

## 고속가공용 엔드밀공구의 형상변화에 의한 성능평가

### Machinability evaluation according to variation of tool shape in high speed machining

강명창, 김정석, 이득우(부산대 기계공학부), 김광호(부산대 재료공학부), 하동근\*(부산대원)  
M. C. Kang, J. S. Kim, D. W. Lee, K. H. Kim, D. G. Ha

#### Abstract

The technique of high speed machining is widely studied in machining fields, because the high efficiency and accuracy in machining can be obtained in high speed machining. Unfortunately the development of tool for high speed machining is not close behind that of machine tool. In this study, several types flat endmill is prepared for obtaining data according to tool shape. Especially, we concentrated in helix angle, number of cutting edge, rake angle and relief angle. Machinability is measured by cutting force, tool life, tool wear, chip shape and surface roughness according to cutting length. 3-axis cutting forces are acquired from the invented tool dynamometer for high speed machining. Particularly, we found out that the axial cutting force waveform has a good relation with tool wear features. By above results, it is suggested the endmill tool with 45° helix angle, 6 cutting edge, -15° rake angle and 12° relief angle be suitable for high speed machining

Key words : High Speed Machining(고속가공),  
Cutting Force(절삭력), Helix Angle(비틀림각),  
Rake Angle(경사각), Relife Angle(여유각),  
Cutting edge(절삭날)

#### 1. 서론

최근에 많은 상품들이 고객의 다양한 욕구를 충족시키기 위해서 다품종 소량생산되고 있다. 이

처럼 제품의 수명주기(Life cycle)이 짧아짐에 따라 금형의 신속한 생산이 절실히 요구되고 있다. 하지만 종래의 가공 방식은 이를 충족시켜 주기에는 한계가 있어 생산성 향상, 원가 절감 등의 요구 조건을 만족시키면서 고정도로 기계가공하는 기술이 산업전반에 절실히 요구되고 있다.

고정도·고능률 가공을 위해 최근 가장 주목 받고 있는 기술이 고속가공(High Speed Machinig) 기술이다. 고속가공기술을 적용하게 되면 고속, 고이송에 따라 절삭시간이 대폭 단축되고, 고정도 소재의 가공이 가능하며, 절삭열이 칩과 함께 배출됨으로써 냉각효과 및 가공물 변형방지 등 범용 가공에서 기대할 수 없었던 부수적인 효과를 기대할 수 있다.<sup>[1]</sup>

이러한 고속가공 기술의 발전을 위해서는 고속가공용 공구의 개발이 뒷받침되어야 한다. 아직 국내의 고속가공용 공구는 전량 수입에 의존하고 있어 연구와 개발이 시급한 실정이다. 특히 고속가공에서의 혹독한 기계적, 열적, 화학적 환경에 견딜수 있는 공구의 개발이 요구된다.<sup>[2]</sup> 또한 고속가공기술이 아직 일반화되지 못한 관계로 고속가공시의 가공특성과 고속가공용 공구의 가공성을 정확히 평가할 수 있는 기술에 대한 연구도 병행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 고속가공시 고주파의 절삭력을 획득할 수 있도록 제작된 3축 공구동력계를 사용하여<sup>[3]</sup> 절삭력과 공구마멸, 표면조도등을 동시에 측정할 수 있는 시스템을 구축하여 고속가공시 공구형상 변화에 따른 가공성을 평가하였다.

## 2. 엔드밀 공구의 형상 특성

일반적으로 엔드밀공구는 가늘고 긴 세장형태로서 정면, 측면, 단, 홈, 구멍가공등 다양한 가공 영역에 사용되고 있으며 그 형상은 Fig. 1과 같다.

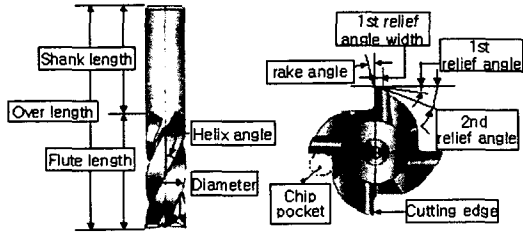


Fig. 1 Elements of end-mill

공구의 성능을 결정하는 공구형상 인자들은 크게 헬릭스각(Helix angle), 날수, 경사각(Rake angle), 여유각(Relief angle) 등이 있는데 본 연구에서는 공구성능에 가장 지배적인 영향을 미치는 이들 인자의 특성을 분석하였다. 그 특성을 간단히 살펴보면 다음과 같다.

헬릭스각은 공구의 비틀림정도를 결정하는 인자로 헬릭스각이 커지면 절삭날이 더 많은 시간동안 절삭에 참여함으로써 긴 칩을 배출하게 되고 그만큼 절삭날에 수직인 방향의 절삭력을 감소시키는 역할을 하게된다. 고경도재를 가공할수록 50° 근방의 고 헬릭스각 공구가 사용된다.

날수는 엔드밀의 칩포켓(Chip pocket)의 크기를 결정하는 인자이다. 칩배출이 문제시되는 저속의 홈가공 등에는 칩포켓의 크기를 증가시키기 위해서 적은 날수의 공구를 사용하고 칩 배출보다는 공구의 강성이 중요한 고경도재 가공의 경우에는 날이 많은 공구로 가공하게 된다. 그러므로 10,000rpm이상의 고속가공으로 고경도재의 소재를 가공할 때에는 4날이상의 공구가 바람직할 것으로 생각된다.

경사각은 절삭시 전단각을 결정하는 인자로 경사각이 커지면 절삭날이 예리하게 되어 절삭저항은 감소하나 칩핑(Chipping)발생의 가능성이 커진다. 반면 경사각을 작게하면 강성을 크게 할수 있는 장점이 있다.

여유각은 절삭날과 가공물과의 마찰을 결정하

는 인자로 여유각이 커지면 재료의 침투성은 요이하나 상대적으로 절삭날의 강성은 감소하게 된다.

고속가공용 공구에는 절삭속도 및 이송속도가 고속으로 작용하기 때문에 큰 원심력과 진동의 영향을 생각해야 한다. 그러므로 혹독한 열적, 화학적 영향은 물론 회전대칭, 최소 불균형 질량, 최소 흔들림 공차등 부수적인 가공 트러블을 고려한 정밀한 형상의 공구가 개발되어야 한다.

## 3. 실험장치 및 방법

공구형상에 따른 가공특성을 평가하기 위해 절삭력 시편과 공구마멸 시편, 그리고 표면조도 시편을 베드위에 동시에 설치하였으며 실험장치도는 Fig. 2에 나타내었다.

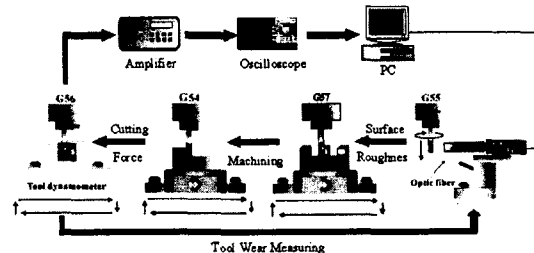


Fig. 2 Cutting and measuring system

한편 고속가공에서는 주축회전수가 높아서 매우 높은 고주파가 발생하게 되는데 기존의 공구동력계(Kistler 9257B)는 고유진동수가 낮아 고주파의 절삭신호를 획득하기 어렵다. 그래서 고주파수 영역에서 안정된 응답특성을 갖도록 개발된 고속가공용 공구동력계로 절삭력을 획득하였다.<sup>[4]</sup> 실험 조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Cutting conditions

Conditions	
Spindle revolution [rpm]	12,000
Feed per tooth [mm/tooth]	0.05
Radial depth of cut [mm]	0.06
Axial depth of cut [mm]	10
Workpiece	STD11(HrC62)

시편은 고경도재인 STD11(HRC 62)을 사용

하였다. 한편 절삭거리에 따른 공구 절삭날의 마멸 형태를 관찰하기 위해서 주축에서 공구홀더(Tool Holder)를 분리할 때 발생할 수 있는 런아웃 등의 오차를 방지하고 위치정밀도를 유지하기 위하여 CCD카메라를 베드위에 설치하였다. 또 측정오차를 최소한으로 줄이기 위해서 CCD카메라에 지그를 제작하여 항상 동일한 위치에서 공구마멸을 측정할 수 있도록 하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 공구제작과 절삭력 분석

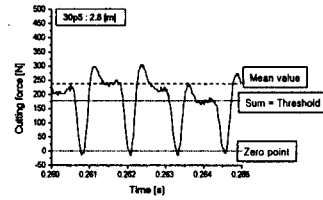
공구의 성능을 결정하는 주요인자들의 가공성을 파악하기 위해서 Table 2에 나타낸 것과 같이 각 요소들을 조합하여 공구를 제작하고 가공 특성을 파악하였다.

Table 2 Tool design factors

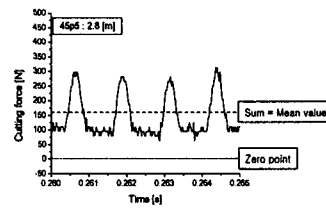
Factors	Helix angle	Cutting edge	Rake angle	Relief angle
Degree (°)	30	4	+5	+4
	45	6	-5	+8
	60		-15	+12

위 Table 2와 같이 공구를 제작했을 때 가장 두드러진 특징은 절삭형태의 차이점이다. 30° 헬릭스각의 4날 공구의 경우 비절삭시간이 존재하는 단속절삭의 형태를 나타내며 그 외의 경우에는 날수와 헬릭스각의 증가에 따라 최소 한날은 계속해서 절삭에 참여하는 준연속절삭의 형태를 나타내었다. Fig. 3에 대표적인 절삭파형의 형태를 나타내었다.

절삭력을 측정함에 있어 각 절삭파형의 특성을 고려하여 Fig. 3(a)과 같은 단속절삭형태는 비절삭영역의 영향을 배제하기 위하여 전체 평균값을 구하고 이를 기준값(Threshold)으로 하여 다시 유효 평균값을 측정하였다. 반면 Fig. 3(b)과 같이 준연속절삭 형태의 경우 항상 공구에 절삭력이 작용하고 있기 때문에 전체평균값을 유효 평균값으로 측정하였다.



(a) For interrupted cutting



(b) For quasi continuous cutting

Fig. 3 The method of cutting force analysis

제작된 공구의 절삭력 파형들을 검증하기 위하여 기하학적으로 공구날의 형태를 도식하고 이로부터 각 공구날의 물림시간을 계산하여 실제 절삭력 파형과 비교 해 보았다. 그결과 기하학적으로 계산한 물림 시간과 실제 절삭파형이 정확히 일치하는 것을 알 수 있었다. 그 중 30° 헬릭스각의 4 날 공구를 Fig. 4에 나타내었다.

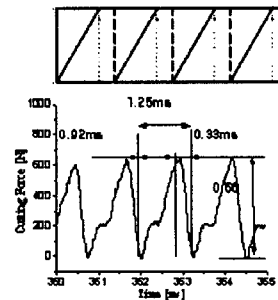


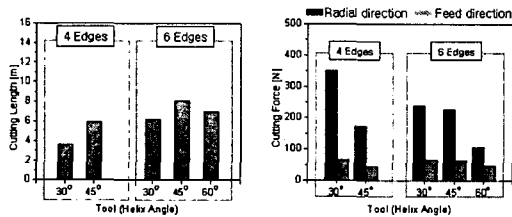
Fig. 4 Geometric shape and Cutting waveform of 30° 4edge tool

이상과 같이 확인된 결과를 바탕으로 자체 개발된 고속가공용 공구 동력계의 신뢰성도 검증하였고 공구 형상에 따른 절삭력의 경향을 파악할 수 있었다.

#### 4.2 헬릭스각의 특성

정상적인 마멸거동을 고려하여 공구수명의 기준을 0.3mm까지로 하고 절삭거리를 측정 한 결과를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 같은 날수일 때 헬릭스각을 30° 에서 60° 로 변화시키면 대략 30~60%의 성능이 향상되었다. 이는 헬릭스각이 커지게 되면 공작물에 침투하는 절삭날의 각이 커지고 절삭에 참여하는 절삭날의 길이가 길어지게 되어 그만큼 작은 절삭부하를 받게 되는 것으로 파악된다.

절삭초기에 각 공구에 작용하는 반경방향과 이송방향의 절삭력은 Fig. 5(b)에 나타난 것처럼 반경방향 절삭력과 이송방향 절삭력은 대략 4 : 1의 비로 거의 유사한 경향을 나타내었다. 헬릭스각이 커질수록 절삭력이 감소하였다.



(a) Tool life (B) Cutting force  
Fig. 5 Cutting force according to helix angle

30° 헬릭스각, 4날공구의 경우 Fig. 6과 같이 이상 마멸형태가 나타났는데 이는 단속절삭으로 인한 과도한 충격력의 반복작용으로 인한 것으로 생각된다.

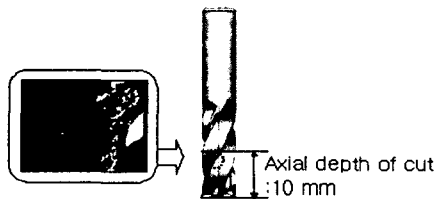


Fig. 6 Wear shape of 30° helix and 4edges tool

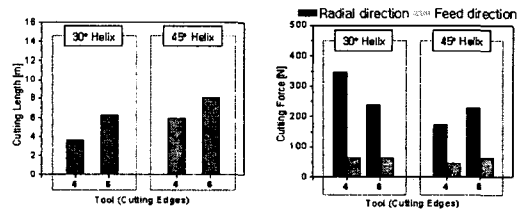
한편 헬릭스각이 증가함에 따라 Fig. 7에서처럼 칩배출 길이가 길어지고 칩두께가 얇아져서 많은 감김(curl)이 나타났다.



(a) 30° helix (b) 45° helix (c) 60° helix  
Fig.7 Chip shape according to helix angle at the beginning of cutting (6 edges)

#### 4.3 날수의 특성

Fig. 8(a)와 같이 동일한 헬릭스각의 경우 날수가 증가함에 따라서 35~75% 정도의 공구수명이 개선되었다. 이는 날수의 증가에 따라 보강된 공구의 강성이 많은 영향을 주었으리라 판단된다. 앞에서 살펴보았듯이 날수의 증가는 칩포켓의 크기를 감소시키고 그만큼 공구의 단면적이 커져서 공구의 강성을 증대시킬 수 있다. 특히 고속가공은 칩배출이 크게 문제되지 않는 정삭 개념이기 때문에 날수의 증가로 인해 공구수명이 상당히 개선된 것으로 사료된다.<sup>[5]</sup>



(a) Tool life (B) Cutting force  
Fig. 8 Tool life according to cutting edges

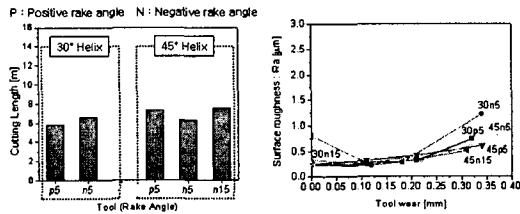
Fig. 8(b)에서처럼 초기 절삭력의 경우 헬릭스각의 변화와는 달리 날수의 변화에 대해서는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다.

#### 4.4 경사각의 특성

우선 4날 공구들에 대하여 공구마멸량이 0.3mm에 도달할 때까지의 절삭거리를 Fig. 9(a)에 나타내었다. 경사각 중 p는 양(Positive)각, n은 음(Negative)각을 나타낸다. 전반적으로 헬릭스각이 증가함에 따라 공구수명이 약 20%까지 개선되었다. 헬릭스각이 30° 인 경우 경사각이 음의 값을 가질 때 수명이 더 향상되는 경향을 보이나 헬릭스각이 45° 일 경우에는 공구수명이 10%내외로

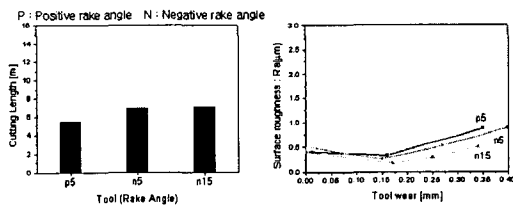
거의 비슷한 값을 가지며 특별한 경향은 보이지 않았다.

한편, Fig. 9(b)에는 공구 마멸에 따른 가공물의 표면거칠기를 나타내었다. 가공초기에 날끝이 날카로우면 재료의 칩투성이 용이한 반면 공구에 미세한 진동이 발생하게 되고, 어느 정도 마멸이 진행되면 날끝이 적당히 무더져서 절삭력은 증가하나 공구의 떨림이 작아진다. 이런 이유로 표면거칠기 값도 가공 초기에 비해 공구마멸이 0.1mm 정도 일 때 다소 안정된 값을 보이다 공구 마멸이 급속히 진행되면 절삭날의 심한 파손으로 공작물의 표면정도를 급격히 악화시키는 되는 것으로 파악된다.



(a) Tool life (b) Surface ruoughness  
Fig. 9 Tool life and surface roughness according to rake angle (4 edges)

이상의 결과를 바탕으로 가장 성능이 우수하다고 판단되는 6날 45헬릭스각 공구로 경사각의 변화에 관해 실험을 해본 결과가 Fig. 10과 같다.



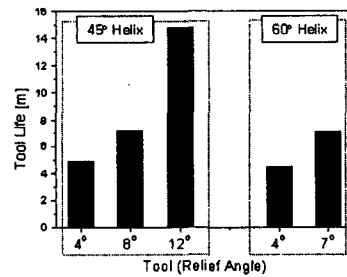
(a) Tool life (b) Surface ruoughness  
Fig. 10 Tool life and surface roughness according to rake angle (6 edges 45° helix angle)

공구수명의 경우에는 4날 공구와 거의 유사하나 가공면의 정도가 다소 향상되었으며 경사각의 감소에 따라 공구수명이 점차 향상되는 특징을 보

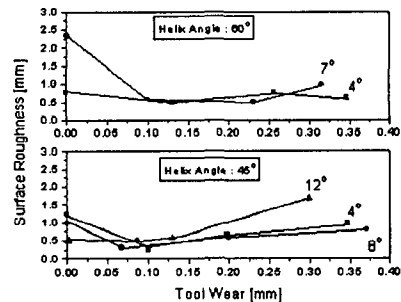
였다. 6날 45도 헬릭스 공구의 경우 경사각이 -15도인 경우 공구의 진동억제로 인해 작은 칩포켓에도 불구하고 가공면의 정도가 오히려 향상되는 결과를 보였다. 그러므로 고속가공 영역에서 가공물의 표면정도를 향상시키기 위해서는 칩 포켓보다 공구의 절삭날부가 적당한 재료 칩투성을 유지하여 진동을 억제할 수 있도록 설계가 이루어져야 하겠다.

#### 4.5 여유각의 특성

6날 -15° 경사각 공구들에 대해 1차여유각 (Relief angle)을 변화시켜 Fig. 11과 같이 그 특성을 파악하였다. 60° 헬릭스각, 8° 여유각 공구의 경우 제작의 어려움으로 여유각을 7°로 제작하여 실험하였다.



(a) Tool life



(b) Surface ruoughness

Fig. 11 Tool life and surface roughness according to relief angle (6edges -15° rake angle)

우선 45° 헬릭스 공구의 경우 여유각의 증가에 따라 공구수명이 현저하게 증가하는 보여 여유

각이 공구수명에 미치는 영향이 매우 큰 것으로 파악되었다. 특히 여유각이 12° 인 경우 여유면 (Flank wear) 마멸이 0.3mm가 되때까지의 절삭길이 약 15m에 달하였다. 한편 60° 헬릭스각 공구의 경우 큰 여유각 공구를 제작할 수 없어서 12° 공구에 대해서는 실험을 하지 못 하였으나 전반적으로 여유각의 증가에 따라 공구수명이 증대되는 현상을 보였다.

특히 60° 헬릭스각 공구의 경우 가공초기에 재료에 대한 침투성이 좋은 반면 진동에 민감하여 표면 거칠기 값이 나빴으나 공구가 어느 정도 마멸됨에 따라 안정되는 현상이 두드러졌다.

여유각이 공구수명에 미치는 영향에 대한 연구가 보다더 진행되어야 하겠다.

## 5. 결론

고경도 소재(STD11)에 대한 고속가공용 공구형상(헬릭스각, 날수, 경사각, 여유각)변화에 따른 특성을 평가한 결과는 다음과 같다.

- 1) 이상의 결과 6날, 45° 헬릭스각, -15° 경사각, 12° 여유각을 갖는 공구가 고속가공에 적합한 것으로 생각된다.
- 2) 공구수명 측면에서 헬릭스각의 증가에 따라 약 30~60%의 변화를 보였으며, 45° 헬릭스각 공구가 가장 우수한 공구수명을 나타내었다. 그리고 경사각의 감소에 따라 15%정도 수명이 향상되었고, 여유각의 증가에 따라 현저한 성능 향상을 나타내었다.
- 3) 헬릭스각과 날수에 따른 공구의 특성평가에서 반경방향과 이송방향의 절삭력의 크기는 약 4:1 정도 나타났다.
- 4) 칩은 헬릭스각이 증가할수록 칩배출 길이가 길어지고 칩 두께가 얇아져서 더 많은 감김이 나타났다. 공구마멸이 진행될수록 배출되는 칩은 유동형에서 전단형 칩으로 변형되는 경향을 보였다.
- 5) 고속가공 영역에서의 표면조도는 칩 포켓보다 절삭날에 더 많은 영향을 받았다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-301-013-3)지원으로 수행되었음.

## 참고문헌

1. T. Moriwaki, "High Speed Machining," CIRP, Vol. 41, 1992.
2. H. Schut, "High Speed milling of Dies and Moulds-Cutting Conditions and Technology," CIRP, Vol. 44, 1995.
3. M. C. Kang, D. W. Lee, J. S. Kim, "A Study on The High Speed Interrupted Machining of High Hardened Material using Newly Developed Tool Dynamometer," ICPE 97, pp. 262-268, 1997.
4. 강명창, 김정석, 이득우, "고속가공에서 가공성 평가를 위한 3축 공구동력계 개발," 한국정밀공학회지, 제16권, 제5호, pp. 11-18, 1999.
5. F. Abrari, M.A. Elbestawi, "Closed form formulation of cutting forces for ball and flat end mills," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 37, pp. 17-27, 1990.