圓孔놋치를 갖는 部材의 塑性變形擧動에 關한 硏究

金 正 一

A Study on the Plastic Strain Behavior of Hole Notchd Plate

Kim Jeongill

〈目 次〉

1. 序 論
2. 塑性 變形 擧動의 有限 要素法에 依한 解析
3. 實 驗
4. 考 察
5. 結 譽
參考文獻

Abstract

Using the optical interference method, the plastic strain hehavior and the progress of the through-the-thickness deformation around a hole notch tip for SS41 steel under the tensile load were observed continuously on the various sisz of hole notches.

The relationship berween the plastic strain behavior and applied load was clearly explained.

Important results obtained are as follows:

1) The plastic strain behavior and the progress of the through-the-thickness deformation around a hole notch tip can be observed by the optical interference method.

2) If the ratio of hole notch diameter to specimen breadth is below 0.1, plastic flow process from the hole notch tip appears to the direction of 45° to the tensile axis. However, if that ratio is over 0.1, it appears perpendicular to the tensile axis.

3) Even if the plastic flow initiates at the hole notch tip, it spreads out stably to the specific zone, and then, the plastic flow grows up rapidly toward general yield.

1. 序 論

構造物의 最適 設計를 위해서는 外部로 부터 加해지는 荷重에 依한 部材의 彈性 및 塑性 變形擧動을 正確히 把握할 必要가 있다.

一般的인 境遇, 部材는 應力 集中 部인 notch를 包含하고 있으므로 이러한 notch先端 領域의 彈一塑性 變形 擧動은 構造物의 變形 및 破壞機構를 究明하는데 가장 重要한 要素이다. 卽, 外部 負荷에 依해서 notch周圍에서 最初로 發生한 彈性的인 擧動이 어떠한 過程을 거쳐 塑性的인 擧動으로 遷移하며, 또한 部材 全體로 어떻게 퍼져 나가는가 하는 連續的인 過程을 正確히 把握할 必要가 있다.

지금까지 notch 를 갖는 部材의 変形 擧動에 関해서는 많은 解析的 研究 結果가 報告가 되어 있다. 即, Hult, Koshinen, Allen과 Southwell, Stimpson 과 Eaton에 等의 解析 結果가 報告되어 있으며, 이들의 研究 結果는 어느 것이나 平板의 片側에 位置한 slit notch 또는 V notch 先端에 있어서의 塑性 変形 擧動을 다루고 있다.[1]

引張 荷重을 받는 板의 中央에 位置한 円孔 notch 周囲의 応力과 変形에 対해서는 光弾性法 [2] 또는 解析法 [3] 에 依한 研究 結果가 報告되어 있다. 이 研究 結果들은 簡略化한 弾性 model 下에서 이루어진 것이므로 応力에 対해 非 直線性, 非 加逆性을 갖는 塑性 変形 擧動에 対해서는 言及되어 있지 않다.

本 研究에서는 中央에 円孔 notch를 갖는 部材에 対하여 引張 荷重이 作用할 때 Notch 部近에서 最初로 塑性 変形이 発生하여 그것이 全面 降伏에 이르기 까지의 連続的 過程을 有限要素法에 依한 解析 및 実験을 通하여 考察하였다. 実験은 光干涉法을 利用 함으로써 塑性領域의 微視的인 変化 擧動을 直接 観察하였으며 円孔 notch 의 曲率 半径의 変化에 따르는 塑性 変形 擧動의 変化를 比較 検討하였다.

2. 塑性 變形 擧動의 有限要素法에 依한 解析

2・1 荷重과 応力

有限要素法에 依한 応力과 変形率의 解析은 要素内 任意의 一点의 変位와 変形率을 다음과 같이 近似的으로 節点들의 変位로써 表示할 수 있다는데 그 基礎를 두고 있다.[4]

$$\{u\} = [N]\{q\} \tag{1}$$

$$\{\varepsilon\} = [B]\{q\} \tag{2}$$

여기서, $\{u\}$: 要素内 任意의 一点의 変位

$[N]$: 形状函数(shape function)

$\{q\}$: 節点의 変位

$\{\varepsilon\}$: 要素内 任意의 一点의 変形率

〔B〕 : 要素의 幾荷的 形態와 形狀函数에 따라 決定
되는 行列

한 要素에 作用하는 힘들의 平衡方程式은

$$\int_v [B]^T \{\sigma\} dv = \{F\} + \int_s [N]^T \{\bar{T}\} ds + \int_v [N]^T \{\bar{X}\} dv \quad (3)$$

여기서, $\{\sigma\}$: 応力

$\{F\}$: 節点力

$\{\bar{T}\}$: 表面力

$\{\bar{X}\}$: 質量力

그런데 塑性域에서는 応力과 変形率의 関係가 非線形일 뿐 아니라 荷重을 加할 때와 荷重을 除去할때의 經路가 相異하다. 따라서 弾－塑性 解析에서는 荷重의 增分과 応力의 增分과의 関係를 利用하게 되므로[5] 式(3)을 微分하면 다음과 같다.

$$\int_v [B]^T \{d\sigma\} dv = \{dF\} + \int_s [N]^T \{d\bar{T}\} ds + \int_v [N]^T \{d\bar{x}\} dv \quad (4)$$

2・2 応力 增分과 変形率 增分과의 関係

金属의 機械的 性質은 그 金属이 処하고 있는 條件에 따라 달라진다. 特히 이 機械的 性質은 温度에 敏感하게 反応한다. 応力과 変形率이 平衡 状態에 있고 荷重의 変化가 없다 하여도 材料의 機械的 性質이 変 한다면 그 平衡 状態는 더 以上 維持되지 못하고 새로운 平衡状態를 이루기 위하여 応力과 変形率은 変하게 된다.

塑性 領域에서는 応力과 変形率의 履歷이 平衡状態에 影響을 미친다. 例를 들면 単純 引張時 応力을 加할 때와 除去할 때의 經路가 다르기 때문에 하나의 応力에 対応하는 変形率은 2개 以上 있게 된다. 따라서 이러한 現象들을 考慮하기 위하여 前述한 弾－塑性 解析에서는 荷重, 応力, 変形率의 增分들을 利用한다. 그러므로 応力과 変形率의 関係는 다음과 같다.[4]

$$\{\varepsilon\} = [C^e]^{-1} \{\sigma\} + \{\varepsilon^t\} + \{\varepsilon^p\} \quad (5)$$

여기서, $[C^e]$: 弾性行列

$\{\varepsilon^t\}$: 熱変形率

$\{\varepsilon^p\}$: 塑性変形率

이 式을 微分하면 다음 式을 얻는다.

$$\{d\varepsilon\} = d[C^e]^{-1}\{\sigma\} + [C^e]^{-1}\{d\sigma\} + \{\alpha\}d\theta + \{d\varepsilon^p\} \qquad (6)$$

여기서, $\{\alpha\}$: $[\alpha, \alpha, \alpha, 0, 0, 0]^T$

α : 材料의 熱膨脹係数

θ : 材料의 温度

弾性 領域에서는 塑性 変形率의 增分이 零 ($\{d\varepsilon^p\} = 0$)이므로 式(6)에서 応力 增分 $\{d\sigma\}$에 関하여 整理하면

$$\{d\sigma\} = [C^e]\{d\varepsilon\} - \{dL_t^e\} \qquad (7)$$

여기서, $\{dL_t^e\} = [C^e]\, d[C^e]^{-1}\{\sigma\} + [C^e]\{\alpha\}d\theta$

弾性 領域과 塑性 領域의 区別法은 다음과 같다.

어떤 応力 函数 $f(\sigma)$를 塑性 変形(plastic flow)의 判別式으로 正義하고 이 函数의 값이 $f_0(W_p, \theta)$에 이르면 塑性 領域이 되고 其他는 弾性 領域이다. f_0의 값은 材料의 種類에 따라 다르며 塑性일 W_p와 温度 θ의 函数이다.

塑性 領域에서는 塑性 変形率의 增分 $\{d\varepsilon^p\}$는 다음과 같다.[5)]

$$\{d\varepsilon^p\} = d\lambda\left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\} \qquad (8)$$

여기서, $d\lambda$: 正의 常数

$f(\sigma)$: 塑性 変形 判別式

그리고 塑性 変形이 일어나고 있는 동안에는 다음式이 成立한다.

$$f(\sigma) = f_0(W_p, \theta) \qquad (9)$$

이 式을 微分하면 다음과 같다.

$$\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\}^T \{d\sigma\} = \frac{\partial f_0}{\partial w_p} dw_p + \frac{\partial f_0}{\partial \theta} d\theta = \text{———} (10)$$

한편 塑性일의 增分 dw_p 는 다음과 같다.

$$dw_p = \{\sigma\}^T \{d\varepsilon^p\} = \{\sigma\}^T \, d\lambda \{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\} \text{———} (11)$$

式(6), (8), (10), (11) 로 부터 $d\lambda$를 求하면 다음과 같다.

$$d\lambda = \frac{1}{S}(\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\}^T [C^e] \{d\varepsilon\} - \{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\}^T [C^e] \, d[C^e]^{-1} \{\sigma\}$$

$$- \{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\}^T [C^e] \{\alpha\} d\theta - \frac{\partial f_0}{\partial \theta} d\theta \text{———} (12)$$

여기서, $S = \{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\}^T [C^e] \{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\} + \frac{\partial f_0}{\partial w_p} \{\sigma\}^T \{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\}$

式(12) 의 $d\lambda$를 式(8)에 代入하고 $\{d\varepsilon^p\}$ 를 求하여 式(6) 에 代入한 다음 $\{d\sigma\}$ 에 關하여 整理하면

$$\{d\sigma\} = [C^{ep}] \{d\varepsilon\} - \{dL_t^p\} \text{———} (13)$$

여기서, $[C^{ep}] = [C^e] - [C^e] \{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\} \{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\}^T [C^e] / S$

$$\{dL_t^p\} = [C^{ep}] (d[C^e]^{-1} \{\sigma\} + \{\alpha\} d\theta) - \frac{1}{S}[C^e] \{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\} \frac{\partial f_0}{\partial \theta} d\theta$$

式(7)과 式(13) 을 比較하면 應力 增分과 變形率 增分과의 關係는 다음과 같다.

$$\{d\sigma\} = [C] \{d\varepsilon\} - \{dL_t\} \text{———} (14)$$

弾性 領域에서는 $[C] = [C^e], \{dL_t\} = \{dL_t^e\}$ 이고, 塑性領域에서는 $[C] = [C^{ep}], \{dL_t\} = \{dL_t^p\}$ 이다.

2・3 剛性 行列과 荷重 vector

式 (2)를 微分하면

$$\{d\varepsilon\} = [B] \{dq\} \text{———} (15)$$

이 式을 式 (14)에 代入하면 다음과 같다.

$$\{d\sigma\} = [C][B]\{dq\} - \{dL_t\} \qquad (16)$$

式(16)을 式(4)에 代入하여 整理하면 다음과 같다

$$[K]\{dq\} = \{dL\} \qquad (17)$$

여기서, $[K] = \int_V [B]^T [C][B]\, dv$

$$\{dL\} = \int_V [B]^T \{dL_t\}\, dv + \{dF\} + \int_S [N]^T \{d\overline{T}\} ds + \int_V [N]^T \{d\overline{X}\}\, dv$$

式(17)은 어느 한 要素에 作用하는 荷重 增分 {dL}과 그 要素의 節点 變位 增分 {dq}와의 關係를 나타낸 것으로, 剛性行列 [K]와 荷重 vector {dL}를 全 要素에 對하여 組立(assemblage)하고, 境界 條件에 따라 修正(modification)하면 變位 增分 {dq}가 求해진다. 이것을 式 (15)에 代入하여 變形率 增分 {dε}을 求하고, 式(16)에 代入하여 應力 增分 {dσ}를 求한다.

2・4 von Mises 의 判別式에 依한 平面應力 狀態의 二次元 應力 解析

式(17)에서 剛性 行列 [K]를 求하려면 [C]를 알아야 하는데, 彈性 領域에서는 $[C] = [C^e]$ 이므로 平面 應力 狀態下의 二次元 應力 解析의 境遇에는 다음과 같다.[4]

$$[C^e] = \frac{E}{1-\nu^2}\begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \qquad (18)$$

여기서, E ; young 係數

ν ; poisson 比

塑性 領域에서는 $[C] = [C^{ep}]$ 이므로 $[C^{ep}]$를 求하려면 塑性 變形 判別式이 利用되는데 本 稿에서는 von Mises 의 判別式을 利用하고자 한

다.

von Mises의 塑性 變形(plastic flow)判別式 $f(\sigma)$는 剪断 変形 에너지(distortion energy)이다.[5] 平面 応力 状態下의 二次元 応力解析의 境遇 判別式 $f(\sigma)$는 다음과 같다.

$$f(\sigma) = \frac{1}{12G}\{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x^2 + 6\tau^2_{xy}\} \qquad (19)$$

여기서, G ; 剪断 弾性係数

이 $f(\sigma)$의 값이 単純 引張時 弾性 限界의 剪断 変形 에너지와 같으면 塑性 変形이 일어난다고 看做한다.[5]

単純 引張時 弾性 限界를 σ_o라 하면 弾性 限界에서의 剪断 変形 에너지 u_1은 $u_1 = \frac{1}{6G}\sigma_o^2$ (20)

式 (20)과 式 (19)를 等置시켜 다음式을 얻는다.

$$\sigma_o = \sigma_e \qquad (21)$$

여기서, σ_e(等価応力) $= \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \sigma_y^2 + \sigma_x^2 + 6\tau^2_{xy}\}}$

式(21)에 依하면 塑性 変形이 일어나고 있는 동안에는 等価 応力 σ_e가 単純 引張時의 弾性 限界 σ_o와 같다. 따라서 σ_e가 σ_o보다 작은 領域($\sigma_e < \sigma_o$)은 弾性 領域이고, σ_e가 σ_o보다 크거나 같은 領域

($\sigma_e \geq \sigma_o$)은 塑性 領域이다.

式(19)를 式(13)의 $[C^{ep}]$와 $\{dL^D_t\}$에 代入하여 整理하면 다음과 같다.

$$[C^{ep}] = [C^e] \frac{2G^2}{(1-\nu)GS' + 2(1-\nu^2)H'\sigma_e^2}\{Pc\}\{Pc\}^T \qquad (22)$$

$$\{dL^p_t\} = [C^{ep}](d[C^e]^{-1}\{\sigma\} + \{a\}d\theta\} - \frac{2G\sigma_e}{GS' + 2H'(1-\nu)\sigma_e^2}\frac{\partial\sigma_o}{\partial\theta}d\theta\{p_c\} \qquad (23)$$

여기서, $S' = (5-4\nu)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) - (8-10\nu)\sigma_x\sigma_y + 18(1-\nu)\tau^2_{xy}$

$$H' = \frac{\partial \sigma_o}{\partial \bar{\varepsilon}_p}$$

$\bar{\varepsilon}_{p}$: 単純 引張時 塑性 変形率

$$\{Pc\} = \begin{Bmatrix} (2-\nu)\sigma_x - (1-2\nu)\sigma y \\ (2-\nu)\sigma y - (1-2\nu)\sigma x \\ 3(1-\nu)\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}$$

2 . 5 塑性 変形 挙動의 解析

有限 要素法에 依한 弾一塑性 応力 解析을 두께가 3㎜, 幅이 28㎜ 인 軟鋼材의 中央에 円孔이 있는 境遇에 適用했다. 本 model 은 上下 左右가 対称이기 때문에 Fig. 1 과 같이 円孔을 포함한 全 材料의 1/4 에 対하여 解析하고 円孔 周囲의 塑性域을 計算하였다.

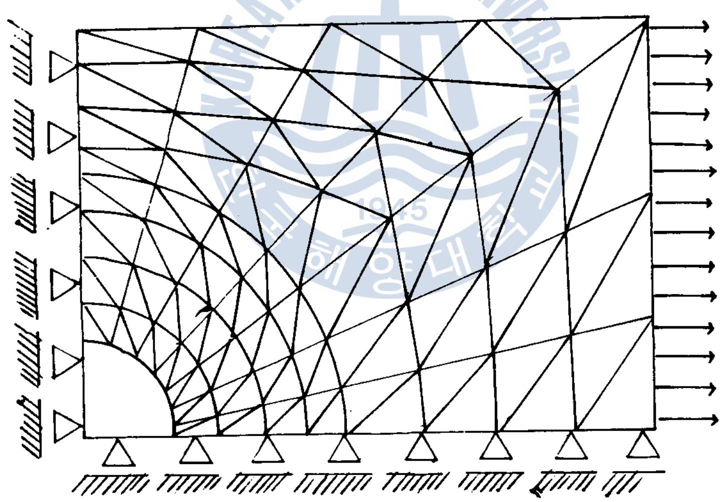


Fig. 1 Divided element around a notch tip and boundary condition

Fig. 1에서와 같이 model 을 三角形 要素로 分割하는데 있어 応力의 変化가 심할것 같이 豫想되는 円孔 周囲의 要素 分割은 더욱 細分化하였다.

円孔에서 充分히 떨어진 곳에서 均一 引張 応力(uniform tensile stress)이 作用한다고 仮定하여 이 応力의 微少한 増加에 対応하는 塑性 域의 要素 番号를 表示하도록 함으로써 塑性域을 알아낼 수 있었다.

式(17)에서 応力이 作用하는 동안 温度 変化가 없다 ($d\theta = 0$)고 하면

$$\{dL_t\} = 0 \qquad (24)$$

本 model에서는 質量力은 無視할 수 있으므로

$$\{d\bar{X}\} \doteq 0 \qquad (25)$$

荷重은 円孔에서 充分히 떨어진곳의 均一 引張 応力 뿐이므로 節点力을 組立하면 零이 되므로 式 (17)에서

$$\{dL\} = \int_S [N]^T \{d\bar{T}\} ds \qquad (26)$$

model의 境界 条件은 Fig.1과 같이 対称軸에 垂直 方向 変位를 零으로 놓았다.

3. 実 驗

3·1 光干涉法의 測定 原理[6)]

光源上의 一点으로 부터 나온 빛이 두 部分으로 나누어져 両者가 서로 다른 径路를 通해 다시 合해 질때에는 干涉 現象이 일어난다. 이 両光의 振幅을 各各 A_o, B_o 라고 하면 干涉光의 세기는

$$I = A_o^2 + B_o^2 + 2A_oB_o \cos\varphi \qquad (1)$$

로 表示된다.

式(1)에서 φ는 A光과 B光의 位相差이고 이것은 다시

$$\varphi = \frac{2\pi r}{\lambda} + x \qquad (2)$$

로 주어진다.

여기서, r : A光과 B光의 光路差

x : 途中에 反射를 받았을 때 생기는 位相変化의 差

λ : 光源의 波長

式 (1)은 $\cos\varphi = 1$ 일때 最大이고, $\cos\varphi = -1$ 일때 最少이므로 光源에 単色光을 利用하면 最大일때 밝고, 最少일때는 어두워지므로 明暗의 干涉무늬가 생긴다.

光干涉法에 依한 試材의 strain 測定은 測定用 光束을 2분하여 그 중 한 쪽의 光束을 試片의 表面에서 反射시켜 干涉무늬가 생기도록 한다. 이 때에 試片의 表面에 凹凸의 変化가 생기면 光路差에 変化가 생기므로 干涉 무늬의 横様이 変化한다. 이것을 利用하여 試片 表面의 strain 分布를 測定할 수 있다.

Fig.2 는 optical flat에 依한 光干涉을 일으키기 위한 光学系이다. 또한 Fig. 3은 optical flat과 試片 表面과의 사이에서 光干涉 무늬가 생기는 原理를 나타낸 것이다.

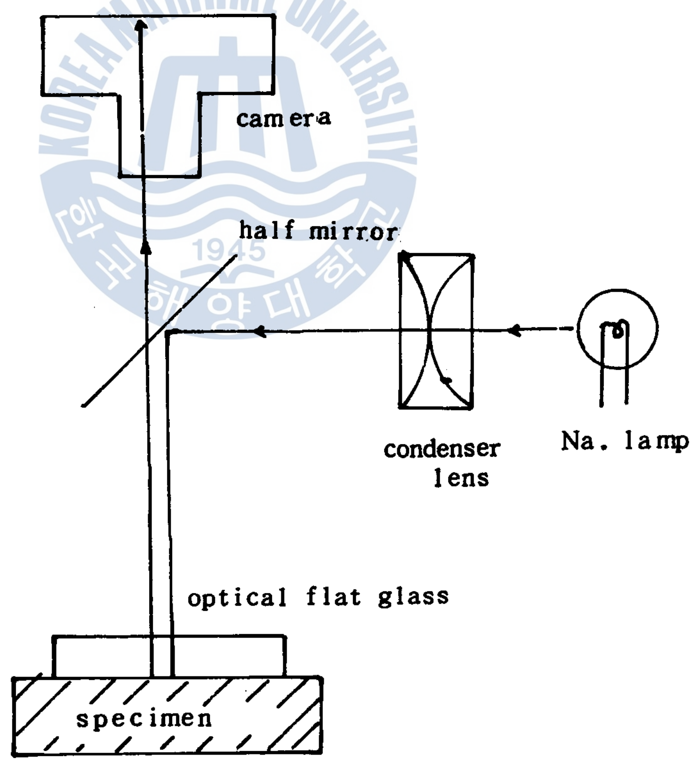
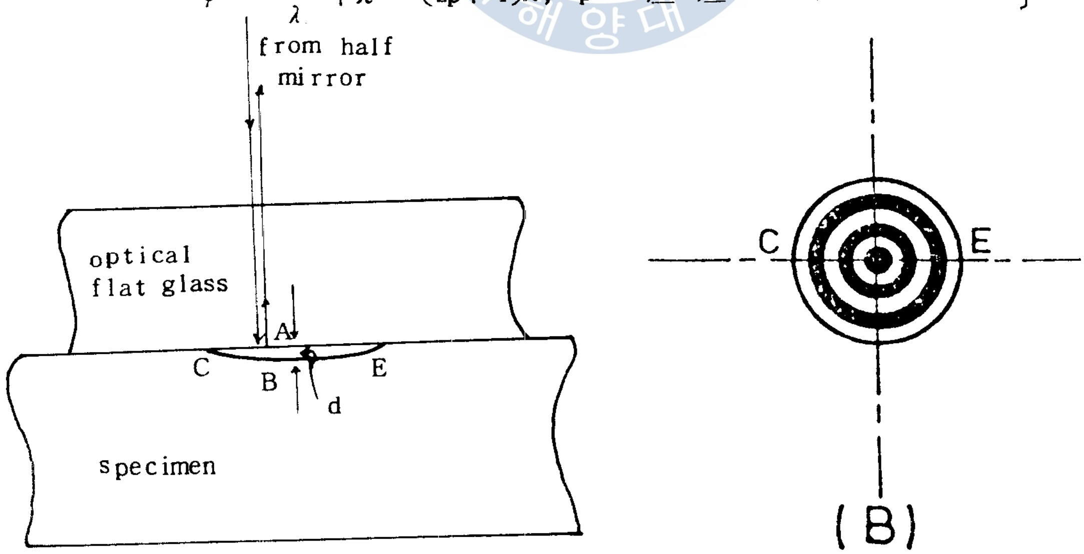


Fig.2 optic system for observing optical interference fringes fig. 3 (A)와 같이 試片 表面에 凹部 CE가 있고 그 위에 optical flat가 놓여 있다고 하면 half mirror로 부터 나오는 빛은 一部는 optical flat의 底面 A에서 反射하고 一部는 試片의 表面 B까지 到達한 후 거기서 反射하게 된다. 이 때에 A에서 反射한 光束과 B에서 反射한 光束 사이에는 π의 位相 変化 差가 생기므로 式(2)에 있어서의 位相 差는

$$\varphi = \frac{2\pi r}{\lambda} + \pi \qquad (3)$$

로 表示된다. 또한 式 (1)에 있어서 光源에 単 色光을 利用하면 $\cos\varphi = 1$이면 光의 세기 I는 最大로 되고, $\cos\varphi = -1$에서 最少로 되어 各各 明暗의 줄 무늬가 생긴다. 그러므로

$$\left.\begin{array}{l} \cos\varphi = 1 \text{ 일때는} \\ \varphi = \dfrac{2\pi r}{\lambda} + \pi = 2p\pi, \quad p = 0, \pm 1, \pm 2 \text{ 로 되여 明이 된다.} \\ \cos\varphi = -1 \text{ 일때는} \\ \varphi = \dfrac{2\pi r}{\lambda} + \pi = (2p+1)\pi, \quad p = 0, \pm 1, \pm 2 \text{ 로 되여 暗이 된다.} \end{array}\right\} \qquad (4)$$



(A) (B)

Fig.3 Principle for optical interference fringes

Fig. 3 (A)의 境遇 凹部의 깊이를 d라고 하면 式(3)에 있어서 光路差 r는 2d가 되므로 式 (4)에 依해서 明環의 境遇에는

$$d=\frac{\lambda}{2}(p-\frac{1}{2}),\qquad p=0,\pm1,\pm2 \qquad (5)$$

即 Fig. 3 (B)에 있어서 明環과 明環사이의 거리는 $\frac{\lambda}{2}$의 order 로 되여 있다.

暗環의 境遇는

$$d=\frac{\lambda}{2}\cdot p,\qquad p=0,\pm1,\pm2 \qquad (6)$$

로 되어 暗環과 暗環사이에도 $\frac{\lambda}{2}$의 order 로 되여있다.

따라서 試片 表面의 変形量 d는 $\frac{\lambda}{2}$의 order 로 測定이 可能하다

3·2 実 験 方 法

試片은 SS41 軟鋼材이고 化学 成分과 機械的 性質은 Table 1 과 같고 試片의 形状은 Fig. 4 와 같다.

試験 装置는 自作 lead screw式 手動 引張機이며 試片에 加해지는 均一 応力은 試片에 strain gauge를 附着하여 測定하였다. 또한 応力의 増加에 따르는 塑性域의 伝播 過程은 光干渉法에 依해 連続的으로 観察하였다. 実験 装置의 全景은 Fig. 5와 같다.

Chemical compositions (Wt %)					Mechanical properties		
C	Si	Mn	P	S	Y.P (kg/mm^2)	T.S (kg/mm^2)	El (%)
0.176	0.04	0.50	0.009	0.021	30	44.4	36

Table1. Chemical compositions and mechanical properties of materials.

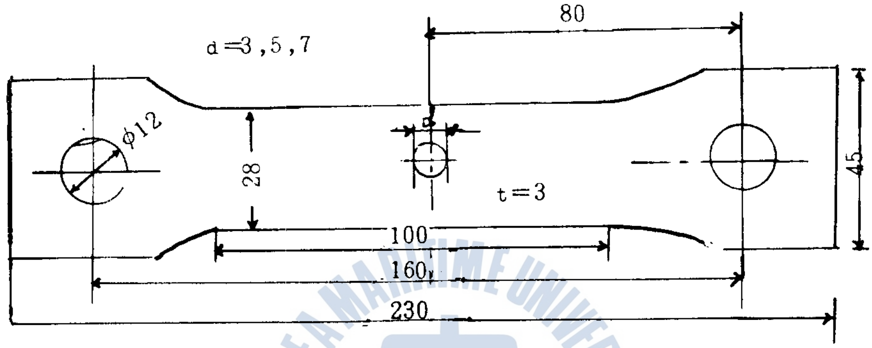
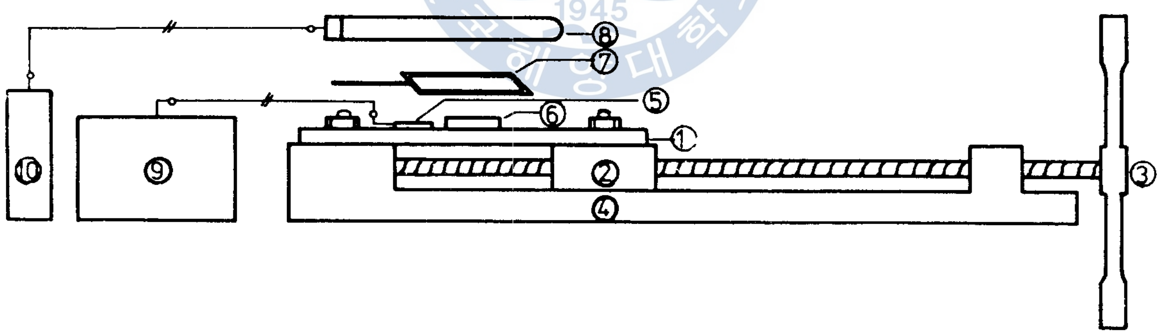
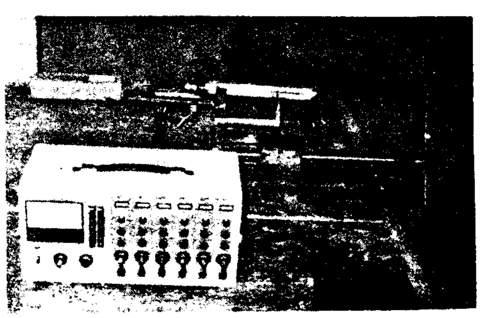


Fig.4 Dimension of specimen





1. specimen
2. leading block
3. handle
4. bed
5. strain gauge
6. optical flat
7. half mirror
8. na.lamp
9. strain amplifier
10. transformer

Fig.5 Photo and schematic diagram of tensile tester

3・3 実 験 結 果

Fig. 6 및 Fig. 7은 直徑 3㎜, 5㎜ 및 7㎜ 円孔 notch를 갖는 試片에 対한 光干渉에 依한 塑性 領域의 伝播 過程을 連続的으로 観察한 結果이다.

応力의 増加에 따라 円孔 notch 周囲에는 光干渉 무늬의 密集 現象이 나타나고, 이러한 密集 現象이 나타나는 領域은 直徑 3㎜ notch의 境遇에 試片의 引張軸에 対하여 約 45° 方向, 直徑 5㎜, 7㎜ notch의 境遇에는 直角 方向으로 伝播됨이 観察된다. 여기서 光干渉 무늬의 密集 領域은 塑性 変形으로 因하여 試片의 두께 方向으로 necking 現象이 일어난 領域으로 이 領域이 바로 塑性 領域이다.

이 結果에 依하면 本 実験의 境遇와 같이 necking zone이 뚜렷이 나타나는 材料의 境遇에는 円孔 notch 周囲에 最初로 塑性 領域이 発生한 後에도 그것이 一定 길이에 伝播되기 까지는 매우 緩慢히 進行되며 一定 길이에 到達한 以後에는 比較的 短 時間内에 全面 降伏에 이르고 있음이 Fig. 6에서 観察된다. 또한 塑性 領域의 伝播 過程은 試片의 幅(B)와 円孔 notch의 直徑(D)와의 比 D/B에 따라서 달라짐이 観察된다. 即 D/B의 값이 0.1인 直徑 3㎜ notch의 境遇에는 引張軸에 対하여 45° 方向으로 塑性 変形이 일어나고 있으나, D/B의 값이 0.1以上인 直徑 5㎜ 및 7㎜ notch의 境遇에는 引張軸에 対하여 直角 方向으로 塑性 領域이 나타나서 全面 降伏에 이르고 있음이 Fig. 7에서 観察된다.

一般的으로 notch가 없는 平滑 板材의 境遇, 即 D/B가 零인 境遇에는 引張軸에 対하여 45° 方向으로 slip가 発生하여 塑性 変形이 일어난다는 것은 잘 알려진 事実이다. 따라서 D/B의 값이 0.1以下인 境遇의 塑性 変形 挙動은 notch의 影響을 거의 받지 않으나, 그 以上의 값에서는 引張軸에 対하여 直角 方向인 試片의 幅, 即 最少 断面積 方向으로 塑性 領域이 伝播되어 変形된다는 것을 알 수 있다.

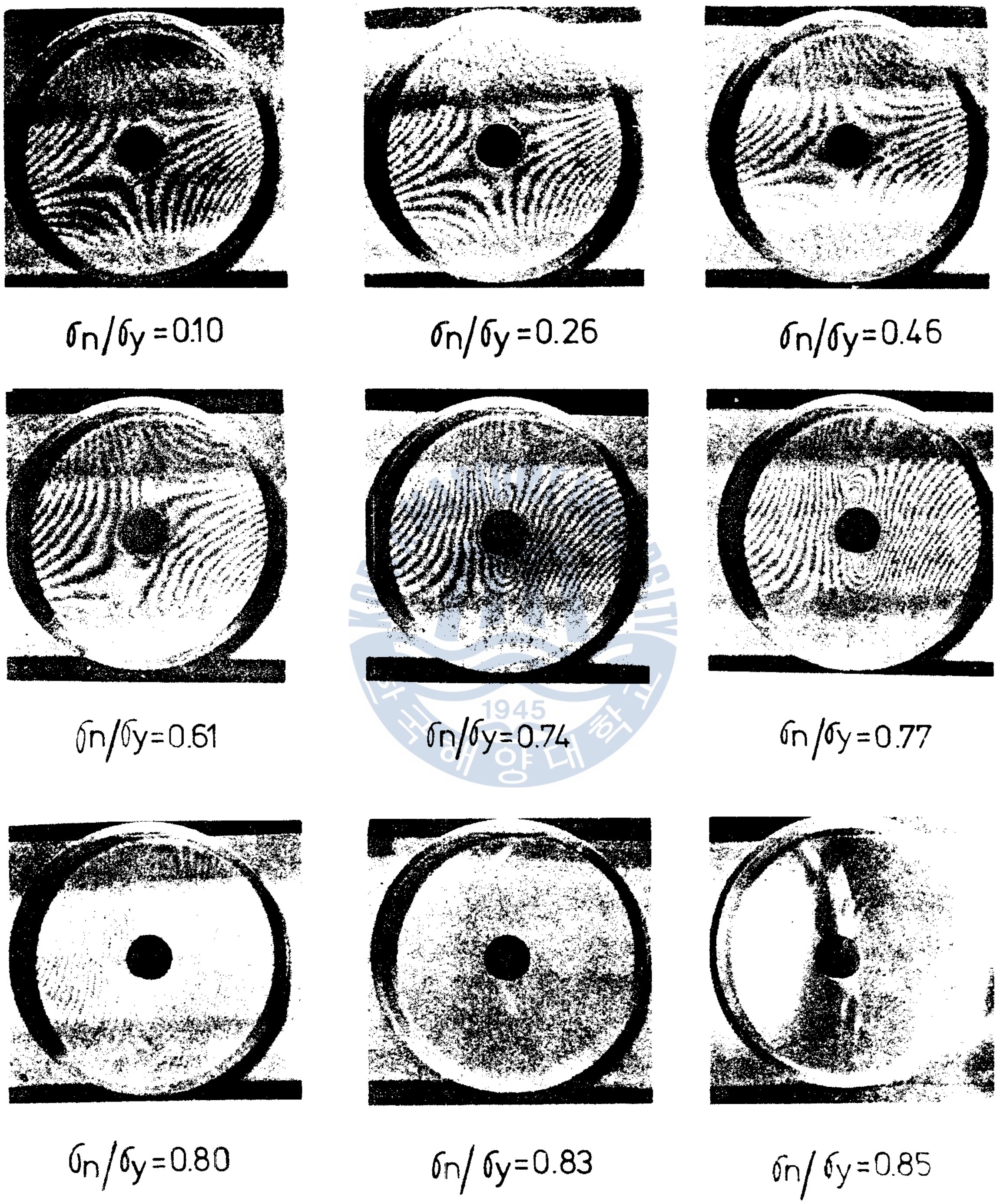


Fig.6 Progress behaviors of plastic flow process by optical interference method. (d = 5 ㎜)

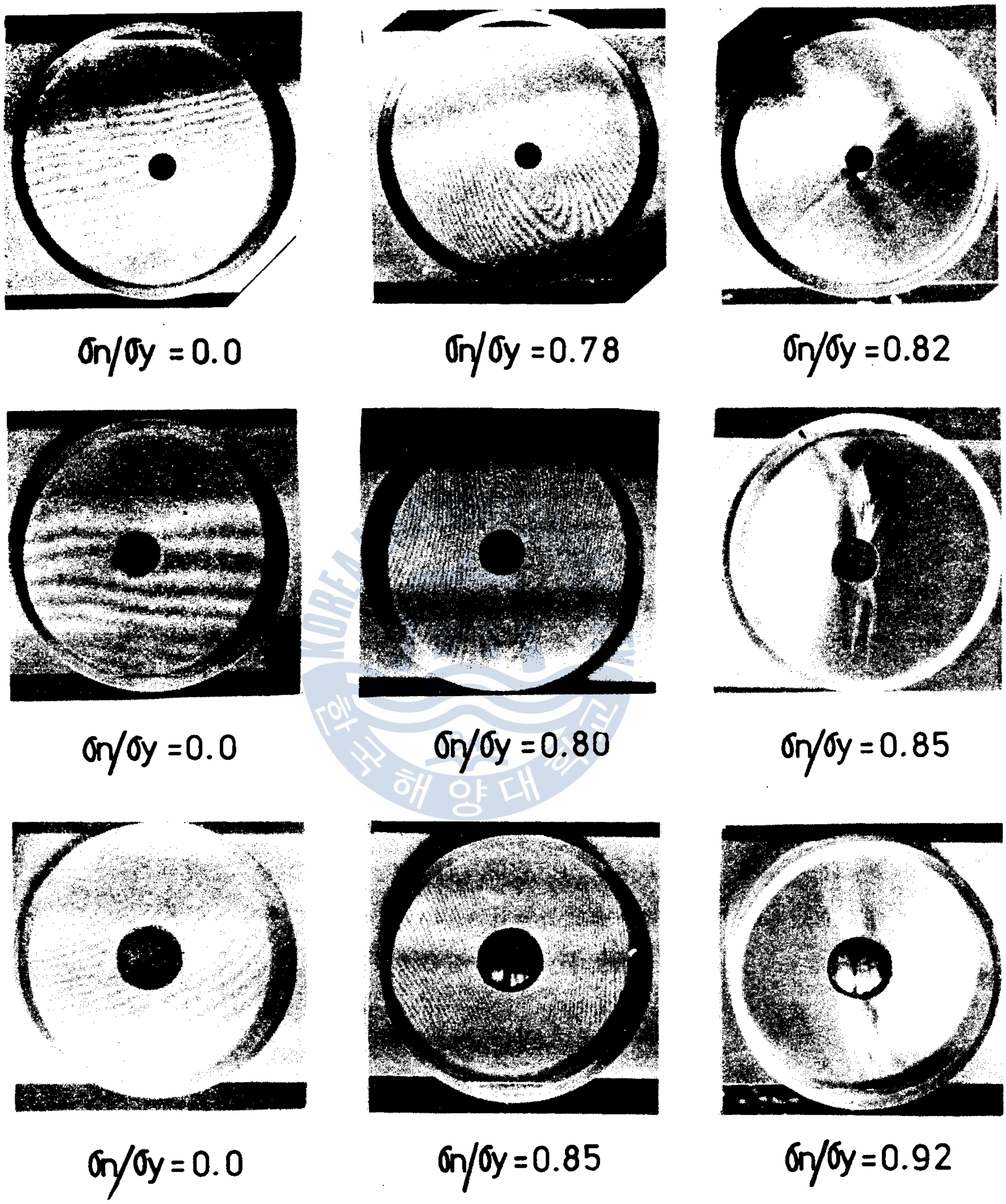


Fig.7 Progress behaviors of plastic flow process by optical interference method. (d = 3, 5, 7 mm)

또한 Fig.8 로 부터 円孔 notch 周囲에 最初로 塑性 変形이 発生 할 때의 試片에 作用하는 平均 応力을 測定 함으로써 試片의 降伏 応力과의 相関 関係를 利用하여 notch의 応力 集中 係数(stress concentration factor)를 求할 수 있다.

3・4 Notch 周囲의 応力 集中 係数

Fig. 8은 3 ㎜, 5 ㎜ 및 7 ㎜ 円孔 notch 周囲에 塑性 変形이 最初로 発生할 때 干渉 무늬의 模様을 撮影한 것이다. 이때 各 試片의 最少 断面積에 있어서의 公称 応力을 求하여 材料의 降伏 応力과의 相互 関係를 利用하여 応力 集中 係数를 求하면 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{\sigma_n}$$

여기서, α : 応力 集中 係数

σ_y : 材料의 降伏 応力

σ_n : notch 周囲에 塑性 変形이 最初로 発生할때의 最少 断面積에서의 公称 応力

Fig. 9는 本 実験에서 求한 応力 集中 係数와 지금까지 報告된 研究 結果를 比較 対照한 것이다. 이 対照 結果에 依하면 光干渉法에 依하여 実験的으로 求한 応力 集中 係数는 Howland, Coker 等이 光弾性法 및 解析法 等의 結果로 求한 값[7]과 거의 같은 傾向을 보이고 있다. 또 이 結果로 부터 試片의 中央에 設置한 円孔 notch의 直径이 커짐에 따라 応力 集中 係数는 작아지고 있다는 것을 알 수 있다.

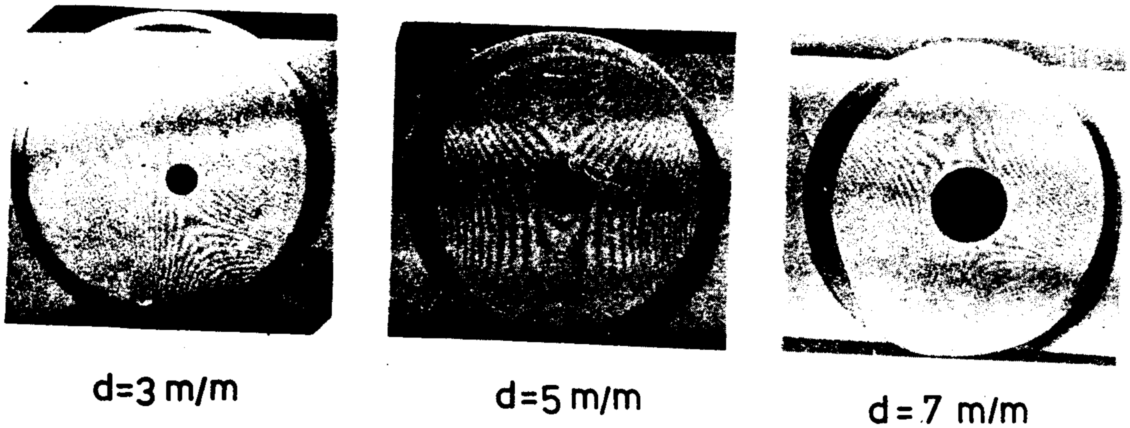
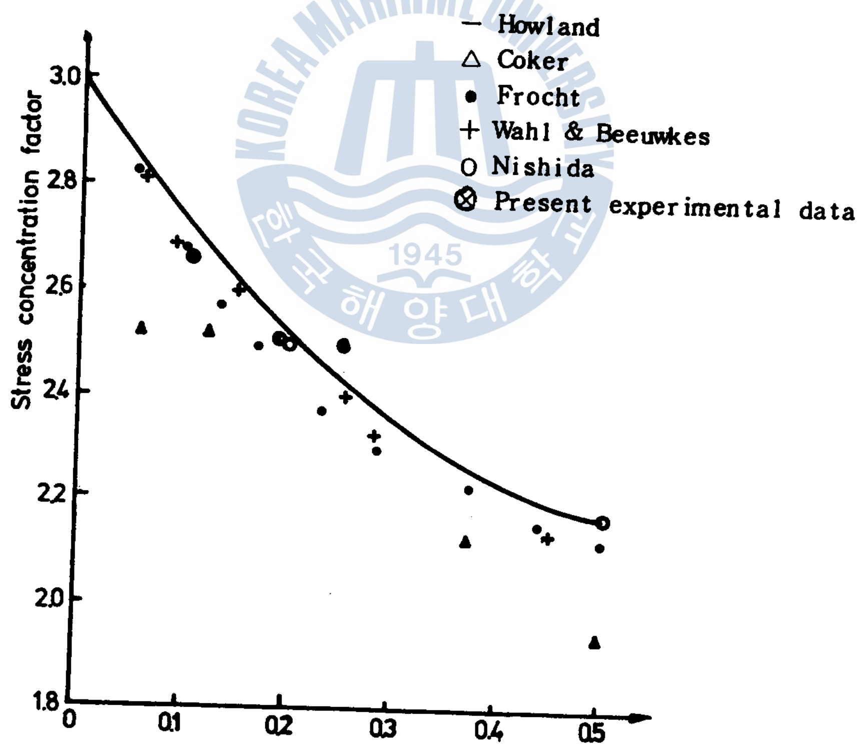


Fig.8 Origin of plastic flow at notch tip.



Dia. of notch/Breadth of specimen

Fig.9 Stress concentration factor vs. D/B.

4. 考 察

Fig 10은 試片 中央에 直徑 3㎜의 円孔 notch가 있는 境遇와 5㎜의 円孔 notch가 있는 境遇에 塑性域의 伝播 挙動을 有限 要素法에 依해 求한 結果를 円孔 notch의 1/4만 表示한 것이다.

이것을 検討하면, 直徑 3㎜ notch의 境遇에는 引張軸에 対하여 45° 方向으로 塑性 変形이 集中的으로 発生하고, 直徑 5㎜ notch의 境遇에는 처음에는 引張軸에 対하여 直角 方向으로 塑性 変形이 一定길이 만큼 発生한 後 45° 方向으로 全面 降伏에 이르고 있음을 알 수 있다.

有限 要素法에 依한 以上의 解析 結果와 Fig. 7의 実測 結果를 比較 検討해 보면, 塑性 領域의 模様에는 差異가 있으나 応力의 增加에 따르는 塑性 変形의 伝播 経路에는 비슷한 様相을 나타내고 있다. 塑性 領域의 模様에 差異가 나타난 것은 試材가 下降伏 現象 및 Lüders band 가 뚜렷이 나타나는 SS41 軟鋼材이나, 有限 要素法에 依한 解析에 있어서는 이것이 考慮되지 않았기 때문인 것으로 推察되나 앞으로 좀 더 徹底한 究明이 期待된다.

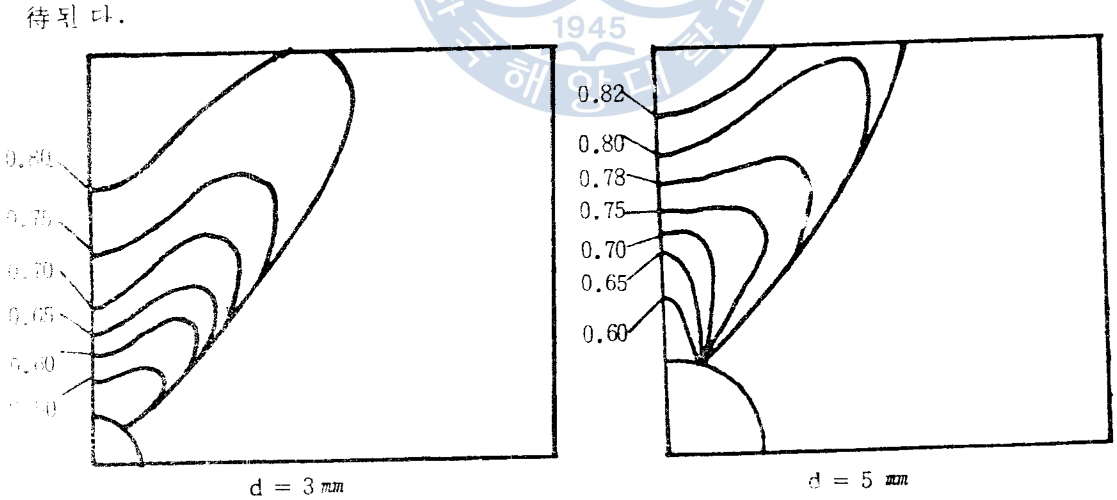


Fig.10 Progress behaviors of plastic flow process by finite element method.

5. 結 論

研究 結果를 整理하면 다음과 같다.

① 光干涉法에 依하면 notch 周囲의 塑性域의 伝播 擧動을 連続的으로 観察할 수 있고, 그 notch 周囲의 応力 集中 係数도 求할 수 있다.

② 試片의 幅 (B)와 円孔 notch의 直径 (D)와의 比, 即 D/B의 값이 0.1 以下이면 引張軸에 対하여 45° 方向으로 塑性 変形이 일어나고, 그 以上에서는 引張軸에 直角 方向으로 塑性 変形이 進行됨을 알 수 있다.

③ notch 部에서 塑性 変形이 発生한 後에도 그 変形이 一定한 길이까지 伝播되는데는 매우 緩慢하고 安定的인 擧動을 보인다. 따라서 構造物의 設計를 現在 使用하고 있는 弾性 領域内 制限으로 부터 塑性領域内까지로 拡大하면 材料의 節約을 図謀할 수 있다.

参 考 文 献

1) W.W. Gerherich : Plastic Strain and Energy Density in Cracked plate part1, Exp. Mech., Vol.11, p.335, (1964)

2) 西田正孝 : 応力集中, 森北出版, 東京, p.221, (1967)

3) R.C.J. Howland : On the Stresses in the Neighbourdhood of a Circular Hole in a Strip under Tension, phil. Trans. Roy. Soc. A, Vol.229, p.48, (1930)

4) O.C. Zienkiewicz: The Finite Element Method, McGraw-Hill, London, p.24, (1977)

5) R.A.C. Slater: Engineering Plasticity, The Macmillan Press. Ltd., London, p.111, (1977)

6) 金永植 : 光干涉法을 利用한 스트레인 分布의 測定, 大韓機械学會誌, Vol.19, No.3, p,182, (1979)

7) R.G.Belie & F.J.Appl : Stress Concentration in Tensile Strips with Large Circular Holes, Exp.Mech., Vol.12, pp.190～195, (1972)