

엔드밀 설계 및 제작 기술에 관한 연구

고성림*(건국대 기계항공공학부), 김용현(건국대 대학원 기계설계학과)

Development of Design and Manufacturing Technology for Endmills

Yong-Hyun Kim, Sung-Lim Ko(Mechanical Eng. Dept., Kon-Kuk Univ.)

ABSTRACT

The geometry parameter of tool such as rake angle and clearance angle is defined clearly to solve the difference in communication between design and measurement stage. Using the developed simulation program, wheel is properly determined and end mill can be manufactured accurately. The performance test with well defined end mill provides sufficient information to decide optimal geometry. For machining hardened steel, end mills are designed and manufactured. Optimal rake angle and clearance angle is obtained from performance test. A specific software for automatic end mill production is developed for simulation and for generation of NC code as Cad/CAM system.

Key Words : Helical Flutes(나선형 홈), Rake Angle(경사각), Clearance Angle(여유각), Design Parameters(설계 인자), Prediction of End Mill Geometry(엔드밀 단면형상 예측)

1. 서론

엔드밀은 재료, 형상 그리고 코팅 기술의 세가지 측면에서 함께 발달되어왔다. 그 중 공구 형상 개발로의 접근에는 몇가지 어려움이 있다. 엔드밀의 형상은 가공중 발생한 칩의 원활한 배출과 절삭유의 공급을 위한 공간으로서 적정 크기의 나선형 홈, 즉 플류트가 있고, 절삭날은 이 나선형 홈을 따라서 존재한다. 때문에 경사각과 여유각을 기하학적으로 정의하고 측정하는데에 제약이 따른다. 또한 엔드밀 제작은 공구 인선부와 나선형 홈부의 가공이 동시에 설계 조건을 만족시키면서 이루어져야 한다. 따라서 가공 정밀도와 동일 형상 재현 역시 어렵다. 가공에 사용되는 휠의 적절한 형상을 결정하는것도 간단하지 않다. 일반적으로는 휠의 형상을 임의로 결정한 후 선정된 휠로 엔드밀을 제작해봄으로써 원하는 엔드밀의 형상을 가공할 수 있는 휠 형상을 결정하고 있기 때문에 현장에서는 어려움이 많다.

따라서 엔드밀 형상 개발에 대한 요구와, 실제 설계 및 제작에 있어서의 어려움을 해결하기위한 엔드밀 제작 및 설계 기술 개발이 필연적으로 필요한 시점이다.

본 논문에서는 엔드밀의 성능에 있어 중요한 인자인 공구 경사각(γ)과 여유각(η)에 대한 기하학적 정의를 하였다. 그리고, 원하는 형상의 엔드밀 제작을 위한 휠 형상을 시뮬레이션을 이용하여 찾아낼 수 있는 소프트웨어를 개발하였다. 정의된 엔드밀 형상 치수에 부합하는 엔드밀 샘플을 제작하고, 그 성능 테스트를 수행함으로써 엔드밀의 기하학적 형상에 따른 성능을 정성적으로 데이터화 하였다. 따라서 이를 이용한 향후 엔드밀 생산 시스템에서의 활용이 기대된다.

2. 엔드밀 형상 정의와 측정

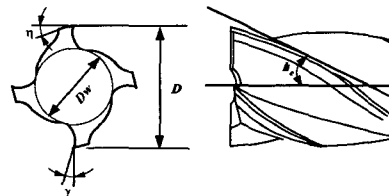


Figure 1 Geometry of end mill

엔드밀 설계에 있어서 중요한 설계인자로는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 직경(D), 내접원(Dw), 여유각

(η), 경사각(γ), 헬릭스각(h_e) 이 있다. 이 중에서 절삭 성능에 큰 영향을 미치는 요소는 경사각과 여유각으로 정의되는 절삭날 각이다. 경사각이 음(-)인지 양(+)의 경사각인지에 따라 절삭성, 날끝강성, 공구강성, 다이내믹 밸런스등에 영향을 미친다. 여유각은 그 크기에 따라 최종 가공 표면 정도에 영향을 미친다. 여유각이 너무 커지면 표면 정도는 좋아지지만 치핑의 우려가 있고, 반면에 여유각이 너무 작아지게되면 절삭시 표면과 마찰면적이 커짐으로 인해 채터와 가공면조도에 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 따라서 엔드밀 형상 설계를 위해서는 우선적으로 경사각과 여유각에 대한 정확한 정의와 측정이 요구되므로 본 논문에서는 다음과 같이 정의하였다. 경사각은 공구 단면 형상에서 날 끝에서부터 공구 반경방향으로 형성된 경사면(rake face)로의 접선의 기울기로 정의한다. 또한 여유각은 날 끝에서부터 일정한 폭(Land Width)까지 이루는 각도로 표시하기로 한다.

일반적으로 경사각과 여유각의 측정은 엔드밀을 절단한 후 그 단면을 공구 형상 확대기를 이용하여 측정하는 방식을 많이 사용한다. 이러한 방식의 측정은 공구 파손에 의한 손실과 많은 오차를 포함하게 된다. 절단한 단면의 평면이 보장되기가 힘들뿐만 아니라, 측정 치수가 측정자에 따라서 크게 다르게 얻어질 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 보다 정확한 엔드밀의 형상 측정을 위하여 Walter 사의 공구 형상 측정기 Helicheck 를 이용하였다.

3. 나선형 홈 예측을 위한 기본 알고리즘

나선형 홈 가공을 위해서는 지금까지 두가지의 방법이 사용되고 있다. 첫번째 방법은 가공휠을 여러개의 두께를 무시할만한 얇은휠의 조합으로 가정하고, 엔드밀 역시 축방향으로 얇은 두께의 실린더의 조합으로 가정하여 각각 얇은 휠과 실린더의 교점의 조합으로부터 가공단면을 예측하였다[1,2]. 다른 방법은 나선형홈의 가공시에 휠과 엔드밀과의 접촉점에서 공통법선은 반드시 축을 통과한다는 기본관계에 의한 수학적인 관계에 기초하여 나선형 홈 단면형상을 예측하였다[3,4,5]. 이미 수행된 연구에서는 첫번째 방법에 기초하여 홈가공을 분석하고 나선형 가공단면을 예측하였다. [6]

엔드밀의 제작에 사용되는 전형적인 휠의 형상이 Fig.2 에 있다. 휠을 두께방향으로 일정한 간격의 n 개의 매우 얇은 요소로 분리한 후 휠의 각 요소에 의한 가공결과와 각각의 결과를 종합한 결과를 임의의 축에 직각인 단면에서 예측하는 작업을 수행하면 엔드밀 축에 직각인 단면에서의 나선형 홈 가공 형상이 얻어진다.

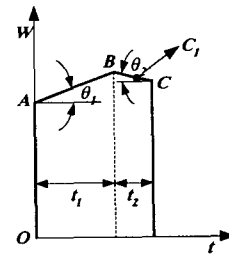


Figure 2 Configuration of grinding wheel for manufacturing end mill

4. 엔드밀 설계 및 제작 기술





4.1 연삭 슷들 형상 결정

엔드밀의 절삭 인선부와 공구 경사면의 형상은 가공휠의 형상과 대응 관계를 이루지 못하기 때문에 원하는 단면 형상으로부터 휠형상을 예측하는 것이 불가능하다[6]. 그러므로 엔드밀 제작을 위한 휠은 경험에 의한 대략적인 형상을 선택하여 결정한다. 앞 절에서 검토한대로 엔드밀의 중요한 요소인 경사면과 내접원의 크기가 휠 요소 AO 에 의해서 가공되고, 공구 강성과 칩배출을 위한 나선형 홈은 AB 형상에 의해서 결정된다(Fig.2). 물론 엔드밀 단면 형상은 주어진 휠의 형상이 같다 하더라도 휠의 상대 위치(x_0, y_0)와 설치각(α)의 크기에 의해서도 변하고, 그 변화의 범위가 경사각(γ)의 크기에 의해 결정된다. 휠의 1 차 경사면 부분의 형상과 크기는 엔드밀의 나선형 홈부의 형상을 결정하고 휠 요소 BC 가 사용될 때에는 날부 두께를 나타내는 마아진부의 크기를 결정한다.

Table 1 에는 다양한 휠 조건에 의한 엔드밀 단면 시뮬레이션 결과가 나타나있다. 엔드밀은 고경도강 용으로 날수가 6, 헬릭스각(h_e) 45° , 직경(D) 10, 내접원의 크기(D_w)가 8, 공구경사각(γ) -14° 를 만족한다. (a)는 나선형 홈 가공 결과가 다음날의 인선부와 닮아 있다. 이 경우는 여유면 가공을 할 여유가 남지 않을 뿐만 아니라 다음날의 인선부에 영향을 미칠 우려도 있으므로 적합하지 않다. (b)는 undercut 인 경우이다. 충분한 플류트가 확보되지 못하고, 여유면 작업을 하기에 적절하지 못한 형상이 얻어졌다. (c)는 공구 경사면 작업을 하면서 바로 인접한 다음날의 인선부까지 과도하게 절삭이 일어나 있다. 역시 적절하지 못하다. (d)는 적절한 형상의 휠을 선정된 경우이다. 플류트 단면도 확보되어 있고, 여유면 작업을 위한 여유 역시 남겨져 있다.

시뮬레이션 결과 휠 (d)를 가공용 휠로 선정하여, 이에 대해 경사각과 여유각을 변화시켜가면서 단면 형상에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

Table 1 Influence of the various wheel geometry on cross sectional configuration in helical flute grinding

	(a)	(b)	(c)	(d)
t_1 (mm)	4	4	4	2.2
t_2 (mm)	0	0	0	2
θ_1 (°)	14	0	20	15
θ_2 (°)	0	0	0	5
Simul				
	Overcut	Undercut	Overcut	Proper

4.2 주어진 휠에 의한 엔드밀 설계

휠 (d)를 사용하여 경사각과 여유각을 Table 2와 같이 변화시켜가면서 엔드밀 단면 형상을 예측한 결과가 Fig. 3에 있다. Fig. 3(b)에 나타난 다양한 여유각은 θ_e 만큼 taper 진 휠에 의해서 헬릭스 각이 h_e 인 엔드밀이 플류트 작업과 동일한 피치로 진행할 때 그 크기가 다음식과 같이 결정된다.

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \theta_e}{\tanh_e} \right)$$

여기서 여유각은 여유면에서 날끝에서의 접선각을 나타낸다. 본 연구에서 wheel taper angle을 변화시켜서 Table 2에서와 같이 5°, 10°, 14°의 여유각을 제작하였다.

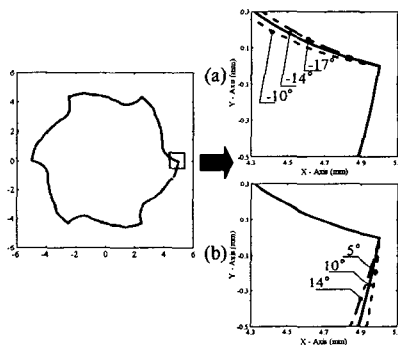


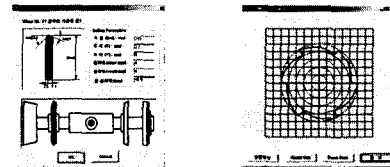
Figure 3 Simulation results with various rake angles(a) and clearance angles(b)

4.3 소프트웨어 개발

공구 가공용 프로그램은 설계 파라미터에 따른 엔드밀의 형상을 예측하는 기능과 실제 엔드밀 가공을 위한 휠의 위치 data를 산출해내는 기능이 필요하다. 엔드밀 가공은 휠과 공구 피삭재와의 회전과 직선 운동으로 이루어진다. 따라서 공구 가공을 위한 NC code를 제작하기 위해서는 각 공정별 시

작점과 끝점에 대한 데이터를 연산해야 한다. 개발된 소프트웨어는 단면 형상 예측과 NC code 제작을 위한 휠의 위치 데이터를 연산한다.

엔드밀 형상 예측과 position data를 산출하기 위해서는 엔드밀 형상 파라미터와 각 가공 공정에 사용되는 휠형상 파라미터 그리고, 기계 파라미터가 필요하다. 기계 파라미터는 휠의 회전 중심으로부터 장착된 각 휠의 가공날까지의 거리와 각 좌표 중심으로부터 가공 원점까지의 거리 등이다. 가공 형상을 예측하고 가공 파라미터를 연산하는 solver가 되는 부분은 fortran을, GUI는 visual c++를 사용하였다. Fig. 4는 개발된 소프트웨어를 이용하여 단면 형상을 예측하고 있는 모습을 보여준다. Fig. 4(a)는 휠형상 파라미터를 입력하는 창을 보여준다. (b)에서는 위의 입력조건에 의한 가공 simulation 결과를 나타내고 있으며, table 1 (d)의 가공결과를 보여주고 있다.



(a) Input for wheel parameters (b) simulation results
Figure 4 Some windows for manufacturing end mill prog.

5. 엔드밀 제작 및 절삭 성능평가

5.1 엔드밀 샘플제작

개발된 소프트웨어를 이용하여 설계치수를 변화시켜가면서 엔드밀에 대한 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과를 이용하여 고정도 가공용 엔드밀을 제작하였다. 프로그램의 타당성 검증은 Helicheck를 이용하여 경사각과 여유각을 측정하였고, 설계값과 비교해보았다(Table 2). 측정 위치가 인선으로부터 0.2mm 인 경우에는 설계치와 비슷한 측정결과를 얻었지만, 0.4mm에서는 다소 차이가 난다. 이것은 설계치가 인선부 끝에서 접선에 해당하는 경사면의 각도를 나타내기 때문에 측정위치가 인선부에 가까울수록 더 정확한 측정값을 나타낼 수 있다.

Table 2에 나타난 파라미터는 여유각(η) = 10°로 일정한 경우 경사각을 -10°, -14°, -17°로 변화시켜가면서, 경사각(γ) = -14°로 일정한 경우 여유각(η)을 5°, 10°, 14°로 변화를 주고 있다. 이 파라미터를 사용한 단면 형상에 대한 시뮬레이션 결과와 가공 후 단면 형상 비교결과가 Fig. 10에 있다. 단면 시뮬레이션 결과를 보면 경사각과 여유각의 변화에 따라 공구 인선부의 형상을 확인할 수 있다.

Table 2 Comparison of designed and measured geometry of end mill samples

	Design		Measurement			
	R.A (γ)	C.A (η)	(γ)		(η)	Clear width
			0.2	0.45		
A	-10	10	-11.29	-12.55	11.59	0.967
B	-14	10	-15.18	-19.3	11.54	0.907
C	-17	10	-18.63	-20.97	11.42	0.952
D	-14	5	-12.4	-23.3	6.35	0.473
E	-14	14	-15.97	-16.35	15.42	1

5.2 경사각과 여유각 변화에 따른 엔드밀 성능 평가

제작된 엔드밀의 성능평가를 위하여 Table 5 의 조건에서 절삭성능 시험을 실시하였다. Fig. 11,12는 각각에 대한 절삭력 테스트 결과와 표면 조도를 측정 한 것이다. Fig. 11 에서는 여유각이 일정(10°)할때 경사각이 -10°에서 -17°로 감소할수록 이송분력과 배분력이 증가되므로 전체적인 절삭력의 증가가 나타나고 이로 인하여 표면 오차가 증가하는 경향을 알 수 있다. Fig.12는 경사각이 -14°로 일정하고, 여유각을 5°,10°,14°로 변화시킨 경우에 대한 실험 결과이다. 여유각이 증가할수록 절삭력이 감소하고, 가공정밀도는 양호해짐을 확인할 수 있다. 위의 실험결과로부터 엔드밀 형상에 대한 절삭성능을 가공정밀도로 판단한다면 경사각이 -14°, 여유각 14°인 엔드밀에서의 가공 정밀도가 가장 우수함을 알 수 있다. 같은 방법으로 다양한 피삭재와 공구 엔드밀 규격에 따라서 최적의 공구 형상을 결정할 수 있음을 알 수 있다.

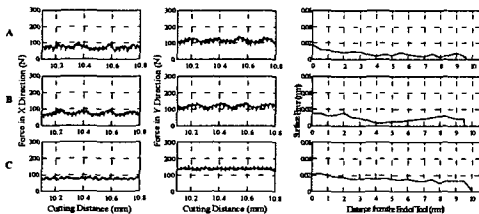


Figure 11 The influence of rake angle with constant C.A(10°): (A) R.A.= -10° ,(B) -14° ,(C)-17°

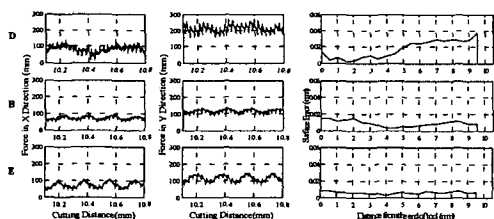


Figure 12 The influence of clearance angle with constant R.A(-14°): (D) C.A= 5° ,(E) 10° ,(E) 14°

Table 5 Cutting conditions for performance tests

Material	Workpiece	SKD11
	H _R C	45
Cutting	Axial Depth	10mm
	Radial Depth	0.2mm
	Feed Rate	0.03 mm/tooth
	Cutting Speed	2400rpm

이상의 일련의 과정을 통하여 엔드밀 형상 설계와 이를 제작하기 위한 휠의 형상 결정 및 위치 결정을 시뮬레이션을 함으로서 가능하게 되었다. 이 관계를 이용하여 일관된 엔드밀을 제작함으로써 각 엔드밀의 성능을 파악할 수 있게 된다. 이 성능 결과를 data base화 함으로써 최적의 엔드밀의 형상을 결정할 수 있다.

6. 결론

[1] 엔드밀 제작에 사용할 휠 형상을 시뮬레이션을 통하여 결정하고 가공후의 나선형 홈의 단면 형상을 예측할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다.

[2] 중요한 설계인자인 경사각과 여유각을 기하학적으로 정의하고, 측정을 통하여 정의한 엔드밀의 설계치수의 타당성을 검증 하였다.

[3] 다양한 형상의 고정도 가공용 엔드밀을 제작하였으며 각 엔드밀의 절삭 성능을 평가하는 실험을 통하여 최적의 경사각, 여유각을 발견하였다.

[4] 엔드밀 설계에서부터 제작,성능평가까지 전체 공정에 일관성을 부여하여 개별적 가공 공정에 적합한 최적의 엔드밀을 제작할 수 있도록 하였다.

참고문헌

1. Tlustý, J., Smith, S., and Zamudia, C., "Operation Planning Based on Cutting Process Model," Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 517 - 521, 1990.
2. Kaldor, S., Rafael, A.D. and Messinger, D., 1988, "On the CAD of Profiles for Cutters and Helical Flutes Geometrical Aspects." CIRP, Vol.37/1, pp53-56.
3. Agullo-Batell, J., Cardona-Foix, S. and Vinas-Sanz, C., 1985, "On the Design of Milling Cutters or Grinding Wheels for Twist Drill Manufacture. A CAD Approach," Proceedings 25th MTDR conf., pp315-320
4. Sheth, D.S. and Malkin, S., 1990, "CAD/CAM for Geometry and Process Analysis of Helical Groove Machining," Annals of CIRP, Vol.39/1, pp.129-132.
5. Ehmann, K.F., 1990, "Grinding Wheel Profile Definition for the Manufacture of Drill Flutes," Annals of CIRP, Vol.39/1, pp153-156
6. S.L.Ko, 1994, "Geometrical Analysis of Helical Flute Grinding and Application to End Mill", Transactions of NAMRI/SME, Vol. XXII