

# 有限要素法에 의한 工具刃先의 應力分布에 關한 研究

金 政 斗 · 李 用 成  
(正會員：韓國産業技術大學) (正會員：檀國大學校 工科學)

## ABSTRACT

In the present paper are calculated and compared the stresses on the normal tools and the restricted tools which have three various rake angles by Least Square Method. The results obtained are summerized as follows. The tool displacement at rake angle  $\alpha = 12^\circ$  and  $\alpha = 0^\circ$  is positive value in the principal cutting direction and negative value in the feed direction. At rake angle  $\alpha = -12^\circ$  the displacement is negative value in both of directions. The principal stress of the restricted and normal tool is maximum at the tip of the tool, the shear stress is maximum after a certain distance from the tip. The result of FEM and P.E method shows that in the range of rapid decreasing of normal stress of the tool edge, the shear stress is maintaining a certain value. This is due to the friction characteristic of the chip.

## 1. 緒 論

最近 CNC 工作機械의 使用增加 및 工場의 無人化 傾向에 따라 우수한 材質의 切削工具 出現이 더욱 要請되고 있다. 특히 WC 工具의 出現以後 實際切削加工上의 問題點은 工具의 磨滅에서 칩핑 등 工具 破損現象으로 나타나고 있으며 이것의 解決이 중요한 研究課題의 하나로 되고 있다. 또한 切削

工具에서 問題視되었던 磨滅이 解決됨에 따라 強靱性이 減少하는 傾向이 있으며 이로 인하여 工具壽命의 예측 등 生産工場에서의 自動化에 重要な 課題로 登場하고 있다.

Gustav<sup>1)</sup> Schwerd<sup>2)</sup> 등은 切削時 上面傾斜角에 따른 切削工具 및 工作物 接着部分에 나타나는 여러형태의 應力現象 및 칩핑現象에 대한 原因을 料明하기 위하여 스트레인 게이지를 利用한 研究가

發表되었다. Coker<sup>3)</sup> Okoshi<sup>4)</sup> 등은切削工具 및被削材에 대하여應力狀態를彈性的으로解析하고 있으나各切削部位의應力分布에關하여서는解析될 수 없으므로光彈性方法으로問題를解決하고 있다. 竹山<sup>5)</sup> Uehara<sup>6)</sup> 등은 칩핑의原因으로서衝擊性 칩핑, 熔着性 칩핑 및 칩에 의한 칩핑으로分類하고 그의發生場所는傾斜面과 측면의單一 및 複數 칩핑으로 나타나며 특히 칩에 의한 칩핑은構成刃先 및 크레이터 磨滅後의 刃先弱화에 의하여 나타나는 것으로서 이러한弱화를防止하기 위하여切削工具를人爲的으로強制拘束하여適用하는方法이研究되고 있다. 李<sup>7, 8)</sup>은光彈性的으로考察한切削工具의應力解析에서工具傾斜面の垂直應力은工具尖端部分이量대가되며, 剪斷應力은일정한거리以後에서最大의값을 나타내고 있으며, 이는切削時에工具面の크레이터平行部の磨滅進行이느린것과一致함을發表한바 있다. 또한光彈性結果로서 얻은摩擦係數分布에서拘束

工具의摩擦係數는正常工具보다적으며 이는接觸面積의拘束으로인한垂直應力增大에비하여剪斷應力이적기 때문이라고 밝힌바 있다. 근래에와서FEM을이용한工具傾斜面에서의應力解析研究가이루어지고 있으며 Hoshi<sup>9)</sup>는工具刃先의剛性解析을FEM으로서, 여기에서 그는공구여유각을크게함에따라서刃先變形이增大함을報告하고 있다. 본研究에서는工具刃先을正常工具와拘束工具로區分하여光彈性的으로 얻어진結果와 이때同時에測定된切削力을適用하여工具面の變位 및應力分布에對하여FEM으로比較檢討하였다.

2. 理 論<sup>10)11)</sup>

모델의要素分割에 있어서 4角要素를使用하였으며工具의上面傾斜部에서應力集中이 예상되므로 이 부근에서要素를細分하였다.

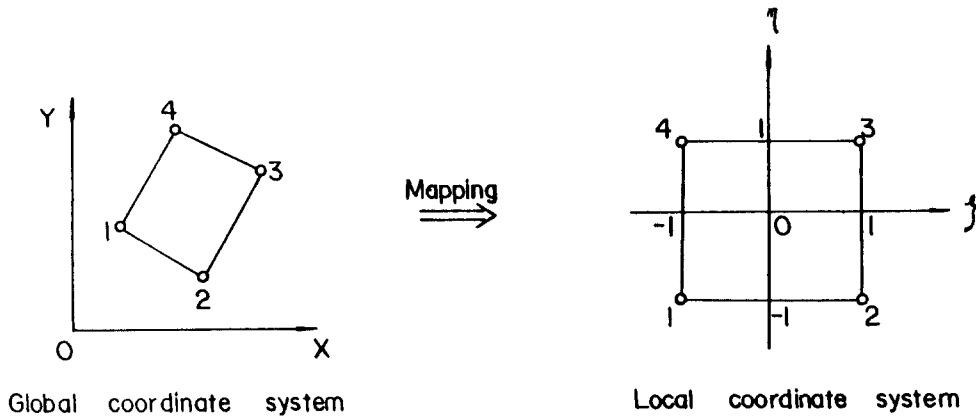


Fig. 1. Typical Local and Global Coordinate System

Fig. 1의 국부좌표계에서 Isoparametric 要素에對하여 임의의 한 要素에서의變位와 좌표계는 다음과 같이表現된다.

$$\left. \begin{aligned} u(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) u_i \\ v(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) v_i \\ x(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) x_i \\ y(\xi, \eta) &= \sum_{i=1}^4 N_i(\xi, \eta) y_i \end{aligned} \right\} \dots\dots (1)$$

여기에서  $N_i$ 는 각 요소간의 경계에서變位  $u, v$ 가 어떤 연속조건을 만족하도록 하는 함수, 形状函数이다. 또  $u_i, v_i$ 는 절점에서의變位成分이며  $x_i, y_i$ 는 절점의 국부좌표이다. 形状函数를  $C^0$ 연속조건에 만족하도록 한다면 4角要素에서 다음과 같이 주어진다.

$$\left. \begin{aligned} N_1(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(\xi-1)(\eta-1) \\ N_2(\xi, \eta) &= -\frac{1}{4}(\xi+1)(\eta-1) \\ N_3(\xi, \eta) &= \frac{1}{4}(\xi+1)(\eta+1) \\ N_4(\xi, \eta) &= -\frac{1}{4}(\xi-1)(\eta+1) \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

한편, strain은 다음과 같이 정의된다.

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

그러므로

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_x &= \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial x} u_i \\ \epsilon_y &= \sum_{i=1}^4 \frac{\partial N_i}{\partial y} v_i \\ \gamma_{xy} &= \sum_{i=1}^4 \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} v_i + \frac{\partial N_i}{\partial y} u_i \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

이 된다.

Strain vector {ε}는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \{\epsilon\} &= \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \\ &= \sum_{i=1}^4 \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix} \quad \delta_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix}$$

$$\{\epsilon\} = [B] \{\delta\}^e = \sum_{i=1}^4 B_i \delta_i \dots\dots (6)$$

構成條件에서 節點變位와 strain의 關係를 알면 stress-strain [D]에 의하여 다음과 같이 주어진다.

$$\{\sigma\} = [D] \{\epsilon\} \dots\dots\dots (7)$$

여기에서,

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} : \text{stress vector}$$

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} : \text{strain vector}$$

이다.

Matrix [D]는 平面 strain에서,

$$[D] = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 0 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix}$$

平面 stress에서

$$[D] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}$$

이며 여기에서,

E : elastic modulus

ν : Poisson's ratio

이다. 식(6)으로부터 4角形要素의 應力은 節點變位 Vector에서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= [D] \{\epsilon\} \\ &= [D] [B] \{\delta\}^e \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

以上에서 要素의 節點變位에 대한 stress-strain을 유도하는 순서에 대하여 설명하였으나 실제로 荷重을 받고 있는 연속체에 생기는 stress-strain을 구하기 위한 支配方程式은 total potential energy를 最小化함으로서 얻을 수 있다.

彈性體의 total potential energy π는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \pi &= \frac{1}{2} \int_V \{\epsilon\}^T \{\sigma\} dv \\ &\quad - \int_V \{\delta\}^T \{F\} dv - \int_A \{\delta\}^T \{P\} dA \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

여기에서,

{ε} : strain vector

{σ} : stress vector

{δ} : displacement vector

{F} : volume force vector

{P} : surface force vector

이다. 體積力을 무시한다면 식(9)는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \pi &= \frac{1}{2} \int_V \{\epsilon\}^T \{\sigma\} dv \\ &\quad - \int_A \{\delta\}^T \{P\} dA \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

또한 系의 total potential energy는 모든 要素의 total potential energy의 總和와 같으므로

$$\begin{aligned} \pi &= \sum_e \pi_e \\ &= \sum_e \left( \frac{1}{2} \int V_e \{ \epsilon \}^T \{ \sigma \} dv \right. \\ &\quad \left. - \int A_e \{ \delta \}^{eT} \{ P \} dA \right) \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

이 된다. 여기에서,

$\pi_e$  : element의 total potential energy

$V_e$  : element volume

$A_e$  : element surface area

이다. 식(6), (8), (11)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \pi_e &= \frac{1}{2} \int V_e \{ \delta \}^{eT} [B]^T [D][B] \{ \delta \}^e dv \\ &\quad - \int A_e \{ \delta \}^{eT} [N]^T \{ P \} dA \dots\dots\dots (12) \end{aligned}$$

여기에서,

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 & N_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & N_1 & N_2 & N_3 & N_4 \end{bmatrix}$$

이다. 식(12)에서  $\{ \delta \}^e$ 에 대해  $\pi_e$ 를 최소화하는 條件을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \pi_e}{\partial \{ \delta \}^e} &= \int V_e [B]^T [D][B] \{ \delta \}^e dv \\ &= \int A_e [N]^T \{ P \} dA = 0 \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

여기서,

$$[K]^e = \int V_e [B]^T [D][B] dv$$

$$\{ F \}^e = \int A_e [N]^T \{ P \} dA$$

라고 하면 식(13)은 다음과 같이 주어진다.

$$[K]^e \{ \delta \}^e = \{ f \}^e \dots\dots\dots (14)$$

여기에서,

$$\{ \delta \}^{eT} = \{ u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4 \ v_1 \ v_2 \ v_3 \ v_4 \}$$

$$\{ f \}^{eT} = \{ f_{x_1} \ f_{x_2} \ f_{x_3} \ f_{x_4} \ f_{y_1} \ f_{y_2} \ f_{y_3} \ f_{y_4} \}$$

이다. 식(14)를 全體系에 대하여 조합하면 다음과 같다.

$$[K] \{ \delta \} = \{ f \} \dots\dots\dots (15)$$

여기에서,

$$[K] = \sum_e [K]^e$$

$$\{ f \} = \sum_e \{ f \}^e$$

이다.

### 3. 工具의 問題設定

工具는 두께가 一定한 2次元切削으로 光彈性實驗<sup>12)</sup>에 使用한 工具와 同一條件으로서 實驗中 測定한 切削力을 적용하여 工具傾斜面變化에 對한 應力分布 및 工具刃先變位에 對해서 先彈性實驗結果와 比較檢討하였다. 本 解析을 하기 위하여서는 工具傾斜面의 切削應力分布를 알아야 하므로 이는 光彈性 測定에 의한 工具刃先點의 切削應力 分布로서 荷重條件을 計算하였고 이것을 基礎로 等價節點 荷重을 구하였다.

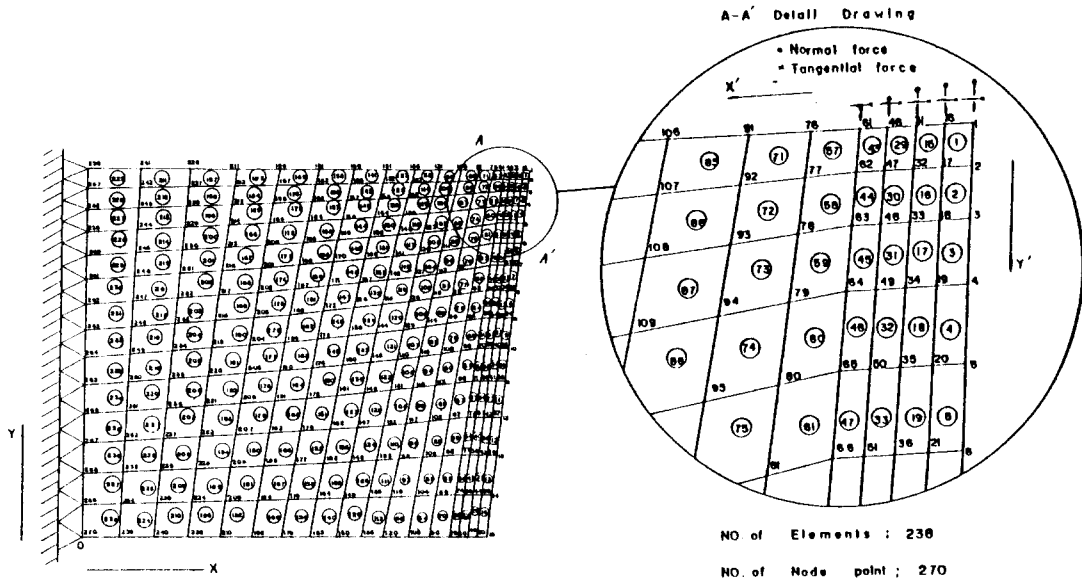


Fig. 2. Division of Element and Loading Condition

모델의 요소분割에 있어서 Fig 2와 같이 4角要素를 使用하였고 工具의 尖端刃先部에서 應力集中이 予想되므로 이 部分에서 細分하였다. 要素 및 節點의 數는 上面傾斜角  $\alpha = 12^\circ, 0^\circ, -12^\circ$ 의 어느 경우에서나 동일하게 각각 238개, 270개로 分割하였다. 境界條件은 工具를 固定시키는 部分을 假定하고 이 部分에서의 變位를 0로 하였다. 계산에 使用한 物理的 性質은 彈性係數  $E : 280 \text{ kgf/mm}^2$ , Poisson比 : 0.38로 하였다.

本 計算處理는 韓國科學技術院의 大型 Computer cyber 170-385에 의하여 行하였으며 Fig. 3은 program SAPCUT ( Stress analysis program for the cutting tool )의 flow chart를 설명한 것이다.

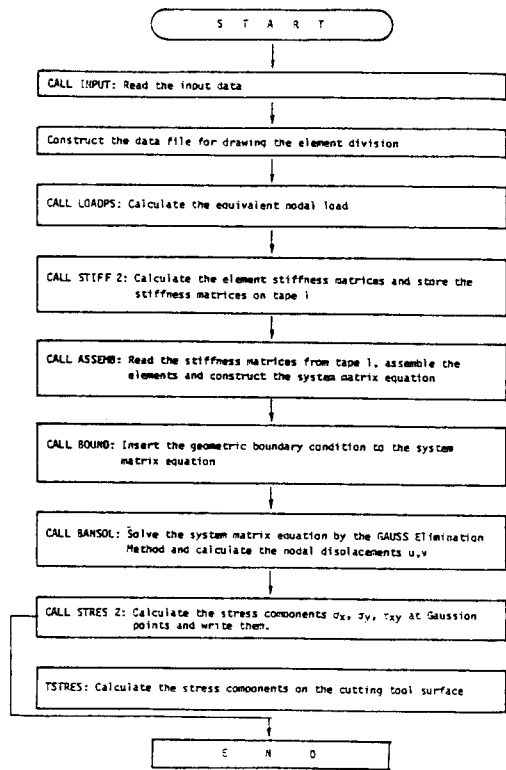


Fig. 3. Flow Chart of Program SAP Cut

3.1. 荷重條件의 計算

工具面의 有限要素解析을 위한 荷重條件을 求하

기 위하여 光彈性實驗에 의하여 測定된 工具面과 칩이 接觸된 區間에서의 剪斷應力  $\tau_{xy}$ 와 垂直應力  $\sigma_y$ 를 least square method에 의하여 各各의 least square function을 求하고 주어진 接觸區間에서의 積分값을 normalize시켜  $\sigma_y$ 와  $\tau_{xy}$ 에 대한 各各의 normalized least square function을 normal과 tangential component의 分布荷重을 基本機能으로 하였다. Least square function을 求하기 위하여 trial function으로서 1~5th각의 多項式을 使用하여 그중 오차가 가장 작은 것을 選擇하였다. 이에 의하여 求해진 分布荷重 기능은 Table 1과 같다.

Table 1. Distribution Load Function

rake angle	kind of tool	cutting force (kgf)	contact region (mm)	distribution load function(kgf/mm)
12°	MOR	$F_c = 12.4$ $F_t = 4.2$	$0 \leq x \leq 1.33$	$P_c = 15.0065 - 0.5461x$ $P_t = 3.0605 + 0.3075x - 0.0539x^2$
	MES	$F_c = 15.6$ $F_t = 6.7$	$0 \leq x \leq 1.5$	$P_c = 15.6636 - 7.0181x$ $P_t = 4.2090 + 0.0975x + 0.246x^2$
0°	MOR	$F_c = 14.5$ $F_t = 5.5$	$0 \leq x \leq 1.67$	$P_c = 15.5410 - 8.2136x$ $P_t = 3.8542 - 0.6716x$
	MES	$F_c = 20.5$ $F_t = 9.0$	$0 \leq x \leq 2.0$	$P_c = 19.1235 - 8.8735x$ $P_t = 5.0342 - 0.5342x$
-12°	MOR	$F_c = 20.9$ $F_t = 10.5$	$0 \leq x \leq 2.33$	$P_c = 15.1251 - 5.3202x$ $P_t = 4.1094 + 0.1235x + 0.1394x^2$
	MES	$F_c = 22.0$ $F_t = 12.0$	$0 \leq x \leq 2.0$	$P_c = 19.4216 - 8.4216x$ $P_t = 4.6441 + 1.3559x$

3.2. 工具面에서의 應力解析

工具傾斜面의 應力解析은 有限要素法에 의하여 節點에서는 變位를, Gaussian point에서는 應力을 求하였으므로 工具面에서의 應力을 求하기 위하여 linear extrapolation을 使用하였다. Fig. 4에서와 같이 工具面 위의 한점 P에서 應力  $\sigma_{ij}^p$ 는 點 a, b에서의 應力  $\sigma_{ij}^a, \sigma_{ij}^b$ 를 linear extrapolation하므로써 얻을 수 있다.

$\sigma_{ij}^p$ 와  $\sigma_{ij}^a, \sigma_{ij}^b$ 間的 關係는 다음과 같다.

$$\sigma_{ij}^p = \sigma_{ij}^a + \frac{m}{n} (\sigma_{ij}^b - \sigma_{ij}^a) \dots\dots\dots (16)$$

여기에서  $\sigma_{ij}^p$ 는  $x, y$  Coordinate system에서 정의된 것으로서 工具面을 따르는  $x', y'$  coordinate system에서의 應力  $\sigma_{ij}'$ 는 Fig.5와 같이 coordinate transformation에 의하여 求하 여진다.

$\sigma_{ij}^p$ 와  $\sigma_{ij}'$ 와의 關係는 tensor notation으로

$$\sigma_{ij}' = \beta_{ik} \beta_{jm} \sigma_{km}^p \dots\dots\dots (17)$$

이고, 여기에서  $\beta_{ik}$ 는 direction cosine이다.

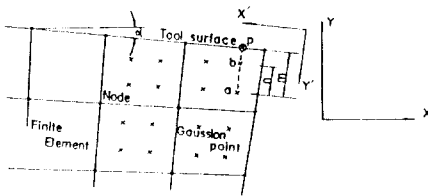


Fig. 4. Calculation of Stress on the Cutting Tool Surface

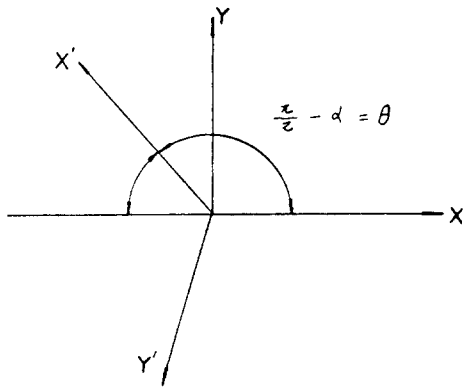


Fig. 5. Coordinate Transformation

#### 4. 實驗結果 및 考察

##### 4.1. 工具刃先の 變位

Table 2는 工具上面傾斜角 變化에 따른 正常工具 및 拘束工具刃先の 變位結果로서 節點番號 1,

16, 31, 46, 61, 76, 91에서의 값을 나타낸 것이다. 工具刃先尖端에서의 工具刃先變位는  $u$  ( $x$  方向)  $v$  ( $y$  方向)에 대하여 다음과 같이 나타나고 있다. 上面傾斜角  $\alpha = 12^\circ$  NOR에서  $0.068 \text{ mm}$ 와  $-0.142 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 12^\circ$  RES에서  $0.073 \text{ mm}$ 와  $-0.160 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 0^\circ$  NOR에서  $0.032 \text{ mm}$ 와  $-0.111 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 0^\circ$  RES에서  $0.037 \text{ mm}$ 와  $-0.145 \text{ mm}$ ,  $\alpha = -12^\circ$  NOR에서  $-0.01 \text{ mm}$ 와  $-0.084 \text{ mm}$ ,  $\alpha = -12^\circ$  RES에서  $-0.004 \text{ mm}$ 와  $-0.107 \text{ mm}$ 를 각각 나타내고 있다. 上面傾斜角  $\alpha = 12^\circ$  및  $\alpha = 0^\circ$ 에서는 拘束工具의 刃先變位가 正常工具의 刃先變位에 비하여 크게 나타나고 있으나 上面傾斜角  $\alpha = -12^\circ$ 의 negative 角에 대한 刃先變位는 正常工具가 拘束工具에 비하여 크게 나타나고 있다. 이러한 傾向은 節點番號 31 番까지는 同一하나 그 以後에서 上面傾斜角  $\alpha = 12^\circ$  및  $\alpha = 0^\circ$ 에서는 拘束工具는 正常工具에 비하여 크게, 上面傾斜角  $\alpha = -12^\circ$ 에서는  $u$ 의 값은 正常工具가  $v$ 의 값을 拘束工具가 各各 크게 나타나고 있다.

工具刃先の 變位方向은 上面傾斜角  $\alpha = 12^\circ$  및  $\alpha = 0^\circ$ 에서 變位  $u$ 는 positive 方向이며, 變位  $v$ 는 negative 方向의 變位를 나타내고 있다. 반면에 上面傾斜角  $\alpha = -12^\circ$ 에서는  $u$  및  $v$ 는 共通적으로 negative 方向變位임을 알 수 있다. 또한 工具刃先の 主切削方向變位  $u$ 는 移送分力方向變位  $v$ 에 비하여 적은 變位量이나 上面傾斜角이 크게 됨에 따라 工具刃先은 크게 變形하나 切削力은 적게 分布되고 있다.

Table 2. Results of Displacement

Tool	Node No.	1		16		31		46		61		76		91	
		u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v	u	v
12°	NOR	.6857	-.1423	.6295	-.1337	.6929	-.1252	.5789	-.1171	.5593	-.1094	.5289	-.9989	.4879	-.9055
		E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00
	RES	.7348	-.1605	.7019	-.1503	.6703	-.1403	.6413	-.1309	.6171	-.1219	.5911	-.1134	.5520	-.1038
		E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00
0°	NOR	.3233	-.1114	.3153	-.1072	.3139	-.1018	.3154	-.9592	.3197	-.8991	.3210	-.8212	.3129	-.7484
		E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00
	RES	.3765	-.1459	.3660	-.1404	.3657	-.1329	.3699	-.1248	.3790	-.1166	.3866	-.1081	.3832	-.9941
		E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00	E-01	E+00
-12°	NOR	-.1081	-.8455	-.1194	-.8701	-.9614	-.8608	-.6944	-.8345	-.3002	-.7908	.9991	-.7435	.4409	-.6859
		E-01	E-01	E-01	E-01	E-02	E-01	E-02	E-01	E-02	E-01	E-03	E-01	E-02	E-01
	RES	-.4470	-.1072	-.5044	-.1064	-.3675	-.1028	-.1586	-.9796	.2258	-.9257	.6412	-.8671	.9549	-.7696
		E-02	E+00	E-02	E+00	E-02	E+00	E-02	E-01	E-02	E-01	E-02	E-01	E-02	E-01

4.2. 工具傾斜面の 剪斷應力 및 垂直應力分布

Fig. 6은 上面傾斜角  $\alpha = 12^\circ, 0^\circ, -12^\circ$ 에서 FEM에 의한 結果로서 光彈性實驗結果와 비교한 것이다. 光彈性實驗에 의한 方法은 刃先거리  $x' = 0.34\text{ mm}$ 의 부근까지 측정이 가능하였으나 FEM에 의한 方法은 刃先거리  $x' = 0.07\text{ mm}$ 까지 測定되었다. 光彈性實驗結果에 의하면, 剪斷應力은 工具尖端으로부터 一定部位 떨어진 位置에서 最大의 剪斷應力을 나타내고 있으며 FEM에 의한 結果는 上面傾斜角  $\alpha = 12^\circ$  NOR에서  $\tau_{xy} = 1.11\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.07\text{ mm}$ ),  $1.12\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.26\text{ mm}$ ),  $1.06\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.40\text{ mm}$ ),  $\alpha = 12^\circ$  RES에서  $1.09\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.08\text{ mm}$ ),  $1.10\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.3\text{ mm}$ ),  $1.06\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.46\text{ mm}$ )의 剪斷應力으로 計算되고 있다.

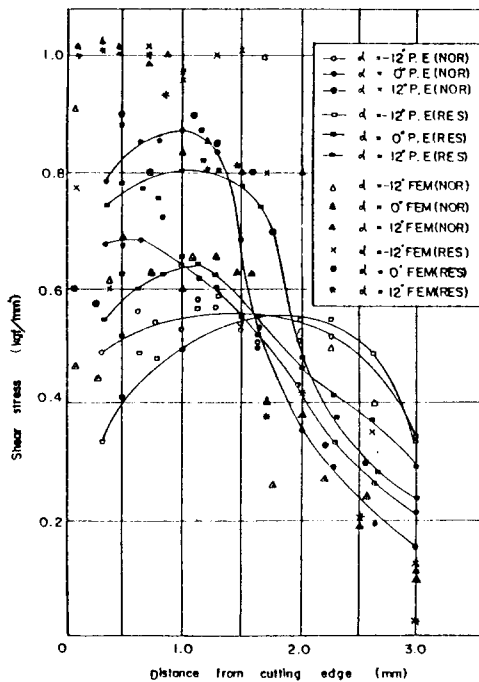


Fig. 6. Distribution of Shear Stress by FEM and P.E.

工具尖端에서의 剪斷應力  $\tau_{xy}$ 는 正常工具가 拘束工具에 비하여 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 上面傾斜角  $\alpha = 0^\circ$  NOR에서는 刃先거리에 대하

여  $\tau_{xy} = 0.46\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.089\text{ mm}$ ),  $0.67\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.51\text{ mm}$ ),  $0.69\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.93\text{ mm}$ )의 크기를 나타내고 있으며 그以後에서 감소하고 있다. 拘束工具에서는 刃先거리에 대하여  $0.60\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.1\text{ mm}$ ),  $0.90\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.6\text{ mm}$ ),  $0.91\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 1.1\text{ mm}$ )의 分布를 나타내며 그以後에서 감소하고 있다.

以上에서 보는 바와 같이 工具刃先의 剪斷應力은 一定한 刃先거리以後에서 最大剪斷應力이 나타나고 있다. 上面傾斜角  $\alpha = -12^\circ$ 에서의 正常工具는 刃先거리에 따라  $0.93\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.12\text{ mm}$ ),  $0.62\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.46\text{ mm}$ ),  $1.05\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.7\text{ mm}$ ),  $0.68\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 1.02\text{ mm}$ ),  $1.07\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 1.76\text{ mm}$ ),  $0.57\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 2.27\text{ mm}$ )로  $\alpha = 12^\circ$  및  $0^\circ$ 에 비하여 그의 pattern이 불규칙함을 나타내고 있다. 이것은 上面傾斜角變化에 대한 chip流動의 特性으로 인한 영향으로 생각된다.

Fig. 7은 上面傾斜角  $\alpha = 12^\circ, 0^\circ, -12^\circ$ 에서의 FEM 및 光彈性法에 대한 垂直應力分布이다. FEM에 의한 垂直應力分布는 光彈性結果와 잘一致되는 것을 알 수 있다. 上面傾斜角  $\alpha = 12^\circ$  NOR에서 刃先거리에 따른 垂直應力  $\sigma_y$ 는  $2.62\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.07\text{ mm}$ ),  $2.14\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.26\text{ mm}$ )이고 拘束工具는  $2.70\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.08\text{ mm}$ ),  $2.22\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.30\text{ mm}$ )로 各各 나타나고 있다.

$\alpha = 0^\circ$  NOR에서  $2.14\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.08\text{ mm}$ ),  $1.93\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.33\text{ mm}$ ), RES에서  $2.64\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.1\text{ mm}$ ),  $2.37\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.39\text{ mm}$ )이며  $\alpha = -12^\circ$  NOR에서  $1.95\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.12\text{ mm}$ ),  $1.64\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.46\text{ mm}$ ) RES에서  $3.05\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.1\text{ mm}$ ),  $2.6\text{ kgf/mm}^2$  ( $x' = 0.38\text{ mm}$ )가 各各 나타나고 있다. 光彈性實驗 結果에 의하여 刃先거리  $x' = 0.34\text{ mm}$  정도까지의 應力分布는 알 수 있었으나, 그 以上の 工具尖端部에 대하여는 測定되기 어려움이 있으며, 이것은 FEM 結果로서 垂直應力分布를 알 수 있다. 以上の 結果에서 밝힌바와 같이 垂直應力은 尖端部일 수록 極大值를 갖으며, 剪斷應力  $\tau_{xy}$ 의 分布가 平行 또는 減少하는 상태에서도 垂直應力은 增加하고 있음을 알 수 있다.

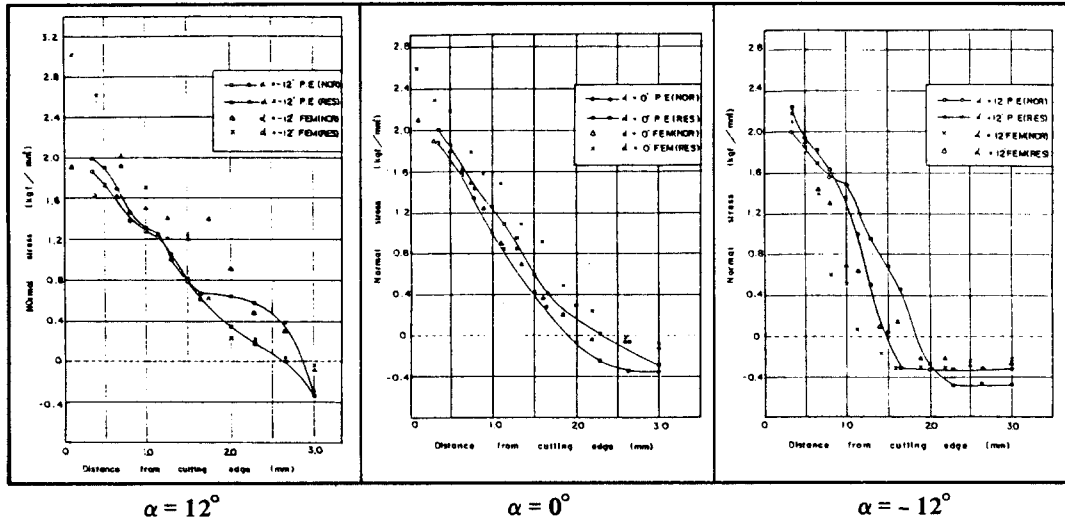


Fig. 7. Distribution of Normal Stress by FEM and P.E.

工具刃先의  $\sigma_y$ 의 크기는 上面傾斜角  $\alpha = 12^\circ$ 가 제일 크게 分布되며  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = -12^\circ$ 의 순서로 작아지고 있다. 그의 傾向은 拘束工具에서도 同一하게 나타나며, 다만 上面傾斜角  $\alpha = -12^\circ$ 에서는  $\sigma_y = 3.05 \text{ kgf/mm}^2$ 로 크게 分布되고 있다. 以上에서 上面傾斜角의 增大는 工具刃先に chipping 現象을 촉진시키며, 負(-)의 上面傾斜角에 대해서는 칩핑보다는 工具破損에 影響이 미치는 것을 의미하고 있다고 생각된다. 또한 上面傾斜角이  $\alpha = 12^\circ$ 에서는 最大剪斷應力은 工具刃先點으로부터 chip接觸길이의 約 1/3의 장소에 생기지만  $\alpha = 0^\circ$  및  $\alpha = -12^\circ$ 로 갈수록 最大剪斷應力은 chip이 工具面에서 분리되는점 부근에서 나타남을 알 수 있다.

### 5. 結 論

光彈性 實驗結果에서 얻은 切削應力分布 및 切削力을 적용하고 Least square Method로 荷重條件을 FEM에 의하여 解析하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 工具刃先의 變形은 上面傾斜角이 增加함에 따라서 切削力은 적게 分布되나 變形量은 增加한다.
- 2) 上面傾斜角  $\alpha = 12^\circ$  및  $\alpha = 0^\circ$ 에서 工具

刃先의 主切削方向 變位는 positive value이며 移送方向變位는 negative value이다. 上面傾斜角  $\alpha = -12^\circ$ 에서는 어느 경우에서나 negative value로 나타나고 있다.

3) 剪斷應力은 一定한 刃先거리에서 最大剪斷應力을 나타내고 있으며, 垂直應力은 刃先의 尖端에서 極大值를 갖는다. 즉 剪斷應力  $\tau_{xy}$ 의 分布가 一定하거나 減少하는 상태에서도 垂直應力은 增加하고 있음을 알 수 있다.

### 參 考 文 獻

- 1) Gustav Viergge, Zerspanung der Eisenwerkstoffe, verlag stahleisen. M.B.H./Düsseldorf, PP. 1-33, 1970.
- 2) Schwerd F. Was ist und wie entsteht ein Flußeisen, Techn Zbl Prakt. Metallbearb. PP. 745/49-751, 1936.
- 3) Coker, E.G. Report on the Action of Cutting Tools Proc. Inst. Mech. Eng. (London), PP. 357-434, 1925.
- 4) Okoshi M., Fukui S., Researches on the cutting action of planing tool by Microkinematographic photoelastic and Piezoelec-



- tric Methods. Sci. Pap. Inst. Phys. Chem. Res. 22 PP. 97-166, 1933.
- 5) 竹山秀彦, 切削工具の脆性損傷に関する研究の展望(1), 機械の研究, 第31巻 第5号, pp. 567-572, 1979.
- 6) Uehara. K, Kanda. Y. On the chipping phenomena of carbide cutting Tools, Annals of CIRP, 25 (1977) 11.
- 7) 金政斗, 李用成, 切削加工의 光弾性的 現象에 관한 研究(I), 大韓機械学会論文集, 第7巻 第2号, pp. 161~167, 1983.
- 8) 金政斗, 李用成, 切削加工における 光弾性測定と 解析, 日本精機学会秋季大会学術講演会論文集, pp. 313~316, 1983.
- 9) 星光一, 齊藤膝政, 有限要素法にする 工具刃光の 剛性解析, — 工具傾斜面の 切削応力分布と工具刃先の静剛性 — 精密機械, 39巻 10号, pp. 47~53, 1973.
- 10) Q. C. Zienkiewicz, Methode der Finiten Elemente, Carl Hanser Verlag München, Wein 1975.
- 11) 三好俊郎, 有限要素法 入門, 培風館, 1978.
- 12) 金政斗, 李用成, 切削加工의 光弾性的 現象에 관한 研究(II), 大韓機械学会生産工学 및 産業機械部門学術講演会抄録集, pp. 9~12, 1983.