

穿孔법에 의한 殘留應力 測定方法의 改善에 關한 研究

金 東 哲

A Study on the Modified Hole-drilling
Method for Determining Residual Stresses

Dong-chul Kim



〈目 次〉

Abstract

記號說明

1. 序 論
 2. 穿孔법에 의한 殘留應力의 測定
 3. 孔徑의 變化를 利用한 殘留應力의 測定
 4. 實驗方法
 - 4·1 試驗材 및 試驗片
 - 4·2 實驗裝置 및 方法
 - 4·3 解放스트레인 測定
 5. 實驗結果 및 考察
 6. 結 論
- 參考文獻

Abstract

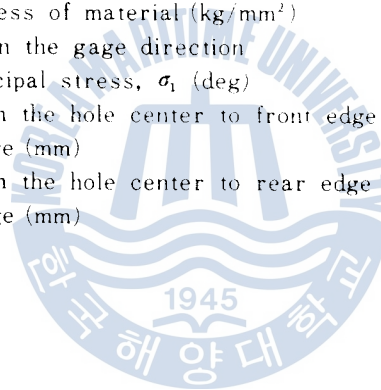
In general, two principal stresses, σ_1 , σ_2 and the direction of σ_1 , θ should be determined for measuring residual stresses in plane stress state. Naturally, three informations are necessary for deciding three unknowns- σ_1 , σ_2 , θ -and therefore three strain gages are required for determining residual stresses at one point.

In this paper, we tried to measure the residual stresses of one point with only two strain gages by drilling the hole of different diameters twice at that point and by detecting relaxation strains for each hole-drilling. We presented also the formulas for determining the residual stresses from relaxation strains detected by strain gages in each hole-drilling.

We carried out experiments, determined principal stresses and the direction of σ_1 for the specimens applied with specified uniform stress, and compared experimental results with the values calculated by formulas presented in this paper. The values calculated by formulas presented in this paper are always a little greater than the experimental results.

記號說明

- C_d = drilling clearance (mm)
 d = diameter of hole (mm)
 E = modulus of elasticity (kg/mm^2)
 ϵ_v = Net relaxation strain (μs)
 ϵ_T = measured total relaxation strain (μs)
 ϵ_m = relaxation strain due to machining (μs)
 ϵ_p = relaxation strain due to local plastic flow (μs)
 l = Strain gage length (mm)
 ϕ_i = diameter of i th hole-drilling (mm)
 ν = poisson's ratio of material
 σ_1, σ_2 = principal stresses (kg/mm^2)
 σ_y = the yield stress of material (kg/mm^2)
 θ = angle between the gage direction
 and the principal stress, σ_1 (deg)
 r_1 = distance from the hole center to front edge
 of strain gage (mm)
 r_2 = distance from the hole center to rear edge
 of strain gage (mm)



1. 序 論

應力을 받고 있는 材料에 구멍을 뚫으면 구멍 周圍에 應力의 一部가 解放되면서 解放 스트레인(relaxation strain)이 發生한다. 이 解放스트레인을 檢出해 내서 殘留應力으로 換算하는 方法이 穿孔法에 의한 殘留應力 測定方法인데, 이때 解放스트레인의 檢出 方法으로써 보통 스트레인게이지를 使用한다. 이 方法에 의한 殘留應力의 測定은 比較的 적은 施設로써 손쉽게 操作할 수 있기 때문에 많은 사람들에 의하여 研究되었고^{1), 2), 3), 4)} 오늘날 널리 利用되고 있다.

穿孔法에 의한 殘留應力의 測定은 表面應力의 測定으로 表面에 垂直한 方向의 應力은 無視($\sigma_z=0$)되고, 表面應力의 主應力 σ_1 , σ_2 와 主應力의 方向 θ 을 決定하게 된다. 그런데 2個의 主應力과 主應力의 方向, 都合 3個의 未知數를 決定하는 데는 3個의 式이 必要하고, 따라서 一點의 應力을 測定하는 데는 3個의 스트레인게이지를 붙여야 한다.

勿論 스트레인 로세트(strain rosette)를 쓸 경우에는 3葉짜리 로세트를 써야 한다.

本 研究에서는 直徑이 다른 구멍을 같은 자리에 두 번 뚫음으로써 스트레인게이지를 2個만 붙이고도 3個의 未知數 σ_1 , σ_2 , θ 를 求할 수 있는 理論式을 提示하고, 이를 實驗에 의하여 究明하였다. 實驗은 本 研究室에서 考案·製作한 引張機에 試片을 걸어놓고 一定한 應力을 加한 后, 이 試片의 應力을 本 研究에서 提示한 孔徑의 變化를 利用한 穿孔法으로 測定하여 實際 加해준 應力과 比較하였다.

2. 穿孔法에 의한 殘留應力의 測定

穿孔法에 의한 殘留應力의 測定은 殘留應力을 測定하고자 하는 個所에 一定直徑의 구멍을 뚫고 구멍 周圍의 解放스트레인을 스트레인게이지로 檢出하여 應力으로 換算하는 方法으로 다음에 이를 紹介한다.^{1), 2), 3), 4)}

스트레인게이지로 檢出할 수 있는 解放스트레인은 半徑方向 解放스트레인과 圓周方向 解放스트레인이 있는데 이 中 圓周方向 解放스트레인은 殘留應力測定에 適合하지 않음이 證明되었으므로⁵⁾ 半徑方向의 解放스트레인으로 殘留應力을 測定한다.

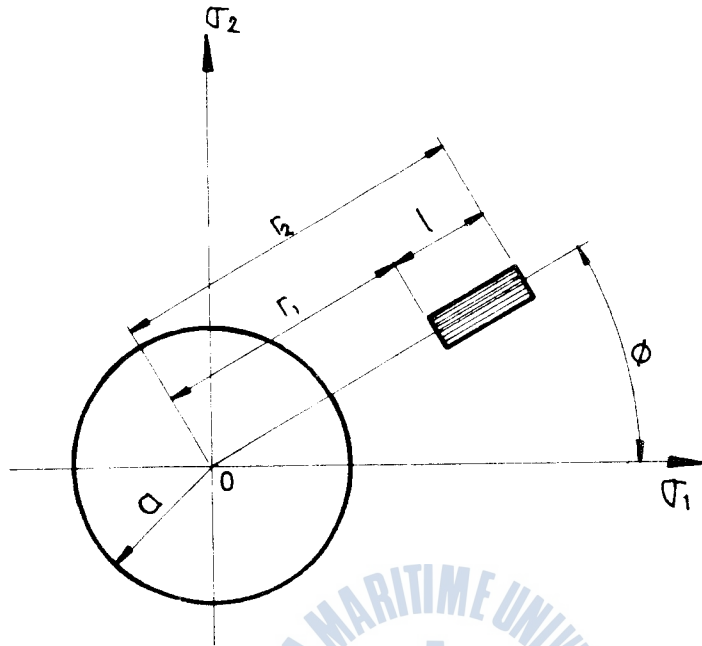


Fig. 1. Relative situation of strain gage for measuring relaxation strain in direction φ .

Fig. 1에 보이는 바와 같이, 殘留應力을 測定하고자 하는 點 0의 主應力을 σ_1, σ_2 라 하고, σ_1 의 方向과 反時計方向으로 φ 의 角度를 이루는 方向으로 測定點 0에서 r_1 의 거리에 길이 l 인 스트레인지지를 半徑方向으로 붙여 놓고, 測定點 0에 半徑 a 인 구멍을 뚫었을 때 스트레인지지에 檢出될 解放스트레인 i 는 다음 式과 같다.

$$i = \frac{A}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B}{E} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\varphi \quad (1)$$

여기서

$$A = -\frac{1+\nu}{2} \cdot \frac{a^2}{r_1 r_2}$$

$$B = \frac{2a^2}{r_1 r_2} \left(-1 + \frac{1+\nu}{4} a^2 \frac{r_1 + r_1 r_1 + r_2^2}{r_1^2 r_2^2} \right)$$

ν : 포아송比

a : 구멍의 半徑

E : 彈性係數

$$r_2 = r_1 + l$$

測定點 0의 應力解析을 위해 2個의 主應力 σ_1, σ_2 와 主應力의 方向, 都合 3個의 未知數를 求하려면 3個의 스트레인지지를 測定點 周圍에 붙여 놓고 測定點 0에 구멍을

뚫어 各各의 스트레인게이지로부터 檢出된 解放스트레인을 式(1)에 代入하여 3個의 式을 만들고 이것을 聯立시켜 풀면 3個의 未知數(2個의 主應力과 主應力의 方向)를 求할 수 있는데 이를 보이면 다음과 같다.

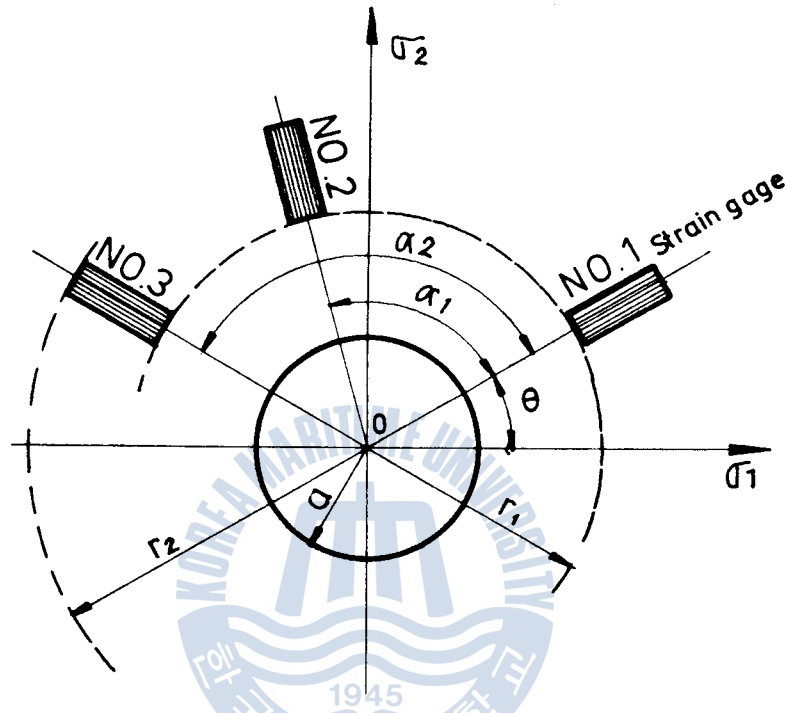


Fig. 2. Arrangement of strain gages for measuring stresses at point O (3-gage method.)

Fig. 2에 보이는 바와 같이 1번 스트레인게이지의 方向이 σ_1 의 方向과 反時計 方向으로 이루는 角을 θ ($-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$)라 하고, 2번 스트레인게이지의 方向이 1번 스트레인게이지의 方向으로부터 反時計 方向으로 이루는 角度를 α_1 , 3번 스트레인게이지의 方向이 1번 스트레인게이지의 方向과 反時計 方向으로 이루는 角度를 α_2 라 하고, 測定點 O에 半徑 a 의 구멍을 뚫을 때 1번 스트레인게이지에 檢出될 解放스트레인 i_1 은 式(1)에서 $\varphi = \theta$ 를 代入하면 되고, 2번 및 3번 스트레인게이지에 檢出될 解放 스트레인 i_2 및 i_3 는 式(1)에서 $\varphi = \theta + \alpha_1$ 및 $\varphi = \theta + \alpha_2$ 를 各各 代入하면 된다.

$$\begin{aligned}
 i_1 &= \frac{A}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B}{E} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \\
 i_2 &= \frac{A}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B}{E} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos (2\theta + 2\alpha_1) \\
 i_3 &= \frac{A}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B}{E} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos (2\theta + 2\alpha_2)
 \end{aligned} \tag{2}$$

式(2)를 聯立시켜 풀면 $\theta, \sigma_1, \sigma_2$ 를 求할 수 있다.

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{(i_1 - i_3) \cos 2\alpha_1 + (i_2 - i_1) \cos 2\alpha_2 + (i_3 - i_2)}{(i_1 - i_3) \sin 2\alpha_1 + (i_2 - i_1) \sin 2\alpha_2} \right] \quad (3)$$

$$-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$$

$$\sigma_1 = \frac{EBi_1 (\cos 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_1 \tan 2\theta) - EBi_2 - AE(i_2 - i_1) \sec 2\theta}{2AB (\cos 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_1 \tan 2\theta - 1)} \quad (4)$$

$$\sigma_2 = \frac{EBi_1 (\cos 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_1 \tan 2\theta) - EBi_2 - AE(i_2 - i_1) \sec 2\theta}{2AB (\cos 2\alpha_1 - \sin 2\alpha_1 \tan 2\theta - 1)} \quad (5)$$

式(3)에서 主應力의 方向 θ 는 어떠한 境遇이든지 唯一하게 決定된다. 여기서 한 가지 注意할 點은 α_1, α_2 가 다 같이 $n \times 90^\circ$ (n 는 整數)가 되어서는 안 된다. 왜냐하면 式(3)에서 알 수 있는 바와 같이 α_1, α_2 가 다 같이 $n \times 90^\circ$ 가 되면 θ 를 決定할 수 없기 때문이다 (不能). 만약 $i_1 = i_2 = i_3 = i$ 이면 式(3)의 大괄호 안이 0이 되고 θ 는 無數히 많게 된다. 即 모든 方向이 主應力의 方向이 되고 이때의 主應力은 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{Ei}{2A} \quad (6)$$

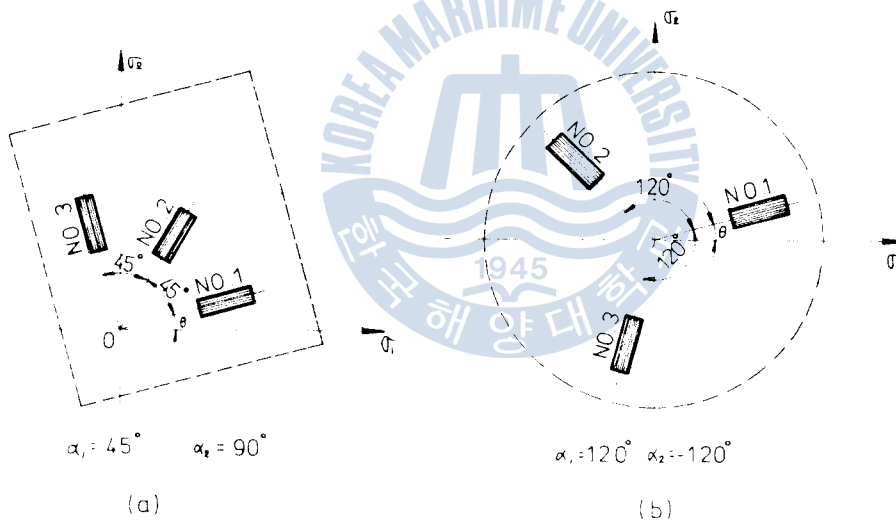


Fig. Strain rosettes

特別히 $\alpha_1 = 45^\circ, \alpha_2 = 90^\circ$ 이면 Fig. 3(a)에 보이는 바와 같은 스트레인로세트 (strain rosette)가 되고, 이 때의 $\theta, \sigma_1, \sigma_2$ 는 다음과 같다.

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{i_1 + i_3 - 2i_2}{i_1 - i_3} \quad -45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ \quad (7)$$

$$\sigma_1 = \frac{EBi_1 \tan 2\theta + EBi_2 - AE(i_2 - i_1) \sec 2\theta}{2AB (1 + \tan 2\theta)} \quad (8)$$

$$\sigma_2 = \frac{EBi_1 \tan 2\theta + EBi_2 + AE(i_2 - i_1) \sec 2\theta}{2AB(1 + \tan 2\theta)} \quad (9)$$

또한 Fig. 3(b)에 보이는 바와 같은 스트레인로세트에서는 $\alpha_1 = 120^\circ$, $\alpha_2 = -120^\circ$ 가 되며, 이 때의 θ , σ_1 , σ_2 는 다음과 같다.

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(i_2 - i_3)}{(2i_1 - i_2 - i_3)} \quad (10)$$

$$-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$$

$$\sigma_1 = \frac{EBi_1(\sqrt{3} \tan 2\theta - 1) - 2EBi_2 + 2AE(i_2 - i_1) \sec 2\theta}{2AB(\sqrt{3} \tan 2\theta - 3)} \quad (11)$$

$$\sigma_2 = \frac{EBi_1(\sqrt{3} \tan 2\theta - 1) - 2EBi_2 - 2AE(i_2 - i_1) \sec 2\theta}{2AB(\sqrt{3} \tan 2\theta - 3)} \quad (12)$$

3. 孔徑의 變化를 利用한 殘留應力의 測定

앞에서 보인 바와 같이 殘留應力의 測定에 있어서 2個의 主應力 σ_1 , σ_2 와 σ_1 의 方向을 決定하는 角度 θ , 即 3個의 未知數를 求하기 위해서는 3個의 스트레인게이지가 必要하였다. 그러나 本 研究에서는 2個의 스트레인게이지만 가지고도, 3個의 未知數 σ_1 , σ_2 , θ 를 求할 수 있는데 이를 보이면 다음과 같다.

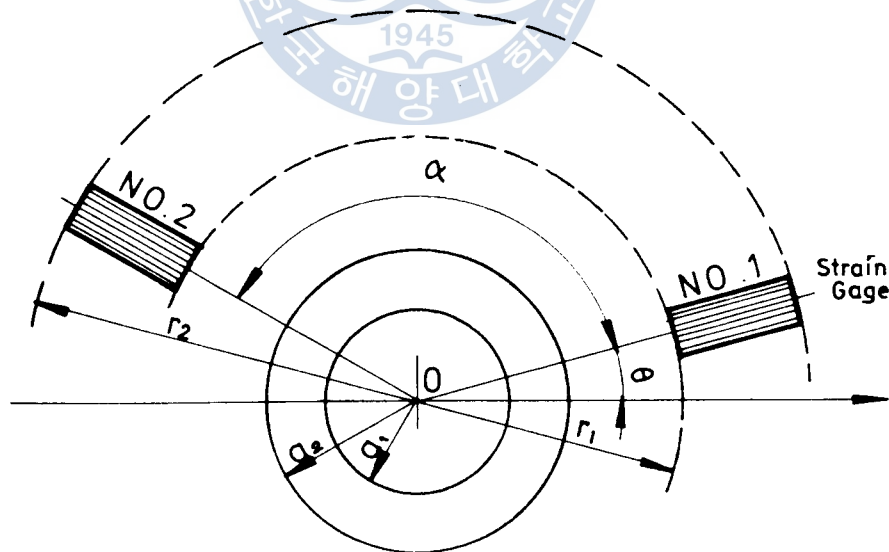


Fig. 4. Arrangement of strain gages for measuring stresses at point O (2-gage method.)

Fig. 4에 보이는 바와 같이 1번 스트레인게이지의 方向이 σ_1 의 方向과 反時計向으로 이루는 角을 θ ($-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$)라 하고, 2번 스트레인게이지의 方向이 1번 스트레인게이지의 方向과 反時計向으로 이루는 角을 α 라 한다. 測定點 0에 半徑 a_1 인 구멍을 뚫었을 때 1번 및 2번 스트레인게이지에 檢出된 解放스트레인 i_1 및 i_2 는 式(1)에 $\varphi = \theta$ 및 $\varphi = \theta + \alpha$ 를 代 入함으로써 다음과 같이 된다.

$$i_1 = \frac{A_1}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B_1}{E} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \quad (13)$$

$$i_2 = \frac{A_1}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B_1}{E} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos (2\theta + 2\alpha) \quad (14)$$

여기서 $A_1 = -\frac{1+\nu}{2} \cdot \frac{a_1^2}{r_1 r_2}$

$$B_1 = \frac{2a_1^2}{r_1 r_2} \left\{ -1 + \frac{1+\nu}{4} a_1^2 \frac{r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2}{r_1^2 r_2^2} \right\}$$

또한 測定點 0을 中心으로 半徑 a_2 ($a_2 > a_1$)인 구멍을 뚫었을 때 1번 및 2번 스트레인게이지에 檢出된 解放스트레인 i_3 및 i_4 는 다음과 같이 된다.

$$i_3 = \frac{A_2}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B_2}{E} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \quad (15)$$

$$i_4 = \frac{A_2}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{B_2}{E} (\sigma_1 - \sigma_2) \cos (2\theta + 2\alpha) \quad (16)$$

여기서

$$A_2 = -\frac{1+\nu}{2} \cdot \frac{a_2^2}{r_1 r_2}$$

$$B_2 = \frac{2a_2^2}{r_1 r_2} \left\{ -1 + \frac{1+\nu}{4} a_2^2 \frac{r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2}{r_1^2 r_2^2} \right\}$$

그러고 i_1 , i_2 , i_3 , i_4 사이에는 다음과 같은 關係가 成立한다.

$$\frac{i_1 - i_2}{i_3 - i_4} = \frac{B_1}{B_2} \quad (17)$$

式 (13), (14), (15), (16)의 4個中 任意로 3個를 取하여 이를 聯立시켜 풀면 σ_1 , σ_2 및 θ 를 求할 수 있는데 4式中 어떻게 3個를 取하는 結果는 마찬가지이다. 여기서는 式(13), (14), (15)를 取하여 이들을 聯立시켜 σ_1 , σ_2 , θ 를 求하면 다음과 같다.

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{\cot 2\alpha - \frac{A_1 B_2 (i_2 - i_1) + B_1 (A_1 i_3 - A_2 i_2)}{B_1 (A_1 i_3 - A_2 i_1) \sin 2\alpha}}{\dots} \right] \quad (18)$$

$$-45^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$$

$$\sigma_1 = \frac{E (i_1 B_2 - i_3 B_1) + E (A_1 i_3 - A_2 i_1) \sec 2\theta}{2 (A_1 B_2 - A_2 B_1)} \quad (19)$$

$$\sigma_2 = \frac{E (i_2 B_2 - i_4 B_1) - E (A_1 i_3 - A_2 i_1) \sec 2\theta}{2 (A_1 B_2 - A_2 B_1)} \quad (20)$$

여기서 α 는 $n \times 90^\circ$ (n 는 整數)가 되어서는 안 된다. 왜냐하면 α 가 $n \times 90^\circ$ 가 되면 式(18)에서 보는 바와 같이 θ 를 定할 수가 없기 때문이다.

4. 實驗方法

4-1 試驗材 및 試驗片

本 實驗에 使用된 試驗材는 國產一般構造用 壓延鋼板 두께 3mm의 SB41이며, 그 化學的成分과 機械的性質은 Table. 1과 같다.

Table. 1 Chemical Compositions and mechanical Properties (SB41)

Chemical Compositions (wt %)								Mechanical Properties		
C	Mn	P	Si	Ni	Cr	Mo	Al	Yield Strength (kg/mm ²)	Tensile Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
0.18	0.61	0.008	0.18	0.015	0.012	0.01	0.034	30	45	28

試驗片의 採取는 試片引張方向이 壓延方向과 같게 하여 母材를 310×80mm로 剪斷后, Fig. 5와 같이 機械加工하였다. 試驗片 製作過程에서 發生할 수도 있는 殘留應力을 除去하기 위하여 炉内풀림 熱處理를 實施하여 試片으로 使用하였다.

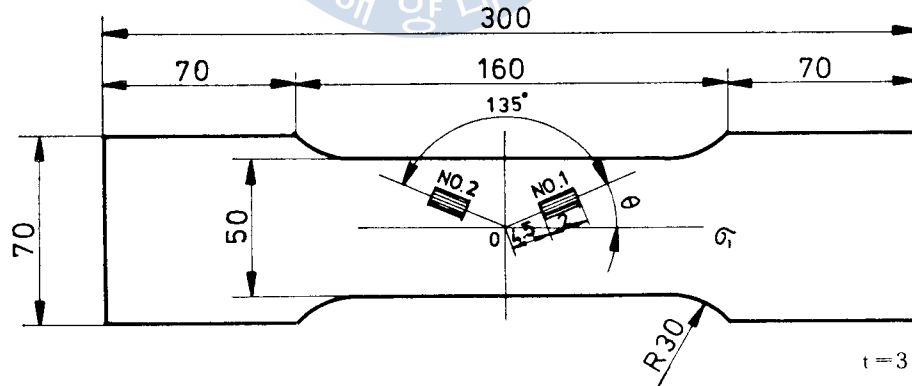


Fig. 5. Configuration and dimensions of specimens.

Fig. 5는 試片의 形狀과 치수 및 스트레인게이지의 配置들을 나타낸다. 使用된 스트레인게이지의 길이는 2mm이고, 測定點 0에서 4.5mm되는 곳에 半徑方向으로 붙였다.

또한 1번 스트레인게이지와 2번 스트레인게이지와의 角度 α 는 135° 로 하였다. 여기서
에 쓰인 스트레인게이지는 SAN-EI社 製品인 *NII-FA-2-120*을 使用하였다.

4-2 實驗裝置 및 方法

實驗에 使用한 試驗機는 本 研究室에서 考案製作한 引張機로서 이것의 概略圖 및 外觀
을 Fig. 6과 Fig. 7에 보인다. 척(chuck)에 Fig. 5의 試片을 물리고 핸들(handle)을

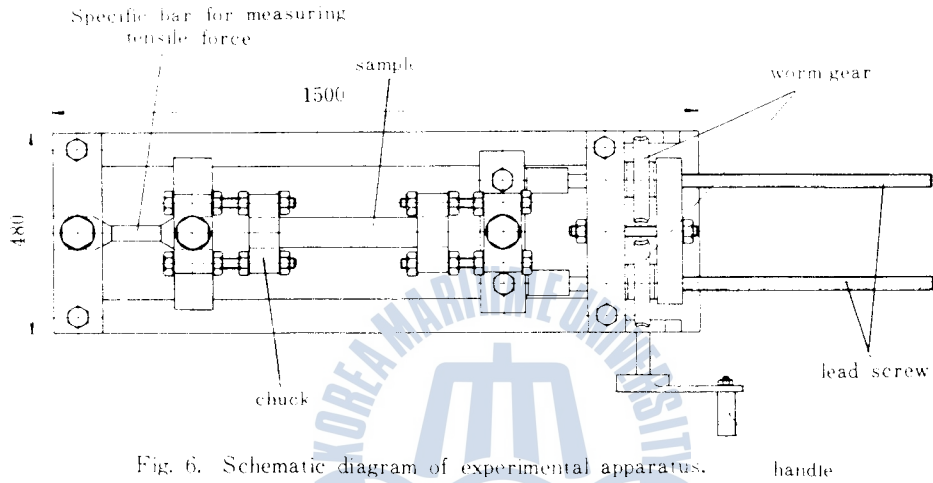


Fig. 6. Schematic diagram of experimental apparatus.



Fig. 7. General view of experimental apparatus.

돌리면 이 運動이 2 쌍의 워엄 및 워엄기어(worm and worm gear)를 通하여 2 個의 암나사에 傳達된다. 2 個의 암나사가 돌아가면 이와 맞물린 2 個의 리드스크류(lead screw)를 當겨 試片에 引張應力을 加하게 된다. 試片의 引張應力은 丸棒(specific bar for measuring tensile force)의 表面에 스트레인게이지를 붙여 測定하였다. 이렇게 하여 試片에 一定한 單純引張應力 σ_1 을 加하여 놓고, 半徑 a_1 이 1.5mm인 구멍을 鐫어 1번 및 2번 스트레인게이지를 檢出된 解放스트레인 i_1, i_2 를 스트레인미터(TOYO社 製品, MD-6E-F)로 測定하고, 이어서 半徑 a_2 가 3mm인 구멍을 鐫고 1번 및 2번 스트레인게이지에 檢出된 解放스트레인 i_3 및 i_4 를 測定하였다.

4-3 純粹解放 스트레인 測定

穿孔에 의하여 스트레인게이지에 檢出된 解放스트레인은 全部가 作用應力에 의한 解放스트레인이 아니고, 여기에는 穿孔時 機械加工으로 因한 스트레인 成分과 구멍 周圍의 局部的인 降伏으로 因한 解放스트레인 成分 등이 包含되어 있다. 따라서 作用應力에 의한 純粹解放스트레인을 얻기 위해서는 다음과 같이 이들의 影響을 除去해야 한다.⁵⁾

$$\epsilon_N = \epsilon_T - \epsilon_m - \epsilon_p \quad (21)$$

여기서

ϵ_N : 作用應力으로 因한 純粹解放스트레인

ϵ_T : 實測된 全解放 스트레인

ϵ_m : 穿孔時 機械加工으로 因한 스트레인 成分

ϵ_p : 구멍 周圍의 局部的인 降伏으로 因한 解放스트레인 成分이다.

無應力狀態에서 試片에 스트레인게이지를 붙여 놓고 구멍을 鐫을 때, 이때 檢出되는 스트레인은 應力이 없기 때문에 全部가 機械加工에 의한 스트레인이라고 看做된다. 따라서 機械加工으로 因한 스트레인 ϵ_m 를 測定해 내기 위하여, 試片을 無荷重狀態에서 固定시켜 놓고, 測定點으로부터 半徑方向으로 5mm인 位置에 스트레인게이지의 先端이 오도록 붙여 놓고 測定點에 直徑을 1mm에서 7mm까지 段階的으로 구멍을 鐫어, 이때 나타나는 스트레인 ϵ_m 을 drilling clearance, C_d 와 關聯지어 Table. 2에 나타냈다. 여기서 drilling clearance, C_d 는 구멍가장자리로부터 게이지 先端까지의 거리이다. Table. 2를 그래프로 나타내면 Fig. 8과 같다.

Table. 2. Values of ϵ_m and C_d

Hole diameter(mm) d	1	2	3	4	5	6	7
drilling Clearance(mm) $C_d = r_1 - d/2$	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5
$\epsilon_m (\mu s)$	0	5	17	34	65	88	210

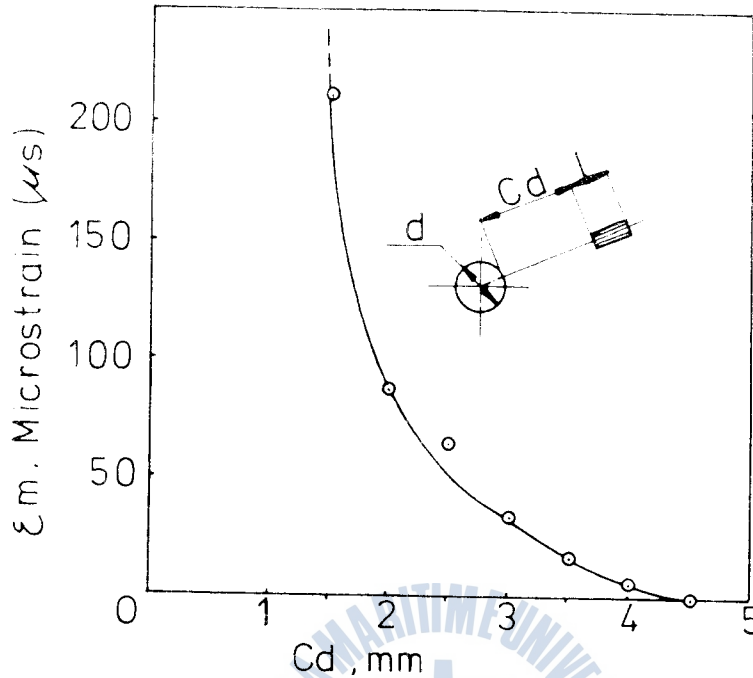


Fig. 8. Values of ϵ_m for $C_d \leq 4.5$ mm

Fig. 8에서 보는 바와 같이 ϵ_m 는 drilling clearance, C_d 가 작아지면 急激히 增加함을 알 수 있다. 特히 $C_d \geq 4.5$ mm인 경우, 穿孔時 機械加工으로 因한 스트레인 ϵ_m 는 거의 無視($\epsilon_m = 0$) 된다.

또한 解放스트레인 成分中 ϵ_p 는 구멍 周圍의 應力場에 局部塑性流動이 생길 때만 나타난다. 即 加해준 應力이 어떤 一定한 값을 超過하면 구멍 周圍에 塑性變形이 發生하기 때문에 strain-stress의 關係는 線形的으로부터 離脫한다. 離脫程度는 구멍의 크기, 스트레인게이지의 位置, C_d 값 등에 關係된다. ϵ_p 값을 測定해 내기 위하여 試片의 測定點에서 $r_1 = 4.5$ mm, $\theta = 20^\circ$ 인 位置에 半徑方向으로 스트레인게이지를 붙여 놓고, 測定點에 一定直徑의 구멍을 뚫은 다음 應力을 段階的으로 增加시켜, 이때의 各 스트레인을 測定하여 機械加工으로 因한 ϵ_m 을 減한 후, 그래프에 옮기면 Fig. 9와 같이 된다. 그림에서, 구멍周圍의 局部的인 降伏으로 誤差없이 測定할 수 있는 限界應力은 $\frac{1}{2} \sigma_s$ 以下임을 알 수 있고, 應力이 增加함에 따라 局部塑性流動으로 因한 誤差가 갑자기 增加함을 알 수 있다.

한편, 純粹解放스트레인만을 위하여 C_d 값을 增加시키면 ϵ_m , ϵ_p 등의 減少를 볼 수 있

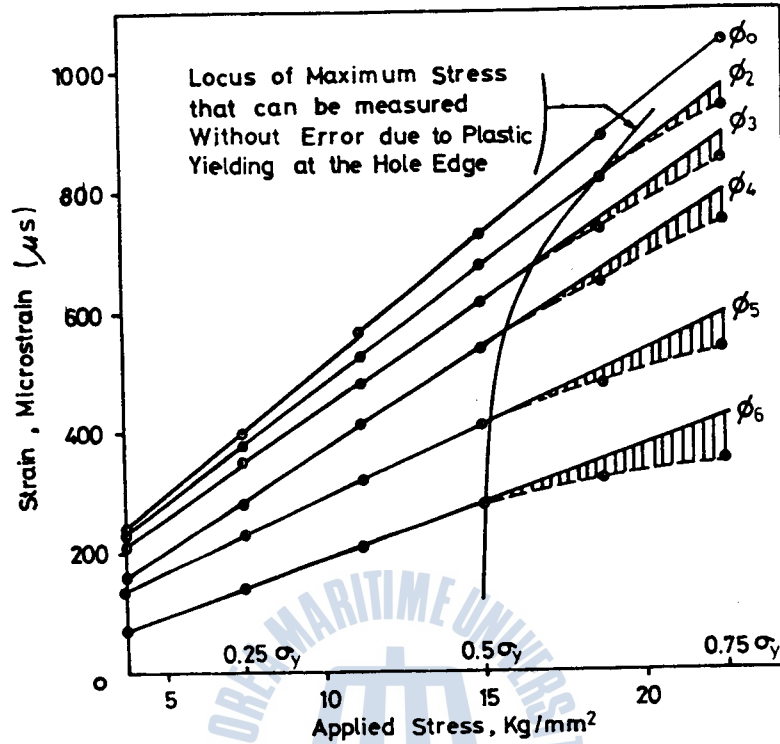


Fig. 9. Average Strain vs. Applied Stress Plot for ϵ_p Measured

으나, 解放스트레인의 感度(sense)가 좋지 못함으로 實際에는 이 兩者에 對한 折衷이 要求된다.

本 研究의 解放스트레인 檢出은 實測된 解放스트레인 ϵ_r 와 穿孔時 機械加工에 의한 解放스트레인成分 ϵ_m , 그리고 一定應力 超過時 구멍周圍의 局部的인 降伏에 의한 解放스트레인成分 ϵ_p 를 式(21)에 各各 代入하여 加한 應力에 對한 純粹解放스트레인 ϵ_N 인 i_1 , i_2 , i_3 , i_4 를 檢出해 내었다.

5. 實驗結果 및 考察

Table. 3은 引張機에 의해서 加해준 應力 σ_1 , σ_2 (σ_2 는 恒상 零) 및 1번 스트레인지어지와 이루는 角度 θ 에 對해서 測定된 解放스트레인 i_1 , i_2 , i_3 , i_4 를 나타낸다.

Table. 3. Measured Relaxation Strains in μs (Micro-strain)

[$a_1=1.5mm$, $a_2=3mm$, $r_1=4.5mm$, $r_2=6.5mm$, $\alpha=135^\circ$, $\nu=0.28$, $E=21,000kg/mm^2$]

Sample No.	Given Stresses(kg/mm ²) and Angles(Degree)			Measured Relaxation Strains in μs (Micro-strain)			
	σ_1	σ_2	θ	i_1	i_2	i_3	i_4
1	5	0	-20	-38	-10	-126	19
2	5	0	5	-46	-18	-156	-66
3	5	0	15	-42	-29	-136	-100
4	8	0	-20	-62	-16	-204	30
5	8	0	5	-74	-29	-240	-106
6	8	0	15	-67	-47	-222	-160
7	12	0	-20	-94	25	-310	45
8	12	0	5	-112	-44	-365	-160
9	12	0	15	-102	-71	-335	-245
10	18	0	-20	-145	38	-475	69
11	18	0	5	-172	-67	-560	-245
12	18	0	15	-156	-110	-510	-370
13	25	0	-20	-205	54	-670	99
14	25	0	5	-245	-95	-790	-350
15	25	0	15	-220	-155	-730	-530

Table 3에서 보인 測定된 解放스트레인 i_1 , i_2 , i_3 를 式(18), (19), (20)에 代入하여 主應力 σ_1 , σ_2 및 θ 를 計算하면 Table. 4와 같으며, 또한 Table. 4에는 σ_1 , θ 에 對한 相對誤差도 함께 나타내었다. 이 表에서 보이는 바와 같이 應力이 크면 클수록 誤差도 커진다는 것을 알 수 있고, 또 測定된 應力은 實際應力보다 一般적으로 크게 나타남을 알 수 있다.

Table. 4. Calculated Stresses and Angle from Measured Relaxation Strains

Sample No.	Calculated Stress(kg/mm ²) and Angless(Degree)			Relative Error	
	σ_1	σ_2	θ	of σ_1 (%)	of θ (%)
1	5.100	0.064	-20.24	2.0	1.2
2	5.131	0.047	4.911	2.6	-1.78
3	4.90	-0.579	15.31	-2.0	2.1
4	7.987	-0.23	-18.98	-0.16	-5.1
5	8.089	-0.314	5.466	1.11	9.32
6	8.408	0.6295	14.70	5.1	-2
7	12.29	-0.2285	-19.51	2.42	-2.45
8	12.47	0.048	5.03	3.92	0.6
9	12.45	0.049	14.92	3.75	-0.53
10	18.29	-1.046	-18.43	1.6	-7.85
11	19.07	-0.079	5.001	5.94	0.02
12	18.83	-0.714	15.37	4.6	2.47
13	25.56	-1.84	-18.13	2.24	-9.35
14	26.19	-2.4	5.86	4.76	17.2
15	27.75	2.37	14.73	11.0	1.8

6. 結 論

一定 直徑의 구멍을 뚫으므로 인한 應力場의 解放스트레인을 理論적으로 解放하고 實驗한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 穿孔法에 의한 殘留應力의 測定에 있어서 같은 자리에 直徑이 다른 구멍을 2번 뚫음으로써 스트레인게이지를 2個만 붙이고도 主應力과 主應力의 方向을 求할 수 있다.

(2) 이 方法에 의한 殘留應力의 測定은 既存方法에 비해 스트레인게이지가 1/3節約되며, 主應力의 測定値는 一般的으로 實際보다 약간 크게 나오고 그 誤差는 應力이 클수록 컸다.

本 研究를 더하여 좀 더 精密度 높은 殘留應力測定을 위한 諸測定條件 即, 스트레인게이지의 相互位置, 구멍의 直徑 등은 앞으로 더 研究되어야 할 課題로 提示한다.

參 考 文 獻

1. A. Chabenat et R. Martin: La mesure des contraintes résiduelles, Les mémoires techniques du CETIM N° 24, (1978)
2. Osamu Doi and Kouichi Kataoka: Measurement of Principal Residual Stresses in orthotropic plate when Their Directions are unknown, Bulletin of the JSME, Vol. 16, No. 102, Dec., (1973)
3. H. V. Cordiano and V. L. Salerno: Study of Residual Stress in Linearly varying Biaxial Stress Fields, Experimental Mechanics, Jan., (1969)
4. B. R. Lake, F. J. Appl and C. W. Bert: An Investigation of the Hole-drilling Technique for Measuring Planar Residual Stress in Rectangularly orthotropic Materials, Experimental Mechanics, June. (1970)
5. A. M. Nawar, K. McLachlan and J. Shewchuck: A Modified Hole-drilling Technique for Determining Residual Stresses in Thin Plates, Experimental Mechanics, June, (1976)
6. Bhagwati P. Gupta: Hole-drilling Technique-Modifications in the Analysis of Residual Stresses, Experimental Mechanics, June. (1973)
7. N. Tebedge, G. Alpsten and L. Tall: Residual-Stress Measurement by the sectioning Method, Experimental Mechanics, Feb, (1973)
8. S. P. Timoshenko and J. N. Goodier: theory of Elasticity, 3rd Ed, McGraw-Hill, P. 91, (1970)
9. 川田雄外共編: 應力測定マニュアル, オーム社, 東京, pp. 363~367, (1972)
10. 西田正考: 應力集中・森北出版株式会社, 東京, pp. 258-260. (1967)
11. 韓應教: 스트레인게이지, 普成文化社, 서울, pp. 40-52. (1983)
12. 廉永夏外共譯: 固體力學의 基礎와 應用, 東明社, 서울, pp. 139-147. (1980)

Scherbius System에 있어서의 誘導電動機特性 改善에 關한 研究

鄭 曠 烈

A Study on the Characteristics Improvement of
the Induction Motor in Scherbius System

Kyung-yul Chung

〈目 次〉

Abstract

記 號 說 明

1. 序 論

