

## 參 考 文 獻

1. 河注植, 陳康奎 : 2 次系의 制御對象에 對한 PI制御器의 最適調整에 關한 研究.
2. 朴進吉, 金仁泰 : Smith制御系의 安定度에 關한 研究. 韓國海洋大學 大學院 論文集 第七輯 pp. 384.
3. O. J. M. Smith : Closer Control of Loops With Dead Time, Chemical Engineering Progress, Vol. 53 No. 5 pp. 217~219 (1957).
4. 渡部慶二 : Smith法の外乱に對する 制御特性の改善, 計測自動制御學會 論文集 第19卷 第3號, pp. 187 (昭和58).
5. 河注植, 尹智根 : 브러시리스交流 發電機의 電圧制御 特性에 關한 研究, 韓國 海洋大學 大學院 論文集 第七輯 pp. 437.
6. A. Senoo, M. Itoh, T. Arie : Development of the Speed Control System of Main Engine Cooling Sea Water Pump, The 3rd International Symposium on Ship Operation Automation. pp. 215~221.
7. G. R. WALSH : Methods of Optimization, A. Wiely-Interscience Publication. pp. 74~140.
8. DAVID. E. Johnson, V. JayaKumar : Operational Amplifier Circuit Design and Application.
9. 伊藤政八, 加村正夫, 福岡佑治 著, 朴潤基 譯 : 自動制御시스템, 新岩文化社 pp. 240~255, pp. 190~194.
10. 河注植 : 自動制御工學, 海事圖書出版部. pp. 277~279.
11. 廣田實 : 船舶制御システム工學, 成山堂, pp. 139~144.
12. 三菱電機 : 三菱AS Motor取扱説明書.

# 鋼管 内部 코일의 임피이던스 特性解析과 非破壊検査에 關한 研究

李 泰 洙

A Study on Non-Destructive Inspection and  
Impedance Characteristic Analysis of inner  
Coil in Steel Pipe

*Lee Tae-soo*

〈 目 次 〉

## Abstract

1. 序論
2. 基本式
3. 코일 임피이던스 特性에 대한 시뮬레이션
4. 實驗裝置 및 實驗方法
  - 4.1 試驗管
  - 4.2 涡流検査用코일
  - 4.3 實驗裝置
5. 實驗結果 및 考察
  - 5.1 코일의 치수에 따른 임피이던스曲線
  - 5.2 外徑變化에 의한 코일 임피이던스 變化
  - 5.3 內徑變化에 의한 코일 임피이던스 變化
  - 5.4 外面垢에 의한 코일 임피이던스 變化와 코일의 치수
  - 5.5 試驗周波數의 選定에 대한 考察
6. 結論

參考文獻

## A Study on Non-Destructive Inspection and Impedance characteristic Analysis of inner Coil in Steel Pipe.

Tae - Soo Lee

Department of Marine Engineering, Graduate School, Korea Maritime University.

### Abstract

This paper dealt with a basic study for non-destructive inspection of metallic structure by measuring the impedance of a coil sensor closed to the test piece.

The author has carried out the theoretical analysis for impedance of a coil sensor inserted in the steel pipe, and with these results, optimum condition is obtained for non-destructive inspection as to the coil size and testing frequency by computer simulation.

For selected test condition from the simulation, the results of experimental tests are also shown.

The results obtained are summarized as follows;

- 1) Figure of curve of coil impedance V. S. test frequency is largely affected by coil size and pipe thickness by the ratio of coil diameter and inner diameter of pipe especially in case of inserted coil inspection.
- 2) The maximum variation of impedance amplitude occurred at given frequency and is proportional to the ratio of pipe thickness to inner diameter of pipe, and the variation of impedance angle increased with frequency.
- 3) The amplitude of coil impedance varied much with groove (artificial defect skinned on outer surface of the pipe) width, but little change in impedance angle is shown by varying groove width.
- 4) Thus optimum test frequency may be selected according to the size of test piece.

## 1. 序論

電磁誘導를 이용한 非破壊試驗은 交流가 흐르는 試驗 코일을 金屬에 接近하는 경우 金屬에 誘導되는 涡流의 變化를 코일의 起電力의 變化 혹은 코일의 임피이던스의 變化로 檢出하여 金屬의 缺陷과 材質의 差異検查, 形狀의 크기 및 두께의 測定등을 하는 涡流試驗이며, 特히 缺陷의 檢出을 目的으로 하는 경우를 涡流探傷試驗이라고도 한다.<sup>1)</sup>

涡流試驗은 英國의 H. D. Hughes 가 金屬材質判別의 報告를 한 것이 始初<sup>2)</sup>이고, 本格的인 實用化는 독일의 F. Förster 에 의한 基礎研究와 試驗裝置의 開發<sup>3)</sup>이 이루어진 이후부터이다.

非破壊試驗法은 主로 被試驗體 内部의 缺陷을 檢出하는 것이 目的이며, X 線透過試驗, 超音波探傷試驗등이 있고 이들 非破壊試驗法은 각종 工業分野에서 널리 實用化되고 있다. 涡流探傷試驗은 被試驗體의 電磁氣的 特性과 形狀, 크기, 被試驗體와 試驗코일의 相對的인 位置變化등 많은 要因으로 影響을 받는 缺點이 있어 實用例가 比較的 적은 편이었으나, X 線透過試驗法과 비교하여 裝置가 간편하고 超音波探傷과 비교하면 물과 같은 接觸媒質이 필요없고, 高速라인의 自動探傷이 가능하고, 連續正弦波를 사용하여 涡流探傷의 信號處理가 容易하고, 特히 原子力發電所 등 热交換器用 傳熱管의 檢查에서는 管의 内面부터 檢查해야 하는 등의 制約을 받아 다른 方法으로는 試驗을 할 수 없으므로 涡流探傷試驗이 利用되는 등<sup>4)</sup>, 涡流試驗의 適用範圍가 넓어지고 있다.<sup>5), 6)</sup> 最近에는 多重周波數의 涡流探傷試驗裝置의 開發<sup>7, 8)</sup>, 特殊프로우브의 開發, 信號處理法의 開發<sup>9)</sup> 등으로 涡流試驗의 信賴性이 向上되고 電子回路技術의 進步로 今後의 涡流試驗法의 應用分野는 擴大될 것으로 期待된다.

涡流探傷에서 交流를 흘린 코일에 의하여 導體에 誘導되는 涡流는 使用周波數가 높을수록, 또 導體의 導電率과 透磁率이 높을수록 表皮効果가 크고, 導體表面 근방에 集中해서 흐른다. 보다 高周波交流를 利用한 수록 被検査體의 微細한 表面缺陷을 檢出할 수 있으나, 半面, 導體內의 缺陷은 檢出하기 곤란하다. 따라서 最適交流周波를 選定하거나 多量周波數에 依한 探傷이 요망된다.

涡流探傷試驗에는 1次코일의 勵磁에 의하여 생긴 導體의 涡流變化를 1次코일 自體에서 檢知하는 自己誘導型과 1次코일의 勵磁에 의하여 2次코일에서 檢出하는 相互誘導型이 있고 또 코일과 導體의 配置에 따라 空心코일 内部에 棒 또는 管形導體를 插入하는 貫通型, 管의 内部에 코일을 插入하는 內入型 및 表面検查를 위하여 表面과 直角으로 코일을 對應하는 プロウブ型이 있다. 이들 각 方式에 관하여 지금까지 코일과 導體가 無限長의 경우인 理想化한 條件下에서의 理論解析이 研究되고 있고 그의 近似式에 의한 實用化가 이루어지고 있다.

本 研究에서는 코일의 길이에 比하여 충분히 긴 円筒導體내에 코일이 插入되어 있는 自己誘導型에 관한 理論式을 電磁氣의 基本式인 맥스웰方程式에서 誘導하여 코일의 임피이던스特性에

대한 數值解析과 電子計算機에 의한 시뮬레이션을 하고 實驗에 의한 測定으로 그 타당성을 立證하였다.

實驗에서는 被試驗體로 스텐레스钢管(非磁性體)를 사용하였고 管의 두께(管厚) 差에 의한 코일 임피이던스의 變化, 코일크기의 變化 및 管面의 缺陷에 의한 코일 임피이던스의 變化 등을 測定하여 코일 임피이던스 特性的 標準的 데이터를 設定하고 이들 測定에서 얻은 結果의 分析에 의하여 内部코일에 의한 涡流探傷試驗에 있어서의 最適試驗周波數 選定에 대하여 檢討하였다.

本 研究에서 導入한 理論的 解析은 自己誘導方式의 內入型에 있어서 일반적으로 應用이 가능하고 實驗의 結果는 모든 非磁性管의 內入型方式 涡流探傷試驗에 일반적으로 應用될 수 있을 것이며 여기서 얻은 測定데이터와 選定된 周波數에 의해서 보다 精度가 높은 非破壊検査를 하는 데 크게 도움이 될 것으로 期待된다.

## 2. 基 本 式<sup>10, 11)</sup>

正弦波交流가 흐르는 円形코일에 對하여 導體가 코일의 軸에 對稱으로 配置하고 있는 경우, 코일 임피이던스特性 解析의 基本이 되는 것은 맥스웰方程式이며 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\nabla \times H = \frac{\partial D}{\partial t} + J \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

단,  $H$ : 磁界的 세기,  $D$ : 電束密度,  $J$ : 電流密度,  $E$ : 電界的 세기,  $B$ : 磁束密度

여기서는 定常狀態만을 考慮하고 導體内外에서의 變位電流는 무시한다. 따라서 (1)식은 다음의 (3)식이 된다.

$$\nabla \times H = J \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

오옴의 法칙에 의하면

$$J = \sigma E \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

이고, 여기서  $\sigma$ 는 導電率이다. 導體內에서 이 오옴의 法칙을 (3)식에 적용하여 다음 식을 얻는다.

$$\nabla \times (\nabla \times H) = \nabla \times (\sigma E) = \sigma (\nabla \times E) \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

(2)식에서  $B = \mu \cdot H$ 이므로

가 되고 (5)식은 다음의 (7)식이 된다.

또한

이 된다. 여기서 圓筒座標( $r, \theta, z$ )를 採用하고, 벡터포텐셜  $A$ 를 定義하다

$$H = \nabla \times A = \begin{vmatrix} a_r & a_\theta & a_z \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial z} \\ Ar & rA_\theta & A_z \end{vmatrix} \dots \quad (9)$$

지금 圓筒(鋼管) 내에 들어 있는 코일은 軸에 대하여 對稱하고 코일에 電流가 흐르기 때문에 포텐셜은  $\theta$  成分만 存在하고 磁界는  $r$  成分과  $z$  成分이 存在한다.

따라서  $Az = 0$ ,  $Ar = 0$ 이다. 또  $A_\theta = A$ 라 놓으면  $H$ 의 각成分은 다음의 (10)~(12)식이 된다.

$$H_r = \frac{1}{r} \left( \frac{\partial A_z}{\partial \theta} - r \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) = -\frac{\partial A}{\partial z} \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

$$H_{\theta} = \frac{\partial A_z}{\partial r} - \frac{\partial Ar}{\partial z} = 0 \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

$$H_z = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot A_\theta) - \frac{\partial A_r}{\partial \theta} \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot A) \quad \dots \quad (12)$$

(3) 식에 (9) 식을 대입하면

(9) 식에서 磁界 즉,  $\nabla \times A$ 는  $r$  방향과,  $z$  방향만 存在하므로

가成立하고, 또電流密度도  $\theta$  방향만 존재하므로 (13), (14)식에서 다음의 (15), (16)식이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot A) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A \right] = - J \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

한편

$$\nabla \times H = \begin{vmatrix} \frac{a_r}{r} & a_\theta & \frac{a_z}{r} \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial z} \\ H_r & rH_\theta & Hz \end{vmatrix} \dots \quad (17)$$

따라서

$$\nabla \times (\nabla \times H) = \begin{vmatrix} \frac{a_r}{r} & a_\theta & \frac{a_z}{r} \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial \theta} & \frac{\partial}{\partial z} \\ \left(\frac{\partial H_z}{r \partial \theta} - \frac{\partial H_\theta}{\partial z}\right) & r \left(\frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r}\right) & \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \cdot H_\theta) - \frac{\partial H_r}{\partial \theta}\right] \end{vmatrix} \quad (18)$$

이고,  $H$ 는  $r$ 成分과  $z$ 成分만 있으므로 (18)식을 정리하여  $Fr$  및  $Fz$ 成分만 취하고, 또 (7)식에서 다음의 (19)식을 구한다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} r \left( \frac{\partial}{\partial z} Hr - \frac{\partial}{\partial r} Hz \right) &= q^2 Hr \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \left( \frac{\partial}{\partial z} Hr - \frac{\partial}{\partial r} Hz \right) &= -q^2 Hz \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

(19) 식에 (10) ~ (12) 식을 대입하여 정리하면

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} & \left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} + r \frac{\partial}{\partial r} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} - q^2 \right] (A \cdot r) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial r} & \left[ \frac{\partial^2}{\partial z^2} + r \frac{\partial}{\partial r} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} - q^2 \right] (A \cdot r) = 0 \end{aligned} \right\} \dots \quad (20)$$

이 된다. 여기서 다음의 (21)식과 같이 두면 (22)식이 성립한다.

$$P = \left( r \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - q^2 \right) (r \cdot A) \quad \dots \dots \dots \quad (21)$$

$$\left. \begin{array}{l} \frac{\partial}{\partial z} P = 0 \\ \frac{\partial}{\partial r} P = 0 \end{array} \right\} \dots \quad (22)$$

따라서  $P$ 는 다음과 같이 常數  $C$ 가 된다.

이 解는 다음 식의 解에  $(-C/q^2)$ 을 보탠 것이 된다.

그러나 벡터포텐셜은 (10)~(12) 식에서 보는 바와 같이 항상 微分되는 상태로 이용되기 때문에常數項은 생략해도 결과는 같아지다.

결국 円筒導體(鋼管) 내부에 코일이 일정하게配置되어 있고 여기에 電流가 흐르는 경우 微分方程式 (16) 식과 (24) 식을 풀면 포텐셜에 의한 磁界分布特性과 코일 임피이던스特性을 알 수 있다.

여기서는 코일 임피던스特性에 대해서만 考察을 하고 이 코일 임피던스의 變化特性으로부터 最適試驗周波數의 設定을 檢討한다.

円筒導體(钢管)에同心으로 들어있는 내면코일의 경우에는 그림 1에 표시하는 바와 같이円

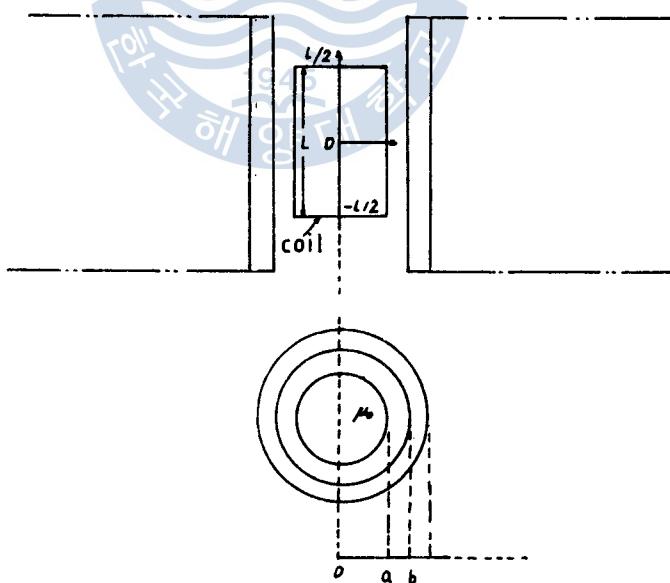


Fig.1 A solenoid coil encircled by an infinite conductive hollow cylinder and its coordinate system

简座標를 정하고 試驗體内部의 座標中心에 코일이 들어 있다. 코일의 길이가  $\ell$ , 半徑이  $a$ 이고 試驗體의 内徑이  $b$ 이다.

우선 半徑  $a$ , 位置  $z'$ 에 있는 單一코일에 單位電流가 흐르는 경우의 포텐셜, 즉 그린의 函數를 구하면 (16)식은 다음의 (25)식이 된다.

$$\left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z'^2} \right] G = -\delta(r-a) \cdot \delta(z-z') \quad \dots \dots \dots \quad (25)$$

단,  $\delta$ :  $\delta$ 函數,  $G$ : 單一코일의 그린의 函數

$G(z)$ 의  $z$ 에 관한 풀리에 變換을  $g(\zeta)$ 라 하면 다음의 관계가 성립한다. 여기서  $\zeta$ 는 積分 變換에서의 變數이다.

$$g(r, \zeta) = \int_{-\infty}^{\infty} Ge^{jz\zeta} dz \quad \dots \dots \dots \quad (26)$$

$$G(r, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g e^{-jz\zeta} d\zeta \quad \dots \dots \dots \quad (27)$$

따라서 均一하게 卷線된 卷數  $N$ 의 單層 솔레노이드 코일電流에 依한 포텐셜  $A$ 는 (27)식에서 다음식으로 구할 수 있다.

$$A = \frac{N}{\ell} I \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} dz' \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g e^{-jz\zeta} d\zeta \quad \dots \dots \dots \quad (28)$$

또 코일의 인덕턴스  $L$ 은 다음의 (29)식이 된다.

$$L = \frac{2\pi\mu_0 Na}{\ell I} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} A_{r=a} dz \quad \dots \dots \dots \quad (29)$$

단,  $I$ 는 코일의 電流

그리고 코일이 圓筒導體와 對應되지 않고 단독으로 있을 때의 内部磁界가 均一한 無限長 솔레노이드의 경우의 인덕턴스  $L_0$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$L_0 = \frac{\mu_0 \pi a^2 N^2}{\ell} \quad \dots \dots \dots \quad (30)$$

### 3. 코일의 임피이던스 特性에 대한 시뮬레이션

앞 章에서의 解析을 이용하여 코일의 임피이던스 特性을 살펴보면 코일이 圓筒導體와 관계없이 단독으로 있을 때의 임피이던스는 다음과 같다.

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \quad \dots \dots \dots \quad (31)$$

코일을円筒導體속에 넣어서円筒導體와近接되어 있을 때의 코일 임피이던스는 다음의 (32)식으로표현된다.

여기에서 抵抗成分  $R$ 은 코일 및 被試驗體에 있어서의 에너지 損失(즉, 주울熱로서 코일의 電流가  $I$  일때  $RI^2$ )에 對應하고 또 인덕턴스는 코일 및 被試驗體에 있어서의 磁場에너지( $=\frac{1}{2}Li^2$ )에 對應한다. 따라서 코일 임피이던스의 相似的 관계는, 코일의 磁場, 電流(코일電流와 被試驗體의 涡流)의 分布의 幾何學的 相似라는 점에서 임피이던스에 영향을 주는 諸因子가 서로 독립된 無次元의 量의 組合으로 표시될 수 있다.

임피이던스의 變化量은 다음 식과 같다.

筒座標를 정하고 試驗體内部의 座標中心에 코일이 들어 있다. 코일의 길이가  $\ell$ , 半徑이  $a$ 이고 試驗體의 内徑이  $b$ 이다.

우선 半徑  $a$ , 位置  $z'$ 에 있는 單一코일에 單位電流가 흐르는 경우의 포텐셜, 즉 그린의 函數를 구하면 (16)식은 다음의 (25)식이 된다.

$$\left[ \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z'^2} \right] G = -\delta(r-a) \cdot \delta(z'-z') \quad \dots \dots \dots \quad (25)$$

단,  $\delta$ :  $\delta$ 函數,  $G$ : 單一코일의 그린의 函數

$G(z)$ 의  $z$ 에 관한 풀리에 變換을  $g(\zeta)$ 라 하면 다음의 관계가 성립한다. 여기서  $\zeta$ 는 積分 變換에서의 變數이다.

$$g(r, \zeta) = \int_{-\infty}^{\infty} Ge^{j\zeta z} dz \quad \dots \dots \dots \quad (26)$$

$$G(r, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g e^{-jz\zeta} d\zeta \quad \dots \dots \dots \quad (27)$$

따라서 均一하게 卷線된 卷數  $N$ 의 單層 솔레노이드 코일電流에 依한 포텐셜  $A$ 는 (27)식에서 다음식으로 구할 수 있다.

$$A = \frac{N}{\ell} I \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} dz' \cdot \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g e^{-jz\zeta} d\zeta \quad \dots \dots \dots \quad (28)$$

또 코일의 인덕턴스  $L$ 은 다음의 (29)식이 된다.

$$L = \frac{2\pi\mu_0 N a}{\ell I} \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} A_{r=a} dz \quad \dots \dots \dots \quad (29)$$

단,  $I$ 는 코일의 電流

그리고 코일이 円筒導體와 對應되지 않고 단독으로 있을 때의 内部磁界가 均一한 無限長 솔레노이드의 경우의 인덕턴스  $L_0$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$L_0 = \frac{\mu_0 \pi a^2 N^2}{\ell} \quad \dots \dots \dots \quad (30)$$

### 3. 코일의 임피이던스 特性에 대한 시뮬레이션

앞 章에서의 解析을 이용하여 코일의 임피이던스 特性을 살펴보면 코일이 円筒導體와 관계없이 단독으로 있을 때의 임피이던스는 다음과 같다.

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0 \quad \dots \dots \dots \quad (31)$$

코일을 원통형 **원통형** 속에 넣어서 원통형 **원통형**과 **접촉**되어 있을 때의 코일 임피던스는 다음의 (32)식으로 표현된다.

여기에서 抵抗成分  $R$ 은 코일 및 被試驗體에 있어서의 에너지 損失(즉, 주울熱로서 코일의 電流가  $I$  일때  $RI^2$ )에 對應하고 또 인덕턴스는 코일 및 被試驗體에 있어서의 磁場에너지( $=\frac{1}{2}Li^2$ )에 對應한다. 따라서 코일 임피이던스의 相似的 관계는, 코일의 磁場, 電流(코일電流와 被試驗體의 涡流)의 分布의 幾何學的 相似라는 점에서 임피이던스에 영향을 주는 諸因子가 서로 독립된 無次元의 量의 組合으로 표시될 수 있다.

입피이던스의 變化量은 다음 식과 같다.

여기서 임피이던스의 數值計算을 용이하게 하고 그 變化率을 圖表上에 나타낼 수 있게 하기 위하여  $L_0$ 에 대한 變化率을 구하다.

$$\frac{R - R_0}{j\omega L_0} + j \frac{\omega L - \omega L_0}{j\omega L_0} = \left( \frac{L}{L_0} - 1 \right) - j \frac{R - R_0}{\omega L_0} \quad \dots \dots \dots (34)$$

이 變化特性을 圖表에 나타낼 때 實軸上의 1을 基準으로 規格化 시켜서 表示하기 위하여 다음과 같이 對應시킨다

여기서  $L_1$  및  $L_2$ 는 (29), (30) 식의 쿼터이 가 이터스의

그림 2에 코일 및 試驗體(円筒導體)의 配置와 치수를 표시한다. 코일의 卷線層의 두께가 작기 때문에 그 두께는 생략하고 치수는 平均直徑  $2a$ , 길이  $\ell$ 로 한다. 또 試驗體가 強磁性일 경우  $\mu$ 를 獨立 파라미터로 취급하여야 하나 非磁性體의 경우는 그럴 필요가 없다. [ $\mu \doteq \mu_0 (= 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m})$ ]

그림의 内部코일과 非磁性管의 組合에 있어서 각 파라미터는 다음의 것을 사용한다

- i)  $(a/b)^2$  : 充填率
  - ii)  $b/t$  : 管두께의 比
  - iii)  $\ell / 2a$  : 코일의 치수比

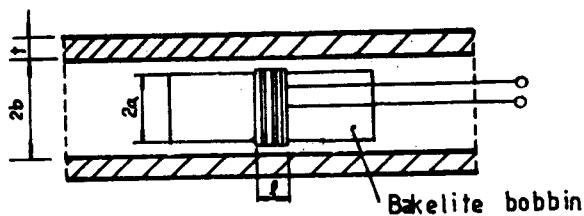


Fig. 2 Dimension and position of coil

(35) 식에서 周波數가 충분히 큰 경우  $X \approx \frac{L}{L_0}$  가 되고, 다음 그림 3 및 7에서  $X \approx 1.0$  을 基準으로 하기 위하여 鋼管의 치수에 따른 實效充填率 ( $\eta$ ) 을 다음의 (36) 식과 같이 表示한다. 이 것은 그림 3 및 7에서 각 曲線이  $X$  軸과 만나는  $X$  的 值에 해당한다.

實驗에서 얻게 된 結果와 比較하기 위하여 内部코일과 円筒導體의 組合(그림2)에서 채택한

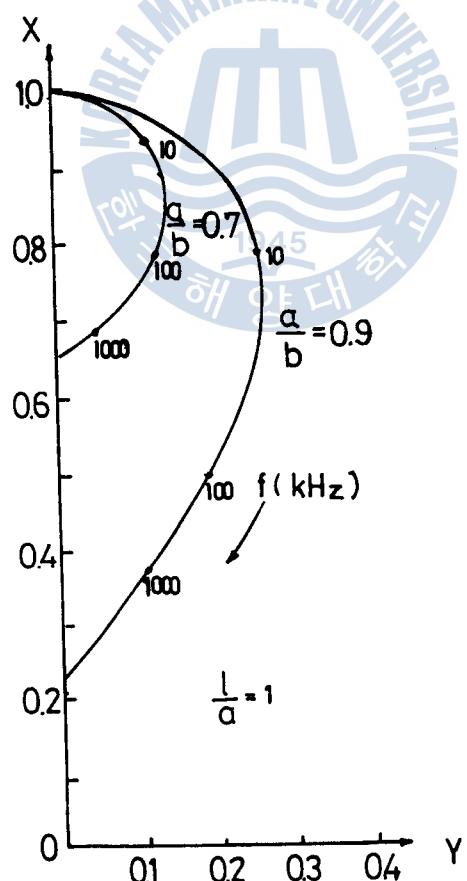


Fig.3 Result of simulation on frequency characteristics of coil impedance

파라미터의  $a/b$ 는 0.7 및 0.9이고  $\ell/a$ 는 1로選定하여 (35)식을適用해서 코일 임피이던스의 周波數 特性에 관하여 시뮬레이션 한 結果는 그림 3과 같다. 이 시뮬레이션에는 電子計算機 (PRIME 550-2)의 SSP (Scientific Subroutine Package) 중 BES I, K 등을 이용하였다.

## 4. 實驗裝置 및 實驗方法

### 4.1 試 驗 管

測定에 사용한 試驗管은 길이 200mm의 STS 304 스텐레스鋼管이며 다음과 같이 内徑 및 外徑이 一定하고 각각 두께가 다른 3種의 管을 機械加工으로 製作하였다. 이 STS 304 스텐레스 鋼管의 機械的 特性과 化學的成分은 다음의 表1과 같다.

加工時 디스토우선을 적게 하기 위하여 研削을 사용하고 加工후의 热處理는 하지 않았으며 試驗管의 比透磁率(非磁性管)은 1로 간주하였다.

- 1) 外徑變化의 試驗管: 内徑은 18.0mm이고, 管두께는 각각 1.5, 2.0, 3.0mm의 管이다.
- 2) 内徑變化의 試驗管: 外徑이 27.0mm이고 管두께는 각각 2.0, 3.0, 4.0mm이다.
- 3) 外面厚 變化的 試驗管: 앞서 사용한 外徑變化 試驗管中 内徑이 18.0mm로 一定하고 管두께 2.0mm의 試驗管 外面에 厚度가 각각 2.0, 5.0, 15.0mm이고 두께가 50% 되는 外面厚을 加工하였다. 이 外面厚의 길이는 150mm로 하였다.

Table.1 Chemical compositions and mechanical properties

Material	Chemical composition (wt %)							Mechanical properties				
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	YP kg/mm <sup>2</sup>	TS kg/mm <sup>2</sup>	E kg/mm <sup>2</sup>	RA %	H <sub>B</sub>
STS304	0.060	0.570	1.462	0.025	0.020	8.320	18.60	37.8	66.4	55.6	57.5	180

### 4.2 涡流検査用 코일

試驗코일은 그림 2에 표시한 바와 같이 卷線部의 直徑(2a)이 각각 17.0, 16.0, 15.0mm인 3種類의 베이크라이트棒에 厚은 絶緣紙를 한層 같은 위에  $\phi: 0.06\text{mm}$ 의 에나멜銅線(대한 전선社 製品)을 單層으로 卷線한 것으로 코일의 길이(卷數N)는 2.5 (33T), 3.5 (46T), 6.0 (80T), 7.0 (92T), 16 (211T)mm등의 종류를 사용하였다.

## 4.3 實驗裝置

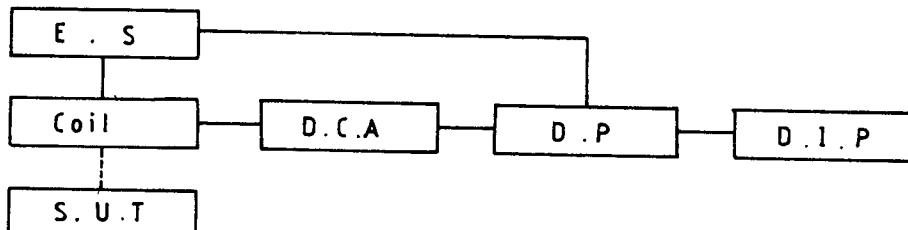


Fig.4 Eddy current test system

그림 4는 潛流検査装置의 일 반적인 構成圖이다. 勵磁部(E.S: excitation source)는 試験體(S.U.T: sample under test) 内部에 들어 있는 勵磁코일에 電流를 供給하는 發振器와 電力增幅器로 構成하였고 連續波의 正弦波를 供給한다. 檢出部(D.C.A: detection circuit and amplifier)에서는 差動接續 부리지回路를 사용하여 필요한 感度로 檢出한다. 信號處理部(D.P: data processing)에서는 필요한 信號를 檢波하여 位相解析을 하기 위하여 勵磁部의 信號를 基準으로 한 同期檢波를 하고 表示部(D.I.P: display)에서는 디지털計器와 오실로스코우프를 사용하였다.

本 實驗은 限定된 試験管의 코일 임피이던스 特性을 測定하여 코일과 管두께의 變化 및 간단한 外面形에 대한 코일 임피이던스 變化的 ディテール을 얻고, 最適試験周波數를 設定하는 것이 目的으로 實驗에 사용한 計測器具는 그림 5와 같다.

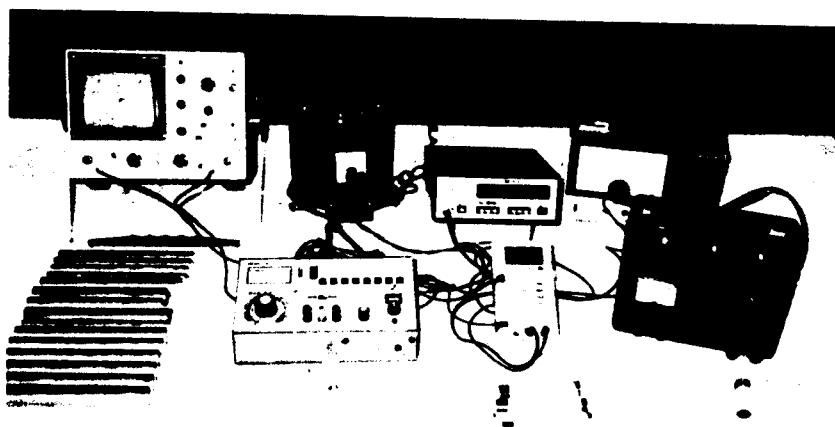


Fig.5 Measuring apparatus

임피이던스 부리지로는 그림 6 과 같은 맥스웰 부리지를 사용하였으며 位相分析은 오실로스코우프의 브라운管에서 리사아주 圖形을 사용하였다. 周波數는 오디오 제너레이터에 의해서 周波數範圍를 5~200 KHz로 하여 周波數카운터에서 정확한 周波數發生이 되도록 노력하였다.

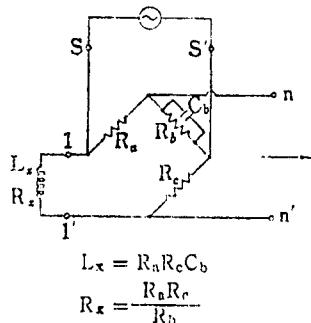


Fig. 6 Maxwell bridge

코일의 位置나 偏心등에 의한 誤差를 줄이도록 노력하여 測定의 最小值는 實效抵抗  $0.001\Omega$  (誤差  $\pm 5\%$ ), 인덕턴스  $0.01\mu H$ (誤差  $\pm 1\%$ ) 이다.

## 5. 實驗結果 및 考察

### 5.1 코일의 치수에 따른 임피이던스 曲線

STS 304 鋼管을 內徑  $18.0\text{mm}$ , 두께( $t$ )  $2.0\text{mm}$ 로 一定히 하고 코일의 치수를 달리했을 때의 임피이던스 測定結果는 그림 7 과 같다.

임피이던스는 空心코일의 임피이던스인 (31) 식을 이용해서 規格化함으로써 實軸(從軸) 上의 1.0點을 基準으로 하여 表示하였다. 이 結果에 의하면 임피이던스曲線은 코일의 치수에 의하여 큰 영향을 받는 것을 알 수 있다. 試驗體가 非磁性管이기 때문에 그 特徵은  $L/L_0$  軸의 下方交點이 實效充填率 (36) 식으로 收斂하고 있는 사실이다.

實效充填率은 公稱의 充填率( $a^2/b^2$ ) 및  $\ell/2a$ 에 의해서 정해진다.

또 임피이던스 曲線의 最大 曲點  $[(R-R_0)/\omega L_0]$ 의 값은 同一試驗品( $2b=18.0\text{mm}$ ,  $t=2.0\text{mm}$ )에서 實效充填率에 比例함을 보여주고 있다.

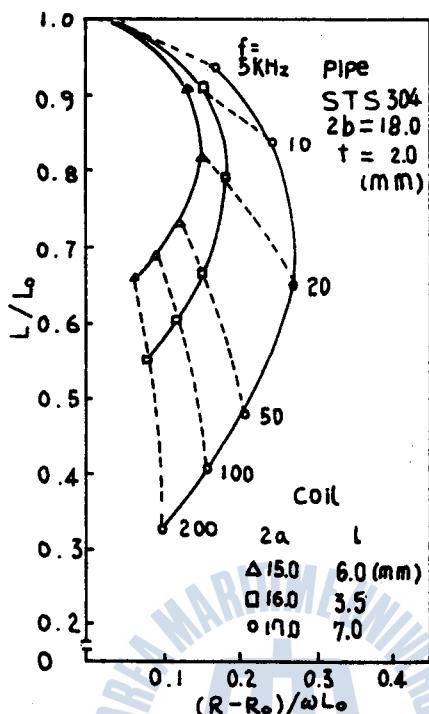


Fig.7 Impedance curve of insidecoil  
in coil size is variable  
( I.D. & t is constant )

#### 5·2 外徑變化에 의한 코일 임피이던스 變化

管의 内徑을 一定히 하고 外徑이 다른 試驗管을 사용하여 外徑變化에 대한 코일 임피이던스의 變化를 測定하였다. 그림 8은 外徑變化에 의해서 管두께 ( $t$ )가 1.5, 2.0, 3.0mm인 경우의 測定結果이다.

그림에서 管두께가 減少함에 따라 코일 임피이던스의 抵抗成分은 增加하고 리액턴스 成分은 낮은 周波數에서 增加하고 높은 周波數에서는 管두께의 增加와 더불어 減少하는 變化를 表示한다. 이러한 變化는 管의 磁場分布와 關係가 있는 것으로 管두께의 減少와 더불어 磁場이 浸透해서 涡流에 의한 抵抗分의 增加를 가져오고 또 낮은 周波數에서는 磁場의 浸透에 의해서 임피이던스가 增加하고 높은 周波數에서는 涡流에 의한 表皮效果와 磁場浸透가 複合되어 두꺼운 管에서의 임피이던스는 減少하게 되는 것으로 料된다.

그림 9의 (a), (b)는 코일 임피이던스의 抵抗成分 및 리액턴스 成分과 周波數의 關係를 管두께를 파라미터로 해서 測定한 것이다. 그림 (a)에서는 각각의 管두께에 대한 抵抗分  $(R-R_0)$  /  $\omega L_0$  이 最大로 되는 周波數, 즉 그림 8의 임피이던스 曲線에서  $(R-R_0)/\omega L_0$  이 最大가 되는

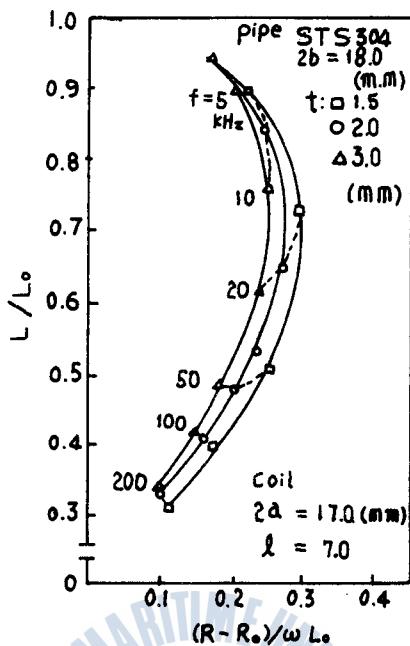


Fig.8 Impedance curve of inside coil in out Dia. is variable  
( I.D. is constant )

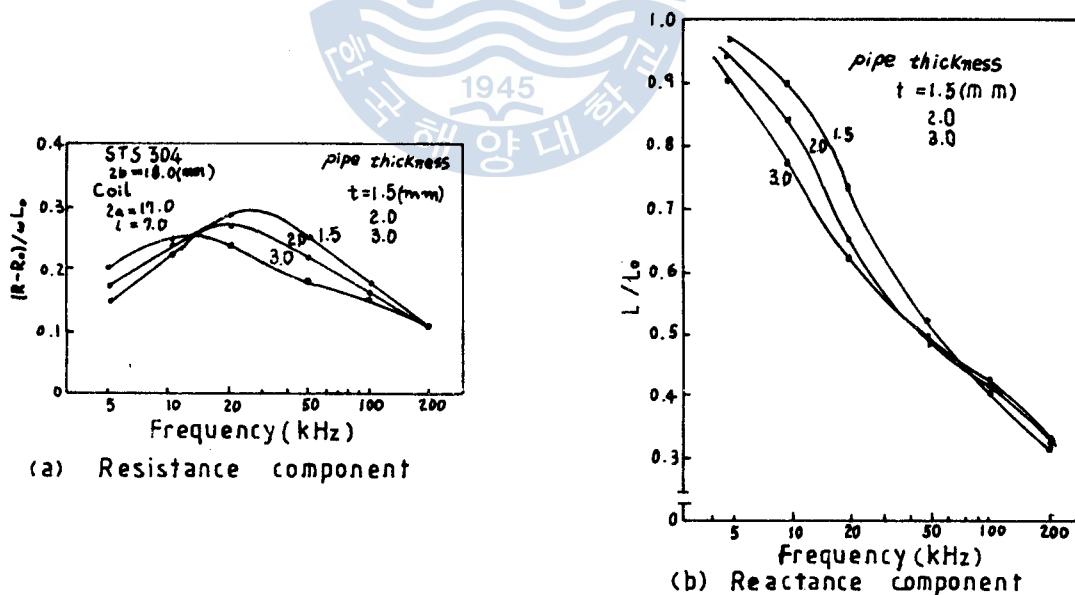


Fig.9 Frequency and coil impedance

周波數 ( $f$ ) 를 표시한 것이다. 管두께  $t = 1.5 \text{ mm}$ 의 경우는 약 30 KHz,  $t = 2.0 \text{ mm}$ 에서는 약 20 KHz,  $t = 3.0 \text{ mm}$ 에서는 약 10 KHz로 测定되었다. 이들 周波數 ( $f$ ) 는 이 範圍에서 대략  $t$ 에 反比例하는 關係가 있는 것을 알 수 있다.

### 5·3 内徑變化에 의한 코일 임피이던스變化

管의 外徑을 一定히 하고 内徑을 變化시켜 管두께가 減少한 경우의 코일의 임피이던스를 内徑變化 試驗管을 사용하여 測定하였다. 測定은 역시 코일을 管과 同心의 位置에 놓고 한 것이다.

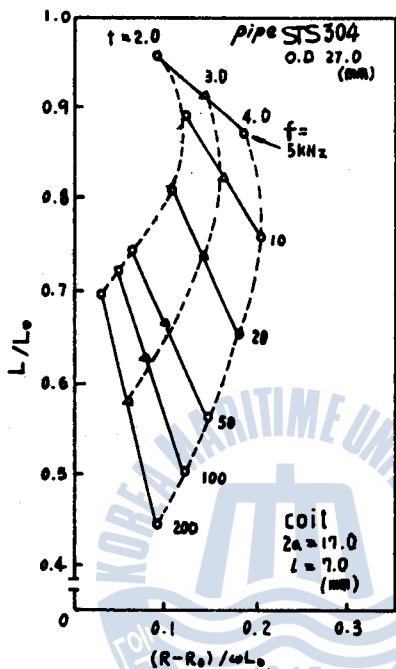


Fig.10 Impedance curve of inside coil  
in I.D. is variable  
(O.D. is constant )

그림 10은 外徑이 一定하고 内徑이 다른 鋼管에 대한 코일 임피이던스 曲線이다. 이 경우에 是 内徑變化에 의해 管두께와 充填率( $a^2/b^2$ )이 동시에 變化하나 充填率의 영향이 더 크다는 것은 그림 8과 비교하여 알 수 있다.

### 5·4 外面흡에 의한 코일 임피이던스 變化와 코일의 치수

코일의 치수와 管의 缺陷과의 關聯을 調査하기 위하여 内徑 18.0 mm이고 管의 두께가 2.0 mm인 試驗管에 흡폭 ( $L$ )이 각각 2, 5, 15 mm의 外面흡(두께 감소 50%)을 加工한 試驗片과 直徑이 17.0 mm이고 길이 ( $\ell$ )가 2.5, 7.0, 16.0 mm인 코일을 사용하여 周波數 20 KHz에 있어서의 코일 임피이던스 變化特性을 測定하였다.

그림 11에 그 測定結果를 表示한다.

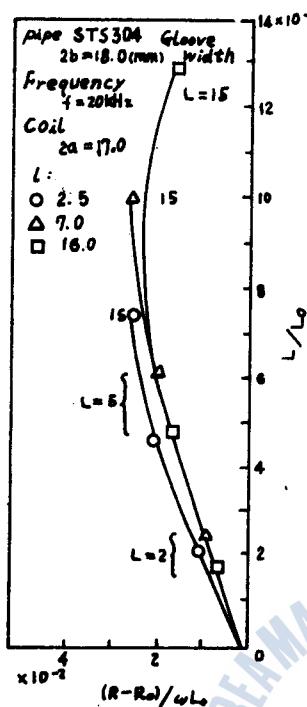


Fig.11 Range of O.D. decrease and coil impedance change

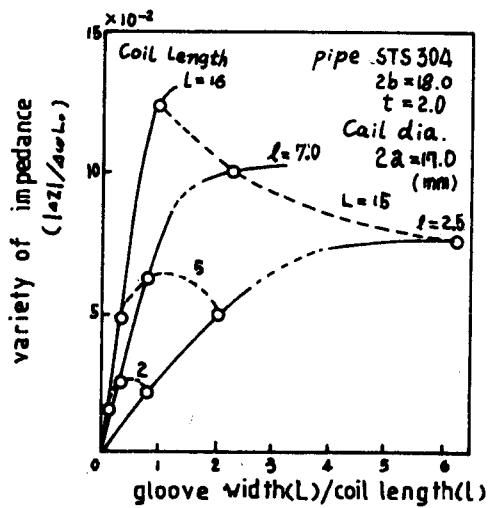


Fig.12 Range of O.D. decrease and coil length impedance change

그림 11에서 코일 임피이던스 變化의 크기는 흠풀 및 코일길이와 더불어 增大한다. 또 位相에 대해서는 흠풀 및 코일길이에 의한 差가  $10^\circ$  정도로서 적은 편이다. 따라서 位相變化에 미치는 흠풀 및 코일길이의 영향은 적은 것으로 생각할 수 있다.

그림 12는 코일 임피이던스 變化의 絶對值와 코일 一外面 흠풀의 치수比  $L/l$ 의 관계를 나타낸다. 코일 임피이던스 變化는  $L/l$  외에 코일의 實效充填率의 영향을 크게 받고 있다. 그림 12로부터 일반적으로 짧은 缺陷에 대해서도 公稱充填率  $a^2/b^2$  이 일정할 경우 코일의 길이 ( $l$ )가 어느 程度 큰 쪽이 外面에 있어서의 小區域의 두께 減少를 檢出하는데 適合하다는 것을 알 수 있다.

### 5.5 試驗周波數의 選定에 대한 考察

지금까지의 여러가지 코일 임피이던스 試驗에서 알게 된 바와 같이 涡流探傷試驗에 있어서 試驗周波數는 試驗片의 特性이나 缺陷의 檢出感度, 또는 信號 雜音比의 向上을 위해서 중요한 要素라 하겠다. 따라서 그 選定에는 다음과 같은 方向으로 考察되어야 할 것이다.

- (1) 코일 임피이던스 變化(絕對值 또는 各成分)을 最大로 한다. (指示의 最大化)
- (2) 缺陷, 雜音에 대한 코일 임피이던스 變化의 位相角을  $90^\circ$  (直交)로 한다.(同期檢波에 의한 信號雜音比의 向上)
- (3) 缺陷의 치수에 의한 位相變化 檢出의 最適化를 도모한다.

이상 3 가지의 考察方向을 고려하여 具體的으로 試驗周波數 選定을 檢討하여 본다.

(1) 外徑變化에 의한 두께減少에 있어서 그림 9에서 表示한 것처럼 코일 임피이던스 變化를 最大로 하는 周波數가 存在한다. 그리고 그 周波數는 管의 두께  $t$ 에 反比例하고 있다. 또 코일 임피이던스 變化의 各成分, 絶對值를 最大로 하는 周波數는 파라미터  $b/t$ 에 比例하는 直線 變化를 나타내는 경향이 있다.

內徑變化에 의한 두께減少에 있어서는 코일 임피이던스 變化가 周波數와 더불어 增大하고 最大值를 갖지 않는다. 따라서 內徑變化檢出에는 높은 周波數가 適合하다.

(2) 코일 임피이던스 變化의 位相角을 고려한 周波數의 選定을 檢討하기 위하여 그림 13에 지금까지 求한 內徑變化, 外徑變化에 의한 코일 임피이던스 變化의 位相과 周波數의 關係를 表示하였다.

指示信號를 同期檢波에 의해서 判別하는 경우 그 位相差가  $90^\circ$  일때 信號雜音比를 가장 向上 시킬 수 있다. 여러가지 狀況에서 同期檢波에 의한 位相解析에 最適의 試驗周波數로서는 그림

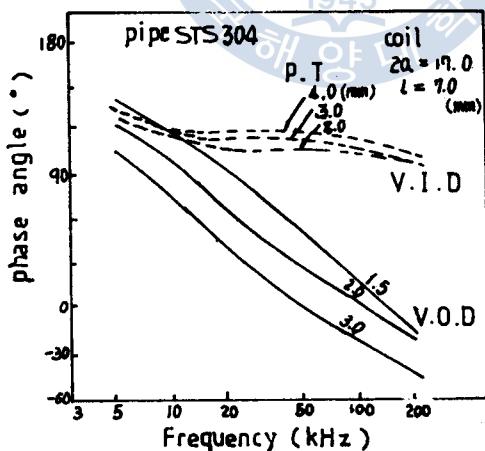


Fig.13 Phase angle of coil impedance change and frequency

13에서 各 因子의 變化에 대한 位相角의 差가  $90^\circ$  附近의 周波數를 選定하면 될 것이다.

(3) 管의 두께 감소에 의한 位相變化는 周波數와 管두께에 依存한다. 특히 外徑變化의 管의 두께 감소에 의한 位相變化幅을 最大로 하는 周波數는 他의 最適周波數와 比較해서 매우 높은 周波數임을 알 수 있다. 경우에 따라서는 外面의 두께 감소量을 位相變化의 指示로 求하는 試驗方法도 考慮될 수 있을 것이다.

## 6. 結論

円筒導體 内部에 들어 있는 코일의 임피이던스 特性에 대해서 理論解析을 하고 선택된 파라미터를 써서 電子計算機에 의한 시뮬레이션을 하였으며 鋼管의 外徑 및 內徑의 變化에 의한 管두께의 變化 및 外面 흠의 變化등에 의한 코일의 임피이던스 特性變化와 코일의 치수에 의한 特性變化등을 STS 304 스텐레스鋼管(非磁性管)을 이용하여 測定하였다. 또 位相特性에서 涡流 探傷試驗에 있어서의 最適試驗 周波數에 대하여 檢討하였다. 그 結果를 綜合해 보면

- 1) 鋼管에 있어서의 内部코일의 임피이던스 對 周波數 特性 曲線은 實效充填率과 코일 길이 및 管두께比에 의해서 特性이 결정된다.
- 2) 外徑變化(두께減少)에 의한 코일 임피이던스 變化는 管두께 및 周波數에 의해서 變化하고, 임피이던스의 각 成分의 變化가 最大로 되는 周波數는 管두께比  $b/t$ 에 비례한다. 또 位相變化의 幅은 周波數와 더불어 增加하고 비교적 높은 周波數에서 最大로 된다.
- 3) 內徑變化(두께減少)에 의한 코일 임피이던스의 絶對值의 變化는 周波數가 높을수록 커지고 코일의 치수에 영향을 받으나 임피이던스의 位相의 變化는 充填率과 管두께의 영향을 받지 않는다.
- 4) 外面 흠에 의한 코일 임피이던스의 絶對值의 變化는 흠폭, 코일 길이의 영향을 크게 받으나 位相에서는 그 差가 적다.
- 5) 코일 임피이던스 變化를 最大로 하는 試驗周波數는 外徑變化, 內徑變化 등의 測定 對像에 따라 다르며 最適值가 存在한다.

本研究에서 선택한 파라미터의 範圍안에서는 涡流探傷 試驗의 結果에서 以上과 같은 結論을 얻었으나 앞으로의 廣範圍한 試驗에 應用하기 위하여는 코일 임피이던스 特性的 보다 광범한 데 이터의 收集이 要求된다고 하겠다.

## 參 考 文 獻

- 1) 屋上: 涡流検査概論, 伸銅技術研究會 vol 9, No. 1 (1970) p. 20~35
- 2) H. D. Hughes: Phil Mag 5~8 p. 50(1879)
- 3) F. Förster: Nondestructive Testing Handbook, Vol. II, Section 36~42(The Ronald Press Co New York, 1959)
- 4) F. Förster: Proc, 8th World Conf, NDT, (1976), IB·1
- 5) G. Labbe, et, al' : Proc. 8th World Conf. NDT (1976), IB·1
- 6) J. J. Davis: Materials Evaluation, 38-1 (1980), p.62
- 7) J. C. Coachman, et. al.,: British J. NDT. 20-3 (1978), p. 128
- 8) N. Nielsen: Proc. 9th World Conf. NDT (1979), 2A·3
- 9) W. Stam : British J. NDT. 20-2 (1978), p. 76
- 10) 屋上: 導體に近接した有限長ソレノイドコイルの解析, 電氣學會誌 88(1968), 1894~1902
- 11) C. V. Dodd, et. al : J. Applied Physics, 36-6 (1968), p. 28, 29

# 鑄鐵의 아아크 熔接時 熔接條件이 熔接部의 組織및 切削性에 미치는 影響에 關한 研究

車道鉉

Study on the Effect of Welding Condition on  
the Micro-Structure and Cuttability of Welded  
Part in Arc Welding for Gray Cast Iron.

*Cha Do-hyun*

.....< 目次 >.....	
Abstract	
1.	序論
2.	實驗方法
2.1	熔接材料 및 試驗片
2.2	實驗裝置 및 實驗方法
2.2.1	熔接方法
2.2.2	切削抵抗의 測定
2.2.3	切削面粗度 測定法
2.2.4	熔接部位의 顯微鏡 組織
3.	實驗結果 및 考察
3.1	熔接條件에 따른 顯微鏡 組織變化
3.2	熔接條件에 따른 硬度變化
3.3	熔接條件에 따른 切削面 粗度의 變化
3.4	熔接條件에 따른 切削抵抗의 變化
4.	結論
参考文獻	