

## 論文

### Stainless 鋼 傳熱管에 있어서 渦電流 信號強度와 缺陷크기와의 關係에 관한 研究

\* 韓 應 教      \*\* 嚴 浩 燮      \*\* 朴 翼 根      \*\*\* 崔 明 植

1987년 3월 3일 접수

(A study on the Relationship between the  
Size of Defect and the Intensity of Eddy  
Current Signal in Heat Exchanging  
Tube made of STS 304.)

E. K. Han,      H. S. Eom,      I. G. Park,      M. S. Choi

### ABSTRACT

Eddy Current Examination is expected as the effective technique for nondestructive inspection of steam generator and various kinds of heat exchanging tubes made of STS - 304.

In Case of E. C. T, a study on the various factors which have an effect on coil impedance is very important to the sensitivity of defect detection and the ratio of signal to noise.

Therefore, this study analyzed coil impedance by means of the variational principle, the minimized theory of energy functional and the application of Finite Element Method.

Really by using E. C. T, the relationship between the size of defects and the intensity of Eddy Current Signals can be obtained.

Signal intensity becomes maximum at certain frequency.

This frequency is affected by the characteristics and the position of signal sources.

---

\* 漢陽大學校 精密機械工學科 教授

\*\* 漢陽大學校 大學院 精密機械工學科

\*\*\* 韓國 에너지 研究所

## NOMENCLATURE

$A_l, A_m, A_n$	: Vector potential in Triangular element node (l, m, n) [wb/m]
$A_{ct}$	: Vector potential in the ith Triangular element.
B	: Flux density (wb/m <sup>2</sup> )
E	: Intensity of Eddy Current Signal (volt)
F	: Energy Functional
H	: Intensity of Magnetic field (N/wb)
J	: External forcing Current density (Amp/m <sup>2</sup> )
$J_i$	: Induced Current density. (Amp/m <sup>2</sup> )
$N_p$	: Shape function
$N_s$	: Uniform turn density (turn/m <sup>2</sup> )
T	: Thickness of Test piece
$Z_i$	: Impedance of a Filamentary Circular loop of Radius $r_{ct}$
$Z_p$	: Probe Coil Impedance
$\sigma$	: Conductivity (mho/m)
$\mu$	: Permeability (Henry/m)
$\delta$	: Standard depth of penetration (mm)
$\theta$	: Phase angle (Degree)
$\Delta$	: Area of Triangular element.

### 1. 序 論

最近 原子力發電所의 蒸氣發生器 各種 熱交換配管은 1차 壓力 境界面積의 50% 이상을 점유하는 重要 部位로서 傳熱管의 健全性 維持는 原子力發電所의 安全性을 確保하는데 매우 艱요하다.

Austenite Stainless 鋼을 많이 使用하는 蒸

氣發生器 傳熱管의 缺陷식별, 크기 등을 판단하는데 渦電流探像 (Eddy Current Test, 이하 ECT)<sup>1) 4)</sup>이 널리 利用된다.

ECT는 交流가 흐르는 檢査 Coil을 導體에 접근시켜서 電磁誘導現象으로 渦電流를 發生시켰을때 渦電流의 흐름은 導體의 物理的 特性에 따라 變化하고 이 變化는 Coil Impedance를 變化시키므로 Coil Impedance의 變化를 測定하여 試驗體의 物理的 特性을 檢査하는 方法이다.

Coil Impedance를 解析하는 方法에는 Green Function 等에 의한 微分方程式이나 Rayleigh-Ritz Method 等에 의한 解析的 方法과 有限要素法 (F. E. M) 等에 의한 數值解析法이 있는데 여기서는 軸對稱 圓筒坐標系에 있어서 有限要素法<sup>9) 10)</sup>에 의한 磁界領域을 三角形要素로 分割하고 各 三角形要素에 對한 全体 Matrix 方程式으로 부터 Vector Potential을 구하고 Coil Impedance를 해석하였다.

1964年 Libby<sup>1) 2)</sup>는 缺陷信號의 位相角을 測定하여 缺陷의 깊이를 評價하는 位相分析法 (phase Analysis Method)에 對한 理論을 제시하였으며 이에 對한 많은 研究가 이루어져 왔다.

本 研究에서 缺陷信號의 信號強度는 缺陷의 부피에 對한 의존하는 것으로 알려져 있을 뿐 缺陷信號의 평가기준이 없어 실제 ECT장비를 가지고 各種 缺陷形態에 對한 信號強度와 位相角과의 相互關係를 實驗을 통해 考察하였다.

### 2. 理論解析

#### 2-1 에너지 汎函數

(Energy Functional)

電磁界의 Maxwell 方程式은

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times H = J + J_s, \dots\dots\dots (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$J_s = \sigma E$$

로 표현되며 또한, 磁束密度  $B$ , 磁氣 Vector Potential  $A$ , 磁界의 세기  $H$ 의 상호관계는

$$\begin{aligned} B &= \mu H \\ B &= \nabla \times A \end{aligned} \dots\dots\dots (2)$$

이다. 式(2)의 透磁率  $\mu$ 를 線型이라는 가정하에 式(2)를 式(1)에 代入하여 정리하면 정상상태에서

$$\nabla^2 A = -\mu J + j\omega\sigma\mu A \dots\dots\dots (3)$$

인 Poisson 方程式이 된다. 따라서 電磁界 문제에 있어서의 解는 式(3)을 만족하는 Vector Potential  $A$ 를 구하는 것으로 요약된다.

일반적으로 電磁界에 적용되는 에너지 汎函數

$$F = \int_R \left\{ \frac{1}{2\mu} (\nabla \times A) \cdot (\nabla \times A) + j \frac{\omega}{2} A^2 - j \cdot A \right\} dR \dots\dots\dots (4)$$

로 표시되며 축대칭 원통좌표계에서 에너지 汎函數

$$F = \int_R \left\{ \frac{1}{2\mu} \left[ \left( \frac{\partial A}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial A}{\partial r} \right)^2 + \frac{2}{r} A \frac{\partial A}{\partial r} + \frac{A}{r^2} \right] + j \frac{\omega}{2\rho} A^2 - J \cdot A \right\} r dr dz \dots\dots\dots (5)$$

로 된다 式(5)에서  $\frac{1}{\mu} = \nu(b, r, z)$ 의 磁氣抵抗率은 위치와 자속밀도의 함수이며 磁束密度는 비선형으로서  $B = B(\nu, r, z)$ 인 함수가 되므로 한개의 偏角成分 ( $\theta$  方向)에 대한 반경  $r$ 인 해석 영역  $R$ 에서 式(5)의 에너지 汎函數는

$$F = \int_R \left( \int_0^b \nu db \right) r dr dz + j \frac{\omega}{2\rho} \int_R A^2 r dr dz - \int_R J \cdot A r dr dz \dots\dots\dots (6)$$

로되며 式(6)의 에너지 汎函數가 極值를 갖기

위한  $A$ 의 값은

$$\Sigma \frac{\partial F}{\partial A} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

의 조건을 만족하는  $A$ 의 값이 된다.

### 2-2 解析函數의 近似化

有限要素法은  $n$ 개의 節點(node)으로 연결되어 있는 유한개의 要素(element)로 해석 영역을 세분화하여 관계영역의 근사해를 구하는 것이다.

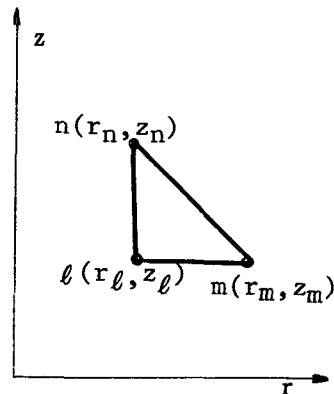
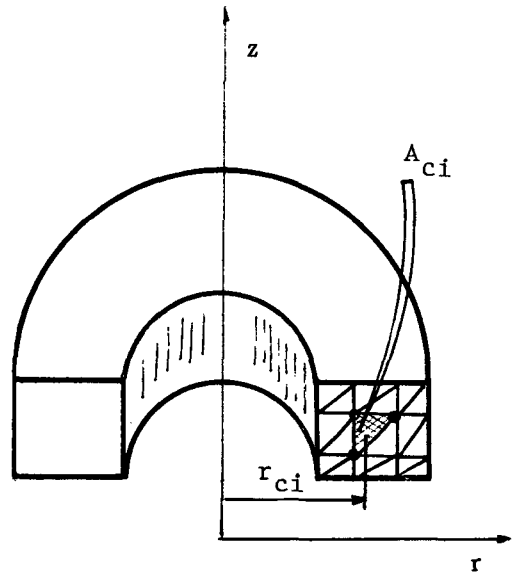


Fig. 1 Triangular element

그림 (1)에서 삼각형요소의 각정점에서 Vector Potential 에 대한 에너지는 式 (6)으로부터

$$W = W_1 + W_2 + W_3, \dots\dots\dots(8)$$

$$W_1 = \int_r \left( \int_0^B \nu b db \right) r dr dz \dots\dots\dots (9)$$

$$W_2 = \int_r \left( j \frac{\omega}{2\rho} A^2 \right) r dr dz \dots\dots\dots (10)$$

$$W_3 = \int_r (-J \cdot A) r dr dz \dots\dots\dots(11)$$

이며 전 영역에서  $\ell$  成分의 Vector Potential  $A_i$  에 대한 成分은 式(8)에서

$$\sum_r \frac{\partial W}{\partial A_i} = \sum_r \frac{\partial}{\partial A_i} (W_1 + W_2 + W_3) = 0$$

$$\sum_r \frac{\partial W}{\partial A_i} = A_i \sum_r \nu \left\{ \frac{r_c}{2\Delta} [ (Z_m - Z_n)^2 + (r_n - r_m)^2 ] + \frac{1}{3} (Z_m - Z_n) + \frac{\Delta}{18r_c} \right\}$$

$$+ A_m \sum_r \nu \left\{ \frac{r_c}{2\Delta} [ (Z_m - Z_n) (Z_n - Z_i) + (r_n - r_m) (r_i - r_n) ] + \frac{1}{6} (Z_n - Z_i) + \frac{1}{6} (Z_m - Z_n) + \frac{\Delta}{18r_c} \right\} +$$

$$A_n \sum_r \nu \left\{ \frac{r_c}{2\Delta} [ (Z_m - Z_n) (Z_i - Z_m) + (r_n - r_m) (r_m - r_i) ] + \frac{1}{6} (Z_i - Z_m) + \frac{1}{6} (Z_m - Z_n) + \frac{\Delta}{18r_c} \right\} + (j \frac{\omega}{18\rho} \sum_r \gamma_c \Delta) \cdot (A_i + A_m + A_n) - \frac{1}{6} \sum_r J \cdot r_c \Delta \dots\dots\dots(12)$$

따라서  $m, n$  에 대해서도 式(12)와 같은 방법으로 하여 全 Matrix를 구성하면

$$\nu [M] [A] + K^2 [N] [A] = [J] \dots\dots\dots (13)$$

여기서

$$M_{11} = \frac{r_c}{2\Delta} [ (Z_m - Z_n)^2 + (r_n - r_m)^2 ] + \frac{1}{3} (Z_m - Z_n) + \frac{\Delta}{18r_c}$$

( $M_{22}, M_{33}$ 는  $l, m, n$  차례로 代入)

$$M_{12} = M_{21} = \frac{r_c}{2\Delta} [ (Z_m - Z_n) (Z_n - Z_i) + (r_n - r_m) (r_i - r_n) ] + \frac{1}{6} (Z_m - Z_n) + \frac{1}{6} (Z_n - Z_i) + \frac{\Delta}{18r_c}$$

$$M_{23} = M_{32} = \frac{r_c}{2\Delta} [ (Z_i - Z_m) (Z_n - Z_i) + (r_m - Z_i) (r_i - r_m) ] + \frac{1}{6} (Z_n - Z_i) + \frac{1}{6} (Z_i - Z_m) + \frac{\Delta}{18r_c}$$

$$M_{13} = M_{31} = \frac{r_c}{2\Delta} [ (Z_m - Z_n) (Z_i - Z_m) + (r_n - r_m) (r_m - r_i) ] + \frac{1}{6} (Z_i - Z_m) + \frac{1}{6} (Z_m - Z_n) + \frac{\Delta}{18r_c}$$

$$N = \frac{\Delta r_c}{18} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}, K^2 = j \frac{\omega}{\rho} \text{이다.}$$

### 2-3 Coil Impedance 解析

式(13)로부터 반경  $r_{ci}$  되는 점의 Vector Potential  $A$  가 구해지면 Coil 전류  $I_s$ 가 흐를 때 Circular loop의 Coil Impedance

$$Z_i = - \frac{j 2\pi\omega r_{ci} A_{ci} (N_s \Delta_i)}{I_s} \dots\dots\dots (14)$$

이고 단면이  $n$  개의 삼각형 유한요소로 분할된 Total Coil Impedance  $Z_c$ 는

$$Z_c = - \frac{j 2\pi\omega N_s}{I_s} \sum_{i=1}^n r_{ci} A_{ci} \Delta_i$$

$$N_s I_s = J \text{이므로}$$

$$Z_c = - \frac{j 2\pi\omega J}{I_s^2} \sum_{i=1}^n (r_{ci} \Delta_i) A_{ci} \dots\dots\dots(15)$$

Eddy Current Coil System에서 두 Coil의 전류방향이 반대방향으로 흐르므로 Probe Coil Impedance

$$Z_p = Z_a + Z_b$$

$$Z_p = j 2 \pi \omega \left[ \frac{J_{sa}}{I_s^2 b} \sum_{i=1}^{nb} (r_{ci} \Delta_i) A_{ci} - \frac{J_{sb}}{I_s^2 a} \sum_{i=1}^{na} (r_{ci} \Delta_i) A_{ci} \right] \dots\dots\dots(16)$$

두 Coil 이 구조가 같고 같은 전류가 흐르면

$$Z_p = \frac{j 2 \pi \omega J}{I_s^2} \left[ \sum_{i=1}^{nb} (r_{ci} \Delta_i) A_{ci} - \sum_{i=1}^{na} (r_{ci} \Delta_i) A_{ci} \right] \dots\dots\dots(17) \text{ 이다.}$$

### 2-4 缺陷크기와 信號強度

신호강도 (E)는 결함이 없는 경우 전기장분포  $\varphi(r, \theta, z)$ 을 결함체적으로 적분한 量에 비례한다고 가정하면

$$E \propto \int_{D, V} \varphi(r, \theta, z) dv \dots\dots\dots(18)$$

로 표시되며 또 Sensor Coil 이 결함의 길이에 비해 충분히 길고 축대칭이면 전기장이 r 만의 함수로 되어 지수함수적으로 감소한다고 하면

$$\varphi(r) = \exp\left[-\left(\frac{R_i}{a_a} + \frac{r-R_i}{a}\right)\right] \dots\dots\dots(19)$$

$a, a_a$ 는 공기, 시험체의 전자적 감쇄정수  $R_i$ 는 관내반경과 Sensor Coil 의 반경의 차이이며 실제로 전기장은 지수함수적 분포를 하지 않기 때문에 이를 補正하기 위하여 a가 관두께t 함수로 가정하면

$a = a_{(t)}$ 로 되며 따라서 信號強度 (E)는

$$E = K \int_{D, V} \exp\left[-\left(\frac{R_i}{a_a} + \frac{r-R_i}{a_{(t)}}\right)\right] dv \dots\dots(20)$$

式(20)을 해석적적분 또는 수치적분에 의해 실측치를 이용하여  $a_a, a_{(t)}, K$  값을 구하면

$$\begin{aligned} a_a &= 1.99 \text{ mm} \\ a_{(t)} &= 1.83 (t - 1.08)^{-0.44} \text{ mm} \\ K &= \left\{ \begin{array}{l} 4.23 \dots\dots\dots E_t \\ 8.66 \dots\dots\dots S_v \\ 9.64 \dots\dots\dots P_t \end{array} \right\} \dots\dots\dots(21) \end{aligned}$$

... [volt/m<sup>2</sup>] 을 얻는다.

## 3. 實 驗

### 3-1 實驗裝置

실험장치는 원자력발전소 증기발생기 검사를 위하여 한국에너지연구소가 미국 Zetect 社로부터 도입한 MIZ-18 Digital Acquisition System 을 사용하였다.

MIZ-18 System은 Multifrequency ECT장비로서 Computer program에 의해 Data 수집 평가를 실시하여 Data를 Digital化하여 처리하므로 잡음신호가 비교적 적으며 신호진폭은 1/100 volt 단위로 측정할 수 있고 신호위상각은 Degree 단위로 측정할 수 있다.

검사 Coil은 內插型이면서 自己比較型 차동 Coil로서 Coil 외경은 0.65 inch (16.5mm)이며 Photo 1은 실험장치의 전경을 나타낸다.

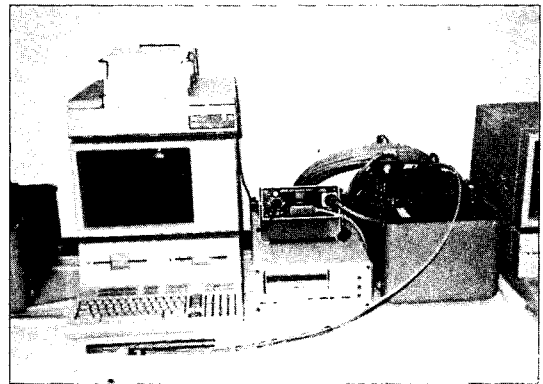
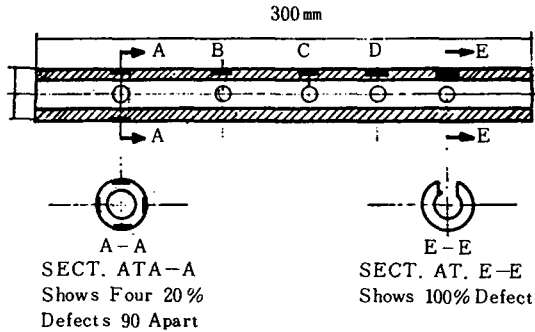


Photo. 1 Experimental Setup

### 3-2 試驗片

시험편은 ASME sec. V 1983에 따라 그림2) 3)과 같이 방전가공 (E. D. M) 과 N. C 선반으로 제작하였으며 시험편의 재질은 원자력발전소의 증기발생기 전열관에 많이 사용되는 Austenite계 STS 304로서 비자성체이며 비저항은  $72 \times 10^{-6} \Omega - \text{cm}$ 이며 관의 규격은 외경 22.2mm 두께 2.2mm이며 fill-factor  $\eta$



Location	A	B	C	D	E
Depth in %of wal	20	40	60	80	100
DIA. of Defect	0.067"	5/64"	7/64"	3/16"	3/16"

Fig. 2 Calibration Standard Test Piece

$$\eta = \frac{(\text{Coil 外徑})^2}{(\text{管內徑})} = 0.86$$

이며 표 (1)은 인공결함의 크기를 나타내며 사진 (2)는 실험용 시험편 전경이다.

Table 1. Size of Artificial Defect

Size of Defect Kinds of Defect	Depth in % of Wall	Unit: mm	
		L (Length)	b (Width)
Defect of Ring Type ( $P_r$ )	50	Four Flat-bottomed Drill Hole Radius $r=0.8, 1.0, 1.2, 1.8$	
Defect of Notch Type ( $S_v$ )	20	$L=10, b=1$	
	50	$L=5, 10, 15$	$b=0.5, 1.0, 1.5$
	80	$L=10$	$b=1$
Defect of Decreasing Thickness ( $E_t$ )	20	$L=20$	
	50	$L=5, 10, 15, 20$	
	80	$L=15$	
Defect of Groove ( $E_g$ )	30	$b=3.2$	
	50	$b=3.2$	
	80	$b=3.2$	

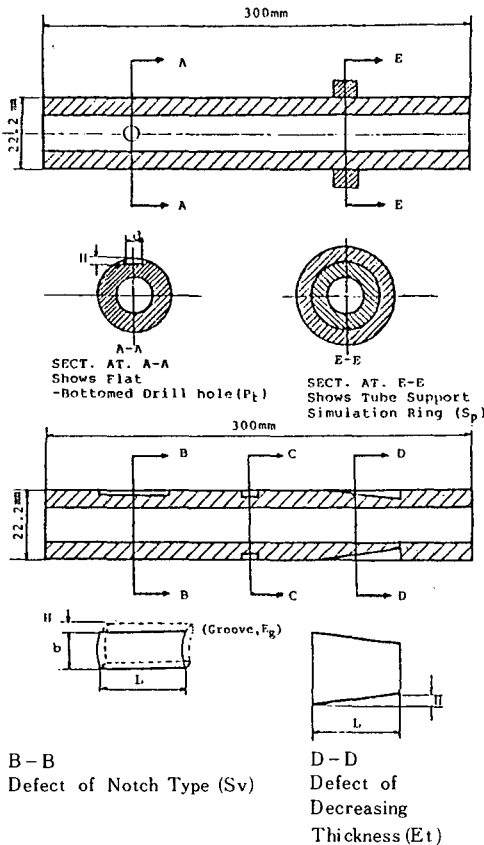


Fig. 3 Test Pieces for Experiment

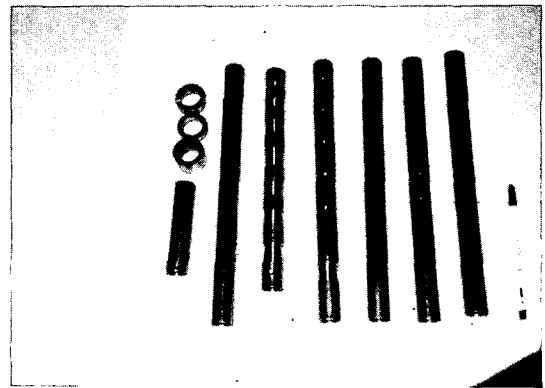


Photo 2. A View of Test Pieces for Experiment

#### 4. 실험방법

실험은 ASME Section XI. Inservice Inspection, Appendix IV, "Eddy Current Test Method for Nonferro Magnetic Heat Exchanging Tube"의 절차에 따라 수행하였다.

ECT 장비는 그림(4)와 같은 Bridge 회로로 되어있고 측정장치의 Block Diagram은 그림(5)와 같이 구성하였으며 표준시험편으로 검사 System에 대한 Calibration을 실시하고 같은 조건하에서 실험용 시험편의 인공결함에 대한 결함 신호의 신호강도(E)와 위상각( $\theta$ )를 측정하였다. 그림(6)은 MIZ-18 system에 의한 결함신호 유형의 예로서 신호강도는 Lissajous 도형 궤적상의 peak-to-peak 값으로 구해지고 위상각은 負의 수평軸으로부터의 角으로 표시되는데 이들은 자동적으로 기록하게 된다.

시험주파수는 (시험편두께) / (표준 침투깊이) ( $T/\sigma$ )의 값에 따라서 변화시켰으며 각각의 경우에 대한  $T/\sigma$  값은 표(2)에 나타냈다.

Table. 2 Selection of Test Frequency

$T/\delta$	Frequency (KHZ)
1.0	50
1.2	70
1.4	100
1.6	130
1.8	170
2.0	200

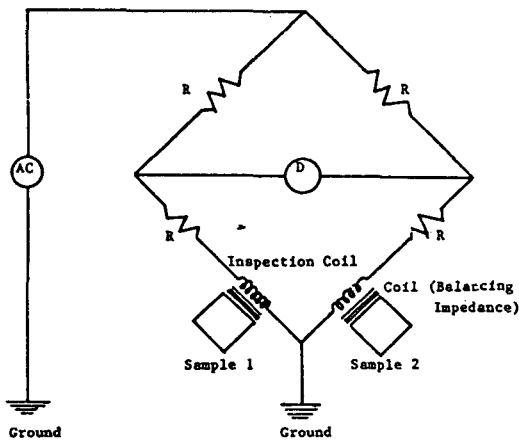


Fig. 4 Bridge Circuit of E. C. T. Equipment

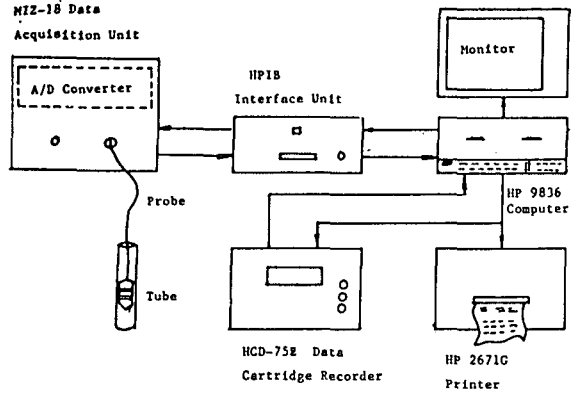


Fig. 5 Block Diagram of Experimental Setup

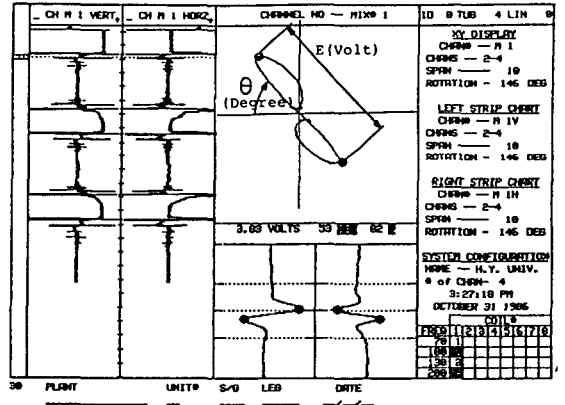


Fig. 6 Example of Defect Signal Waveform

### 5. 實驗結果 및 考察

그림(9)는 標準試驗片에 試驗周波數 (100-200 KHz)의 混合周波數를 인가시켰을때 缺陷信號 및 그 波型을 나타낸 것이고 그림(10)은 그의 Calibration Curve이다.

그림(11)은 信號強度의 實측치와 계산치의 比較를 나타내며 式(19)의 實驗式이 넓은 범위에 걸쳐서 實驗値와 일치함을 알수 있다. 그리고 ECT의 出力은 변화 가능하므로 式(20)의 K값의 절대치는 중요하지 않으나 缺陷이 面 형태 ( $E_t$ ), 線 형태 ( $S_t$ ), 點 형태 ( $P_t$ )로 바뀔때 따라 K 값이 증가함을 알수 있다.

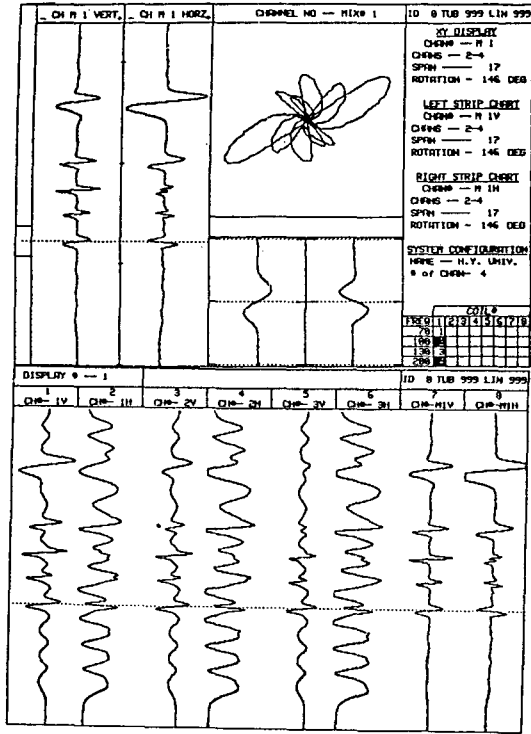
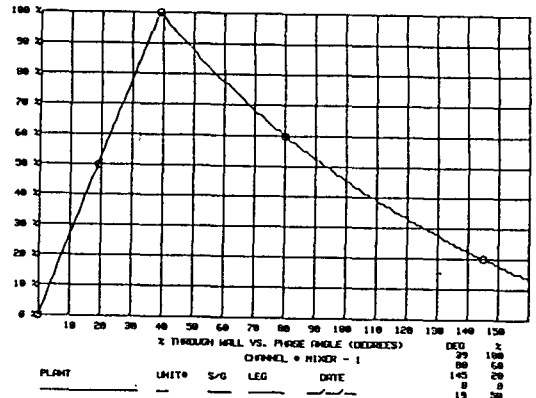


Fig 9 Defect Signal Waveforms and Strip Chart in Calibration Standard Tube

그림 (12)~(14)는 缺陷크기에 따른 信号強度와 位相角의 變化를 나타내며 缺陷길이와 깊이가 증가함에 따라서 信号強度는 증가하지만 缺陷길이 만은 어느 이상되면 포화되어 信号強度는 최대값을 갖는다.

그림 (15)는 信号源의 種類와 位置에 따라서 特定周波數에서 信号強度가 最大가 되는 周波數가 存在함을 보여 주는데 이는 試驗周波數選定이나 信号를 解析함에 있어 主要한 因자라 생각된다.



DEG-%	DEG-%	DEG-%	DEG-%	DEG-%	DEG-%	DEG-%	DEG-%	DEG-%	DEG-%								
0	0	20	53	40	99	60	77	80	60	100	45	120	33	140	22	160	13
1	3	21	55	41	98	61	77	81	59	101	45	121	32	141	22	161	13
2	5	22	58	42	96	62	76	82	58	102	44	122	32	142	21	162	12
3	8	23	60	43	95	63	75	83	58	103	43	123	31	143	21	163	12
4	11	24	63	44	94	64	74	84	57	104	43	124	31	144	20	164	12
5	13	25	65	45	93	65	73	85	56	105	42	125	30	145	20	165	11
6	16	26	68	46	92	66	72	86	55	106	41	126	30	146	20	166	11
7	19	27	70	47	91	67	71	87	55	107	41	127	29	147	19	167	10
8	21	28	73	48	90	68	70	88	54	108	40	128	29	148	19	168	10
9	24	29	75	49	89	69	69	89	53	109	40	129	28	149	18	169	9
10	27	30	78	50	88	70	68	90	52	110	39	130	28	150	18	170	9
11	29	31	80	51	87	71	67	91	52	111	38	131	27	151	17	171	9
12	32	32	83	52	85	72	67	92	51	112	38	132	26	152	17	172	8
13	34	33	85	53	84	73	66	93	50	113	37	133	26	153	16	173	8
14	37	34	88	54	83	74	65	94	50	114	37	134	25	154	16	174	7
15	40	35	90	55	82	75	64	95	49	115	36	135	25	155	15	175	7
16	42	36	93	56	81	76	63	96	48	116	35	136	24	156	15	176	7
17	45	37	95	57	80	77	62	97	47	117	35	137	24	157	15	177	6
18	47	38	98	58	79	78	62	98	47	118	34	138	23	158	14	178	6
19	50	39	99	59	78	79	61	99	46	119	34	139	23	159	14	179	6

Fig. 10 Calibration Curve (Mix Channel 100 - 200KHZ)



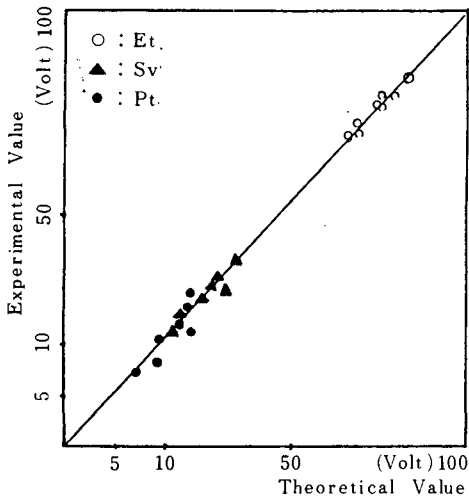


Fig. 11 Comparison between Theoretical Value and Experimental Value of Signal Intensity

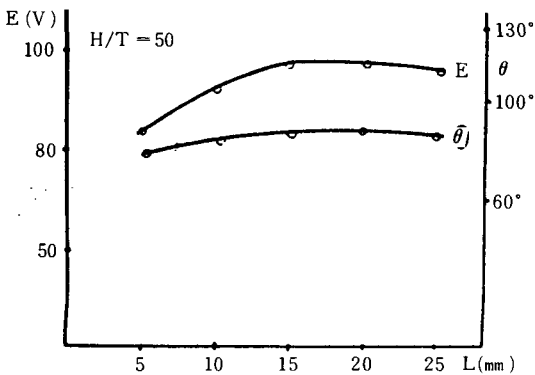
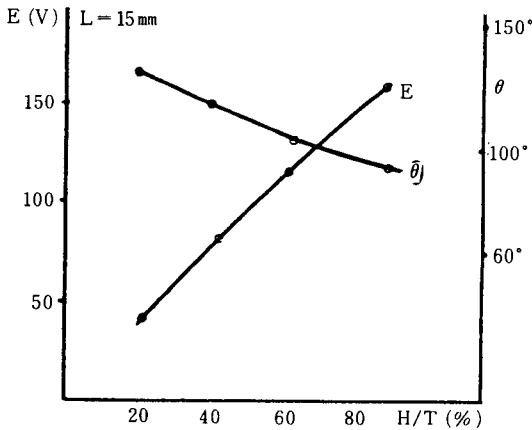


Fig. 12 Defect Signal Intensity of Decreasy Thickness ( $E_t$ )

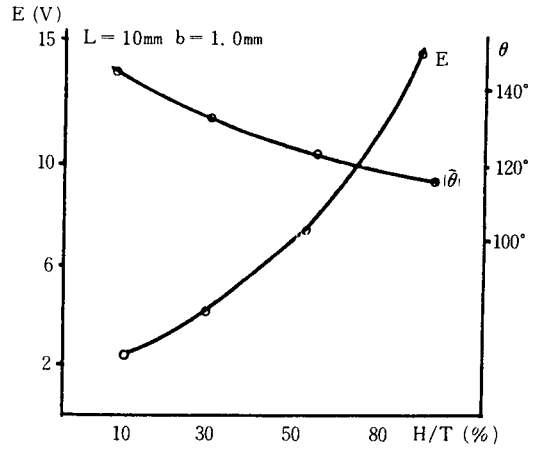


Fig. 13 Defect Signal Intensity of Notch Type ( $S_v$ )

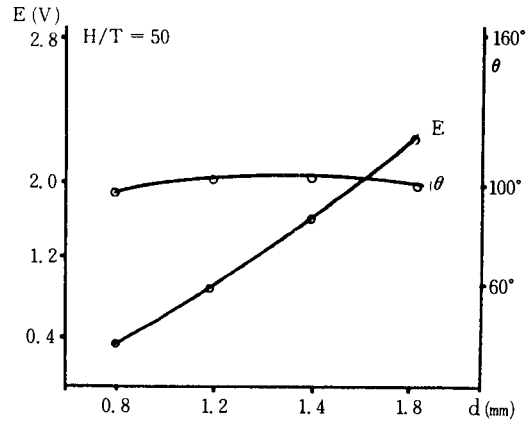


Fig. 14 Defect Signal Intensity of Ring Type ( $P_t$ )

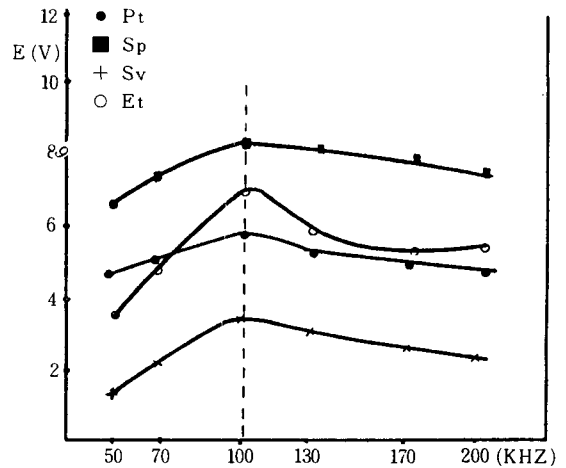


Fig. 15 Characteristics of Frequency

## 6. 結 論

1. 本 研究에 使用된 Probe로 試驗한 結果 缺陷의 크기와 信号強度 (E) 의 상관관계를 定量的으로 파악이 가능했으며 缺陷의 크기가 증가함에 따라 信号強度는 증가하지만 缺陷의 길이만은 어느 이상되면 포화되어 일정한 최대값을 갖는다.
2. 信号源의 位置와 缺陷의 形態에 따라 信号強度가 최대가 되는 周波數는 약 100 K Hz 였다. 앞으로 Coil Impedance 에 대한 보다 精確한 理論的 解析을 토대로 결함의 크기와 ECT 信号강도와와의 관계를 精確하게 파악하므로서 결함신호 判別의 신뢰성을 향상시키고 ECT Probe의 국산화 설계에 접근해 가는것이 研究課題라 하겠다.

## 參考文獻

- 1) Libby H. L., Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods Willey-Interscience. 1971
- 2) Dan G. J. and H. L. Libby ; Steam Generator and Condenser Tubing Nondestructive Inspection. Inst. Mech. Eng. Cont. Publ. 8 1974
- 3) McMaster, R. C. (Edd) ; Nondestructive Testing Hand Book II. Ronald Press Co. (1959)
- 4) 三好, 前田 : 스텐레스 鋼傳熱管의 供用期間中 檢査のための 渦電流探傷試驗 非破壞檢査 28-11.(1979).
- 5) 尾上守夫, 市用初男 ; 渦流檢査用 コイルに關する考察, 非破壞檢査 第6卷 5號 (1967).
- 6) Zetec. Inc. Data Analysis of

Nonferromagnetic Tubing Eddy

Current Inspection Results. 1981

- 7) A. L. Lucero, "Level III Study Guide" Eddy Current Method ASNT-SG-ET3 - 83
- 8) O. C. Zienkiewicz, "The Finite Element Method in Engineering Science" McGraw-Hill. 1971
- 9) E. Guancial, S. Das Gupta ; A Finite element Computer Program for 2 - D and Axisymmetric Magnetic Field Problems IE (I) Journal -EL 1978 Vol. 58
- 10) K. C. Rockey, H. R. Evans ; DW Griffiths, D. A. Nethercot, The Finite Element Method, pp. 96 - 196
- 11) Burrows M. L., Theory of Eddy-Current Flaw Detection" Ph. D. Dissertation, University of Michigan. 1964.
- 12) D. J. Hagemair, "Application of Eddy Current Impedance Testing" Material Evaluation, pp. 1035 - 1042 July 1984

\* 본 논문의 실험에 도움을 많이 주신 한국 에너지연구소 박대영 비파괴 실장님과 ECT 연구실의 여러 연구원들에게 깊이 감사드립니다.