

볼 엔드밀에 의한 정밀 가공에 관한 연구

양 민 양\*, 심 충 건\*\*

A Study on the Precision Machining in Ball End Milling System

Min-Yang Yang\*, Choong-Gun Sim\*\*

ABSTRACT

Cutter deflections in the ball-end milling process is one of the main causes of the machining errors on a free-form surface. In order to avoid machining errors in this process, a methodology avoiding these machining errors on the free-form surfaces has been developed. In this method, feedrates in the finish cuts are adjusted for the prevention of machining errors. A model for the prediction of machining errors on the free-form surface is analytically derived as a function of feed and normal vector at the surface of contact point by the cutter. This model is applied to the determination of the adjusted feedrates which satisfy the machining tolerance of the surface. In the finish cuts of a simple curved surface, the suggested model is examined by the measurements of the generated machining error on this surface. And also, this surface is machined with the adjusted feedrates for the given machining tolerance. The measured machining errors on this surface are compared with the given tolerance. In this comparisons, it is shown that the predicted errors are fairly good agreement with the test results.

**Key Words :** Ball-End Milling (볼 엔드밀링), Cutter Deflection (공구의 처짐), Machining Errors (가공 오차), Machining (절삭), Control (제어), Free-form Surface (자유곡면), Machining Tolerance (가공 공차)

기호설명

$\Delta Area$  : 미소 절삭날에 걸리는 칩의 단면적  
 $d_a(j)$  : a-b-c 좌표계에서 임의 절삭날의 j번째 미소 절삭날의 절삭폭  
 $d_e(j)$  : 절삭폭  $d_c(j)$  에 대한 3차원 절삭에서의 상당값

$df^*(i, j)$  : 이전 절삭날에 발생한 처짐으로 인하여, 임의 절삭날의 회전각  $\theta(i)$  에서 j번째의 미소 절삭날에 걸리는 칩 두께의 증가량  
 $df(i, j)$  : 현재의 절삭날에 발생한 처짐으로 인하여, 임의 절삭날의 회전각  $\theta(i)$  에서 j번째의 미소 절삭날에 걸리는 칩 두께의 감소량  
 $df_e^*(i, j)$  : 칩 두께  $df^*(i, j)$  에 대한 3차원 절삭에서

\* 한국과학기술원 정밀공학과

\*\* 대우중공업 우주항공연구소

의 상당값

$df_e(i, j)$  : 칩 두께  $df(i, j)$  에 대한 3차원 절삭에서의 상당값

$E_n$  : 곡면위의 한점에서 법선 방향으로 생기는 가공오차(machining error)

$\Delta F_u, \Delta F_v, \Delta F_w$  : u-v-w 좌표계에서의 각 방향 미소 절삭력

$\Delta F_t, \Delta F_r$  : 미소 절삭날에 걸리는 접선 방향과 법선 방향의 미소 절삭력

$F_u, F_v, F_w$  : u-v-w 좌표계에서의 각 방향 절삭합력

$F_P$  : 공구의 축방향에 수직으로 걸리는 절삭력 ( $F_P = (F_u + F_v + F_w)^{1.2}$ )

$f_c(i, j)$  : a-b-c 좌표계에서 이송에 의한 임의 절삭날의 회전각  $\theta(i)$  에서 j번째의 미소 절삭날에 걸리는 이송량

$f_e(i, j)$  : 이송량  $f_e(i, j)$  에 대한 3차원 절삭에서의 상당값

$f_m$  : 단위 절삭날 당 평균 이송량

$f_r$  : 각 절삭날의 걸리는 기준 이송량 (reference feed)

$ft_a$  : 가공오차의 제어를 위하여 조정된 이송속도(adjusted feedrate)

$K_l(i, j)$  : 임의 공구의 회전각  $\theta(i)$  에서 j번째의 미소 절삭날의 접선 방향 절삭력 방정식에서의 절삭력 상수

$K_r(i, j)$  : 임의 공구의 회전각  $\theta(i)$  에서 j번째의 미소 절삭날의 법선 방향 절삭력

$M_t$  : 곡면위의 한점에서 법선방향으로 주어진 가공공차(machining tolerance)

R : 공구의 반경

N : 좌표계 u-v-w에서 가공되는 공작물 표면의 법선 벡터 ( $N = N_u i + N_v j + N_w k, |N| = 1$ )

E : 좌표계 u-v-w에서 공구의 이송방향 단위 벡터 ( $|E| = 1$ )

P : 좌표계 u-v-w에서 가공되는 공작물상의 한점 P의 단위 위치벡터 ( $|P| = 1$ ) 방정식에서의 절삭력 상수

Q : 좌표계 u-v-w에서 임의 위치 Q점에 있는 미소 절삭날의 위치벡터 ( $Q = Q_u i + Q_v j + Q_w k, |Q| = R$ )

$\lambda$  : 곡면 위에 남겨진 정삭 여유량

$\theta_d(i, j)$  : 가공되는 공작물의 한 지점에서 이송에 의한 이전 절삭날과 현 절삭날간의 위치차이

$\theta(j)$  : j-번째 위치의 미소 절삭날의 위치각(바닥 끝에서  $j=0$ )

$\theta(i)$  : 절삭날의 회전 위치중 i-번째 위치각(절삭날이 u축에 접할 때  $i=0.180$ )

$\theta_f(i)$  : j-번째 미소 절삭날에서의 비틀림 각

## 1. 서 론

본 엔드 밀링작업은 금형 및 항공기 부품의 가공에 널리 쓰이고 있으며 터어빈 블레이드와 같은 3차원 자유 곡면체의 공작물 가공에 적합한 공정이다. 최근 CAD/CAM 시스템 및 CNC 공작기계의 발달에 따라 비교적 복잡한 형상의 가공물에 대하여도 공구의 정확한 위치(cutter location) 정보 산출 및 그것의 정밀 제어가 가능하여졌으나, 볼 엔드 밀링작업이 근본적으로 공구와 공작물간의 접촉점에서 이루어지는 점 가공의 형태이고 경험에 의해 절삭조건을 부여하기 때문에 가공의 비효율성이 더욱 높아지고 있다.

이러한 비효율성을 극복하기 위한 노력으로 최적공정 계획의 수립에 관한 연구와 더불어 플랫 엔드밀을 적용하려는 연구(1) 등 점 가공의 비효율성을 가능한 한 줄이려는 것과 적절한 가공 조건의 선정으로부터 곡면 가공에서 발생할 수 있는 과대 또는 과소 절삭을 방지하기 위한 연구(2, 3)가 있어 왔다. 특히, 과대 및 과소 절삭의 방지를 위하여 밀링 공정에 대한 절삭력 모델 연구가 많이 있어 왔는데, 크게 한 절삭날에 의해 제거되는 칩의 체적이나 단면적으로부터 절삭력을 구하려는 방법(4, 5)과 미소 절삭날에 대한 3차원 절삭 이론을 적용하여 절삭력을 구하려는 방법(7, 8, 9)으로 구분하여 볼 수 있다.

본 논문에서는 기존의 유연 볼 엔드밀의 절삭력 모델(9, 10)을 바탕으로 자유 곡면의 정삭 가공에서 발생할 수 있는 과대 또는 과소 절삭을 방지하면서 그 가공의 효율성을 높이기 위한 볼 엔드밀의 이송속도 결정법을 제시하고자 한다. 먼저, 자유 곡면의 가공에서 발생할 수 있는 공구의 처짐에 따른 가공오차에 대하여 볼 엔드밀 공구의 처짐벡터와 공작물의 공구 접촉점에서의 법선벡터로 표현되는 가공오차(machining error) 예측 모델식을 유도하였다. 본 가공오차 예측 모델식에서 공

작물은 강성체로 가정되었으며 그 처짐은 고려되고 있지 않다. 이 가공오차 예측 모델식은 다시 절삭날당 가지는 이송량의 함수로 전개되어 그 곡면의 주어진 가공공차(machining tolerance)를 만족시키는 이송속도를 결정하게 된다.

여기서 제시하는 가공오차 예측 모델은 일정한 두께의 정삭여유를 가진 코사인 커브 형태의 2차원 곡면 가공으로부터 그 유효성을 검증받고 있다. 또한 본 곡면의 정삭가공을 위한 CL(cutter location) 데이터의 각 블록(block)들에 이 제시된 방법에 의해 결정되는 이송속도를 부여하여 임의의 가공공차를 갖는 곡면의 가공을 수행하였다. 그 가공면에서 측정된 가공오차를 곡면에 주어진 가공공차와 더불어 비교하였으며, 그때의 소요 절삭시간을 기존의 방법에 의한 결과와 비교하였다.

## 2. 유연 볼 엔드밀에 의한 가공오차

### 2.1 절삭력 예측

#### (1) 칩 두께의 계산

Fig.1은 회전 위치  $\theta(i)$ 에 있는 절삭날의  $j$ -번째 위치에 존재하는 미소 절삭날 OA에 작용하는 미소 절삭력을 정의된 좌표축들과 같이 보여 주고 있다. 지난

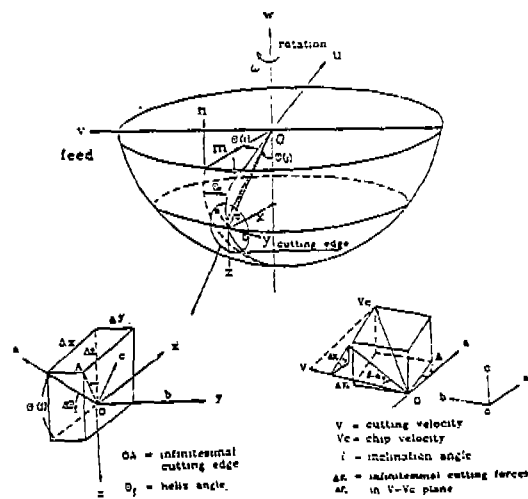


Fig.1 Cutting forces acting on a small element OA sitting on the ball part of ball-end mill with definitions of a-b-c, x-y-z, l-m-n, and u-v-w coordinates

연구(10)에서 처짐이 일어나는 볼 엔드밀 공구의 칩 두께(underformed chip thickness)는 다음과 같이 기술되었다.

$$tc(i, j) = f_c(i, j) + df_c^*(h, j) - df_c^* i, j \quad (1)$$

$$f_c(i, j) = f_c(i, j) / \sin \gamma(j) \quad (2)$$

$$df_c^*(h, j) = df^*(h, j) / \sin \gamma(j) \quad (3)$$

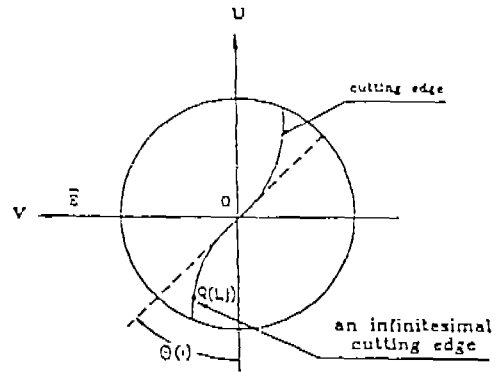
$$f_c(i, j) = fm \cdot \cos \eta \quad (5)$$

$$= fm \cdot E \cdot Q(i, j) / R$$

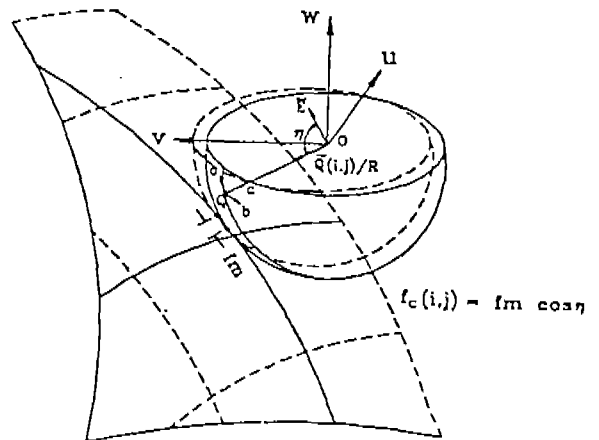
$$h = (\theta(i) + \theta_a(i, j)) / \Delta \theta(i)$$

$$\tan \theta_a(i, j) = fm \cdot \sin(\theta(i) - 90) / (R \cdot \sin \theta(i) - fm \cdot \cos(\theta(i) - 90))$$

여기서,  $tc(i, j)$ 는 임의 절삭날의 회전각  $\theta(i)$ 에서 위치각  $\theta(j)$ 에 있는 미소 절삭날에 걸리는 실제 칩의 두께이며, 식(5)의  $f_c(i, j)$ 는 이송에 의한 이론적인 칩 두께로 Fig.2에서 보듯이 이송방향 단위벡터 E와 미소 절삭날의 위치벡터 Q(i, j)로 표현된다. 또한,  $df(i, j)$  및  $df^*(h, j)$ 는 각각 현재 절삭날의 처짐 및 이전 절삭

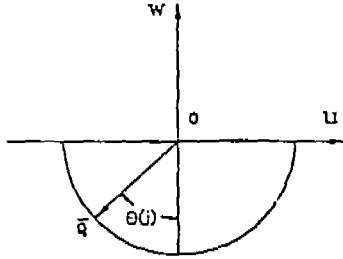


(a) Top view



(b) Perspective view

- $\theta(i)$  = rotation angle
- $G(i)$  = positional angle
- $f_m$  = feed per tooth
- $\bar{E}$  = unit vector of feed direction
- $\bar{q}$  = positional vector of an infinitesimal cutting edge
- $f_c(i,j)$  = feed acting on an infinitesimal cutting edge due to  $f_m$



(c) Side view

Fig.2 Feed at an infinitesimal cutting edge in the machining of free-form surface

날에서의 처짐으로 인한 칩 두께의 변화량을 표시한다.  $\gamma(j)$ 는 절삭날의 기하학적 형태에 따라 결정되는 것으로 Fig. 1에서 보여 주듯이  $j$ -번째 미소 절삭날에 대하여 절삭 속도와 칩 흐름 속도가 이루는 평면과 절삭 속도의 접 평면이 이루는 각이다. 식 (2), (3) 및 (4)의  $f_e(i, j)$ ,  $df_e(i, j)$ , 및  $df_e(h, j)$ 는 각 3차원 절삭으로 본 그 상당값에 해당된다.

(2) 절삭력 상수의 산출

절삭에 참여하는 각각의 미소 절삭날에 대하여 접선 방향과 법선방향의 절삭력을 결정하는 절삭력 상수값  $K_t$  및  $K_r$ 는 식(6) 및 식(7)에서의 같이 절삭 매개 변수들로 정의할 수 있다(11).

$$\Delta F_t = K_t \Delta A_{rca} \quad (6)$$

$$\Delta F_r = K_r \Delta F_c$$

$$K_t = \tau_s \cos(\beta - \alpha) / [\sin \beta \cos(\phi - \beta - \alpha)]$$

$$K_r = \tan(\beta - \alpha) \quad (7)$$

지난 연구(9)에서 HSS 공구에 대한 SM45C 공작물 가공의 경우, 공작물의 전단각( $\phi$ , 도)을 전단응력( $\tau_s$ , Kg/mm<sup>2</sup>) 및 마찰각( $\beta$ , 도)을 절삭속도( $V$ , m/min), 이송량( $f$ , m/tooth) 및 윗면 경사각( $\alpha$ , 도)의 함수로 표현되는 아래의 실험식을 얻을 수 있었다.

$$\phi = 106.7(V/f)^{0.5} + 3.75\alpha + 13.64$$

$$\tau_s = 1.586(V/f)^{-0.25} + 67.703$$

$$\beta = 48.4(V/f)^{2.123} + 28.586 + \alpha - \phi \quad (8)$$

만약 볼 앤드밀 공구의 임의 미소 절삭날이 갖는 절삭속도, 이송속도 및 윗면 경사각의 값을 알게 되면, 실험식(8)과 식(7)로부터 각각의 미소 절삭날에 걸리는 식(6)의 실험적인 상수값  $K_t$  및  $K_r$ 을 각각 산출할 수 있게 된다.

(3) 순간 절삭력의 계산

임의 절삭날의 회전각  $\theta(i)$ 에서  $j$ 번째의 미소 절삭날이 절삭에 참여하고 있다면, 이 미소 절삭날에 걸리는 접선방향과 법선방향의 미소 절삭력은 위에서 산출되는 해당 절삭력 상수로부터 식(6)을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta F_t(i,j) \\ \Delta F_r(i,j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ K_r(i,j) \end{bmatrix} [K_t(i,j) d_e(j) f_c(i,j)] \quad (9)$$

여기서  $d_e(j)$ 는  $j$ 번째 미소 절삭날에 걸리는 상당 절삭 폭으로 Fig. 1을 보면 미소 절삭날 OA에 대하여 아래와 같이 표현된다.

$$d_e(j) = OA \cos \gamma$$

$$d_e(j) = d_s(j) \sin \gamma(j) \quad (10)$$

Fig. 1에서 보여주고 있는 미소 절삭력을 u-v-w 좌표 계로 변환하면 미소 절삭날의 위치각  $\theta(j)$ , 절삭날의 회전각  $\theta(i)$  및 비틀림 각  $\theta_r(j)$ 로 다음의 매트릭스 변환 형태로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta F_u(i,j) \\ \Delta F_v(i,j) \\ \Delta F_w(i,j) \end{bmatrix} = [A][B][C][D] \begin{bmatrix} \Delta F_t(i,j) \\ \Delta F_r(i,j) \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서,

$$[A] = \begin{bmatrix} -\sin \theta(i) & \cos \theta(i) & 0 \\ -\cos \theta(i) & -\sin \theta(i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} -\sin \theta_r(j) & \cos \theta_r(j) & 0 \\ \cos \theta_r(j) & \sin \theta_r(j) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[C] = \begin{bmatrix} -\sin \theta(j) & 0 & \cos \theta(j) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta(j) & 0 & -\cos \theta(j) \end{bmatrix}$$

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & \cos \gamma(j) \\ 1 & 0 \\ 0 & \sin \gamma(j) \end{bmatrix}$$

$$[E] = \begin{bmatrix} 1 \\ K_c(i,j) \end{bmatrix}$$

식(9)을 이용하여 식(11)을 다시 쓰면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta F_u(i,j) \\ \Delta F_v(i,j) \\ \Delta F_w(i,j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_u(i,j) \\ T_v(i,j) \\ T_w(i,j) \end{bmatrix} tc(i,j) \quad (12)$$

여기서,

$$\begin{bmatrix} T_u(i,j) \\ T_v(i,j) \\ T_w(i,j) \end{bmatrix} = [A][B][C][D][E]K_c(i,j) d_c(j)$$

따라서, 임의 절삭날의 회전각  $\theta(i)$ 에서의 순간 절삭합력은 절삭에 참여하고 있는 모든 미소 절삭날에 대하여 식(12)의 미소 절삭력을 합하게 되면 아래와 같이 얻을 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} F_u &= \sum_j T_u(i,j) tc(i,j) \\ F_v &= \sum_j T_v(i,j) tc(i,j) \\ F_w &= \sum_j T_w(i,j) tc(i,j) \end{aligned} \quad (13)$$

자유곡면의 가공에 참여하고 있는 볼 엔드밀의 절삭날에서 어떤 미소 절삭날들이 순간 순간 절삭에 참여하고 있는지는 다음의 2.2절에서 서술되고 있다.

### 2.2 공구-공작물간의 접촉 부위 산출

가공오차의 발생이 주로 정삭 가공에서 나타나는 만큼 여기서는 일정 두께의 정삭 여유를 남겨둔 가공물로부터 공구-공작물간의 접촉부위를 산출하고, 본 접촉부위 정보로부터 회전중심 절삭날의 어떤 미소 절삭날들이 매순간 절삭에 참여하는지를 알게 된다.

어떤 곡면을 연속가공하고 있는 공구의 임의 미소 절삭날에서 절삭이 일어나기 위하여는 다음의 세 조건이 함께 만족되어야 한다. 첫째, 가공 위치에서 공구의 절삭날이 일정 두께의 정삭 여유면 이내에 포함되어야 한다. 둘째, 가공 위치에서 공구의 절삭날이 반경방향 절삭쪽에 포함되어야 한다. 셋째, 공구의 절삭날이 이송 방향의 전반부에 있어야 한다. 이는 진행 방향의 후반부에는 이미 공작물이 절삭되어 없어졌기 때문이다. 다음은 위의 조건들에 따른 접촉부위의 판별을 위한 각각의 판별식을 보여주고 있다.

#### (1) 정삭 여유면에 의한 접촉부위

Fig. 3을 보면 공구가 공작물상의 한점  $P_1$ 에서 접촉할 경우 정삭 여유면에 대하여  $P_1$  점을 포함한 앞으로 가공될 점  $P_2, P_3, \dots$ 의 단위 위치벡터들  $P$ 와 임의 미소 절삭날의 위치벡터  $Q$ 로부터 그 미소 절삭날의 접촉 여부를 아래와 같이 판별할 수 있다.

$$\begin{aligned} D_{int} &= R - |P||Q|\cos \eta \\ &= R - P \cdot Q \\ R - P \cdot Q &\leq \lambda \end{aligned} \quad (14)$$

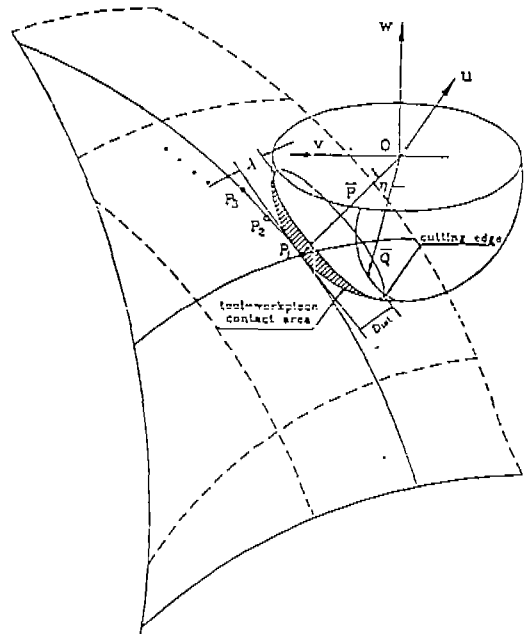


Fig. 3 Tool-workpiece contact area by the offset surface remained for finish cuts in the rough cutting

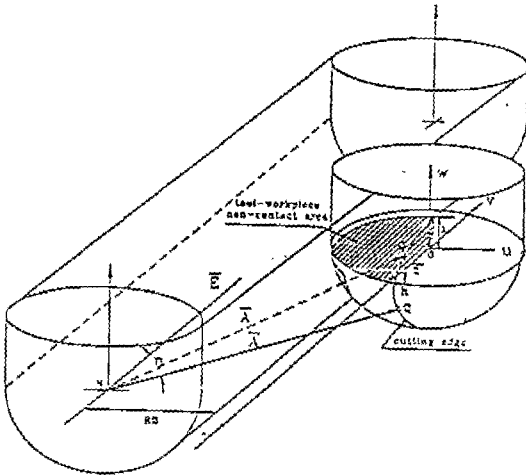


Fig. 4 Tool-workpiece contact area by the radial depth of cut

여기서  $D_{ist}$ 는 임의 미소 절삭날이 곡면에 이르는 최소 거리에 해당한다. 따라서, 식(14)을 만족하는 임의 미소 절삭날은 절삭에 참여할 수 있다.

(2) 절삭쪽에 의한 접촉부위

Fig. 4를 보면 공구의 현 가공 위치로부터 가장 근접한 이전 가공경로중의 한점 N과 그때의 이송방향 단위 벡터 E를 알면, 점 N으로부터 현재 공구의 임의 미소 절삭날의 위치벡터 A와 더불어 아래와 같이 구면부위 및 원통부위의 미소 절삭날들에 대하여 절삭쪽에 의한 접촉 여부를 알 수 있게 된다.

$$\begin{aligned}
 |A| \sin \eta &\geq RD \\
 |A \times E| &\geq RD && \text{구면 부위} \\
 |(A+Z) \times E| &\geq RD && \text{원통 부위} \quad (15)
 \end{aligned}$$

여기서, RD는 반경방향 절입폭이고  $\eta$ 는 벡터 A와 E간의 사이각이다.

따라서, 식(15)을 만족하는 임의 미소 절삭날은 절삭에 참여할 수 있다.

(3) 이송방향에 의한 접촉부위

Fig. 5를 보면 현재의 이송방향 단위벡터 E와 미소 절삭날의 위치벡터 Q로부터 아래의 조건으로 그 미소 절삭날이 진행방향의 전반부 또는 후반부에 위치하는가를 판별할 수 있다.

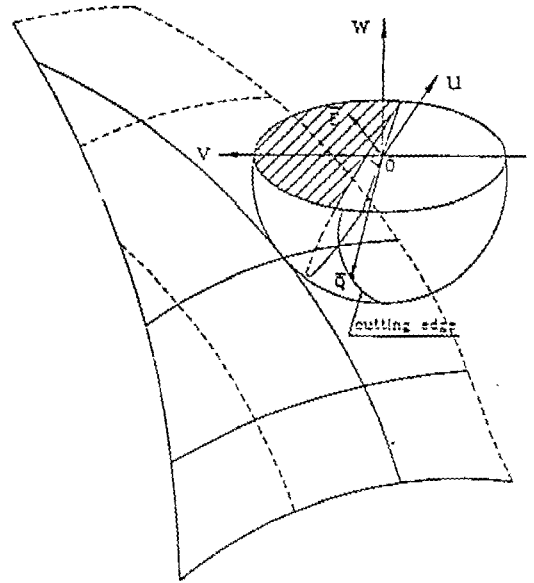


Fig. 5 Tool-workpiece contact area by the direction of feed

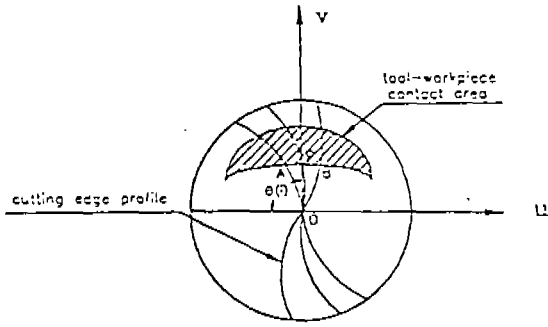
$$E \cdot Q \geq 0 \quad (16)$$

따라서, 식(16)을 만족하는 임의 미소 절삭날은 절삭에 참여할 수 있게 된다.

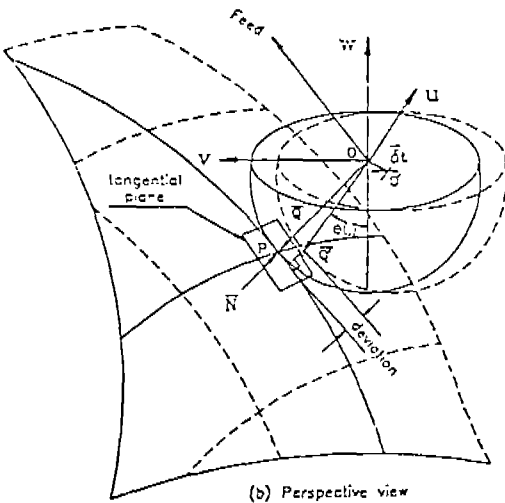
2.3 가공오차 예측모델

공작물의 처짐이 무시될 수 있는 공작물의 가공에 있어서 그 가공면에 발견되는 가공오차는 일반적으로 공구의 처짐에 기인한다. 곡면 가공에 있어서 공구의 처짐량과 그 처짐형태로 절삭날의 한 회전중에서 다양하게 변하는데, 특히 가공해야 될 곡면위의 공구-곡면간의 접촉면에서 일어나는 공구의 처짐은 그 절삭날로 하여금 가공되어야 될 곡면을 어떤 편차(deviaion)를 가지고 지나가게 만든다. 그리고, 그 편차는 곧 가공오차로 그 곡면위에 나타나게 된다.

Fig. 6에서와 같이 유연 볼 엔드밀이 자유 곡면위의 한점 P를 가공해야 할 경우, 가공오차  $E_n$ 는 절삭에 참여하는 미소 절삭날들이 그리는 궤적들과 곡면위의 한점 P에서의 접평면이 만드는 편차들중의 그 최소값으로 정의할 수 있다. Fig. 6(b)를 보면, 절삭날의 회전 위치  $\theta(i)$ 에서 처짐으로 인한 공구의 중심이  $O'$ 에 존재하고 임의 미소 절삭날의 궤적이  $Q'$  점을 지나고 있다면, 이때 이 미소 절삭날이 가지는 편차는 그 궤적의



(a) Top view



(b) Perspective view

- O = center of undeflected cutter
- O' = center of deflected cutter
- v = positional vector of an infinitesimal cutting edge on the undeflected cutter
- v' = positional vector of an infinitesimal cutting edge on the deflected cutter

Fig.6 The generation of machining error on the free-form surface

$$D_{,uu} = R - |N||Q'| \cos / Q'OP$$

$$= R + N \cdot Q' \tag{17}$$

$$Q' = Q + \delta_i \tag{18}$$

위치로부터 접평면에 이르는 수직 거리이며 다음과 같이 얻어진다.

여기서,

$$D_{ist} = \text{수직거리}$$

O, O' = 치점이 일어나기 전과 후의 공구의 중심위치

Q = 치점이 일어나기 전의 임의 미소 절삭날의 위치벡터

Q' = 치점이 일어난 후의 임의 미소 절삭날의 위치벡터

$\delta_i$  = uv 평면에서의 공구의 치짐벡터

N = 공작물 위의 P점에서 법선단위벡터

따라서, 절삭에 참여하는 각각의 미소 절삭날의 궤적과 접평면이 만드는 편차들은 각각의 수직 거리들로 다음의 집합으로 볼 수 있다.

집합 A = {Dist (1), Dist (2), ... 절삭에 참여되는 모든  $\theta(i)$  및  $\theta(j)$ 에 대하여}

가공오차는 위 집합 A의 요소값중 최소값으로 결정되며, 식(17)으로부터 다음과 같이 정의한다.

$E_n$  = 집합 A의 성분값중 최소값

$$= \text{Min.} [R + Q' \cdot N, \text{ 절삭에 참여되는 모든 } \theta(i) \text{ 및 } \theta(j) \text{에 대하여}]$$

식(13) 및 식(18)을 이용하여 식(19)에서 정의되는 가공오차 식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$E_n = \text{Min.} [R + (Q_u + Q_v J + Q_w K + (F_u I + F_v J) / k_{t1}) \cdot (N_u I + N_v J + N_w K), \text{ 절삭에 참여되는 모든 } \theta(i) \text{ 및 } \theta(j) \text{에 대하여}]$$

$$= \text{Min.} [R + (Q_u + F_u / K_{t1}) \cdot N_u + (Q_v + F_v / K_{t1}) \cdot N_v + Q_w \cdot N_w, \text{ 절삭에 참여되는 모든 } \theta(i) \text{ 및 } \theta(j) \text{에 대하여}] \tag{20}$$

여기서,  $K_{t1}$  공구의 끝에서 얻어지는 공구의 절삭력에 의한 탄성 계수로 외팔보 또는 단진 외팔보 (stepped cantilever beam) 이론을 적용하여 구해질 수 있다 (10). 회전중인 공구 절삭날의 궤적을 Fig. 6(a)에서 보면 그 가공오차를 결정하는 최소 편차는 P점 부근의 임의 회전위치 A 지점에서부터 B 지점 사이에서 일어날 수 있는데, 식(19)의 가공오차를 결정하는 정확한 지점을 알 수 없는 것은 공구-공작물간의 접촉부위의 다양한 변화로 인하여 회전중 공구의 치짐벡터가 일정하지 않기 때문이다.

### 3. 가공오차 제어를 위한 이송속도 결정

알절에서 언급되었듯이 가공오차를 결정하는 최소 거리는 가공지점 P점의 부근에서 일어나지만 다양하게 변하는 공구의 치짐 벡터로 인하여 정확한 회전 지점을 알기 어렵다. 따라서, 본 방법에서는 강성체 불 엔드밀

공구에 대한 절삭력 모델을 제시된 가공오차 예측 모델식에 적용하여 P 지점에서의 가공공차를 만족시키는 단위 낱당 기준 이송량을 먼저 결정한다. 그리고, 이 얻어진 기준 이송량으로부터 다시 유연 볼 엔드밀 공구에 대한 절삭력 모델을 적용하여 P점을 부근의 임의 회전 지점 A에서부터 B까지 발생하는 공구의 처짐벡터들을 구하여 실제 이 기준 이송량이 가져오는 가공오차를 검증하고 조정하게 된다.

3.1 기준 이송량의 결정

곡면위의 가공지점 P점을 지나는 절삭날의 회전각이  $\theta(i_c)$  라면, 이때의 예측되는 가공오차는 식(13)을 이용하여 식(20)을 다시 쓰면 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$E_s = R + (Q_v(i_c, j) + \sum_j T_u(i_c, j) tc(i_c, j) / K_{t1}) \cdot N_u \cdot (Q_c(i_c, j) + \sum_j T_v(i_c, j) tc(i_c, j) / K_{t1}) \cdot N_v + Q \cdot N_x \quad (21)$$

강성체 볼 엔드밀 공구에 있어서 칩 두께에 대한 공구처짐의 영향을 무시하면, 식(1)의 실제 칩의 두께  $tc(i_c, j)$ 는 이송에 의한 이론적인 칩 두께  $fc(i_c, j)$ 가 된다. 그리고, 식(2)과 식(5)을 이용하여 식(21)의 오차식을 낱당 이송량  $fm$ 의 선형 함수로 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$E_s = R + [Q_u(i_c, j) + fm(\sum_j T_u(i_c, j) (E \cdot Q(i_c, j)) / \sin \gamma(j)) / (R \cdot K_{t1})] \cdot N_u [Q_v(i_c, j) + fm(\sum_j T_v(i_c, j) (E \cdot Q(i_c, j)) / \sin \gamma(j)) / (R \cdot K_{t1})] \cdot N_v + Q_w \cdot N_w \quad (22)$$

따라서, 절삭날의 회전각  $\theta(i_c)$ 에서 곡면의 주어진 가공공차가  $M_t$ 라고 하면, 이를 만족시키는 기준 이송량  $f_r$ 는 식(22)을 이용하여 다음과 같이 구해진다.

$$M_t = \frac{\partial E_n}{\partial f_n} f_r$$

$$f_r = M_t \frac{\partial f_m}{\partial E_n}$$

$$= M_t / [G_u(i_c) \cdot N_u + G_v(i_c) \cdot N_v] \quad (23)$$

여기서,

$$G_u(i_c) = [\sum_j T_u(i_c, j) (E \cdot Q(i_c, j)) / \sin \gamma(j)] / (R \cdot K_{t1})$$

$$G_v(i_c) = [\sum_j T_v(i_c, j) (E \cdot Q(i_c, j)) / \sin \gamma(j)] / (R \cdot K_{t1})$$

위 식에서 절삭계수  $G_u$  및  $G_v$ 는 미소 절삭력  $T_u$  및  $T_v$ 의 계산을 위한 절삭력 상수값만 주어지면 상수가 된다. 따라서, 이때 절삭력 상수를 얻기 위하여 식(8)의 절삭 매개 변수를 결정하는 절삭속도, 이송량 및 윗면 경사각을 주게 되는데, 윗면 경사각은 측정 데이터를 주게 되고 절삭속도는 공구의 회전속도에서 얻어지는 값을 주며 이송량은 일반 가공범위 내에서의 임의 값을 선택하여 준다. 절삭력 상수의 산출을 위해 선택된 이송량은 구하고자 하는 기준 이송량과 다를 수 있으나, 그 이송량의 미소 차이가 절삭력 상수에 미치는 영향은 매우 적은 것으로 사려되었다<sup>(10)</sup>. 본 식(23)으로부터 얻어지는 기준 이송량은 절삭날이 곡면위의 가공 지점 P를 지날 때의 그 접촉점에서 일어나는 공구의 처짐 벡터만을 이용한 것으로, 실제 곡면에서의 가공오차 예측을 위한 기준값이 되며 보다 정확한 가공오차의 제어를 위해서 3.2절에서 언급되고 있듯이 조정을 받게 된다.

3.2 가공오차의 제어

일반적으로 곡면의 정삭가공을 위한 CL 데이터에 절삭 조건을 부여하는 것은 절삭속도가 공구 및 공작물의 재질에 따라 결정되는 것이 비하여 이송속도는 경험적으로 주어지며 또한 과대 과소 절삭의 방지를 위하여 필요 이상으로 작을 수가 있다.

이러한 정삭가공에 있어서 본 식(22)로부터 얻어지는 기준 이송량은 어떤 연속 가공경로 상에서 CL 데이터가 그리는 각각의 공구 이동 궤적들에 적용되어 주어진 곡면의 가공공차를 보장받을 수 있는 것으로 기대되어진다. 그러나, 처짐이 일어나기 쉬운 공구(slender or long ball-end mill)에 대해서는 본 기준 이송량은 보다 엄밀한 가공공차를 보장 받기 위해 유연 볼 엔드밀 절삭력 모델을 이용하여 다음의 검증 및 조정을 받게 된다. 먼저, 기준 이송량으로부터 얻어지는 유연 볼 엔드밀에서의 실제 칩 두께를 식(1)로부터 구한다<sup>(10)</sup>. 다음에는 얻어진 칩 두께로부터 식(13)의 절삭력을 구하고 식(19)의 일반 가공오차 모델식에 P점 부근의 A부터 B점의 위치각에 대한 공구 처짐벡터를 적용하여 실제 유연 볼 엔드밀 공구에 의한 가공오차를 예측한다. 만약, 그 예측 결과가 허용 가공공차를 벗어날 경우 초기에 주어진 기준 이송량을 미소량 조정하여 위의 방법으로부터 다시 검증을 받게 된다.

따라서, 검증이 된 이송량으로부터 공구의 회전속도가



Table 1 Adjusted feedrates and expected errors for the CL data in the test ball end mill : HSS  
workpiece : SM45C machining tolerance  $M_t = \pm 120 \mu\text{m}$

| CL DATA |        |         | Normal Vector at the surface |        |       | Feed $f_r$ (mm/tooth) [ $\theta_c$ , degree] |            | Adjusted feedrate $f_t \theta_a$ (mm/min) | Expected error $E_n$ ( $\mu\text{m}$ ) |
|---------|--------|---------|------------------------------|--------|-------|--|------------|---|--|
| X       | Y      | Z       | $N_u$                        | $N_v$  | $N_w$ | Reference                                    | Adjusted   |   |  |
|         | :      |         |                              | :      |       | :  |            | :   | :                                      |
|         | :      |         |                              | :      |       | :  |            | :   | :                                      |
| 0       | 4.512  | -0.791  | 0                            | 0.333  | 0.943 | 0.475[90]                                    | 0.250[81]  | 150                                       | 119                                    |
| 0       | 4.625  | -0.831  | 0                            | 0.340  | 0.940 | 0.482[90]                                    | 0.225[78]  | 135                                       | 119                                    |
| 0       | 4.851  | -0.915  | 0                            | 0.355  | 0.935 | 0.490[90]                                    | 0.212[74]  | 127                                       | 115                                    |
| 0       | 4.064  | -0.958  | 0                            | 0.362  | 0.932 | 0.505[90]                                    | 0.212[73]  | 127                                       | 115                                    |
|         | :      |         |                              | :      |       | :  |            | :   | :                                      |
|         | :      |         |                              | :      |       | :  |            | :   | :                                      |
| 0       | 26.823 | -15.492 | 0                            | -0.432 | 0.901 | 0.133[90]                                    | 0.250[126] | 150                                       | -76                                    |
| 0       | 26.895 | -15.457 | 0                            | -0.432 | 0.901 | 0.133[90]                                    | 0.250[126] | 150                                       | -80                                    |
| 0       | 26.965 | -15.423 | 0                            | -0.442 | 0.896 | 0  | 0.250[125] | 150                                       | -83                                    |
|         |        |         |                              |        |       | 133[90]                                      |            |   |  |
| 0       | 27.035 | -15.389 | 0                            | -0.448 | 0.894 | 0.129[90]                                    | 0.150[125] | 90  | -90                                    |
| 0       | 27.102 | -15.354 | 0                            | -0.453 | 0.891 | 0.126[90]                                    | 0.150[125] | 90  | -90                                    |
| 0       | 27.168 | -15.321 | 0                            | -0.459 | 0.888 | 0.126[90]                                    | 0.125[124] | 75  | -107                                   |
| 0       | 27.231 | -15.288 | 0                            | -0.464 | 0.885 | 0.126[90]                                    | 0.125[123] | 75  | -110                                   |
| 0       | 27.291 | -15.256 | 0                            | -0.470 | 0.882 | 0.122[90]                                    | 0.123[122] | 74  | -112                                   |
| 0       | 27.349 | -15.226 | 0                            | -0.476 | 0.879 | 0.120[90]                                    | 0.120[122] | 72  | -115                                   |
| 0       | 27.404 | -15.195 | 0                            | -0.481 | 0.876 | 0.120[90]                                    | 0.108[121] | 65  | -110                                   |
| 0       | 27.455 | -15.167 | 0                            | -0.487 | 0.873 | 0.121[90]                                    | 0.102[121] | 61  | -109                                   |
| 0       | 27.505 | -15.139 | 0                            | -0.493 | 0.869 | 0.117[90]                                    | 0.100[120] | 60  | -109                                   |
| 0       | 27.552 | -15.112 | 0                            | -0.499 | 0.866 | 0.115[90]                                    | 0.098[120] | 59  | -110                                   |
| 0       | 27.599 | -15.085 | 0                            | -0.505 | 0.863 | 0.115[90]                                    | 0.098[120] | 59  | -110                                   |
| 0       | 27.647 | -15.057 | 0                            | -0.511 | 0.859 | 0.116[90]                                    | 0.098[119] | 59  | -111                                   |
| 0       | 27.695 | -15.028 | 0                            | -0.517 | 0.856 | 0.113[90]                                    | 0.095[119] | 57  | -112                                   |
|         | :      |         |                              | :      |       | :  |            | :   | :                                      |
|         | :      |         |                              | :      |       | :  |            | :   | :                                      |
| 0       | 41.193 | -3.031  | 0                            | -0.566 | 0.825 | 0.106[90]                                    | 0.090[109] | 54  | -108                                   |
| 0       | 41.307 | -2.953  | 0                            | -0.561 | 0.828 | 0.106[90]                                    | 0.097[110] | 58  | -110                                   |
| 0       | 41.422 | -2.876  | 0                            | -0.556 | 0.831 | 0.105[90]                                    | 0.105[112] | 63  | -116                                   |
| 0       | 41.533 | -2.801  | 0                            | -0.551 | 0.834 | 0.108[90]                                    | 0.107[113] | 64  | -117                                   |
| 0       | 41.650 | -2.756  | 0                            | -0.546 | 0.838 | 0.110[90]                                    | 0.108[113] | 65  | -118                                   |
|         | :      |         |                              | :      |       | :  |            | :   | :                                      |
|         | :      |         |                              | :      |       | :  |            | :   | :                                      |

Machining conditions : RPM=300rev/min, no. of flute=2, ball radius=5mm, radial depth of cut=5mm, axial depth of cut( $\lambda$ )=2mm, length of cutter=50mm  $\theta_c$ : the rotation angle of cutting edge in the machining error prediction model surface :  $Z=8\cos(2\pi Y/50)-8$

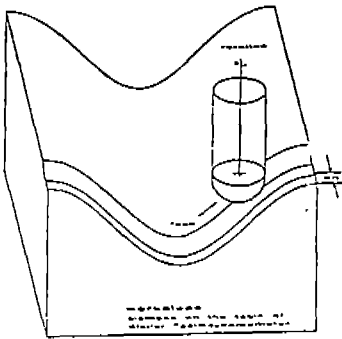
주어진면 다음과 같이 조정된 이송속도가 CL 데이터의 각 블록(block)들에 부여된다.

Table 1은 코사인 커브 형태의 2차원 곡면에 대한 본 절삭 실험에 적용된 절삭 조건들로부터 CL 데이터의 각 블록에서 얻어지는 기준 이송량, 조정된 이송속도 및 예상 가공오차를 보여 주고 있다.

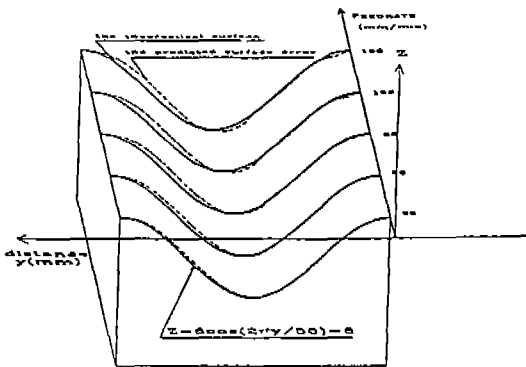
#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 실험

일반적인 곡면형상의 간단한 형태로 Fig. 7(a)에 나타내듯이 코사인 커브 형태의 2차원 곡면을 만들어 (주) 통일 수직 머시닝 센터(TONGNIL CNC TAPS)에서 볼 엔드밀링 작업을 하였다. 공작물의 재질은 SM45C이

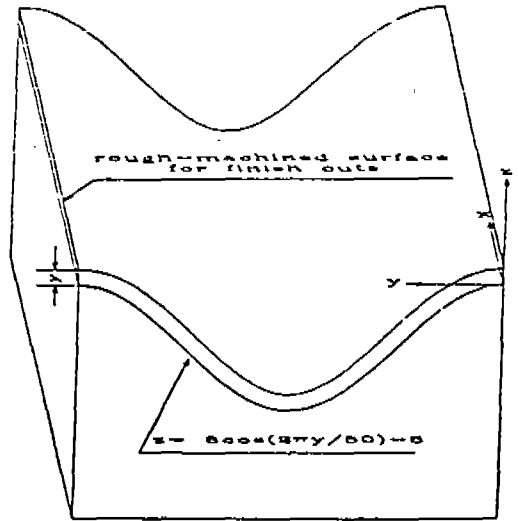


(a) The ball-end milling experiments

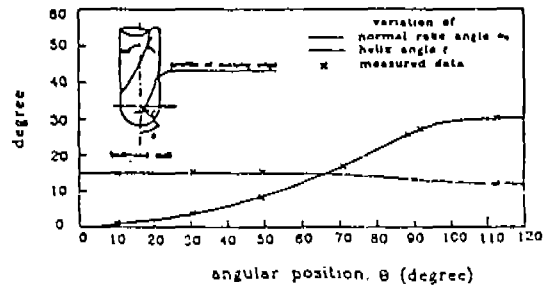


(b) Profiles of the predicted surface errors on the workpiece

Fig. 7 Graphic display of the ball-end milling in these experiments and the machining errors predicted on this workpiece



(a)



(b)

Fig. 8 The prepared workpiece and the geometry of cutting edge used in the experiments

고 사용한 공구는 (주)SOMTA 제품으로 2날의 HSS 재질이며 직경이 10mm이다. 볼 부위 절삭날의 비틀림 각 및 윗면 경사각은 Fig. 7(b)에서과 같이 측정되었으며, 1도씩 잘게 나누어진 미소 절삭날들을 절삭력 모델에 적용하여 각각의 회전각도에서 순간 절삭력을 구하도록 하였다. 공구의 끝 지점에서 공구의 상당 탄성계수는  $K_{el}$ 은 100kgf/mm로 측정되었다.

실험은 크게 식(20)의 가공오차 예측 모델식을 검증하기 위한 것과 식(24)의 조정된 이송속도에 의한 가공오차 제어를 확인하는 것으로 구분하였다. 본 가공오차 모델식을 검증하기 위하여 Fig. 8(a)에서와 같이 주어진 시편의 코사인 커브 형태의 2차원 곡면을 따라 임의의 절삭폭을 가지고 일정한 이송속도로 가공하여 그 가공면에서 측정된 가공오차를 예측 결과와 비교하였다. 이때

일정 이송속도는 30, 50, 80, 120 150mm/min로 각각 주어져 그 결과를 비교하고 있다. 조정된 이송속도에 의한 가공오차의 제어를 확인하기 위하여 주어진 시편의 코사인 커브를 따라 일정한 절삭폭을 가지고 식 (24)으로 얻어지는 조정된 이송속도로 가공하였다. 이때 조정된 이송속도는 곡면의 허용 가공공차  $\pm 50\mu\text{m}$ ,  $\pm 80\mu\text{m}$  및  $\pm 120\mu\text{m}$ 에 대하여 각각 구분되어 얻어졌으며 그에 따른 가공면에서의 측정된 가공오차를 예측 결과와 비교하고 있다.

모든 실험에서 절삭유는 사용하지 않았으며, 공구의 회전속도는 300rpm로 일정히 유지하였다. 반경방향 절입폭을 5mm로 주어졌으며, 준비된 시편은 Fig. 7(a)에서 보여 주고 있듯이 곡선을 따라 2mm의 일정한 정삭 여유 두께로 가지고 있다. 공구경로 생성시 허용공차는  $\pm 0.004\text{mm}$ 로 하였으며, 가공된 면에 대해 3차원 측정기 WEGU Messtechnik GmbH을 이용하여 레이저 스캐닝 한 데이터를 분석에 이용하였다.

4.2 결과 및 고찰

Fig. 9는 본 실험에서 선택된 가공 조건들에 대해 코사인 커브를 따라 변화하는 공구-공작물간의 접촉 부위를 앞 2.2절에서 제시된 산출법으로부터 얻어진 결과이다. 이를 검토하여 본 결과, 본 산출법은 비교적 정확하며 PC(Personal Computer) 수준에서 쉽게 적용할 수 있을 것으로 고려되었다.

Fig. 10은 이송속도를 30, 50, 80, 120 및 150mm/min로 각각 일정히 주어서 가공된 면의 측정결과를 예상 가공오차와 비교하고 있다. 본 제시된 가공오차 예측 모델식에 의하여 예측되는 가공오차가 곡면을 따라 크기나 그 형태에 있어서 측정 가공오차 값들에 매우 근접하고 있음을 보여 주고 있다. 특히, Fig. 10에서 가공경로를 따라 각각의 공구 궤적에서 절삭날이 한 회전중에 가지게 되는 순간 절삭력의 최대값을 함께 보여 주고 있는데, 그 변화 형태가 가공오차의 변화 형태와는 같지 않다. 이는 엔드밀에 의한 직선 가공에서와는 달리 곡면 가공에서는 가공오차가 최대 절삭력과 단순한 비례 관계가 아님을 보여 주는 것이며, 그 가공오차의 제어를 위하여 단순히 절삭력만을 목적 함수로 볼 수 없는 이유이기도 한 것이다.

Fig. 8(b)는 본 시편의 곡면 가공 실험에 대하여 예상되는 가공오차를 3차원적으로 보여 주고 있는데, 일정 이송속도에 대해서 곡면을 따라 그 가공오차의 크기

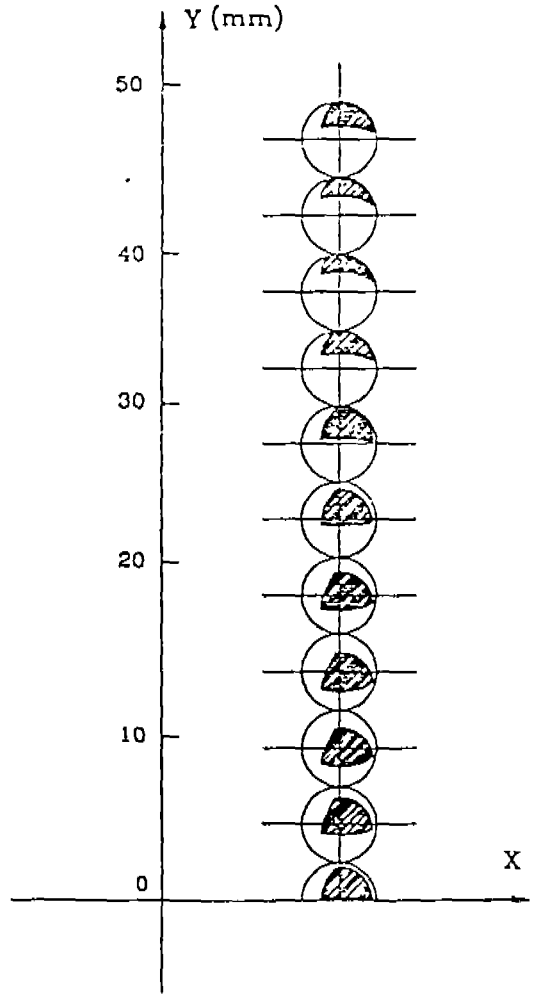


Fig. 9 The variations of tool-workpiece contact area in the machining of the cosine-curved surface (RD+5mm,  $\lambda=2\text{mm}$ )

가 변하고 있으며 이송속도의 증가에 따라 그 절대량도 증가하고 있다. 또한, 곡률이 연속적으로 변화하는 곡면의 중심부위에서는 과대 절삭이 그리고 상향 경사면을 따라 과소 절삭이 일어나기 쉬운 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 곡면의 주어진 가공공차  $50\mu\text{m}$ ,  $80\mu\text{m}$  및  $120\mu\text{m}$ 에 대하여 각각 제시된 방법으로부터 얻어지는 조정된 이송속도들에 의해서 가공된 공작물을 측정하여 얻은 가공오차를 예상되는 가공오차와 비교하고 있다. 이 실험에서 측정되어 얻어진 가공오차는 그 형상이나 크기에 있어서 예측치에 비교적 잘 부합하고 있으며 주

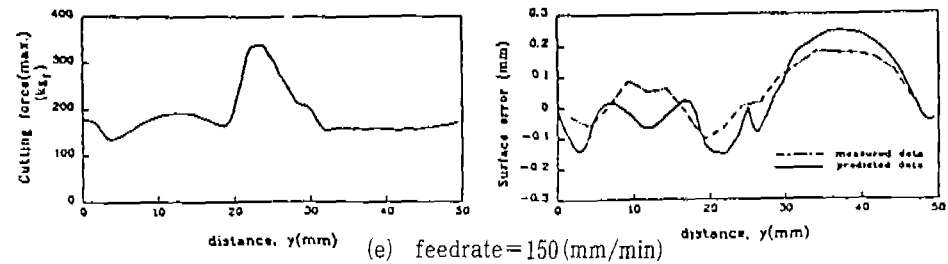
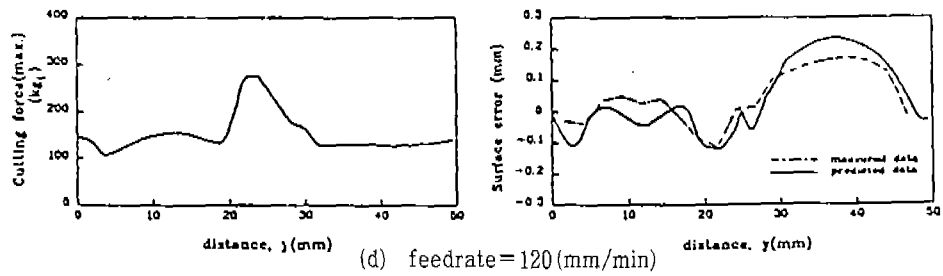
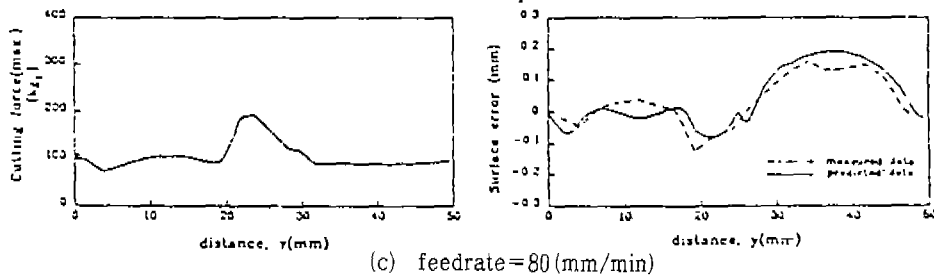
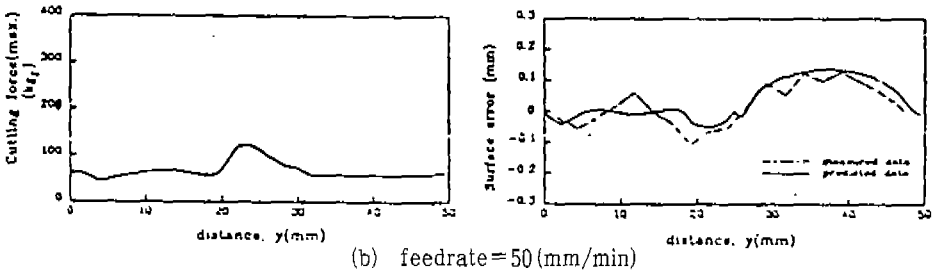
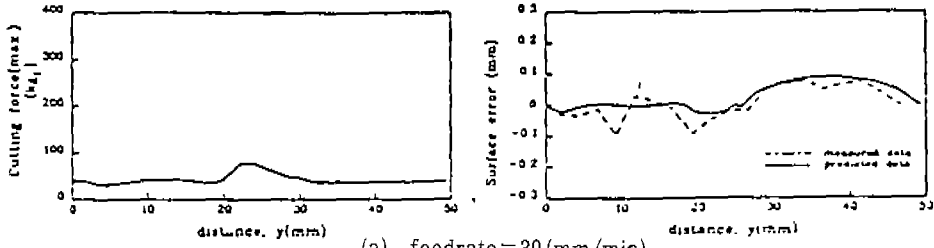
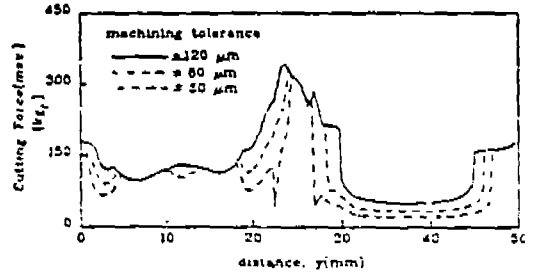
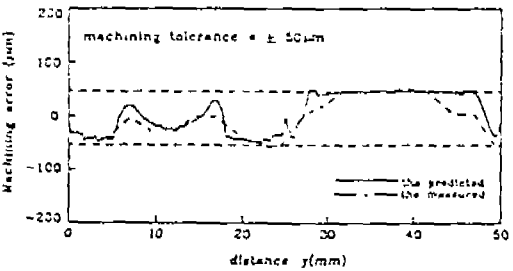
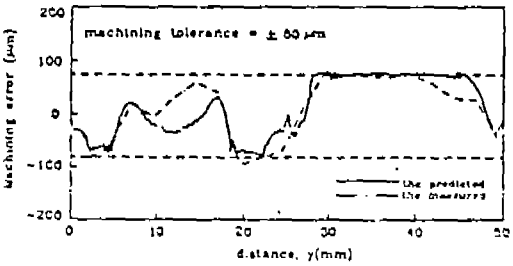
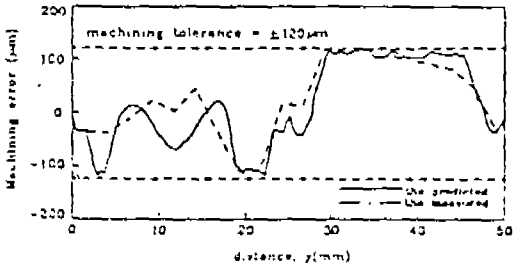
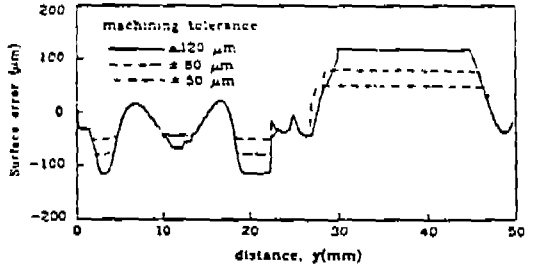


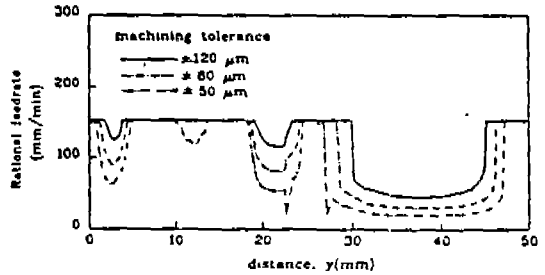
Fig.10 Comparisons of machining errors on the machined surface for various feedrates



(a) The variations of cutting force



(b) The predicted surface error



(c) The rational feedrates along the cutter path

Fig.11 The control of machining error by the adjusted feedrates for the given machining tolerance on the surface

어진 곡면의 가공오차를 만족시켜 주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 12는 식 (25)으로부터 얻어지는 조정된 이송속도와 그때 예측되는 가공오차 및 최대 절삭력의 변화를 나타내고 있다. Fig. 12(b) 및 Fig. 12(c)를 보면 본 조정된 이송속도가 그 곡면의 가공오차를 보장할 수 있는 최대의 이송속도임을 알 수 있다. 여기서, 곡선의 일부에서는 허용 가공 공차를 완전히 충족하지 않고 있는데, 이는 조정된 이송속도의 최고값을 제한하기 때문이다(본 실험에서는 150mm/min로 제한하고 있음). 식 (25)으로 주어지는 조정된 이송속도는 가공되고 있는 공작물 표면이 공구축과 수직이 될 경우 매우 큰 값이

Fig.12 The variation of cutting force, machining error and adjusted feedrate along the curven in the suggested method

될 수 있는데, 현실적으로 공구의 파손이나 공작물의 가공 동특성 및 가공 표면의 조도등을 고려하여 이를 제한하여야 한다.

Fig. 13은 일반 엔드밀링 공정에 적용되고 있는 이송속도의 한 조정 방법으로 공구의 축에 수직으로 걸리는 절삭력( $F_p$ )을 공구의 각 이동 궤적에서 일정히 유지하는 방법에서 주어지는 이송속도의 변화와 그때의 가공오차 형상을 시뮬레이션하여 보여 주고 있다. Fig. 12(b) 및 Fig. 13(b)의 가공오차 시뮬레이션 결과에서 보듯이

본 논문에서 제시하고 있는 방법에 의한 조정된 이송속도는 곡면 가공에 있어서의 가공오차를 보다 효과적으로 제어하고 있음을 알 수 있다. 특히 Fig. 14에서 보여주는 양방법간의 절삭시간 비교를 통하여 본 방법이 같은 가공공차의 공작물을 보다 효과적으로 수행하고 있음을 알 수 있다.

본 실험은 간단한 곡선의 2차원 곡면에 대하여 수행하였으나 3차원 곡면에 대하여 제시된 공구 공작물간의 접촉부위 산출법 및 가공오차 예측 모델식을 적용하는데

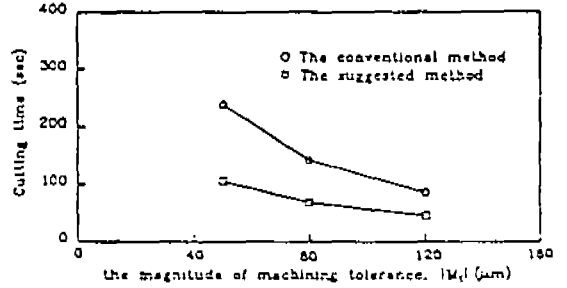


Fig. 14 The comparison of cutting times between two methods

어려움이 없을 것으로 본다. 또한, 공구경로간에 발생하는 스킵(scallop or cusp)에 의한 표면오차(surface error) 문제는 앞으로 자유 곡면의 정밀가공을 위하여 같이 연구되어야 할 것으로 본다.

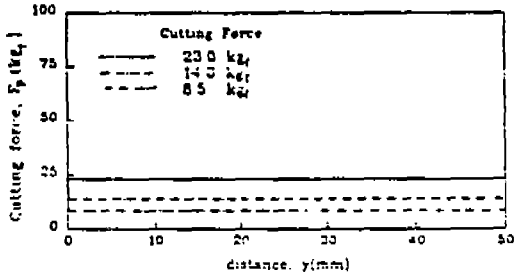
### 5. 결 론

본 연구는 유연 볼 엔드밀에서 발생하는 공구의 처짐에 의한 자유곡면 위의 가공오차에 대하여 공구의 처짐 벡터와 곡면의 공구 접촉점에서의 법선벡터로 표현되는 가공오차 예측 모델식을 유도하였다. 또한, 본 모델로부터 일정 두께의 정삭여유를 가진 자유곡면의 정삭가공에서의 가공오차 제어를 위한 이송속도 조정방법을 제시하고 있다. 이 이송속도는 기존의 공구에 발생하는 미소 절삭날의 한 회전중 일어나는 순간 절삭력들의 평균 또는 최대 절삭력이 아닌 곡면위의 가공오차를 제어함으로써 그 곡면에서 요구되는 가공공차를 보다 신뢰성 있게 만족시켜 주고 있다.

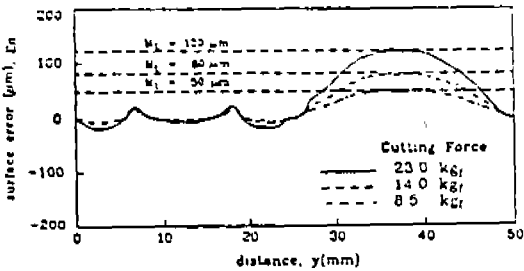
본 엔드밀링 작업에 있어서 본 이송속도의 조정방법은 정삭가공에서 일어날 수 있는 과대 또는 과소 절삭에 의한 가공오차의 방지 외에도 보다 짧은 절삭시간으로 그 곡면의 주어진 가공공차를 만족시킬 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

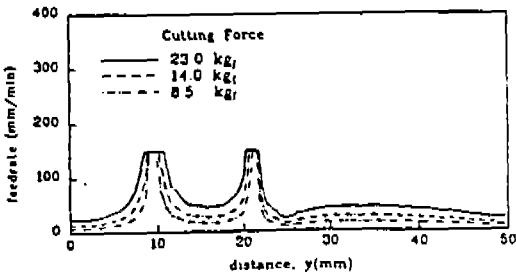
1. Vicker, G. W. and Quan, K. W., 1989, Feb., "Ball-Mills Versus End-Mills for Curved Surface Machining", ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 111, pp. 22~26.



(a) The variations of cutting force



(b) The variations of surface error



(c) The obtained feedrates along the cutter path

Fig. 13 The variation of cutting force, machining error and adjusted feedrate along the curve in the conventional method

2. Sutherland, J. W., DeVor, R. E., 1986, "An Improved Method for Cutting Force and Surface Error Prediction in Flexible End Milling System", ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 108, pp.269~279.
3. Kline, W. A., DeVor, R. E. and Shreef, I. A., 1982, Aug., "The Prediction of Surface Accuracy in Eng Milling", ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 104, pp.272~278.
4. Wang, W. P., 1988, "Solid Modeling for optimizing Metal Removal of Three-dimensional NC Eng Milling", J. of Manufact. Sys., Vol. 7, No. 1, pp.57~65.
5. Voelcker, H. B. and Hunt, W. A., 1981, "The Role of Solid Modeling in Machining-process Modeling and NC Verification", SAE Technical Paper Series 810195.
6. Hartiquist, E. E. and Sungurtekin, U. A., 1988, Sep., "Solid Modeller Based Automatic NC Verification", 4th Biennial Int. Machine Tool Technology Conference.
7. Devor, R. E., Kline, W. A and Zdeblick, W. J., 1980, "A mechanistic model for the force system in end milling with appliation to machining airframe structures, 8th North American Manufacturing Conference Proceedings, p.297.
8. Devor, R. E. and Sutherland, J. W, 1986, "An improved method for cutting force and surface error prediction in flexible and milling systems", J. Eng. for Ind., Vol. 108, p.269.
9. 박희덕, 양민양, 1989, "볼 엔드밀에 의한 곡면가공의 절삭력 예측에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제13권 제3호, pp.433~442.
10. 심충건, 양민양, 1991, "유연성이 있는 볼 엔드밀 공구의 처짐 모델과 절삭성에 대한 연구", 대한기계학회논문집, 제15권 제3호, p.1067~1082.
11. Geoffrey Boothroyd, 1975, Fundamentals of metal machining and machine tools, McGRAW-Hill, New York.