

切削中인 工具의 傾斜面上에 Crack 을 갖는 경우의 應力解析에 관한 研究

A Study on the Stress Analysis for Rake Face of a Tool with
Crack in Cutting Process

金 元 鎰*, 南 俊 祐**
W. I. Kim, J. W. Nam

ABSTRACT

The determination of stress distributions on the rake face of tool are important to understand the mechanism of metal cutting. For this reason, many researchers have been payed much effort to analyze machining stress distribution on the rake face.

The author's photoelastic experiment has shown that the stress distributions on a rake face can be obtained photoelastically by using a specially designed tool made of epoxy resin plate, and also, Stress Intensity Factors K_I , K_{II} and Crack Extension Angle can be determined by using Linear Elastic Fracture Mechanics.

1. 緒 論

切削中인 공구는 被削材로부터 切削抵抗을 받고, 工具 傾斜面에서 칩(chip)과의 摩擦作用으로 工具 刃先部(Cutting Edge)에 큰 應力集中 現象이 發生된다는 것은 잘 알려진 事實이다.⁽¹⁾ 오래 전부터 많은 研究者들에 의해 切削中 工具의 磨耗, 應力集中 및 칩핑(chipping) 現象을 緩和하기 위한 많은 研究結果⁽²⁾ 들이 提案되고 있으며, 그중 Strain Gauge를 利用한 應力解析 및 應力函數(Strain Function)를 利用한 彈性學的 理論解析 등이 代表的인 例라 할 수 있겠다. 그러나 이러한 方法論들은 거의가 靜的狀態의 應力解析 技法을 根據로 한 研究結果로서 被削材가 移送 또

는 回轉중인 實際 切削狀態와는 相當한 差異가 있음을 알 수 있다.

近來 動的現象에 對한 研究로서는 S. Ramalingon 와 L.L. Lehn⁽³⁾, 三本教⁽⁴⁾ 등이 切削時 工具角의 變化에 따른 被削材의 應力解析, 日井英治⁽⁵⁾, 山本明⁽⁶⁾, 金政斗⁽⁷⁾ 등이 切削中 工具의 應力分布에 對한 光彈性解析 등이 報告되고 있으며, 또한 岸浪建史⁽⁸⁾ 등은 工具刃先部の 剛性解析을 有限要素法으로 解析한 例도 있고, 上田完次⁽⁹⁾ 등은 切削工具에 對한 破壞力學的 解析을 試圖한 바도 있다.

光彈性 現狀을 切削機構의 解析에 利用하는 것은 그렇게 새로운 것은 아니지만 切削中の 應力狀態를 觀察할 수 있고, 等色線으로부터

* 慶南大學校 機械工學科

** 國民大學校 機械設計學科

直接 應力值들 얻을 수 있다는 利點이 있어서 他 實驗方法에 比해 많이 利用되고 있다.

이와같은 實驗方法을 適用하여 實際 金屬 切削에 그 技法을 應用하기 위한 一련의 基礎 研究로 볼 수 있다.

本 研究에서는 特殊하게 設計製作한 補助裝置를 光彈性 實驗裝置에 附着하여 切削時 工具刃先部の 應力分布를 2次元 切削모델을 바탕으로 測定하였으며 切削刃(Cutting Edge)의 破壞를 豫測하기 위해 工具刃先附近에 銳利한 Crack을 만들고 切削中 Crack周圍에 發生하는 應力分布를 光彈性的인 方法으로 解析하여 應力擴大係數(Stress Intensity Factor) 및 破壞進行 方向을 豫測하는데 目的을 두었다.

2. 基礎理論

2.1 Crack尖端附近的 應力分布

Fig.1 및 Fig.2에서와 같이 平均應力 狀態에 있는 Crack尖端附近的 應力成分과 應力擴大係數들 사이에는 다음과 같은 關係가 있는은 잘 알려진 事實이다.¹⁰⁾

$$\sigma_x = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) - \frac{KII}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) - \sigma_{ox}$$

$$\sigma_y = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{KII}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}$$

$$\tau_{xy} = \frac{KI}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} + \frac{KII}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

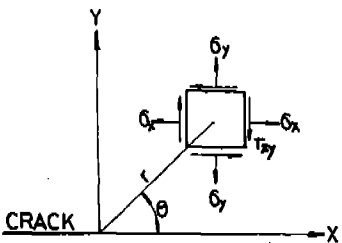


Fig.1 The Coordinates Near The Crack Tip

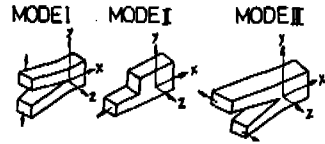


Fig.2 The Basic Modes of Crack Surface Displacement

여기서, KI, KII는 Crack 面의 變位の 2個 基本型에 대한 Mode I, Mode II의 壓力擴大係數이다. 式(1)에 있어서의 應力擴大係數는 荷重에 正比例하고 Crack 또는 外周의 境界條件에 의하여 決定되는 것으로 線形破壞力學에서 Crack尖端部の 應力の 強度를 나타낸다.

2.2 光彈性에 의한 應力擴大係數의 決定

Fig.1과 같은 應力狀態에서 얻을 수 있는 最大剪斷應力은

$$\tau_{max} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2(\tau_{xy})^2} \dots\dots\dots (2)$$

와 같이 表示하며, 光彈性 實驗에서 얻은 等色線 무늬의 次數를 N, 에폭시(Epoxy Resin) 板의 두께를 t, 光彈性感度를 α라 하면 다음 式으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2 \tau_{max} = \frac{N}{\alpha t} \dots\dots\dots (3)$$

式(1)~(3)의 關係로부터

$$\frac{1}{2\pi r} [(KI \sin \theta + 2KII \cos \theta)^2 + (KI \sin \theta)^2 + (KII \sin \theta)^2] + \frac{2\sigma_{ox}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} [KI \sin \theta (1 + 2 \cos \theta) + KII (1 + 2 \cos^2 \theta + \cos \theta)] + \sigma_{ox}^2 = \left(\frac{N}{\alpha t} \right)^2 \dots\dots\dots (4)$$

이다. 式(4)의 關係를 뉴우튼랩슨方法(Newton Raphson method)과 最小自乘法(Least-Squares method)을 滿足하는 最小化過程으로 얻을 수 있는 범함수(F_k)의 形態로 쓰고 Fig.3과 같이 等色線上의 任意의 點 즉, (r₁ θ₁), (r₂ θ₂), (r₃ θ₃).....(r_m θ_m)에 대해 適用시킴으로써 KI, KII, σ_{ox}를 구할 수 있다.

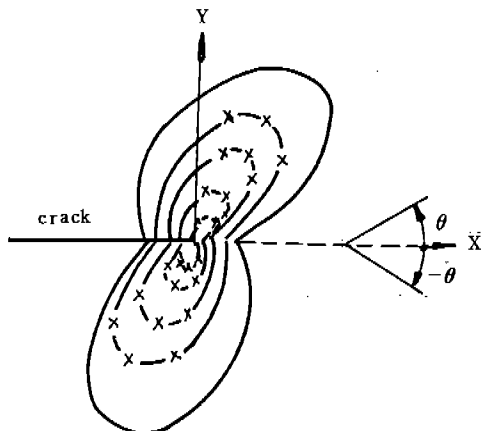


Fig. 3 Pointplot of Isochromatic fringe loop at the Crack Tip

$$F_k(KI, KII, \sigma_{ox}) = \frac{1}{2\pi r_k} [(KI \sin \theta_k + 2KII \cos \theta_k)^2 + (KII \sin \theta_k)^2] + \frac{2\sigma_{ox}}{\sqrt{2\pi r_k}} \sin \theta_k [KI \sin \theta_k (1 + 2\cos \theta_k) + KII(1 + 2\cos^2 \theta_k + \cos \theta_k)] + \sigma_{ox}^2 - \left(\frac{N_k}{at}\right)^2 = 0 \dots\dots\dots (5)$$

여기서, $k = 1, 2, 3, \dots\dots m$ 이며, $m > 3$ 이다.

式(5)의 $F_k=0$ 으로 놓고 KI, KII, σ_{ox} 를 反復法(Iteration Method)으로 決定하기 위해서 처음 推定한 값을 段階의으로 補完하기 위해 Taylor級數展開에 基本을 둔 反復方程式(Iteration Equation)으로 表示하면 다음과 같다.

$$(\Delta F_k)_{i+1} = (F_k)_i + \left(\frac{\partial F_k}{\partial KI}\right)_i \Delta KI + \left(\frac{\partial F_k}{\partial KII}\right)_i \Delta KII + \left(\frac{\partial F_k}{\partial \sigma_{ox}}\right)_i \Delta \sigma_{ox} \dots\dots\dots (6)$$

여기서, i 는 反復段階이고, $\Delta KI, \Delta KII, \Delta \sigma_{ox}$ 는 $(i+1)$ 反復段階의 推定值에 대한 補正值이다. 이 補正值들을 $(\Delta F_k)_{i+1} = 0$ 로 두면 式(5)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(F_k)_i = \Delta KI \left(\frac{\partial F_k}{\partial KI}\right)_i + \Delta KII \left(\frac{\partial F_k}{\partial KII}\right)_i + \Delta \sigma_{ox} \left(\frac{\partial F_k}{\partial \sigma_{ox}}\right)_i \dots\dots\dots (7)$$

Crack 尖端附近의 等色線上에 $k=1, 2, 3 \dots m$ 개의 任意의 點을 選擇한다고 하면 各各의

任意의 點에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[F] = [A] [\Delta k] \dots\dots\dots (8)$$

$$[F] = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{Bmatrix}_i$$

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial KI} & \frac{\partial F_1}{\partial KII} & \frac{\partial F_1}{\partial \sigma_{ox}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial KI} & \frac{\partial F_2}{\partial KII} & \frac{\partial F_2}{\partial \sigma_{ox}} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial F_m}{\partial KI} & \frac{\partial F_m}{\partial KII} & \frac{\partial F_m}{\partial \sigma_{ox}} \end{bmatrix}$$

$$[\Delta K] = \begin{Bmatrix} \Delta KI \\ \Delta KII \\ \Delta \sigma_{ox} \end{Bmatrix}_i$$

式(8)을 最小化 시키기 위하여 兩線에 Transpose Matrix $[A]^T$ 를 곱하면 다음과 같다.

$$[A]^T [F] = [A]^T [A] [\Delta K]$$

따라서

$$[\Delta K] = [(A)^T [A]]^{-1} [A]^T [F] \dots\dots\dots (9)$$

가 된다.

式(9)를 利用하여 Computer Program을 作成하고 初期推定值 KI, KII, σ_{ox} 를 定하는 2次 단계 범위내에서 實驗決定值 KI, KII, σ_{ox} 를 收斂시킬 수 있다.

Fig. 4는 Computer Program을 作成한 flow Chart를 나타낸 것이다.

3. 實 驗

3.1 實驗裝置 및 實驗材料

本 研究에 使用된 光彈性 實驗裝置는 Fig. 5와 같이 Riken PA-300 Type의 平面 光彈性 測定 裝置로서 여기에 附着된 荷重裝置를 除去하고 새로 特殊하게 設計製作한 切削裝置를 設置한 것이 Fig. 6이다. 이 切削裝置에 에

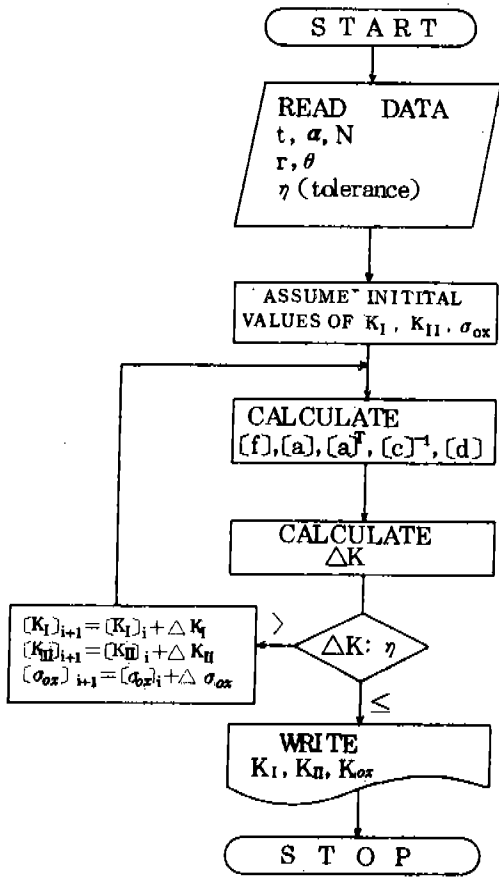


Fig.4 Flow chart for photoelastic constants

폭시(Epoxy Resin) 切削工具를 附着하고, Cl-amp로 被削材를 固定하였다.

특히, 切削工具 上端部에는 工具動力計(Tool Dynamometer TD-500 KA)를 附着하고 動的變形增幅器(YA-506 A) 및 高感度の 記錄計(RAPET RMS-11)를 使用하여 2次元 切削에 있어서의 切削抵抗을 測定하였다.

切削工具로서는 光彈性感度が 良好한 Epoxy Resin Plate($t = 6\text{ mm}$)를 使用하였고, 被削材는 Epoxy로 만든 切削工具가 充分히 切削할 수 있는 市販用 연납을 使用하였다.

工具의 形狀은 Fig. 7과 같이 하였고, 工具材料의 機械的性質은 Table 1에 있으며, 被削材의 化學成分은 Table 2와 같다.

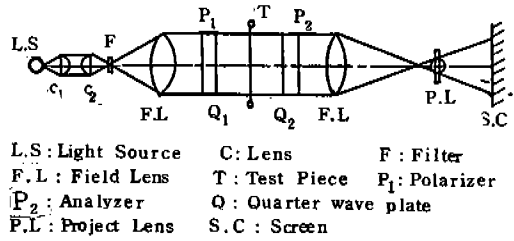


Fig.5 Schematic diagram of the photoelasticity apparatus

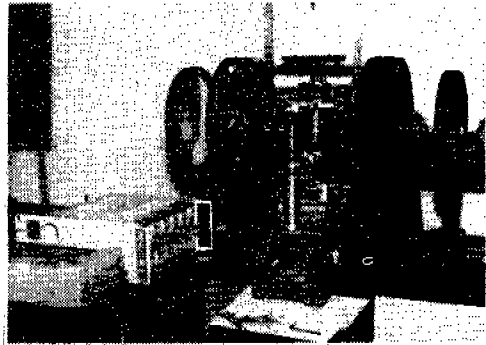


Fig.6 Experimental Setup

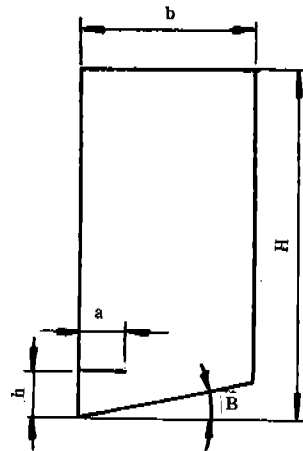


Fig.7 Specimen Configuration

Table 1. Properties of Epoxy Resin plate

Elastic modulus	Tensile strength	Photoelastic sensitivity	Poisson's ratio
<i>kg/mm</i>	<i>kg/mm</i>	<i>mm.order/kg</i>	
356.0	2.5	0.91	0.37

Table 2. Chemical Composition

pb	cu	As	sb	sn	zn	Fe	Bi
99.52	0.05	0.01	0.16	0.05	0.01	0.05	0.15

3.2 光彈性 感度の 測定

光彈性 感度は 光彈性 材料의 性質을 나타내 는 것으로 다음과 같은 式으로 주어진다.

$$\alpha = \frac{N}{(\sigma_1 - \sigma_2)t} \dots\dots\dots (10)$$

여기서, σ_1, σ_2 는 最大 및 最小主壓力이다.

α 를 測定하는 方法으로는 몇가지 測定法이 提示되고 있지만²⁾, Fig. 8과 같이 純粹굽힘모 우멘트를 받을 수 있는 4點壓縮試驗을 하였다. 이 경우 $\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = 0$ 이므로

$$\alpha = \frac{N}{\sigma t} = \frac{h^2}{3Pl} \cdot N$$

$$\left(\because \sigma = \frac{N}{Z} = \frac{Pl/2}{h^2 t/b} = \frac{3Pl}{h^2 t} \right)$$

$$= 0.91 \text{ mm order/kg}$$

이 된다.

여기서 M 은 굽힘 모우멘트이고 Z 는 斷面 係數, h 는 工具의 幅, P 는 軸 荷重, l 은 兩 端 支持點과 荷重作用點의 距離를 나타낸다.

또한 工具를 光彈性 荷重裝置에 積載하여 Fig. 9와 같이 等色線 次數 N 이 1次數 增加씩 마다 荷重 P 를 測定하였다.

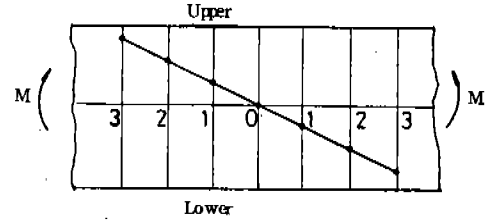


Fig.9 Photoelastic Sensitivity Curve

3.3 實驗方法

에폭시수지로 製作된 切削工具로서 切削寬이 0.3mm, 切削速度 $V=95 \text{ mm/min}$ 의 低速으로 一定하게 維持하고 各 工具의 Crack 길이 및 工具先端에서의 Crack 位置에 따른 變化를 Table 3에서와 같이 하여 2次元 切削하였다. 이때 工具의 두께는 6mm, 工具傾斜角 0°, 工具餘裕角 6°, 被削材의 두께는 3.6mm로 一定하게 하여 完全한 切削이 行하여지도록 하였다. 특히 切削溫度의 上昇을 피하기 위하여 低速 切削(95mm/min)을 하였으며 切削抵抗의 測定은 工具動力計를 附着하여 自動記錄計로 切削抵抗을 記錄하였다. 이상과 같이 適切한 切削狀態라고 判斷되었을 때 等色線의 Dark field 및 Light field 寫眞을 撮影하였다. 이때의 露出時間은 5秒 이내로 하였고 여기서 撮影된 필름은 Profile Projector(倍率 10×)로 工具刃先部 및 Crack 尖端近傍의 壓力分布를 觀察하였다.

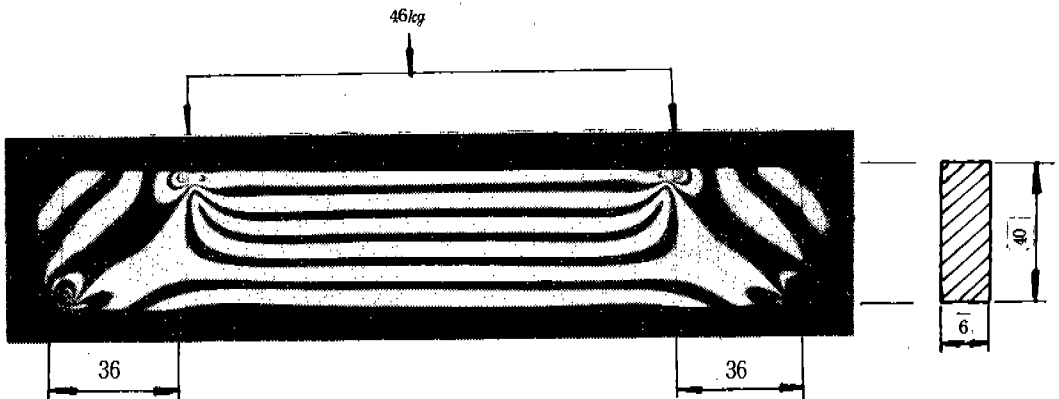


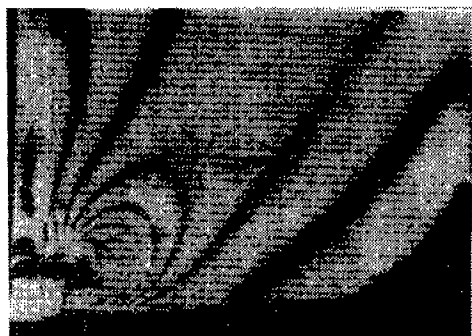
Fig.8 Isochromatic Fringe Pattern for Photoelastic Sensitivity



a) Cutting State ($a=10\text{mm}$, $h=5\text{mm}$)



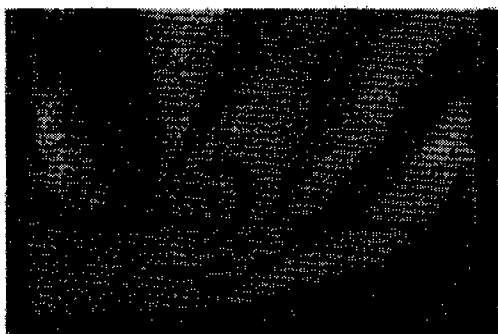
b) Stationary State ($a=10\text{mm}$, $h=5\text{mm}$)



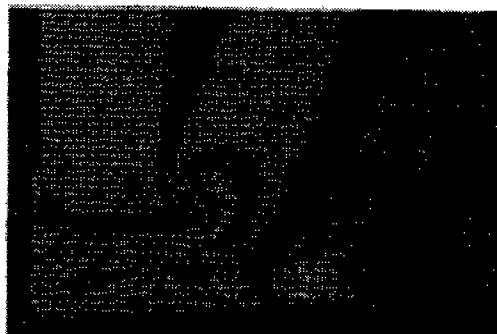
c) Cutting State ($a=3\text{mm}$, $h=3\text{mm}$)



d) Stationary State ($a=3\text{mm}$, $h=3\text{mm}$)



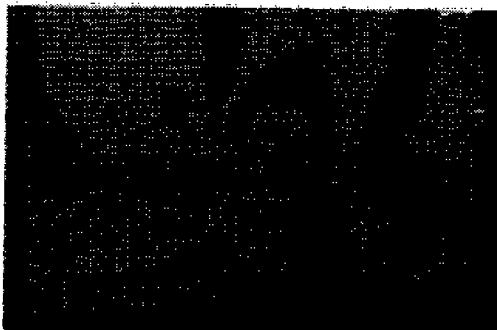
e) Cutting State ($a=7\text{mm}$, $h=5\text{mm}$)



f) Stationary State ($a=7\text{mm}$, $h=5\text{mm}$)



g) Cutting State ($a=10\text{mm}$, $h=7\text{mm}$)



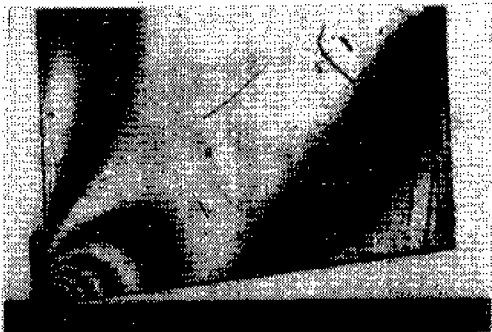
h) Stationary State ($a=10\text{mm}$, $h=7\text{mm}$)

Fig.10 Isochromatic fringes for a photoelastic tool under different test conditions with crack

等傾線은 等色線 測定이 끝난 다음 光原을 白色光으로 바꾸고 1/4 파장판을 除去한 뒤 Polarizer(P₁) 및 Analyzer(P₂)의 主軸은 光學대에서 垂直 및 水平으로 직교시킨 후 暗視野 狀態에서 等傾線이 뚜렷이 나타나도록 荷重을 調整한 다음 時計方向으로 0°~90°까지의 Index line을 15° 간격으로 回轉시키면서 Camera의 위치에 Screen을 놓고 Plot 하여 綜合적으로 나타낸 것이다.

Table 3. Cracking Point and Crack Length

Distance from cutting edge h (mm)	Crack length a (mm)			
3	3	5	7	10
5	3	5	7	10
7	3	5	7	10



a) Light-field isochromatic fringe pattern



b) Dark-field isochromatic fringe pattern

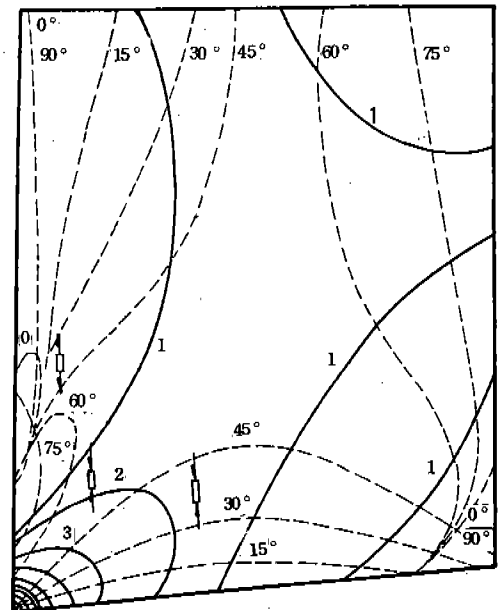
Fig.11 Light-field and Dark-field fringe of an uncracked photoelastic tool

4. 實驗結果 및 考察

前述한 實驗過程에 따라 얻어진 實驗結果는 Fig.10에서 보는 바와같이 Crack을 加工하였을 때, Isochromatic Fringe Pattern의 Light field에서는 Fig.의 a), b)와 같고, Dark field에서는 c), d), e), f), g), h)와 같이 나타났다.

Fig.11은 Crack을 加工하지 않은 切削工具의 Isochromatic Fringe Pattern을 나타낸 것으로서 工具傾斜面上的 應力은 工具刃先에서 最大 壓縮應力을 나타내며 一定範圍를 벗어날 경우 引張應力이 形成되고 있음을 알 수 있다. 壓縮應力은 工具傾斜面的 下部로부터, 引張應力은 工具傾斜面的 上部로부터 應力圓이 「→표」와 같이 形成되는 것으로 觀察되었다.

Fig.12는 이때의 Isoclinic Line 및 Isochromatic Line을 圖示한 것으로 「←□→」과 「→□←」은 各各 引張應力과 壓縮



98. 5.4. 76 — Isochromatic Line
 - - - Isoclinic Line

Fig.12 Isochromatic and Isoclinic Lines for a photoelastic tool with out crack

應力の 領域을 나타낸 것이다. 따라서 切削時 應力分布는 不均一分布 形狀이며 壓縮應力과 引張應力이 工具傾斜面上에서 同時に 形成되는 것으로 생각된다.

Fig. 13은 연납被削材의 切削抵抗을 나타낸 것으로서 背分力과 移送分力은 거의 없었고 主分力만 圖示한 것으로 A點 및 B點은 切削生成初期 및 切削安全期로 볼 수 있다.

Fig. 14 및 Fig. 15는 Table 3의 條件에 對한 應力擴大係數 k_I , k_{II} 와 a/b 의 關係를 圖示한 것이다.

여기서 a 는 Crack의 길이이고 b 는 工具의 幅이다.

Fig. 14에서 切削工具의 幅에 對한 Crack 길이의 變化時 k_I 은 $h: 3\text{mm}$ 인 경우 a/b 가 적을수록 커지는 경향이고 $h: 5\text{mm}$, $h: 7\text{mm}$ 에서는 a/b 가 클수록 k_I 또한 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 工具刃先 部位에 큰 應力集中 現象이 일어나기 때문에 Crack 길이가 작은 즉, 工具刃先部位에 가까울수록 應力擴大係數가 큰 값을 나타내는 것으로 생각된다. 또한 Crack 이 工具刃先에서 多少 떨어진 部位에서는 刃先部の 應力集中이 緩和된 탓인지 이때는 通常의인 境遇와 마찬가지로 Crack 길이가 길수록 큰 應力擴大係數의 값을 얻을 수 있었다. 이러한 側面에서 볼 때 工具刃先部の 破損은 $h: 5\text{mm}$ 以上에서는 Crack 成長에 의한 破壞가 豫想되나 工具刃先 近傍에서는 Crack 成長의 影響보다는 切削時 形成된 Chip 과의 摩擦로 인한

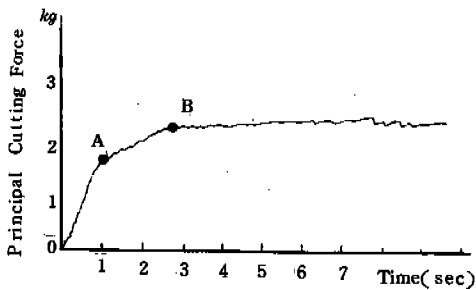


Fig. 13 Principal Cutting Force versus Cutting Processing Time

摩擦現象의 影響이 至大한 것으로 判斷된다.

Fig. 15에서는 應力擴大係數 k_{II} 의 값 또한 工具刃先部 近傍인 $h: 5\text{mm}$ 와 $h: 7\text{mm}$ 의 경우엔 a/b 가 增大함에 따라 一定하게 增加하다가 $a/b = 0.23$ 近傍을 境界로 점차 減少하는 傾向을 나타내고 있으며, $a/b =$

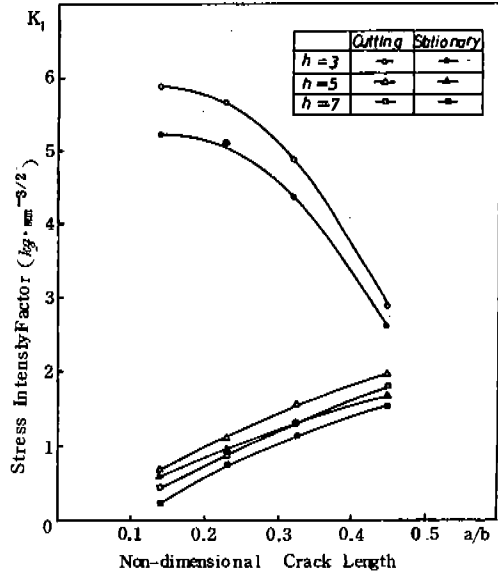


Fig. 14 Stress Intensity Factor K_I versus Non-dimensional Crack Length a/b

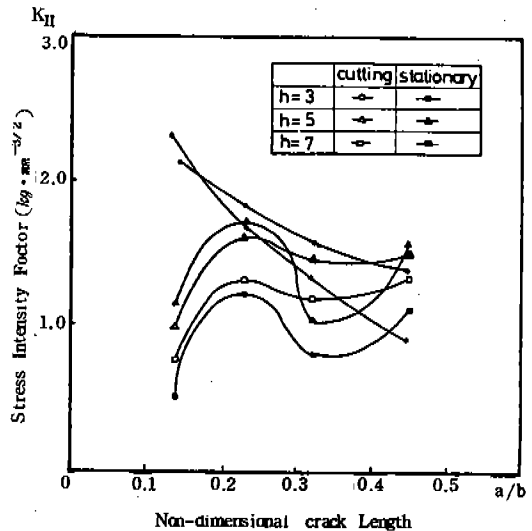


Fig. 15 Stress Intensity Factor K_{II} versus Non-dimensional Crack Length a/b

0.32 程度에서 다시 增加하는 것을 알 수 있다. $h: 3\text{mm}$ 의 경우에서는 a/b 의 增加와 더불어 k_{II} 의 값은 점차 減少하는 傾向을 보이고 있다. $h: 5\text{mm}$ 및 $h: 7\text{mm}$ 의 境過 k_{II} 의 曲線이 不規則하게 나타난 것은 Fig. 10에 圖示한 Fringe order가 Zero 差 近傍에 Crack이 位置한 것이라고 생각된다. 또 切削中인 狀態와 停止狀態의 應力擴大係數의 크기를 比較한 結果 切削中일 때가 停止狀態보다는 切削抵抗의 影響으로 約 8% 程度 큰 값으로 나타났다.

Fig. 16은 工具의 Crack 길이에 對한 Crack 進行方向 θ 를 圖示한 것으로 G.C.Sih⁽⁹⁾에 의해 提案된 Strain Energy Density theory에 따라 破壞進行 方向은 最大剪斷 應力이 最小가 되는 方向($\theta = \theta_0$)을 따라 進行됨을 알 수 있었다.

5. 結 論

以上과 같이 光彈性 解析技法을 適用하여 工具刃先部에 Crack을 갖는 動的應力 狀態를 實驗한 結果 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

1) 一般의인 光彈性 實驗法은 靜的 荷重 狀態에서만 解析할 수 있었으나 本 研究에서는 切削中인 工具刃先部の 應力狀態를 動的 狀態로서도 解析할 수 있었다.

2) 切削中인 工具傾斜面上的의 應力分布는 停止狀態와 相當한 差異가 있었으며 切削中인 工具의 應力擴大係數가 約 8% 以上 큰 것으로 나타났다.

3) 切削初期에는 切削抵抗이 급격히 增加하였으나 3秒程度以上에서는 一定하게 維持되므로 切削安全期로 볼 수 있다.

4) 工具刃先거리 $h=3\text{mm}$ 의 경우 a/b 가 커질수록 相對적으로 k_I 은 減少하고 $h=7\text{mm}$ 에서는 a/b 가 커질수록 k_I 또한 一定하게 增加하는 傾向을 갖는다.

5) 工具刃先에서 $h=5\text{mm}$ 이상 比較的 멀리 떨어진 部分의 破損은 Crack先端의 應力集中이 그 原因이 되며, Crack 成長에 의한 破壞

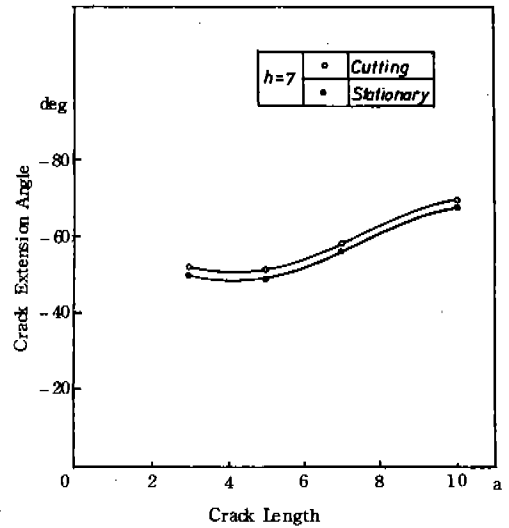


Fig. 16 Crack Extension Angle θ_0 versus Crack Length a

進行은 G. C. Sih 등의 研究結果와 같이 最大剪斷 應力이 最小가 되는 方向($\theta = \theta_0$)으로 進行되었다.

REFERENCES

1. Geoffrey Boothroyd, "Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools", International Student Edition, pp. 61-90, 1975.
2. H. Chandrasekaran, R. Nagarajan, "Influence of Frank Wear on the Stress in a Cutting Tool," ASME pp. 566-577, 1977.
3. S. Ramaingan, L.L. Lehn, "A Photoelastic Study of Stress Distribution During Orthogonal Cutting," Journal of Eng. for Industry, pp. 527-537, May, 1971.
4. 三本教, 郎部晃, "切削の工具および被削材應力と剪斷におよぼす切削の影響" 日本光彈性學會, 第4回 研究發表論文集, pp. 49~53, 1982.
5. 臼井英治, 竹山秀彦, 島村昭治, 小口俊明,

- “切削應力と光弾性解析” 日本機械試験
所所報 Vol 12 pp. 21-26, 1958.
6. 山本明, 中材示, 外山和巳, 河村一郎,
“二次元切削時におけるすくい面上應力分
布モデルの提案”, 日本精密機械學會誌,
45 卷, 11 號, pp. 90-95, 1979.
7. 金政斗, 李用成, “切削加工의 光弾性的
現象에 관한 研究”, 大韓機械學會論文集
第 8 卷, pp. 401-407, 1984.
8. 岸浪建史, 横内弘字, 星光一, 齊藤勝政
“有限要素による工具刃先の剛性解析”,
日本精密機械學會誌, 第 39 卷, 10 號,
pp. 47-52, 1973.
9. マイクロ切削に関する破壊力學的 研究”,
日本精密機械學會誌, 第 51 卷, 第 10 號,
pp. 21, 1985.
10. P.C. Paris G.C. Sih. “Stress Analysis of
Crack,” ASTM, STP 381, pp. 30-81,
1964.
11. R.J. Sanford, “Application of the Least
Squares Method to Photoelastic Analy-
sis,” Experimental Mechanics, pp. 192-
197, 1980.
12. 益田義治, “入門光弾性實驗”, 日刊工業
新聞社, 1970.
13. G.C. Sih, “Strain-energy-density Factor
Applied to Mixed Mode Crack Problems,”
Int. J. of Fracture, pp. 305-321, 1974.