

고속가공용 엔드밀의 형상설계에 관한 연구(2)

고성립*, 배승민**, 이상규**, 김경배***, 서천석***

A study on the Design of Endmill Geometry in High Speed Machining

Sung Lim Ko*, Seung Min Bae**, Saun Ku Lee**, and Kyung Bae Kim***, Cheun Suk Seo***

ABSTRACT

The objective of this research is to use an analytical and experimental approach to develop optimal tool geometry for high speed machining. The tool geometry parameters and cutting process have complex relationships. Until now, numerous cutting tests were needed to acquire optimal design of endmill for the purpose of high speed machining, due to the insufficient knowledge about process in high speed machining. In order to improve the cutting ability of endmill, a model for optimal cutter shape was developed to minimize resultant cutting force by combining cutting force and wear test and surface roughness test from optimized and conventional cutter with the same cutting condition. Using various tools with different geometry, relationships between the tool geometry parameter, rake angle, clearance angle, length of cutter have been studied.

Key Words : tool geometry(공구형상), High speed machining(고속가공), cutting force(절삭력), surface roughness(표면조도), rake angle(공구경사각), clearance angle(여유각), end mill(엔드밀)

1. 서론

제조품은 제조공정에 의하여 그것의 형태 즉 error 와 surface finish 에 의하여 결정지어진다. 엔드밀은 제조업체에서 slot 이나 pocket, 정밀급형이나 다이를 만들기 위해 가장 넓게 사용되는 중요한 machining process 이다. 고속가공을 실현하기 위해서 주축 및 이송계의 고속화, 제어시스템, 가공 데이터의 전송, 공구경로결정, 절삭공구등 많은 문제를 해결해야 한다. 특히 절삭가공시 공구와 공작물간의 마찰로 인하여 온도상승이 심각하며, 절삭속도에 민감하여 가공속도를 증가시키면 시킬수록 온도가 상승하여 결국에는 피삭재의 용융점에 접근하게 된다. 그러므로, 고속가공을 가능케하기 위해서는 이런 극한 조건에서도 견디어 낼수 있는 공구의개발이 필수불가결하다. 공작기계의 측면에서는 강성증가, 열변형의 억제와 동적 안정성의 개선 및 응답성 개선을 통하여 가공 정밀도를 개선시키며, 공구 측면에서는 새로운 재종 및 코팅 기법의 개발에 의한 절삭속도의 고속화를 통하여 생산성의 향상을 도모하며, 특히 공구형상의 최적화를 통한 동적안정성과 가공정밀도를 개선한다. 그러므로 엔드밀의

성능의 극대화를 위한 최적설계는 엔드밀의 형상 정의로부터 출발하여 생산방법과 측정방법을 함께 고려하여 결정하여 이를 통한 절삭성능 시험에 의한 데이터베이스를 확보하여 공구 설계 단계에서의 비용절감과 함께, 최적의 절삭공구 형상설계를 가능케한다.

2. 고속용엔드밀의 형상 측정

2.1 전용 측정장비에 의한 형상측정

Fig 1 은 외경의 측정을 통한 reference angle 을 결정하는 그림이다. 외경을 측정하기 위하여 CNC 공구형상측정기 자체에서 광선이 툴부위를 비추면 광선은 한방향으로 비추게 되고 툴은 angle 를 측정하기 위해서 회전을 하게 된다. 따라서 Fig.1 에서 알수 있듯이 자체적으로 회전하면서 외경의 최대값을 찾음으로써 reference plane 을 결정한다. 또한 아래의 그림은 날끝에서 부터 지정된 지점까지 auto focusing 에 의한 line scanning 에 의하여 얻은 contour data 를 보여준다. 또한 지정된 지점까지의 data 를 이용한 linear interpolation 에 의해서 경사각을 결정하는 과정을 보여준다.

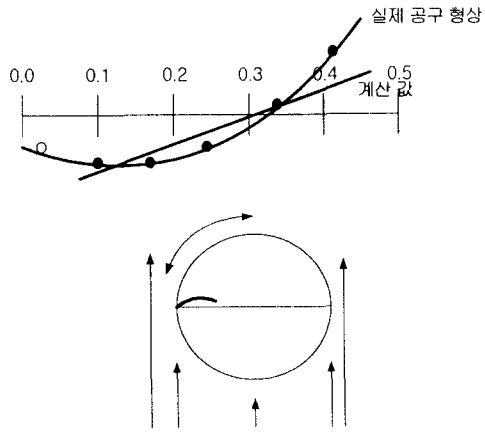


Fig. 1 The measurement of rake angle

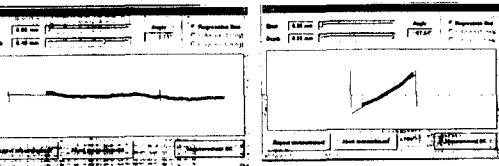


Fig. 2 Comparison of Rake angle with (a) dia.=10, teeth=2, (b) dia.=10, teeth=6

2.2 고속용 엔드밀과 일반용 엔드밀의 비교

고속가공용 엔드밀은 일반엔드밀에 비하여 날수가 많고, 내접원이 커서 강성이 매우 강하며, 공구경사각과 여유각의 크기 및 끝날의 형상 및 단면 형상이 인선강성 위주로 제작되어진다. 또한 고경도강이나 난삭재를 위한 용도로서 국한되어지며 특히 고속가공시 발생하는 열에 의한 공구의 마모를 최소화 하기위하여 재질적으로 초미립자 재종과 TiAlN 계의 박막을 적용하여 강성의 향상과 고온에서의 안정성을 높인다. Fig. 2 에서 고속용 엔드밀과 일반용엔드밀의 형상을 보여주며 측정장비에 의한 공구경사각의 차이를 보여준다.

3. 공구 형상과 절삭거동과의 관계

3.1 형상에 따른 공구의 동적 거동 특성

엔드밀링 가공시 단속절삭에 의해 발생하는 절삭력은 공구의 진동을 유발한다. 진동으로 인하여 공구와 피삭재 사이의 상대 속도가 변화하면, Fig. 3 과 같이 공구의 운동 방향을 변화시켜, 공구 경사

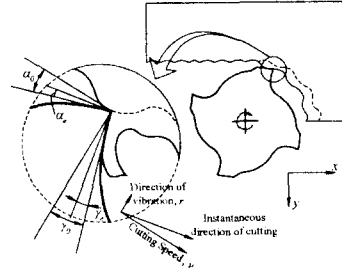


Fig. 3 Effective rake angle and clearance angle during end milling operation with vibration

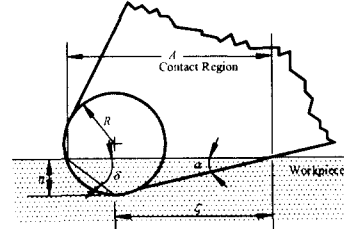


Fig. 4 Indentation of tool nose into workpiece

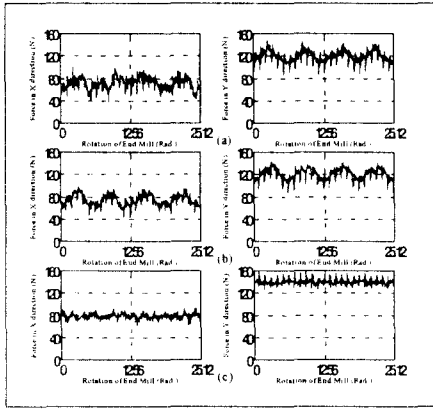
Table 1 The comparison between conventional and HSM Eedmill

	일반용엔드밀	고속용엔드밀
날수	2~4	6 날이상
공구경사각	positive	negative
여유각	11~14	4~10
Helix angle	30	45~55
재종	하이스	초미립자 WC
코팅	Ti 계열	TiAlN 계열

Table 2 Cutting condition with SKD11, Hrc 50 (f: mm/tooth, V: m/min, F: mm/min)

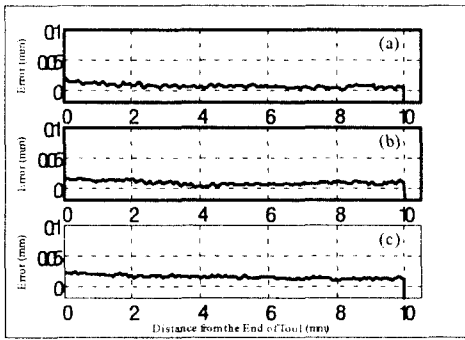
D	AD	Rd	f	rpm	V	F	overhang
10	10	0.2	0.03	2400	75	432	3D

각과 여유각에도 영향을 준다. 공구와 피삭재 간의 상대 변위에 의하여, 순간 절삭 방향은 절삭 방향에 대하여 $\dot{r}(t)/v$ 만큼 기울어지고, 공구 경사각, γ_0 , 과 공구 여유각, α_0 , 은 Fig. 3 과 같이 유효 경사각, γ_e , 과 여유각, α_e , 으로 변화한다. 진동이 커질수록 $\dot{r}(t)$ 이 커지므로, 경사각과 여유각에는 더 큰 변화가 발생한다. 이러한 유효 경사각의 변화는 공구 여유면과 피삭재의 마찰 면적을 변화시키며, 절삭력의 비선형성을 증대시키는 경향을 갖는다. 공구의 진동은, 표면조도와 공구 수명에 악영향을 끼치며, chatter로 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



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

Fig. 5 Comparison of experimented cutting force with various rake angle



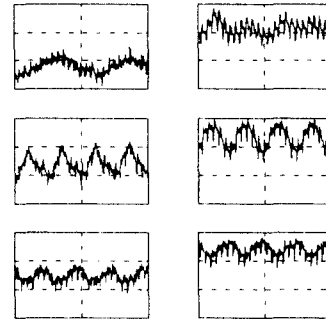
(a) : rake angle = -7° ; (b) : rake angle = -12°
(c) : rake angle = -17°

Fig. 6 Comparison of experimented surface accuracy with various rake angle

데미ング 효과보다 훨씬 크다.[2] Fig. 4 는 유한한 인선 반경을 갖는 공구의 여유면이 표면에 압입되는 것을 그린 그림이다. 접촉 면적 A 와 최대 압입깊이, η , 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. 피삭재는 H_RC45 로 열처리된 SKD11 이다

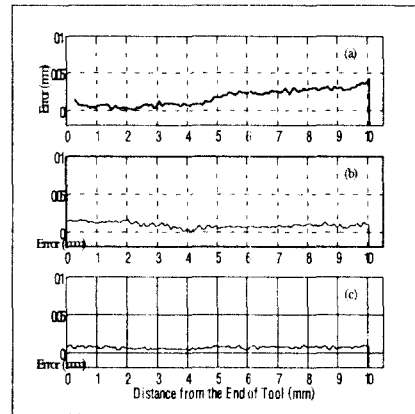
3.2 공구 경사각에 따른 절삭거동의 변화

고강성의 소재를 고속에서 절삭하는 경우 충격으로 인한 크랙이나 치핑이 발생하기 쉽다. 이를 견디기 위하여 공구는 큰 음의 경사각을 가지도록 제작되었다. Fig. 5 과 Fig. 6 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 절삭속도



(a) clearance angle = 4° (b) clearance angle = 8°
(d) clearance angle = 12°

Fig. 7 Comparison of experimented cutting force with various clearance angle



(a) clearance angle = 4° (b) clearance angle = 8°
(d) : clearance angle = 12°

Fig. 8 Comparison of experimented surface accuracy with various clearance angle

에 따라서 최적의 공구 경사각은 변화하게 되는데, 공구수명의 관점에서는 공구 경사각이 작을수록 충격에 강하고, 가공 오차의 측면에서는 공구 경사각이 클수록 정밀한 제품을 얻을수 있다.

3.3 공구 여유각에 따른 절삭거동의 변화

Fig. 7 와 Fig. 8 은 공구 여유각을 4° 에서 12° 로 변화시키면서 동일한 절삭 조건에서 가공을 수행한 실험결과이다. 여기에서는 인선부의 길이를 변화를 주면서 성능에 미치는 여유각의 영향도 관찰하였다. 여유각의 감소는 공구 여유면과 피삭재의 마찰 면적을 증가시키고, 이로 인한 마찰 저항의 증가는 절삭저항의 증가로 이어진다. 이러한 마찰 저항으로 인하여 (b)의 절삭저항은 (a)에 비하여 50% 가량 감소했으나, (c)의 경우에는 여유각이 이미 충분히 크기 때문에 여유각을 증가시키더라도 절삭 저항은 크게 감소하지 않았다. (a)와 같이 여유각이 4° 로 매우 작을 경우, 표면과의 간섭으로 인한 채터링이

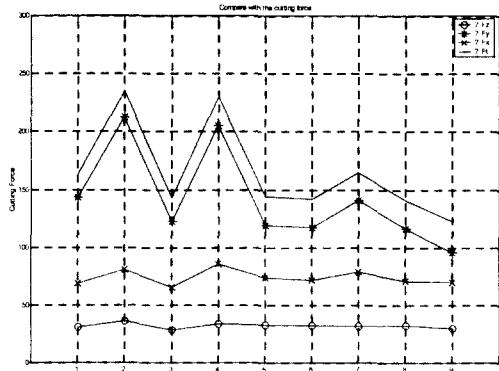


Fig. 9 Average cutting force of each endmill

Table 3 Numbering about each tool geometry

Sample	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	3 차
R.A	-12	-12	-7	-7	-12	-7	-17	-12	-12
C.A	8	4	8	4	8	8	8	12	8

발생하여 절삭력이 매우 불균일하게 발생하였으며, 표면의 품질도 매우 불량하였다.

3.4 다양한 형상을 가진 엔드밀의 성능분석

Fig. 9 에서 다른 샘플과는 달리 특히 샘플 1,5,9 가 절삭력면에서 가장 양호한 결과를 나타낸다. 1,5,9 모두 공구경사각이 -12, 공구여유각이 8 도의 형상을 가지며 $\phi 10$ 의 고정도강 시험에서, 이 형상이 가장 최적의 형상임을 보여준다.

그러나 이들의 절삭값이 1 에서 9 로 갈수록 순차적으로 조금씩 절삭력이 감소하고 있음을 볼수 있는데, 이는 같은 설계치임에도 불구하고 제작상 재현성의 문제로 인하여 절삭력의 불균일성을 관찰할수 있다. 또 1,2 와 5,8 에서 볼수 있듯이 여유각이 작을수록(공구여유각이 일정할 때), 절삭력이 증가하는 것으로 보아 여유각의 영향이 절삭력의 크기에 크게 기여함을 확인할수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 형상의 공구에 대한 절삭 실험을 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, 인선

부의 인성을 증가시킨다.

2. 공구 여유각의 증가는 여유면의 마찰면적을 감소시켜 절삭저항을 감소시키지만, 인선부의 땀뿜 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. 공구 경사각의 음의 방향으로 증가할수록 진폭의 변화가 감소하는 경향을 나타(-17 도에서 거의 flat 한 정도를 나타냄)내며, 이송방향의 절삭저항의 변화는 거의 없으나 배분력의 경우 절삭력이 이 점점 더 증가하는 경향을 보인다.

참고문헌

1. M.A.El Baradie, "The effect of varying the workpiece diameter on the cutting tool clearance angle in tool life testing", Elsevier Science S.A., 1996
2. Ranganath, S. et al., "The Role of Flank Face Interference in Improving the Accuracy of Dynamic Force 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 Machining(HSM), FRAISA SA, 1997
6. I.A.Kattan and K.R.Currie, "Developing New Trends of Cutting Tool Geometry, journal of Materials Processing Technology, p231~237, 1996
7. S.Kaldor, "Macro-level Optimization of cutting Tool geometry", journal of manufacturing Science and Engineering, vol. 119, 1997
8. W.A.Kline and R.E.Devor, "The effect of runout on cutting geometry and force in end milling", Int.J.Mach Tool Des. Res, vol.23, No2/3, p123~140, 1983