깊이 및 권선수를 결정하여 Photo 4와 같이 제작하였다. 코일에 연결된 케이블은 실제 검출기 이동관의 전길이를 검사할 수 있도록 저항이 작고 C 값이 101 PF/m인 RG 174 동축 케이블 42.7m를 사용하여 케이블의 커패시턴스를 계산하였으며 코일사이의 Interwinding 커패시턴스는 케이블의 커패시턴스에 비해 매우 작으므로 고려하지 않았다.

Table 1. Chemical composition(%) and physical properties of the specimen(stainless steel 316)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Electrical Resistivity	Relative magnetic Permeability
0.05	0.47	1.25	0.038	0.005	11.73	16.15	2.05	74 $\mu\Omega$ -cm	1

Table 2. Chemical composition(%) and physical properties of the guide tube(stainless steel 304)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Electrical Properties	Relative magnetic Permeability
0.060	0.024	0.95	0.025	0.24	8.18	18.67	0.370	72 $\mu\Omega$ -cm	1

Table 3. Dimensions of test specimen

Specimen	Defect Dimensions(mm)	1	2	3	4	5
		Depth(a)	0.8	0.6	0.4	0.2
# 1	ARC Length(deg.)	90	90	90	90	90
	Axial Length(b)	25	25	25	25	13
	True Depth(%)	80	60	40	19	10
	Depth(a)	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1
# 2	ARC Length(deg.)	90	90	90	90	90
	Axial Length(b)	25	25	25	25	13
	True Depth(%)	79	61	41	20	11
	Depth(a)	0.3	0.1	0.6	0.3	0.15
# 3	ARC Length(deg.)	90	90	90	90	90
	Axial Length(b)	30	10	30	25	20
	True Depth(%)	30	10	60	29	15
	Depth(a)	0.4	0.5	0.75	0.2	0.1
# 4	ARC Length(deg.)	90	90	90	90	90
	Axial Length(b)	40	30	50	15	80
	True Depth(%)	40	49	76	20	13

Specimen #5	Depth(a/c)	0.05/0.1	0.25	0.45	0.2	0.1/0.3
	ARC Length(deg.)	360	90	90	180	360
	Axial Length(b)	10	20	30	15	30
	True Depth(%)	11	25	46	20	32
Specimen #6	Guide Tube Without Defect					

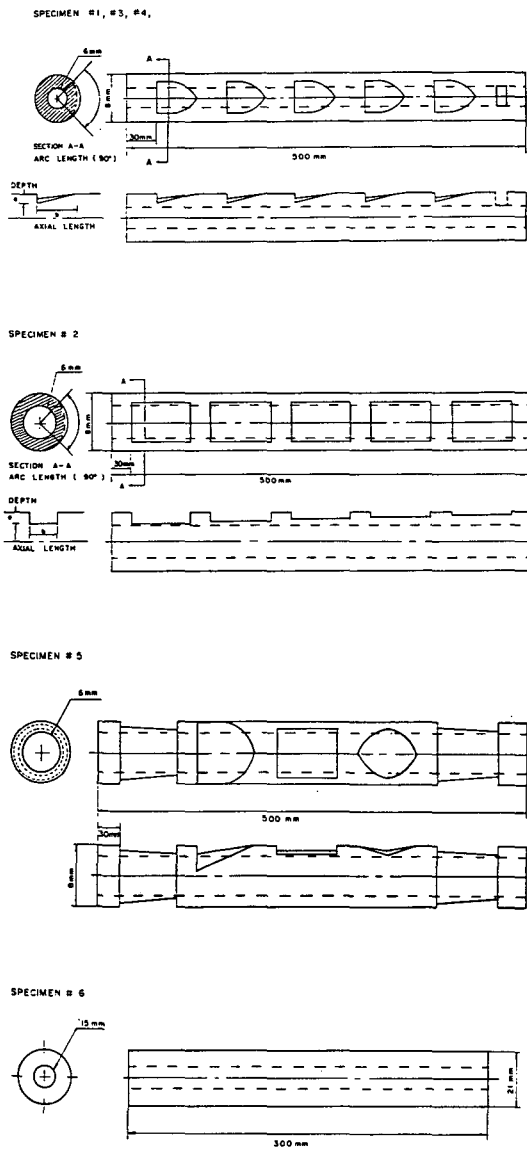


Fig. 3 Drawing of test specimens

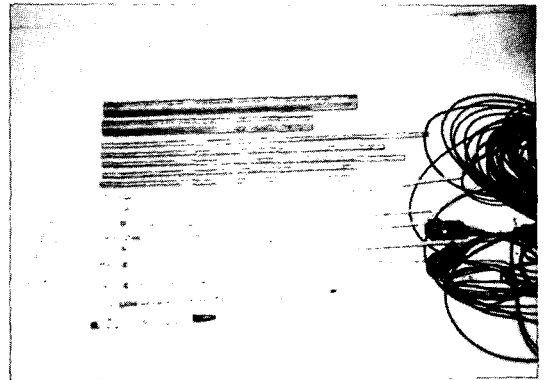


Photo 4. Test specimens and probes

Table 4. Dimensions of probe coils

Probe Coils Dimension	Coil # 1,2	Coil # 3,4,5	Coil # 6,7,8	Coil # 9,10
Depth of Coil Windings(mm)	1.5	1.5	1.0	1.0
Length of Coil Windings(mm)	1.5	1.5	1.0	1.0
Outer Radius(mm)	2.8	2.8	2.8	2.8
Inner Radius(mm)	1.3	1.3	1.8	1.8
Number of Turns	58	77	60	33
Wire Gage(mm) (φ enameled copper wire)	0.15	0.1	0.15	0.1
Cable Length (m)	42.7	42.7	42.7	42.7

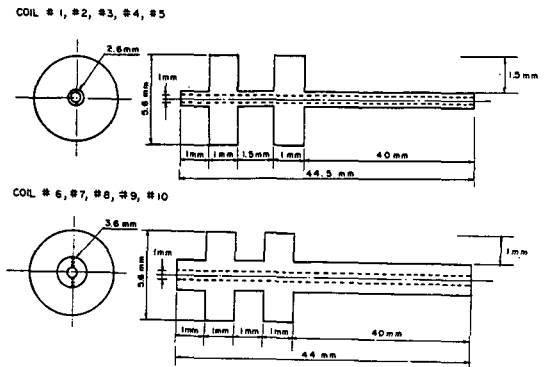


Fig. 4 Drawing of probe coils

3.3 실험방법

공진주파수를 달리하여 제작된 코일의 특성을 조사하기 위해 코일의 임피던스 Z, 리액턴스 X, 저항 R 및 양호도를 주파수의 변화에 따라 측정하였으며 튜브 시험편에 대한 코일의 결함검출감도 측정(Defect Sensitivity Test)을 위해 기록할만한 지시부(Recordable Indication)인 20% 결함 및 판막음 조치의 대상이 되는 40%, 60% 결함에 대하여 진폭 측정을 하였고 시험편 #1, 2, 3, 4, 5의 각각의 결함에 대하여 평가정밀도(Evaluation Accuracy)를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 공진주파수 및 임피던스 특성조사

각각 코일에 42.7m의 케이블을 연결하여 임피던스 값 및 공진주파수를 Fig. 5에 비교하였다. 각각의 코

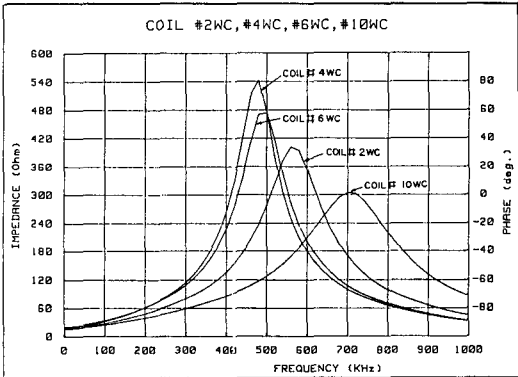


Fig. 5 Impedance variation for different coils

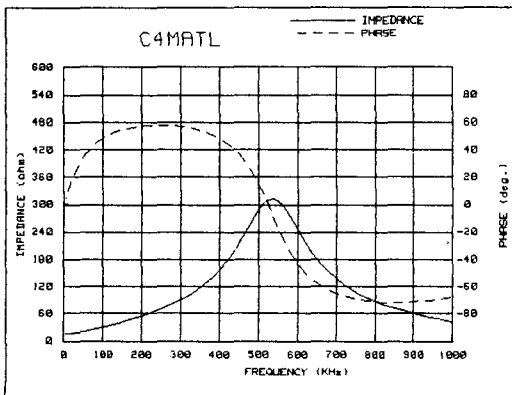


Fig. 6 Impedance variation for probe #4 wc on specimen

일은 설계시의 공진주파수보다 낮은 주파수에서 공진이 일어났는데 탐촉자 설계시 무시하였던 코일 및 케이블의 저항 및 코일의 인덕턴스, 커패시턴스 값의 차이로 인하여 식(2b)에 의해 공진주파수가 낮아진 것으로 생각된다. Fig. 6은 검사감도가 가장 좋은 코일 #4를 시험편에 접촉 하였을 때의 주파수 변화에 따른 임피던스 및 위상의 변화를 나타낸 것이다.

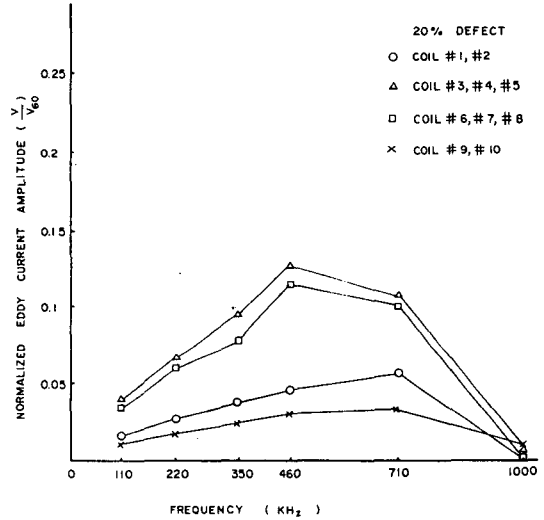


Fig. 7 Signal amplitude vs. frequency for different probes(20% defect)

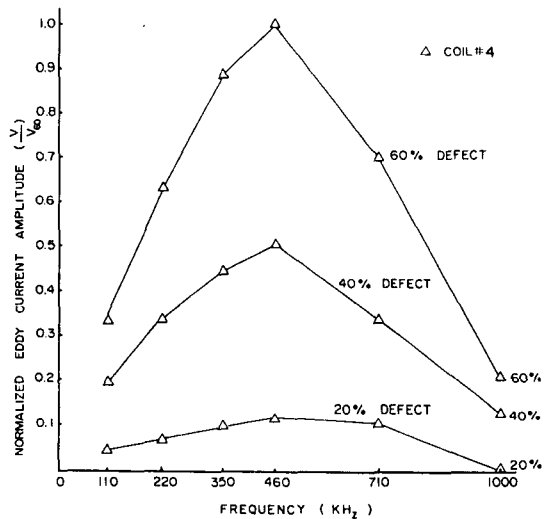


Fig. 8 Signal amplitude vs. frequency for different probes(20, 40, 60% defect)

4. 2 탐촉자 코일의 결함검출감도 측정(Defect Sensitivity Test)

표준시편의 20% 결함에 대하여 각 코일의 주파수 변화에 따른 신호 진폭(코일 #4의 60% 결함의 신호 크기로 Normalized된 값)의 값을 Fig. 7에 나타내었는데 각각 코일의 공진주파수 근처에서 검출감도가 우수하였다. 검사감도가 가장 좋은 코일 #4를 사용하여 20, 40, 60% 결함에 대하여 주파수에 따른 신호 진폭을 Fig. 8에 나타내었다.

4. 3 평가정밀도 측정(Evaluation Accuracy)

Fig. 9는 주파수 460kHz에서 각각 코일을 사용하여 Tapered Triangular Defect에 대하여 와전류 탐상에 의한 결함평가치를 나타낸 것으로 코일 #2, 4, 6, 10에 따른 평가오차는 거의 차이가 없었다. Fig. 10은 결함의 형태, 길이, 깊이 등을 달리한 시험편 #1, 2, 3, 4, 5에 대하여 시험편 #1의 20, 40, 60%의 Tapered Triangular Defect(Arc Length 90°)를 표준시험편으로 하여 평가한 결과 Tapered Triangular Defect 및 Rectangular Defect(Arc Length 90°)에 대해선 결함 평가 오차가 우수하였지만 Arc Length 360°인 Rectangular Defect에 대해서는 결함부피 증가에 따른 신호진폭의 증가로 매우 과대평가되었다. Fig. 11은 Rectangular Defect에 대하여 시험편 #2의 Rectangular Defect인 11, 41, 61%(Arc Length 90°)를 표준시험편으로 하여 평가한 결과 Arc Length 90°의 결함에 대해서는 평가오차를 줄일 수 있었지만 Arc Length 360°인 경우에는 평가오차를 줄일 수 없었다. Fig. 12는 Triangular Defect Tube(시험편 #1, 3, 4, 5)를 안내관 시험편 #6 내에 삽입하여 Tapered Triangular Defect를 표준시험편으로 하여 결함을 평가한 결과로서 안내관의 신호를 소거하기 위해 주파수 믹싱(Frequency Mixing)하여 결함을 평가한 경우가 평가오차를 줄일 수 있었다.

5. 현장 검사 적용

본 실험을 토대로 고리 2호기(1990, 2) 및 영광 2호기(1990, 5)의 원자로 중성자속 검출기 이동관(In-Core Flux Thimble)의 결함을 와전류탐상법을 적

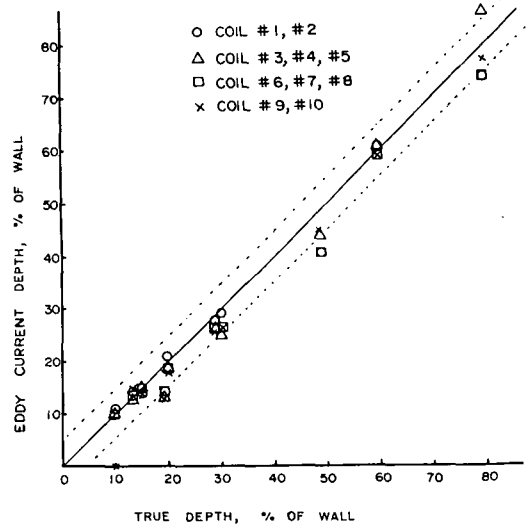


Fig. 9 Defect depth estimation using different probes

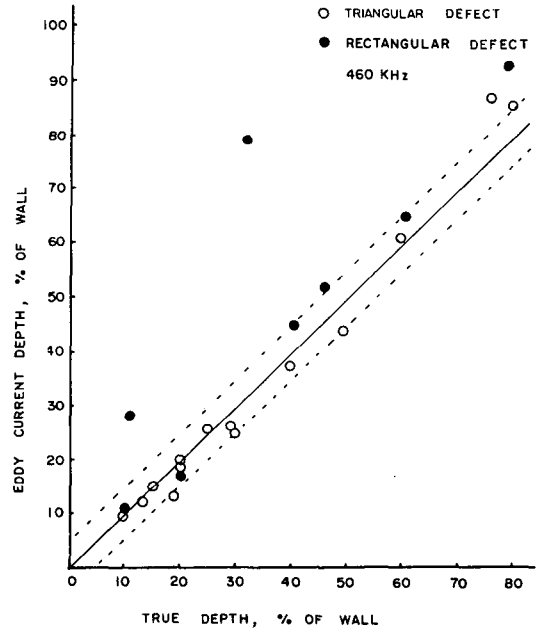


Fig. 10 Defect depth estimation using triangular defect

용하여 평가한 결과 결함의 모양 및 길이는 호기마다 약간씩 차이가 있었지만 대부분의 결함이 표준시험편의 Triangular Defect와 유사하게 나타나 와전류 탐상 방법이 적용가능하였다. 보다 정확한 결함평가를 위해서는 각 호기별 결함특성에 맞추어 표준시험을

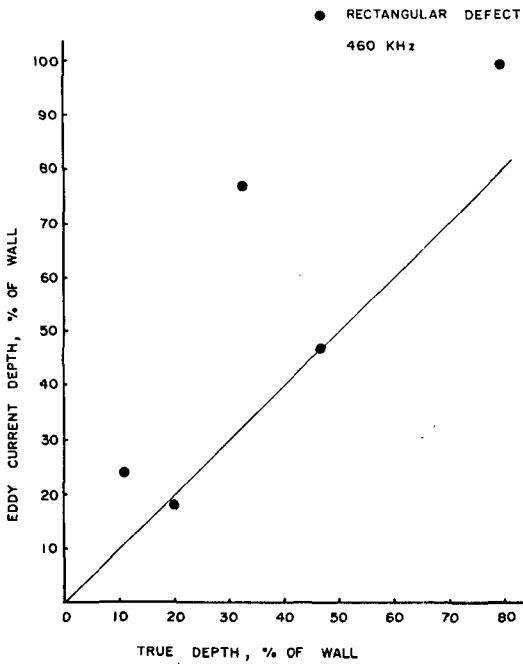


Fig. 11 Defect depth estimation using rectangular defect

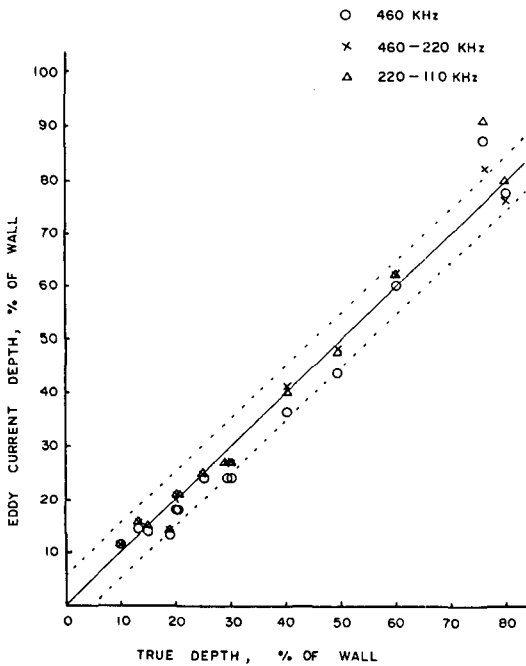


Fig. 12 Defect depth estimation with guide tube

제작하는 방법도 검토된다. 검출기 이동관이 안내관 내에 삽입되어 있는 경우(Cold Shut Down) 안내관 신호를 소거하기 위해 주파수 믹싱하는 방법이 효과적이었다.

6. 결 론

원자로 중성자속 검출기 이동관(In-Core Flux Thimble Tube)의 와전류 탐상을 위한 검사 코일은 시편두께/표준침투깊이(T/δ)가 0.7-1.6이 되도록 검사주파수를 선정하고 이에 적합하게 공진 주파수를 고려하여 코일을 설계하며 국내 원전에서 발견된 결함형태도 표준시편으로 사용한 Tapered Triangular Defect와 유사하게 나타나 와전류 탐상 방법이 적용 가능하였으며 검출기 이동관이 안내관(Guide)내에 삽입되어 있을 경우 주파수 믹싱(Frequency Mixing) 하는 방법이 결함을 평가하는데 더욱 효과적이었다.

References

1. Nuclear Energy Agency, IRS 583 "Wear of In-core Instrumentation Thimbles" Nov. 1985.
2. IE Information Notice, No. 87-44 "Thimble Tube Thinning in Westinghouse Reactors", Sep. 1987.
3. IAEA Incident Reporting System, BE-09, "Wear of In-core Instrumentation Thimbles" Aug. 1987.
4. NRC Bulletin, No. 88-09 "Thimble Thinning in Westinghouse Reactors", Sep. 1988.
5. 김용식 "In-Core Instrumentation System Thimble Tube Thinning에 대한 U.S. NRC 조치와 국내 원전대책" 원자력 안전센터 발표자료, Oct. 1988.
6. K. Krzywosz, "Nondestructive Evaluation Program" EPRI NP-5490-SR, (1987), pp. 42-1~42-23.
7. 이세경의 "와전류탐상 탐촉자 개발" KSRI-86-16-IR, 한국표준연구소, 1986.
8. V. S. Cecco, et al., "Manual on Eddy Current

- Method”, AECI 7523, 1981.
9. V. G. Welsby, “The Theory and Design of Inductance Coils”, John Wiley and Sons Inc., (1960), pp. 42~44.
10. “Flux Mapping System Instrument Thimble Leaked” Nuclear Power Experiences Vol. II Reactor Internal, 1984, 1986, 1988.
11. D. Dobbeni “Applying Eddy Current Technique to In-Core Instrument Thimbles” Nuclear Engineering International Apr. (1987), pp. 62~63.