

원자로 제어봉 End-Tip 원주방향균열 와전류검사

이희종, 남민우, 정계조
한국전력공사 전력연구원 원자력연구실 원전설비지원그룹

초 록 경수로형 원자로 제어봉집합체(rod cluster control assembly)의 제어봉선단 봉단마개 부위에 발생할 수 있는 원주방향균열을 검출하기 위한 다중표면 와전류탐촉자를 설계하였으며, 이를 MIZ-30 주파수발생장치에 연결하여 원주방향균열을 검출하고 원주방향깊이를 측정할 수 있는 와전류검사기술을 개발하였다. 8X1 다중표면 와전류탐촉자는 원주방향으로 발생할 수 있는 균열 검사에 적합하도록 탐촉자 내부 원주방향으로 8개 표면코일을 일정간격으로 배치하고 코일 후방에 스프링을 설치하여 주사시 코일 머리부분이 표면에 밀착되도록 코일과 피복관표면 사이의 lift-off 발생이 최소가 되도록 설계하였다. LCR-meter 및 HP-VEE 프로그램을 사용하여 코일의 전기적특성을 평가하였으며, 탐촉자의 균열검출 특성은 Miz-30과 Eddynet 프로그램을 사용하여 평가하였다. 교정 standard와 시험편은 14X14형 제어봉피복관(SS-304, 외경: 10.95mm, 두께: 0.48mm)을 사용하여 축방향과 원주방향으로 깊이와 길이를 달리하여 여러가지 균열성 EDM노치(폭 0.2mm, 관두께의 15, 25, 40, 50, 60%깊이)를 가공하였으며, 이를 이용하여 탐촉자의 균열검출 및 크기측정 특성을 평가한 결과 제어봉 튜브표면에 발생한 원주균열의 검출 가능 최소깊이는 3.5mm이고, 깊이는 $\pm 5.31\%$ RMS 오차 이내로 측정할 수 있었다. 또한, 제어봉선단 봉단마개 부위에 발생할 수 있는 마모, 스크래치, 축 및 원주방향균열 신호는 신호의 위상과 신호형상을 분석하므로써 구분이 가능하였다.

1. 서 론

웨스팅하우스사에서 설계한 경수로형 원자로 제어봉 집합체(rod cluster control assembly)는 원자로 노심의 반응도 제어 및 정지 기능을 가진 기기로서 제어봉의 구조는 피복관(재질: SS304, 외경 약 10mm, 두께 약 0.45mm)내에 흡수물질(은-인듐-카드뮴 합금, 외경 약 9~10mm)이 내장되어 있고 끝단은 end plug로 봉입되어 냉각재로부터 격리된다. 원자로 운전중 제어봉 집합체는 핵연료 내부에서 인출되어 용기 상부에서 8개의 안내 카드에 의해 지지된다. 원자로 운전중 용기내 냉각재 흐름에 의한 진

동으로 안내 카드와 접촉하여 피복관에 fretting wear가 발생할 수 있으며 또한, 운전중 핵연료 집합체내에 삽입되어 있는 제어봉 end plug부위는 중성자조사에 의한 균열발생 등으로 인해서 수명이 단축될 수 있다. 제어봉 집합체 제작사(WH사)에 의하면 RCCA의 예상수명은 약 15년 정도이나 위와 같은 결함발생으로 인해서 10년 정도로 단축될 수 있고, 제어봉의 재배치(repositioning)에 의해 5년 정도가 연장될 수 있다고 한다.

이와 같은 제어봉 수명 연장을 위한 제어봉 재배치 등의 조치와 원전 장주기 운전시 제어봉 집합체 작동의 신뢰도 향상을 위해서 주기적으로 와전류검

사를 수행하여 건전성을 평가하고 있다.

제어봉 제작사에서 권고하여 현재 국내 원전에 적용하고 있는 제어봉 관리기준은 제어봉 피복관 단면적의 50%이상 감육이 발생한 제어봉 집합체와 end-tip부위에 원주방향으로 180° 이상 균열이 발생한 제어봉 집합체는 교체하는 것이다. 현재 국내·외적으로 제어봉 집합체 건전성 평가를 위해 적용하고 있는 와전류검사기술은 differential encircling probe와 profilometry probe를 사용하여 흡수체 충전부위에 발생하고 있는 평균·국부 마모량을 측정하고 있으며, 피복관 end plug부위 원주방향으로 발생할 수 있는 미세 균열을 검출하고 길이를 측정할 수 있는 기술은 아직 적용되지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 8X1 다중 표면탐촉자를 설계하고, 이를 이용하여 제어봉 end plug부위의 원주방향으로 발생할 수 있는 미세 균열을 검출하고 길이를 측정할 수 있는 기술을 개발하여 현장에 적용하고자 한다.

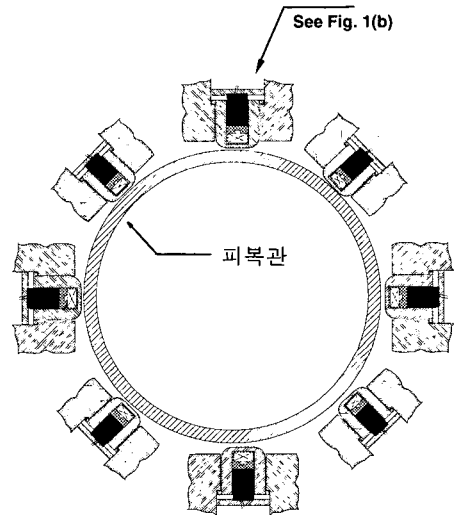
1.1. 제어봉 End Plug부위 결함발생기구¹⁾

미국 EPRI에서 수행한 바 있는 폐기제어봉의 hotcell 전자현미경 금속조직검사에 의하면 균열은 입계에 발생한 응력과 함께 방사선조사에 의해 복합적으로 발생하는 것으로 밝혀 졌다. 방사선 조사에 의해 실리콘, 황화합물 등과 같은 불순물이 입계에 편석되어 균열이 발생하게 되므로 실리콘 및 황화합물 등과 같은 불순물이 적게 포함된 피복관은 균열 발생이 적다. 또한, 방사선에 조사된 피복관의 인장 시험결과에 따르면 피복관의 방사선조사만으로 입계 균열 발생 가능성이 크게 증대될 수 있음이 밝혀졌다. 이 균열 발생 기구는 creep 발생 기구와 유사하다. 제어봉 균열을 유발시키는 응력원은 흡수물질의 부풀음, 소성변형, 열팽창, tolerance, 피복관 감육 등과 같은 것들이 서로 결합하여 나타난다. 또한 hotcell시험에 의하면 방사선 조사에 의해 피복관 재질 입계내로 실리콘 및 황화합물 등이 침투하여 취화요소로 작용하여 응력부식균열을 촉진한 것으로 알려져 있다. EPRI보고서에 의하면 SS 304피복관은 일반적으로 9주기 운전후 피복관 균열이 발생할 가능성이 높다. 균열은 봉단(끝부분)에서 시작하여 피복관이 4~6 정도 갈라지고 이틈으로 냉각재가 흡수체에 침투한다. 일반적으로 $1.9\sim 2.0 \times 10^{22}$ nvt ($E>0.3\text{ev}$) 이하로 방사선이 조사된 제어봉 피복관에

서는 균열이 발생하지 않는다.

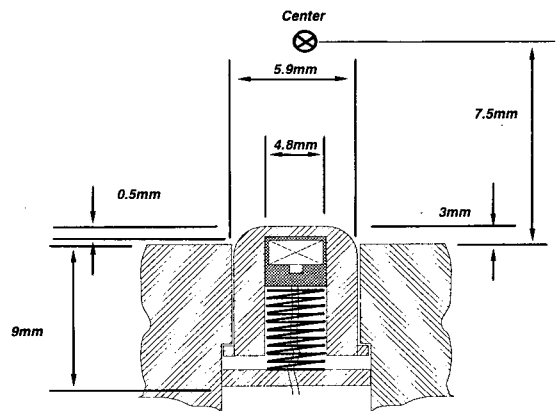
2. 탐촉자 설계 및 제작

보빈 및 encircling 탐촉자는 원주방향 균열에 대해 감도가 매우 낮아 검출이 어렵다. 이는 와전류가 원주방향으로 감긴 코일에 평행한 방향으로 흘러 와전류흐름방향과 평행인 원주방향균열과 작용하기 어렵기 때문이다. 또한 제어봉 외부 표면에 발생한 마



8*1 Multi Surface Probe

(a) 8X1 surface coil 배치도



Detail "A"

(b) 8X1 surface coil dimension

Fig. 1

모결함의 국부적인 단면형상검사에 사용되는 pro-
filometry 탐촉자도 마찬가지로 코일과 피복관 표면
사이의 lift-off현상으로 인한 noise로 인해서 신호
해석과 크기측정이 매우 어렵다(Fig. 5 참조). 따라
서 코일과 피복관 표면 사이의 lift-off현상을 제거하

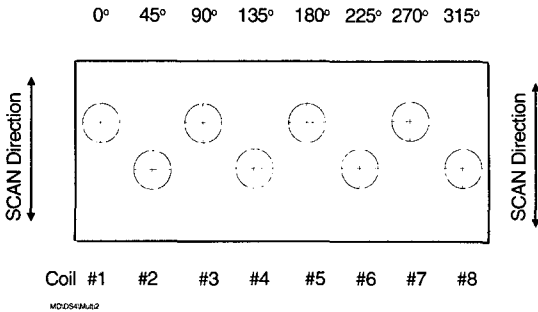


Fig. 2 A development figure of 8X1 surface probe

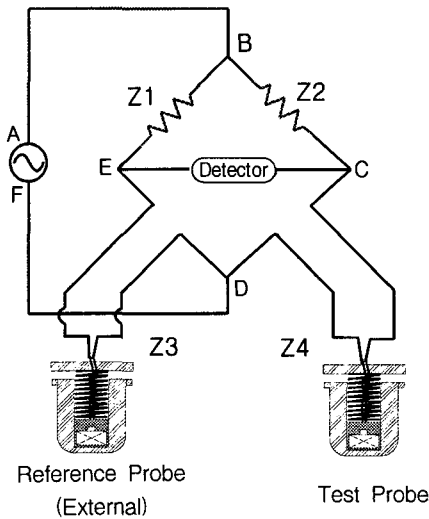


Fig. 3 8X1 Surface probe circuit

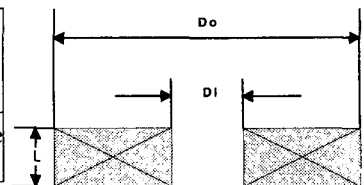
여 S/N비를 향상시키기 위해서 주사시 코일이 피복
관 표면에 밀착되도록 탐촉자를 설계하였다. probe
의 구조(Fig. 1 (a), (b), 2)는 probe몸체 내부 원주방
향으로 8개의 표면코일을 일정한 간격으로 배치하고
코일 후방에 스프링을 설치하여 제어봉 피복관 표면
을 주사할때 probe coil과 피복관 사이의 lift-off 발
생이 최소가 되도록 설계하였다. 이 스프링의 힘에
의해서 코일 몸체가 피복관 표면에 밀착되어 lift-off
현상에 의한 noise 발생을 최소화한다. 또한 probe 몸
체 재질은 온도가 약 40° 인 수중에서 검사가 이루어
지기 때문에 수분흡수에 의한 치수변형을 고려하여
수분흡수력이 적은 아세탈로 제작하였으며, 피복관 표
면에 밀착되는 머리부분은 기계적마모에 강하도록 특
수 에폭시 접착제를 사용하여 내마모성을 증대시켰다.

와전류검사 신뢰도에 영향을 가장 많이 미치는
변수인 시험주파수(400kHz)는 표준침투깊이를 피복
관두께의 1.6배($\delta/t=1.6$)로 가정하고 와전류 표준침
투깊이 계산식을 이용하여 구하였다²⁾.

수중내 원격검사에 필요한 탐촉자 케이블은 길이
가 약 23m인 동축 케이블(RG-174, C값: 101pF/m)
을 사용하였다. 이론 공명주파수(400kHz), 케이블
capacitance와 탐촉자-케이블간 공명주파수식을 이
용하여 코일의 인덕턴스값($L=68\mu H$)을 구한 다음 이
에 상응한 코일 내외반경, 두께 및 권선수($N=$
240turns)를 정하였다. 탐촉자의 기하학적 치수중 내
경은 검사대상인 피복관 외경에 따라 결정되고 또한,
탐촉자 내경 원주방향으로 8개 코일을 배열해야 되
기 때문에 내경 원주길이에 따라 최대로 크게할 수
있는 코일직경이 결정된다. 따라서 제어봉표면에 발
생할 수 있는 균열검사에 최적인 코일의 전기적 특
성은 인덕턴스가 약 $68\mu H$, 권선수가 약 240회로서
winding 후 코일 외경이 약 6mm가 되었다. 하지만
이 코일은 외경이 너무 커서 탐촉자내 원주방향으로
(탐촉자 내경 원주길이 약 39.8mm) 배열하는 것이

Table 1 Probe coil characteristic

Coil No	권선수 N (Turns)	코일 Dia. (Do/Di, mm)	길이 (l, mm)	Inductance L in Air(μH)@500kHz		Resistance in Air(k Ω)	공명주파수 in Aired with Cable (kHz)	비고
				Air-cored	Ferrite-cored			
#1	120	4.5/1.5	2	26	68	10	410	* Ferrite Core Dia. 1.6mm



* 측정온도 : $20.0 \pm 0.1^\circ C$, probe cable길이 : 23m

* Ferrite core permeability : 800

불가능하여 권선수를 120회로 줄여 코일 외경을 4.5 mm로 줄이고, 대신 코일 내부에 페라이트 코어를 삽입하여 투자율을 증대시키므로써 균열검출에 필요한 약 68 μ H의 인덕턴스를 얻었다³⁾(Table 1). 또한, 이 코일에 케이블을 연결하였을 때 시험주파수 400kHz 부근에서 최대감도(공명발생)가 발생하도록 탐촉자 회로에 ceramic capacitor를 병렬로 첨가하여 공명점을 조정하였다. 검사방식은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 외부차동형(external differential)으로서 시험탐촉자와는 별도로 외부에 reference 탐촉자를 배치하였다.

3. 시험편(Test Specimen) 제작

14X14형 제어봉 집합체 피복관 외부 표면에 발생할 수 있는 균열을 모의하기 위해서 피복관과 동일한 재질인 SS-304 튜브와 흡수체(은-인듐-카드뮴 합금)를 사용하여 피복관 외부에 원주방향으로 길이를 다르게 하여 폭 0.2mm의 균열성 EDM노치를 가공하여 시험편을 제작하였다(Table 2참조). 이 시험편들을 이용하여 탐촉자를 구성하고 있는 8개 코일의 원주방향균열에 대한 검출능력을 평가하고 크기를 측정하였다.

4. 실험

4.1. 실험장치 구성

8 \times 1(3절참조) 다중표면탐촉자의 균열검출 특성을 평가하기 위해 사용된 주파수 발생장치는 64채널 용량으로 주파수 대역이 10kHz~1MHz인 Zetec사의 Miz-30/8을 사용하였으며⁴⁾, EddyNet 95 프로그램을 사용하여 탐촉자의 결합검출 특성과 검사정확도를 평가하였다. 실험은 온도변화에 따른 코일 와이어의 저항변화를 최소화하기 위해서 주위온도가 일정하게 유지되는 콘테이너 내부 20 \pm 1 $^{\circ}$ C에서 수행하였다. Calibration standard 및 시험편이 탐촉자 내부를 통과하게 될 때 코일과 시험편간의 lift-off변화에 의한 오차를 최소화하기 위해 탐촉자를 고정하기 위한 검사대를 제작하여 활용하였다(Fig. 4 참조).

4.2. 신호취득(Data Acquisition)

8 \times 1 다중표면탐촉자는 차동형(differential)탐촉자로서 각 코일당 1개 채널씩 8개채널을 사용하였으

Table 2 Artificial defect dimension on SS-304 tubing

Specimen No.	Defect Type	Direction	Length(mm)	Depth,mm(%TW)	Remarks
1	Crack Like EDM Notch (Width : 0.2mm)	Circumferential	2	0.05(10%)	OD 10.95mm, Wall Thickness 0.48mm
			3.5	0.10(21%)	
			5.5	0.16(33%)	
			7.0	0.22(46%)	
			8.2	0.26(54%)	
2	"	Circumferential	4.3(45 $^{\circ}$)	0.07(15%)	OD 10.95mm, Wall Thickness 0.48mm
			8.6(90 $^{\circ}$)	0.12(25%)	
			17.2(180 $^{\circ}$)	0.19(40%)	
			34.4(360 $^{\circ}$)	0.24(50%)	
				0.28(60%)	

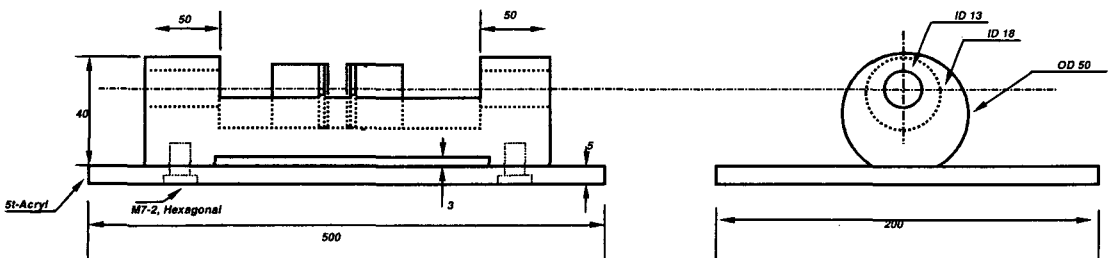


Fig. 4 Probe fixture apparatus

며, 1차 시험주파수는 400kHz, 보조주파수로서 200, 100kHz를 사용하여 총 24개 채널의 신호를 취득하였다. 주사속도는 calibration standard 및 시험편을 탐촉자 내부로 약 7mm/sec속도로 통과시켜 신호를 취득하였으며 이때 주사조건은 sampling rate 200samples/sec, gain 2, drive 7 Volts를 적용하였다 (30data points/mm). 시험주파수 400kHz에서 calibration standard EDM 노치로부터 발생한 신호를 8개 채널별로 Fig. 6에 나타냈다.

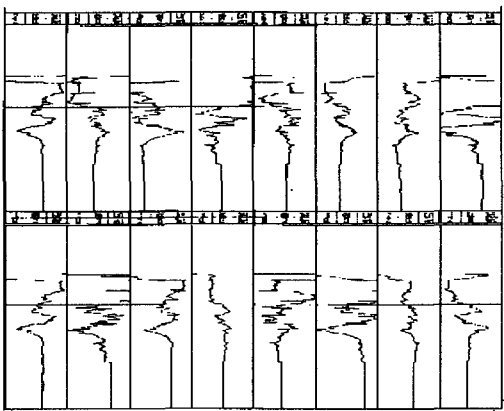


Fig. 5 Signals from circumferential EDM notch with profilometry probe
(위 : 수직성분, 아래 : 수평성분)

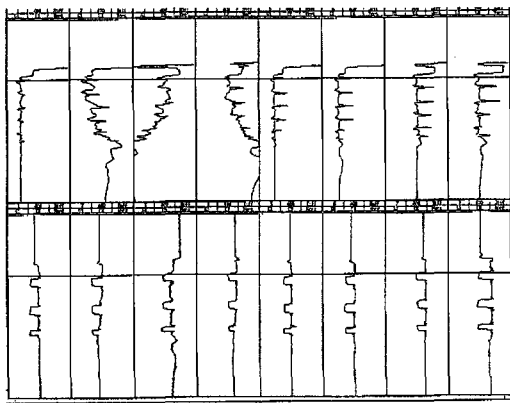


Fig. 6 Signals from each surface riding coil (8 channels) (위 : 수직성분, 아래 : 수평성분)

4.3. 신호 해석

8×1(3절참조) 다중표면탐촉자의 원주방향균열 검출 및 크기측정 정확도 평가를 위해서 피복관 외부에 원주방향으로 길이를 달리하여 가공한 EDM노치 (2, 3.5, 5.5, 7.0mm원주길이)신호를 분석하였다. 취득한 신호 분석에 필요한 기준을 설정하기 위해서 임피던스 평면상에서 피복관 두께의 21% 깊이의 균열성 EDM 노치로부터 발생한 신호의 위상각을 90°로, 신호크기를 5Volts_{p-p} (3 screen division)가 되도록 조정하였다.

Fig. 6에 나타낸 8×1(3절참조) 다중표면탐촉자를 사용하여 각 EDM(원주방향 360°)노치로부터 발생한 신호는 신호의 구분이 어려운 profilometry probe 신호(Fig. 5)와는 달리 형상구분이 명확하여 신호해석이 가능하다. 균열의 원주길이를 측정하고 검출이 가능한 최소 균열길이를 확인하기 위해서 원주방향 길이가 다른 각 노치로부터 발생한 신호들을 분석하였으며, 원주방향으로 45° 길이의 EDM노치를 탐촉자내부로 통과하였을 때 발생하는 신호(Fig. 7참조)를 이용하여 코일 1개의 원주방향 검출범위를 확인하였으며, 이 신호는 위상각을 조정하여 수평성분을 제거한 것이다. EDM노치 깊이 측정정확도는 와전류신호 진폭(Volts_{p-p}) Vs depth곡선을 작성하여 측정하였다.

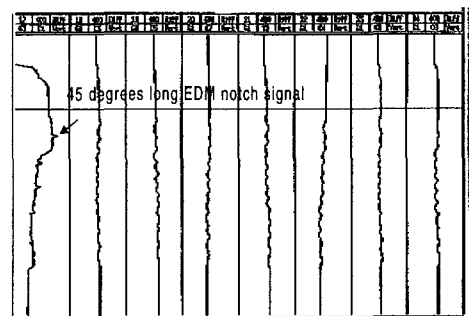


Fig. 7 Signals from 4.3mm-long Circumferential Notch (45°) at 400KHz

5. 실험 결과 및 고찰

다중표면코일에서 발생하는 와전류신호 형상은 코일배치가 외부차동형(external differential)으로 연결되어 있기 때문에 절대형코일에서 얻어진 신호와

유사하다. 즉 탐촉자가 제어봉 피복관 표면을 주사할 때 코일이 EDM노치에 접근하게 되면 발생하는 신호는 처음에 왼쪽 윗쪽으로 진행하다가 코일중심이 EDM노치에 놓이면 최고 정점에 도달하게 되고 EDM노치에서 점차 멀리 떨어지게 되면 신호는 다시 오른쪽 아래 평형점(nulling point)으로 되돌아와 신호 형성을 완료한다. 제어봉 end-tip부위에 발생할 수 있는 결함은 마모, 미끄럼 스크래치, 균열 등이다. 즉 마모는 피복관의 안내카드와 접촉에 의해서 발생하는 것으로 대부분 원주방향 홈형태로 발생하고 폭은 안내카드 두께와 동일한 약 25mm이다. 미끄럼 스크래치는 제어봉 인출 및 삽입시 안내카드와 접촉하여 미끄러져 발생하고, 원자로 운전중 핵연료 집합체에 삽입되어 있는 제어봉 end-tip부위는 중성자 조사에 의해서 축 및 원주방향 균열 등이 발생할 수 있다. 주기적으로 수행하는 와전류검사 결과 원주방향균열이 검출될 경우 제어봉 제작사에서는 그 길이가 원주방향으로 180° 이상일 경우 제어봉을 교체할 것을 권고하고 있다. 따라서 이들 결함 중에서 원주방향균열을 구별하여 제어봉의 재사용 여부를 결정하기 위해서 두가지 분석기법을 병행하여 적용하였다. 즉 첫번째 방법으로 시험편의 각 모의결합에서 발생하는 신호를 취득하여 주파수변화에 따른 신호의 위상각변화 특성을 관찰하였으며, 두 번째로 신호형성과정과정 특성특성을 분석하여 원주방향균열을 판별하였다. 원주방향균열을 판별하는 첫번째 방법으로 리사주화면에서 발생한 균열성 EDM notch, 스크래치신호의 주파수변화에 따른 위상각변화 특성을 분석하여 3가지 결함중 균열과 스크래치신호 두가지를 구분하였다. Fig. 8에 나타낸 바와 같이 EDM노치신호의 주파수변화에 따른 위상

각변화특성은 주파수가 감소함에 따라 약간 시계방향으로 회전하는 특성을 가지고 있다. 이에 비해서 미끄럼 스크래치신호의 위상각은 주파수가 변해도 수평선 아래로 거의 일정하다. 원주방향균열을 판별하는 두 번째 방법은 각 결점에서 발생한 신호형상 특성 및 형성과정을 분석하였다.

마모신호의 형상특성을 살펴보면 Fig. 9 (a)에 나타낸 바와 같이 코일이 마모 시작점인 그루브턱을 지날 때 1차 피크가 발생하고 시작점을 지나서 마모가 발생한 그루브를 통과할 때 신호가 나타나지 않다가 코일이 다시 마모끝점의 턱을 지나게 되면 2차 피크가 생성되어 신호형성을 마치게 된다. 미끄럼 스크래치 신호 특성은 Fig. 9 (b)에 나타낸 바와 같이 신호 로브형상이 부드럽게 벌어져 형성된다. 세 번째 결점인 축·원주방향 균열중 축방향 균열신호는 Fig. 9 (c)에 나타낸 바와 같이 코일이 축방향 균열을 따라서 주사할 때 로브의 벌어진 폭이 좁고 비교적 날카롭게 형성되며 수직성분의 피크부분이 넓다. 이에 비해서 원주방향 균열신호는 Fig. 9 (d)에 나타낸 바와 같이 로브를 형성하지 않고 수직성분의 피크가 날카롭고 순간적으로 신호가 나타나는 특성을 나타내기 때문에 축방향균열과 구분이 가능하다. 또한 균열의 방향성(축·원주방향)은 encircling coil신호를 병행하여 분석하므로써 구분이 가능하다. 즉 와전류는 감긴 코일방향과 평행하게 발생하므로 코일이 감긴 방향에 수직으로 놓인 결함과는 상호작용이 커서 검출이 용이하나, 평행으로 놓인 결함과는 상호작용이 거의 없어 검출이 어렵기 때문에 원주방향균열은 encircling coil신호에 거의 나타나지 않고 축방향균열신호만 검출되기 때문에 균열의 방향성 판별이 가능하다.

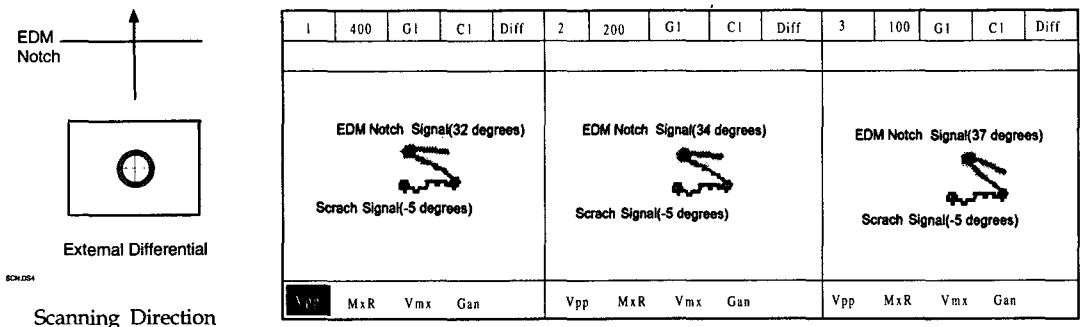


Fig. 8 Signal response from scratch, EDM notch at 3 inspection frequencies using the external differential coil

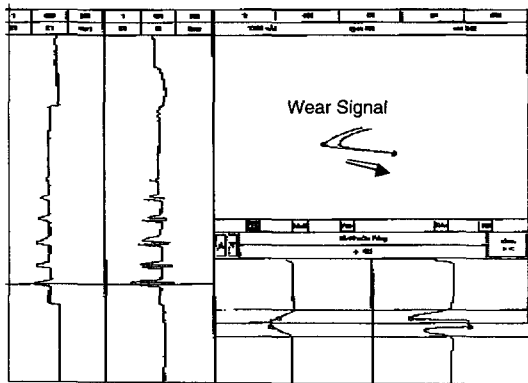


Fig. 9a Signal pattern of wear Ddefect at 400kHz inspection frequencies using the external differential coil

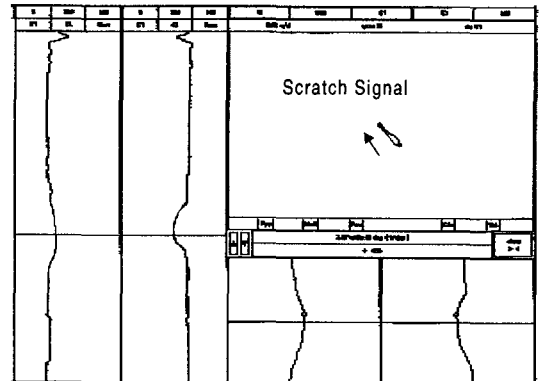


Fig. 9b Signal pattern of scratch at 400kHz inspection frequencies using the external differential coil

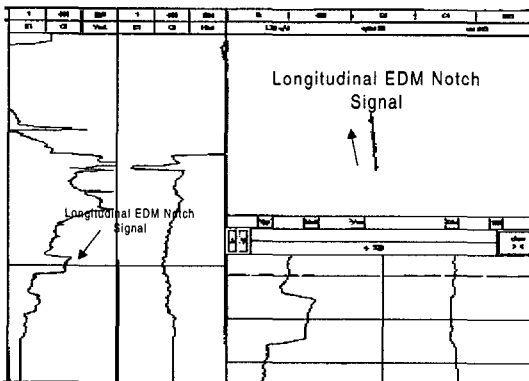


Fig. 9c Signal pattern of crack like longitudinal EDM notch at 400kHz inspection frequencies using the external differential coil

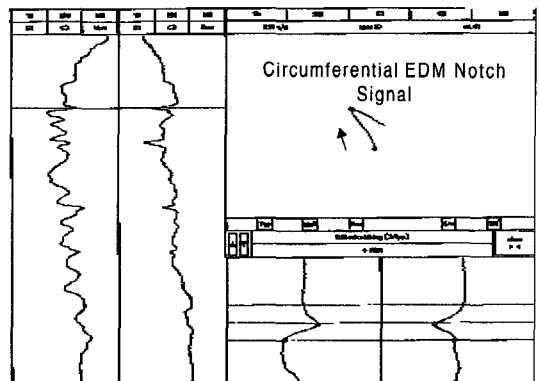


Fig. 9d Signal pattern of crack like circumferential EDM notch at 400kHz inspection frequencies using the external differential coil

5.1. 균열 길이 및 깊이 측정

8X1 다중표면탐촉자를 사용하여 검출이 가능한 균열의 최소 원주길이는 시험편 No. 1의 길이가 다른 각 EDM노치 신호를 분석하여 확인하였다. Fig. 10에 나타낸 바와 같이 깊이가 관두께 40%이고 원주길이가 각각 2, 3.5, 5.5, 7.0, 8.2mm인 5개 EDM노치중 2mm EDM노치는 거의 신호가 발생하지 않고 3.5mm EDM노치부터 신호가 발생하여 검출이 가능한 최소 원주길이는 약 3.5mm이었다. 코일 1개의 원주방향 검출범위는 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 45° 길이의 EDM노치신호가 8개 코일중 1개(채

널 #17)코일에서 검출되어 코일 1개가 원주방향 약 45° 범위를 검출할 수 있는 것으로 관찰되었다. 본 실험에서는 제어봉의 재사용 판정기준인 원주방향 길이가 180° 초과 여부를 판단하기 위한 기준을 설정하였다. 즉, 원주방향균열길이가 180° 이상인 균열은 8개 코일(채널)중 4개 코일의 거의 동일한 축방향위치에서 동시에 신호가 발생하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한, 균열깊이는 differential mode에서 피복관 두께의 21%깊이의 균열성 EDM 노치로부터 발생한 신호의 위상각을 90°로 조정하고 신호크기를 5Volts_{p-p} (3 screen division)이 되도록 맞추어 Volts_{p-p} Vs. depth 곡선을 작성하여 측정하였다.

균열깊이 측정 정확도 평가는 시험편 #2의 각 EDM 노치를 10회씩 측정하여 평균값을 적용한 결과 원주방향 EDM노치의 깊이를 $\pm 5.31\%$ RMS 오차로 측정이 가능하였다(Fig. 11 참조).

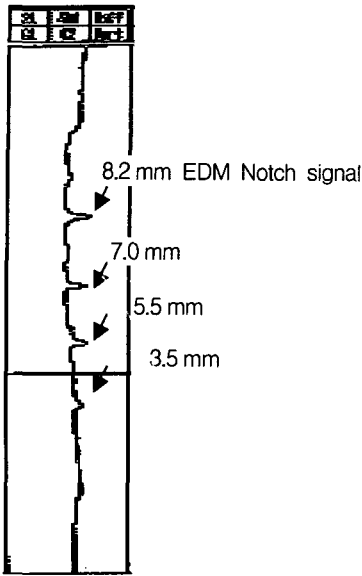


Fig. 10 Signals from 3.5, 5.5, 7.0, 8.2mm long EDM notch

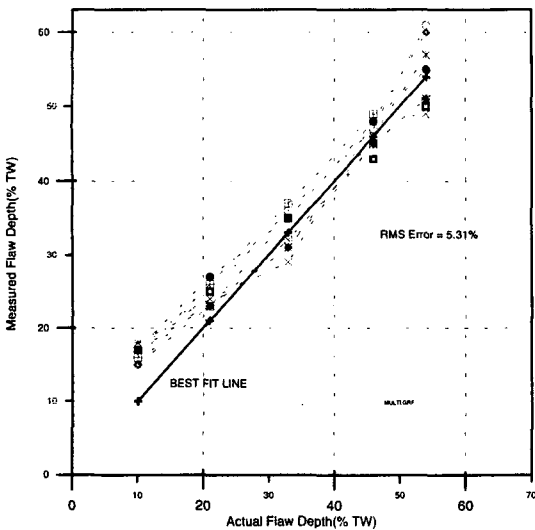


Fig. 11 Crack depth examination of 8X1 surface riding probe

6. 결론

8X1 다중표면탐촉자를 설계하여 제어봉 피복관의 부에 발생할 수 있는 원주방향균열을 검출하고 원주방향길이와 깊이를 측정하였다. 제어봉 피복관과 동일한 재질을 사용하여 원주방향균열성 EDM 노치를 모의제작한 시험편을 이용하여 8X1 다중표면탐촉자의 균열검출과 크기측정 특성을 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 와전류신호의 주파수변화에 따른 위상각 변화 특성을 분석하여 균열성 EDM notch와 스크래치 신호의 구분이 가능하였다. 즉, EDM노치 신호는 주파수가 감소함에 따라 위상이 약간 반시계방향으로 회전하는 특성을 가지고 있다. 이에 비해서 미끄럼 스크래치신호의 위상각은 주파수가 변해도 수평선 아래로 거의 일정하였다. 둘째, 마모, 스크래치, 축 및 원주방향 균열신호는 각 신호의 형상과 형성과정을 분석하여 구분이 가능하였다. 즉, 축방향균열신호는 수직성분 피크형상이 직선모양이고 원주방향균열신호는 날카롭고 순간적으로 형성되므로 이러한 특성에 따라 축방향균열과 원주방향균열을 구분할 수 있었다.

셋째, 8X1 다중표면탐촉자의 검출 가능한 균열의 원주길이는 약 3.5mm이었다.

넷째, 원주균열의 길이는 노치신호가 검출된 코일의 수를 이용하여 측정이 가능하였다.

다섯째, 8X1 다중표면탐촉자의 균열깊이 측정 정확도는 시험편 EDM노치의 깊이를 $\pm 5.31\%$ RMS 오차로 측정이 가능하였다.

참고 문헌

- 1) EPRI, "Lifetime of PWR silver-indium-cadmium control rods, EPRI NP-4512), pp. 7-1~5, (1986)
- 2) Chalk River Nuclear Laboratories, Eddy Current Manual, pp. 68~72, (1981)
- 3) 이희중, 남민우, 이진환, "원형튜브 단면검사용 와전류탐촉자 개발" 한국비파괴검사학회지, Vol. 17, No. 4, (1997)
- 4) Zetec Inc. USA, MIZ-30 Operation Manual, (1994)

RCCA End-Tip Examination by ECT

H. J. Lee, M. W. Nam and G. J. Jung

Nuclear Power Generation Research Lab., KEPRI,
Korea Electric Power Corporation, Taejon 305-380

Abstract RCCA(rod cluster control assembly) End-Tip suffers from neutron irradiation and constant vibration due to high-speed internal flow of primary coolant during plant operation. Such operating conditions cause the RCCA end-tip crackings around the circumferential weldment of the end-tip, and in some cases, the defective end-tips were completely broken loose. However, no reliable inspection techniques for end-tip crackings were developed in the past, although some techniques exist for inspecting RCCA control rod wears. Therefore, NDE group at KEPRI has developed an ECT technique for the detection and the sizing of the end-tip crackings. The technique uses a specially designed surface-riding probe that can detect size of circumferential crackings with an accuracy of $\pm 5.31\%$ RMS error. This paper describes the ECT instrumentation including the ECT probes, calibration bars, as well as technical approaches.