

## 볼엔드밀 가공의 칩두께 모델 해석

심기중\*, 문상돈<sup>+</sup>

(논문접수일 2005. 11. 22, 심사완료일 2006. 1. 12)

### Analysis of Chip Thickness Model in Ball-end Milling

Ki-Joung Sim\*, Sang-Don Mun<sup>+</sup>

#### Abstract

This paper describes a analysis on the chip thickness model required for cutting force simulation in ball-end milling. In milling, cutting forces are obtained by multiplying chip area to specific cutting forces in each cutting instance. Specific cutting forces are one of the important factors for cutting force predication and have unique value according to workpiece materials. Chip area in two dimensional cutting is simply calculated using depth of cut and feed, but not simply obtained in three dimensional cutting such as milling due to complex cutting mechanics. In ball-end milling, machining is almost performed in the ball part of the cutter and tool radius is varied along contact point of the cutter and workpiece. In result, the cutting speed and the effective helix angle are changed according to length from the tool tip. In this study, for chip thickness model analysis, tool and chip geometry are analyzed and then the definition of chip thickness and estimation method are described. The resulted of analysis are verified by compared with geometrical simulation and other research. The proposed chip thickness model is more precise.

**Key Words** : chip thickness(칩두께), chip area(칩단면적), helix angle(나선각), depth of cut(절삭깊이), cutting force(절삭력), specific cutting force(비절삭력)

## 1. 서론

엔드밀 가공은 절삭가공 분야에서 가장 광범위하게 사용되는 방법이다. 특히, 볼엔드밀은 경로생성 및 가공시간의 이점으로 곡면가공에서 주로 사용된다. 다양한 소비자 요

구를 충족시키기 위한 곡면가공 수요의 증가는 복잡한 3D 형상의 설계와 가공이 가능한 컴퓨터 성능, CAD/CAM 소프트웨어 및 공작기계 제작기술의 발전을 가져왔다. 자동차, 전기, 전자 산업의 프레스, 사출금형 가공, 항공기 터빈블레이드, 임펠러 가공 등은 볼엔드밀이 이용되는 전형적인 예

\* 전북대학교 기계공학과

<sup>+</sup> 교신저자, 국립익산대학 산업설비제어과 (msd11@iksan.ac.kr)  
주소: 570-752 전북 익산시 마동 194-5

로, 생산성 향상과 정밀한 가공기술의 개발을 위한 연구가 진행되고 있다. 또한 공작기계와 상용 소프트웨어들이 가공현장의 요구를 충족시키기 위하여 고속, 정밀가공이 가능하도록 만들어지고 있다. 궁극적인 가공의 목적을 달성하기 위하여 절삭력, 공구변형, 형상오차, 공구마모 및 파손에 대한 많은 연구결과와 예측모델이 제시되고 있으며, 이들의 연구는 가공 전 절삭상태의 예측을 통하여 실제 가공에서 발생할 수 있는 이상 가공상태를 미연에 방지하고자 하는 것이다. 엔드밀 가공에 대한 많은 해석적 연구들이 절삭력 모델을 기초로 이루어지고 있으며, 절삭력 모델은 비절삭저항(절삭파라미터)과 칩두께의 함수로 표현되어 가공물, 공구, 절삭조건 및 가공방법에 따른 칩두께 계산은 필수적인 하나의 요소가 된다.

엔드밀 가공에서 칩두께의 해석은 Martellotti<sup>(1)</sup>의 연구를 바탕으로 원주밀링에서의 칩두께 계산 이론식을 단순화하여 사용한다. 엔드밀 가공경로는 공구의 회전과 이송운동에 의하여 트로코이드(trochoid) 경로를 가지나 회전속도가 이송 속도에 비하여 크기 때문에 원형경로로 단순화 한다. 또한 나선을 따라 분포하는 절삭날을 미소한 날로 절단하고 각각의 절단된 날에서 2차원 절삭이론을 따른다고 가정한다. 엔드밀 가공에서 칩두께 계산 모델은 비교적 계산이 간단한 평균 칩두께를 이용하는 경우와 회전위치각에 따른 순간 미소절연의 칩두께를 이용하여 계산하기도 한다. Feng<sup>(2-4)</sup> 등은 초기 연구에서 순간 칩두께를 계산하는데 Martellotti의 이론을 바탕으로 다음의 간단한 근사식을 사용하였다.

$$t_i(\theta, z) = f \sin \theta_i(\theta, z) \quad (1)$$

식 (1)은 런아웃 및 공구변형 등 칩두께에 영향을 주는 요소들을 고려하지 않고 원형의 공구경로를 사용하는 이상적인 상향밀링 가공의 칩두께를 계산하는 간단한 이론식이다. 또한 Feng 등은 식 (1)을 Kline<sup>(5)</sup>의 연구를 바탕으로 공구 런아웃을 고려한 칩두께 모델을 개발하여 절삭력 예측에 이용하였다. Yang<sup>(6)</sup>의 연구에서는 절인상의 임의의 점에서 절삭속도 벡터와 칩 속도벡터가 이루는 평면에서 볼랜드밀의 절삭기하학의 해석을 기초하였고, 2차원 선삭실험으로부터 절삭변수를 얻었다. Yucesan<sup>(7)</sup>의 연구에서는 기계학적 모델을 이용하여 절삭력을 예측하는 모델을 개발하였으며, 칩두께를 칩의 접촉길이로 가정하여 식 (1)과 유사하게 날의 회전각과 지연각의 함수로 칩두께를 계산하였다. Altintas<sup>(8)</sup>의 연구에서는 칩두께 계산에 페이스 밀링의 칩두께 계산모델을 볼랜드밀에 적절하게 수정 사용하였고 공구변형과 런

아웃을 고려하였다.

본 연구에서는 기존 연구들을 바탕으로 볼랜드밀 가공에서 공구변형, 수직방향 이송 및 치수효과 등 칩두께에 영향을 미치는 요소를 포함하는 좀더 정밀한 칩두께 계산모델을 제시하고자 한다. 또한 기존 모델과 제시된 모델의 계산 결과를 비교 검토하였고, 솔리드모델의 불린연산(boolean operation)을 이용하여 기하학적으로 제시된 모델의 타당성을 검증하였다.

## 2. 엔드밀가공 절삭기구

### 2.1 공구의 표현

최근 개발된 엔드밀 공구의 절삭능력과 정밀도는 가공 시 발생하는 고온의 절삭온도에서 오랜 공구수명을 보장할 수 있고, 코팅기술과 날의 정밀도는 고속, 고정밀 가공에 우수한 성능을 보이고 있다. Fig. 1은 엔드밀 공구의 기하학적 형상을 보여주고 있다.

Fig. 1에서 표현된 치수와 각은 엔드밀 형상을 표현하기 위한 변수로 볼랜드밀은 다음과 같이 표현하게 된다.

$D \neq 0$  : 공구직경

$R = R_z = D/2$  : 공구정점(O)부터 R중심의 수직거리

$R_r = 0$  : 공구축부터 R중심의 수평거리

$\alpha = \beta = 0$  : 절삭날부의 경사(테이퍼)각도

$h \neq 0$  : 날부의 길이

볼랜드밀 공구의 절삭날은 실린더부와 반구부로 나누어진 다. 실린더부의 절삭날은 일정한 나선각(helix angle)을 유지 하면서 배치되어 있지만 반구부에서 날은 성능을 유지하기

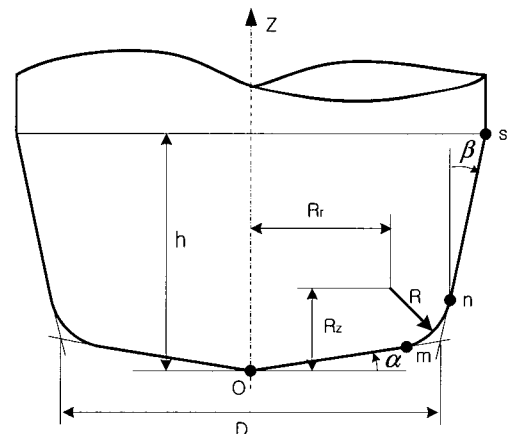


Fig. 1 General tool geometry of the end mill

위하여 국부적인 나선각이 날의 위치에 따라 변하게 된다. 최근에는 사용목적에 따라 나선각을 변형하여 제작하기도 하는데 보통 강 of 절삭에는 거의 일직선의 날을, 극한 절삭조건에서는 높은 나선각을 갖도록 형상을 설계하고 있다.

볼엔드밀의 절삭기구 및 좌표축 시스템 정의를 Fig. 2에 나타내었다. 볼엔드밀 가공은 대부분 반구부 절삭날에 의해 이루어지고 최종 가공면이 공구 정점 부근의 절삭날에 의하여 생성되는 경우가 많다. 또한 가공방법에 따라 공구와 가공물의 접촉위치가 변하게 되고 이는 공구의 유효반경, 절삭속도, 국부나선각, 공구경사각 및 여유각 등 절삭변수를 변하게 한다.

볼엔드밀 가공에서 절삭속도는 보통 접촉 절삭날의 선속도로 표현되는데 이는 스핀들 회전수와 공구직경의 함수이다. 따라서, 반구부에서 절삭속도는 공구의 직경변화에 따라 외경부위에서 최대값을, 공구 정점부에서 “0”이 되어 이송속도만으로 가공이 이루어진다. 이러한 절삭특성은 바람직하지 않으므로 가공방법 선택 시 고려해야만 한다.

반구부에서 국부나선각의 변화는 식 (2)와 같이 표현되며, 공구정점에서 “0”을, 실린더부와 접하는 위치에서 최대값을 갖게 된다.

$$\tan\beta(z) = \frac{R(z)}{R_0} \tan\beta_0 \quad (2)$$

- 여기서,  $R(z)$ : 공구정점에서 높이  $z$ 에서 공구반경
- $R_0$  : 공구반경
- $\beta_0$  : 실린더부와 반구부가 만나는 위치의 나선각

공구의 정점으로 부터 높이  $z$ 에 따른 미소 절삭날의 유효

공구반경은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$R(z) = \sqrt{2R_0z - z^2}, \quad 0 \leq z \leq R_0 \quad (3)$$

위 식 (2), (3)으로부터 공구정점( $z=0$ )에서  $R(z)=0$ 으로 국부 나선각이 “0”이 됨을 알 수 있다. 절삭날은 나선각이 “0”인 공구 정점부에서 가공을 시작하여 공구의 회전과 함께 날이 가공물을 따라 미끄러져 올라가면서 가공이 이루어진다. 따라서 칩두께의 계산을 위해서는 절단된 미소날의 회전위치각을 표현할 수 있어야 한다. Fig. 2에서 현재의 미소 절삭날(P)의 위치표시에는 축방향 위치각( $\phi$ )과 회전방향 위치각( $\theta$ )이 필요하다. 미소 절삭날에 의해서 생성되는 가공점의 회전위치각은  $N_f$ 개의 날을 가진 공구의  $i$ 번 날에서 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\theta_i(\theta, z) = \theta - \frac{z}{R_0} \tan\beta_0 - (i-1) \frac{2\pi}{N_f} \quad (4)$$

위 식에서  $\theta$ 는 절삭날의 기준위치(y축방향)로부터 측정된 공구회전각,  $\frac{z}{R_0} \tan\beta_0$ 는 높이  $z$ 에 따른 절삭날의 지연을 나타낸다.

## 2.2 공구변형

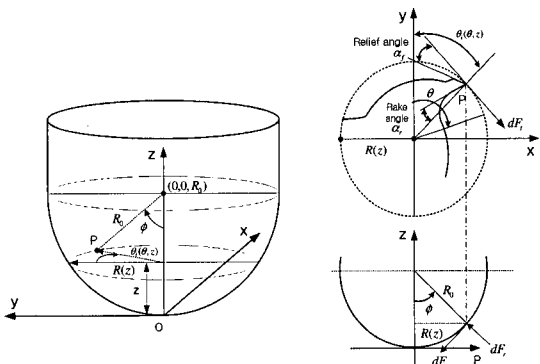
엔드밀 가공에서 칩두께의 변화에 영향을 주는 중요한 요인 중의 하나가 공구변형이다. 공구변형의 크기, 방향에 따라 절삭날과 가공물의 접촉조건이 변하게 된다. 공구변형이 크면 과도한 절삭을 하거나 절삭이 이루어지지 않게 되고, 미소한 공구변형에서도 칩두께의 변화가 발생하게 된다. 따라서 칩두께의 계산에 공구변형을 고려하는 것이 바람직하다고 판단된다. 엔드밀 가공에서 공구변형 모델은 홀더부분을 강체로 공구를 외팔보(cantilever beam)로 가정하여 계산하며, 이에 대한 많은 방법들이 연구되어졌다<sup>(5,9)</sup>.

Fig. 3은 볼엔드밀 가공에서 공구변형을 계산하는 대표적인 모델로 절삭저항의 작용점이 공구끝으로 고정되지 않고 접촉위치에 따라 작용점이 변하는 모델로  $z$ 높이에서의 공구 변형( $\delta_y(z)$ )은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$\delta_y(z) = \frac{F_y}{2ER^4} [ < C_y - z >^3 - (L-z)^3 + (L-z)^2(L-C_y) ] \quad (5)$$

Fig. 3과 식 (5)로부터 공구변형은 수평절삭저항과 절삭저항의 작용점에 의하여 결정됨을 알 수 있다.

Lim<sup>(10)</sup>은 공구부분과 척 부분의 변형을 고려한 모델을 제시하였지만, 최근의 공작기계 제작기술은 척의 변형을 무시



(a) Coordinate system (b) Section view at level z

Fig. 2 Geometric model of the ball-end mill

하여도 좋은 정도의 정밀한 제품이 생산되고 있는 상황이다. Kim<sup>(11)</sup>은 엔드밀 공구 자체의 절삭날부를 직경이 다른 외팔보로 고려하여 중첩에 의한 공구변형을 계산하였다.

Fig. 4는 엔드밀 공구를 생크부와 절삭날부가 직경이 다른 2개의 복합 외팔보로 고려한 모델을 도식적으로 보여주고 있다. 각 부분의 끝단에서 변형과 기울기각의 중첩으로 전체 공구변형을 계산한다. 식 (6), 식 (7)은 생크부에서 공구변형을 표현하고 있다.

$$\delta_s = \frac{F}{6EI} [L_s^3 + 3L_s^2(L - C_y)] \quad (6)$$

$$\phi_s = \frac{F}{2EI} [L_s^2 + 2L_s(L - C_y)] \quad (7)$$

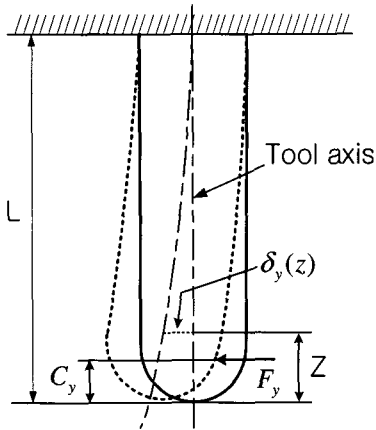


Fig. 3 Tool deflection model of the ball-end mill

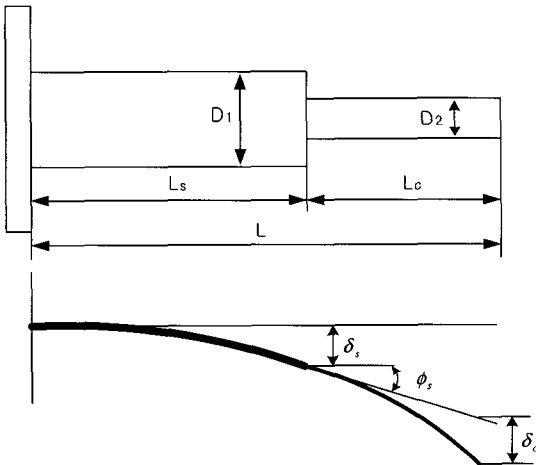


Fig. 4 Composite tool deflection model

여기서,  $\delta_s$  : 생크부의 공구변형

$\phi_s$  : 생크부의 기울기각

결과적으로 공구정점으로부터 높이 z에서 y축 방향의 전체 공구변형( $\delta_y$ )은 식 (5)에 의해서 구해지는 절삭날부의 공구변형과 식 (6)과 식 (7)에 의해서 구해지는 생크부의 공구변형을 식 (8)과 같이 중첩하여 구할 수 있다.

$$\delta_y = \delta_s + \delta_c + \phi_s(L_c - z) \quad (8)$$

여기서,  $\delta_c$  : 절삭날부의 공구변형

x축방향의 공구변형도 같은 방법으로 구할 수 있다. 곡면 가공에서는 가공이 볼 부분에서 이루어지며 가공 생성면이 항상 절삭날에 수직인 방향으로 생성되어 x축, y축 공구변형을 동시에 고려한 전체 공구변형 모델을 사용하였다.

### 2.3 칩두께 계산 모델

칩은 절삭과정에서 절인에 의하여 가공물로부터 제거되는 가공물의 일부분으로 가공조건, 런아웃,<sup>(12)</sup> 공구 및 공작기계의 변형 등에 영향을 받는다. 곡면가공은 동일한 가공조건에서도 곡면의 곡률이나 경사각의 크기에 따라 매순간 칩두께가 변하게 되어 정량적인 해석이 어렵다. 따라서 앞서 언급한 것처럼 실제의 절삭기구를 해석이 가능하도록 단순화하여 사용하거나 대략적인 평균값을 계산하여 이용하게 된다. 칩두께는 특정 절인이 일정 각 위치에서 연속하는 2개의 절삭날 경로의 차로 정의되고 회전위치각( $\theta$ )과 축방향 위치각( $\phi$ )으로 함수로 표현된다. Fig. 5는 볼엔드밀 가공에서

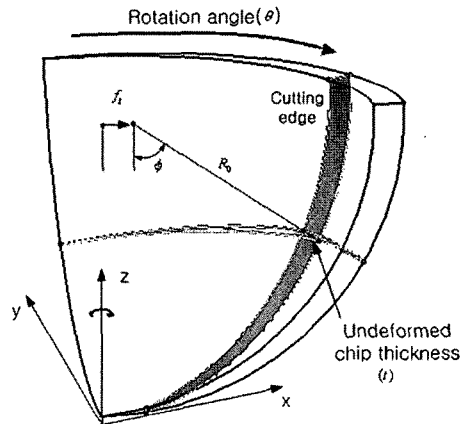


Fig. 5 Definition of chip thickness in ball-end mill

칩두께의 정의를 보여주고 있다.

다음은 계산과정을 단순화하기 위하여 칩두께 계산시 다음 사항을 고려하였다.

- 1) 특정 절삭날의 경로를 원으로 가정한다. 이는 이송속도에 비하여 절삭속도가 상대적으로 크고 공구의 직경이 반경방향 절삭깊이에 비하여 클 때 가능하다.
- 2) 볼랜드밀의 반구부에 나선각을 따라 분포하는 절삭날을 공구축 방향으로 일정크기로 미소하게 절단하고 절단된 미소 절삭날에 2차원 절삭이론을 적용하여 고찰한다.
- 3) 칩두께는 현재의 절삭날을 기준으로 바로 전 또는 그 전의 절삭날과의 경로차로 정의되고, 날당이송이 칩두께의 중요인자가 된다. 절삭날 경로변화를 가져오는 공구변형과 런아웃은 칩두께에 영향을 주므로 고려하여 계산하였다.
- 4) 정삭가공은 경로간 거리와 절삭깊이가 미세하여 한날당 절삭면적이 적어 치수효과를 고려하였다.
- 5) 곡면가공에서 공구는 동시에 수평, 수직방향의 이송이 이루어진다. 따라서 칩두께 계산에서 수평이송에 수직방향(z축) 이송의 영향을 고려한 이송을 사용하였다.

본 연구에서는 Feng<sup>(4)</sup>의 연구에서 사용한 칩두께 모델을 위에 열거된 영향 요소들이 포함될 수 있는 칩두께 계산 모델로 수정하여 사용하였다. Fig. 6은 사용된 칩두께 계산 모델을 도식적으로 보여주고 있다.

공구변형이 날당이송보다 작은 경우 Fig. 6으로부터 칩두

께의 계산은 식 (9)와 같이 정의할 수 있다.

$$[t_i(\theta, z)]^m = [f_i \cos \phi \sin \theta_i(\theta, z) + \text{def}(z)] \cos \beta_i(z) \quad (9)$$

여기서,  $m$  : 치수효과 상수

$\beta_i(z)$  : 곡부나선각

$$\text{def}(z) = (R_i - R_{i-1}) + [\delta_i(z) - \delta_{i-1}(z)] \sin \theta_i(\theta, z)$$

이송방향의 경사각이  $\phi \geq 0$ 이면, 즉 상방향 절삭 시  $R_i - R_{i-1} = R_i(z) - R_{i-1}(z + f_i \sin \phi) = 0$ 이다.

위 식은 바로 전 절삭날의 경로와 현재 절삭날 경로의 (+)z 방향 이송에 의한 절삭날 경로의 반경차를 계산하게 된다. 공구축의 (+) 방향 이송에 의한 반경의 변화가 칩두께의 크기에 주는 영향을 추가하게 된다. 상방향 절삭경로에서는 (+)방향 이송은 칩두께 크기에 큰 영향이 없는 것으로 알려져 있다.

이송방향의 경사각  $\phi < 0$ 이면, 즉 하방향 절삭 시 (-)z 방향 이송성분에 의한 반경의 변화가 칩두께 계산에 포함되게 된다. 하방향 절삭에서는 칩두께 계산에 영향을 주고 있다. 식 (9)에서  $[\delta_i(z) - \delta_{i-1}(z)] \sin \theta_i(\theta, z)$ 는 공구변형이 칩두께에 미치는 영향을 포함하게 된다. 공구변형이 날당이송보다 큰 경우는 이송에 의한 정상적인 절삭이 이루어지지 않고 공구변형에 의한 절삭이 이루어지게 된다. 식 (10)은 공구변형이 날당이송보다 큰 경우의 칩두께 계산식을 보여주고 있다.

$$[t_i(\theta, z)]^m = [f_i \cos \phi \sin \theta_i(\theta, z) + \text{def}(z)] \cos \beta_i(z) + n(k) \quad (10)$$

식 (10)에서 마지막 항은 이송보다 큰 공구변형에 의하여 제거되는 칩두께 때문에 정상적인 이송운동에 의하여 절삭하지 못하는 절삭날의 수를 표현하게 된다.

### 3. 계산결과 및 고찰

#### 3.1 실험방법

분석에 사용된 가공형상은 수평면, 경사평면, 곡면을 동일한 가공조건에서 한번에 실험할 수 있는 형상으로 칩두께 계산 모델의 분석에도 동일하게 사용하였다. 경사평면은 15°, 30°, 45°, 곡면은 곡률반경이 15mm, 25mm, 35mm인 형상으로 가공재료는 STD 11을 사용하였다. 공구는 반경 5mm, 헬릭스 각 30°, 2날 볼랜드밀 공구로 TiAlN 코팅처리 되어 있어 경도가 큰 열처리 강 of 절삭에 많이 사용되는 공구이다. 가공조건은 스펴들 회전속도 1,450rpm, 2,400rpm, 날당 이송 0.05mm/tooth, 0.08mm/tooth, 절삭깊이(radial, axial)

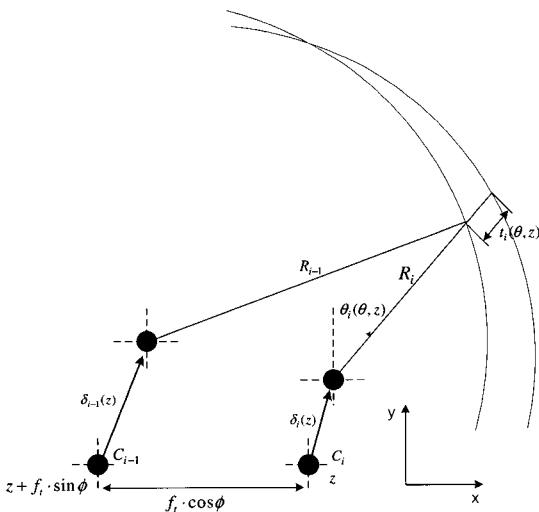


Fig. 6 Calculation model of chip thickness

0.3mm를 선택하였다.

### 3.2 칩의 기하학적 해석

본 연구에서 제시된 칩두께 계산모델의 유용성을 확인할 목적으로 솔리드 모델의 불린연산을 이용하여 3가지 형상에서 칩의 크기와 생성위치에 대하여 분석하였다.

Fig. 7은 수평면 가공에서 날당이송(0.05mm/tooth)에 따른 칩 크기와 접촉위치를 도식적으로 보여주고 있다. 절삭성이 나쁜 공구 정점부가 가공에 많이 참여하고 있음을 알 수 있으며 칩두께 계산에 필요한 회전위치각과 축방향 위치각의 범위를 그림으로부터 알 수 있다.

Fig. 8은 15°, 30° 경사평면 가공에서 칩의 형상을 도식적으로 보여주고 있다. 경사평면의 경사기울기가 증가할수록 칩 단면적이 작아지고 공구의 유효직경이 증가하는 방향으로 접촉위치가 이동하고 있음을 알 수 있다. 이는 공구와 가

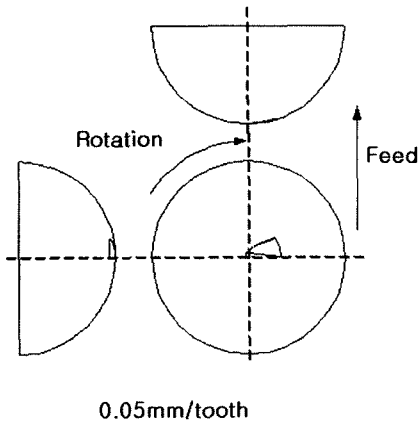


Fig. 7 Chip shape and position in plain machining(PL)

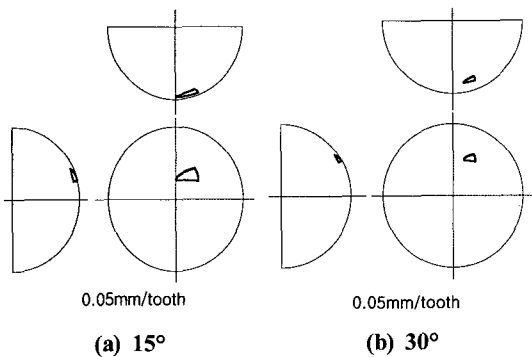


Fig. 8 Chip shape in inclined plain machining(IN)

공물의 물림길이가 회전위치각을 감소시켜 결과적으로 전체적인 칩면적을 감소시키는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 15mm, 25mm 곡률반경을 갖는 2차원 곡면가공에서 접촉위치와 칩형상을 보여주고 있다. 곡면의 곡률반경이 감소함에 따라 칩면적이 작아지고 유효직경은 미세하게 증가하고 있음을 알 수 있었다. 위의 결과들로부터 공구와 가공물의 접촉위치의 변화는 절삭력 크기의 변화와 일치하는 경향을 보이고 있으며, 이는 접촉위치의 변화가 절삭속도와 칩면적 변화의 주된 요인임을 알 수 있었다.

### 3.3 칩두께 계산

Fig. 10은 솔리드모델을 이용하여 공구와 가공물을 모델링하고 불린연산으로부터 얻어진 칩형상의 기하학적 분석을 통하여 얻어진 칩두께의 대략적인 크기를 가공 형상별로 보여주고 있다.

여기에서는 공구변형, 치수효과 등 다른 요인은 고려되지 않고 순수하게 날당이송 크기를 공구경로방향으로 이동하였

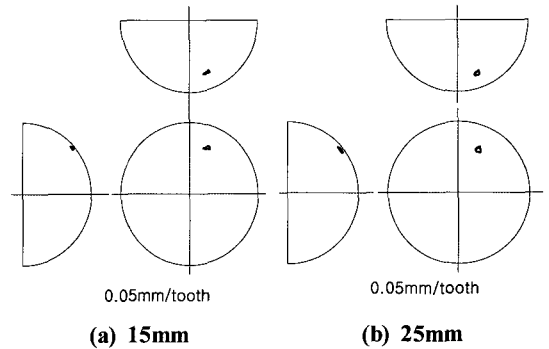


Fig. 9 Chip shape in surface machining(SU)

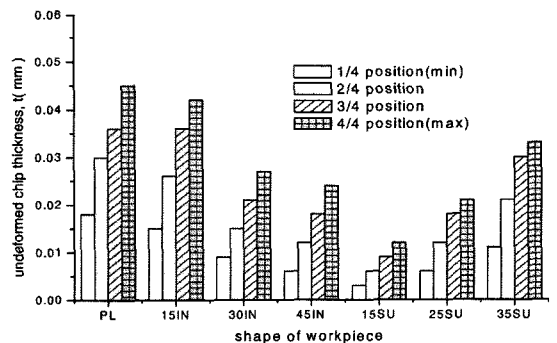


Fig. 10 Chip thickness according to geometric analysis (feed : 0.08mm/tooth)

을 때 각각의 가공물 형상에 따른 칩형상으로 부터 얻어진 값들이다. 형상 별로 4개의 값을 가지는데 이는 공구 정점으로부터 공구축을 따라 일정한 간격으로 4등분하여 측정된 값이다. 칩두께는 수평면, 경사평면, 곡면 순으로 작아지고 있음을 알 수 있다. 또한 칩두께는 경사평면가공에서는 경사 기울기가 증가할수록, 곡면가공에서는 곡면의 곡률이 감소할수록 작아졌으며, 절삭 중 발생하는 절삭력 크기의 변화, 접촉위치의 변화와 경향이 일치하였다. 동일한 조건에서 날당이송이 0.05mm/tooth로부터 0.08mm/tooth로 증가되면 칩두께는 대략적으로 30% 증가한 것을 알 수 있었다.

Table 1은 공구 정점으로부터 높이(z)에 따른 공구의 기하학적 표현 값의 변화를 보여주고 있다. 공구가 회전함에 따라 절삭날과 가공물의 접촉이 나선각을 따라 상승하게 되며, 유효반경, 곡부 나선각, 절삭속도는 모두 증가함을 알 수 있다.

Table 2는 수평면 가공에서 날당이송 0.08mm/tooth일 때 회전위치가 40°, 60° 일 때 칩두께 계산결과를 보여주고 있다. 비교를 위하여 본 연구에서 사용된 칩두께 계산식에 의하여 얻어진 결과는 proposal로, 식 (1)에 의하여 얻어진 결과는 basic으로 함께 보여주고 있다.

식 (1)은 상향밀링 가공의 칩두께 계산 시 활용되며 회전 위치각( $\theta$ )의 증가와 함께 계산된 칩두께가 증가하게 된다. 본 연구에서는 하향밀링 가공으로 절삭날의 초기 진입 시 큰 칩두께 계산이 가능하도록 수정하였으며, 공구정점에서 부터 높이가 높아짐에 따라 미세하지만 증가하고 있음을 알 수 있었다. 두 식에 의하여 얻어진 칩두께는 비슷한 크기를 보이며, 본 논문에서 제시된 계산모델에 의하여 얻어진 값이 약간 크게 계산되며, 이는 식 (1)에서 고려하지 않은 공구변

**Table 1 Calculations of the tool geometry(spindle speed: 2,400rpm, tool radius: 5mm, PL)**

z (mm)	R(z) (mm)	$\beta(z)$ (°)	V (m/min)	$\theta(z)$ (°)
0	0	0	0	40
0.03	0.55	3.61	8.25	39.80
0.07	0.83	5.50	12.57	39.54
0.11	1.04	6.87	15.73	39.27
0.15	1.22	7.99	18.33	39.01
0.19	1.37	8.96	20.59	38.74
0.23	1.50	9.82	22.60	38.49
0.27	1.62	10.60	24.44	38.22
0.32	1.76	11.49	26.54	37.88

형, z방향 이송 등의 영향으로 판단된다.

Table 3은 15° 경사평면 가공에서 날당이송 0.08mm/tooth일 때 회전위치가 45°, 53° 일 때 칩두께 계산결과를 보여주고 있다. 회전위치가( $\theta$ )은 Fig. 8로부터 계산하였으며, 절삭날이 절삭을 시작하는 위치각과 빠져나오는 위치의 각을 나타낸다. 경사평면에서 얻어진 칩두께 계산결과도 평면에서의 결과와 유사한 결과를 보여주고 있다.

Table 4는 곡률반경 15mm의 곡면가공에서 날당이송 0.08mm/tooth일 때 회전위치가 24°, 31° 일 때 칩두께 계산결과를 보여주고 있다. 앞의 두 경우와 유사한 경향을 보이고 있다. 또한 동일한 날당이송에서 평면가공, 경사면 가공, 곡면 가공 순으로 칩두께가 작아지고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과는 Fig. 10의 솔리드 모델에 의한 불린 연산으로부터 계산된 값과 비교하면 다소 크지만 대체적으로 일치하

**Table 2 Calculations of the chip thickness(spindle speed: 2,400rpm, feed: 0.08mm/tooth, PL)**

$\theta_i(\theta, z), 60^\circ$		$\theta_i(\theta, z), 40^\circ$		z(mm)
proposal	basic	proposal	basic	
0.0308	0.0432	0.0444	0.0320	0.03
0.0309	0.0432	0.0445	0.0319	0.05
0.0311	0.0430	0.0446	0.0317	0.09
0.0314	0.0429	0.0449	0.0315	0.15
0.0316	0.0427	0.0450	0.0313	0.19
0.0318	0.0426	0.0452	0.0311	0.23
0.0321	0.0424	0.0454	0.0308	0.29
0.0323	0.0423	0.0455	0.0307	0.32

**Table 3 Calculations of the chip thickness(spindle speed: 2,400rpm, feed: 0.08mm/tooth, 15IN)**

$\theta_i(\theta, z), 53^\circ$		$\theta_i(\theta, z), 45^\circ$		z(mm)
proposal	basic	proposal	basic	
0.0355	0.0394	0.0407	0.0347	0.15
0.0360	0.0390	0.0411	0.0343	0.25
0.0364	0.0387	0.0415	0.0339	0.35
0.0369	0.0383	0.0419	0.0335	0.45
0.0371	0.0381	0.0420	0.0333	0.5
0.0373	0.0379	0.0422	0.0330	0.55
0.0377	0.0376	0.0426	0.0326	0.65
0.0380	0.0374	0.0428	0.0324	0.7

**Table 4 Calculations of the chip thickness(spindle speed: 2,400rpm, feed: 0.08mm/tooth, 15SU)**

$\theta_i(\theta, z), 31^\circ$		$\theta_i(\theta, z), 24^\circ$		z(mm)
proposal	basic	proposal	basic	
0.0217	0.0214	0.0272	0.0158	0.85
0.0222	0.0209	0.0277	0.0152	0.95
0.0227	0.0204	0.0282	0.0147	1.05
0.0233	0.0199	0.0288	0.0141	1.15
0.0235	0.0196	0.0290	0.0138	1.2
0.0238	0.0193	0.0293	0.0136	1.25
0.0241	0.0191	0.0295	0.0133	1.3
0.0243	0.0188	0.0298	0.0130	1.35

는 경향을 보이고 있다. 곡면가공은 매끄럽게 흘러가는 공구경로에서, 각각의 미세한 경로 구간은 경사평면을 가공하는 것과 동일하게 직선경로를 가지게 된다. 따라서 축방향 위치차이 연속적으로 변하는 것으로 고려하여 계산하는 것이 가능하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 볼 엔드밀 가공에서 절삭기구 및 칩두께 모델의 이론적 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공구변형, 치수효과 및 z방향 이송을 고려한 칩두께 계산 모델이 제시되었으며, 솔리드모델의 불연연산을 통한 기하학적 분석결과와 비교하여 좀 더 정확한 칩두께 계산 모델을 개발하였다.
- (2) 개발된 모델에 의하여 계산된 칩두께는 수평면, 경사평면, 2차원 곡면 가공 실험에서 얻어진 접촉위치의 변화와 일치하는 경향을 보이고 있어, 공구변형 및 절삭력 계산 모델에서 활용 시 좋은 결과를 줄 것으로 판단된다.

#### 후 기

이 논문은 2005년도 익산대학 산업기술연구소의 지원에 의하여 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

(1) Martellotti, M. E., 1941, "An Analysis of the Milling

Process," *Trans. ASME*, Vol. 63, pp. 677~700.

(2) Feng, H. Y. and Menq, C. H., 1993, "The Prediction of Cutting Forces in the Ball-End Milling Process-I," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34, pp. 697~710.

(3) Feng, H. Y. and Menq, C. H., 1993, "The Prediction of Cutting Forces in the Ball-End Milling Process-II," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 34, pp. 711~719.

(4) Feng, H. Y. and Menq, C. H., 1996, "A Flexible Ball-End Milling System Model for Cutting Force and Machining Error Prediction," *Trans. ASME*, Vol. 118, pp. 461~469.

(5) Kline, W. A., Devor, R. E. and Lindberg, J. R., 1982, "The Prediction of Cutting Forces in End Milling with Application to Conering Cuts," *Int. J. Mach. Tool Des. Res.*, Vol. 22, pp. 7~22.

(6) Yang, M. Y. and Sim, C. G., 1994, "A Study on the Precision Machining in Ball End Milling System," *Journal of KSPE*, Vol. 11, pp. 50~64.

(7) Yucessan, G. and Altintas, Y., 1996, "Prediction of Ball End Milling Forces," *Trans. ASME*, Vol. 118, pp. 95~103.

(8) Altintas, Y. and Lee, P., 1998, "Mechanics and Dynamics of Ball End Milling," *Trans. ASME*, Vol. 120, pp. 684~692.

(9) Kline, W. A., Devor, R. E. and Shareef, I. A., 1982, "The Prediction of Surface Accuracy in End Milling," *Trans. ASME*, Vol. 104, pp. 272~278.

(10) Lim, E. M. and Menq, C. H., 1995, "The Prediction of Dimensional Error for Sculptured Surface Productions Using the Ball-End Milling Process PART2," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 35, No. 5, pp. 1171~1185.

(11) Kim, G. M., Kim, B. H. and Chu, C. N., 2003, "Estimation of Cutter Deflection and Form Error in Ball-end Milling Processes," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 43, pp. 917~924.

(12) Hwang, J., Chung, E. S., Shin, S. C. and Namgung, S., 1998, "A Study on the Identification of Cutter Offset by Cutting Force Model in Milling Process," *Journal of KSMTE*, Vol. 7, No. 2, pp. 91~99.