

◆특집◆ 고속가공을 위한 공구개발

엔드밀의 형상설계에 관한 연구

고성림\*, 이상규\*\*, 배승민\*\*

Study on the Design of End Mill Geometry

Sung-Lim Ko\*, Sang-Kyu Lee\*\*, Seung-Min Bae\*\*

**Key Words** : Tool geometry (공구 형상), High speed machining (고속 가공), Cutting force (절삭력), Rake angle (공구 경사각), Clearance angle (공구 여유각), End mill (엔드밀)

1. 서론

공작기계의 전반적인 성능 향상과 새로운 공구의 개발은 상호 보완적인 관계를 가지며 끊임없는 발전을 거듭해 왔다. 공작기계의 측면에서는 강성 증가, 열변형의 억제와 동적 안정성의 개선 및 응답성 개선을 통하여 가공정밀도를 개선시키고 있으며, 이송속도와 절삭속도의 증가를 통하여 생산성을 증대시키고 있다. 공구의 측면에서는 새로운 재질 및 코팅기법의 개발에 의한 절삭속도의 고속화를 통하여 생산성의 향상을 달성하고 있고, 공구형상의 최적화를 통하여 동적 안정성을 확보하고 가공 정밀도를 개선하고자 다양한 시도가 이루어지고 있다. 고속의 주축 회전수와 작은 절입량을 특징으로 하는 고속가공은 기존의 절삭 작업에 비하여 공구의 동특성이 공구 수명과 품질에 절대적인 영향을 미치기 때문에, 공구 형상 설계 기준도 새로운 관점에서 접근할 필요가 있다.

절삭 거동은 그 특성상 매우 복잡하며 각각의 설계 인자들은 절삭 거동에 대하여 다양한 영향을

미친다. 이 때문에, 공구를 설계하기 위해서는 실험을 통하여 각각의 설계 인자들을 선정해 왔기 때문에 고비용과 긴 개발시간의 문제와 함께, 최적의 형상 설계를 보장할 수 없다는 한계가 있다.

이에 대한 개선책으로서, 고속 가공용 엔드밀의 형상 설계에 있어서의 적절한 설계 기준을 확립할 필요가 있다. 본 연구에서는 공구 경사각, 여유각, 날부 길이, 헬릭스 각 등이 절삭에 미치는 영향에 대하여 분석하고, 형상 설계의 기초 자료를 제시한다.

2. 엔드밀의 형상에 따른 강성 변화

엔드밀의 복잡한 단면형상으로 인하여 날부에 대한 단면 2 차 모멘트를 구하기 위해서는 수치해석적 방법을 사용하는 것이 편리하다. Fig.1 을 보면, 두 날 엔드밀의 경우에는 뚜렷한 이방성을 가지고 있다는 것을 직관적으로 알 수 있다. 일반적으로 여섯날 엔드밀의 경우에는 플러트부(flute)가 작고 내접원이 커서 두 날에 비해 훨씬 큰 단면적을 갖는다. 계산을 위해 사용된 공구를 Table 1 에 나타내었다. 공구의 단면을 10°씩 회전시키면서 단면 2 차 모멘트를 계산한 결과를 Fig.2 에 나타내었다. 두날두날짜리 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 경

\* 건국대학교 기계설계학과 부교수

Tel. 02-450-3465, Fax. 02-447-5886

Email slko@konkuk.ac.kr

생산 및 자동화에서 특히 생산가공 및 절삭가공기술에 관한 연구와 미소비에 대한 연구활동을 하고 있다.

\*\* 건국대학교 기계설계학과 대학원

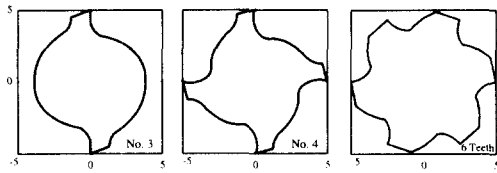


Fig. 1 Representation of cross section in end mill

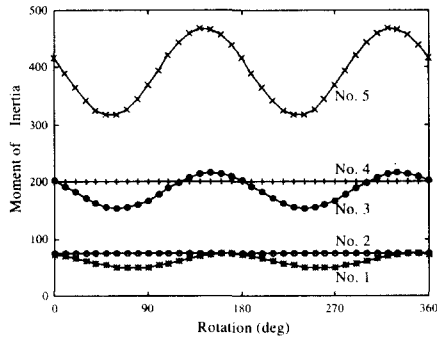


Fig. 2 Comparison of moment of inertia

우 이방성의 영향으로 인하여 표면정밀도와 표면조도에 악영향을 끼치는 것으로 보인다.

공구의 강성은 세날 이상인 경우에는 전혀 이방성이 존재하지 않는다<sup>(1)</sup>. 따라서, 세날 이상의 엔드밀에 대해서는 시뮬레이션시 계산의 편이를 위하여 공구의 강성을 원형봉으로 단순화하더라도 정확한 예측이 가능함을 알 수 있다. 공구의 단면형상으로부터 단면 2 차 모멘트를 구한 후 식(1)과 같이 역으로 원형봉의 직경을 환산하면, 공구의 강성과 동일한 등가직경을 얻을 수 있다. 이와 같은 등가직경을 이용하면 공구의 처짐을 간단하게 계산할 수 있다.

Table 1 에 나타난 공구의 등가직경 계산결과를

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

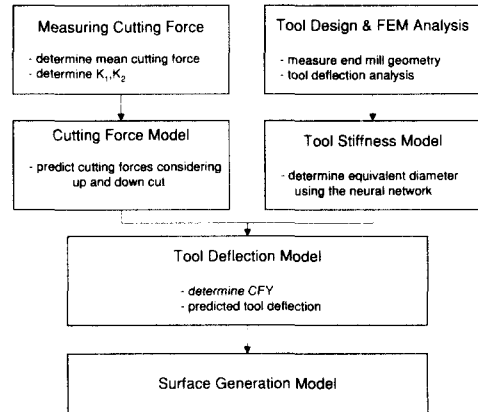
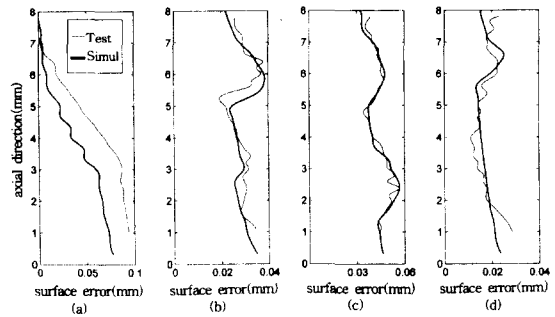


Fig. 3 Flow chart for surface generation simulation



- (a) 2 Teeth, H.A. = 30°, RD = 1mm, AD=8mm, Feed Rate = 0.06mm/rev
- (b) 3 Teeth, H.A. = 50°, RD=1, 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. 4 Comparison of simulated surface accuracy and tested surface accuracy (workpiece = SCM4)

$$(D_{eq})_0 = \sqrt[4]{64 \frac{I_{yy}}{\pi}} \quad (1)$$

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 여섯날인 경우에는, Fig.1 에서 볼 수 있듯이 내접원의 비도 약 0.8 정도로 증가하고 날 끝부가 공구 강성에 크게 기여한다. 이 때문에, 동일한 직경의 두날짜리 엔드밀에 비하여 공구의 강

성은 일반적으로 약 15~20% 가량 증가한다<sup>(2)</sup>.

### 3. 엔드밀을 이용한 절삭공정 시뮬레이션

여러 인자들 중에서 표면 정밀도에 가장 큰 영향을 주는 것은 절삭력에 의하여 발생하는 공구변형이다. 공구의 처짐을 고려한 절삭공정 시뮬레이션 프로그램의 전체적인 구조는 Fig.3 과 같다. 절삭시 발생하는 절삭저항으로 인하여 공구가 변형될 경우 변형된 공구만큼 절삭량이 줄어들기 때문에 절삭력과 처짐량간에 상쇄가 발생한다<sup>(3)</sup>. 따라서 절삭력을 예측하기 위하여 공구의 처짐을 고려해 주었다. 서로 다른 헬릭스각과 날수를 가지는 엔드밀에 대하여 절삭력과 가공오차를 예측한 후, 실제 실험을 통하여 가공오차를 비교한 결과를 Fig.4 에 나타내었다. 시뮬레이션 결과의 신뢰성이 적정함을 알 수 있다.

공구 형상의 측면에서, 날의 개수가 적고 헬릭스각이 작을 경우에는 공구의 각위치에 따른 절삭량의 편차가 크기 때문에, 표면에 남는 가공량의 편차 또한 매우 증가한다. Fig.4 (c)와 같이 날의 개수가 많고 헬릭스각이 큰 경우에는 절삭력의 편차가 감소하므로 가공면의 평탄도가 가장 좋은 것을 확인할 수 있다. 또한, 공구강성의 증대로 인하여 가공오차의 크기가 감소하는 경향이 있다. 절삭공정의 측면에서는 날의 개수가 많을수록 칩의 배출이 원활하지 않다는 단점이 있으므로, 여섯날 이상의 엔드밀에서는 반경방향의 절삭깊이를 너무 크게 증가시키면 공구 파손의 원인이 될 수 있다.

### 4. 형상에 따른 공구의 동적 거동 특성

엔드밀링 가공시 단속절삭에 의해 발생하는 절삭력은 공구의 진동을 유발한다. 진동으로 인하여 공구와 피삭재 사이의 상대 속도가 변화하면, Fig. 5 과 같이 공구의 운동 방향을 변화시켜, 공구 경사각과 여유각에도 영향을 준다.

공구와 피삭재 간의 상대 변위에 의하여, 순간 절삭 방향은 절삭 방향에 대하여  $\dot{r}(t)/v$  만큼 기울어지고, 공구 경사각,  $\gamma_0$ , 과 공구 여유각,  $\alpha_0$ , 은 Fig. 1 과 같이 유효 경사각,  $\gamma_e$ , 과 여유각,  $\alpha_e$ , 으로 변화한다[1]. 진동이 커질수록  $\dot{r}(t)$  이 커지므로, 경사각과 여유각에는 더 큰 변화가 발생한다. 이러한 유효 경사각과 유효 여유각의 변화는 공구 여유면

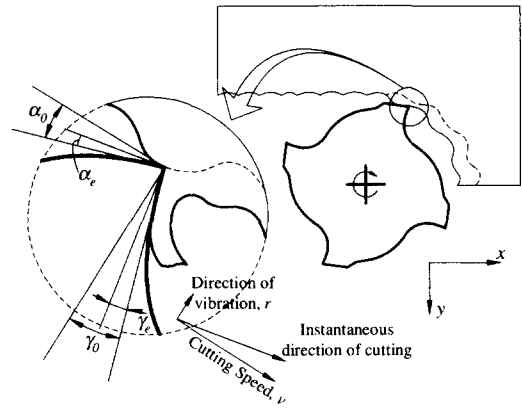


Fig. 5 Effective rake angle and clearance angle during end milling operation with vibration

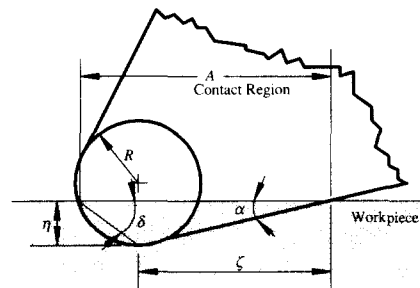


Fig. 6 Indentation of tool nose into workpiece

과 피삭재의 마찰 면적을 변화시키며, 절삭력의 비선형성을 증대시키는 경향을 갖는다. 또한 공구의 진동은, 표면조도와 공구 수명에 악영향을 끼치며, 채터링으로 발전하여 공구를 파손시키기도 한다. 실제 단속절삭에 의한 가진으로 발생하는 진동은 인선부와 피삭재의 압입과 탄성복원에 의한 댐핑 효과에 의하여 억제되는데, 이러한 인선부의 에너지 흡수 효과는 공구와 피삭재의 처짐에 의한 댐핑 효과보다 훨씬 크다<sup>(2)</sup>. Fig. 6 는 유한한 인선반경을 갖는 공구의 여유면이 표면에 압입되는 것을 그린 그림이다. 접촉 면적 A 와 최대 압입깊이,  $\eta$ , 는 공구 여유각과 플랭크 마모의 진전에 따라 크게 변화한다. 실제 전체 절삭력의 5% ~ 30% 정도에 이르는 플랭크 마모에 의한 절삭력의 증가는, 전적으로 공구 인선부의 압입량에 의하여 결정된다<sup>(3)</sup>.

### 5. 고속용 엔드밀의 특징

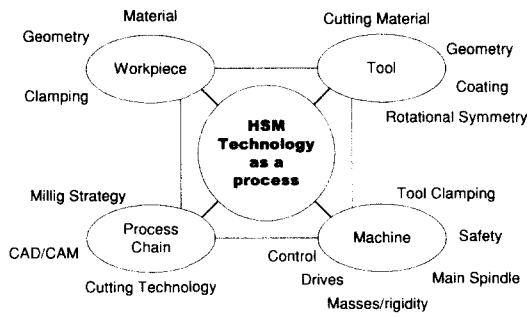


Fig. 7 Influencing factors and the environment of HSM processes

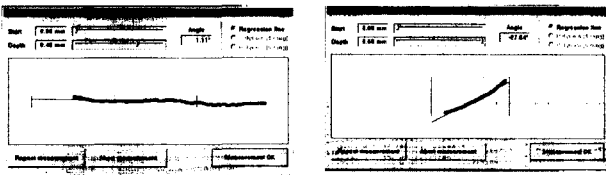


Fig. 8 Comparison of Rake angle with (a) dia.=10, teeth=2, (b) dia.=10, teeth=6

5.1 특징

고속가공기술은 기존의 가공기술의 한계를 극복하기 위하여 제안된 새로운 가공전략으로서, 고속의 주축회전수와 이송속도를 통하여 가공효율을 증가시킴과 동시에, 작은 절입량을 통하여 공구 수명을 유지하는 전략이다. 고속가공의 한계인 작은 절입량 때문에 실제 절삭작업시간은 기존의 가공에 비하여 증가하지만, 표면정밀도와 표면조도가 매우 우수하기 때문에 후처리공정이 대폭 절감되어 전체 생산시간과 생산비용을 크게 줄일 수 있을 것으로 기대되고 있다. 또한, H<sub>c</sub>C 60 이상의 고경도 금형강의 직접 절삭작업이 가능하며, 표면 변질층이 매우 작다는 점도 품질향상과 비용 감소를 가능케 하는 큰 장점이다. 이와 같은 고속가공을 위해서는 Fig. 7[5]와 같이 절삭에 관계되는 모든 생산요소의 설계 및 제작환경에 대한 재정립이 필요하며, 기존의 정적 강성에 대한 확보 개념에서 동적 안정성의 확보라는 측면을 대폭 고려하는 방향으로 개념의 전환이 이루어져야만 한다. 본 절에서는 공구의 측면에서 고속가공을 위한 공구의 특징에 대하여 소개한다.

엔드밀의 고속가공을 가능하게 하기 위해서 기

본적으로 요구되는 공구의 특성은 고온,고압 절삭 환경에서의 내마모성, 고온에서의 고경도와 높은 인성이며, 이와 같은 공구특성은 얼마나 고속으로 가공할 수 있는지를 결정하는 중요한 인자이다. 주축 회전수가 매우 클 경우, 공구의 밸런스 (balance)는 공구의 동적 안정성을 결정하는 가장 중요한 요소이다. 고속에서의 채터링 발생은 공구 파손 뿐 아니라 작업환경의 안전성에도 심각한 영향을 미치므로, 공구 및 홀더의 질량 편심은 최대한 억제되어야 한다. 이를 위하여 런아웃 및 질량 편심이 발생하지 않도록 공구를 설계, 제작하여야 한다. 가공시 발생하는 절삭력의 편차가 클 경우, 공구에 고주파의 가진효과를 가지기 때문에 안정성을 저해하는 요인이 된다. 따라서, 절삭력의 편차를 최소화할 수 있는 공구형상이 요구되며, 이에 대한 해결책으로는 날수의 증가와 헬릭스각의 증가를 통하여 가공에 참여하는 날의 수를 증가시키는 방법이 제시되고 있다.

공구의 파손을 방지하고, 동적 안정성을 증가시키기 위해서는 응력집중을 방지하고 공구 강성을 증가시킬 수 있는 단면 설계가 매우 중요하다. 플러트부(flute)와 생크부(shank)가 만나는 과도구간에서의 응력집중을 막아야만, 피로하중에 의한 공구 파손을 예방할 수 있다. 또한, 강성을 증가시키기 위하여 공구 연삭휠의 형상을 최적화해야 하며, 플러트부의 감소를 통하여 강성을 가능한 한 증대시켜야 한다. 또한, 공구의 인선부를 최대한 짧게 가공하여 강성을 최대한으로 유지해야만 하며, 공구의 전장착길이(overhang)도 가능한 한 짧게 유지하는 것이 안정적인 절삭에 도움이 된다.

그러나, 고경도 재료의 고속가공시에는 절입량이 매우 작으므로, 플러트부가 감소하더라도 칩배출에 큰 문제가 없지만, 알루미늄과 같은 쾌삭재의 고속가공시에는 칩배출량이 중요한 요소가 되므로, 각각의 목적에 적합한 공구를 따로 제작할 필요가 있다.

고속가공에서 발생하는 높은 충격력과 진동 및 열변화를 견디기 위해서는 공구의 인성을 증가시켜야 한다. 공구의 인성을 증가시키는 방법으로는 공구 경사각을 음의 값으로 하여 인선의 강성을 증대시키고 치핑의 발생을 억제하는 방안이 제시되고 있다. 또한 모재의 입자 크기(grain size)를 0.5 $\mu$ m 이하로 감소시킬 경우, 일반적인 입자크기를 사용한 공구에 비하여 인성이 50% 이상 향상

된다.

고속가공을 가능토록 하기 위해서는 고온에서 견딜 수 있는 코팅 재종이 필수적이다. 비록 고속가공에서 공구 상면 경사각에서의 접촉면적이 감소함에 따라 발생한 열의 대부분이 칩과 함께 배출된다 하더라도 고온에서의 내마모성과 고경도의 확보는 매우 중요하다. 현재, 생산되고 있는 고속가공용 공구는 모두 TiAlN 코팅을 채용하고 있으며, TiN 코팅에 비하여 고온에서의 내마모성과 마찰특성이 매우 우수하다.

**5.2 고속용 Endmill 형상**

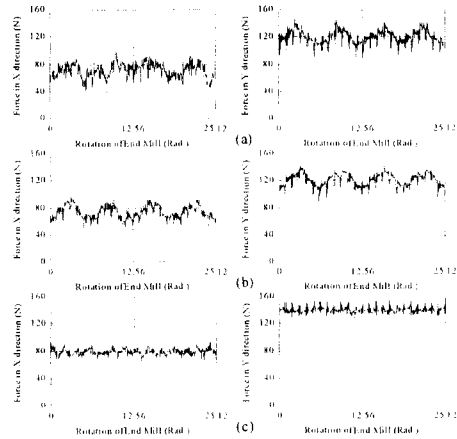
엔드밀에 있어서 일반용엔드밀과 고경도강용엔드밀의 가장 큰 차이는 Fig. 8 에서 보듯이 공구 경사각의 감소로 인한 강성의 증가를 들수 있다. (a)는 2 날이며 양의 경사각을 가짐을 알수 있고, (b)는 6 날을 가진 고속용엔드밀로서 음의 방향으로 상당히 큰 값을 가지는 것을 확인할수 있다. 특히 공구경사각과 여유각이 절삭시 미치는 영향을 이해하기 위해서 여러각도에서의 공구경사각과 여유각을 가진 엔드밀을 제작하여 관찰하였다.

**5.2.1 공구 경사각에 따른 절삭 거동의 변화**

고강성의 소재를 고속에서 절삭하는 경우 충격으로 인한 크랙이나 치핑이 발생하기 쉽다. 이를 견디기 위하여 공구는 큰 음의 경사각을 가지도록 제작되었다. Fig. 9 과 Fig. 10 는 공구 경사각을 -7°에서 -17°로 변화시키면서 동일한 절삭조건하에서 실험을 수행한 결과이다. 절삭실험 결과로부터 공구 경사각의 감소는 이송분력과 배분력을 증가시키고, 절삭력의 증가로 인하여 표면 오차도 증가하는 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 소재의 경도나 절삭 속도에 따라서 최적의 공구 경사각은 변화하게 되는데, 공구 수명의 관점에서는 공구 경사각이 작을수록 충격에 강하고, 가공 오차의 측면에서는 공구 경사각이 클수록 정밀한 표면을 얻을 수 있다.

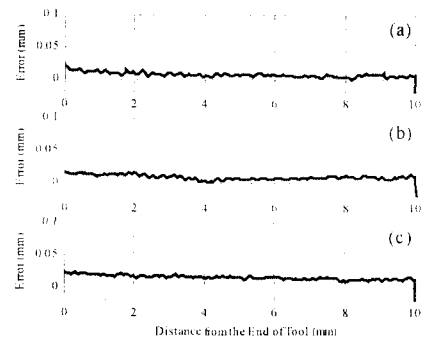
**5.2.2 공구 여유각에 따른 절삭거동의 변화**

Fig. 11 와 Fig. 12 은 공구 여유각을 4°에서 12°로 변화시키면서 동일한 절삭 조건에서 가공을 수행한 실험결과이다. 이 때, 실험 (a),(b)에서는 인선부 길이가 25mm, 실험 (c),(d)에서는 인선부의 길이를 20mm 로 변화를 주었다. 여유각의 감소는 공구 여유면과 피삭재의 마찰면적을 증가시키고, 이로 인



(a) : rake angle = -7°; (b) : rake angle = -12°  
(c) : rake angle = -17°

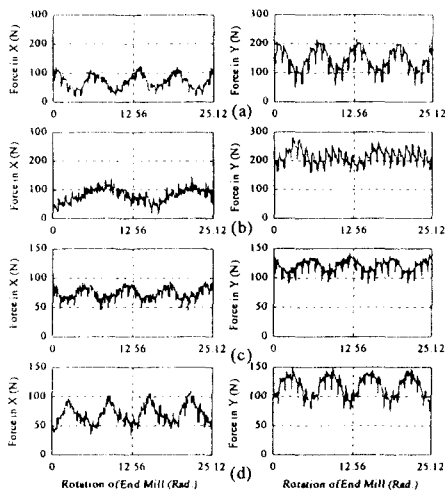
Fig. 9 Comparison of experimented cutting force with various rake angle (cutting tool geometry : heilx angle = 45°, diameter = 10mm, clearance angle = 10°, tooth = 6, material : workpiece = SKD11, H<sub>v</sub>C = 45, cutting condition : axial depth of cut = 10mm, radial depth of cut = 0.2mm, feed rate = 0.03mm/tooth, cutting speed = 2400rpm)



(a) : rake angle = -7°; (b) : rake angle = -12°  
(c) : rake angle = -17°

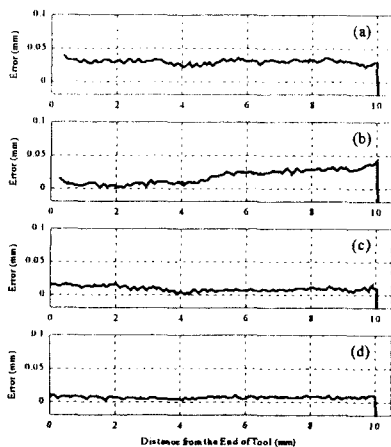
Fig. 10 Comparison of experimented surface accuracy with various rake angle (same cutting condition)

한 마찰 저항의 증가는 절삭저항의 증가로 이어진다. 이러한 마찰 저항으로 인하여 (b)의 절삭저항은 (a)에 비하여 50% 가량 증가했으나, (c)의 경우에는 여유각이 이미 작기 때문에 여유각을 증가시키더라도 절삭 저항은 (d)에서 볼 수 있듯



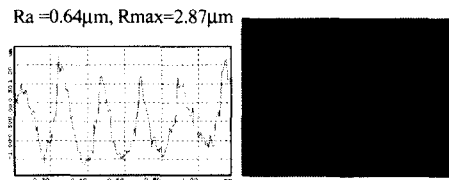
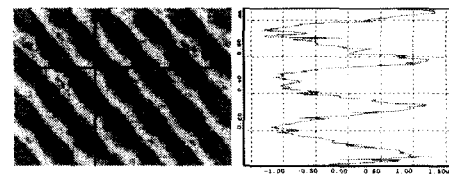
(a) : clearance angle =  $8^\circ$  (b) : clearance angle =  $4^\circ$   
 (a,b) : length of tooth = 25mm  
 (c) : clearance angle =  $8^\circ$  (d) : clearance angle =  $12^\circ$   
 (c,d) : length of tooth = 20mm

Fig. 11 Comparison of experimented cutting force with various clearance angle (cutting tool geometry : helix angle =  $45^\circ$ , diameter = 10mm, rake angle =  $-12^\circ$ , tooth = 6, material : workpiece = SKD11,  $HRC = 45$ , cutting condition : axial depth of cut = 10mm, radial depth of cut = 0.2mm, feed rate = 0.03mm/tooth, cutting speed = 2400rpm)



(a) : clearance angle =  $8^\circ$  (b) : clearance angle =  $4^\circ$   
 (a,b) : length of tooth = 25mm  
 (c) : clearance angle =  $8^\circ$  (d) : clearance angle =  $12^\circ$   
 (c,d) : length of tooth = 20mm

Fig. 12 Comparison of experimented surface accuracy with various clearance angle (same cutting condition)



(a) clearance angle :  $8 \text{ deg.}$

(b) clearance angle :  $12 \text{ deg.}$

Fig. 13 Comparison of experimented surface roughness with various clearance angle

이 크게 증가하지 않았다. (b)와 같이 여유각이  $4^\circ$ 로 매우 작을 경우, 표면과의 간섭으로 인한 chatter가 발생하여 절삭력이 매우 불균일하게 발생하였으며, 표면의 품질도 매우 불량하였다. Fig. 11 (d)의 경우 여유각의 증가로 인하여 절삭저항은 약간 감소했으나, 날부의 댐핑 효과의 감소로 인하여 진동이 약간 증가했고, 인선부의 인성 감소와 진동으로 인하여 표면조도가 Fig. 13 과 같이 악화되었으며, 공구 수명 단축이 나타났다.

### 5.2.3 인선부 길이에 따른 절삭거동의 변화

Fig. 11 와 Fig. 12 에서 (a),(c)의 공구는 인선부의 길이를 제외하면 전체 공구 길이를 포함한 모든 절삭조건이 동일하다. 그러나, 평균 절삭력은 이송분력 방향으로 약간 감소하고 배분력 방향으로 약간 증가했으며, 절삭력의 진폭은 인선부의

길이가 5mm 더 긴 (a)의 경우가 세 배 가량 증가한 것을 관찰할 수 있다. 또한, 가공 오차의 경우에도 크게 악화되었다.

이는 인선부 길이의 증가에 따른 공구 강성의 저하에 기인한다. flute 부의 강성은 shank 부에 비하여 공구 형상에 따라 70~85%정도이므로, 인선부의 길이가 길수록 공구 강성은 크게 떨어진다[4]. 이러한 강성의 저하는 공구의 변형량을 증가시켜 표면 오차에 직접적인 영향을 준다.

#### 5.2.4. 절삭 속도에 따른 절삭 거동의 변화

Fig. 14 은 절삭속도를 1200rpm 에서 6000rpm 까지 증가시키면서 동일한 절삭조건에서 절삭실험을

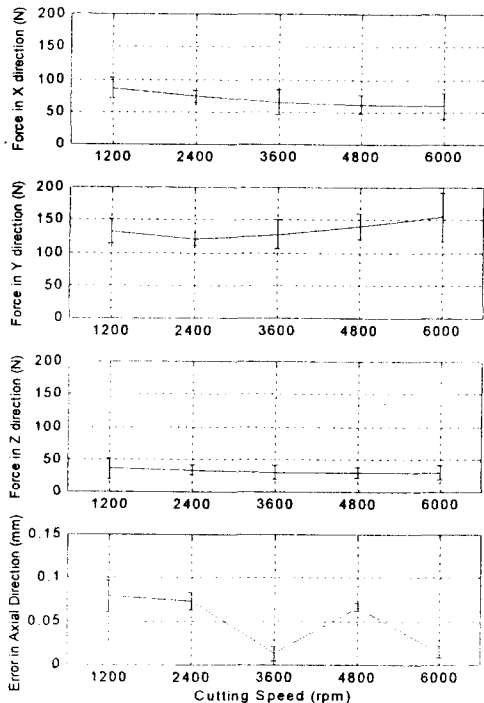


Fig. 14 Comparison of mean value and standard deviation using experimented cutting force and surface accuracy with various cutting speed (cutting tool geometry : heilx angle = 45°, diameter = 10mm, rake angle = -12°, clearance angle = 8°, number of tooth = 6, material : workpiece = SKD11, H<sub>R</sub>C = 45, cutting condition : axial depth of cut = 10mm, radial depth of cut = 0.2mm, feed rate = 0.03mm/tooth)

수행한 결과이다. 절삭속도의 증가에 따라 이송방향과 축방향의 절삭력은 감소하는 경향을 보이고, 공구의 진동으로 인한 절삭력의 진폭은 조금씩 증가하는 증가하는 경향을 보인다. 배분력은 2400rpm 에서 가장 작은 값이었다가 속도가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. 이러한 변화는 전단변형률의 증가에 따른 고온 발생과 그에 따른 전단각의 감소에 기인한다[5].

가공 오차 측면에서는 절삭속도가 클수록 진폭도 또한 개선되는 경향을 보이고, 표면 조도 또한 개선되는 경향을 보이는 것을 관찰할 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 엔드밀을 이용한 정밀가공을 위한 기초연구로서 엔드밀의 단면형상이 공구의 강성과 가공성능에 미치는 영향을 해석하였다. 절삭공정 시뮬레이션 프로그램의 개발을 다양한 절삭변수들이 가공에 미치는 영향을 효율적으로 분석할 수 있는 기반을 마련하였으며, 이를 통하여, 공구형상이 절삭공정에 미치는 영향을 분석하였다. 엔드밀의 절삭공정에 대한 기초 연구를 기반으로 하여, 최근 각광을 받고 있는 고속가공에 적합한 엔드밀의 형상에 대하여 기술하였다.

특히 다양한 형상의 공구에 대한 절삭실험을 통하여 공구형상 (공구 경사각, 공구 여유각, 인선부 길이) 와 절삭속도가 공구의 절삭 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 공구 경사각의 감소는 전단저항을 증가시켜 절삭력과 진동 및 가공오차를 증가시키며, 인선부의 인성을 증가시킨다.

공구 여유각의 증가는 여유면의 마찰면적을 감소시켜 절삭저항을 감소시키지만, 인선부의 댄핑효과를 떨어뜨려 동적 안정성이 악화된다. 인선부의 길이는 공구 강성과 가공오차에 직접적인 영향을 미치므로 최대한 짧게 설계할 필요가 있다. 가공시에도 공구 길이를 최대한 짧게 장착하는 것이 가공 정밀도 측면에서 바람직하다. 절삭속도의 증가는 절삭력의 방향에 영향을 미치며, 표면조도나 가공정밀도를 개선시키는 효과가 있다.

## 참고문헌

1. Yoshida Fujii, Hiroyasu Iwabe, "Cross Sections and Flexural Rigidity of Helical End Mills," JSPE, Vol.

- 49, No. 6, pp. 45-50, 1983.
2. 이상규, 고성립, “신경망을 이용한 엔드밀의 정적 강성 결정,” 한국정밀공학회지, 제 14 권, 제 12 호, pp. 143-152, 1997.
  3. 이상규, 고성립, “엔드밀 가공시 표면형성 예측을 통한 정밀가공에 관한 연구,” 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 4 호, pp. 229-236, 1999.
  4. M.E. Martellotti, “An Analysis of the Milling Process,” trans. of the ASME, Vol. 63, pp. 667-700, 1941.
  5. A. Reuteler, Cutting Tool Technology in High-Speed Milling(HSM), FRAISA SA, 1997.
  6. Elanayar, S., Y. C. Shin, “Modeling of Tool Forces for Worn Tools : Flank Wear Effects,” J. of ASME, Vol. 118, pp. 359 – 366, 1996.
  7. Ranganath, S. et al., “The Role of Flank Face Inteference in Improving the Accuracy of Dynamic Force Predictions in Peripheral Milling,” J. of ASME, Vol. 121, pp. 593 – 599, 1999.
  8. Mei, Z. et al. “Active Chatter Suppression by On-Line Variation of the Rake and Clearance Angles in Turning – Principles and Experimental Investigations,” Int. J. of Mach. Tools Manufat. Vol. 34, No. 7, pp. 981 – 990, 1994.