

<論 文>

圓錐頂 Ball End Mill 의 3次元 曲面切削力系에 관한 研究

朴 天 卿\* · 孟 喜 永\*\*

(1985年 3月 15日 接受)

A Study on Free Surface Cutting Force System of Conical Tipped  
Circular Cutting Edge Ball End Mill

Chun Kyung Park and Hee Young Maeng

**Key Words:** Circular Cutting Edge(圓弧切削날), Free Surface Machining Process(曲面切削過程), Cutting Force Curve(切削力曲線), Machining Condition(加工條件), Tool Geometry(工具幾何形狀), Stability(安定性)

Abstract

This study is concerned with the analysis of cutting force system acting on ball-nose end mill in three-dimensional surface machining process.

Conical tipped circular cutting edge element model and free surface machining process types are proposed to apply oblique cutting theory, and then derived equations are used for numerical approach of cutting force curves by matrix method. This approach has a good agreement with experimental results both in magnitude and shape within the range of 15 percent, which was conformed on 6061-T6 aluminum workpiece having twofold curved surface.

From the cutting load variation to edge location, it is confirmed that circular cutting edge shapes has a better cutting ability than that of straight and both have a singularity near a tool point. It is also verified that what kind of machining condition is recommendable for three-dimensional machining process in connection with deflection of the cutter to workpiece and tool point wearing or system stability.

記 號 說 明

- |   |  |
|---|--|
| $B_e$ : 有效切削幅                                   | (kgf/mm)   |
| $C_s$ : 切削날 要素의 側面切削날角(side cutting edge angle) | $f_x, f_y, f_z$ : 切削날 要素의 X, Y, Z 軸 方向 切削力 成分 (kgf/mm) |
| $d_0$ : 加工面의 垂直方向 切削깊이                          | $F_x, F_y, F_z$ : Ball End Mill 에 作用하는 全體 切削力 成分(kgf)  |
| $f$ : 移送速度(mm/rev.)                             | $i$ : 切削날 要素의 傾斜角(inclination angle)                   |
| $f_p$ : Pickfeed 量(mm/pass)                     | $k_s$ : 比切削抵抗(kgf/mm <sup>2</sup> )                    |
| $f_r, f_\theta$ : 切削날 要素의 半徑 및 接線方向 切削力 成分      | $r$ : 任意 切削날 要素의 回轉半徑                                  |
|   | $r_0$ : Ball End Mill 의 球面部 半徑                         |
|   | $S_e$ : 切削날 要素의 半徑方向 切削깊이                              |

\* 正會員, 서울大學校 工科學 機械設計學科

\*\* 正會員, 서울大學校 大學院

- $t$  : 回轉時間(sec)
- $\alpha_b$  : 切削날 要素의 橫斷傾斜角(cross rake angle)
- $\alpha_c$  : 圓錐팁의 圓錐角
- $\alpha_e$  : 切削날 要素의 有效傾斜角(effective rake angle)
- $\alpha_n$  : 切削날 要素의 垂直傾斜角(normal rake angle)
- $\beta$  : 切削時 摩擦角(friction angle)
- $\gamma$  : 切削날 要素의 位相角
- $\delta$  : 切削날 要素의 位置角
- $\mu$  : 移送方向角
- $\lambda$  : Pickfeed 方向角
- $\omega$  : 工具의 角速度(rad./sec)
- $\phi_B$  : 圓錐팁 設置角
- $\phi_e$  : 剪斷角(shear angle)
- $\eta$  : Chip 流出方向 指定角
- $\eta_c$  : Chip 流出角

1. 緒 論

3次元 自由曲面的 切削은 NC 自動프로그래밍 技術의 發展으로 그 應用이 더욱 擴大되고 있어서, 이를 뒷받침하기 위해서는 性能 좋은 Ball End Mill의 開發과 加工時의 力學的 舉動에 대한 解析 豫測이 時急하다. 따라서 曲面 切削用 工具로서의 Ball End Mill은 適切한 形狀의 超硬化되거나 throwaway 化된 여러 工具들이 考案되고 있으며, T. Kishinami<sup>(1,2)</sup>등은 一般化된 切削날 形態로서 圓弧切削날을 提案하여 切削 運動機構와 切削性 評價基準으로서의 切削作用角을 解析한 바 있다. 그리고 Y. Fujji<sup>(3)</sup> 등은 測定과 實驗技法을 通하여 切削力 曲線과 加工精密度와의 關係를 檢討하였고, S. Miyazawa<sup>(4)</sup> 등은 曲面切削時의 幾何學的 거칠기와 實驗에 의한 實際거칠기와의 差異를 考察하기도 하였다.

그러나 아직 Ball End Mill의 曲面 切削力系에 關한 解析은 實施되지 않고 있기 때문에 工具의 切削性이나 先端部에서의 耐摩減性 및 加工誤差 等に 대해서는 局部的인 實驗結果로 밖에는 밝히지 못하고 있다. 그 理由를 살펴보면, Ball End Mill은 날의 位置마다 切削角들이 다르고 한편 頂點部에서는 特異性<sup>(1,2)</sup>을 갖고 있으며, 曲面切削으로 因해 chip 形狀이 不確實함은 물론 切削날이 渦旋的으로 前加工面과의 干涉을 일으키며 繼續切削을 하고 있는 複雜性 때문이다.

이를 解明하기 위해 本 研究에서는 數值解析 方法으로 接近시켰는바, 먼저 3次元 切削理論<sup>(5-12)</sup>의 適用

을 前提로 하여 圓錐팁 모델의 切削날 要素에 대해 加工過程 類型에 따른 近似式들을 誘導하였고, 이를 매트릭스方法<sup>(7)</sup>에 의해 切削力曲線을 數值接近시키는 데에 利用하였다. 그리고 解析結果에 대한 妥當性を 檢討하기 위해 圓錐팁 Ball End Mill을 제작하여 2重 曲率의 曲面을 갖는 工作物을 切削하는 實驗을 하였다.

따라서 本 論文에서는 曲面切削力系의 解析을 통하여 切削性和 耐摩減性이 우수한 工具幾何形狀과 曲面 切削過程에서 切削條件에 따라 變化하는 加工精密度 및 安定性を 규명하고자 한다.

2. 理論解析

2.1. 工具의 모양과 切削模型

Ball End Mill의 切削날은 側面部와 球面部로 이루어지나, 曲面切削時의 特性은 주로 球面部의 切削날에 의해 일어난다. 그리고 球面部의 切削날은 일반적으로 圓弧切削날로서 表現할 수 있다<sup>(1,2)</sup>.

따라서 이 研究에서는 Fig. 1과 같이 圓錐팁 切削날을 模型으로 設定하였다. 여기서 윗면 傾斜面(rake face)은  $O_0PST$ 의 半圓錐面으로 이루어지고, 切削날은  $\widehat{PST}$ 의 圓弧가 되며  $\widehat{PO_0}$ 에 의한 影響은 무시될 수 있다고 본다. 이때 工具의 切削날 모양은  $\alpha_c$ 와  $\phi_B$ 로 나타내고, 任意 切削날 位置角은  $\delta$ 라고 定한다. 또 切削날 要素  $S$ 의 位置와 位相角  $\gamma$ 는 다음과 같다<sup>(1)</sup>.

$$\left. \begin{aligned} r &= r_0 \sin \delta \\ X &= r_0 \sin \delta \cdot \sin \gamma \\ Y &= r_0 \sin \delta \cdot \cos \gamma \\ Z &= -r_0 \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

그리고

$$\left. \begin{aligned} \sin \gamma &= \frac{1}{\sin \delta} \sqrt{\sin^2 \delta - \frac{1}{\tan^2 \phi_B} (1 - \cos \delta)^2} \\ \cos \gamma &= \frac{(1 - \cos \delta) \cdot \cos \phi_B}{\sin \delta \cdot \sin \phi_B} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

한편 Ball End Mill로 3次元 曲面을 切削하는 過程을 Fig. 2와 같은 加工過程 模型으로 設定하여 생각한다. 여기서  $\vec{V}$ 는 工具의 移送, 速度벡터,  $\vec{F}_p$ 는 pick feed 運動 速度벡터이며,  $\vec{N}$ 은 加工面法線方向벡터이다.  $\vec{V}$ 는  $X-Z-Z'$  平面上에,  $\vec{F}_p$ 는  $Y-Z'$  平面上에 있으며  $\vec{N}$ 은  $\vec{V}$ 와  $\vec{F}_p$ 에 直角이다. 그리고 方向角은 各各 移送方向角  $\lambda$ 와 pick feed 方向角  $\mu$ 로 定한다. 各 各 vector의 成分은 다음과 같다<sup>(2)</sup>.

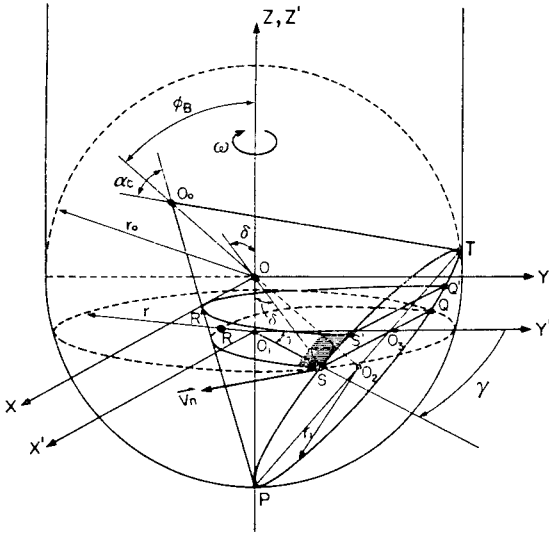


Fig. 1 Configuration of conical tipped circular cutting edge model

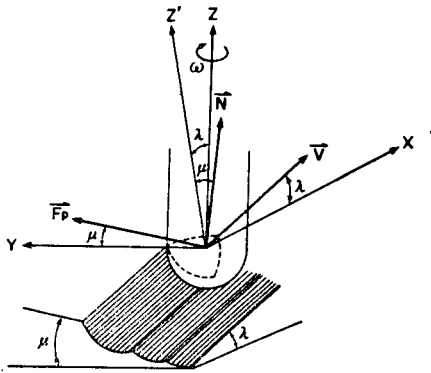


Fig. 2 Three-dimensional surface cutting process model of ball end mill

$$\left. \begin{aligned} \vec{N} &= d_0(-\cos\mu \sin\lambda, -\sin\mu, \cos\mu \cos\lambda) \\ \vec{V} &= f(\cos\lambda, 0, \sin\lambda) \\ \vec{F}_s &= f_s(-\sin\mu \sin\lambda, \cos\mu, \sin\mu \cos\lambda) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

여기서

$$\left. \begin{aligned} \vec{N} &= [R_x]_\mu \cdot [R_r]_\lambda \cdot (0, 0, d_0) \\ \vec{V} &= [R_r]_\lambda \cdot (f, 0, 0) \\ \vec{F}_s &= [R_r]_\lambda \cdot [R_x]_\mu \cdot (0, f_s, 0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$[R_i]_j$ :  $i$  축에 대한  $j$  角度 回轉 Matrix.

2.2. 有效工具傾斜角

Fig. 1에서 任意的 切削날 要素  $\overline{SS'}$ 에 3次元 切削理論의 概念<sup>(5-9)</sup>을 適用할 때 必要한 工具角들은 切削날 要素  $\overline{SS'}$ 가 空間上에서 切削方向  $\vec{V}_n$ 과 이루는 角으로서 表現된다. 圓錐Tip의 橫斷面  $\widehat{SQR}$ 이  $O_1$ 點을 中心으로 運動하기 때문에 橫斷傾斜角  $\alpha_b$ 는 S點에서  $\widehat{SRQ}$ 에 接하는 直線과  $\overline{SO_1}$ 이 이루는 角이다. 여기서  $\overline{SO_3} = M$ ,  $\overline{RO_3} = N$ 이라 하면,  $\widehat{SRQ}$ 는 圓錐斷面중 2次曲線의 경우로서<sup>(13)</sup>

$$X'^2 = -\frac{M^2}{N} (Y' + N)$$

으로 表現되고, S點에서의 接線과  $\overline{SO_3}$ 가 이루는 角은  $\tan^{-1}\left\{\frac{dY'}{dX'}\right|_{X'=M}\} = \tan^{-1}(2N/M)$ 이 되며,  $\angle O_1SO_3 = \frac{\pi}{2} - \gamma$ 이고 橫斷傾斜角  $\alpha_b$ 는 陰의 값이므로 다음과 같다[附錄 1 參照]

$$\alpha_b = \frac{\pi}{2} - \gamma - \tan^{-1}(2N/M) \quad (5)$$

그리고

$$\left. \begin{aligned} M &= \overline{SO_1} \cdot \sin\gamma = r_0 \sin\delta \cdot \sin\gamma \\ N &= \overline{RO_1} + \overline{O_1O_3} \\ &= r_0(1 - \cos\delta) \cdot \tan\left(\phi_b - \frac{\alpha_c}{2}\right) + \sin\delta \cdot \cos\gamma \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

또한 側面切削날角  $C$ , 와 傾斜角  $i$ 는 切削날要素  $\overline{SS'}$ 의 回轉半徑  $\overline{O_1S}$ 를  $X'$ 軸과 一致시켰을 때,  $\overline{SS'}$ 가  $X'-Z$ 平面 및  $Y'-Z$ 平面에 投像되는 角으로 表現된다<sup>(7)</sup>.  $\phi_b = 0$ 라고 할 때,  $X-Z$ 平面上에서 切削날  $\widehat{PST}$ 는 半徑  $r_1$ 인 圓弧이며, S點의 좌표는  $(X_s, 0, Z_s)$

$$\left. \begin{aligned} \bar{Z}_s (= \overline{PO_3}) &= r_0(1 - \cos\delta) / \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_b\right) \\ X_s (= \overline{SO_3}) &= r_0 \sqrt{\sin^2\phi_b - (\bar{Z}_s / r_0 - \sin\phi_b)^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

이므로, 이것을 P點을 中心으로  $X$ 軸으로  $-\left(\frac{\pi}{2} - \phi_b\right)$ 만큼 回轉한 다음 다시  $Z$ 軸으로  $-\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right)$ 만큼 回轉하면  $S(X_s, Y_s, Z_s)$  점은

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) & \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) & 0 \\ -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &\times \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_b\right) & \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_b\right) \\ 0 & -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_b\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_b\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_s \\ 0 \\ Z_s \end{pmatrix} \quad (8) \end{aligned}$$

으로 變換되어 P점을 原點으로 하는 固定좌표계 X-Y-Z에 대한 좌표값이 다음과 같이 얻어진다. [附錄 2 參照]

$$\begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_s \cos\left(\frac{\pi}{2}-r\right) + \bar{Z}_s \sin\left(\frac{\pi}{2}-r\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2}-\phi_B\right) \\ -X_s \sin\left(\frac{\pi}{2}-r\right) + \bar{Z}_s \cos\left(\frac{\pi}{2}-r\right) \sin\left(\frac{\pi}{2}-\phi_B\right) \\ Z_s \cos\left(\frac{\pi}{2}-\phi_B\right) \end{pmatrix} \quad (9)$$

한편 같은 方法으로 S'점에 대해서도 位置角  $\delta'$ 에 해당하는  $\bar{Z}_s', X_s'$ 를 식 (7)에서 求하여 식 (9)에 대입하면 S'점의 좌표값 ( $X_s', Y_s', Z_s'$ )가 얻어진다.

따라서  $i$ 와  $C_s$ , 그리고 垂直工具傾斜角  $\alpha_n$ 은 다음의 關係式에서 얻어진다.

$$\left. \begin{aligned} \tan(i) &= (Y_s' - Y_s) / (Z_s' - Z_s) \\ \tan(C_s) &= (X_s' - X_s) / (Z_s' - Z_s) \\ \tan(\alpha_n) &= \cos i \cdot \cos C_s \cdot \tan \alpha_s \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

한편 切削날은 性格上 한개의 直線날로 취급될 수 있기 때문에 Stabler의 假定( $\eta_s \doteq i$ )을 適用하면 有效傾

斜角  $\alpha_n$ 은 다음과 같이 決定된다<sup>(7)(9)</sup>.

$$\sin \alpha_n = \sin^2 i + \cos^2 i \cdot \sin \alpha_s \quad (11)$$

### 2.3. 加工過程과 切削깊이

Ball End Mill의 3次元 曲面 切削過程을 解析하는 데에는 다음과 같은 制約이 뒤따른다. 우선 Ball End Mill의 頂點部 近處에서 特異性이 생기는 點을 勘案해야 하고, 前加工面과의 干涉領域에 대한 適當한 表現 方法이 모색되어야 하며, 空間上에서 渦旋運動을 하는 工具軌道를 解析이 可能한 運動으로 變換하는 일이다.

이 問題點들을 解決하기 위해 2가지의 假定을 하였다. 첫째, 頂點部 近處에서는 切削常數들이 無限大로 되지만 이와 반대로 切削날 크기는 零에 가까워지고 連續切削 狀態로서 그 變化가 적기 때문에 結果力은 일정한 크기만큼 作用한다고 가정한다. 둘째, 頂點部 近處가 아닌 곳에서는  $f \sin \omega t \ll V_n$ 으로 취급할 수 있기 때문에 工具가 1回轉하는 동안은 Fig. 3(a)와 같은 平面運動으로 가정할 수 있다.

이와 같은 가정下에서 加工 process는  $d_0, \mu'$  및  $\lambda$ 의 크기에 따라 前加工面과의 干涉을 고려하여 Fig. 3(b)와 같은 6가지 類型의 切削領域으로 나누어 設定

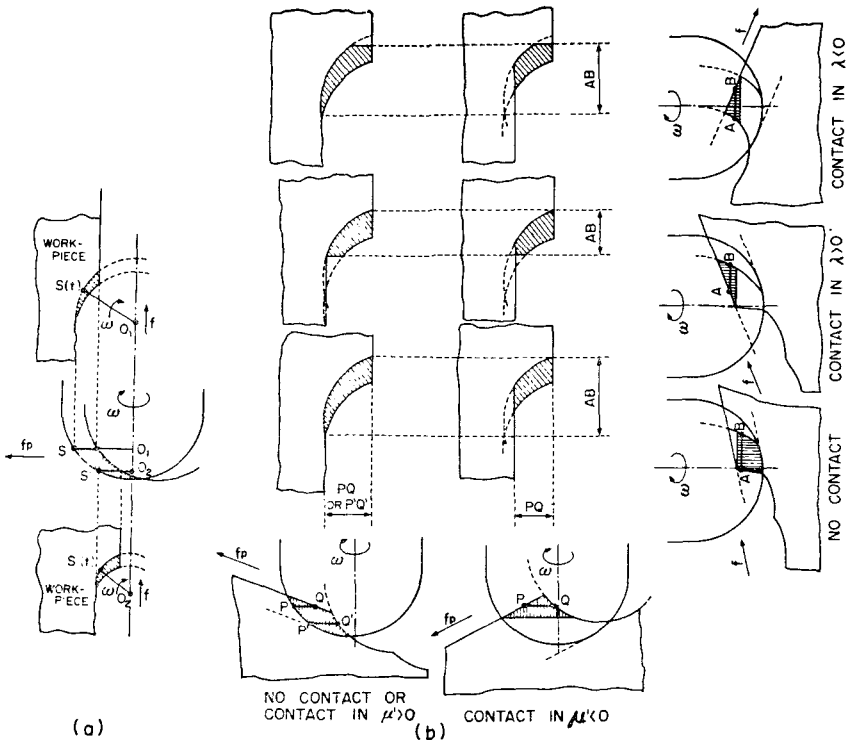


Fig. 3 Machining process type of arbitrary cutting edge due to contact with presurface

할 수 있으며, 이는 Fig. 4에서의  $\overline{AA'}$ ,  $\overline{PP'}$ ,  $\overline{BB'}$  및  $\overline{EF}$ 에 대한 境界條件으로서 數值解析 過程에 利用할 수 있다.

한편 前加工面과의 干涉이 없을 境遇에 切削깊이는 回轉半徑의 法線方向에 대한 切削領域의 두께로서 Fig. 4에서  $\overline{ab}$ 이다. Fig. 4에서 任意的 時刻  $t$ 에 있어서  $a$ 點 및  $c$ 點의 位置는 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} X_a &= r \cos(\omega t + \gamma) \\ Y_a &= r \sin(\omega t + \gamma) + f \cdot t \\ \theta_c &= \tan^{-1} \{ (Y_a + 2\pi f / \omega) / X_a \} \\ X_c &= r \cos(\theta_c - 2\pi) \\ Y_c &= r \sin(\theta_c - 2\pi) + f \cdot (\theta_c - 2\pi - \gamma) / \omega \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$c$ 點에서의 接線  $\overline{cb'}$ 로부터  $b'$ 點의 位置는

$$\left. \begin{aligned} X_{b'} &= \{ X_c (Y_a - Y_c) / (X_a - X_c) - f \cdot t \} \\ &\quad / \{ \tan(\omega t + \gamma) + (Y_a - Y_c) / (X_a - X_c) \} \\ Y_{b'} &= \tan(\omega t + \gamma) \cdot X_{b'} + f \cdot t \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

이기 때문에, 이를 反復하면  $b$ 點의 位置에 接近한다. 따라서 切削깊이  $S_c(t)$ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$S_c(t) = \delta_c(t) \cdot (X_a - X_{b'}) / \cos(\omega t + \gamma) \quad (14)$$

여기서

$$\delta_c(t) = \begin{cases} 1, & R_{b'} \leq r \text{ 일때} \\ 0, & R_{b'} > r \text{ 일때} \end{cases}$$

그리고 前加工面과의 干涉에 대한 境界條件은 各各의 境遇마다  $\lambda$ ,  $\mu$  및  $d_0$ 로서 표현된 各線分の 位置  $X_p$ ,  $X_s$  및  $Y_a$ ,  $Y_b$ 를 식 (14)에 置換하여 代入함으로써 나타낸다.

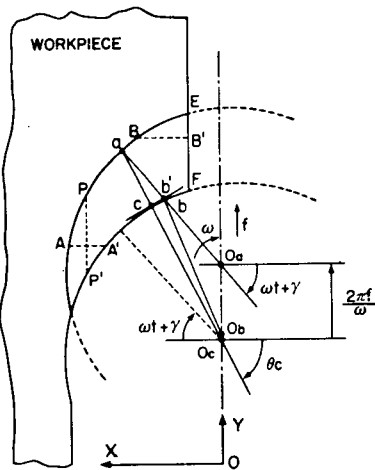


Fig. 4 Determination of radial depth in local cutting edge element

### 2.4. 切削力系의 解析

3次元 切削力系의 解析方法으로는 energy method<sup>(5)</sup> flow stress method<sup>(6)</sup>, single shear plane method<sup>(8,9)</sup> 등도 있으나, 本 研究에서는 切削날 要素의 形態와 解析節次에 適合한 方法으로서 matrix method<sup>(7)</sup>와 實驗의 切削常數 決定法<sup>(10-12)</sup>을 適用하였다.

微小 要素  $\overline{SS'}$ 에 作用하는 半徑, 接線, 軸方向의 切削力 成分은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} f_r(t, \delta) \\ f_\theta(t, \delta) \\ f_z(t, \delta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_s \sin \eta \\ f_s \\ -f_s \cos \eta \end{pmatrix} \quad (15)$$

여기서  $\eta$ 는 側面切削날角  $C_s$ 를 切削方向에 垂直한 平面으로 投像했을 때의 角이며,  $f_s$ ,  $f_a$ 는 2次元 切削의 경우에 相當하는 切削力 成分으로<sup>(7)</sup>

$$\sin \eta = \cos \alpha_s \cdot \sin C_s \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} f_s &= \frac{k_s \cdot B_s \cdot S_s \cdot \cos(\beta - \alpha_s)}{\sin \phi_s \cdot \cos(\phi_s + \beta - \alpha_s)} \\ f_a &= \frac{k_s \cdot B_s \cdot S_s \cdot \sin(\beta - \alpha_s)}{\sin \phi_s \cdot \cos(\phi_s + \beta - \alpha_s)} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

이다. 이때  $B_s = r_0 \{ \cos \delta - \cos(\delta + \Delta \delta) \}$ 이고,  $S_s$ 는 식 (14)에서,  $\alpha_s$ 는 식 (11)에서 計算되며  $k_s$ ,  $\phi_s$ ,  $\beta$ 는 Lee-Shaffer와 Stabler의 식  $\phi_s + \beta - \alpha_s = 45^\circ \sim 60^\circ$ 와 切削實驗 데이터에 의해 얻어지는 常數들이다.

그리고 임의의 時刻  $t$ 에 있어서 切削날要素의 回轉半徑  $\overline{OS}$ 는  $X-Y$  平面상에  $Y$ 軸과  $\omega t + \gamma$ 의 角을 이루고 있으므로  $X, Y, Z$ 方向의 切削力成分은 다음과 같이 變換된다.

$$\begin{pmatrix} f_x(t, \delta) \\ f_y(t, \delta) \\ f_z(t, \delta) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega t + \gamma) & \sin(\omega t + \gamma) & 0 \\ -\sin(\omega t + \gamma) & \cos(\omega t + \gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_r(t, \delta) \\ f_\theta(t, \delta) \\ f_z(t, \delta) \end{pmatrix} \quad (18)$$

따라서 切削깊이  $d_0$ 에 해당하는 位置角  $\delta_c$ 까지 積分하면 全體 切削力의 各方向成分은 다음과 같이 얻어진다.

$$\begin{pmatrix} F_x(t) \\ F_y(t) \\ F_z(t) \end{pmatrix} = \int_0^{\delta_c} \begin{pmatrix} f_x(t, \delta) \\ f_y(t, \delta) \\ f_z(t, \delta) \end{pmatrix} d\delta \quad (19)$$

여기서

$$\cos \delta_c = 1 - \frac{d_0}{r_0} \cos \mu \cos \lambda \quad (20)$$

이상과 같은 解析過程을 flowchart로 정리하면 Fig. 5와 같다.

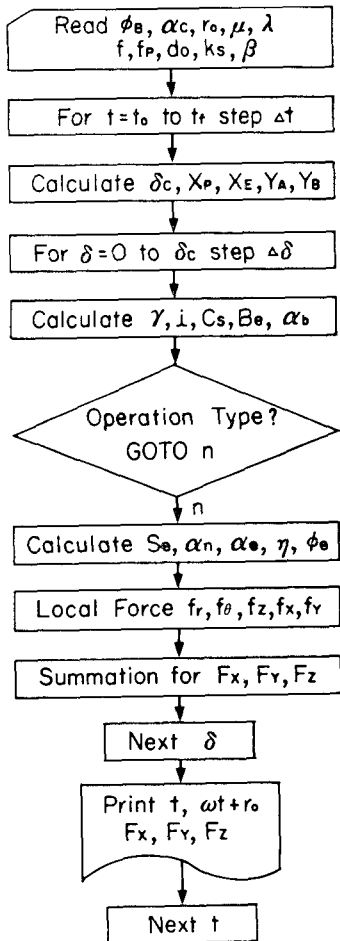


Fig. 5 Flowchart for numerical analysis

3. 實 驗

實驗에 使用된 Ball End Mill은 HSS 材 圓錐팁을 研削加工하여 Fig. 6 과 같이 固定시킨 throwaway 型이다. 이때 圓錐팁의 圓錐角  $\alpha_c$ 는  $30^\circ, 60^\circ$ 의 2가지를 使用하였고, 設置角  $\phi_B$ 는 모두  $45^\circ$ 로 하였다. 工作機械는 同時 3軸制御 Hitachi-Seiki 製 수직형 NC Machining Center를 使用하였으며, 切削力은 ASTM式 工具動力計로 測定하여 Strain Amp.를 거쳐 Oscilloscope 와 Linearrecorder 또는 Datacorder 에 記錄하였다. 또 工作物 材質은 工具의 摩滅과 動特性에 대한 影響을 줄이기 위해 6061-T6 aluminum 材를 使用하였다.

切削力을 測定하는 過程은 上向切削으로서 2段階를 거쳐 實施하였는데, 첫 단계에서는 各 位置마다의 切削날 要素에 대한 切削力 크기를 測定하는 實驗으로서  $\delta$ 로 指定되는 切削날 位置의 해당 깊이만큼 낮추어 가면서 준비된 1mm 두께의 얇은 板材 工作物을 切削 하였다. 이때 使用된 切削條件들은 Table 1과 같으며 여기에는 이 工作物 材質에 대해 提案<sup>(7,9)</sup>되고 있는 切削常數 값의 範圍도 제시하였다. 이 實驗의 結果는  $k_s, \beta$ , 및  $\phi_e + \beta - \alpha_c$ 의 값을 決定하는 데에 利用된다.

두번째 段階에서는 工具의 移送方向 및 pickfeed 方向에 대한 切削力 變化特性을 測定하는 實驗으로서, Fig. 7과 같이  $R_1=60, R_2=30\text{mm}$ 의 曲率半徑을 갖는 tube 모양의 加工物을 使用하여 NC 프로그램대로 自動운전하면서 一括적으로 切削力의 變化過程을 測定할 수 있도록 하였다. 이때 切削條件은 切削깊이  $d_0=2.0\text{mm}$ 로 一定하게 하였고, 主軸 및 移送速度는 앞의 實驗과 같으며,  $f_e=2.094\text{mm/pass}$  ( $4\mu'=2^\circ$ 에 해당)로 하였다. 여기서 1회 切削當 切削되는 圓弧의 長이는  $\lambda=-35^\circ\sim 35^\circ$ 까지에 해당하도록  $36.652\text{mm}$ 로 하였고, pickfeed 方向角도  $\mu'=-30^\circ\sim 30^\circ$ 까지 變할 수 있도록  $62.832\text{mm}$ 의 tube 길이를 切削하게 하였으며, 工具는 NC 프로그램 속에서 G41 code로 항상 加工面에 垂直으로 半徑벡터만큼 補正되도록 하였다.

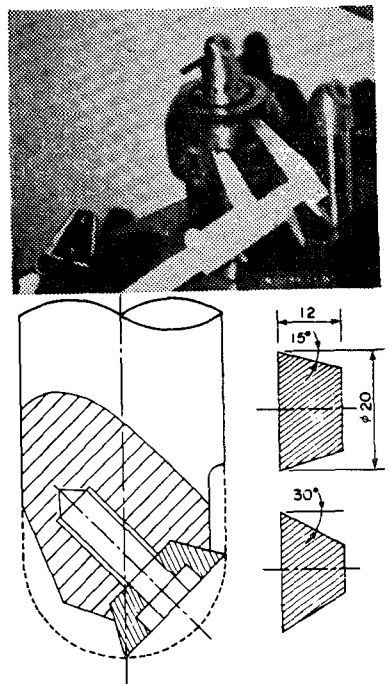


Fig. 6 Dimension and view of conical tipped B.E.M

Table 1 Machining conditions and workpiece parameters

Machining conditions		Workpiece machining parameters	
Spindle speed	200 rpm	Specific cutting force ( $k_s$ )	15.0~30.0 kgf/mm <sup>2</sup>
Feedrate ( $f$ )	40 mm/min. (=0.2mm/rev.)	Friction angle ( $\beta$ )	40°~50°
Pickfeed ( $f_p$ )	2.0 mm/pass	Shear angle relation ( $\phi_s + \beta - \alpha_s$ )	30°~50°

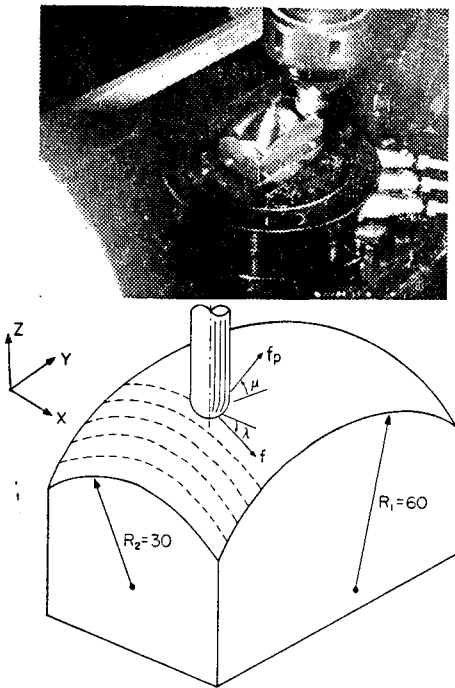


Fig. 7 Cutting force measuring process in three-dimensional surface machining

4. 結果 및 考察

첫 段階의 實驗에서 얻어진 데이터를 Fig. 8 과 같이 線圖化함으로써  $k_s$  는 26.5kgf/mm<sup>2</sup>,  $\beta$  는 47°,  $\phi_s + \beta - \alpha_s = 42^\circ$ 의 結果를 얻었다. 이를 求하는 方法은 Table 1에서 提示된 범위內的 切削常數들을 數值計算用 프로그램에 入力하여, 해당  $\delta$  값에 대한 X 및 Z 方向 最高 切削力 成分들을 計算하고, 이것을 實驗데이터와 比較한 後 再調整하는 方法을 使用했다. 여기서 Y 方向의 成分을 除外한 것은 式 (15) 및 (17)에서  $f_p$  와  $f_t$  의 重複을 피하기 위함이다. 結果의 由로 切削常數가 適切

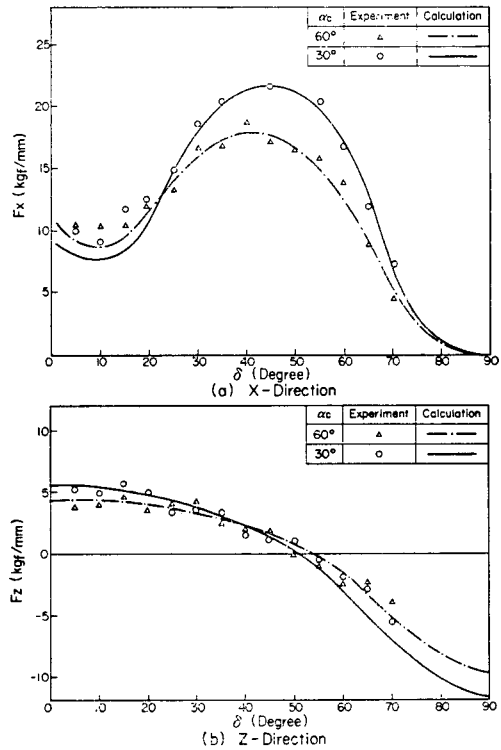


Fig. 8 Cutting force components per unit length in each cutting edge element location

히 定해지면, 實驗値와 理論的 計算値는 比較적 잘 一致됨을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 9 과 Fig. 10 은 數值 計算 過程에서 나타나는 工具角들의 變化와 半徑方向 切削깊이를 提示한 것이다.

Fig. 8에서  $\delta$  값에 대한 切削力 成分의 變化를 살펴 보면, X 方向 分力의 最高값은  $\delta = 35^\circ \sim 45^\circ$  에서 가장 크고  $\delta$  가 작아질수록 切削力도 작아지나 最低値는  $\delta = 5^\circ \sim 10^\circ$  에서 나타내는 특징을 보인다. 이는 頂點部 근처에서 特異性이 일어남을 意味하는데, Fig. 9에서와 같이 工具角들도 이러한 性格을 갖고 있지만 무엇보다도 頂點部 근처에서는 Fig. 10 과 같이 工具가 回轉하

는 동안 半徑方向 切削깊이가 항상 큰 값을 가지고 있기 때문에 이와같은 現象이 일어난다고 생각된다. Z 方向 分力の 最高값은  $\delta$ 가 커질수록 점차적으로 작아지는 경향을 보여주고 있으며  $\delta=50^{\circ}\sim 60^{\circ}$  사이에서 陰(-)으로 되고 있다. 이같은 現象은 Z 方向의 衝擊을 줄여줌으로서 頂點部에서의 摩滅을 감소시키고 壽命을 增大시켜 주는 效果라고 생각된다.

또한  $\alpha_c$ 가  $30^{\circ}$ ,  $60^{\circ}$ 인 두 경우를 比較하면 X 方向 分力は  $\alpha_c=60^{\circ}$  쪽이 크기가 작기 때문에 切削성이 優秀하다고 볼 수 있으나 Z 方向 分力は 陰(-)의 값으로 肥大하여지므로 工具 頂點部에서의 摩滅은  $\alpha_c=30^{\circ}$  쪽이 적다는 것을 알 수 있다.

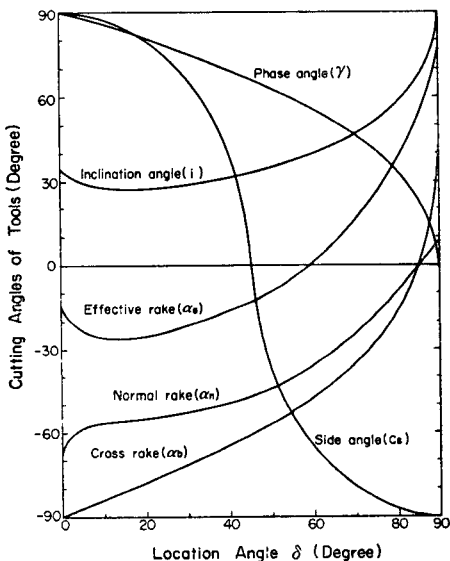


Fig. 9 Variation of cutting angles in numerical calculation corresponding to preceding conditions

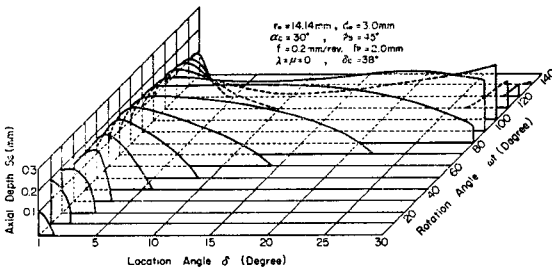


Fig. 10 Variation of axial depth of cut with location angle and tool rotating angle

이와같이 求한 切削常數들을 3次元 曲面 切削力 曲線의 數值計算用 프로그램에 入力하여 얻어진 結果는 Fig. 11 (a)~(c)에 提示하였으며, 이것은 實驗結果인 (d)와 比較할 때 그 次元이나 變化樣相이 비교적 잘 一致하고 있음을 알 수 있다. 여기서  $\mu=0^{\circ}$ ,  $\mu=10^{\circ}$ 인 경우를 提示한 것은 切削力 曲線이  $-15^{\circ} < \mu < 0^{\circ}$ 의 경우에서는 심한 變化特性을 갖고 있고, 그 以外의 경우에는 비교적 單調로운 樣相을 띠고 있다는 것을 實驗結果로부터 알 수 있었기 때문이다. 이때 그 特性을 考察하여 보면 다음과 같다.

$F_x$ 는  $\mu=0^{\circ}$ 일 때에는  $\lambda$ 가  $0^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $-15^{\circ}$ ,  $-30^{\circ}$ 인 順으로 最大값의 크기가 작아지고, 이에 到達하는 時期는  $0^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $-15^{\circ}$ ,  $-30^{\circ}$ 의 順으로 늦어지고 있다. 한편  $\mu=-10^{\circ}$ 일 때에는 앞의 경우에 比較해서 最大力의 크기가 대체로 작고  $\lambda < 0^{\circ}$ 일 때에는 正弦波 曲線의 過渡의 現象을 보이고 있다. 그러나  $F_y$ 는 두 경우에 있어서 그다지 差異를 보이지 않고 있는데,  $\lambda$ 가  $15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ 일 때에는 陽(+)의 값으로 되고,  $\lambda$ 가  $-15^{\circ}$ ,  $-30^{\circ}$ 일 때에는 陰(-)의 값이 되고 있으며,  $\lambda=0^{\circ}$ 일 때에는 陽과 陰의 값이 모두 나타난다.  $F_z$ 에 있어서는  $\mu=0^{\circ}$ 일 때, 最大力의 크기는  $\lambda=0^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$ ,  $-15^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ,  $-30^{\circ}$ 의 順으로 작아지며  $\lambda$ 가 클수록 빠른 時期에 到達하는 單調로운 形態이나,  $\mu=-15^{\circ}$ 일 때에는 가장 變化樣相이 심하여  $\lambda=-10^{\circ}$ 의 臨界條件에서는 最低值가 0이 아닌 10kgf 정도의 값을 갖는다.

한편 Fig. 11의 結果를 全般的으로 考察하여 보면  $\mu=-10^{\circ}$ 인 경우가  $\mu=0^{\circ}$ 인 경우보다 最高值도 작고 넓게 分散되는 경향임을 알 수 있다. 이는 工具의 頂點部에서 보다는 약간 벗어난  $\delta=10^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 인 領域에서 安定性있게 切削이 이루어짐을 意味한다. 그리고 이 두 경우의 切削作用角도  $\mu=0^{\circ}$ 일 때에는  $85^{\circ}\sim 90^{\circ}$ ,  $\mu=-15^{\circ}$ 일 때에는  $90^{\circ}\sim 95^{\circ}$ 로 되어 있으며, 이것은 T. Kishinami<sup>(2)</sup> 등의 機構學的 解析結果보다는 약간 크다는 것을 切削力 曲線의 實驗結果로서 立證하게 되었다. 또한 이 값들은  $\phi_s=0^{\circ}$ 인 直線切削날의 경우와 比較하여  $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 가 큰 값이기 때문에,  $\phi_s=45^{\circ}$ 인 本研究의 圓弧切削날은 前者의 경우보다 切削力이 넓게 分散되고 最大力도 작은 長點이 있음을 보여주는 것이다.

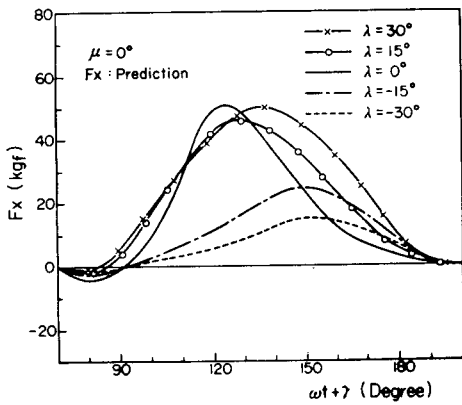
Fig. 12는 切削力 曲線의 最高值와 最低值만을 曲面 切削實驗을 통하여 測定한 結果이다. 여기서 3次元 曲面의 切削力系에 對한 特性을 一括적으로 考察할 수 있게 되었으며, 數值計算用 프로그램으로는 計算量의



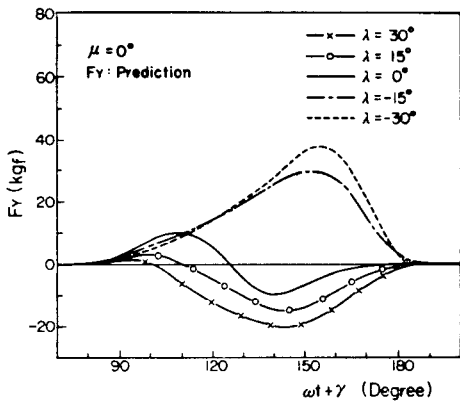
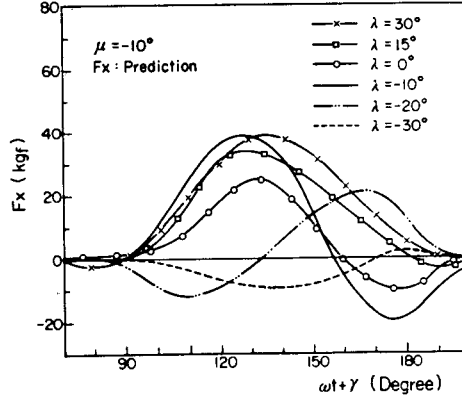
過多로 全體에 대해서는 얻을 수 없지만 任意 條件에 대해서 確認될 수 있었다.

Fig. 12에서 切削力系의 變化特性은 Fig. 11에서 보았던  $\mu = -10^\circ$ ,  $\lambda = -10^\circ$  일 때의 過渡特性을 境界

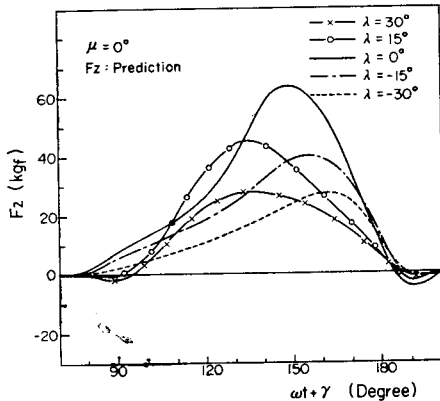
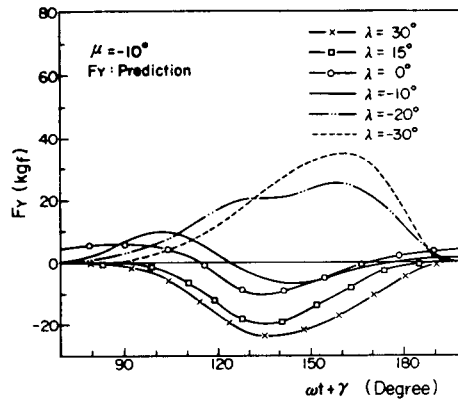
로 서로 對稱的으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 曲面切削時의 切削條件은 크게 다음과 같은 4가지 領域으로 나뉜다. 첫째  $\mu > 0^\circ$  이거나  $\mu < -20^\circ$ 이고  $\lambda > -10^\circ$  인 領域으로서 切削力 曲線은 單調로우나 主



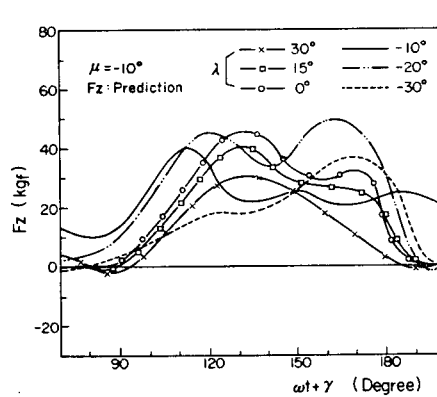
(a) X-Direction

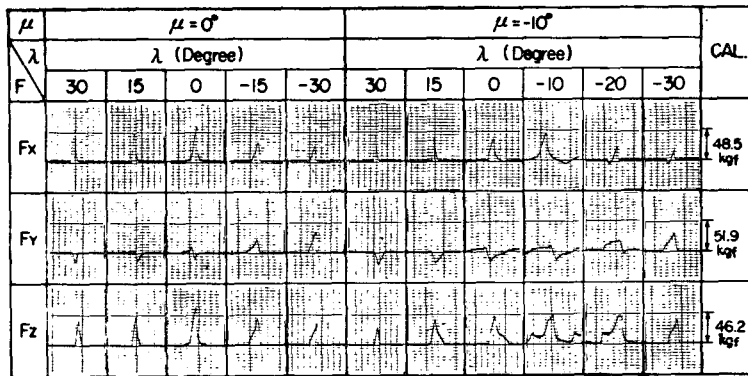


(b) Y-Direction



(c) Z-Direction





(d) Experiment

Fig. 11 Cutting force curve in three-dimensional surface machining process

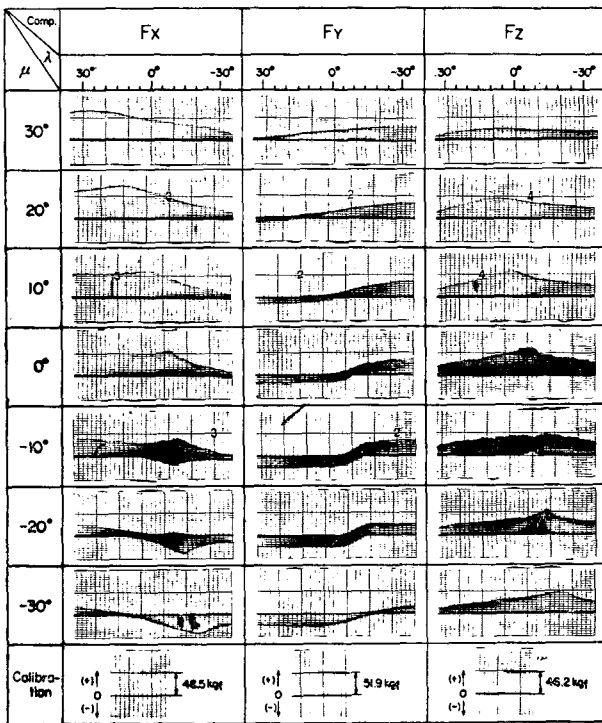


Fig. 12 Three-dimensional cutting force system represented by peak force component profiles

切削力成分이  $F_x$ 에 집중되어 있고  $F_z$ 도 큰 값을 갖는 영역, 둘째  $\mu > 0^\circ$  이거나  $\mu < -20^\circ$ 이고,  $\lambda < -10^\circ$ 인 영역으로서切削力曲線도單調롭고主切削成分도分散되어 있으면서  $F_z$ 도 작은 가장良好한 영역, 셋째  $-20^\circ < \mu < 0^\circ$ 이고,  $\lambda > -10^\circ$ 인比較的單純하고  $F_z$ 가 작은 過渡的 領域, 넷째  $-20^\circ < \mu < 0^\circ$ 이고,

$\lambda < -10^\circ$ 인 매우 激烈한 變化를 가지면서  $F_z$ 도 큰 값을 갖는 가장 不安定한 領域이다. 加工上의 見地에서 살펴보면 曲面切削時에 있어서 工具의 徑路는 可及的 위의 두번째 또는 세번째 領域의 切削條件을 갖도록 하는 것이 바람직하고, 그렇지 못할 경우에는 이로 인한 加工上의 許容誤差나 工具壽命에 對한 影響<sup>(3)(12)</sup>이 考慮되어야 할 것으로 본다.

### 5. 結 論

以上과 같이 3次元 曲面의 NC 切削過程을 數值接近의 方法으로 解析하고 切削實驗을 通하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) Ball End Mill에 있어서 圓錐팁 模型 切削날 要素의 加工過程 解析은 3次元 切削理論의 適用과 曲面 切削力 系의 數值解析을 可能케 한다.

(2) 切削날 要素에 作用하는 主切削力은 位置角  $\delta = 25^\circ \sim 45^\circ$ 에서 最高로 되며,  $\delta = 5^\circ \sim 15^\circ$ 에서 最低值가 생기다가 頂點部 近處에서는 다시 커지는 特異性을 갖는다.

(3) 曲面切削時에 切削力 曲線은  $-20^\circ < \mu < 0^\circ$ 와  $\lambda < -10^\circ$ 인 切削條件에서 가장 不安定한 過渡的 特性을 가지며,  $\mu < -20^\circ$ 이거나  $\mu > 0^\circ$ ,  $\lambda > -10^\circ$ 인 切削條件에서 가장 安定되고 軸方向 切削力도 작은 特性을 갖는다.

(4) 같은 圓錐팁의 圓錐角에 대해 設置角이  $0^\circ$ 인 直線切削날보다 圓弧切削날의 경우가 일반적으로 切削力이 작고 넓게 分散되어 切削性이 優秀하다.

(5) 圓錐팁의 圓錐각이 큰 工具일수록 切削性은 優秀하지만 軸方向의 合力이 커지게 되어 工具 頂點部에

서의 摩滅을 促進시킬 우려가 있다.

참 고 문 헌

(1) T. Kishinami. et al., A Theoretical Analysis of Cutting Speed Components on the Rake Face of Circular Cutting Edge Ball End Mill, J. of JSPE, Vol. 46, pp. 115~122, 1980

(2) T. Kishinami. et al., A Theoretical Analysis of Cutting Operation Angle of Circular Cutting Edge Ball End Mill, J. of JSPE, Vol. 47, pp. 73~79, 1981

(3) Y. Fujji and H. Iwabe, Relationship between Cutting Force Curve and Working Accuracy with Ball-nose End Mills, J. of JSPE, Vol. 48, pp. 105~110, 1982

(4) S. Miyaxawa and K. Takada, Micro Milling of Three-Dimensional Surface, J. of JSPE, Vol. 47, pp. 94~99, 1981

(5) Usui, E., and Hirota, A., Analytical Prediction of Three-Dimensional Cutting Process. Part2, ASME Trans., J. of Engineering for Industry, Vol. 100, No. 2, p. 229, May 1978

(6) Lin, G.C.I., Prediction of Cutting Forces and Chip Geometry in Oblique Machining from Flow Stress Properties and Cutting Conditions, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 18, p. 117, 1981

(7) Kir, J.A., Anand, D.K. and Mckindra, C., Matrix Representation and Prediction of Three-Dimensional Cutting Forces, ASME Trans., J. of Eng. for Ind., Vol. 99, No. 4, p. 828, Nov. 1977

(8) Pandey, P.C., and Shan, H.S., Analysis of Cutting Forces in Peripheral and Face Milling Operations, Int. J. Prod. Res., Vol. 10, No.4, p. 379, 1982

(9) Venu Vinod, P.K. et al., ON a New Model of Oblique Cutting, ASME Trans., J. of Eng. for Ind., Vol. 100, No. 2, p. 286, 1978

(10) Fu, H.J., DeVor, R.E. and Kapoor, S. G., A Mechanistic Model for the Prediction of the Force System in Face Milling Operations, ASME Trans., J. of Eng. for Ind., Vol. 106, p. 81, Feb. 1984

(11) Kline, W.A., Devor, R.E. and Lindberg, J.R,

Prediction of Cutting Forces in End Milling with Applicatimn to Cornering Cuts, Int. J. Mach. Tool Des. Res., Vol. 22, No. 1., pp. 7~22, 1982

(12) Kline, W.A. DeVor, R.E. and Shareef, I.A., The Prediction of Surface Accuracy in End Milling, ASME Trans., J. of Eng. for Ind. Vol. 104, pp. 272~278, 1982

(13) Rogers, D.F., Adams, J.A., Mathematical Elements for Computer Graphics, McGraw-Hill, 1976, pp. 94~97

[附 錄 1]

Fig. 1에서  $\widehat{SQR}$ 은 圓錐斷面의 二次曲線으로서 陰函數인 다음 式으로 표현된다<sup>(13)</sup>.

$$(X' - h)^2 = 4P(Y' - R)$$

그리고 이 式은  $Y'$  축에 대칭이므로

$$X'^2 = 4P(Y' - k)$$

이며,  $\overline{SO}_3 = M$ ,  $\overline{RO}_3 = N$ 이라 할때

$$X'^2 = \frac{M^2}{N}(Y' + N)$$

이다. 따라서  $\alpha_b$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \alpha_b &= \left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) - \theta \\ &= \left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) - \tan^{-1}\left(\frac{dY'}{dX'} \mid X' = M\right) \\ &= \frac{\pi}{2} - \gamma - \tan^{-1}\left(\frac{2N}{M}\right) \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} M &= \overline{SO}_3 = \overline{SO}_1 \cdot \sin \gamma \\ &= \overline{SO} \cdot \sin \delta \cdot \sin \gamma \\ &= r_o \sin \delta \cdot \sin \gamma \\ N &= \overline{RO}_3 = \overline{RO}_1 + \overline{O}_1\overline{O}_3 \\ &= \overline{O}_1\overline{P} \cdot \tan\left(\phi_b - \frac{\alpha_c}{2}\right) + \overline{O}_1\overline{S} \cdot \cos \gamma \\ &= (\overline{OP} - \overline{OO}_1) \cdot \tan\left(\phi_b - \frac{\alpha_c}{2}\right) + r_o \cdot \sin \delta \cdot \cos \gamma \\ &= r_o(1 - \cos \delta) \cdot \tan\left(\phi_b - \frac{\alpha_c}{2}\right) + r_o \cdot \sin \delta \cdot \cos \gamma \end{aligned}$$

이다.

[附 錄 2]

半徑  $r_1$ 인 圓弧가 P점을 중심으로  $\phi_b = 0$ 이 되도록 회전될 때

$$\begin{aligned} \overline{Z}_r &= \overline{PO}_3 = \overline{PO}_1 \mid \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_b\right) \\ &= (\overline{OP} - \overline{OO}_1) / \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_b\right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= r_0(1 - \cos \delta) / \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_B\right) \\
 X_s = \overline{SO}_s &= \sqrt{r_1^2 - (\overline{Z}_s - r_1)^2} \\
 &= r_0 \sqrt{\left(\frac{r_1}{r_0}\right)^2 - \left(\frac{\overline{Z}_s}{r_0} - \frac{r_1}{r_0}\right)^2} \\
 &= r_0 \sqrt{\sin^2 \phi_B - (\overline{Z}_s / r_0 - \sin \phi_B)^2}
 \end{aligned}$$

그리고  $S(X_s, Y_s, Z_s)$ 는 式 (8)에서

$$\begin{pmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) & \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) & 0 \\ -\sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X_s \\ Z_s \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_B\right) \\ Z_s \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_B\right) \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} X_s \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) + Z_s \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_B\right) \\ -X_s \sin\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) + Z_s \cos\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi_B\right) \\ Z_s \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi_B\right) \end{pmatrix}$$

으로 구하여 진다.