

# 정면밀링가공에서 인서트의 챔퍼각 변화에 의한 표면거칠기 향상

권원태\*, 이성세\*\*

## Improvement of the Surface Roughness by Changing Chamfered Angle of the Insert in Face Milling

Won Tae Kwon\*, Seong Sei Lee\*\*

### ABSTRACT

A milling process with 45 degree chamfered inserts produces a perfect flat surface only in theory. It is due to many unwanted factors including thermal effect, dynamic effect, the problem of the controller used and the problem of accuracy of the machine tool. In this study, introduced is a method to improve the surface roughness by redesigning of the chamfer angle of the insert, which traditionally has been 45 degree. First, the relationship between the fixed machine coordinate and the relative coordinate on the insert is derived. This transfer matrix is used to determine the new insert angle to maximize the flatness of the machined surface. A newly designed insert is manufactured, and used to carry out the experiment. It is proved that the insert designed by the proposed method produced a much flatter surface than a traditional one.

**Key Words** : Face milling (정면밀링), Chamfered insert (챔퍼된 인서트), Chamfer angle (챔퍼각), Surface roughness (표면거칠기), Coordinate transformation (좌표변환)

### 1. 서론

정면밀링은 우수한 표면을 만드는 가공방법으로 금속의 면가공에 널리 사용되고 있다. 표면거칠기는 공작물의 가공이 제대로 되었는지 판단하는 근거가 되며 공작기계의 상태나 공구의 상태도 알려주는 중요한 요소이다. 공작기계가 성능이 향상 되었음에도 불구하고 가공된 표면은 개선의 여지가 많은데 그 이유는 다음과 같다. 첫 번째는 공작기계의 열변형에 기인한 오차이고 두 번째는 공작기계 자체의 정밀도 문제이며 세 번째는 컨트롤러의 성능에 관련된 문제이고 마지막으로 기계진동에

의한 채터 같은 동역학적 문제에 의한 오차이다.

이 연구에서는 공작기계의 정밀도에 의한 오차를 보상하는 방법을 제시한다. 공작기계의 정밀도는 각 부품들의 정밀도와 부품들이 조립된 상태에서의 정밀도를 포함한다. 이와 같이 공작기계 정밀도 측면에서 표면거칠기를 해석하려는 연구도 활발히 진행되었다.

Gu<sup>(1)</sup>는 표면거칠기 예측모델에 이송방향과 그에 수직인 방향의 주축경사를 고려하였다. 절삭력으로

2000년 10월 27일 접수

\* 서울시립대학교 기계정보공학과

\*\* 서울시립대학교 기계정보공학과 대학원

부터 주축경사를 예측하는 방법도 제안되었는데 Li Zheng<sup>(2)</sup> 엔드밀에서 절삭력을 이용하여 주축경사를 계산하는 식을 제안하였다. 홍민성<sup>(3)</sup>은 선반작업에서 선반의 기하학적모델을 좌표변환을 통하여 나타내었고 Ploughing 현상이 표면형상에 미치는 영향을 고려하였다. Fu<sup>(4)</sup>는 절삭력 예측에서 공구각을 이용하여 새로운 인서트의 형상을 제안하였다. 이우영<sup>(5)</sup>은 정면밀링의 절삭력 예측과정에서 공구각을 정의하고 공구각을 이용하여 커터의 형상을 확립하여 더욱 개선된 절삭력 모델을 제시하였다.

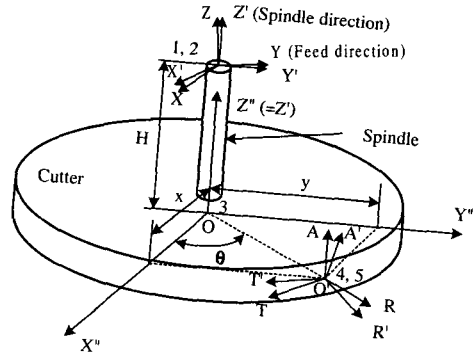
이들 연구는 표면거칠기를 모델링하고 제시된 모델에 따라 표면거칠기를 예측하고 실험을 통하여 모델을 검증하는데 주안점을 두었다. 표면거칠기에 관한 연구들은 표면거칠기에 영향을 주는 요소 중 주축경사에 관한 연구는 많이 진행되어 왔으나 커터자체의 기하학적형상에 대해서는 연구된 바가 없다. 커터의 표면거칠기에 직접적인 영향을 주는 커터의 기하학적 형상에 관한 연구는 위의 연구사례와 같이 절삭력 모델링에 관한 연구에 집중되었다. 또한 이 연구들은 커터, 인서트를 결합시키는 포켓, 인서트 등이 완벽하게 제작되었고 오차 없이 조립되었다는 가정에서 시작하였다. 하지만, 실제 제작과정이나 조립과정 그리고 사용자가 인서트를 커터에 결합시키는 과정에서 오차가 발생하고 누적되며, 누적된 오차는 표면거칠기의 증가로 나타난다.

이 논문에서는 정면밀링가공 중 45°의 챔퍼각을 갖는 인서트를 45°리드각을 갖는 커터에 장착하여 평면을 가공할 때 발생하는 표면조도를 줄이기 위하여 인서트의 챔퍼각을 바꾸는 방법을 제시하였다. 수정할 챔퍼각을 계산하기 위하여 정면밀링에서 기하학적 모델을 유도하였으며 이 모델을 바탕으로 평면가공을 위한 인서트의 챔퍼각을 계산하였다. 변화된 각도를 갖는 인서트가 같은 절삭조건에서 훨씬 더 좋은 평면을 생성한다는 것을 실험으로 증명하였다.

## 2. 정면밀링의 기하학적 형상 모델링

### 2.1 좌표계의 정의

기하학적인 모델링을 위해 Fig. 1에서 5개의 좌표계가 설정되었다. XYZ 좌표계는 이 논문에서 사용되는 공작기계의 3차원 기준 좌표계로서 1 점을 원점으로 하고 Y방향은 정면밀링가공 시 피드



- XYZ: Reference coordinate(origin: 1)
- X'Y'Z': Coordinate considering spindle tilt(origin: 2)
- X''Y''Z'': Coordinate in the center of the cutter (origin: 3)
- TRA: Coordinate at the tip of the insert (origin: 4)
- T'R'A': Coordinate after rotating tool angles about TRA coordinate (origin: 5)

Fig. 1 Coordinate on the machine tool

방향이다. X'Y'Z' 좌표계는 주축의 경사를 고려한 좌표계이며 X''Y''Z''좌표계는 커터의 중심점인 3점이 원점인 좌표계이다. 이 좌표계의 Z''방향은 공작기계의 주축방향이다. TRA 좌표계는 Fig. 1에서 커터의 원주상의 4점을 중심으로 하는 좌표계로 접선 방향을 T방향, 반경방향을 R방향으로 하고 그에 수직인 방향을 A방향으로 설정한 좌표계이다. T'R'A' 좌표계는 TRA 좌표계에서  $\gamma_L, \gamma_R, \gamma_A$ 만큼 회전한 좌표계로서 인서트의 방위를 결정한다. 여기서  $\gamma_L, \gamma_R, \gamma_A$ 는 각각 리드각, 반경방향경사각, 축방향 경사각을 나타낸다. T'R'A' 좌표계의 원점인 5점은 4점과 같은 위치에 있다. Fig.1에서 3점은 O점, 4, 5점은 O' 점으로 나타낸다. TRA 좌표계는 O점을 중심으로 하는 X'Y'Z' 좌표계에서  $\theta$  만큼의 회전이 동과 X방향으로 x, Y방향으로 y만큼 평행이동을 한 좌표계이다. TRA, T'R'A' 좌표계사이의 관계는 Fig. 2에 나타나 있다.

Fig. 1을 참고하여 공작기계의 XYZ 좌표계로부터 T'R'A' 좌표계까지 변환행렬을 작성하면 식(1)과 같다. 여기에서 H는 기준좌표에서 커터중심까지의 길이이고 N은 주축경사 행렬을 M은 커터

공구각 행렬로 각각 주축경사 모델링과 공구각 모델링을 통하여 구한 행렬이다.

$$N \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -H \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} M \quad (1)$$

## 2.2 정면밀링 커터의 모델링

### 2.2.1 공구각의 정의

공구각은 Fig. 2에 나타나 있다. 리드각( $\gamma_L$ )은  $T$ 축을 중심으로 회전한 각으로 세 공구각 중 공작물의 표면형상에 가장 큰 영향을 미친다. 리드각은 인서트면 위에서 정의되며 Fig. 2의  $I$ 축과  $A'$ 축이 인서트면 위에서 이루는 각이다.  $I$ 축은, 인서트면과  $TR$ 평면이 이루는 교선( $\overline{O'E}$ )을 법선벡터(normal vector)로 갖고면서  $O'$ 점을 지나는 평면과, 인서트면이 만나는 교선이다. 반경방향 공구각( $\gamma_R$ )은  $A$ 축을 중심으로 회전한 각으로 인서트면과  $TR$ 평면의 교선이  $R$ 축과 이루는 각이다. 축방향 공구각( $\gamma_A$ )은  $R$ 축을 중심으로 회전한 각으로 인서트면과  $TA$ 평면의 교선이  $A$ 축과 이루는 각이다.

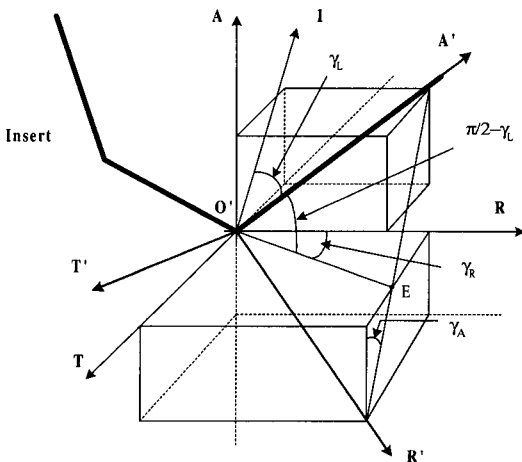


Fig. 2 The Relation between TRA and TR'A' coordinate (gl: lead angle, gr: radial rake angle, ga: axial rake angle)

### 2.2.2 TRA좌표계와 TR'A'좌표계의 관계

세 공구각이 모두 회전각이라고 이야기하였으나 그냥 세 개의 회전행렬을 곱하는 것은 옳지 않다. 회전행렬을 곱하는 것은 여러 가지 조합이 있으며 행렬을 곱하는 순서에 따라 최종결과가 달라지고 이로 인해 같은 공구각을 갖지 못하기 때문이다. 그러므로 인서트가 공구각에 의하여 기울어져 있는 인서트의 기하학적 형상을 고려하여 두 좌표계의 관계를 결정하는 행렬을 유도하는 것이 바람직하다. 기하학적인 형상을 고려하여 TRA좌표계와 TR'A' 좌표계의 관계를 유도하면 다음과 같다.

$$M^{-1} =$$

$$\begin{bmatrix} C_{YA}C_{YR} & S_{YA}C_{YR}S_{YL} - S_{YR}C_{YL} & S_{YA}C_{YR}C_{YL} + S_{YR}S_{YL} \\ C_{YA}S_{YR} & S_{YA}S_{YR}S_{YL} + C_{YR}C_{YL} & S_{YA}S_{YR}C_{YL} - C_{YR}S_{YL} \\ -S_{YA} & C_{YA}S_{YL} & C_{YA}C_{YL} \end{bmatrix}$$

where C, S stands for cos, sin respectively

(2)

식(2)의 행렬은 TR'A'축에서 T'축R'축A'축순서로 상대좌표계 좌표변환한 행렬이다. 챔퍼된 인서트(Chamfered insert)를 사용하는 경우 이론적으로 챔퍼면은 가공면과 평행이고 표면거칠기는 반경방향이나 축방향의 공구각에 영향을 받지 않는다.

## 2.3 주축경사의 모델링

주축경사는 표면조도에 가장 큰 영향을 미치는 요소로 모델링에 반드시 고려되어야 한다고 알려져 있다. 주축경사는 절삭 시 뒷날절삭을 방지하기 위하여 공작기계 제작 시에 고려되는 것 이외에 가공시 절삭력에 영향을 받거나 열변형에 의하여 발생할 수 있다. 표면조도에 가장 큰 영향을 미치는 주축경사는 측정이 가능하다.

Fig. 3과 같이 주축경사는 정면 밀링의 경우 이송방향( $R$ )과 그에 수직인 방향( $T$ )으로 나뉜다. 주축경사각  $a$ 와  $b$ 를 나타내기 위한 회전행렬을 구하기 위하여  $R$ 축을 중심으로 회전한 각을  $a'$ ,  $T$ 축을 중심으로 회전한 각을  $b'$ 라하고  $a'$ 와  $b'$ 를 사용하여 두 좌표계간의 변환행렬을 구하면 식(3)과 같다. 주축경사각과 회전각 사이의 관계를 구하기 위하여 T'R'A'좌표계의 단위벡터를 식(3)의 변환 행렬을 사용하여 TRA좌표계의 점으로 변환하

고 각각  $TA$ 와  $RA$  평면에 사영하였다. 식(4)는

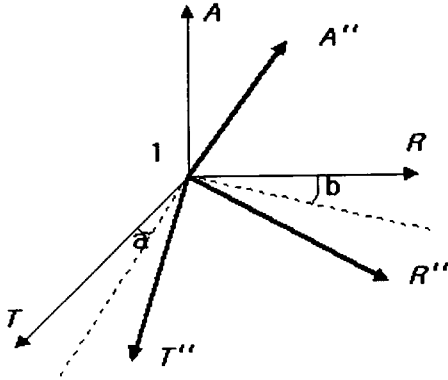


Fig. 3 Coordinate transformation considering spindle tilt

$$\begin{bmatrix} T'' \\ R'' \\ A'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ca' & Sa'Sb' & Sa'Cb' \\ 0 & Cb' & -Sb' \\ -Sa' & Ca'Sb' & Ca'Cb' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ R \\ A \end{bmatrix} \quad (3)$$

측정된 주축경사각  $a, b$ 와 회전각  $a', b'$ 사이의 관계식이다.  $N$ 행렬은 주축의 원래 좌표계와 주축경사각 만큼 기울어진 후 좌표계와의 관계를 나타낸다.

where  $\tan a' = -\tan a$ ,

$$\tan b' = \frac{\tan b}{\cos a'} \quad (4)$$

$a'$  = rotation angle about R  
 $b'$  = rotation angle about T

### 3. 표면조도개선을 위한 새로운 챔퍼각의 계산

이론식에 의하면 챔퍼된 공구를 커터에 장착하여 평면을 가공할 때, 가공된 표면은 완전한 평면이 되어야 한다. 하지만 실제 가공면의 표면은 평면이 아닌데 이것은 각 부품의 가공오차, 조립시의 조립오차, 인서트의 장착 오차 등에 기인한다. 이미 제작된 공작기계에서 이러한 오차를 제거하는 것은

어렵다. 하지만, 시험적으로 평면을 가공하고 표면 거칠기의 형상을 측정 후 오차를 보정하는 챔퍼각을 갖는 인서트를 설계할 수 있다. 다음은 오차를 보정하는 챔퍼각을 갖는 인서트 설계방법이다.

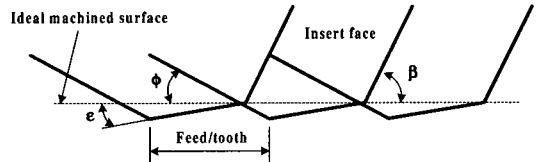


Fig. 4 Identification of the inclination angle of the insert from the machined surface

#### 3.1 표면각 $f$ 와 $\beta$ 의 정의

챔퍼된 인서트를 사용하여 가공한 표면은 커터에러, 주축경사에 의한 오차 등 여러 가지 원인 의하여 Fig. 4과 같은 형상을 보인다. 표면 거칠기로부터 유효 공구각을 계산하기 위하여 Fig. 4에서 보는 바와 같이 표면각  $f$ 와  $\beta$ 를 설정하였다. Fig. 4에서 도시된 각  $f$ 와  $\beta$ 를 구함으로써 인서트가 평면에서 기울진 각도를 구할 수 있다. 하지만 실제 측정 시 인서트의 노우즈 반경 때문에 표면각의 측정이 불가능하므로 다른 방법이 사용되었다. 2mm 깊이로 절삭하다가 중간에 절삭을 중지하면 기울어진 단이 만들어지는데, 이 단의 기울기가  $\beta$ 이고  $f = \pi/2 - \beta$ 로 계산된다. 챔퍼각이  $p/4$ 인 경우  $f + e = p/4$ 의 관계가 성립한다.

#### 3.2 새로운 챔퍼각을 갖는 인서트의 설계

표면 조도를 향상시키기 위하여 이미 만들어진 공작기계를 수정하거나 처음부터 다시 설계 제작하는 것은 비경제적이다. 이를 극복하기 위하여 인서트의 형상을 재 설계하여 표면조도를 향상시키는 방법을 제시한다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 완전평면을 만들기 위해서는 직선  $\overline{PO}$ 가 인서트의 챔퍼된 모서리가 되고 이때 인서트가 갖는 챔퍼각은  $\angle PO'Q$ 가 된다. 이를 위하여 가상평면상의 점  $P$ 를  $T'R'A'$  좌표계 위의 점으로 변환하여 실제 인서트가 가져야 하는 각도를 구해보면 식 (5)와 같은 값을 얻을 수 있다.  $M'$  행렬은 주축경사 행렬과 공구각 행렬의 곱으로 점  $P$ 의 좌표계인  $x, y, z$  좌표계로부터

$T'R'A'$ 좌표계까지의 회전이동부이다.

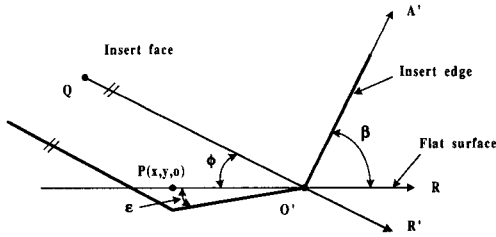


Fig. 5 Insert design for machining flat surface

$$\tan(\angle PO'Q) = \frac{b_{11}b_{32} - b_{12}b_{31}}{b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}} \quad (5)$$

where  $M' = NM = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{pmatrix}$   
 $\theta = 0$

#### 4. 실험 및 결과

새로운 챔퍼각을 갖는 인서트가 표면조도를 향상시켰는가를 확인하는 실험이 행하여 졌는데 첫 번째 실험은 주축의 경사각을 구하기 위한 실험이고 두 번째 실험은 그림 4의  $\epsilon$  와  $\beta$  각을 구하기 위한 실험이며 마지막 실험은 구해진  $\epsilon$  와  $\beta$  각을 바탕으로 새로운 챔퍼각을 가진 인서트를 설계하고 제작하여 평면을 가공한 실험이다.

##### 4.1 실험장치

실험은 두산기계 CNC 밀링머신(DSM-2V)에서 대한중석 M545SE05R-12B (리드각=45°, 축방향경사각=20°, 반경방향경사각=-6°, 직경=125mm)커터로 실행하였다. 인서트는 45° 챔퍼각을 갖는 대한중석 SEKN 1203AFN-J 인서트와 새로운 챔퍼각을 갖도록 이 인서트를 연삭한 것을 사용하였으며 시편은 Al6061T6를 사용하였다. 실험은 외날 절삭으로 행하였고, 실험 후 표면거칠기는 표면조도계(RankTaylor-Hobson사의 form telysurf series2)로 측정하였다. 실험절삭조건은 절삭속도 600rpm, 이송속도 400μ m/rev., 절삭깊이 2mm 이다.

##### 4.2 실험결과

##### 4.2.1 주축경사각 측정 실험

주축경사를 구하기 위해 다음과 같은 실험이 실행되었다. 우선 +x축 방향으로 공작물을 평면 가공하고 +z축 방향으로 절삭깊이(2mm)만큼 이송한 후, 공작물의 중간 정도까지 -x 방향으로 가공하였다. 첫 번째 가공면과 두 번째 가공면의 높이 차와 +z축 방향의 절삭깊이를 비교하여 그 차이를 계산하고 커터의 직경을고려하면 주축경사를 구할 수 있다. 실험결과 절삭깊이의 차이는 약 300μm로 경사각도는 0.15° 정도이며 따라서 실험에 사용된 CNC 밀링머신의 주축경사는 거의 무시할 정도로 작다는 것이 밝혀졌다.

##### 4.2.2 인서트 보정전후 표면거칠기 비교

주어진 절삭조건에서 인서트 보정없이 실험을 행하여 표면거칠기를 구하고 보정된 인서트를 이용하여 가공된 표면과 비교하였다. 보정된 인서트는 그림 6에 주어진 바와 같이 기존의 45° 각도에서 1.42° 정도 더 작은 각을 갖는다. 인서트 보정 전후의 표면거칠기를 표면조도계로 측정한 결과가 그림 7에 주어졌다. 이 그림에서 보정 후의 인서트로 가공한 표면의 조도가 보정하지 않은 인서트로 가공한 표면의 조도에 비하여 상당히 개선되었음을 알 수 있다. 이 사실은 실제로 가공된 공작물의 표면을 비교할 때, 눈으로도 확연히 알 수 있을 정도로 표면거칠기가 개선되었다. 제시된 방법으로 생산성이 어느정도 향상되었는지 확인하기 위하여 여러 가지 이송속도하에서 실험하였고 그 결과가 그림 7에 주어졌다. 각 이송속도에서 실험은 3번씩 행하여 졌고 그 평균값이 도시되었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 모든 이송속도에서 표면거칠기가 향상되었다. 이론적으로는 보정후 표면거칠기값이 0이 되어야 하지만, 실제적으로는 이송속도에 선형적으로

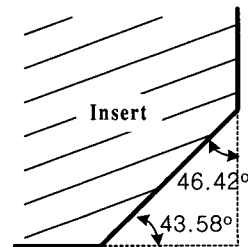


Fig. 6 Newly designed and manufactured insert

증가하는 값을 얻었는데 이는 인서트 가공시의 정밀도 문제와 실제 절삭할 때의 z방향 절삭력에 의한 공구의 변형에 기인한 것으로 추정된다.

### 5. 결론

1) 정면밀링에서 챔퍼된 인서트를 이용하여 평면을 가공할 때, 기준좌표와 인서트 끝단좌표와의 관계를 해석적으로 나타내었다.

2) 인서트 경사면에서 공구각으로 회전하기 전 좌표와 회전 후의 좌표의 관계를 나타내었다.

3) 챔퍼된 인서트로 가공된 표면을 분석하여 좀더 완벽한 표면을 만들기 위한 인서트 설계방법을 제시하였다.

4) 설계된 인서트를 제작하여 표면을 절삭을 실행하여 새로운 인서트로 가공된 표면이 나온 표면을 만드는 것을 확인하였다.

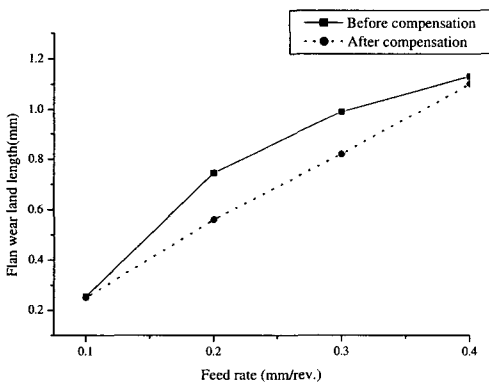


Fig. 7 Comparison of the machined surface roughness before and after the insert chamfer angle compensation

### 참고문헌

1. F. Gu, S.N. Melkote, S.G. Kapoor, and R.E. DeVor, "A Model for the Prediction of Surface Flatness in Face Milling," J. of Manufacturing Science and Eng., Transactions of the ASME, Vol. 119, pp. 476-484, 1997.

2. Li Zheng and S.Y. Liang, "Identification of Cutter Axis Tilt in End Milling," J. of Manufacturing Science and Eng., Transactions of the ASME, Vol. 119, pp. 178-185, 1997.

3. 홍민성, 염철만, "선반작업에서 Ploughing Mechanism을 고려한 표면거칠기에 관한 연구," 99년도 추계학술대회 논문집, 한국 공작기계학회, pp. 251-256, 1999.

4. H.J. Fu, R.E. Devor, S.G. Kapoor, "Mechanistic Model for the Prediction of the Force System in Face Milling Operations," J. of Eng. for Ind., Vol. 106, pp. 81-88, 1984.

5. 이우영, "정면밀링의 절삭성 향상을 위한 밀링커터의 설계에 관한 연구," 공학박사학위 논문, 서울대학교 대학원, pp. 20-50, 1990.

6. 이기용, 강명창, 김정석, "엔드밀 가공시 동적 절삭력 모델에 의한 절삭력 및 표면형상 예측," 한국 정밀공학회지 제14권, 4호, pp. 38-45, 1997.

7. 백대균, 고태조, 김희술, "정면밀링 가공에서 표면조도 모델 개발," 한국 정밀공학회지 제12권, 12호, pp. 149-156, 1995.

8. 박희재, 이석원, 권혁동, "머시닝센터 열변형 측정 및 실시간 보정시스템 개발," 한국 정밀공학회지 추계학술대회 논문집, pp. 231-234, 1999.