

## 엔드밀의 형상에 따른 가공정밀도 해석

고성림\*(건국대 기계설계학과), 이상규, 김용현(건국대 대학원 기계설계학과)

### Analysis on the Surface Accuracy in according to Geometry of End Mill

Sung-Lim Ko(M.D.P.E. Dept. KKU), Sang-Kyu Lee, Yong-Hyun Kim(M.D.P.E. Dept., KKU)

#### ABSTRACT

As tools for machining precision components, end mills and ball end mills are widely used. For the end mills have longer cylindrical shape comparing diameter, liable to deflect and induce deterioration of surface roughness. Tool geometry parameters and cutting process have complex relations with each other. So, It is hard to determine how to select optimal tool geometry. So, to improve the stiffness, relationship between cutting process and tool geometry must be studied. In this study, relations between grinding wheel geometry, setting condition and tool geometry are revealed. For the purpose of studying relations between each parameter, the equivalent diameter of tool has been calculated assuming tool as a simple beam. By the various cutting simulations and experiments, tool geometry and cutting process has been studied.

**Key Words** : Flute (플러트부), Chip (칩), Tool geometry (공구형상), Grinding wheel (연삭숫돌), Cutting force (절삭력), Surface accuracy (가공 정밀도), End mill (엔드밀), Equivalent diameter (등가직경), Helix angle (헬릭스각)

#### 1. 서론

공작기계의 전반적인 성능 향상과 새로운 공구의 개발은 상호 보완적인 관계를 가지며 끊임없는 발전을 거듭해 왔다. 최근에는 CAD/CAM 기술의 발전을 통하여 새로운 가공전략이 수립되고 있는 것과 더불어 고속가공기술을 기반으로 한 공작기계의 눈부신 발전으로 인하여 기존의 공구보다 강력한 새로운 절삭공구의 개발해야 할 필요성이 증대되고 있다.

공작물의 윤곽가공에 주로 사용되는 엔드밀과 볼엔드밀은 절삭성을 좌우하는 인선부와 강성 및 칩배출의 특성을 결정하는 나선형홈의 가공이 동시에 이루어지기 때문에 형상에 제약이 크다. 또한, 연삭숫돌의 마모가 제품의 성능에 직접적인 영향을 미치기 때문에 공구설계 및 제작에 어려움이 많다. 공구의 설계가 어려운 또 하나의 요인은 공구의 다양한 형상 요소와 절삭성능간의 관계가 매우 복잡적이어서 명확한 관계를 정의하기 어렵다는 점이다.

따라서, 엔드밀과 볼엔드밀의 형태는 제작공정에 대한 고려뿐만 아니라, 절삭성능에 미치는 영향을 고려하여 다양한 설계 인자들을 최적화하는 방

향으로 설계되어야 한다.

이를 위하여 본 연구에서는 다양한 엔드밀의 설계요소와 제작 공정간의 관계에 대한 이해를 바탕으로 하여, 엔드밀의 형상이 가공정밀도에 미치는 영향을 다각적으로 분석하고, 공구의 형상과 절삭조건간의 관계에 대하여 실험을 통하여 고찰하였다.

#### 2. 엔드밀의 설계 및 제작 기술

##### 2.1 엔드밀의 설계요소

엔드밀의 형상은 Fig.1 과 같이 축방향을 따라 나선형으로 형성된 절삭날과 칩(chip) 배출과 절삭유의 공급을 위한 플러트(flute) 등으로 구성되어 있다. 엔드밀은 주로 윤곽가공을 수행하기 때문에, 형상설계에 있어서 다음과 같은 요소를 고려해야 한다. 우선, 가공 중 절삭저항이 작게 발생하도록 공구경사각과 공구 여유각을 설정해 주는 것이 중요하다. 또한, 엔드밀과 같이 가늘고 긴 공구에서는 가공중에 발생하는 절삭저항에 의한 공구 처짐으로 공구 파손과 가공정밀도 저하가 발생하기 쉬우므로, 우수한 강성을 갖는 공구형상이 필요하다. 공구강성은 가공면의 조도 및 공구 수명에 직접적인 영향을

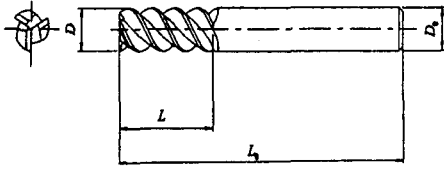


Fig. 1 General configuration of endmill

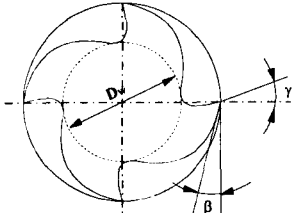


Fig. 2 Design factors for end mill

미치는 중요한 요소로서 공구강성에 직접적으로 관여하는 것은 식 (1)과 같이 표현되는 단면적의 2 차 모멘트이다.

$$I_{yy} = \int_A y^2 dA \quad (1)$$

그러므로 칩배출로 인한 문제가 제기되지 않는 범위내에서  $I_{yy}$  의 값이 되도록 큰 값을 유지할 수 있는 단면형상 가공이 이루어져야 한다.

이상에서 살펴본 엔드밀의 절삭특성은 측면날부의 형상과 플러트의 단면형상에 의해서 결정됨을 알 수 있다. 엔드밀의 나선홈 가공은 절삭날부의 형상과 공구강성을 결정짓기 때문에 가공하고자 하는 엔드밀의 형상에 따라 적절한 스톨 형상을 결정한 후, Fig. 2 에 나타난 엔드밀의 주요한 설계요소인 공구경사각 ( $\gamma$ )이나 내접원의 크기, 공구여유각 등을 만족하도록 연삭스톨의 상대위치를 정확하게 결정하는 것이 중요하다.

## 2.2 엔드밀 제작기술

일반적으로 CNC 공구연삭기에서의 나선홈 가공에서는 주어진 형상의 연삭스톨을 사용하여 공구와 스톨의 상대위치만을 입력한 후 프로그램에 의한 작업을 수행하게 된다. 따라서 공구제작시 연삭스톨의 단면형상 설계가 선행되어야 한다. 즉, 엔드밀의 제작을 위해서는 연삭스톨의 형상결정을 위한 프로그램과 홈 가공을 위한 연삭스톨의 상대위치를 결정하는 두 개의 프로그램이 요구된다.

연삭스톨의 적정 형상은 가공하고자 하는 엔드밀 형상 요소를 고려하여 나선형 홈 가공의 기하학적 관계에 대한 연구결과<sup>(1)</sup>에서 개발된 소프트웨어의 기본구조를 반복, 적용함으로써 얻을 수 있다. Fig. 3 의 스톨형상에서 경사각  $\theta_1$  과  $t_1$  의 크기에 의해

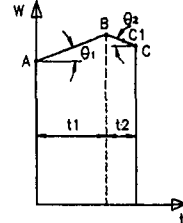


Fig. 3 Configuration of grinding wheel for manufacturing end mill

서 엔드밀의 단면형상이 결정된다. 물론 주어진 형상에서도 스톨의 상대위치와 설치각의 크기에 의해서 변화하지만 그 변화의 범위 역시 경사각의 크기에 의해서 결정된다.

연삭스톨의 상대위치를 결정하기 위해 만족해야 하는 요소는 내접원의 크기와 공구경사각이다. 엔드밀에 대한 연삭스톨의 상대위치( $X_0, Y_0$ )는 다음과 같이 결정할 수 있다. 주어진  $Y_0$  에서 내접원의 크기를 만족할 때까지 연삭스톨을 엔드밀에 접근시켜서  $X_0$  를 결정한다. 이렇게 결정된 연삭스톨의 위치에서 나선홈 단면 형상은 나선홈 가공결과 예측용 소프트웨어<sup>(2)</sup>를 사용하여 얻을 수 있다. 이 결과로부터 공구경사각을 구해서 설계값과 비교하여 허용오차내에 있는 경우에는 그 위치를 선정하고 그렇지 않은 경우에는 초기의  $Y_0$  위치를 일정간격으로 변화시키면서 앞의 작업을 반복하여 원하는 내접원과 공구경사각을 만족하는 스톨의 위치를 결정한다.

## 3. 엔드밀의 형상에 따른 가공정밀도의 변화

### 3.1 엔드밀의 단면이차 모멘트와 등가직경

엔드밀의 복잡한 단면형상으로 인하여 날부에 대한 단면 2 차 모멘트를 구하기 위해서는 수치해석적 방법을 사용하는 것이 편리하다. Fig.4 를 보면, 두 날 엔드밀의 경우에는 뚜렷한 이방성을 가지고 있음을 알 수 있다. 여섯날의 경우에는 내접원이 더 커서 더 강한 강성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 계산을 위해 사용된 공구를 Table 1 에 나타내었다.

Table 1 Geometrical parameter of end mills and equivalent diameter for 0° helix angle end mill by cross section analysis

No.	Dia.	Helix Angle	No. of Tooth	Inscribed Diameter	Insc. Ratio	Equivalent Diameter	Equi. Ratio
1	8	30°	2	5.12	0.64	5.95	0.74
2	8	30°	4	4.97	0.62	6.22	0.78
3	10	30°	2	6.44	0.64	7.83	0.78
4	10	30°	4	6.24	0.62	7.99	0.80
5	12	30°	2	7.44	0.62	9.46	0.79

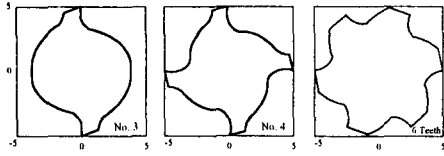


Fig. 4 Representation of cross section in end mill

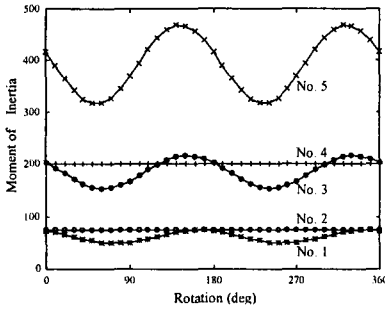


Fig. 5 Comparison of moment of inertia

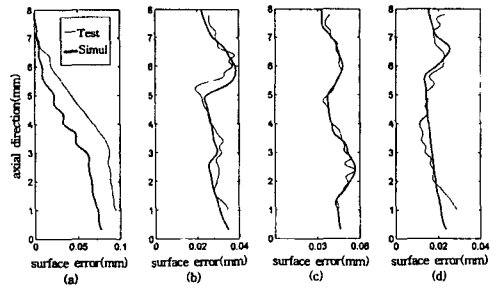
공구의 단면을 10°씩 회전시키면서 단면 2 차 모멘트를 계산한 결과를 Fig.5 에 나타내었다. 두날 짜리 엔드밀에서는 단면 2 차 모멘트가 약 20% 내외의 큰 폭으로 이방성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 헬릭스각의 존재로 인하여 그 영향은 약간 상쇄되지만, 실제 절삭시 두날의 경우 이방성의 영향을 무시할 수 없을 것으로 생각된다. 또한, 세날 이상인 경우에는 전혀 이방성이 존재하지 않는다<sup>(3)</sup>. 따라서, 계산의 편이를 위하여 공구의 강성 모델을 원형봉으로 단순화할 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 공구의 단면형상으로부터 단면 2 차 모멘트를 구한 후 식(2)와 같이 역으로 원형봉의 직경을 환산하면, 공구의 강성과 동일한 등가직경을 얻을 수 있다. 이와 같은 등가직경을 이용하면 공구의 처짐을 간단하게 계산할 수 있다.

$$(D_{eq})_0 = \sqrt[3]{\frac{64 I_{yy}}{\pi}} \quad (2)$$

Table 1 에 나타낸 공구의 등가직경 계산결과를 보면, 두날의 경우 내접원의 비는 네 날 엔드밀에 비하여 더 크지만 공구강성은 오히려 더 나쁜 것을 알 수 있다. 이는 날의 개수가 증가할 경우 날부의 증가로 인하여 공구 강성이 크게 증가하기 때문이다. 날의 개수가 여섯날로 증가하면, 공구의 강성은 훨씬 커진다<sup>(4)</sup>.

**3.2 엔드밀의 처짐을 고려한 표면정밀도 예측**  
 절삭시 발생하는 절삭저항으로 인하여 공구가 변형될 경우 변형된 공구만큼 절삭량이 줄어들기 때문에 절삭력과 처짐량간에 상쇄가 발생한다<sup>(5)</sup>. 따라서 절삭력을 예측하기 위하여 공구의 처짐을 고



(a) 2 Teeth, H.A. = 30°, RD=1mm, AD=8mm, Feed Rate = 0.06mm/rev  
 (b) 3 Teeth, H.A. = 50°, RD=1mm, AD=8mm, Feed Rate = 0.09mm/rev  
 (c) 6 Teeth, H.A. = 50°, RD=1mm, AD=8mm, Feed Rate = 0.18mm/rev  
 (d) 3 Teeth, H.A. = 50°, RD=0.5mm, AD=8mm, Feed Rate = 0.09mm/rev  
 Fig. 6 Comparison of simulated surface accuracy and tested surface accuracy (workpiece = SCM4)

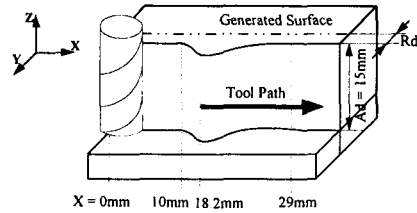


Fig. 7 Schematic illustration of modified cornering cut in linear direction

려할 필요가 있다. Fig.6 에서 다양한 공구형상과 절삭조건에 대하여 절삭 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 실제 가공실험 결과와 비교하였다.

날의 개수가 적고 헬릭스각이 작을 경우에는 공구의 각위치에 따른 절삭량의 편차가 크기 때문에, 표면에 남는 가공량의 편차 또한 매우 큰 것을 알 수 있다. 반대로, 날의 개수가 많고 헬릭스각이 클수록 절삭력의 감소와 공구강성의 증대로 인하여 가공량의 편차가 작고 가공오차 또한 작은 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 엔드밀의 적정 절삭조건 선정을 통한 가공정밀도 향상

##### 4.1 코너가공

Fig. 7 은 반경방향 절삭 깊이의 변화에 따른 절삭 특성파악을 위한 실험조건이다. 축방향으로의 절삭깊이는 일정할 때, 반경방향 절삭깊이가 변화하도록 형상을 가공하였다. 엔드밀이 그림과 같은 방향으로 직선이송을 하면 반경방향 절삭깊이 변화에 따른 절삭력을 얻을 수 있고, 가공면을 측정하여 공구 처짐의 영향을 알 수 있다. 실험을 통하여 측정된 절삭력을 Fig. 8 에 나타냈다.

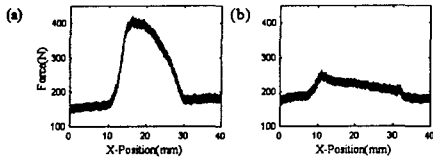


Fig. 8 Resultant cutting force with various cases  
 (a) Linear cut with constant feed(F216) (feed:mm/min)  
 (b) Linear cut with modified feed(F91-216)

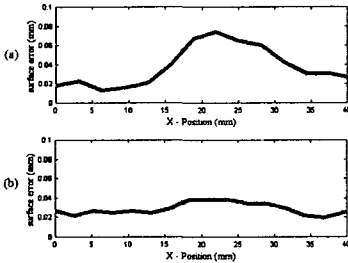


Fig. 9 Surface profile errors measured in feed direction by laser (feed : mm/min)  
 (1) Surface error with constant feed (F216)  
 (2) Surface error with modified feed (F91-216)

Fig. 8(a)는 피삭재를 일정한 feed(F216mm/min)로 가공한 결과이다. (b)는 절삭깊이의 변화에 따라 적정한 이송량을 이송량 결정 알고리즘으로부터 생성하여 적용한 결과이다. 이송량을 제어한 경우 최대 합력이 50%정도 감소되었음을 확인할 수 있다.

동일한 이송량으로 가공한 경우(a)와 이송량을 제어한 경우(b)에 대한 가공면 상단 부분을 공구 이송방향으로 레이저를 이용하여 측정한 결과가 Fig. 9 에 있다. (a)의 경우는 반경방향 절삭깊이의 증가에 따라 처짐량도 증가하고 있음을 볼 수 있다. (b)의 경우는 전 구간에 걸쳐서 거의 공구의 처짐이 균일하다는 결과가 얻어졌다.

Fig. 10 과 11 은 가공면에 대한 표면 예측 시뮬레이션 결과이다. Fig. 10 과 같이 일정한 이송량으로 가공한 경우에는 반경방향 절삭깊이의 증가에 따라 표면 오차가 증가함을 관찰할 수 있으며, 이송량을 제어해준 경우는 코너 전 구간에 걸쳐서 공구 처짐의 영향이 매우 작은 표면이 생성됨을 Fig. 11 과 같이 예측할 수 있다.

#### 4. 결론

1. 엔드밀의 가공시 연삭돌들의 형상에 의한 구속 조건을 만족하면서, 피삭재와 공구재종의 특성에 따라 절삭성과 공구강성을 최적화할 수 있는 엔드밀의 형상 설계, 제작기술을 개발하였다.
2. 공구의 강성과 유효직경에 대한 해석을 기반으

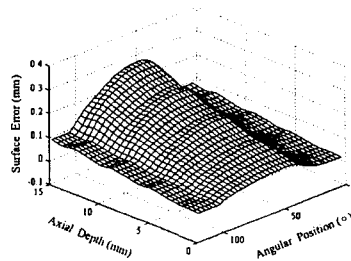


Fig. 10 Surface prediction in cornering cut with const. feed

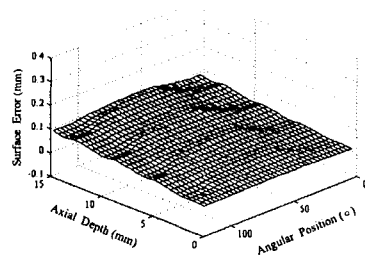


Fig. 11 Surface prediction in cornering cut with modified feed

- 로 하여 공구형상과 가공성능과의 관계를 비교하고, 고속가공에 적합한 공구 형상을 분석하였다.
3. 가공량의 예측을 바탕으로 한 이송량 제어를 통하여 가공오차를 현저히 감소시킬 수 있음을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다.

#### 참고문헌

1. 고성립, "트위스트 드릴 제작을 위한 나선형 홈 가공의 기하학적 해석", 대한기계학회 논문집, 제 8 권, 제 7 호, pp.1643-1653, 1993.
2. 고성립, "엔드밀 제작용 연삭돌형상과 가공 조건 결정을 위한 프로그램 개발", 한국정밀공학회지, 제 13 권, 제 8 호, pp.164-174, 1996.
3. Yoshida Fujii, Hiroyasu Iwabe, "Cross Sections and Flexural Rigidity of Helical End Mills", JSPE, Vol. 49, No. 6, pp. 45-50, 1983.
4. 이상규, 고성립, "신경망을 이용한 엔드밀의 정적 강성 결정", 한국정밀공학회지, 제 14 권, 제 12 호, pp. 143-152, 1997.
5. 이상규, 고성립, "엔드밀 가공시 표면형성 예측을 통한 정밀가공에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 4 호, pp. 229-236, 1999.