

## Grid法에 의한 旋削 加工面の 變形에 關한 研究

車 一男\* 金 潤濟\*\*

### A study on the Plastic Deformation of Surface in Lathe Turning by Grid Method

IL Nam Cha\*, Yoon Jeh Kim\*\*

#### ABSTRACT

Experimental results on plastic strain induced in turning operation are presented in this paper. The plastic strain is computed by lagrangian strain using grid method, and metal cutting phenomena are also illustrated by micrograph and distribution figures of plastic strain and microvickers hardness of the machining surface.

In the cutting of ductile materials, such as carbon steel, generally, the plastic strain is found to be concentrated near the surface. The amount of plastic strain increases with increasing cutting speed and feed rate. The distribution of microvickers hardness is greater near the cutting surface and decreases from the machining surface under which its hardness returns to the normal hardness of the material.

#### 1. 結 論

金屬을 旋削 加工하면, 金屬으로부터 칩(chip)이 除去되며 이때 創成되는 被削材의 加工 表面에는 彈塑性 變化로 인한 加工 硬化層이 形成된다.<sup>1)</sup> 이 加工 硬化層은 加工法의 種類 및 條件에 따라 變化한다.

지금 構造用 合金鋼(SCM4)의 旋削 加工後生

成 表面에 대하여 檢討하여 보면, 表面에 가까운 部分은 旋削前의 結晶粒이 破碎結晶, 微結晶 狀態로 되고, 그곳에서 纖維狀 組織도 形成된다.<sup>2) 3)</sup> 切削 條件에 의한 影響은 이와같은 領域에서의 두께 및 纖維 方向에 있고, 대개 數 10  $\mu\text{m}$  ~ 100  $\mu\text{m}$  以內에 存在한다.<sup>4)</sup> 普通 母 結晶에 移動되어도 格子的 Strain, 즉 彈性 Strain 은 存在한다.

\* 京畿工業開放大學

\*\* 仁荷大學校 工科學

加工 硬化層에 대한 研究는 塑性 變形後의 結晶 格子 Strain에 있어 金屬 顯微鏡의 으로 미끄럼 狀況을 調査한 것<sup>5)</sup>과 X線의 으로 格子 構造의 變化를 調査한 것도 있다.<sup>6)</sup> 또한, 殘留 應力에 대한 研究도 몇개의 報告書가 있으나<sup>7, 8)</sup> 普通 行하여 지고 있는 旋削에 대한 加工後 strain에 대한 研究는 볼 수 없다.

이러한 研究는 機能 部材의 破壞, 磨滅, 耐久性 等に 많은 影響이 있는 加工 表面에 대한 것이며, 앞으로 追求하여야 할 輕量化 設計에 앞서 充分한 研究가 이루어져야 할 것으로 본다.

本 研究에서는 旋削 加工後 被削材에 대한 strain의 크기를 測定할 수 있도록 Grid를 試片에 燒付시켜 加工後 strain變化가 加工 條件에 따라 어떻게 變化하는 가를 究명하였고 表面으로부터의 硬度 變化를 檢討하였다. 따라서, 本 實驗의 研究는 二次元 切削에 關한 것이며, 앞으로 三次元 切削, 工具의 幾何學의 形狀 變化에 따른 表面 strain에 미치는 影響等은 究명하여야 할 課題이다.

## 2. 關係理論

### 2.1 Strain과 變位와의 關係

Strain을 定義하는 方法에는 여러가지가 있으나, Park과 Durelli는 Strain을 9가지로 說明하였고<sup>9),10),11)</sup> 이를 比較的 큰 Strain 分析에 使用하였다.

二次元에서 Strain의 分析은 變形後 길이를 原 길이로 나눈 다음 自然 對數를 取한 값을 strain으로 하는 Natural strain과 變化된 길이를 原 길이로 나눈 값을 Strain 값으로 하는 Eulerian Strain 및 原 길이와 變化된 길이와의 變化比로써 定義하는 Lagrangian Strain을 使用한다. 그러나, 이중 Lagrangian strain은 二次元 金屬 切削에서 材料의 變形 研究에 가장 많이 使用되고 있다. 이를 使用하는 理由는 機械 加工前 平面에 그려 넣은 grid가 加工後 平面에도 法線方向의 變化가 없이 남아 있기 때문이다.

그간 研究된 바에 依하면, 機械 加工中 塑性

變形에 依한 Strain은 比較的 크게 나타나는 點을 究명한 바 있다.<sup>12)</sup>

限定된 範圍內에서의 變形에 대한 Strain의 關係는 相互 關聯性이 있는 것으로 指摘하였다.<sup>13)</sup> 따라서, 本 切削 試驗에서는 切削 깊이와 切削幅의 比를 20:1로 作業하여 平面 Strain이 크게 되도록 하였다. 또한 grid의 距離와 變位는 比較的 적은 工作物 半徑의 變化가 있어도 直交 座標로써 變位와 Strain 域을 說明할 수 있었다.

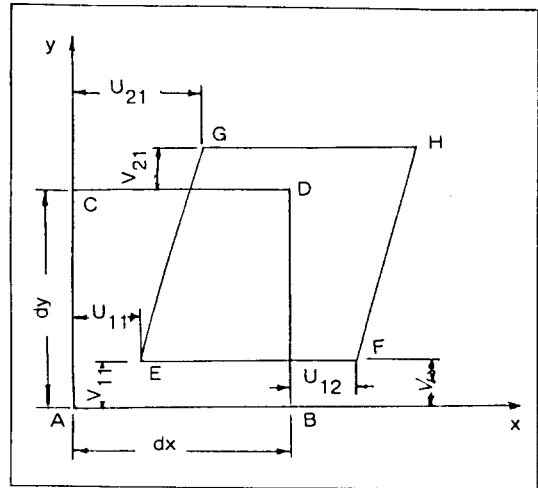


Fig. 1 Deformation of an Infinitesimal Rectangular Element

Fig.1은 任意 4用形 grid에 變形되지 않은(ABCD)의 微小 要素를 나타낸 것이며 變形된 grid는 (EFGH)를 나타낸 것이다. 變形되지 않은 要素 AB와 AC는 工具 方向에 平行한 X幅과 垂直方向에 平行한 Y軸과 致한다. 萬若, X와 Y方向에 strain에 依하여 생긴 變形이 各各 U와 V라면, 이는 平面 strain 變形에 依한 有限 strain의 Lagrangian 要素를 다음 方程式으로 나타낼 수 있다. 여기에서  $E_{xx}$ 는 水平 strain이고,  $E_{yy}$ 는 垂直 strain  $\gamma_{xy}$ 는 剪斷 strain을 나타낸 것이다.

$$E_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \dots\dots\dots(2)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right) \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \dots\dots\dots(3)$$

變位の 部分 微分은 다음 式으로 表現된다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{(u_{12} - u_{11})}{\Delta x} \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{(u_{12} - u_{11})}{\Delta y} \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{(v_{21} - v_{11})}{\Delta x} \dots\dots\dots(6)$$

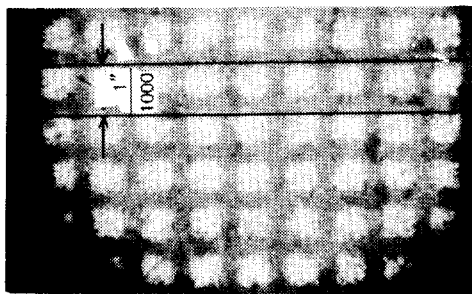
$$\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{(v_{21} - v_{11})}{\Delta y} \dots\dots\dots(7)$$

여기에서  $\partial x$ 와  $\partial y$ 는 x軸과 y軸 方向의 微素 要素의 側面 길이이다. 變位는 式(4,5,6,7)로부터 求할 수 있으며 式(1,2,3)을 利用하여 計算할 수 있다.

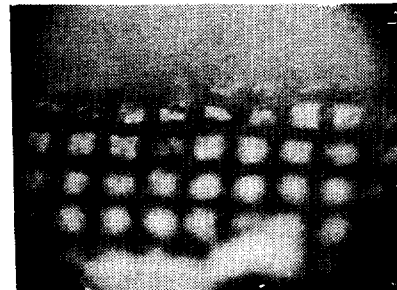
2.2. Strain의 計算 方法

Fig.2는 試片의 grid를 約 300倍로 擴大시킨 것이다. 이 grid는 變形되지 않은 試片에서는 各線이 直交하고 있으나, 加工後에는 表面의 grid는 變形된다. 實際의 測定에서는 變形前 grid의 film과 變形後 film을 重첩시켜 光學 投影機로 擴大 比較 測定하였다.

Table.1은 grid의 點  $u_{11}, u_{12}, u_{21}, v_{11}, v_{12}$ 와  $v_{21}$ 의 變位를 測定한 data의 한 例이며, Table.2와 같은 Computer program에 依하여 各各의 Strain을 計算하였다. Table.3은 計算된 Strain값을 나타낸 것이다.



(a) Undeformed grid



(b) Deformed grid

Fig. 2 Comparison of the Tracing of the undeformed grid (a) and deformed Grid (b) for SCM4 Workpiece

Table 1. Transaction point of grid intersection point

point	A	B	C	D	E
dx	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
dy	1.250	1.250	1.250	1.250	0.750
$u_{11}$	0	0.062	0.130	0.215	0.388
$v_{11}$	0	0	-0.065	-0.170	-1.05
$u_{12}$	0	0.060	0.130	0.265	0.408
$v_{12}$	0	0	-0.065	-0.175	-0.105
$u_{21}$	0.062	0.130	0.215	0.388	0.468
$v_{21}$	0	-0.065	-0.170	-0.105	-0.135

Table 2. Computer program

```

Cc: If  $u_{11} = J, v_{11} = M, u_{12} = H, v_{12} = K,$ 
 $u_{21} = I, v_{21} = L$ 
10: INPUT J, M, H, K, I, L,
20 : A = (H - J) / 1,250
30 : B = (I - J) / 1,250
40 : C = (K - M) / 1,250
50 : D = (L - M) / 1,250
60 : E = A + (A*A+C*C)
70 : F = D + (D*D+B*B)
80 : G = B + C + A*B+C*D
    
```

90 : PRINT E  
 100 : PRINT F  
 110 : PRINT G  
 120 : END  
 Cc : E, F, G equal  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$  and  $\gamma_{xy}$

### 3. 實驗準備 및 實驗方法

#### 3.1 試片 및 工具

本 研究에서는 產業界에서 널리 使用하고 있는 構造用 合金鋼 (SCM4) 를 選擇하여 實驗 하였다. 이 合金鋼은 높은 硬化能과 높은 疲勞 強度, 耐磨耗性, 耐衝擊性을 가진 Cr-Mo 中炭 素鋼으로써 各種 齒車, 보울트, 工具, 部品等の 素材로써<sup>13)</sup> 그 化學的 成分과 機械的 性質은 Table 4 와 같다.

한편 素材의 均質化를 하기 위하여 約 816 °C에서 3時間 維持시켜 燒鈍을 實施한 後 試片 을 製作하였다.

試片의 形狀은 普通 二次元 切削 試驗에서는 Tubular 形을 使用하나, 表面의 Strain 測定

Table 3. Computed strain Value

POINT	$\epsilon_{xx}$	$\epsilon_{yy}$	$\gamma_{xy}$	Remarks
A	0	0.246	4.96	
B	0	-4.63	5.44	
C	0	-7.23	6.80	
D	4.1616	-7.384	13.97	
E	5.88	-12.719	13.74	

Table 4. Chemical Compositions and Mechanical properties of Chrome Molybd Molybden Steel (SCM4)

Chemical Compositions %							Mechanical Properties			
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Hardeness HRB	Tensile Strength $kg/mm^2$	Yield Strength $kg/mm^2$	Elongation %
0.40	0.25	0.72	0.014	0.009	0.98	0.16	200	66.7	42.7	25.7

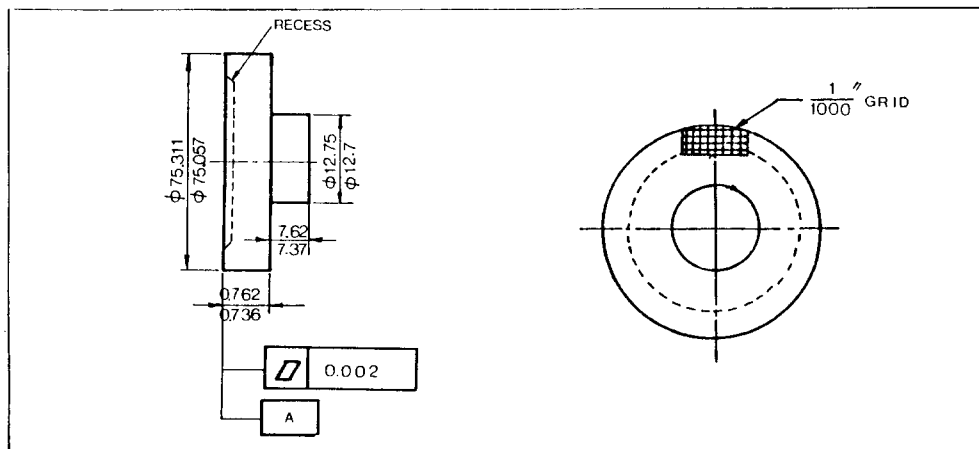


Fig. 3 work specimen

하기 위한 grid를 넣기 위하여 disc形의 試片을 選定하였다. Fig.3은 그 形狀을 나타낸 것이다. 使用한 Grid는 日本製 film(Tokyo Testing Machine MGF, Co., LTD)이며, 試片에 1" □내에 1000個의 Grid線이 直交하도록 燒付하여야 하기 때문에 平面度 向上을 위하여 Lapping을 實施하였으며 (Doall Model CM20). 이때 使用한 Media는 Silicone Carbide # 600과 # 1000이었다.

한편, 試驗에 使用한 工具는 超硬合金(p20)으로 만들어진 切斷 바이트(KS 43-4)를 使用하였으며, 形狀은 Fig.4와 같다.

3.2. 作業 條件

disc形의 試片을 맨드릴에 固定시켜 工具의 移動 方向이 試片의 回轉軸에 垂直이 되도록 旋盤에 裝着하여 試驗을 實施하였으며 Fig. 5는 二次元 切削에서 工具와 試片間의 關係 位置를 圖示한 것이다. 作業 條件은 常用 切削條件에 따라 擇하였으며 Table.5와 같다.<sup>14)</sup> 또한 各各의 試驗에서 工具의 磨耗에 대한 影響을 줄이기 위하여 每 試驗마다 工具를 交換하여 試驗하였다.

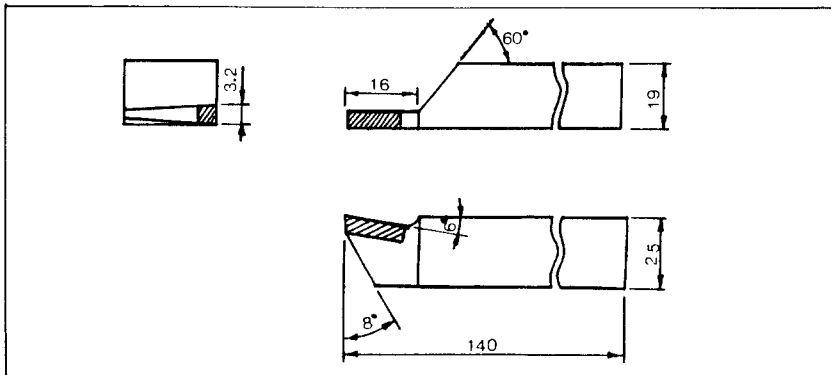


Fig. 4 Tool Geometry

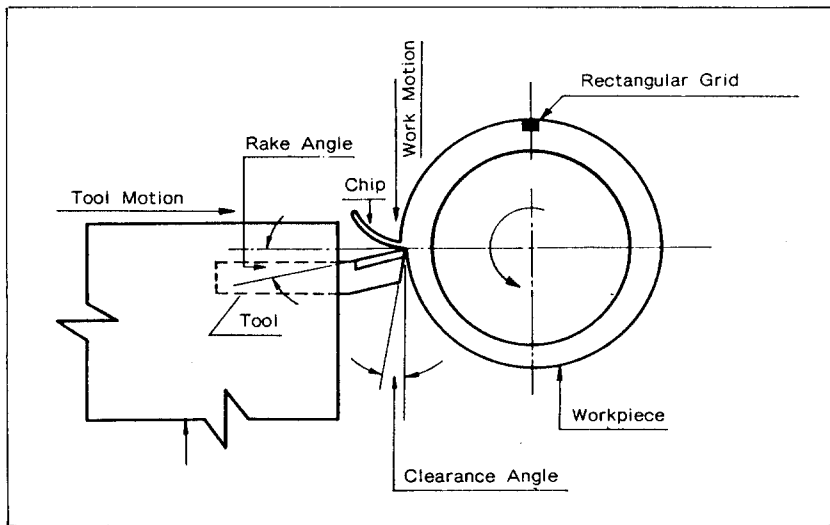


Fig. 5 Orthogonal Machining

Table 5. Working Condition

Cutting Speed	Feed Rate
48 m/min(158 ft/min)	0.18mm / rev(0.07"/rev)
60 " (200 ft/min)	
90 " (300 ft/min)	
130 " (417 ft/min)	
240 (785 ft/min)	
90 m/min(300ft/min)	0.075 mm/rev (.003"/rev) 0.127 mm/rev (.005"/rev) 0.1778 mm/rev (.007"/rev) 0.216 mm/rev (.0085"/rev) 0.254 mm/rev (.010"/rev)

### 3.3 Grid 技法

넓은 基地의 表面에는 塑性 變形이 機械 加工中에 일어나며, 그 分布를 數量的으로 나타내기 위하여 研究하였다. 여기에 使用한 技法은 試片의 側面에 直交 grid를 그려 놓고, 機械 加工後 選定된 grid點의 變位로부터 表面의 Strain을 算定하는 方法을 使用하였다.

grid를 그리는 方法에는 Strain 및 Strain rate, 塑性 波形 速度를 檢討하기 위하여 Douglas<sup>15)</sup>가 考案한 回轉 Microtone을

使用하여 試片의 表面에 Diamond indenter로 直接 線을 그리는 方法도 있으나, 本 實驗에서는 東京 大學 山田<sup>16)</sup>가 考案한 Moire 網 撮影 裝置(Film 1000 line/□", 眞空 燒付 裝置, 回轉 塗布 乾燥器)를 使用하여, 1" 當 1000 線의 密度를 가진 直交 grid를 擇하고 試片의 한 側面에 加工 方向과 垂直이 되도록 燒付하였다. 線의 幅은 .0004" 以下이고, 線間의 間隔은 .0006" 이었다.

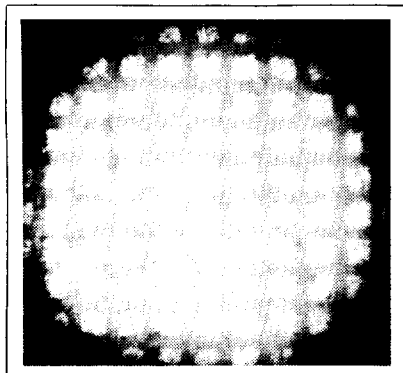


Fig. 6 Microphotograph of standard grid

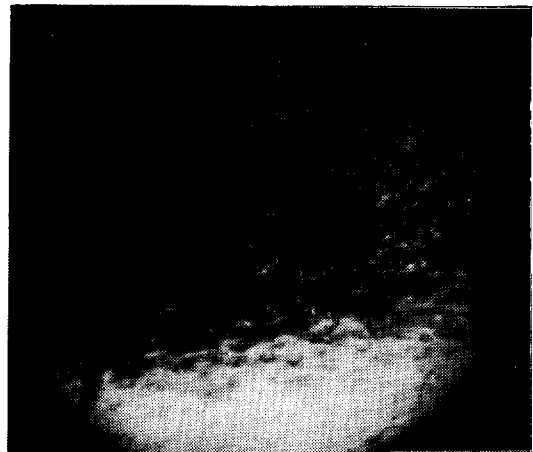


Fig. 7 Photomicrographic view during lathe cutting operation (Cemented carbide tool tip and cutting material SCM4)

이와 같은 線의 密度는 加工에 依하여 生成되는 塑性 變形을 解析하는데 充分한 것으로 생각된다.

Fig.6는 Moire網 撮影 裝置를 利用하여 燒付한 grid를 金屬顯微鏡(Olympus BHM-7)으로 撮影 現像한 것이며 各 線間의 間隔은 0.01"이다.

#### 4. 實驗 結果 및 考察

##### 4.1. 加工 表面으로부터 硬度의 變化

Fig.7은 合金鋼(SCM4)을 旋削 加工할 때의 加工 現狀을 顯微鏡으로 찍은 것이다. 이러한 切削 現狀을 볼 때 加工 表面의 硬度 變化가 있다는 點은 쉽게 豫測할 수 있으며 이를 測定하

기 위해서 本 實驗에서는 Vickers microhardness 試驗機를 使用하였다. 이때 使用한 荷重은 25g이었으며, 金屬 顯微鏡 組織中 퍼얼라이트(pearlite) 部位만을 選擇하여 測定하였다.

Fig.8은 表面으로부터 硬度의 變化를 보여준 것이며, Fig.9는 加工面에서 垂直한 斷面에서 硬度를 測定한 顯微鏡 寫眞이다.

加工 表面으로 부터 硬度 變化는 表面에서는 큰 값을 나타내나 어느 距離에서는 硬度가 떨어졌다가 다시 原 素材의 硬度값으로 復歸함을 알 수 있다. 이와같은 結果는 J.F. Kahles와 M. Field의 實驗<sup>17)</sup>에서와 같은 結果를 나타내고 있으며, 이는 加工에 依한 熱의 發生으로 組織이 軟化되는 現狀으로 생각된다.

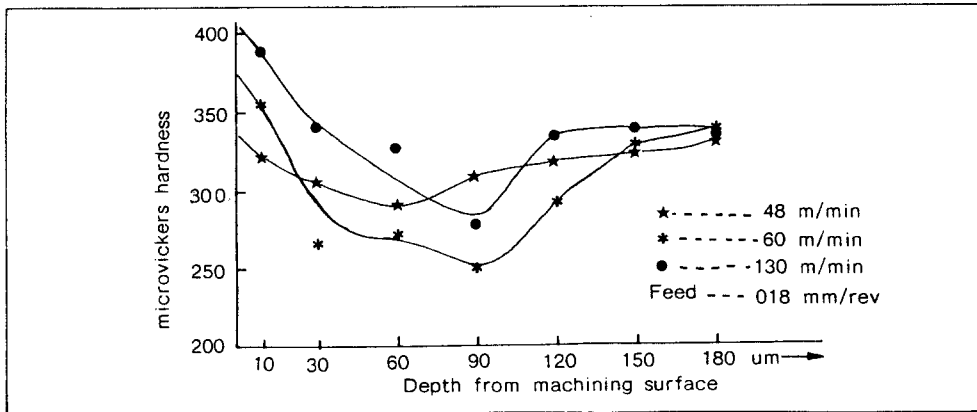


Fig. 8 Variation of Microvickers hardness from machining surface.

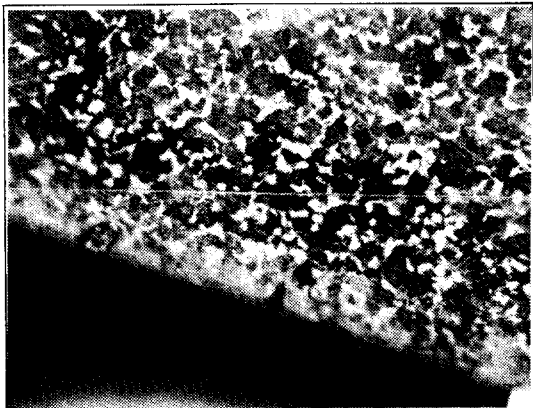


Fig. 9 Photomicrograph specimen on vickers microhardness test

##### 4-2. 塑性 變形의 分布

Fig.9는 機械 加工 前後의 grid의 變形을 顯微鏡으로 擴大하고 그 film을 光學 投影機를 使用 測定하여, 水平 및 垂直 Strain과 剪斷 Strain을 計算하였고 그 값을 切削 表面으로부터 깊이에 따라 그린 것이다.

表面에서의 剪斷 Strain은 약간 적은 값을 나타내나 깊이가 깊어짐에 따라 最大 값까지 증가하였다가 점차 減小함을 알 수 있다.

試片과 工具의 相對 運動 方向과 平行한 Strain은 表面에 對하여 引張으로 作用하고 表面으로부터 깊이가 커짐에 따라 갑자기 減小함

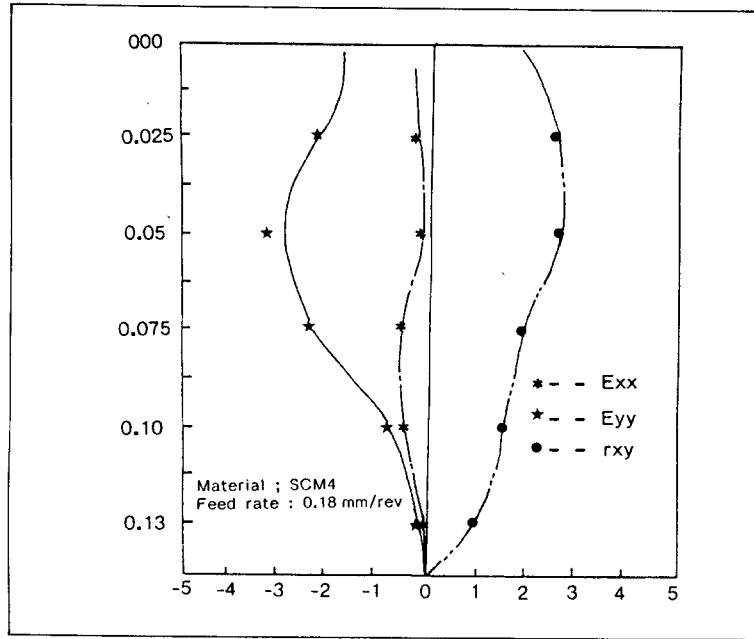


Fig. 10 Subsurface Plastic Strain in machining chrome molybden alloy steel (SCM4)

을 볼수 있다. 한편, 試片과 工具의 相對 運動 方向에 垂直인 Strain은 表面에 대하여 壓縮 方向으로 作用한다. 이 Strain은 表面으로부터 깊이가 커짐에 따라 最大값까지 增加하다가 減小하는 傾向을 볼수 있다. 結果의으로 Strain은 表面으로부터 깊어짐에 따라 增加하다가 減小하며, 깊이가 커지면 무시할 程度가 된다.

4-3. 切削 速度 變化가 Strain에 미치는 影響

이미 4-2에서 考察하여 본 바와같이 Strain은 表面으로부터 깊이에 따라 變化한다. 이 Strain變化에 대한 切削 速度의 影響을 알아 보기 위하여 最大 Strain값을 擇하여 分析하였다.

Fig. 11은 切削 速度 變化에 따른 最大 Strain값의 分布를 나타낸 것이다.

Strain의 變化는 切削 速度 變化에 따라서

顯著的 影響은 나타나지 않으나, 一般的으로, 切削 速度가 커짐에 따라 增加하고 있다. 그러나, 切削 速度 40 m/min ~ 90 m/min 사이에는 Strain의 變化는 不安定하다. 이는 이 範圍의 切削 速度에서는 工具 刃先에 빌트업에지 (Built-up Edge)의 脫落이 많이 일어나는 現狀의 影響으로 생각된다.

4.4. 移送의 變化가 Strain에 미치는 影響

Fig. 12는 切削 速度를 90 m/min 으로 하고 移送量을 變化시켰을 때의 Strain의 變化를 나타낸 것이다. 水平 Strain( $\epsilon_{xx}$ )은 移送量에 關係없이 恒常 一定한 값을 나타내고 있으며, 垂直 Strain( $\epsilon_{yy}$ )는 移送量이 커짐에 따라 線形的으로 減小하는 傾向을 가지고 있다. 그러나, 剪斷 Strain( $\gamma_{xy}$ )는 移送量이 커짐에 따라 增加한다. 即, 移送量의 增加는 切削力을 크게 하며 金屬 表面의 變形을 크게 한다. 또한 Strain의 合이 0이 되지 않는 것은 幅 方向



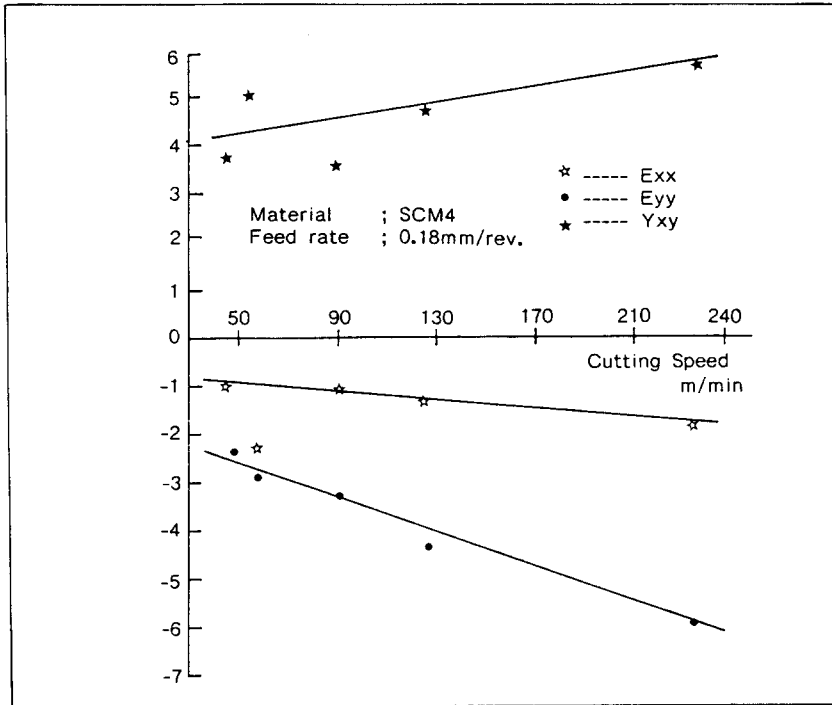


Fig. 11 Tendency of Strain Variation on feed rate 0.18mm/rev. and cutting varied.

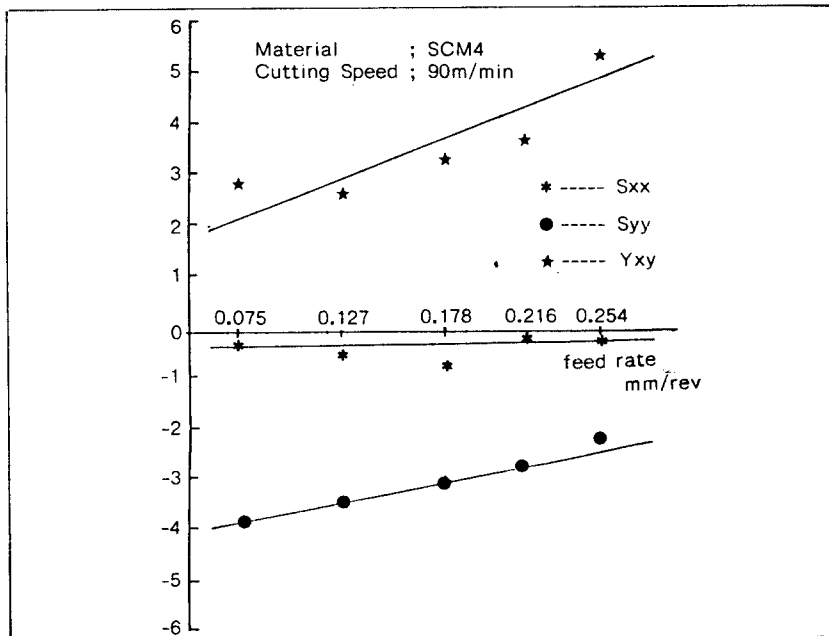


Fig. 12 Tendency of Strain Variation feed rate varied on cutting speed 90m/min

의 Strain이 移送量이 커짐에 따라 増加함을 意味하며, 이는 W.Graham과 C. Rubenstein의 研究 結果와도 一致함을 볼 수 있다.<sup>13)</sup>

### 5. 結 論

旋削 加工 表面의 變化를 究明하기 위하여 加工物에 Grid를 燒付하여 切削 條件 變化에 따른 Strain과 表面으로 부터의 硬度 變化를 實驗 檢討한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 旋削에서의 切削 作用은 加工面에 硬化를 일으키며 硬化現狀은 最外層의 硬度가 가장 크고, 다음 層에서는 硬度가 오히려 低下되는 形狀을 보이고 점차 原 素材의 硬度로 된다.

2. 加工表面의 Strain은 切削속도가 커짐에 따라 線形的으로 증가하며 또한 加工表面으로 부터의 變化는 깊이에 따라 커지다가 어느 限界點에 이르면 다음 점차 減小하여 없어진다.

3. 移送이 커지면 剪斷 Strain은 増加하나 水平 및 垂直 Strain은 減小하는 傾向이다.

### 참고문헌

1. E.USUI, and R.HOSHI, Slip-line fields in metal machining which involve centered fans. International Research in production Engineering, Pub. by ASME, New york (1963) p.61-71
2. J.L.Hau-Brcamonte, J.Wallbank, M.L.H. Wise. The plastic Deformation of mild steel in Metal cutting, Journal of Engineering Materials and Technology, April, 1982, vol.104 p.69-78
3. P.K.Wright, J.G.Chow Deformation Characteristic of Nickel Alloys During Machining, Journal of Engineering Materials and Technology April 1982, vol.104 p.85-93.
4. 横山武人, 橋本太部 旋削加工における 殘留 應力 精密機械 26卷 10號 (1960) p590~595.
5. J.A.Bailey, S.E.Becker, On microchip Formation during machining of a High strength steel. Journal of Engineering Materials and Technology, July, 1974 p.163-167
6. 若林 三記夫, 中山 守, 永田彰信, 研削加工層における X線的 殘留ひずみの 加工向き依存性, 精密機械 43卷 6號 (1977) p. 661
7. 若林三記夫, 中山守 臣視的 および 微視的 殘留應力の 解析 精密機械 44卷 6號 (1978) p710~716.
8. Albert Decneut, Jacques peters, Continuous Measurement of Residual stress in thin Cylindrical pieces using Deflection-Etching Techniques proc. SME, int. conf. on surface Technology, May, 1973 p.262-281
9. Wolak, J. on the Evaluation of large Homogeneous plastic strains Expt'l. Mech., oct, 1972. p.475
10. Park, W.C and Durelli, A. J. On the Definitions of strain and their uses in large strain Analysis Proc. SESA, 1967. vol.24 No.1 p.279
11. Park, W.C and Durelli, A. J. Various Forms of the Strain Displacement Relations Applied to Experimental Strain Analysis Proc. SESA, 1964, vol.21. No.1 p.37
12. Shaik Jeelani A study of Surface integrity in Machining 18% Nickel maraging steel North Carolina state University, 1975
13. 韓國綜合特殊鋼(株) 特殊鋼 1978. 12. p71~76.
14. Headquarters, U.S. Army Material Command Logistics Machining Data May, 1966 AMCP. 700-1 p.31
15. Sachs, G.U. Eisbein, W.; Mitt disch Material prüfanst, Sonderbeft, 16 (1937) p.67
16. 山田, 花井, 西本; モあし法によるひずみ測定. 金屬材料 7~5 (1967) p159~164.
17. J.F.Kahles and M.Field Surface Integity -A New Requirement for Surfaces Generated by Material-Removal Methods. The Institution of Mechanical Engineers preceeding 1967-68, volume 182. Part 3K April 1968, p.31-45
18. W.Graham and C.Rubenstein An Investigation into the degree and Depth of Work hardening produced at the surface of a workpiece by turning M.TDR 1966, p.463-478