

고속 가공용 엔드밀의 형상설계에 관한 연구

이상규*, 배승민(건국대 대학원 기계설계학과), 고성림(건국대 기계설계학과),
김경배, 서천석(한국야금)

Study on the Design of End Mill Geometry for the High Speed Machining

Sang-Kyu Lee*, Seung-Min Bae(M.D.P.E. Dept., KGU), Sung-Lim Ko(M.D.P.E. Dept. KGU),
Kyung-Bae Kim, Chuon-Seok Seo(Korloy Inc.)

ABSTRACT

The tool geometry parameters and cutting process have complex relationships. Until now, numerous cutting tests were needed to acquire optimal design of end mill for the purpose of high speed machining, due to the insufficient knowledge about cutting process in high speed machining. Using various tools with different geometry, relationships between tool geometry parameter (rake angle, clearance angle, length of cutter) and cutting process (cutting force, surface accuracy, surface roughness) have been studied. Acquired data can be used to design optimal tool for high speed machining.

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 재종 및 코팅기법의 개발에 의한 절삭속도의 고속화를 통하여 생산성의 향상을 달성하고 있고, 공구 형상의 최적화를 통하여 동적 안정성을 확보하고 가공 정밀도를 개선하고자 다양한 시도가 이루어지고 있다.

고속의 절삭속도와 작은 절입량을 특징으로 하는 고속가공은 공구의 동특성이 공구의 수명과 가공물의 품질에 절대적인 영향을 미치기 때문에, 공구 형상설계에 있어서 동특성을 고려한 적절한 설계 기준을 확립할 필요가 있다.

본 연구에서는 공구 경사각, 여유각, 날부 길이, 헬릭스 각 등이 절삭에 미치는 영향에 대하여 분석

하고, 형상 설계의 기초 자료를 제시한다. 이와 같은 절삭 거동에 대한 심도 깊은 이해를 통하여 공구 설계 단계에서의 비용 절감과 함께, 최적의 절삭 공구 형상 설계를 가능케 한다.

2. 공구 형상과 절삭거동과의 관계

2.1 형상에 따른 공구의 동적 거동 특성

엔드밀링 가공시 단속절삭에 의해 발생하는 절삭력은 공구의 진동을 유발한다. 진동으로 인하여 공구와 피삭재 사이의 상대 속도가 변화하면, Fig. 1과 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, 초기의 공구 경사각, γ_0 , 과 공구 여유각, α_0 , 은 진동에 의하여 유효 경사각, γ_e , 과 유효 여유각, α_e , 으로 변화한다 [1]. 진동이 커질수록 $\dot{r}(t)$ 이 커지므로, 경사각과 여유각에는 더 큰 변화가 발생한다. 이러한 유효 경사각과 유효 여유각의 변화는 공구 여유면과 피삭재의 마찰 면적을 변화시키며, 절삭력의 비선형

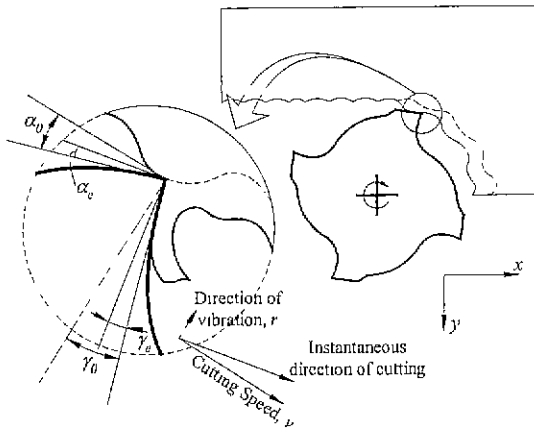


Fig. 1 Effective rake angle and clearance angle during end milling operation with vibration

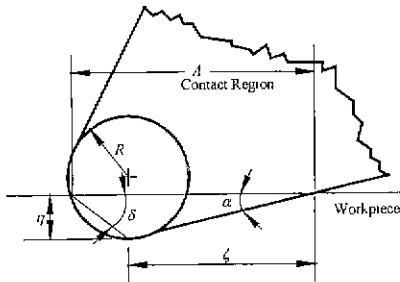


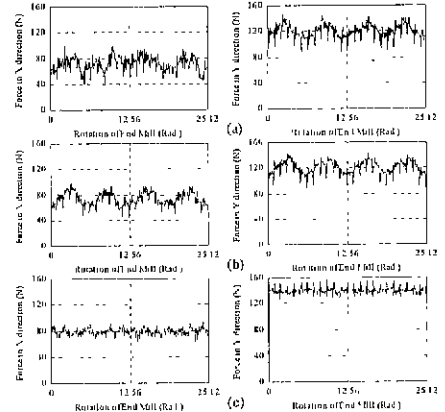
Fig. 2 Indentation of tool nose into workpiece

성을 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[2]

Fig. 2 는 유한한 인선반경을 갖는 공구의 여유면이 표면에 압입되는 것을 그린 그림이다. 접촉면적 \$A\$ 와 최대 압입깊이, \$\eta\$, 는 공구 여유각과 플랭크 크 마모의 진전에 따라 크게 변화한다 실제 전체 절삭력의 5% ~ 30% 정도에 이르는 플랭크 마모에 의한 절삭력의 증가는, 전적으로 공구 인선부의 압입량에 의하여 결정된다[3].

공구 형상과 절삭 공정과의 관계에 대한 분석을 위하여 본 연구에서는 다양한 형상의 공구를 이용하여 현대정공의 SPT-V18S 머시닝 센터에서 측면 하향 절삭 가공을 수행한 후, Kistler 사의 9257B 와 전용 애플을 사용하여 절삭력을 측정하였다. 사용된 피삭재는 H_RC45 로 열처리된 SKD11 이다. 표면 조도의 측정에는 Intek plus 의 Accura 를 사용하였고,

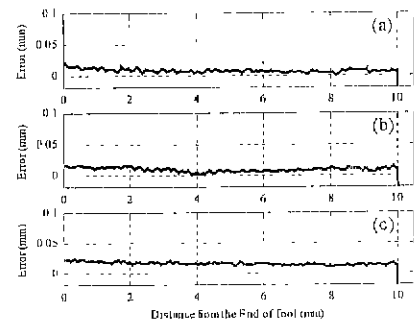


(a) : rake angle = -7° ; (b) : rake angle = -12°
(c) : rake angle = -17°
Fig. 3 Comparison of experimented cutting force with various rake angle (cutting tool geometry : helix angle = 45° , diameter = 10mm, clearance angle = 10° , tooth = 6, material workpiece = SKD11, H_RC = 45, cutting condition : axial depth of cut = 10mm, radial depth of cut = 0.2mm, feed rate = 0.03mm/tooth, cutting speed = 2400rpm)

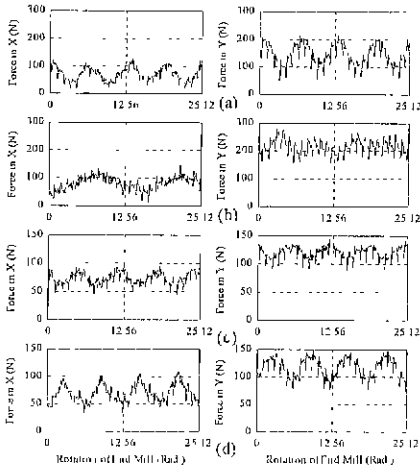
표면 정밀도의 측정을 위해서는 Kleyence 의 Laser Sensor 를 이용하였다.

2.2 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. 3 과 Fig. 4 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

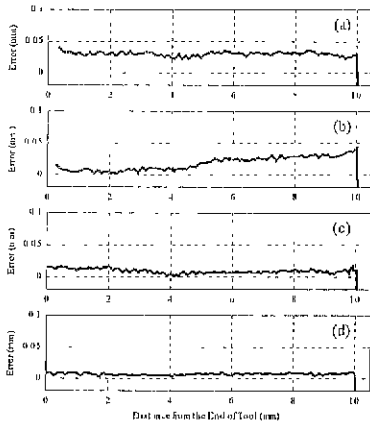


(a) rake angle = -7° ; (b) : rake angle = -12°
(c) rake angle = -17°
Fig. 4 Comparison of experimented surface accuracy with various rake angle (same cutting condition)



(a) clearance angle = 8° (b) : clearance angle = 4°
 (a,b) : length of tooth = 25mm
 (c) : clearance angle = 8° (d) . clearance angle = 12°
 (c,d) : length of tooth = 20mm

Fig. 5 Comparison of experimented cutting force with various clearance angle (cutting tool geometry : helix angle = 45°, diameter = 10mm, rake angle = -12°, 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)



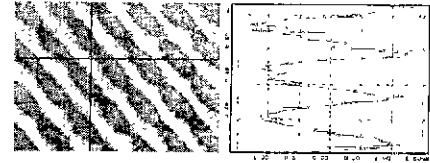
(a) . clearance angle = 8° (b) : clearance angle = 4°
 (a,b) length of tooth = 25mm
 (c) : clearance angle = 8° (d) : clearance angle = 12°
 (c,d) · length of tooth = 20mm

Fig. 6 Comparison of experimented surface accuracy with various rake angle (same cutting condition)

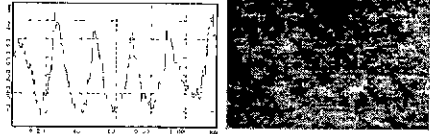
되는데, 공구 수명의 관점에서는 공구 경사각이 작을수록 충격에 강하고, 가공 오치의 측면에서는 공구 경사각이 클수록 정밀한 표면을 얻을 수 있다.

2.3 공구 여유각에 따른 절삭거동의 변화

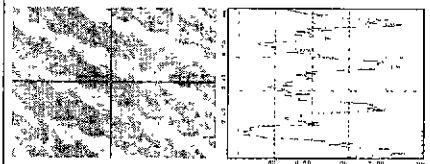
Fig. 5 와 Fig. 6 은 공구 여유각을 4°에서 12°로



Ra =0.64um, Rmax=2.87um



(a) clearance angle . 8 deg.



Ra =0.78um, Rmax=4.20um

(b) clearance angle . 12 deg.

Fig. 7 Comparison of surface with various rake angle (length of tooth = 20mm, same cutting condition)

변화시키면서 동일한 절삭 조건에서 가공을 수행한 실험결과이다. 이 때, 실험 (a),(b)에서는 인선부 길이가 25mm 이고, 실험 (c),(d)에서는 20mm 이다.

여유각이 작아지면 공구 여유면과 피삭재의 마찰면적이 증가하고, 마찰저항과 진동이 증가하게 된다. Fig. 5 (b)는 (a)에 비해 절삭력과 진동이 크게 증가한 것을 관찰할 수 있는데, 이는 여유각의 감소에 따른 여유면에서의 마찰 증가에 기인한다.

Fig 5 (d)와 같이 여유각이 12°로 증가했을 경우 (c)에 비하여 절삭저항의 감소는 크지 않고 진동이 증가한 것을 관찰할 수 있는데, 이는 여유각의 증대에 따라 여유면의 댐핑 효과가 감소하기 때문이다. 여유각의 증가가 절삭력에 별 영향을 미치지 못하고 진동을 증가시킬 경우, 표면의 가공 품질은 Fig. 7 (b)과 같이 악화되었으며 인선부의 인성 감소와 진동으로 인하여 공구 수명도 단축되었다.

(b)와 같이 여유각이 4°로 매우 작을 경우, 표면과의 간섭으로 인한 채터링이 발생하여, 표면의 품질도 Fig. 6 (b)와 같이 매우 불량하였다.

2.4 인선부 길이에 따른 절삭거동의 변화

Fig. 5 와 Fig. 6 에서 (a),(c)의 공구는 인선부의 길이를 제외하면 전체 공구 길이를 포함한 모든 절

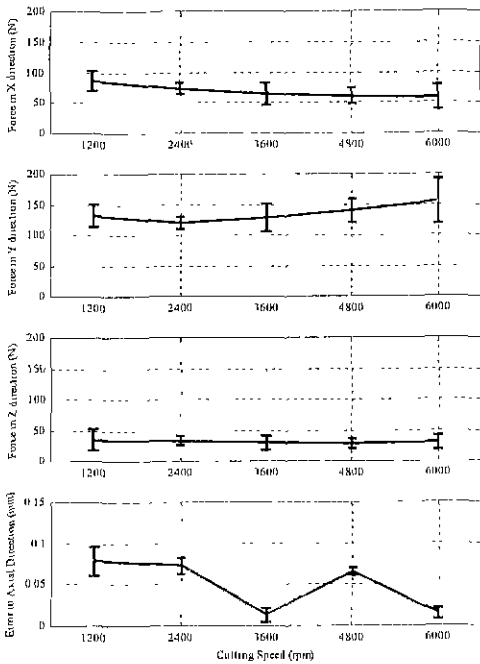


Fig 8 Comparison of mean value and standard deviation using experimented cutting force and surface accuracy with various cutting speed (cutting tool geometry : heilx angle = 45°, diameter = 10mm, rake angle = -12°, clearance angle = 8°, number of tooth = 6, material : workpiece = SKD11, H_RC = 45, cutting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

삭조건이 동일하다. 그러나, 평균 절삭력은 이송분력 방향으로 약간 감소하고 배분력 방향으로는 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.

3. 절삭 속도에 따른 절삭 거동의 변화

Fig. 8 은 절삭속도를 1200rpm 에서 6000rpm 까지 증가시키면서 동일한 절삭조건에서 절삭실험을 수행한 결과이다. 절삭속도의 증가에 따라 이송방향과 축방향의 절삭력은 감소하는 경향을 보이고, 공구의 진동으로 인한 절삭력의 진폭은 조금씩 증가

하는 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.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 형상의 공구에 대한 절삭실험을 통하여 공구형상 (공구 경사각, 공구 여유각, 인선부 길이) 와 절삭속도가 공구의 절삭 거동에 미치는 영향을 분석하였다

1. 공구 경사각의 감소는 전단저항을 증가시켜 절삭력과 진동 및 가공오차를 증가시키지만, 인선부의 인성을 증가시킨다.

2. 공구 여유각의 증가는 여유면의 마찰면적을 감소시켜 절삭저항을 감소시키지만, 인선부의 뒤펜 효과를 떨어뜨려 동적 안정성이 악화된다.

3. 인선부의 길이는 공구 강성과 가공오차에 직접적인 영향을 미치므로 최대한 짧게 설계할 필요가 있다. 가공시에도 공구 길이를 최대한 짧게 장착하는 것이 가공 정밀도 측면에서 바람직하다.

4. 절삭속도의 증가는 절삭력의 방향에 영향을 미치며, 표면조도나 가공정밀도를 개선시키는 효과가 있다.

참고문헌

1. Elanayar, S., Y. C. Shin, "Modeling of Tool Forces for Worn Tools · Flank Wear Effects", J. of ASME, Vol. 118, pp 359 - 366, 1996.
2. Ranganath, S. et al, "The Role of Flank Face Inteference in Improving the Accuracy of Dynamic Forec Predictions in Peripheral Milling". J. of ASME, Vol 121, pp 593 - 599, 1999.
3. 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.
4. 이상규, 고성림, "신경망을 이용한 엔드밀의 정적 강성 결정", 한국정밀공학회지, 제 14 권, 제 12 호, pp. 143 - 152, 1997
5. A. Reuteler, Cutting Tool Technology in High Speed Machinng(HSM), FRAISA SA, 1997