

《論 文》

渦電流 標準浸透 깊이·表皮效果와 缺陷信號 位相角의 關係解析

鄭泰彥, 張基玉, 朴大英

韓國에너지研究所

1985년 2월 접수

Analysis of Relationship between Standard Depth of Penetration Skin Effect and Phase Angle of Defect Signal of Eddy Current Testing

Tae Eon Chung, Kee Oak Chang, Daē Young Park

ABSTRACT

An experiment to investigate the rate of change of phase angle of eddy current output signal caused by outer surface defect of nonferromagnetic tube by variation of standard depth of penetration and variation of percent of tube wall penetration was carried out.

The results of the experiment show that the phase angle of defect signal is increased with decreasing the standard depth of penetration or the depth of defect.

The results also show that the phase angle is decreased with increasing the skin effect of eddy current, and that the resolution is decreased with decreasing the depth of defect.

I. 序 論

渦電流探傷에서 缺陷信號의 位相角을 測定하여 缺陷의 깊이를 評價하는 것은 널리 實用되고 있는 技術이다. 缺陷에 의한 金屬缺損의 부피 (volume of metal loss)에 따라 信號의 振幅이 決定되지만 缺陷의 폭이나 길이에는 關心이 없고 다만 缺陷의 깊이가 試驗體 두께의 몇%인가를 알고자 할때는 信號의 位相만이 重要하게 된다. 特別히 傳熱管等の 檢査에서는 缺陷의 全體的인 크기 보다는 缺陷깊이가 管두께의 몇%인가에 따라서 健全性 與否를 判斷할 境遇가 많다.

管的 渦電流探傷에서 缺陷信號의 位相角은 試驗周波數나 缺陷의 깊이 또는 缺陷의 位置가 管的 內面에 있는가 外面에 있는가에 따라서 달라지게 된다. 뿐만아니라 檢査裝備의 種類 및 狀態나

使用하는 探觸子와 試驗體의 幾何學的 結合程度 (coupling) 등 여러가지 要因에 의하여 信號位相角은 影響을 받으므로 어떤 公式에 의한 信號位相角의 正確한 計算은 不可能하다.

그러므로 實在 檢査에서는 試驗體와 同一한 材質과 規格의 標準試驗管 (Calibration Standard Tube)에 加工된 몇개의 人工缺陷을 같은 條件下에서 檢査하고 이 信號들의 位相角을 測定하여 缺陷깊이의 評價基準으로 삼고있다. 이와같은 方法은 現實的으로 最善策이기는 하지만 標準試驗管에 加工할 수 있는 人工缺陷의 갯수와 精密度에는 限界가 있으므로 缺陷깊이 評價에는 誤差가 發生한다. 渦電流의 表皮效果 (Skin Effect)로 인하여 檢査할 수 있는 試驗體의 두께는 수 mm 以下가 되는데 缺陷깊이 評價의 相對誤差는 적어도 試驗

體 두께의 10%에 이르는 것으로 報告되고 있다. 한편 缺陷깊이의 評價誤차를 줄이기 위해서는 서로 다른 缺陷깊이에 대한 分解能(Resolution)을 增加시켜야 하는데 分解能은 渦電流의 標準浸透깊이(Standard Depth of Penetration)에 反比例하는 것으로 알려져 있다. 2) 試驗周波數를 높게 택함으로써 標準浸透깊이를 減少시킬 수 있지만 따라서 表皮效果가 增大되어 檢査할 수 있는 試驗體 두께가 줄어들게 된다.

本 研究에서는 自己比較型 Inner Probe 를 사용한 非磁性體 管의 檢査에 대한 實驗을 通하여 標準浸透깊이에 따른 管의 外面缺陷 信號位相角의 變化를 考察하였으며 表皮效果의 影響에 대해서도 아울러 檢討하였다.

이 結果는 檢査者가 任意로 調節할 수 있는 唯一한 變數인 試驗周波數의 選擇에 參考가 될 것이며 缺陷評價의 誤차를 줄이는데 도움이 될 것이다.

II. 理論

試驗體에 誘導된 渦電流의 密度는 Maxwell 方程式에 의하여

$$J_x = J_0 \exp \left\{ -(\pi f \mu \sigma)^{1/2} x \right\} \exp \left\{ -j(\pi f \mu \sigma)^{1/2} x \right\} \dots\dots\dots (1)$$

로 表示된다. 3) 여기서

J_x : 試驗體의 檢査 Coil 에 가까운 表面으로 부터의 깊이가 x 인 平面에서의 渦電流 密度(Ampere/ m^2)

J_0 : 試驗體의 檢査 Coil 에 가까운 表面에서의 渦電流 密度(Ampere/ m^2)

f : 試驗周波數(Hz)

μ : 試驗體의 透磁率로서 非磁性體이면 $4\pi \times 10^{-7}$ (Henry/ m)

σ : 試驗體의 電氣傳導度(mhos/ m)

x : 試驗體의 檢査 Coil 에 가까운 表面으로 부터의 깊이(m)

이다.

式(1)에서

$$x = (\pi f \mu \sigma)^{-1/2} \text{ 이면}$$

$$J_x = \frac{1}{e} J_0 \approx 0.368 J_0$$

가 되어 渦電流 密度는 表面에 比하여 約 37%로 減少하게 되는데 이 깊이를 標準浸透깊이라고 δ 로 表示한다.

즉

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \dots\dots\dots (2)$$

이다. 따라서 式(1)을 graph로 나타내면 그림 1과 같이 된다.

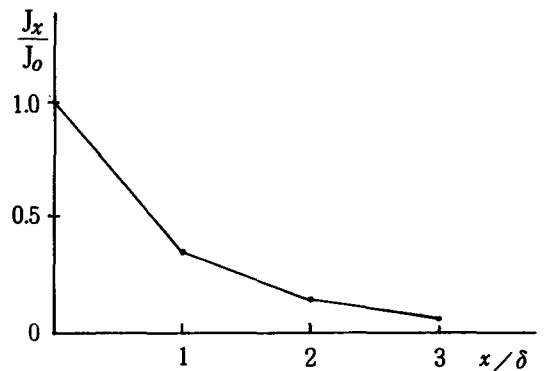


그림 1. 渦電流 밀도의 감쇄

그림 1에서 보는바와 같이 誘導되는 渦電流의 大部分은 檢査 Coil 에 가까운 表面쪽에 集中하여 흐르게 되는데 이와같은 現象을 表皮效果라 한다. 그리고 式(2)에서 부터 試驗周波數나 試驗體의 透磁率 또는 傳導도가 增加할수록 標準浸透깊이는 減少함을 알 수 있으며 이에따라 表皮效果는 增大된다. 渦電流探傷이 可能하려면 그 變化를 探知할 수 있을 程度의 充分한 渦電流가 誘導되어야 하는데 標準浸透깊이의 2배되는 깊이에서의 渦電流密度는 表面에 比하여 13.5%가량밖에 안 되므로 檢査할 수 있는 試驗體두께는 事實上 標準浸透깊이의 2倍 以下로 制限된다. 2,3)

한편 式(1)의 虛數成分은 渦電流의 位相이 試驗體 表面으로 부터의 깊이가 增加할수록 늦어지는 것을 나타낸다.

試驗體 表面과 깊이 x 에서의 位相差를 θ 로 表示하면

$$\theta = x/\delta \text{ (Radian)} \dots\dots\dots (3)$$

이다. 또한 이 關係를 graph로 나타내면 그림 2와 같다. 試驗體 表面으로 부터의 깊이의 差가 클수록, 또한 標準浸透깊이가 작을수록 位相差는 커짐을 알 수 있다.

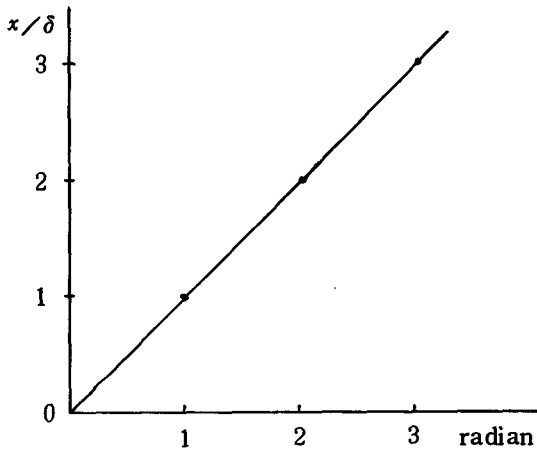


그림 2. 와전류의 위상지연

試驗體에 缺陷이 있으면 그 部位에서 渦電流의 흐름은 變型되고 結果적으로 渦電流에 의한 磁束 (magnetic flux)을 變化시킴으로써 檢査 Coil의 Impedance를 變化시킨다. Coil Impedance의 變化가 缺陷信號로서 나타나는 것인데 Impedance는 Vector量이므로 變化된 Impedance값의 크기와 位相에 의하여 缺陷信號의 振幅과 位相角이 決定된다. 4,5,6) 따라서 缺陷에 의하여 變型된 渦電流의 세기와 位相이 各各 信號의 振幅과 位相角을 決定한다고 볼 수 있다.

試驗體表面으로 부터의 깊이가 서로 다른 두 平面上에 흐르는 渦電流 사이의 位相差는 標準浸透 깊이가 작을수록 增加하게 되므로 깊이가 서로 다른 두 缺陷에 의한 信號位相角의 差도 標準浸透 깊이에 反比例한다. 깊이가 서로 다른 두 缺陷이 있을때 그 깊이의 差를 判別할 수 있는 能力을 分解能이라 하는데 높은 試驗周波數(f)를 擇함으로써 式(2)에 의하여 標準浸透깊이를 줄여서 結

果적으로 分解能을 增加시킬 수 있다. 7,8)

III. 實驗

本 實驗은 ASME Code XI "Inservice Inspection, Appendix IV, Eddy Current Test Method for Nonferromagnetic Heat Exchange Tubing"의 規定에 遵하여 遂行하였다.

試驗片은 美國 Zetec 社에서 製作한 것으로서 材質은 非磁性體인 Inconel Alloy-600이고 規格은 外徑 17.46 mm, 두께 1.016 mm인 管이다. 實驗에 쓰인 人工缺陷은 5個의 flat-bottomed drill hole인데 缺陷의 깊이는 그림 3에 表示한 바와 같이 100% hole에서 부터 管두께의 20% 되는 外面缺陷에 이르기 까지 20% 間隔으로 되어있다. 探觸子는 自己比較型 Inner Probe로서 Coil의 幅은 1.4 mm이고 두 Coil의 間隔은 1.2 mm이다. 또한 Coil의 外徑은 13.97 mm이므로 fill-factor는 約 82%이다. 試驗裝備는 美國 Zetec 社에서 製作한 MIZ-12 및 Storage Oscilloscope가 있는 MIZ-12 Display Unit가 使用되었으며 缺陷信號의 位相角 測定을 위하여 Vector Analyzer를 利用하였다. 試驗周波數는 管의 두께가 標準浸透깊이 δ 의 1배에서 2배에 이르기 까지 0.2배의 間隔이 되도록 選定하였다. Inconel Alloy-600의 比抵抗은 $98 \times 10^{-8} \Omega\text{-m}$ 이고 透磁率은 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ 이며 管의 두께가 $1.016 \times 10^{-3} \text{ m}$ 이므로 管의 두께를 T로 表示하면 T/δ 값에 따른 試驗周波數는 表 1과 같다.

實驗에서 缺陷信號의 振幅은 考慮하지 않았으며 位相角은 Cathode Ray Tube의 Screen上的 (-) X軸을 基準으로 하여 時計方向으로 測定하였다.

實驗內容은 缺陷깊이가 固定되었을 때 T/δ 값의 變化에 따른 信號位相角의 變化와 T/δ 값이 固定되고 缺陷깊이가 變化할 때의 信號位相角의 變化를 測定한 것이다.

LOCATION	A	B	C	D	E	F	G
PHYSICALLY MEAS. DEPTH.	.0050"	.0040"	.0080"	.0160"	.0245"	.0330"	THRU
DEPTH IN % OF WALL	13%	10%	19%	39%	59%	79%	100%
DIA. OF DEFECT	I.D. GROOVE 1/16 WIDE	I.D. GROOVE 1/8 WIDE	3/16	3/16	7/64	5/64	.052"

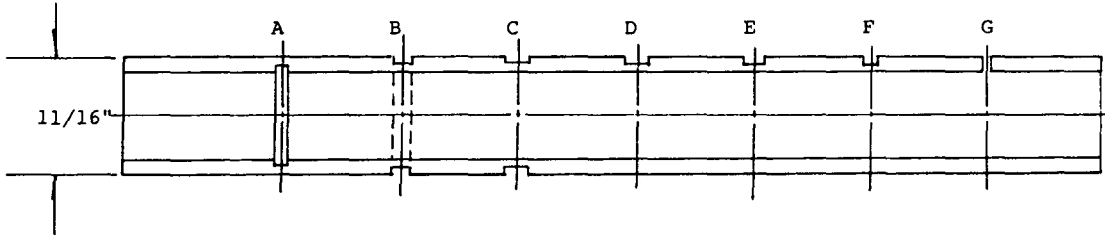


그림 3. 실험용 시험관

표 1. T/δ 값에 따른 시험주파수

T/δ	Frequency(KHz)
1.0	240
1.2	347
1.4	472
1.6	616
1.8	780
2.0	963

표 2. T/δ 값의 변화에 따른 각 결함의 신호 위상각

T/δ	Phase Angle (Degree)				
	100%	80%	60%	40%	20%
1.0	0	0	0	0	0
1.2	49	54	59	64	67
1.4	97	106	116	126	134
1.6	145	163	180	192	203
1.8	189	211	235	251	265
2.0	218	256	279	298	317

IV. 實驗結果 및 考察

表 2는 T/δ 값이 1.0 일때의 각 缺陷信號의 位相角을 0°에 맞추고 試驗周波數를 바꿈으로써 T/δ 를 變化시키면서 信號 位相角을 測定한 結果인데 graph 로 나타내면 그림 4와 같다. 그림 5는 100% hole 에 대한 實驗에서 나타난 信號들이다. 이 結果는 特定한 缺陷깊이에 대해서 信號位相角은 T/δ 만의 函數로 간주되므로 信號位相角을 φ로 表示할때 實驗式을

$$\varphi = A_0 + A_1(T/\delta) + A_2(T/\delta)^2 \dots \dots \dots (4)$$

로 나타내어 最少自乘法으로 各 缺陷깊이에 따른 A₀, A₁ 및 A₂ 를 求할 수 있다. 그러나 T/δ 가 1.6 以下일때는 φ가 T/δ 의 一次函數 關係로 보이므로 位相角 φ를 式(3)의 渦電流位相 θ와 關聯하여

$$\begin{aligned} \varphi &= B_0 + B_1 \theta \\ &= B_0 + B_1(x/\delta) \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

型으로 나타내는 것이 實驗目的과 一致한다. 그림 4에서 보면 B₀와 B₁은 缺陷깊이의 函數로 나타나고 있다. 특히 B₁은 缺陷깊이가 작을수록 增加하는데 이것은 物理的 說明이 곤란하다.

따라서

$$\begin{aligned} \varphi &= B_0 + B_1 \left(\frac{T - aD}{\delta} \right) \\ &= B_0 + B_1 \frac{T}{\delta} \left(1 - a \frac{D}{T} \right) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

이 되는데 實驗에서는 裝備의 phase control 을 調整하여 T/δ 가 1.0 일 때 φ 를 0° 에 맞추었 으므로

$$\begin{aligned} 0 &= B_0 + B_1 \left(1 - a \frac{D}{T} \right) \\ B_0 &= -B_1 \left(1 - a \frac{D}{T} \right) \end{aligned}$$

이 고 이것을 式(6)에 代入하면 實驗式은

$$\varphi = B_1 \left(\frac{T}{\delta} - 1 \right) \left(1 - a \frac{D}{T} \right) \dots\dots\dots (7)$$

가 된다.

表 2 의 實驗 data 중 表皮效果의 影響이 작은 T/δ 가 1.6 以下 이면서 缺陷깊이가 60% 以上 일 때의 結果를 式(7)에 代入하여 B_1 과 a 의 값을 求하면 近似値는 各各

$B_1 = 372.746$, $a = 0.347$ 이 된다.

이 結果는 缺陷信號 位相角 φ 가 와전류 位相差 θ 와 比例하지만 θ 를 求하는 點, 즉 檢査 Coil 쪽 表面으로 부터의 깊이 x 는 管두께 T 에서 缺陷깊이 D 의 約 35% 를 減한 값이 됨을 意味한다. 그러나 式(7)은 T/δ 가 1.6 以下일 때의 實驗結果와 거의 正確하게 一致하지만 試驗周波數가 높아져서 T/δ 가 增加할수록 位相角 φ 는 式(7)에 의한 豫想値보다 작아지고 있는데 이것은 試驗周波數가 높을수록 表皮效果가 增加하여 位相角을 줄이는 것으로 說明할 수 있다.

표 3. 결함깊이 변화에 따른 신호 위상각

T/δ	Phase Angle (Degree)				
	100%	80%	60%	40%	20%
1.0	0	14	28	44	56
1.2	0	21	39	57	71
1.4	0	27	50	73	90
1.6	0	36	64	90	111
1.8	0	45	80	110	137
2.0	0	57	96	132	162

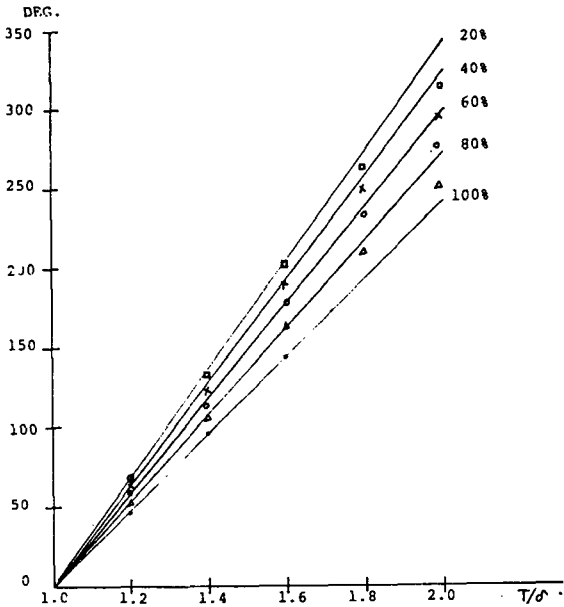


그림 4. T/δ 값의 변화에 따른 각 결함의 신호 위상각

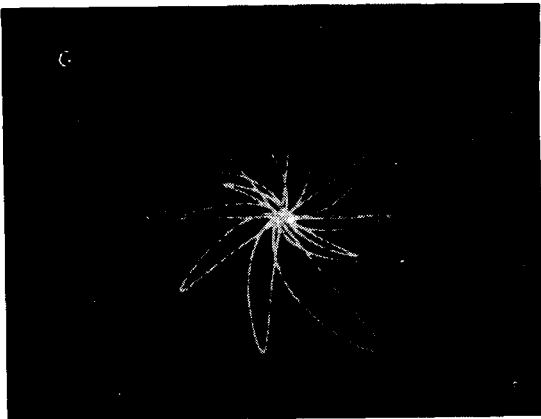


그림 5. 100% hole 에 의한 信號

따라서 B_1 이 固定된 값을 가지려면 缺陷깊이를 D 로 表示할 때 式(5)의 x 를 $x = T - aD$ 로 代入해야 한다. 여기서 $a = 1$ 이면 100% hole 의 경우 $T = D$ 가 되어서 δ 값의 變化에도 불구하고 φ 는 항상 一定하게 되는 모순이 있으므로 a 는 1이 아닌 常數임을 알 수 있다.

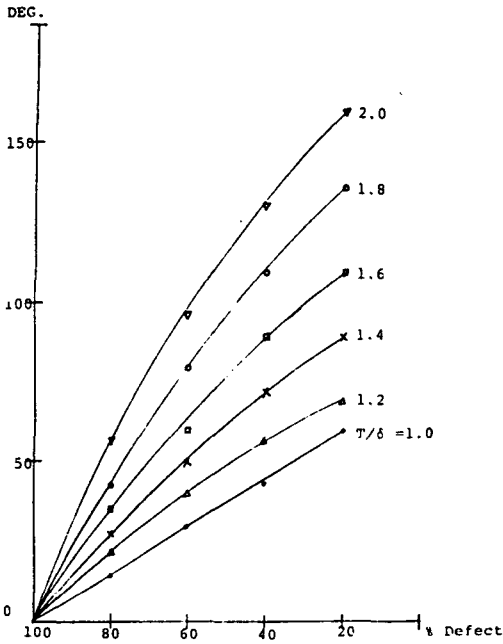


그림 6. 결함깊이 변화에 따른 신호 위상각

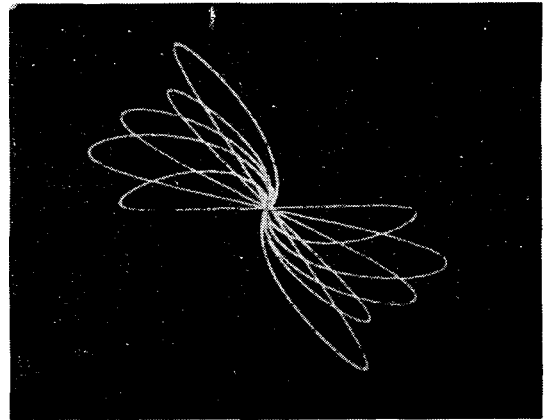
한편 表 3 과 그림 6 은 T/δ 값이 固定되었을 때 缺陷깊이 D 의 變化에 따른 位相角 φ 의 變化를 測定한 結果이다. 이 實驗에서는 100% hole 에 의한 位相角 φ 를 모두 0° 에 맞추었으며 그림 7은 實驗에서 나타난 信號들이다. 이 結果를 나타내는 實驗式은

$$\begin{aligned} \varphi &= B_1 \left(\frac{T}{\delta} - 1 \right) \left(1 - a \frac{D}{T} \right) \\ &\quad - B_1 \left(\frac{T}{\delta} - 1 \right) (1 - a) + B_2 \\ &= B_1 a \left(\frac{T}{\delta} - 1 \right) \left(1 - \frac{D}{T} \right) + B_2 \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

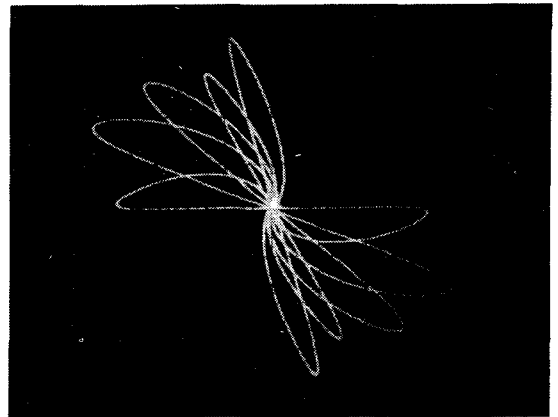
이 되며 B_2 는 T/δ 가 1.0일 때 各 缺陷에 의한 信號位相角이 된다. 式(8)도 또한 T/δ 가 1.6以下이고 缺陷깊이가 60%以上일 때는 實驗結果와 잘 一致하지만 그밖의 범위에서는 表皮效果의 影響으로 實在 測定한 位相角이 豫想值보다 작아지고 있다.

위의 두가지 實驗結果를 보면 缺陷깊이가 작은 영역에서는 位相角이 計算값 보다 작으며 따라서 分解能도 모든 缺陷에 대하여 均一하지 않고 缺陷깊이가 작을수록 分解能도 減少함을 알 수 있다.

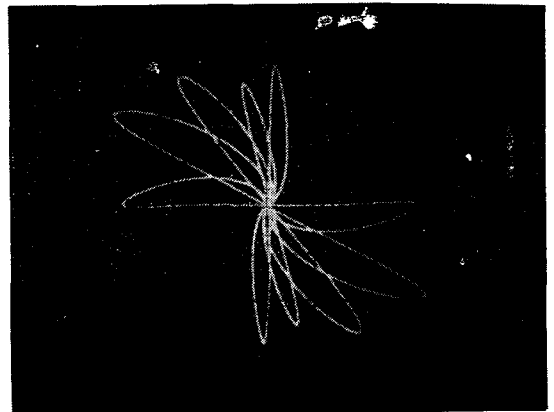
그림 7. 결함깊이가 다른 信號



($T/\delta = 1.0$)

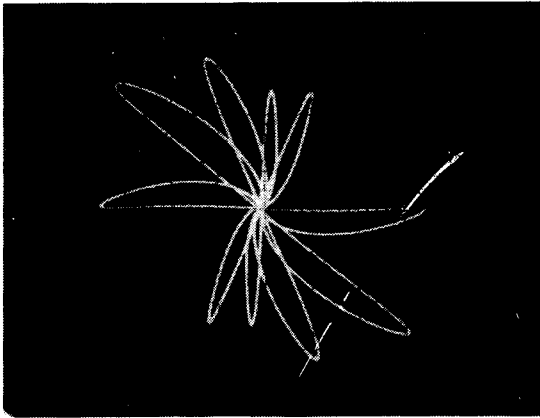


($T/\delta = 1.2$)

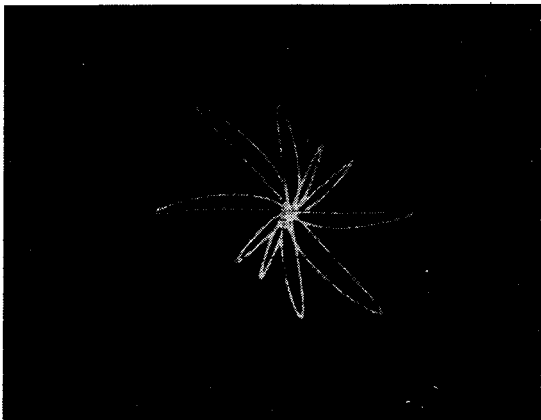


($T/\delta = 1.4$)

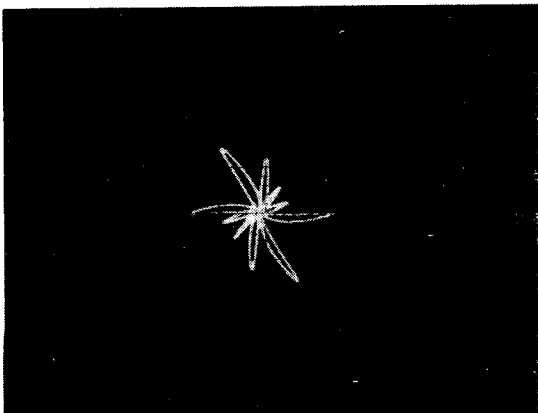
(그림 7 계속)



($T/\delta = 1.6$)



($T/\delta = 1.8$)



($T/\delta = 2.0$)

V. 結 論

管의 外面缺陷의 깊이가 一定할 때 信號의 位相角은 T/δ 값에 比例하며 缺陷깊이가 작을수록 位相角의 增加率은 커진다. T/δ 값이 一定하면 信號의 位相角은 缺陷깊이가 작을 수록 增加하는데 그 增加率은 T/δ 값에 比例한다.

渦電流의 表皮効果는 信號의 位相角을 減少시키는 方向으로 作用하며 缺陷깊이가 작을수록 그 影響은 커지게 된다. 따라서 分解能도 缺陷깊이가 작을 수록 減少하게 된다.

參考文獻

1. G. Van Drunen and V.S. Cecco, "Recognizing limitations in eddy-current testing", NDT International, Vol. 17, No. 1, Feb. 1984. Butterworth and Co (Publishers) Ltd.
2. A.L. Lucero, Level III Study Guide-Eddy Current Method. 1983, ASNT-SG-ET 3-83, American Society for Nondestructive Testing, Columbus, Ohio.
3. H.L. Libby, Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Method. 1971, John Wiley & Sons, Inc. New York, New York.
4. 朴大英 外. 非破壞檢査 技術開發 - 渦電流試驗法, 1982. 韓國에너지研究所
5. R.C. McMaster, ed., Nondestructive Testing Handbook. 1959. American Society for Nondestructive Testing, Columbus, Ohio.
6. Metals Handbook, Nondestructive Inspection and Quality Control, 1977. American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

7. R.S.Sharpe, Research Techniques in Nondestructive Testing, Volume 1, 1970. Academic Press, New York, New York.
8. R.S.Sharpe, Research Techniques in Nondestructive Testing, Volume 2, 1973. Academic Press, New York, New York.