

원형튜브 단면형상검사용 와전류탐촉자 개발

이희종, 남민우, 이진황
 전력연구원 재료부식연구소 비파괴평가그룹

요 약 발전 설비중 열교환기 튜브와 같이 단면 형상이 원형인 부품의 원주 방향으로 마모, 침식 등에 의해 발생할 수 있는 단면 형상 변화를 검사(profilometry)하기 위한 와전류 탐촉자를 임피던스 등가회로이론을 적용하여 개발하였다. 본 연구에서는 외경 9.68mm, 벽두께 0.47mm인 SS304 튜브 외부에 발생할 수 있는 마모, denting 등의 결함을 모의한 시편을 제작하여 실험을 통해 검출 감도와 S/N비가 최적인 탐촉자의 코일 치수, 전기적 특성, 적용 시험 주파수 등을 설정하였다. 이 결과에 따라 단면 형상 검사용 8×1 다중표면 탐촉자를 설계·제작하여 모의시편의 각 결함별 마모율을 검사한 결과 튜브 외부 발생 단면 형상 변화를 튜브 외경의 ±0.2% (0.022mm) 측정 오차 범위로 측정이 가능함을 확인하였다.

1. 서 론

와전류검사법은 대상 시험체에 와전류를 유도하여 와전류와 재질 사이의 상호 작용(즉 시험체에 결함이 존재할 경우 결함에 의해 와전류 흐름이 방해를 받게 되어 발생하는 자장이 변하게 되고, 이에 따라 코일의 임피던스가 변하게 된다)을 관찰하여 시험체의 상태를 분석하는 비파괴검사기술로서 시험체에 탐촉자를 직접 접촉할 필요가 없기 때문에 원격고속자동검사가 가능하다. 특히 원전 1차계통 기기는 방사선으로 오염되어 비파괴검사자의 접근이 제한되므로 방사선 피폭으로부터 검사자를 보호하기 위해 원격검사가 가능한 와전류탐상법이 널리 적용되고 있다. 검사를 위한 공간과 검사자 접근이 제한된 원자로 상부 용기 관통관 용접 열영향부, 원자로 용기 내부 피복재-모재 경계부, 원자로 제어봉 피복관 마모 단면 형상 등을 검사하기 위해서는 크기가 아주 작은(외경 약 4mm, 두께 약 2mm) 특수 표면 탐촉자(surface probe)개발이 필수적

이다. 와전류 탐촉자는 검사 계통의 핵심적인 부분으로 특정 절차서에 따라 평가가 이루어질 때 대상 시험체의 합부를 결정하는 자료를 제공하게 된다. 또한, 수집된 와전류 신호의 품질은 사용되는 탐촉자의 S/N비, 기하학적 형태, 운전 주파수에 따라 결정되어 검사 결과에 미치는 영향이 크기 때문에 와전류검사 탐촉자의 선정은 특히 중요하다.

본 연구에서는 마모로 인해 원형 튜브 외부에 발생하는 단면 형상 변화를 검사하는데 사용되는 profilometry 탐촉자를 설계하기 위한 최적의 조건을 확립하였다. 즉 코일 특성 실험을 통해 여러가지 코일 직경과 형태에 따른 최적 검출 주파수와 체적성 결함에 가장 감도가 우수한 탐촉자를 설계하여 검사 정확도를 확인하였다.

2. 이 론

Lift-off효과를 이용한 브리지형 와전류단면검사 탐촉자는 Fig. 1과 같은 휘스톤브리지회로로 구성되

어 있다. 탐촉자 원주 방향으로 8개의 표면 코일을 배치하여 시험체와 탐촉자간의 lift-off에 의한 코일 임피던스 변화를 측정하여 원주형 튜브 외면에 발생한 단면 변화를 검사한다. 탐촉자 코일이 공기중에 있는 상태에서는 회로가 평형 상태를 이루고 있다(A, C점 사이의 전위차가 없음, $V=0$) 코일에 튜브를 접근시키면 임피던스 Z 가 변하게 되어 평형이 깨져 A, C점사이에 전류가 흐르게 된다. 즉, 회로가 평형 상태에서는 $I_1Z_1=I_2Z_2$, $I_1Z_3=I_2Z_4$ 의 조건이 형성되어 다음식이 얻어진다.

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \dots\dots\dots (1)$$

식 (1)에서 인접한 한쌍의 팔의 임피던스비는 평형되어야 할 다른 인접한 팔의 임피던스비와 같아야 되고 이때 브리지회로는 평형이 이루어진다.

만약 $\frac{Z_1}{Z_2} > \frac{Z_3}{Z_4}$ 이면 "C" 점의 전위는 "A" 점의 전위보다 높다. 이것은 Z_1, Z_2, Z_3 가 일정하고 Z_4 가 증가할 경우 (즉, 코일이 결함을 통과할 때) 브리지회로의 불평형량은 증가하게 되고 반대로 Z_2 가 증가하면 불평형량은 감소한다. 이와같은 불평형 브리지회로의 특성을 이용하여 탐촉자가 국부결함을 통과할때 변화하는 코일의 임피던스를 측정하고, 이를 와전류신호로 나타낸다. 또한, 검사 코일이 고주파수(100kHz 이상)에서 사용되거나 긴 탐촉자 cable을 사용해야 하는 원격검사에는 검사코일과 cable간의 공명(resonance)을 고려해야 하는데 일반적으로 공명주파수에서 최대의 진

폭이 얻어지고 위상각이 180° 반전된다. 공명은 아래 식에서와 같이 코일의 유도성 리액턴스(inductive reactance)가 케이블의 용량성 리액턴스와 동일하게 될 때 발생한다⁵⁾.

즉, $\omega L = 1/\omega C$,의 관계가 성립한다.

$\omega = 2\pi f$ (angular frequency, radian/second), L: 코일 인덕턴스, Henries, C: 케이블 총 capacitance, Farads, f: 주파수, Hertz 윗식에서 탐촉자-케이블 공명 주파수는

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{가 된다.} \dots\dots\dots (2)$$

탐촉자 성능은 공명점 이상에서는 용량성 리액턴스가 감소하여 더욱 악화되고 전류는 코일보다 케이블을 더 흐르게 된다. 따라서, 탐촉자 공명주파수를 높게 유지하여 유도성결합이 넓은 주파수범위에서 이루어지도록 하는 것이 바람직하다⁵⁾.

3. 실험

3.1. 실험 장치 구성

탐촉자 코일의 주파수 반응을 평가하기 위해서 주파수대역 100Hz~40MHz까지 스위프가 가능한 HP4194A 임피던스 분석기를 이용하였고 Fig. 3에서와 같이 HPIB interface와 HP-Vee data acquisition program을 이용하여 측정된 데이터를 PC로 전송하고 분석 프로그램을 사용하여 분석하였다. 설계·제작된 단면형상 검사용 8×1 다중표면탐촉자에 주파수를 발생시키는 주파수 발생장치로는 64채널 용량으로 주파수 대역이

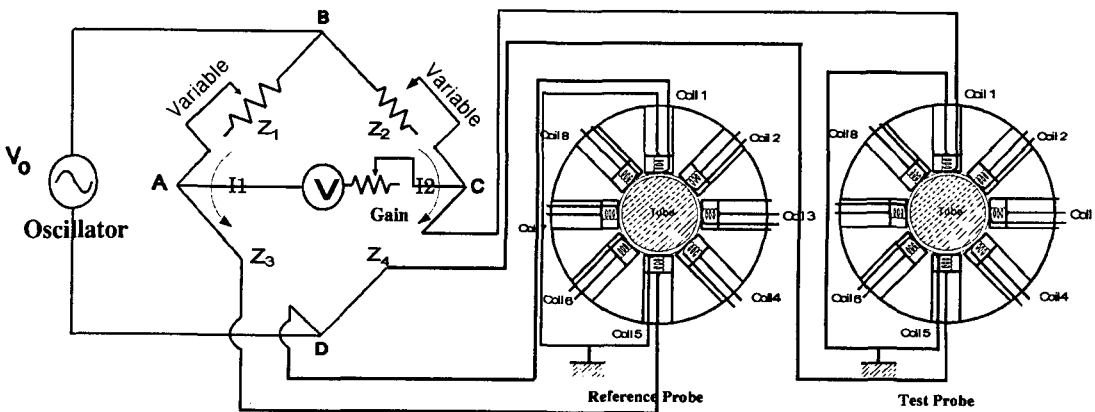


Fig. 1. 8×1 Profilometry probe bridge circuit

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(kΩ)	공명주파수 in aired with/without cable (kHz)	비고	
				Air-cored	Ferrite-cored				
Air cored	#1	237	4/1.3	2	71	-	3.63	397/751	
	#2	222	3.9/1.3	2.1	63	-	3.08	414/814	
	#3	193	3.9/1.3	2.1	42	-	1.89	507/904	
	#4	154	3.7/1.3	2.1	34	-	1.65	556/1041	
Ferrite cored	#5	120	4.1/1.6	2	26	88	10	391/6916	* Ferrite core dia. 1.6mm
	#6	105	4.0/1.6	2.1	20	77	9.2	451/7475	
	#7	95	3.8/1.6	2.1	15	64	8.1	512/8667	
	#8	90	3.6/1.6	2.1	13.9	56	7.9	517/8740	

10kHz~1MHz인 미국 Zetec사의 Miz-30을, 신호수집 및 분석장치로는 Zetec사의 Eddydynet 프로그램을 사용하여 Fig. 4과 같은 검사 시스템을 구성하였다.

3.2. 탐촉자 코일 설계 및 제작

탐촉자 코일의 주파수 특성을 고려하여 두께, 길이, 권선수 등을 각각 다르게 하여 Table 1의 8개 코일을 제작하였다. 단면형상검사용 탐촉자는 탐촉자 몸체 내부 원주방향(내경 10.20mm)으로 8개 표면코일을 배치해야 되기 때문에 8개 코일의 외경 크기가 제한될 수밖에 없다.

따라서, 제한된 코일 크기에서 가능한 한 큰 인덕턴스를 발생²⁾시키기 위해 미국 Pyroferic사의 철심 코아(ferrite core)를 코일내부에 삽입하였고 fill-factor 90%를 적용하여 탐촉자 내경을 설계하였다. 시험코일은 철심을 삽입하지 않은 4개와 삽입한 4개를 제작하여 특성을 비교하였다. 탐촉자 케이블은 원격검사에 필요한 길이로 약 22.5m의 RG 174 동축 케이블(C 값 : 101pF/m)을 사용하였다.

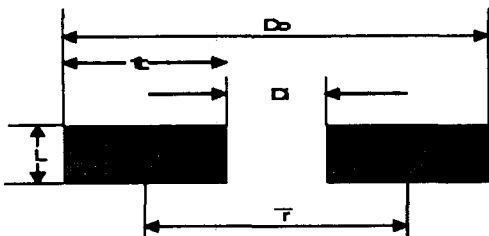


Fig. 2. Multilayer coil

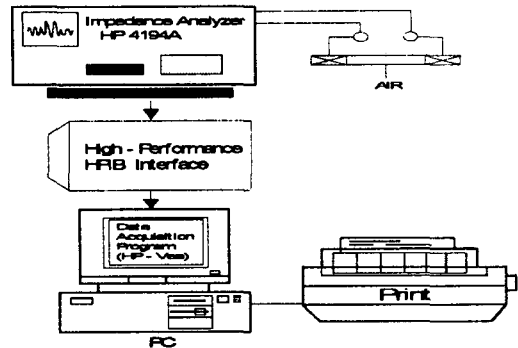


Fig. 3. Coil impedance measurement sys.

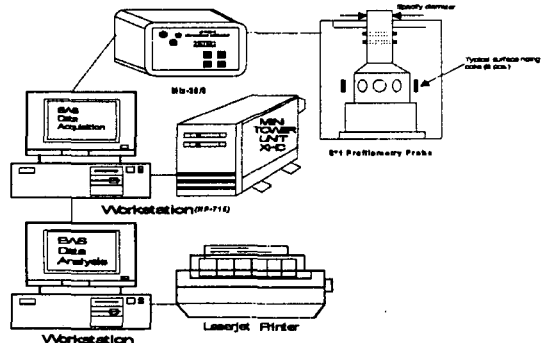


Fig. 4. Eddy curent testing sys.

시험 주파수는 $t/\delta = 0.8$ 로 가정하여 비자성체일때의 와전류 표준 침투 깊이 계산식 (3)을 이용하여 구하였다.

$$f = 1.6 \rho/t^2 \text{ kHz} \dots\dots\dots (3)$$

여기서, δ : 침투깊이(mm), t : 시험체 두께(mm), ρ : 전
기 저항치($\mu\Omega \cdot \text{cm}$), f : 주파수(kHz)

윗식에 제어봉 피복관 SS304의 벽두께 $t=0.47\text{mm}$,
 $\rho=72\mu\Omega \cdot \text{cm}$ 을 대입하여 probe 연장 cable이 연결
되지 않은 상태에서의 시험주파수 f 를 구하면

$$f = (1.6 \times 72) / (0.47)^2 = 522 \text{ kHz가 된다.}$$

탐촉자에 연장 cable을 연결하여 사용할 때 공명주
파수는 balancing을 고려하여 보통 시험주파수의 약
0.8배가 되도록⁵⁾ probe를 설계하므로 공명주파수는 다
음과 같이 선정하였다.

$$\text{fres.} = 0.8 \text{ Test fr} = 0.8 \times 522 = 418\text{kHz}$$

이론 공명주파수(418kHz) 및 근처 주파수 3개와 케
이블 C값을 식 (2)에서 대입하여 각 주파수에서의 L값
을 구한 다음 이에 상응한 코일 내의 반경, 두께 및 권
선수를 정하였다. L값은 Table. 1과 같은 코일의 경우
Self Inductance는 아래 식으로 나타내진다.⁶⁾

$$L = \frac{0.8 (rN)^2}{6r+9\ell + 10b} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, L = self-inductance in microhenries(μH)
N = total number of turns
r = mean radius in inches
b = coil depth or thickness in inches
 ℓ = length of coil

윗식에 L, r, b, ℓ 값을 대입하여 탐촉자 코일의 권
선수(N)를 계산하였다.

3.3 교정 standard 및 시험편 제작

교정 standard 및 시험편은 검사 대상체 튜브와 동일한
재질인 외경 9.68mm, 벽두께 0.47mm의 SS304 튜브를 사
용하여 Fig. 5와 같이 튜브 외부에 마모율(%)을 각각 다르
게 하여 그루브형태의 체적성결함을 선삭가공하였다.

Table 2. Standard & test specimen dimension

교정 Standard(6 groove)			Test specimen(7 groove)		
Flaw No.	Length (mm)	Wall thinning(%)	Flaw No.	Length (mm)	Wall thinning(%)
1	10	15	1	10	19
2	10	20	2	10	24.7
3	10	25	3	10	30
4	10	35	4	10	40.8
5	10	60	5	10	46.2
6	10	70	6	10	51.6
-	-	-	7	10	62

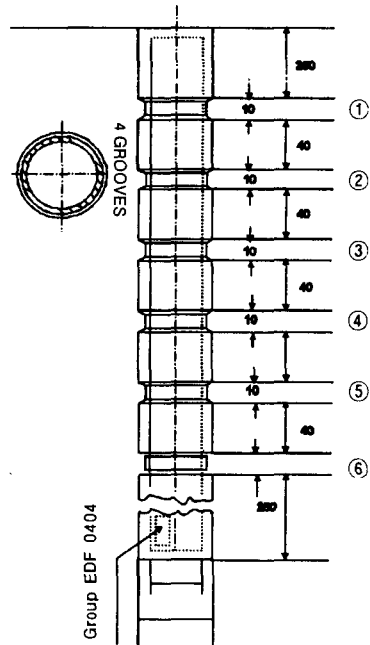


Fig. 5. Calibration standard & test specimen

3.4 탐촉자 주파수 반응 실험

탐촉자 코일의 주파수 반응을 평가하기 위해서 3가지
방법을 사용하여 코일직경과 형상변화에 따른 코일의 특
성을 분석하였다. 첫 번째는 임피던스 측정기를 사용하
여 코일에 케이블이 부착된 상태와 부착되지 않은 상태
에서 20kHz~1MHz 주파수 범위내에서 8개 각 코일의
임피던스 $|Z|$, 위상각 θ , Rc, Xc와 공명주파수를 측정
하여 프로팅하였다. 코일의 상대적 특성평가를 위해 측
정된 신호 진폭을 정규화(normalization)하여 임피던스
비를 비교하였으며 또한 각 코일에 대한 각 마모율의 정
규화 임피던스 선도를 작성하였다. 또한 코일과 시험편
간의 lift-off변화에 의한 오차를 최소화하기 위해 코일
과 시험편을 고정시키기 위한 검사대를 제작하여 사용하
였다. 두번째는 코일의 성능을 평가하기 위해 100~
800kHz 주파수 범위내에서 시험편 각 결함(19, 24.7, 30,
40.6, 46.2, 51.6, 62% 벽두께 감속 그루브)에 대한 코일의
S/N비를 계산하였다. 코일의 S/N비 특성을 비교하기 위
해 100~800kHz 주파수 범위내에서 시험편 각 결함으로
부터 측정된 임피던스값을 5mils 덴트신호로 정규화하
여 코일의 S/N비를 구하였다. 최고 S/N비를 나타내는
주파수를 탐촉자 운전주파수로 선정하여 체적성결함 검
출에 최고 감도를 나타내는 탐촉자 형태를 결정하였다.

세번제방법으로 체적성결함(마모)에 대한 코일의 감도 (sensitivity)를 평가하기 위해서 Miz-30m 디지털 와전류 시험기를 사용하여 각 코일에 대한 각 결함의 신호진폭(volts)을 측정하여 정규화 비교하였다.

3.5 검사 정확도 측정

위의 실험 결과에 따라 8종류의 8×1 단면형상검사 탐촉자를 제작하였으며 각 탐촉자의 검사 정확도를 평가하기 위해 Miz-30 와전류검사 시스템과 Eddyntet program(Fig. 6)을 이용하여 각 결함(7개 그루브)의 평균 단면 직경을 측정하였다. 각 주파수별로 3회씩 단면을 측정하여 평균값을 적용하였고 이 결과에 따라 8개 탐촉자의 검사 정확도를 평가하였다.

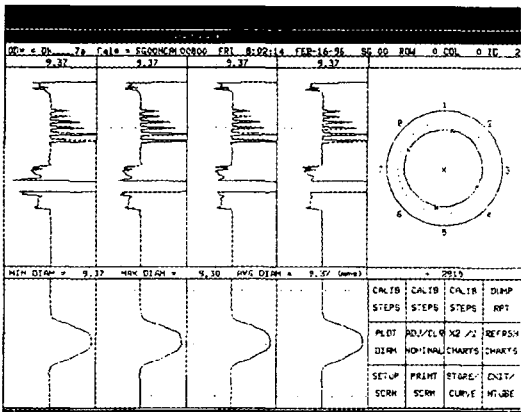


Fig. 6. Eddyntet profilometry display

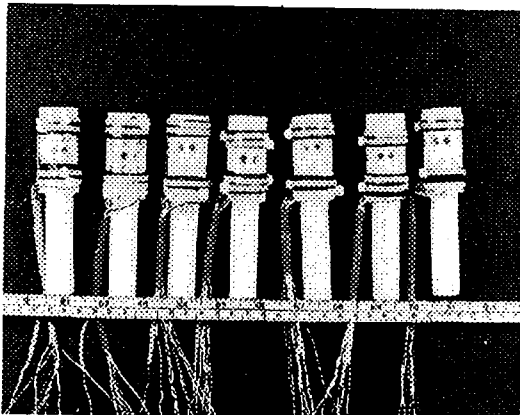
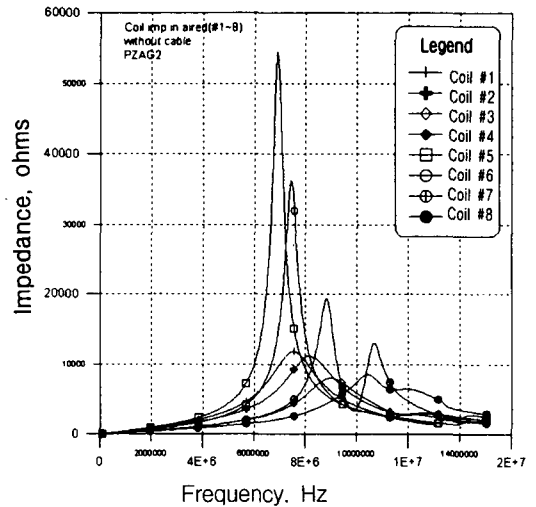


Fig. 7. Profilometry inspection probe

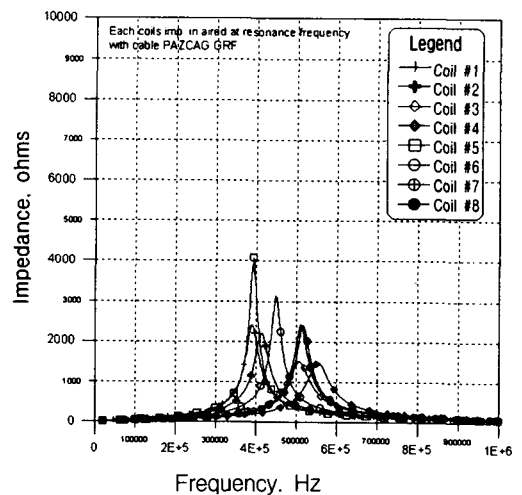
4. 실험 결과 및 고찰

4.1 코일 감도 및 S/N비 평가

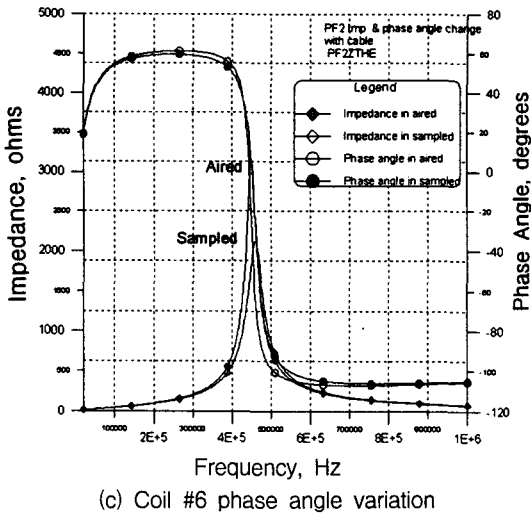
결함 검출을 위한 최적 신호 반응을 나타내는 탐촉자 여기주파수는 탐촉자 공명주파수와 밀접한 관계가 있었다. 탐촉자 공명주파수는 Fig. 8 (c)에서와 같이 코일 임피던스가 최고이고 위상각이 180° 반전하는 현상으로부터 확인하였으며 임피던스 변화는 공명점에서 최고로 발생하였다. 결함 검출을 위한 최적 신호 반응도 동일하게 탐촉자 공명점 부근에서 얻어졌다. 본 실험에 사용된 SS304 튜브의 최적 운전주파수는



(a) Without extension cable

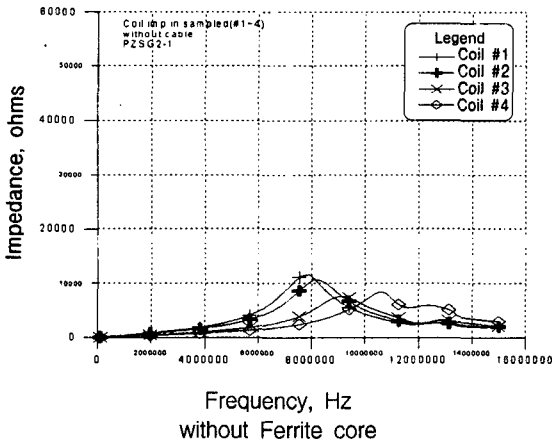


(b) with extension cable

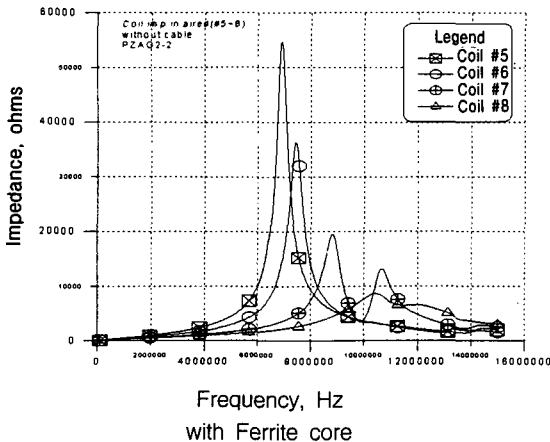


(c) Coil #6 phase angle variation

Fig. 8. Resonance frequency variation of each coils



without Ferrite core



with Ferrite core

Fig. 9. Signal amplitude comparison of coils without/with ferrite core

Fig. 8(a,c)에서와 같이 코일 형태에 상관없이 공명주파수 범위와 동일한 약 400~550kHz 정도에서 형성되었으며 확장 케이블을 추가하면 공명주파수가 감소하였다. 22.5m 확장 케이블을 추가할 경우 전체적으로 신호의 진폭이 감소하였다. 케이블 추가에 따른 신호 감소 현상은 새로 형성된 공명주파수 500kHz 이상에서 특히 현저하였다. 코일 내부에 ferrite core를 삽입한 코일의 신호진폭은 Fig. 9에서와 같이 철심을 삽입하지 않은 것보다 약 3~5배 정도 증대되었으며, 또한 코일 S/N비와 결함 측정 정확도도 전체적으로 개선되었으며 ferrite core를 삽입한 4개 코일중 #5 코일의 진폭이 가장 크게 나타났다. 체적성결함(마모)에 대한 코일의 감도(sensitivity)는 Fig. 10에서와 같이 각 코일의 결함별 정규화된 신호진폭을 비교한 결과 코일 #6의 각 결함에 대한 감도가 가장 우수한 것으로 평가되었다. 결함과 잡음신호와의 분리도를 나타내는 S/N비는 모든 결함에 대해 코일 #6이 가장 우수하게 나타났다. 코일 내부에 철심을 삽입한 코일(코일 #5, 6, 7, 8)의 S/N비는 Fig. 11에서와 같이 철심을 삽입하지 않은 것(코일 #1, 2, 3, 4)보다 최고 약 20%정도 증가하였으며 S/N비는 모든 결함에 대해 코일 #6이 가장 우수하게 평가되었다.

각 결함 신호를 5mils 텐팅 임피던스로 정규화시킨 각 코일의 S/N비가 Fig. 11에 나타나 있고 최대 S/N비는 주파수 400~500 kHz 사이에서 얻어져 이론식에서 얻어진 주파수와 거의 일치하였다.

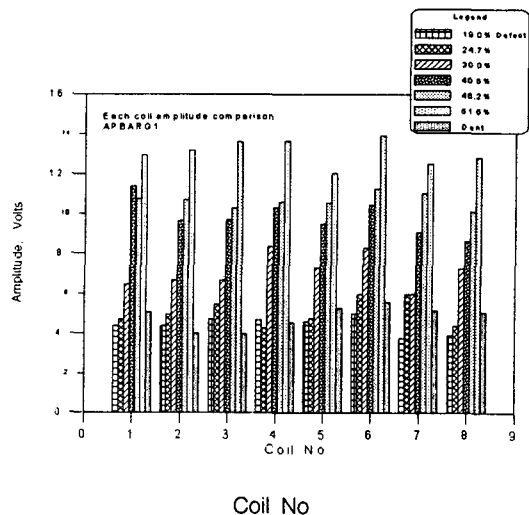


Fig. 10. Signal amplitude comparison of various coils

Signal average amplitude(volts)							
Coil #1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
7.959	7.649	7.770	8.066	7.713	8.631	7.623	7.451

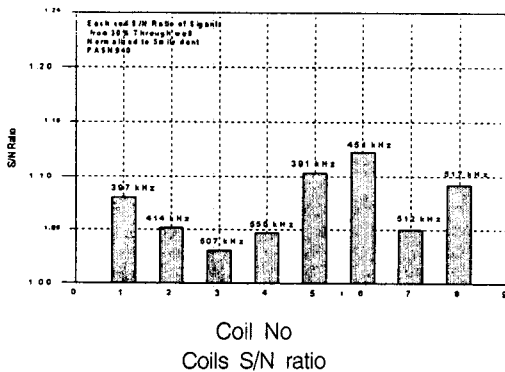
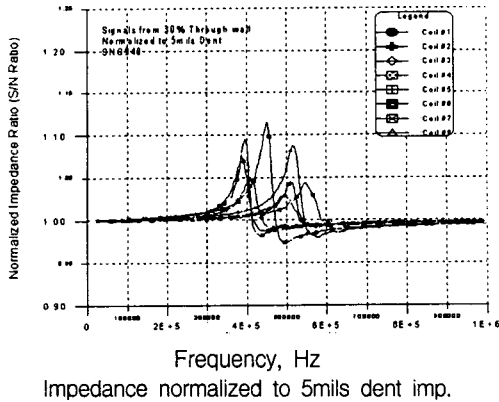


Fig. 11. Coils S/N ratio comparison of 30% wall through groove

4.2 탐촉자 검사 정확도 평가

Table 3. Probes defect estimation accuracy at 300, 400kHz

Coil No.	RMS Error(mm)	
	300 KHz	400 KHz
1	0.0572	0.0353
2	0.0355	0.0280
3	0.0631	0.0433
4	0.0458	0.0387
5	0.0405	0.0484
6	0.0431	0.0217
7	0.0338	0.0391
8	0.0348	0.0449
측정 평균오차(mm)	0.3135	0.2655

8개 각 탐촉자의 검사 정확도는 Table 3에서와 같이 코일 #6으로 제작한 탐촉자가 가장 우수한 것으로 평가 되었으며 감속도가 작은 결합의 검사정확도도 마찬가지로 코일 #6으로 제작한 탐촉자가 가장 우수하였다. 각 탐촉자의 정확도는 운전주파수가 300kHz 보다 400kHz에서 더 우수하여 시험주파수는 400kHz로 선정하였다.

5. 결론

기하학적 형상이 다른 여러 가지 코일들의 주파수반응을 분석하므로써 코일의 특성 평가에 따른 profilometry 탐촉자 코일의 설계가 가능하였다. 실험에 의해 결합 검출시 최적 신호 반응을 나타내는 공명주파수를 선정하였고 체적성결함 검출에 대한 각 코일의 감도를 평가하여 가장 우수한 감도를 나타내는 탐촉자 설계 조건을 아래와 같이 확립하였으며, 이 코일로 제작한 8×1 profilometry probe를 사용한 결과 튜브 외부 원주방향에 발생한 단면형상변화를 튜브 외경의 ±0.2% (0.022mm) 이내의 측정 오차로 측정할 수 있어 튜브 단면 변화 측정을 위한 매우 효과적인 비파괴검사 방법임을 확인하였다.

첫째, 외경 9.68mm, 벽두께 0.47mm인 SS304 튜브 외부에 발생하는 체적성결함 검출을 위한 최적 시험주파수는 탐촉자 확장 케이블을 추가하였을 때 탐촉자 공명점 근처인 약 400kHz로 코일 임피던스 (신호 진폭) 및 탐촉자 공명주파수가 낮아졌다. 탐촉자 확장 케이블의 길이는 가능한 한 짧게 하는 것이 유리하다.

둘째, 코일 중심에 ferrite core를 삽입할 경우 임피던스 및 감도는 삽입하지 않을 때 보다 약 4배 증가되었고, S/N비는 약 20% 증가하게 되어 코일 크기가 제한될 경우 인덕턴스를 증가하기 위한 효과적인 방법이다.

셋째, 체적성결함 검출에 가장 우수한 성능을 나타내는 탐촉자 코일의 전기적 특성은 와이어 권선수 (turn)가 약 105turns인 코일로서 인덕턴스가 약 77 μH이다.

참 고 문 헌

- 1) Hugo L. Libby, "Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods", Nov. (1970)
- 2) ASNT, Nondestructive Testing Handbook (Electromagnetic Testing), Vol. 4(1986), pp.56~88
- 3) Jack Blitz, "Electriccal and magnetic Methods of Nondestructive Testing" (1991)
- 4) Zetec Inc. USA, MIZ-30 Operation Manual (1994).
- 5) Chalk River Nuclear Laboratories, Eddycurrent Manual (1981)
- 6) A. L. Lucero, Eddy current method (1983), pp.17.
- 7) 이세경 외, "와전류탐상탐촉자 개발" KSRI-86-16-IR", 한국표준연구소 (1986)

Development of Eddy Current Test Probe for Profilometry Inspection of Tube

H. J. Lee, M. W. Nam and C. H. Lee

Nondestructive Evaluation Group, Materials & Corrosion Research Lab.
Korea Electric Power Research Institute, Taejon 305-380

Abstract An eddy current probe (8×1 multiple-element, surface scan) was successfully designed and fabricated at the KEPRI using the impedance equivalent circuit theory. The probe is intended for the detection of circumferential deformations (cross-section view) of the heat exchanger tubing that can occur due to corrosion, erosion, and denting. Optimum design parameters providing the highest sensitivity and signal-to-noise ratio, such as the coil dimensions, electrical characteristics, and test frequencies, were determined based on initial laboratory experiments conducted on the test specimen (SS304 tubing: OD: 9.68mm, wall-thickness: 0.47mm) containing artificial flaws (e.g., dents and corroded surface on tube OD) using the available Zetec-made probe. Using this parameters, a new probe was made and tested on an unknown specimen. The result indicated that the new probe is capable of detecting the circumferential deformation with the error of ±0.2% (0.022mm) of the tube O.D.