

◎論 文

## 半無限平板의 두 圓孔排列이 應力集中에 미치는 影響

吳世旭\* · 朴榮哲\*\* · 金峻永\*\*\*

(1990년 2월 17일 접수)

### The Effect of Two Circular Holes Arrangement on the Stress Concentration Factor in a Semi-infinite Plate

Sae-Wook Oh, Young-Chul Park and Jun-Young Kim

**Key Words :** Stress Concentration Factor (K, 應力集中係數), Semi-infinite Plate (半無限平板), Photoelastic Method (光彈性實驗法), Fringe Order(N, 光彈性줄무늬 次數), Two Circular Holes Arrangement (두 圓孔排列), Photoelastic Sensitivity ( $\alpha$ , 光彈性感度)

#### Abstract

This study is concerned about the stress concentration factor measurement by photoelastic method, for the case of two circular holes arrangement in 3mm semi-infinite plate under tensile load, the ratio of those two circular holes diameter, the ratio of distance apart from circular holes to breadth and the two holes arrangement angle with loading direction were varied.

Besides, the measured stress concentration by photoelastic method around one circular hole was compared with that by strain-gage method.

#### 1. 緒 論

實際의 構造物이나 機械部品 등에는 볼트, 리벳 또는 핀 등의 圓孔이 많이 存在하고, 여기에 荷重이 作用하면 圓孔周圍에서 應力集中現象이 發生하게 된다. 따라서 應力集中現象에 의한 破壞를 防止하고 荷重을 安全範圍內에서 作用시키기 위하여

複數圓孔이 存在하는 경우에 대한 應力集中現象을 研究할 必要가 있다.

應力을 測定하는 方法에는 光彈性實驗法 또는 스트레인 게이지法 등이 있으나, 後者は 게이지의 치수 때문에 한 點에서의 應力測定은 할 수 없고, 試驗片의 全體應力分布를 測定하기 힘들 뿐 아니라, 費用도 많이 所要된다. 이에 反하여 光彈性實驗法은 試驗片의 어떠한 위치에서의 應力測定도

+1986年度 韓國海洋工學會 秋季學術大會 發表(1986年 12月)

\* 正會員, 東亞大學校 工科大學 機械工學科 教授

\*\* 正會員, 東亞大學校 工科大學 機械工學科 教授

\*\*\* 正會員, 東亞大學校 大學院 機械工學科

可能하고, 또한 試驗片의 全體應力分布를 測定할 경우, 後者와 比較하여 그 費用이 顯著하게 적게 든다.

近來 應力解析方法으로 크게 脚光 받게된 光彈性實驗法은 1891年 Wilson<sup>1)</sup>에 의해 시작된 以來로 急激히 發達 되어 왔다. 最近에는 Nishida<sup>2)</sup>가 한 개의 中心圓孔을 갖는 無限板의 경우에 대하여 應力解析을 하였고, 두개 혹은 여러개의 圓孔을 갖는 平板에서 圓孔間 거리를 달리하거나 圓孔의 半徑을 달리하여 應力을 解析하였다. 또한 Howland<sup>3)</sup>는 引張을 받고있는 띠板에서 圓孔附近의 應力을 實驗的으로 解析한 報告가 있었다.

그리고 Newman<sup>4)</sup>과 Tada<sup>5)</sup> 등은 平板內의 圓孔 周圍에 크랙이 存在할 때의 應力擴大係數(stress intensity factor)를 理論的으로 解析하였다.

그러나 實際의 構造物이나 機械部品 등에 있는 圓孔들은 非線形的으로 存在할 수 있기 때문에 앞의 實驗만으로는 實際設計에 應用하기는 힘들다고 思料된다. 따라서 本 研究는 半無限平板內 兩 圓孔이 存在할 경우, 兩 圓孔 사이의 거리에 대한 試驗片幅의 比(p/b), 兩 圓孔의 크기의 比(d/do) 그리고 荷重方向과 圓孔排列이 이루는 角度(θ) 등 여러條件을 同時에 變化시켰을 때 應力集中係數의 變化에 대하여 考察하였다.

또한 圓孔의 크기가 같고 荷重方向과 圓孔排列이 이루는 排列角度(θ)가 同一할 경우에 대하여 스트레인 게이지法으로 試驗片中央部의 應力分布를 測定하여 兩 實驗結果를 比較考察하였다.

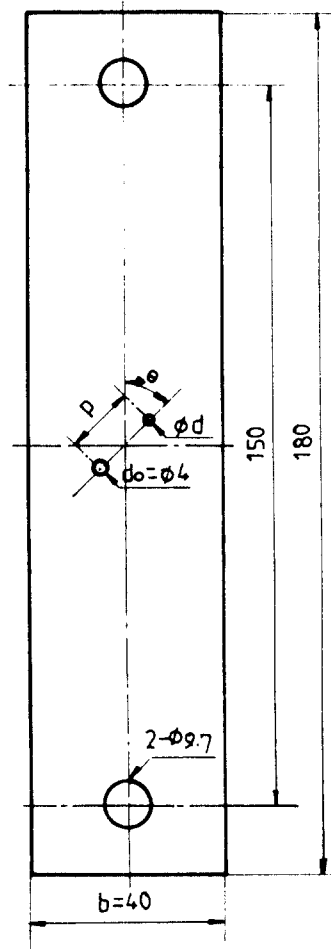


Fig. 1 Geometry of specimen

## 2. 實驗裝置 및 方法

### 2.1 試驗片

光彈性實驗用試驗片材料에는 여러가지가 있으나, 本 실험에서 比較의 攄은 두께 3mm 에폭시 레진板(epoxy resin plate)을 選擇하여 Fig. 1과 같은 形狀의 試驗片을 製作하였으며, 그치수는 Table. 1과 같다.

光彈性試驗片의 製作時 熱應力에 의한 殘留應力의 發生을 最大限줄이기 위하여 드릴 作業時 水中에서 施行 하였다.

作用荷重은 試驗片의 圓孔周圍에서 充分한 彈性應力狀態가 維持되과 同時에 鮮명한 等色線무늬를 얻을 수 있도록 50kgf의 一定荷重을 單軸된 荷重

Table 1 Dimensions of specimen

No.	p	d	θ
1	12	1, 2, 3, 4	0°
2	10	〃	〃
3	8	〃	〃
4	6	〃	〃
5	4	〃	〃
6	12	〃	45°
7	10	〃	〃
8	8	〃	〃
9	6	〃	〃
10	4	〃	〃
11	12	〃	90°
12	10	〃	〃
13	8	〃	〃
14	6	〃	〃
15	4	〃	〃

方式로 모든 光彈性試驗片에 作用시켰고, 스트레인 게이지를 附着하는 試驗片은 S45C로 에폭시 레진판과 同一하게 加工하고, 荷重을 1000kgf까지 作用시켰다.

2.2 實驗方法

Fig. 1과 Table 1에서 보는 바와 같이 두 圓孔의 直徑比  $d/d_0$ 는 0.25, 0.50, 0.75, 1.00으로 變化시켰고, 圓孔中心間 거리와 試驗片幅과의 比  $p/b$ 는 0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30으로, 圓孔排列角度  $\theta$ 를  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 로 各各 變化시켰을 때 發生하는 最大應力集中係數를 測定하였다.

S45C鋼板에서는 排列角度  $\theta=0^\circ$ ,  $d/d_0=1$ 일 경우 圓孔間의 거리와 試驗片幅의 比  $p/b$ 를 0.10, 0.20, 0.30으로 變化시켰을 때, 中心으로 부터 거리와 試驗片幅의 比  $y/b$ 가 0.10, 0.20, 0.30, 0.40인 位置에 2mm 스트레인 게이지를 附着하여 萬能材料試驗機를 使用하여 應力을 測定하였으며, 그 結果值를 光彈性實驗에서 구한 結果值와 比較考察하였다.

스트레인 게이지에 의한 應力測定法은 z 方向의 變形率은 x, y方向의 變形率보다 極히 작기 때문에 本 實驗에서는 無視하였으며  $\sigma_{xx}$ 는 式(1)과 같이 구하였다.

$$\sigma_{xx} = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [(1-\mu)\epsilon_{xx} + \mu\epsilon_{yy}] \dots\dots\dots (1)$$

이때 彈性係數E와 프와송比 $\mu$ 의 값은 實際로 instron 萬能試驗機로 測定하여  $E=1.84 \times 10^4(kgf/mm^2)$ ,  $\mu=0.279$ 를 얻었다.

2.3 實驗裝置

本 實驗에서 使用한 實驗裝置는 지름 300mm의 散光式光彈性實驗裝置(photoelastic division measurement group, Inc.)를 使用하였다.

荷重裝置는 레버比(lever ratio)가 10 : 1인 레버 type이며, 줄무늬 次數(fringe order)N을 精密하게 測定하기 위하여 25倍 倍率의 望遠顯微鏡을 附着하였으며 줄무늬 次數를 보다 精確히 判讀하기 위하여 Tardy method<sup>9)</sup>를 利用하여 最大限의 精密度

를 維持하였다.

한편 觀察된 줄무늬를 記錄하기 위하여 感光度가 낮고, 色調對比가 뛰어난 ASA 25필름을 利用하였고, 카메라 앞에 monochrometer를 附着하고 長時間 露出을 함으로서 줄무늬 幅이 가늘어지는 同時에 줄무늬가 鮮明하게 나타나도록 하였으며, 또한 主應力을 分離하기 위하여 oblique incidence를 附着하였다.

2.4 應力の 一般的인 光彈性解析

試驗片의 自由境界에서는  $\sigma_1=\sigma, \sigma_2=0$ 가 되므로  $\sigma=N/\alpha t$ , 그리고  $\sigma_0$ 를 公稱應力(normal stress)이라고 하면, 應力集中係數  $K_t$ 와  $K_t'$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} = \frac{N/\alpha t}{W/(b-d_0)t} = \frac{(b-d_0)N}{Wa} \dots\dots\dots (2)$$

$$K_t' = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0'} = \frac{N/\alpha t}{W/bt} = \frac{bN}{Wa} \dots\dots\dots (3)$$

- $\sigma_1, \sigma_2$  ; 最大 및 最小主應力(kgf/mm<sup>2</sup>)
- b ; 試驗片의 幅(mm)
- W ; 軸負荷(kgf)
- t ; 試驗片 두께(mm)
- d<sub>0</sub> ; 試驗片內圓孔의 直徑(mm)

光彈性材料는 實驗條件 특히 溫度 및 濕度에 의한 影響을 많이 받으므로 實驗前에 光彈性感度を 補正할 必要가 있다.

光彈性感度の 測定法에는 引張試驗法, 圓板壓縮法, diamond 壓縮法 및 보의 굽힘法 등이 있으나, 本 實驗에서는 引張試驗法<sup>10)</sup>을 使用하였다.

光彈性感度は 式(4)에 의하여 구하였다.

$$\alpha = \frac{N}{\sigma_0 t} = \frac{bN}{W} \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $\sigma_0=W/bt$ 이다.

Fig. 2는 光彈性感度測定에서 얻어진 感度曲線을 나타내고 있으며, 平均感度  $\alpha$ 는 0.81(mm/kgf)로 측정되었다.

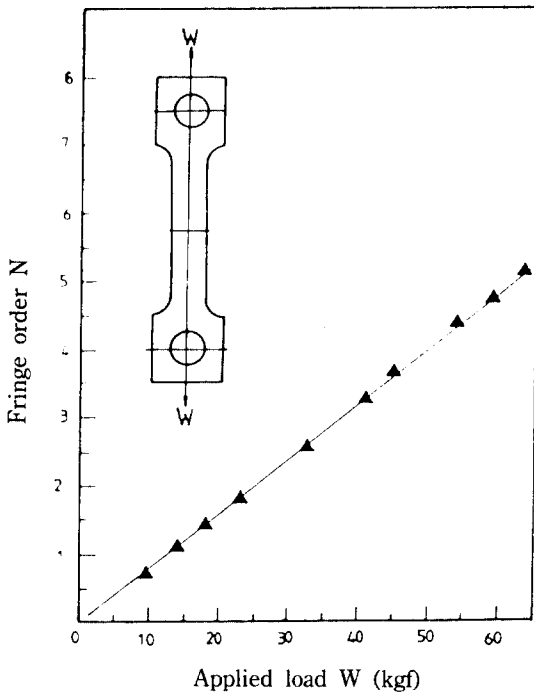


Fig. 2 Photoelastic sensitivity calibration curve  
( $b = 10.032$ )

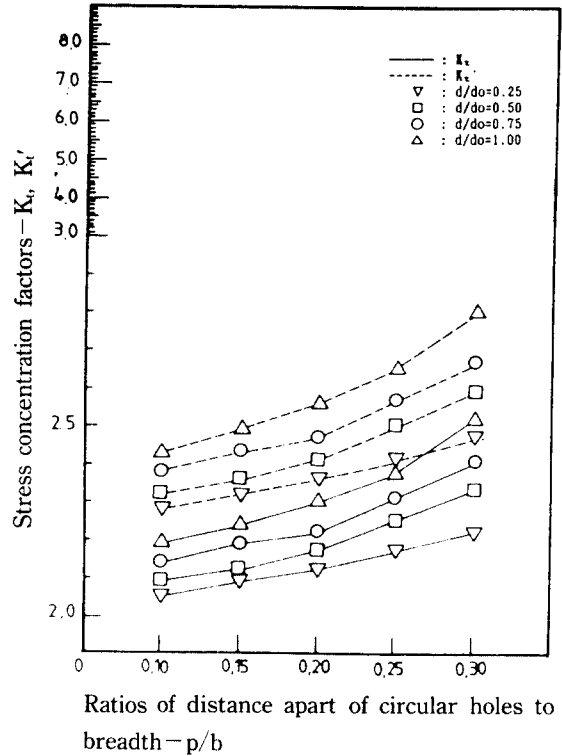


Fig. 3  $K_t - K_t'$  vs.  $p/b$  by photoelastic method  
(when  $\theta = 0^\circ$ )

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1 荷重方向과 圓孔排列이 이루는 角度( $\theta$ )에 따른 應力集中係數( $K_t, K_t'$ )의 變化

Photo. 1은 以上の 實驗方法에 따라 얻은 光彈性 줄무늬의 代表的인 寫眞이다. (a), (b), (c)는  $p/b = 0.30$ ,  $d/d_o = 0.25$ 일때, 두 圓孔의 排列과 荷重方向이 이루는 角度  $\theta$ 가  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ 인 경우의 dark field 形의 光彈性 줄무늬 寫眞이고, (d), (e), (f)는 light field 形의 寫眞이다.

또 (g), (h), (i)는  $p/b = 0.10$ 이고,  $d/d_o$ 가 0.50, 0.75, 0.75일때,  $\theta = 0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ 인 경우의 dark field 形 光彈性 줄무늬 寫眞이다.

Fig. 3은  $\theta = 0^\circ$ 에서의  $d/d_o$ 와  $p/b$ 의 變化에 따른 應力集中係數  $K_t$ 와  $K_t'$ 의 變化를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이  $p/b$ 가 커지면 應力集中係數  $K_t$ 와  $K_t'$ 는 增加하고,  $d/d_o$ 가 커질수록  $K_t$ 와  $K_t'$ 가 커짐을 알 수 있다. 또한  $d/d_o$ 와  $p/b$ 가 增

加함에 따라  $K_t$ 와  $K_t'$ 의 增加幅도 線形的으로 增加함을 알 수 있다. 이와 같은 傾向은 Photo. 1에서도 확인할 수 있다. 즉 Photo. 1의 (a), (d)에서 보는 바와 같이  $p/b$ 와  $d/d_o$ 가 작아질 경우, 두 圓孔周圍에 形成된 光彈性 줄무늬가 서로 重疊되지 않고 弛緩되므로, 두 圓孔周圍에서 發生한 應力이 相互分散作用을 한다는 것을 알 수 있다.

最大應力發生點은 그림에서 보는 바와 같이  $\theta = 90^\circ$ 인 圓孔의 圓周에서 發生한다.

Fig. 4는  $\theta = 45^\circ$ 에서의  $d/d_o$ 와  $p/b$ 의 變化에 따른  $K_t$ 와  $K_t'$ 의 變化를 나타내고 있다.

여기서는  $p/b$ 가 작아지고,  $d/d_o$ 가 커질수록  $K_t$ 와  $K_t'$ 가 增加함을 알 수 있으며, 最大應力發生點은 Photo. 1의 (b), (e)에서 보는 바와 같이  $d/d_o$ 가 0.75이면  $p/b = 0.15$ 를 基準으로,  $d/d_o$ 가 1.00이면  $p/b = 0.20$ 를 基準으로 하여 그 以上일 경우,  $\theta = 90^\circ$ 인 圓孔의 圓周에서 發生하지만, 그 以下일 경우,

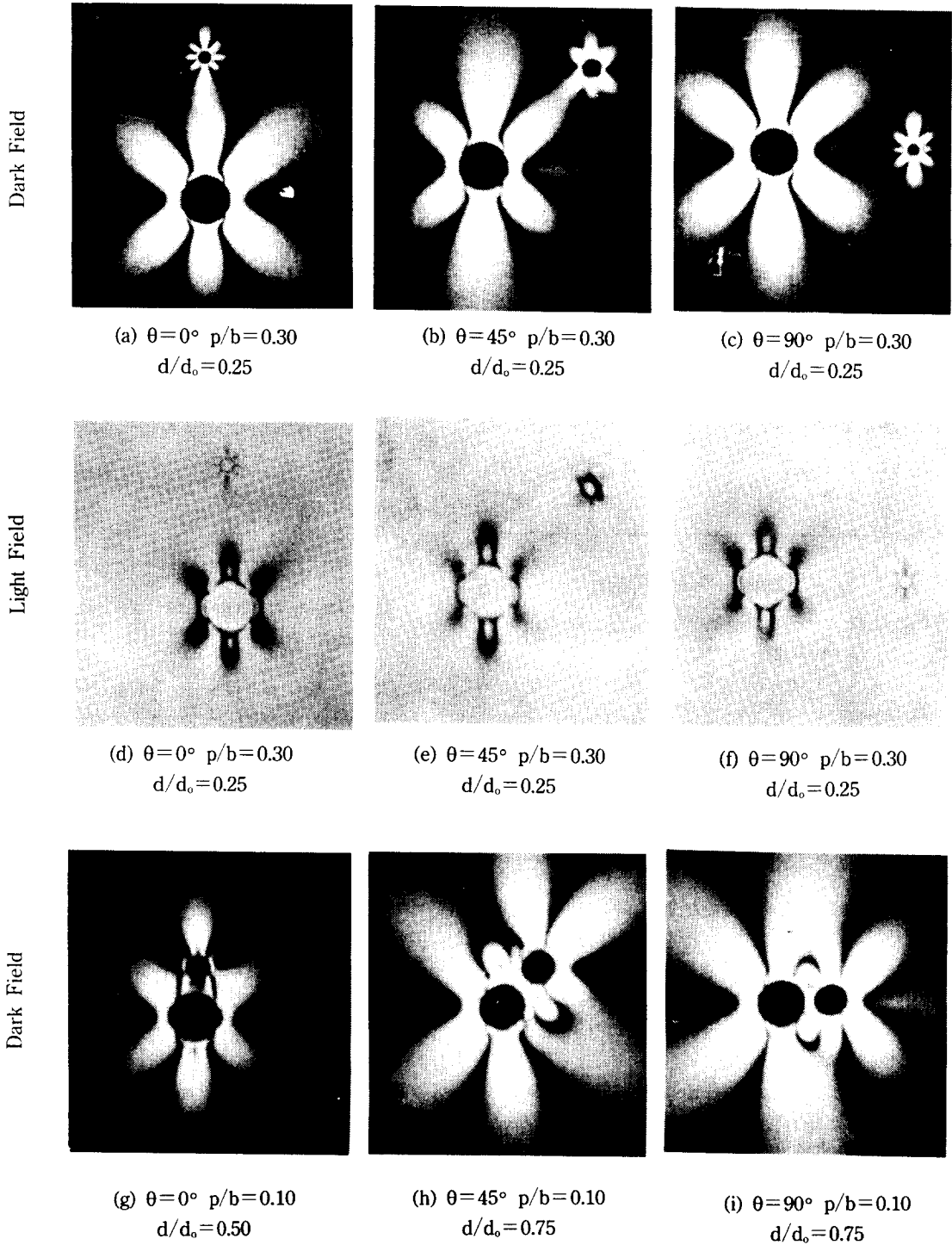
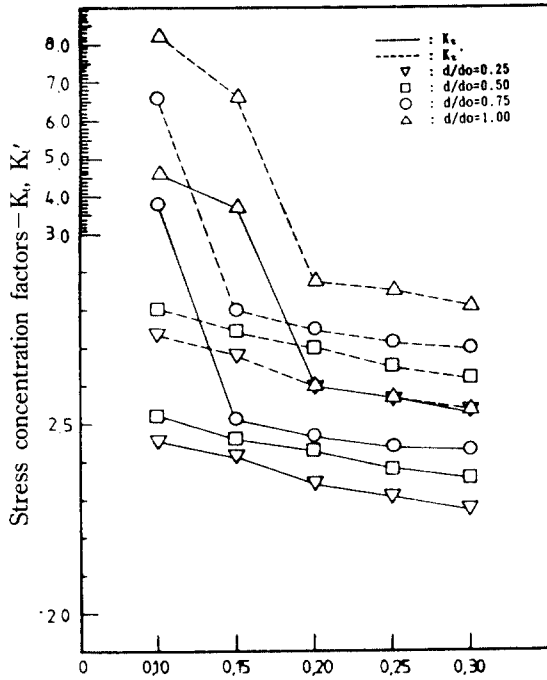
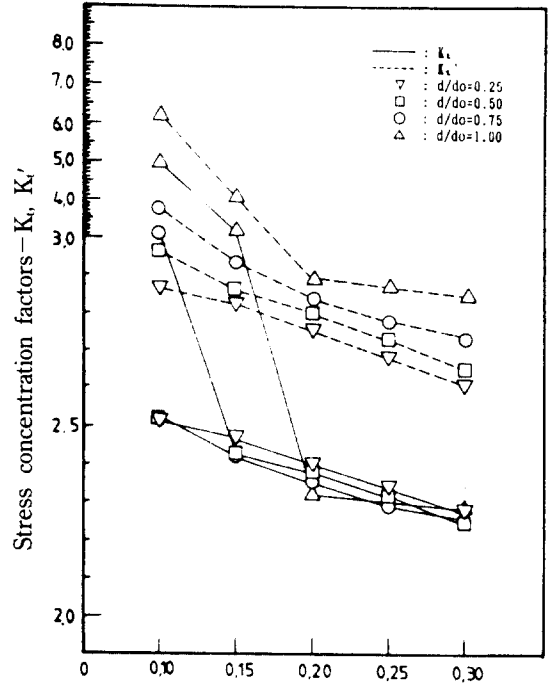


Photo. 1 Photoelastic fringe patterns



Ratios of distance apart of circular holes to breadth - p/b



Ratios of distance apart of circular holes to breadth - p/b

Fig. 4  $K_t - K_t'$  vs. p/b by photoelastic method (when  $\theta = 45^\circ$ )

Fig. 5  $K_t - K_t'$  vs. p/b by photoelastic method (when  $\theta = 90^\circ$ )

最大應力發生點은  $\theta = 45^\circ$ 인 圓孔의 圓周에서 發生하고, 應力集中係數가 急激히 增加하게 된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는  $\theta = 90^\circ$ 일 경우, d/do, p/b와  $K_t, K_t'$ 의 關係를 나타내고 있다.

$\theta = 90^\circ$ 의 경우에는 앞의  $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ 와는 달리 d/do의 變化에 따른  $K_t$ 값의 變化가 非線形的으로 變化됨을 알 수 있고, 또한 앞의 實驗結果에서는 d/do가 커질수록  $K_t$ 가 增加 하였지만,  $\theta = 90^\circ$ 일 경우, p/b=0.15에서 0.25까지는 d/do가 작을수록  $K_t$ 값이 큰 값이 많다. 이와 같은 現象은 d/do가 增加함에 따라 最大應力이 發生하는 點의 斷面積이 減少하게 되어, 式(2)에서 보는바와 같이 줄무늬 次數N이 增加하여도  $K_t$ 값은 非線形的으로 變하게 된다.

이에 反하여  $K_t'$ 는 p/b가 작아지고, d/do가 增加함에 따라 線形的으로 增加함을 알 수 있다.

또한  $\theta = 90^\circ$ 에서도  $\theta = 45^\circ$ 에서의 경우와 마찬가지로 應力集中係數가 急激히 增加하는 變曲點이 存在하는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 여러 角度에서의 p/b, d/do와  $K_t, K_t'$ 의 關係를 比較檢討한 結果는  $\theta = 0^\circ$ 일 경우는 p/b와 d/do가 작아질수록 光彈性줄무늬는 相互弛緩作用을 일으키지만,  $\theta$ 가  $45^\circ$ 以上으로 커지면, 光彈性줄무늬는 相互重疊 된다는 것을 알 수 있다.

즉 圓孔周圍에서 發生하는 應力은  $\theta$ 가 작을 경우 相互分散作用을 하지만  $\theta$ 가  $45^\circ$ 以上이 되면 相互重疊作用을 한다는 것을 알 수 있다. 또한 이 경우, d/do가 0.75이면 p/b=0.15를 基準으로, d/do가 1.00이면 p/b=0.20를 基準으로 하여 그 以下에서는 應力集中係數가 急激히 增加하는 變曲點이 發生한다.

3.2 두 圓孔의 直徑比( $d/d_0$ )에 따른 應力集中係數( $K_t, K_t'$ )의 變化

Fig. 6은  $d/d_0=0.25$ 에서의  $p/b$ 와  $\theta$ 의 變化에 따른 應力集中係數  $K_t$ 와  $K_t'$ 의 變化를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이  $\theta$ 가 커지면 應力集中係數가 增加하지만, 그 增加幅은 오히려 減少한다는 것을 알 수 있다.

한편  $p/b$ 가 작을 경우에는  $K_t$ 와  $K_t'$ 는  $\theta$ 의 影響을 많이 받으나,  $p/b$ 가 커지면  $K_t, K_t'$ 는  $\theta$ 의 影響을 거의 받지 않고 一定하게 된다는 것을 알 수 있다.

또한  $\theta=0^\circ$ 일 경우에는  $p/b$ 의 增加에 따라 應力集中係數가 增加 했지만,  $\theta=45^\circ, 90^\circ$ 일 때에는 減少하고 있다.

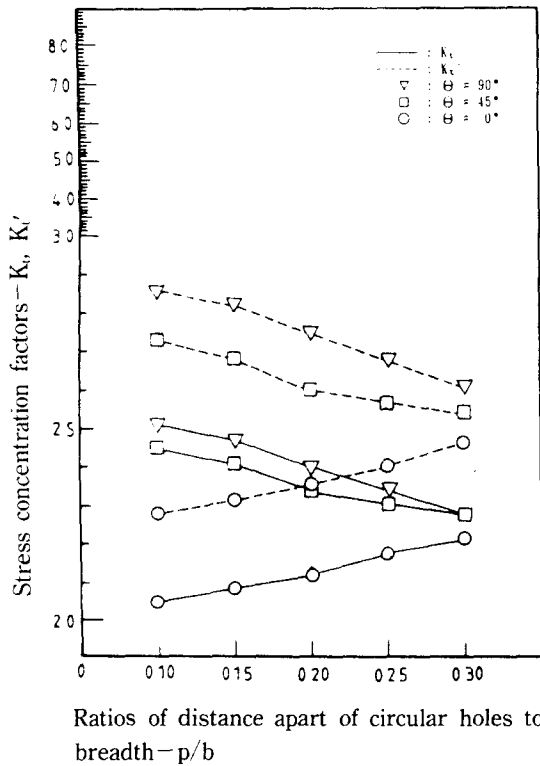


Fig. 6  $K_t-K_t'$  vs.  $p/b$  by photoelastic method (when  $d/d_0=0.25$ )

Fig. 7은  $d/d_0=0.50$ 에서의  $p/b$ 와  $\theta$ 의 變化에 따른 應力集中係數  $K_t$ 와  $K_t'$ 의 關係를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이  $K_t'$ 는  $d/d_0=0.25$ 에서와 類似한 形態를 나타내지만,  $\theta=45^\circ$ 일 때가  $\theta=90^\circ$ 일 때 보다  $p/b$ 가 커질수록  $K_t$ 가 더 커짐을 보여주고 있다. 이와 같은 현상은  $\theta=90^\circ$ 일 경우 最大應力이 發生하는 點에서의 斷面積이  $\theta=45^\circ$ 일 때 보다 작기 때문에 생각되어진다. 따라서  $\theta=90^\circ$ 인 경우가 實際 發生하는 應力은  $\theta=45^\circ$ 일 때 보다 더 큰것으로 思料된다.

또한  $d/d_0=0.25$ 인 경우와 比較해 보았을 때,  $p/b$ 가 커지면 應力集中係數는  $\theta$ 의 影響을 더욱 받지않아 거의 一定하게 된다는 것을 알 수 있다.

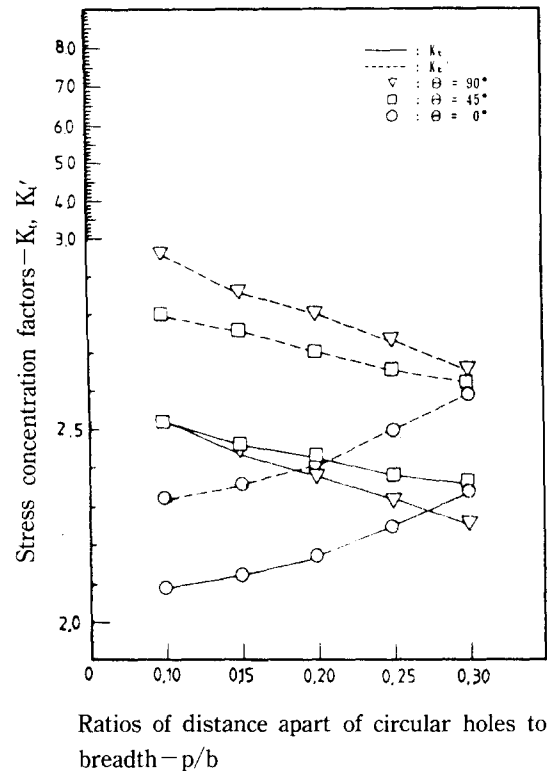


Fig. 7  $K_t-K_t'$  vs.  $p/b$  by photoelastic method (when  $d/d_0=0.50$ )

Fig. 8은  $d/d_o=0.75$ 인 경우,  $p/b$ 와  $\theta$ 의 變化에 따른  $K_t$ 와  $K_t'$ 의 變化를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이  $p/b=0.10$ 일 경우,  $\theta=45^\circ$ 에서  $\theta=90^\circ$ 일 때 보다  $K_t'$ 가 큰 것을 보여주고 있다. 이와 같은 傾向은  $\theta=45^\circ$ 일 경우, 圓孔圓周의  $45^\circ$  方向으로 最大應力이 發生하게 되어 식(3)에서 보는 바와 같이  $\sigma_{\theta'}$ 가 상당히 작아지게 되므로  $K_t'$ 의 값이 커지게 됨을 알 수 있다. 그러나 實際로 發生하는 應力값은  $\theta=90^\circ$ 일 때가 더 크다.

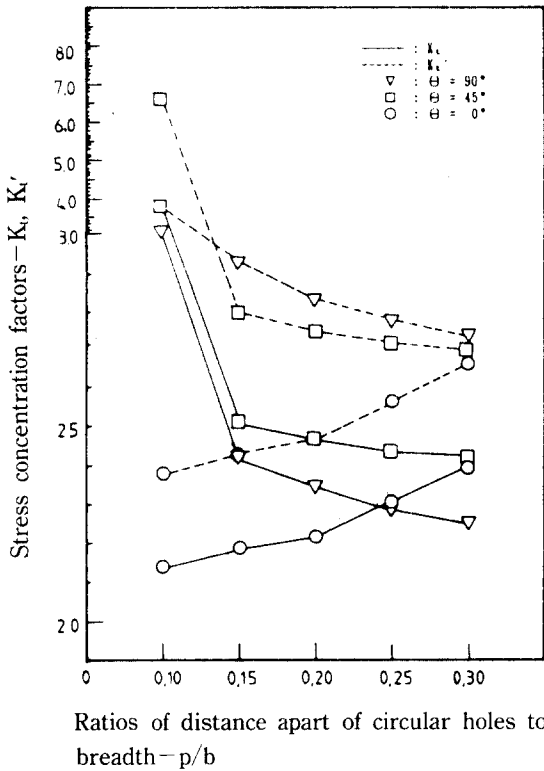


Fig. 8  $K_t-K_t'$  vs.  $p/b$  by photoelastic method (when  $d/d_o=0.75$ )

Fig. 9는  $d/d_o=1.00$ 인 경우,  $K_t$ 와  $K_t'$ 의 變化를 나타내고 있다. 앞의  $d/d_o=0.75$ 와 비슷한 傾向을 보이고 있으나, 다른 點은  $p/b=0.15$  以下이면  $\theta=45^\circ$ 일 때가  $90^\circ$ 일 때 보다  $K_t'$ 가 크다. 이와 같은 現象은 앞에서 說明한 것과 같은 理由로서 나타난 것으로 생각된다.

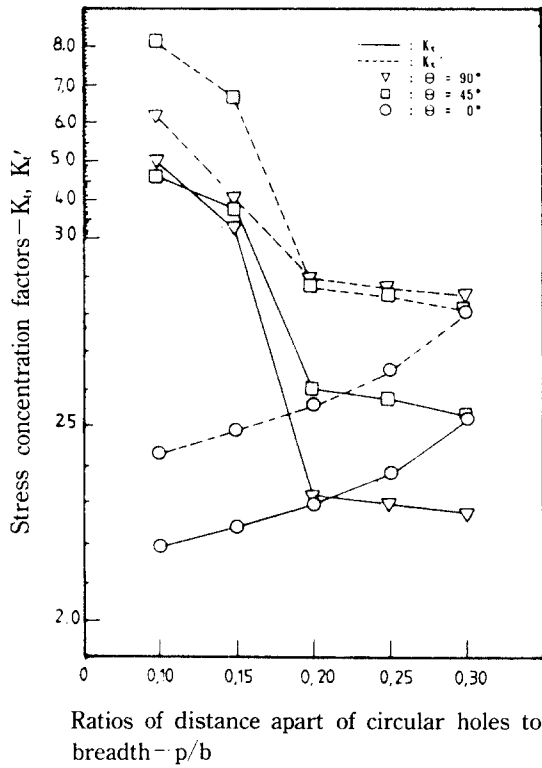


Fig. 9  $K_t-K_t'$  vs.  $p/b$  by photoelastic method (when  $d/d_o=1.100$ )

以上과 같이  $d/d_o$ 의 變化에 따른  $K_t$ 와  $K_t'$ 의 變化를 考察한 結果는  $d/d_o$ 가 커지고,  $p/b$ 가 작아지면 排列角度  $\theta$ 의 變化에 따른  $K_t'$ 의 變化幅이 커지나,  $p/b$ 가 커지면  $\theta$ 의 變化에 따른  $K_t'$ 의 變化幅이 작아져서 거의 一定한  $K_t'$ 의 값을 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은  $\theta=0^\circ$ 이고  $d/d_o=1.00$ 인 경우, 圓孔中央斷面의 應力分布를 光彈性實驗法과 스트레인 게이지法에 의하여 測定한 結果를 比較檢討한 것이며, Fig. 11은  $p/b=0.20$ , Fig. 12는  $p/b=0.30$ 인 경우의 結果를 比較檢討한 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 應力集中係數가 크면 圓孔에 近接한 部分에서 應力分布의 變化가 크다는 것을 알 수 있고, 또한  $y/b=0.40$ 에서는 應力集中係數  $K_t$ 가 거의 一定하게 된다는 것을 알 수 있다.

이들 사이에  $K_t$  값들은 相互間에 잘 一致하고 있으나 若干의 誤差가 發生하는 것은 스트레인 게



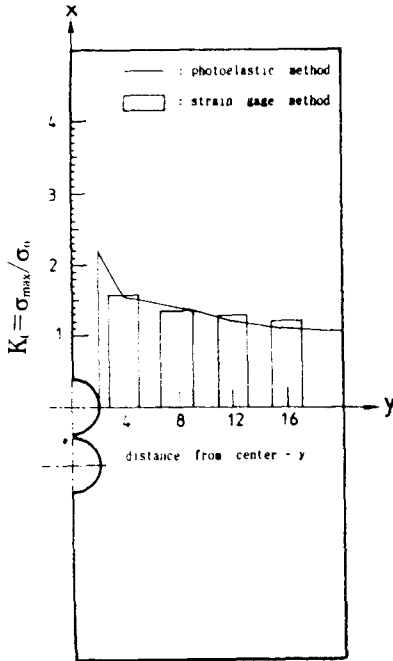


Fig. 10 Distribution of stress by photoelastic method and strain gage method (when  $p/b=0.10$ )

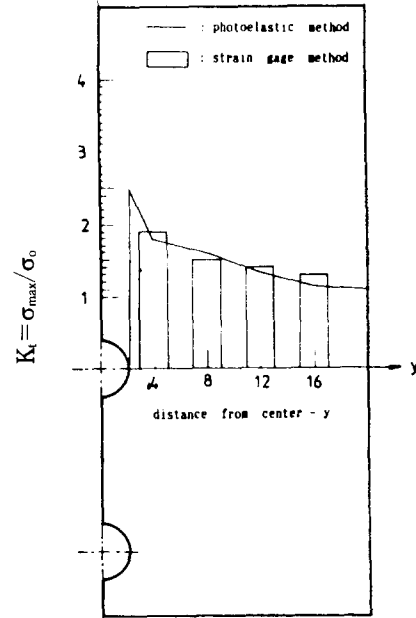


Fig. 12 Distribution of stress by photoelastic method and strain gage method (when  $p/b=0.30$ )

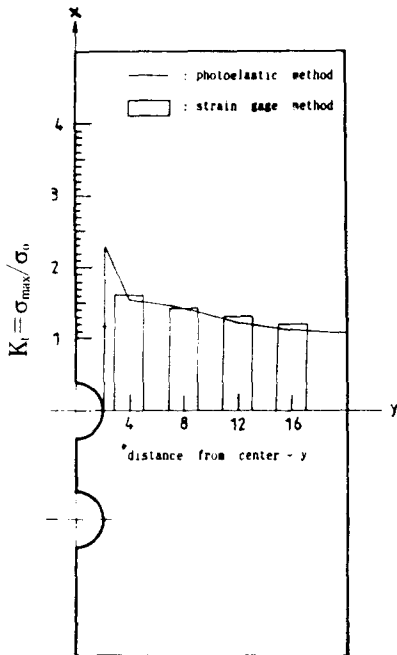


Fig. 11 Distribution of stress by photoelastic method and strain gage method (when  $p/b=0.20$ )

이지는 한 點에서의 測定값이 아니고 게이지幅 사이의 平均値이므로 스트레인 게이지 치수의 影響으로 생각된다.

#### 4. 結 論

引張荷重을 받는 두께 3mm의 半無限平板內에 두 圓孔이 存在할 경우, 應力集中係數를 光彈性實驗法으로 測定하고, 圓孔中央斷面의 應力分布를 光彈性實驗法 및 스트레인 게이지法으로 測定하여 比較考察한 結果는 다음과 같다.

1) 荷重의 方向과 두 圓孔排列이 이루는 角度  $\theta$  가  $0^\circ$ 일 경우  $p/b$ 가 커지면 應力集中係數가 增加하고, 그 增加幅도 커지나,  $\theta$ 가  $45^\circ$ 以上일 경우, 應力集中係數는 오히려 減少한다는 것을 알 수 있다.

2)  $\theta=45^\circ$ 以上일 경우,  $d/d_0$ 가 0.75이면  $p/b=0.15$ 를 基準點으로,  $d/d_0$ 가 1.00이면  $p/b=0.20$ 을 基準點으로 하여  $p/b$ 가 그 以上일 땐, 應力集中係數는 서서히 減少하지만, 그 以下일 경우, 急激히 增

加한다. 이것은 두 圓孔排列에 의해 發生되는 應力集中係數가 3을 基準으로, 그 以下에서는 變化幅이 적지만, 그 以上에서는 急激히 增加한다고 볼 수 있다.

3) 應力集中係數 3을 基準으로, 그 以下일 경우, 最大應力의 發生點은 圓孔圓周의 90°方向이지만, 그 以上일 경우,  $\theta$ 方向으로 最大應力이 發生한다.

4)  $d/d_0$ 가 커지고  $p/b$ 가 커질수록 應力集中係數는  $\theta$ 의 影響이 작아지면서 一定하게 되지만,  $d/d_0$ 가 커지고  $p/b$ 가 작아지면  $\theta$ 의 變化에 따른 應力集中係數變化의 幅은 增加한다.

5) 光彈性實驗法의 實驗結果와 스트레인 게이지法에 의한 實驗結果는 잘 一致되며, 發生하는 空間의 誤差는 스트레인 게이지의 치수效果에 의한 것으로 생각된다.

### 參 考 文 獻

- 1) Wilson, B. C., "Study of Stresses in a Beam with a Concentrated Load", Phil. Mag., Vol. 32, p. 481, 1891
- 2) 西田正孝, "應力集中", 森北出版, 東京, pp. 217~264, pp. 434~456, 1967
- 3) Howland, R. C. J. "On the Stresses in the Neighborhood of Circular Hole in a Strip under Tension", Phil. Trans. ROY. Soc. A, Vol. 229, pp. 48~86, 1930
- 4) Newman, J. C. Jr., "An Improved Method of Collocation for the Stress Analysis of Cracked Plated with Various Shaped Boundaries", NASA TND-6376, 1971.
- 5) Tada, H., "A Note on a Central Crack in a Strip under Uniaxial Tension", Eng. Frac. Mech., Vol. 4, p. 585, 1972
- 6) 辻二郎, "光彈性實驗法", 日刊工業新聞社, pp. 88~90, 1965
- 7) 馬渡鎮夫, "平面偏光光彈性實驗における主應力方向の全域自動計算と等色線分離", 日本機械學會論文集 第55卷 514號, pp. 1423~1428, 1989
- 8) 益田義治, "入門 光彈性實驗法", 日刊工業新聞社, pp. 107~114, 1972
- 9) 濱田 實, "2圓孔を特つ帶板の引張り", 日本機械學會論文集 第45卷 399號, pp. 1332~1337, 1979
- 10) Frocht, M. M., "Photoelastic Studies in Stress Concentrations", Mech. Eng., Vol. 58, pp. 485~489, Aug. 1936
- 11) Frocht, M.M., "Photoelasticity", Vol. 1, 1941, John Wiley & Sons, Inc., London, p. 214
- 12) Dally J. W. & W. F. Riley, "Experimental Stress Analysis", 2nd ed., McGraw-Hill, pp. 406~489 1978