

## 고속용 엔드밀 가공 시 여유각을 고려한 가공특성

고성림, 박정남(건국대학교 기계설계학과), 김경배, 서천석(한국야금㈜)

### Machining Characteristics in High Speed Endmill Operation considering Clearance angle

Sung Lim Ko, Joung Nam Park ( Mechanical Design and Production Dep. K KU ), Kyung Bae Kim, Chuon Seok Seo( Korloy Co )

#### ABSTRACT

The objective of this research is to investigate the effect of clearance angle on cutting performance in high speed endmilling. The tool geometry parameters and cutting process have complex relationship. In order to explain the effect of clearance angle and exist the optimal clearance angle according to the diameter, Using various tool with different clearance angle, numerous cutting tests (cutting force, surface accuracy, too life )was undertaken to show the relationship between clearance angle and cutting process.

**Key Words :** tool geometry (공구 형상), Cutting force (절삭력), clearance angle (여유각), tool life (공구수명), endmill (엔드밀)

#### 1. 서론

엔드밀은 산업현장에서 정밀금형이나 다이 제조 시 넓게 사용되는 절삭 공구이며 공작기계의 향상에 따라 발전을 함께 거듭해 왔다. 공작기계의 고속화에 따라 공작기계의 측면에서는 강성 증가, 열변형의 억제와 동적 안정성의 개선 및 응답성 개선을 통해 정밀도를 개선시키고 이송속도와 절삭속도의 증가를 통하여 생산성을 증대 시키고 있고 공구의 측면에서는 새로운 재종 및 코팅기법의 개발을 통해 공구수명의 향상을 달성하고 있다. 또한 공구형상의 최적화를 통해 동적 안정성을 확보하고 가공 정밀도를 개선하고자 하는 다양한 시도가 이루어지고 있다.

기존의 연구에서는 엔드밀의 여유각 형상이 절삭수행에 중요한 영향을 미치는 것에 대해 연구하였다. 여유각의 차이가 공구의 수명에 영향을 미치며 절삭조건에 따라 최적 여유각의 존재함을 실험을 통해 확인하였다[1,2,3].여유각과 경사각에 따라 표면 조도에 큰 영향을 미침과 런아웃에 대한 error

를 보정하여 모델링 하였다[4].선반에서의 피삭재의 직경에 따른 여유각의 영향을 연구하였다[6]. 국내에서는 다양한 설계변수에서의 절삭성능의 관계를 연구하였다[7,8].

본 연구에서는 다양한 피삭재에서 공구 형상 중 여유각의 변경을 통한 절삭성능의 변화와 수명의 변화를 평가하였다.

#### 2. 공구형상과 절삭거동의 관계

##### 2.1 여유각의 정의 및 형상

여유각이란 절삭 시 경사각과 함께 매우 중요한 요소로서 경사각은 실제 절삭에 참여하는 각으로서 평균 절삭력의 크기를 결정한다.여유각의 크기는 공구인선에 의해서 가공 시 피삭재와 접촉함으로써 가공면의 조도와 공구마모에 따른 접촉면의 증가로 인하여 공구수명에 큰 영향을 끼친다. 일반적으로 산업현장에서는 여유면을 가공을 위하여 concave 와 eccentric 방식을 사용한다(Fig 1).

concave 방식은 가공은 쉬우나 공구인선이 취약

하여 수명이 문제가 되기 때문에 주로 eccentric 방식으로 가공된다.

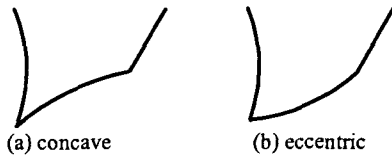


Fig.1 Geometrical shape of clearance Surface

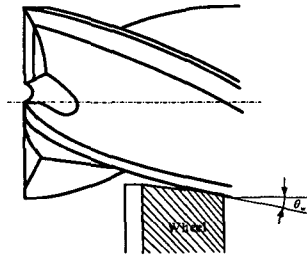


Fig. 2 Method of generating an eccentric clearance surface by grinding tool

Fig.2는 eccentric 방식에 의한 여유면 가공방법을 나타내고 있다. 여유면형성을 위하여 경사각이  $\theta_w$  인 연삭숫돌을 사용한다. 이 경우에는 여유면형상을 계산을 통하여 얻을 수 있는데 공구중심, O,로부터 여유면의 임의의 점, C,까지의 거리,  $\overline{oc}$ ,와 날끝과 이루는 각도,  $\theta$ ,와의 관계는 다음과 같다.

$$\overline{oc} = R - R \frac{\tan \theta_w}{\tan \theta} \cdot \sin \theta$$

이 관계를 이용하여 원하는 여유각,  $\beta$ ,를 얻기 위하여 사용될 연삭숫돌 경사각,  $\theta_w$ ,를 구할 수 있다. 여유각이  $10^\circ$ , 헬릭스각,  $h_a$ ,가  $25^\circ$ 라면 경사각,  $\theta_w$ ,가  $4.7^\circ$ 로 기울어진 연삭숫돌이 필요하다. 위 관계식으로부터 가공후 경사면 형상과 이상적인 여유각  $10^\circ$ 인 경우를 함께 비교하여 Fig.3에서 나타내었다.

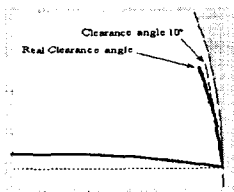


Fig.3 Simulation of generation of clearance surface

## 2.2 탄성 복원을 고려한 절삭거동

엔드밀의 절삭을 2 차원 절삭으로 단순화한 Fig.4는 절삭 시 탄성영역을 고려한 그림이다. 절삭 시 대부분의 chip 의 흐름은 경사면을 따라 흐르지만 micro chip 이 남아서 표면을 문지르는 효과 (burnishing)를 발생하고 그 결과에 의해 탄성복원이 발생한다.

이와 같은 탄성복원의 양은 chip 으로 흘러가지

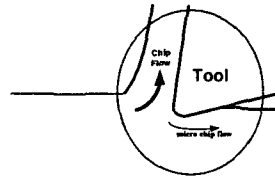


Fig. 4 Chip flow around cutting edge

못한 부분이 공구 날 끝을 거쳐서 소성변형후 공구가 통과한 후 하중이 제거되면서 표면으로 유입된 양에 의해 탄성복원이 발생한다.

그러므로 공구인선부의 반경이 클수록 이 양이 증가하며 이로 인하여 정밀가공이 어렵게 된다. 반대로 공구인선이 예리 할수록 이 양은 감소하며 정밀가공이 가능하게 된다.

이때 여유각이 작은 경우에는 탄성복원 후 마찰면에 증가하여 마모증가가 빠를 것으로 예상되며 반면 여유각이 큰 경우에는 마찰면이 감소할 것이다. 여유면은 절삭 직후 탄성복원에 의해 피삭재와 마찰에 의해 공구수명의 일반적 기준인 Flank 마모가 발생한다.

Kobayashi[5]는 인위적인 플랭크 마모면을 형성하여 선삭 가공시 주분력과 배분력이 마모폭의 증가에 따라서 선형적으로 증가함을 실험적으로 증명하였다. 그러므로 여유각이 작은 여유면의 경우 프랭크마모의 증가에 따른 절삭력의 증가로 가공면 조도의 불량과 정밀도 저하를 초래함으로써 공구수명이 짧아짐을 예상할 수 있다. 또한 여유각의 커짐에 따라서 마모폭의 증가는 다소 지연되지만 인선부가 취약해짐으로 인하여 치핑에 의한 공구수명 감소를 초래할 수 있다. 그러므로 주어진 절삭조건 하에서 공구수명을 위한 최적의 여유각의 크기가 존재함을 알 수 있다.

## 3. 엔드밀 가공에서의 여유각의 영향

### 3.1 절삭조건 및 장비

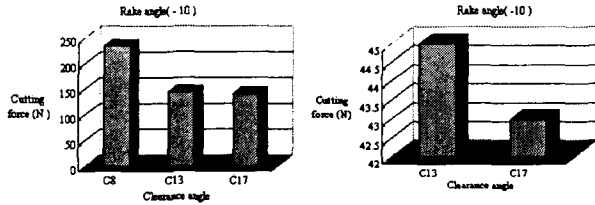
Table 1 Cutting condition for End milling according to diameter

D	AD	Rd	f	Rpm	V	F	Overhang
10	10	0.2	0.03	2400	75	432	3D
6	6	0.12	0.018	4000	75	432	4D

본 연구에서는 공구 형상과 절삭 공정에 관계에 대한 분석을 위하여 현대 정공의 SPT-V18S 머시닝 센터에서 Table 1 과 같은 조건하에서 측면 하향 절삭 가공을 수행한 후, Kistler 사의 9257B 와 전용 앰프를 사용하여 절삭력을 측정하였다. 사용된 피

삭재는 STD11(HRC 50)과 SCM 440 이다. 표면 정밀도의 측정을 위해 Kenence 의 Laser Sensor 를 이용하였다.

### 3.2 여유각에 따른 절삭 성능의 변화



(a) C.A in diameter 10 mm (b) C.A in diameter 6 mm  
Fig.5 Comparison of cutting force in end mills with various clearance angle

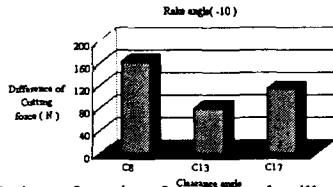


Fig.6 Variation of cutting force in end mills with various clearance angle

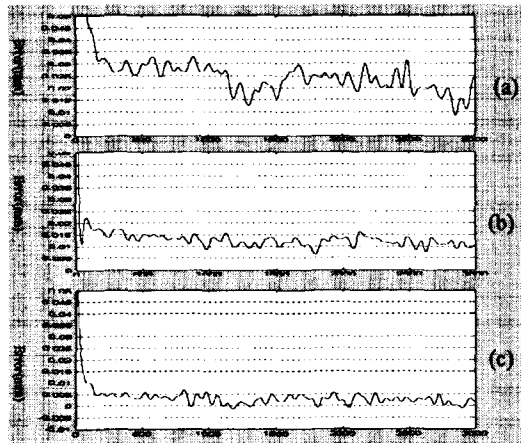
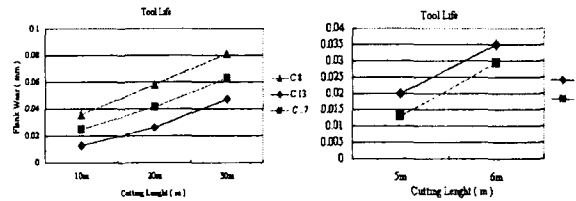


Fig. 7 Comparison of surface accuracy in end mills with various clearance angle and diameter 10mm (Tooth = 6, (a) C.A=8°, R.A=-10°, (b) C.A= 13°, R.A=-10°, (c) C.A=17°. R.A=-10°)

Fig. 5 에서는 직경이 10mm, 6 mm 일 때 경사각 -10°로 일정하게 하고 여유각을 변화시켜 평균 절삭력을 나타낸 그림이다. 직경의 변화에 관계없이 여유각이 증가 할수록 절삭력이 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 직경의 변화에 관계없이 절삭력을 감소하기 위해서는 여유각이 커져야 한다는 것을 알 수 있다. 이는 경사각이 일정한 경우 여유각이 커질수록 날 끝의 강도는 작아지지만 피삭재의 탄성복원의 영향을 적게 받아 좋은 절삭성능이 가질 수 있다.

Fig. 6 은 직경 10 에서의 여유각의 영향에 의한 절삭 진폭의 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 여유각이 감소하면 피삭재와 닿는 면적이 증가하여 진동이 발생하나 여유각이 적정수준보다 더 클 경우 날부의 강성이 떨어져 또한 진동이 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

Fig. 7 은 피삭재 STD11 에서 엔드밀의 가공성능 중에서 중요한 요소 중 하나인 가공정밀도를 측정 한 결과이다. Fig.5 (a)에서 사용한 동일한 직경 10mm 엔드밀을 사용하여 경사각이 -10°로써 일정할 때 여유각을 증가시켜 실험을 하였다. 여유각이 증가할수록 가공정밀도가 좋아짐을 알 수 있다. 이는 여유각이 작아질수록 피삭면에 닿는 여유면의 증가로 인한 탄성 절삭저항으로 가공정밀도가 나빠짐을 알 수 있다.



(a) Diameter 10 mm (b) Diameter 6 mm  
Fig.8 Comparison of tool wear in end mills with various clearance angle ( fixed rake angle -10° )

Fig.8 여유각의 변화에 따른 공구 수명실험 결과 이다. 일정한 경사각 -10°에서 동일하게 여유각을 변경시켜 공구수명의 결과를 관찰하였다. 직경 10mm 에서는 13° 인 경우에 가장 우수한 공구수명을 나타낸 반면, 직경 6mm 에서는 여유각이 17°에서 마모가 감소함을 알 수 있다. 이는 직경 10mm 에서는 여유각 17° 에서는 절삭성능은 좋으나 공구 끝 날 강도가 작아져 미소 칩핑에 의해 마모가 증가되었고 직경 6mm 에서는 여유각 13° 에서는 공구의 여유면이 절삭 시 피삭재와의 접촉면적이 넓어 마찰에 의한 마모가 진행되었다. 직경 10mm 에서는 경사각이 -10° 일때 13°에서 직경 6mm 에서는 여유각이 17°에서 가장 우수한 공구수명을 나타냄을 알 수 있다. 이는 공구 직경에 따라서 최적의 여유각이 존재함을 알 수 있다.

Table 2 Cutting condition for high speed End milling

D	Ad (mm)	Rd (mm)	Fz (mm/tooth)	V (m/min)	Rpm	F (mm/min)
10	10	0.5	0.03	188	6000	1080
6	6	0.3	0.01	188	10000	600

Table 2 는 고속 가공의 절삭조건이며 Fig. 9 은 그 실험조건 하에서의 공구수명의 결과값을 보여주고 있다. 경사각을 -10° 으로 고정하여 고속가공시 직경 10mm 에서는 여유각이 13°에서 가장 우수한

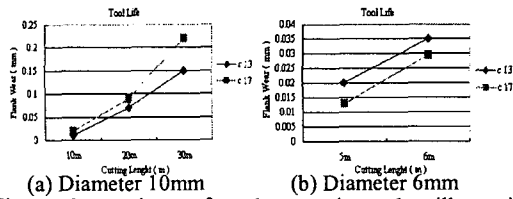


Fig 9 Comparison of tool wear in end mills various clearance angle in high speed machining( fixed rake angle  $-10^\circ$  )

반면 직경 6 mm 에서는 17°에서 우수한 동일한 결과값을 보여주고 있다. 이 결과는 머시닝센터에서의 가공조건에서의 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있음을 나타낸다.

### 3.3 피삭재에 따른 여유각의 영향

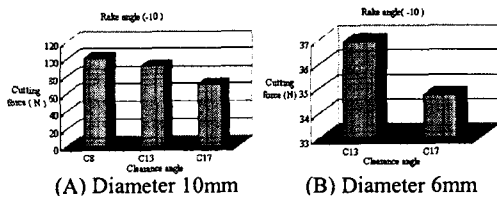


Fig.10 Comparison of cutting force in end mills with various clearance angle in SCM 440

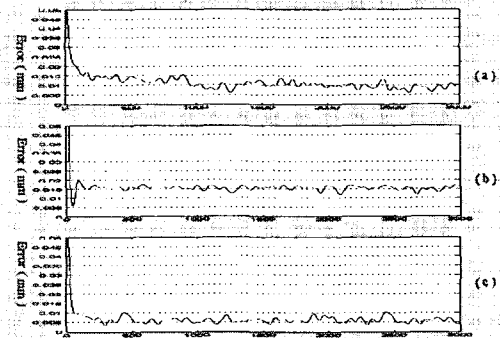


Fig. 11 Comparison of surface accuracy in end mills with various clearance angle and diameter 10mm in SCM 440(Tooth = 6, (a) C.A=8°, R.A=-10°, (b) C.A= 13°, R.A= -10°, (c) C.A=17°, R.A= -10°)

Fig.10 과 Fig.11 은 피삭재를 HRC 50 의 STD11 에서 SCM440 으로 변경하여 동일한 가공실험을 하였다. 피삭재의 영향으로 절삭력이 약 50% 감소하지만 여유각이 증가함에 따라 절삭력이 감소하는 경향은 같다. 또한 가공정밀도의 영향도 여유각이 증가함에 따라 가공정밀도가 좋아지는 것을 알 수 있다. 따라서 여유각의 영향은 피삭재에 따라 큰 차이가 없음을 알 수 있다

### 4. 결론

본 연구에서는 엔드밀의 형상 중 다른 설계 변

수는 고정하고 여유각의 설계변수를 변경하여 실제 절삭 성능의 영향을 관찰 분석하였다.

1. Hrc50 인 STD11 피삭재와 SCM 440 로 절삭 실험을 하여 직경 10mm 인 엔드밀과 직경 6mm 엔드밀에서 공구수명과 정밀도가 가장 우수한 최적 여유각이 존재함을 실험을 통하여 확인하였다.

2. 여유각의 감소는 절삭시 여유면의 참여가 많아져 절삭력이 증가하는 경향이 나타나며 표면조도와 정밀도가 불량해진다.

3. 여유각의 증가는 여유면의 마찰면적을 감소시켜 절삭저항을 감소시키지만, 인선부의 뎀핑효과를 떨어뜨려 동적안정성이 악화된다.

4. 직경이 작아질수록 적정 여유각은 큰 직경에 비하여 여유각이 증가하는 경향을 보인다

5. Machining Center 에서의 엔드밀의 가공성능 평가를 고속가공에서 적용 가능하다.

### 참고문헌

1. Kador, S., Trendler, P. H. H., and Hodgen, T., "Investigation Into the Clearance Geometry of End Mills," Annals CIRP, Vol. 33/1, p. 33, 1984.
2. Kador, S., Trendler, P. H. H., and Hodgen, T., "Investigation and optimization of the Clearance Geometry of End Mills," Annals CIRP, Vol. 34, p. 149, 1985.
3. Kador, S., " A Common Denominator for Optimum Cutting Tool Geometry," Annals CIRP, Vol. 35, No. 1, p. 41, 1986
4. S. N. Melkote, A. R. Thangaraj, " An Enhanced End Milling Surface Texture Model Including the Effects of Radial Rake and Primary Relief Angles", Transaction of the ASME, Vol. 116, May. 1994
5. S.Kobayasi, E.G.Thomsen "The Role of Friction in Metal Cutting", Transaction of the ASME, pp324-332, 1960.
6. IM. A. El Baradie, "The effect of varying the workpiece diameter on the cutting tool clearance angle in tool life testing" Wear 195, pp. 210~105, 1996
7. 배승민, 고성립, 2001, "고속가공용 엔드밀의 형상설계에 관한 연구," 한국정밀학회 2001 년도 추계학술대회 논문집 pp. 10~22
8. 강명창, 김정석, 2002. "고속가공용 엔드밀 형상 변화에 따른 가공성 평가," 한국정밀학회 2002 년도 5 월 한국정밀공학학회지 PP133~138