

엔드밀 가공 시 여유각을 고려한 가공특성

박정남*, 고성림#,

Machining Characteristics in High Speed Endmill Operation Considering Clearance Angle

Joung Nam Park *, Sung Lim Ko #

ABSTRACT

The objective of this research is to investigate the effect of clearance angle on cutting performance in high speed end milling operation. The tool geometry parameters have complex relationship with cutting process parameter. In order to explain the effect of clearance angle, 2D turning operation in lathe and end milling operations are performed. Tools with different clearance angles are manufactured. Cutting forces, machining accuracy and tool life are examined according to the change of clearance angle. As clearance angle increases, cutting force decreases and machining accuracy improves. But it has been proved that there exists the optimal clearance angle according to the diameter of end mill for maximum tool life which is measured by frank wear.

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 있다. 공구의 측면에서는 새로운 재종 및 코팅기법의 개발을 통해 공구수명의 향상을 달성하고 있

다. 또한 공구형상의 최적화를 통해 동적 안정성을 확보하고 가공 정밀도를 개선하고자 하는 다양한 시도가 이루어지고 있다.

기존의 연구에서 엔드밀의 여유각 형상의 변화가 절삭 성능에 중요한 영향을 미치는 사실에 대하여 제한적으로 연구가 진행되어 왔다. Kaldor는 여유각의 차이가 공구의 수명에 영향을 미치며 절삭조건에 따라 최적 여유각이 존재함을 실험을 통해 확인 하였다.^{1,2,3}

Melkote는 엔드밀 가공 시 여유각과 경사각에 경사각에 따라 표면 조도에 미치는 영향과 런아웃

접수일: 2003년 8월 11일; 게재승인일: 2004년 5월 7일
* 이화다이아몬드 연구원
교신저자 : 건국대학교 기계설계학과
Email : silko@konkuk.ac.kr TEL : (02) 450-3465

에 대한 오차를 보정하여 가공면 형성을 모델링 하였다.⁴ 선삭가공시 피삭재의 직경에 따라서 적정 여유각이 존재함을 알 수 있었다.⁶ 국내에서는 다양한 설계변수에서의 절삭성능의 관계를 연구하였다.^{7,8}

본 연구에서는 다양한 피삭재에서 선삭 가공시 여유각의 변화가 절삭 저항에 미치는 영향을 관찰하였으며 밀링가공 시 고경도 가공용 엔드밀의 여유각의 변화에 따른 절삭 성능의 변화와 고속 가공 시 미치는 영향을 연구하였다.

2. 공구형상과 절삭거동의 관계

2.1 여유각의 정의 및 형상

여유각이란 절삭 시 경사각과 함께 매우 중요한 요소이며 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 컨케이브(concave)와 이센트릭(eccentric) 방식을 사용한다(Fig 1).

컨케이브 방식은 가공은 쉬우나 공구인선이 취약하여 수명이 문제가 되기 때문에 주로 이센트릭 방식으로 가공된다.

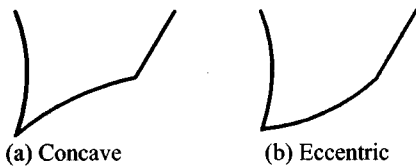


Fig.1 Geometrical shape of clearance surface

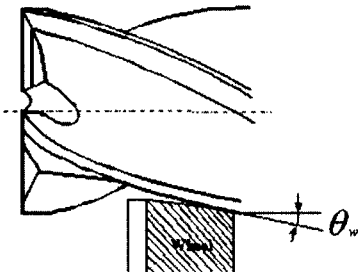


Fig.2 Method of generating an eccentric clearance surface by grinding tool.

Fig.2 는 eccentric 방식에 의한 여유면 가공방법을 나타내고 있다. 여유면 형성을 위하여 경사각이 θ_w 인 연삭숫돌을 사용한다. 이 경우에는 여유면 형상을 계산을 통하여 얻을 수 있는데 공구 중심 O로부터 여유면의 임의의 점 C까지의 거리 OC와 날끝과 공구 중심이 이루는 각도 θ 와의 관계는 다음과 같다.

$$\overline{OC} = R - R \frac{\tan \theta_w}{\tanh a} \cdot \sin \theta \quad (1)$$

여기서 h_a 는 공구헬릭스각, θ 는 인선부로부터 임의의 여유면의 최적위치를 나타낸다. 여유각은 인선부의 최전방향에 대한 여유면의 접선방향과의 사잇각이다. 정의한다면 여유각 β 는 다음과 같이 표현된다.

$$\tan \beta = \frac{\tan \theta_w}{\tanh a} \quad (2)$$

이 관계를 이용하여 원하는 여유각 β 를 얻기 위하여 사용될 연삭 숫돌 경사각 θ_w 를 구할 수 있다. 여유각이 10° , 헬릭스각, h_a 가 25° 라면 경사각, θ_w ,가 4.7° 인 연삭 숫돌이 필요하다. 위 관계식으로부터 가공 후 여유면 형상과 이상적인 여유각 10° 인 경우를 함께 비교하여 Fig. 3에서 나타내었다.

인선부 근처에서는 유사한 면이 형성되나 점차로 오차가 커짐을 알 수 있다.

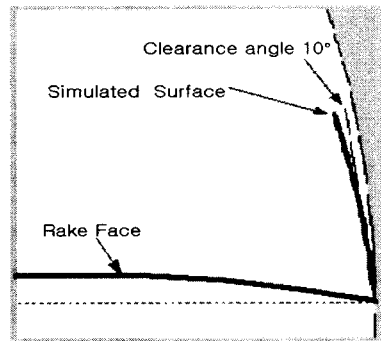


Fig.3 Simulation of generation of clearance surface

2.2 탄성 복원을 고려한 절삭거동

엔드밀의 절삭을 2 차원 절삭으로 단순화한 Fig.4는 절삭 시 탄성영역을 고려한 그림이다. 절

삭 시 대부분의 칩의 흐름은 경사면을 따라 흐르지만 인선부의 노우즈부에서 칩흐름이 분리되어 일부는 피삭재 표면으로 흘러 들어가서 표면을 문지르는 효과(burnishing)를 발생하고 그 결과에 의해 탄성복원이 발생한다.

이와 같은 탄성복원의 양은 칩으로 흘러가지 못한 부분이 공구 날 끝을 거쳐서 소성변형후 공구가 통과한 후 하중이 제거되면서 표면으로 유입된 양에 의해 탄성복원이 발생한다.

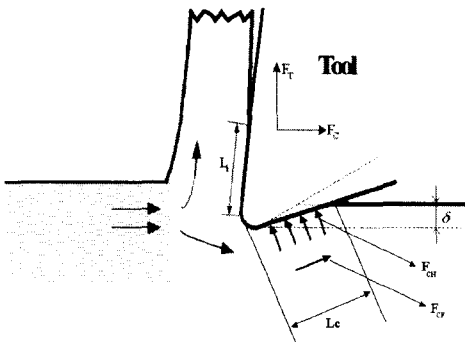


Fig.4 Chip flow around cutting edge

그러므로 공구인선의 노우즈 반경이 클수록 이 양이 증가하며 이로 인하여 정밀가공이 어렵게 된다. 반대로 공구인선이 예리할수록 이 양은 감소하며 정밀가공이 가능하게 된다.

이때 여유각이 작은 경우에는 탄성복원 후 마찰면이 증가하여 마모증가가 빠를 것으로 예상되며 반면 여유각이 큰 경우에는 마찰면이 감소할 것이다. 여유면에서는 절삭 직후 탄성복원에 의해 피삭재와 마찰에 의해 공구수명의 일반적 기준인 플랭크(flank) 마모가 발생한다.

Kobayashi 는 인위적인 플랭크 마모면을 형성하여 선삭 가공시 주분력과 배분력이 마모폭의 증가에 따라서 선형적으로 증가함을 실험적으로 증명하였다.⁵ 그러므로 여유각이 작은 여유면의 경우 프랭크마모의 증가에 따른 절삭력의 증가로 가공면 조도의 불량과 정밀도 저하를 초래함으로써 공구수명이 짧아짐을 예상할 수 있다. 또한 여유각이 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. 선삭 가공에서의 여유각의 영향

3.1 절삭조건 및 장비

본 연구에서는 공구의 형상과 절삭 과정의 관계를 분석하기 위해 우선 선삭에서 다양한 여유각의 공구를 제작하여 절삭 시 그 영향을 비교하였다. 현대의 HIT-8EX 를 이용하여 Kistler 사의 9257B 와 전용 앰프를 사용하여 절삭력을 측정하였다. 사용된 피삭재는 SCM440 이다. 선삭용 초경 바이트 (브레이징 타입) 는 경사각 9°에 5°, 10°, 15°의 여유각을 보유하고 있으며 절삭 속도 150m/min, 이송속도(feed) 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 mm/rev 를 적용하여 Fig. 5 에 나타난 튜브 모양의 피삭재를 가공하여 2 차원 절삭 시험을 실시하였다.

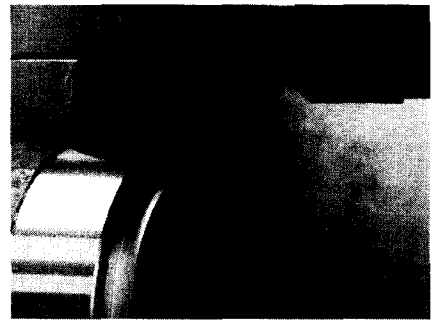


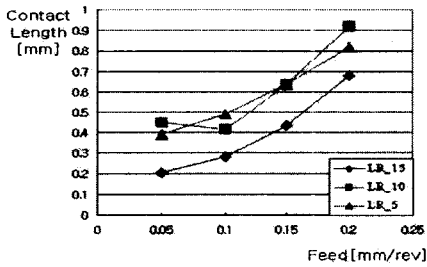
Fig. 5 Orthogonal cutting in lathe

3.2 선삭에서 여유각의 영향

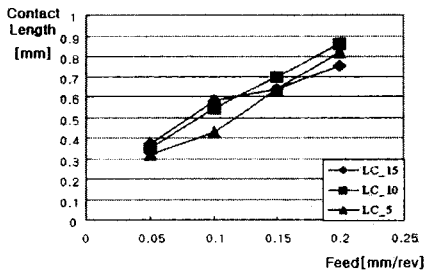
Fig. 6 는 선삭에서 여유각과 이송속도의 변화에 따른 경사면과 여유면의 접촉부분의 길이를 나타내며 그때의 주분력(F_C)과 이송분력(F_T)이 Fig. 7 에 나타나 있다. 경사면과 여유면의 접촉길이 측정은 공구의 각면을 코팅을 하여 가공 후 코팅이 벗겨진 부분의 폭을 측정하여 결정하였다. 그러나 가공 후 접촉부의 경계가 불분명하여 오차가 포함될 것으로 예상된다. Fig.6 의 결과로부터 여유각의 변화에 따른 여유면에서의 접촉 길이는 큰 차이가 없으나 이송속도의 증가에 따라서는 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 여유각의 증가에 따른 주절삭력(F_C)의 증가는 작으나 배분력(F_T)의 증가는 뚜렷함을 알 수 있다(Fig.7). 이로부터 여유면에서의 절삭거동이 배분력에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 이송속도의 증가에 따라 주 절

삭력은 예상한 바와 같이 선형적으로 증가하나 배분력의 경우 매우 완만한 증가를 나타냄을 Fig.7로부터 관찰할 수 있다.

Fig. 4로부터 여유각의 변화에 따른 여유면의 접촉길이 L_c 가 변함을 알 수 있다. 여유각이 증가하면 접촉길이 L_c 가 감소하여 이에 따른 탄성복원량 δ 로 인한 접촉여유면에서의 수직응력 F_{CN} 과 마찰력 F_{CF} 가 감소함을 알 수 있다. 이 절삭저항의 절삭 방향 성분이 Fig.7(a)에서의 주응력성분 F_c 의 변화를 야기시키며 수직방향 성분이 Fig.7(b)에서



(a) On rake surface

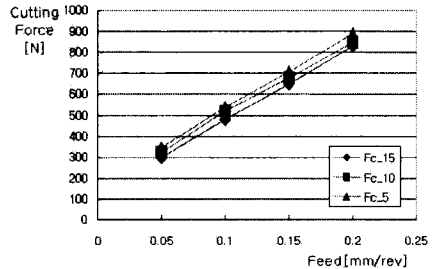


(b) On clearance surface

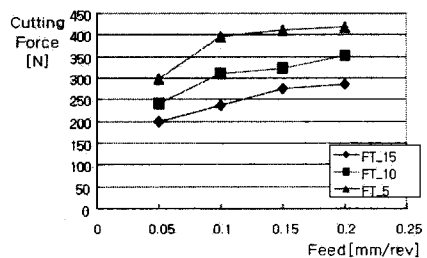
Fig.6 Contact length on rake surface and clearance surface

이송분력 F_T 의 변화량이 된다. Fig.7(b)로부터 여유각의 변화가 배분력에 매우 민감하게 작용함을 알 수 있다. 여기에서 여유면에 수직으로 작용하는 F_{CN} 이 배분력에 주된 역할을 하는 것을 확인할 수 있다. Fig.6 으로부터 여유각의 증가에 따라서 공구경사면에서의 칩과 접촉길이는 감소하나 여유면 접촉길이는 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이는 이제까지 여유각의 증가에 따라서 여유면 접촉길이가 감소한다는 예측과는 다소 차이가 있음을 알 수 있으며 이에 대한 좀 더 정밀한 실험과 해석에 의해서 확인할 필요가 있다. 그러나 여유

각의 변화에 따라서 여유면 접촉부에 분포되는 절삭저항의 크기는 매우 크게 변화함을 알 수 있다. Fig.4로부터 여유면에 수직으로 작용하는 F_{CN} 과 평행하게 작용하는 F_{CF} 의 크기와 방향으로 인하여 주분력 F_c 와 배분력 F_T 에 매우 민감한 변화를 야기시킨다. Fig.7(b)에 나타난 여유각 감소에 따른 배분력의 큰 증가는 정밀도의 감소와 여유면 마찰력의 증가에 따른 플랭크마모의 증가로 공구수명의 감소를 야기시킬 것으로 예상된다. 엔드밀링 가공시 배분력은 공구 이송 방향에 수직인 방향으로 이 힘으로 인하여 공구변형이 초래됨으로 가공정밀도에 영향을 미친다. 이로부터 고속가공과 정밀가공에서 공구의 여유면 형상이 가공정밀도와 공구수명에 큰 영향을 미치게 됨을 예측할 수 있다.



(a) F_C in cutting direction



(b) F_T in feed direction

Fig.7 Cutting force in orthogonal cutting in lathe

이송속도의 증가는 절삭면적의 증가를 의미하기 때문에 절삭면적에 비례하여 증가하는 주분력은 매우 선형적으로 증가하고, 배분력의 크기는 약간의 증가만 나타내고 커다란 변화가 없음을 알 수 있다. 그러나 앞서 언급한 대로 여유각의 크기에는 민감하게 변한다.

4. 엔드밀 가공에서의 여유각의 영향

4.1 절삭조건 및 장비

Table 1 Cutting conditions for end milling

D [mm]	AD [mm]	Rd [mm]	F [mm/tooth]	Rpm	V [m/min]	F [mm/min]	Overhang [mm]
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 공정과의 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 피삭재는 STD11(Hrc 50)이다. 표면 정밀도의 측정을 위해 Keyence 의 레이저 센서를 이용하였다.

실험에 사용된 고속가공용 엔드밀은 Fig.8 에 나타난 바와 같이 6 날을 보유하고 있으며 한국야금에서 제작되었다. Ø10, Ø6 엔드밀의 공구경사각은 -10°로써 음의 값을 유지하며 다양한 공구 경사각을 제작하여 그 영향을 보고자 한다.



Fig. 8 Figure of end mill

4.2 여유각에 따른 절삭 성능의 변화

Fig.9 에서는 직경이 10mm, 6 mm 일 때 경사각을 -10° 으로 일정하게 하고 여유각을 변화시켜 STD11(Hrc50)을 앞에서 주어진 절삭조건으로 머시닝센터에서 가공 시 측정된 평균 절삭력을 나타낸 그림이다. 직경의 변화에 관계없이 여유각이 증가할수록 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 절삭성능을 나타낸다. 이것은 앞에서의 선삭가공 결과와 동일함을 의미

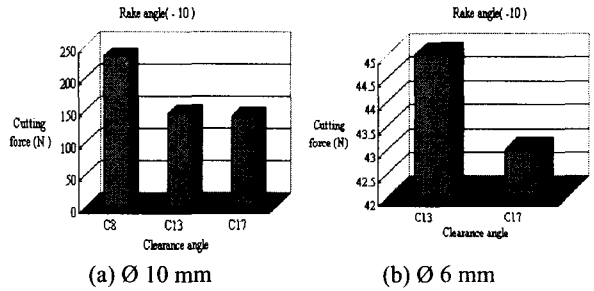


Fig. 9 Comparison of cutting force in end mills with various clearance angle and diameter

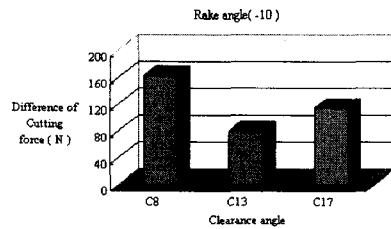


Fig. 10 Variation of cutting force in end mills with various clearance angle with 10 mm diameter

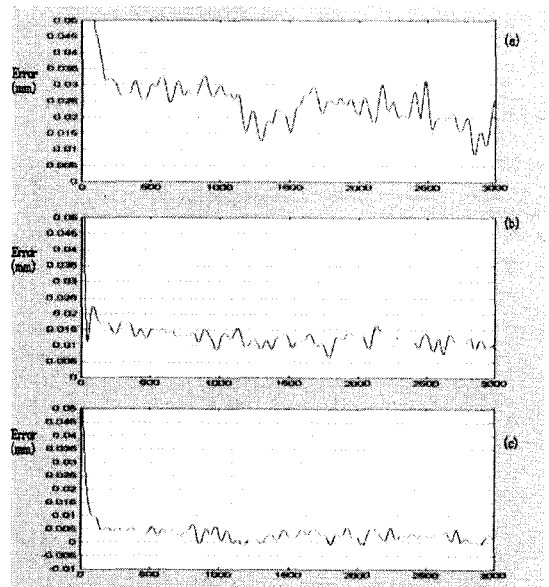
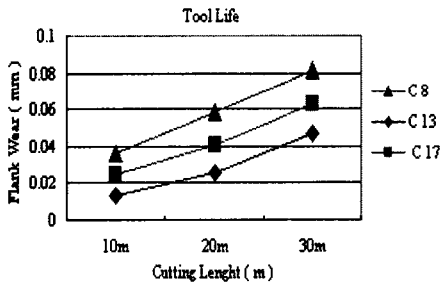


Fig. 11 Comparison of surface accuracy in end mills with various clearance angle and diameter 10mm (Tooth = 6, (a) C.A=8°, R.A=-10°, (b) C.A= 13°, R.A=-10°, (c) C.A=17°, R.A=-10°)

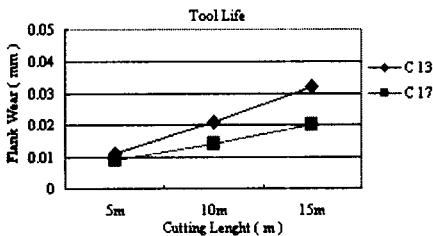
Fig. 10 은 직경 10mm 에서의 여유각의 영향에 의한 앞에서의 동일한 절삭조건으로 가공 시 절삭 저항 진폭의 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 여유각이 감소하면 피삭재와 닿는 면적이 증가하여 진동이 발생하나 여유각이 적정수준보다 더 클 경우 날부의 강성이 떨어져 또한 진동이 발생할 수 있음을 보여주고 있다.

진폭의 크기는 마찰에 의한 진동, 런아웃등에 의해 결정되며 공구의 치핑이나 파손 및 표면 조도의 불량 등을 초래한다. 여유각 13°인 경우에 가장 작은 절삭 진폭을 나타내고 있다.

Fig. 11 은 피삭재 STD11 에서 엔드밀의 가공성능중에서 중요한 요소 중 하나인 가공정밀도를 측정 한 결과이다. Fig. 9 (a)에서 사용한 동일한 직경 10mm 엔드밀을 사용하여 경사각이 -10°로써 일정 할 때 여유각을 증가시켜 실험을 하였다. 여유각이 증가할수록 가공정밀도가 좋아짐을 알 수 있다. 이는 여유각이 작아질수록 배분력의 증가로 인한 공구변형량의 증가로 인하여 가공정밀도가 나빠짐을 알 수 있다.



(a) Ø 10mm

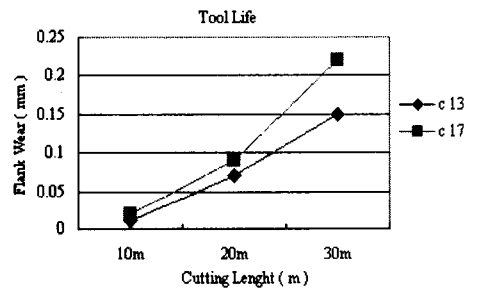


(b) Ø 6 mm

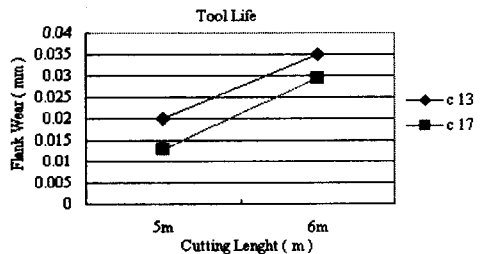
Fig. 12 Comparison of tool wear in end mills with various clearance angle (fixed rake angle -10°)

Fig. 12 는 여유각의 변화에 따른 동일한 절삭 조건에 의한 머시닝센터에서 가공 시 공구 수명실

험 결과이다. 일정한 경사각 -10°에서 동일하게 여유각을 변경시켜 공구수명의 결과를 관찰하였다. 직경 10mm 에서는 13°인 경우에 가장 우수한 공구수명을 나타난 반면, 직경 6mm 에서는 여유각이 17°인 경우에 마모가 감소함을 알 수 있다. 이는 직경 10mm 에서 여유각 17°인 경우는 절삭성능은 좋으나 공구 끝 날 강도가 작아져 미소 치핑에 의해 마모가 증가되었고 직경 6mm 에서는 여유각 13°에서는 공구의 여유면이 절삭 시 피삭재와의 접촉면적에서 마찰에 의한 마모가 빠르게 진행되었다. 직경 10mm 에서는 경사각이 -10°일때 여유각 13°에서 직경 6mm 에서는 여유각이 17°에서 상대적으로 우수한 공구수명을 나타냄을 알 수 있다. 이는 공구 직경에 따라서 적정여유각이 존재함을 알 수 있다.



(a) Ø 10mm



(b) Ø 6mm

Fig. 13 Comparison of tool wear in end mills with various clearance angles in high speed machining (fixed rake angle -10)

Table 2 는 고속가공의 절삭조건이며 Fig. 13 은 고속가공 실험조건 하에서의 공구 수명의 결과값

을 보여주고 보여주고 있다. 경사각을 -10° 로 고정하여 고속가공시 직경 10mm 에서는 여유각이 13° 에서 가장 우수한 반면 직경 6 mm 에서는 17° 에서 우수한 동일한 결과값을 보여주고 있다. 이 결과는 머시닝센터에서의 가공 조건에서의 결과와 동일한 결과를 얻을 수 있음을 나타낸다.

Table 2 Cutting conditions for high speed end milling

D [mm]	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

5. 결론

본 연구에서는 여유각의 영향을 알기 위해 선삭에서의 실험과 다양한 여유각의 엔드밀의 실험을 통해 실제 절삭 성능의 영향을 관찰 분석 하였다.

선삭의 실험을 통해 공구의 여유각은 배분력에 영향을 주고 이는 공구의 정밀도와 수명에 영향을 미침을 확인하였다.

Hrc50 인 STD11 로 절삭 실험을 하여 직경 10mm 인 엔드밀과 직경 6mm 엔드밀에서 공구수명과 정밀도가 우수한 적정 여유각이 존재함을 실험을 통하여 확인하였다.

여유각의 감소는 절삭시 여유면의 참여가 많아져 절삭력이 증가하는 경향이 나타나며 표면조도와 정밀도가 불량해진다. 여유각의 증가는 여유면의 마찰면적을 감소시켜 절삭저항을 감소시키지만, 인선부의 댄핑효과를 떨어뜨려 동적 안정성이 악화된다.

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

머시닝센터에서의 엔드밀의 가공성능 평가를 고속가공에서 적용 가능하다.

“Investigation and optimization of the Clearance Geometry of End Mills,” Annals CIRP, Vol. 34, pp. 149, 1985.

3. Kador, S., “A Common Denominator for Optimum Cutting Tool Geometry,” Annals CIRP, Vol. 35, No. 1, pp. 41, 1986.
4. Melkote, S. N., Thangaraj, A. R., “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. Kobayasi, S., Thomsen, E. G., “The Role of Friction in Metal Cutting,” Transaction of the ASME, pp. 324-332, 1960.
6. Baradie, IM. A. El., “The effect of varying the workpiece diameter on the cutting tool clearance angle in tool life testing,” Wear 195, pp. 210~105, 1996.
7. Ko, Sung-Lim, Lee, Sang-Kyu, Bae, Seung-min, “Study on the Design of End Mill Geometry,” Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol.18, No.8, pp. 24-31, 2001.
8. Kang, M. C., Kim, J. S., Lee, D. W., Kim, K. H., Ha, D. G., “Machinability Evaluation according to Variation of Endmill Shape for High Speed Machining,” Journal of Korean Society of Precision Engineering, Vol.19, No.5, pp. 133-138, 2002.5

참고문헌

1. Kador, S., Trendler, P. H. H., Hodgen, T., “Investigation Into the Clearance Geometry of End Mills,” Annals CIRP, Vol. 33/1, pp. 33, 1984.
2. Kador, S., Trendler, P. H. H., Hodgen, T.,