

### 고속가공에서 공구형상 변화에 따른 가공성평가

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

하동근\*(부산대원) · 강명창 · 김정석 · 김광호(부산대) · 강호연(성진초경공구)

D. G. Ha(Graduated School, Pusan Nat'l Univ.),

M. C. Kang, J. S. Kim, K. H. Kim(Pusan Nat'l Univ.), H. Y. Kang(Sung-Jin Tool)

#### Abstract

The technique of high speed machining is widely studied in machining field. 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 machining tool. So in this study, we made 4 types flat end mill for obtaining data according to tool shape. Especially, we concentrated in helix angle and number of cutting edge. First we confirmed cutting condition by several experiments and measuring cutting force, tool life, tool wear and chip shape according to cutting length. In results, we acquired the fact that 45 degree helix angle and six cutting edge tool is 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

기계부품 및 금형 등의 제작에 있어서 생산성 향상, 원가 절감 등의 요구조건을 만족시키면서 고정도로 기계가공하는 기술은 산업전반에 절실히 요청되고 있다. 고정도·고능률 가공을 위해 최근 가장 주목받고 있는 기술이 고속가공(High Speed Machining)기술이다. 고속가공기술을 적용되게 되면 절삭시의 낮은 전단력에 의한 고속 이송속도로

고정도 고능률 가공이 가능하게 되고, 절삭열이 칩과 함께 고속으로 배출됨으로써 냉각효과 및 가공물 변형방지등의 효과를 얻을 수 있으리라 기대된다.<sup>[1]</sup>

하지만 머시닝센터등의 고속가공기의 고속화는 상당수준 발전한 반면에 그에 따른 공구의 개발은 아직 연구와 개발이 미진한 상태이다. 특히 고속가공에서는 가공속도가 매우 빠름으로 인하여 기계적, 열적 그리고 화학적 환경이 매우 열악하여 기존의 공구로서는 제 역할을 할 수 없는 실정이므로 이들의 문제를 최소화하는 공구의 개발이 요청된다. 또한 고속가공기술이 일반화되지 못한 관계로 고속가공시의 가공특성과 고속가공용 공구의 가공성을 정확히 평가할 수 있는 기술에 대한 연구결과가 많이 나와있지 못한 실정이다.<sup>[2]</sup>

따라서 고속가공에서 공구형상 변화에 따른 가공성을 평가하기 위해서 고속가공시 고주파의 절삭력을 획득할 수 있도록 제작된 3축 공구동력계를 사용하였으며 고속가공기의 베드(Bed)위에서 절삭력과 공구마모를 측정할 수 있는 시스템을 구성하였다. 또 고속가공기의 주축회전속도와 날당이송속도를 변화하여 안정적인 가공조건을 선정하였다. 그리고 고속가공용 공구의 성능에 영향을 미치는 주요한 인자들을 파악하여 고속가공에 따른 주요 공구 형상의 가공특성들을 파악하고자 하였다.

#### 2. 엔드밀의 형상과 고속가공

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

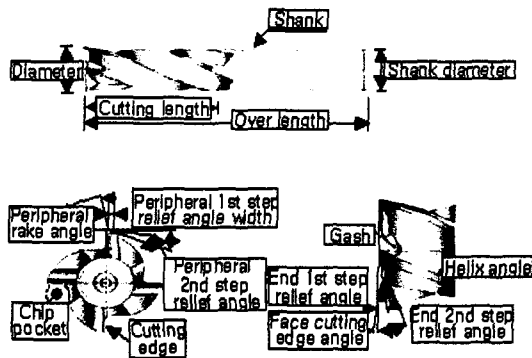


Fig. 1 Elements of end-mill

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 헬릭스각과 날수에 대한 특성을 분석하였다. 일반적인 각 인자들에 대한 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. 주로 15° 근방의 저 헬릭스각 공구는 키, 홈 가공등에 쓰이고, 고경도재를 가공할수록 50° 근방의 고 헬릭스각 공구가 사용된다.

날수는 엔드밀의 칩포켓(Chip pocket)의 크기를 결정하는 인자이다. 결론적으로 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. 고로 10,000rpm 이상의 고속가공으로 고경도재의 소재를 가공할 때에는 4날이상의 공구가 바람직할 것으로 예상된다.

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

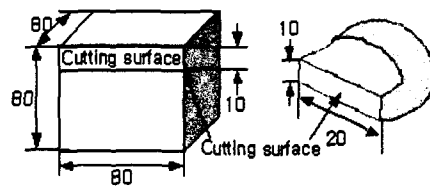
여유각은 절삭날과 가공물과의 마찰을 작게 하는 인자로 여유각이 크면 재료 침투가 용이하고 여유각이 작으면 절삭날을 강화시킬수 있다.

범용가공과는 달리 고속가공에서는 공구에 작용하는 전단응력 이외에 큰 원심력과 진동의 영향이 부가되어 회전대칭, 최소 불균형 질량, 최소 흔들림 공차등이 요구되는 등 부수적인 가공 트러블이 발생한다. 그러므로 고속가공에는 보다 개선된 공구가 사용되어야한다.

### 3. 실험장치 및 방법

공구형상에 따른 가공특성을 평가하기 위해 Fig. 2와 같이 절삭력 시편과 공구마멸 시편을 베드위에 동시에 설치하였으며 실험장치도는 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 2의 시편은 고경도재인 STD11 (Hrc 62)종을 사용하였다. 한편 마멸에 따른 공구의 형태를 관찰하기 위해서 주축에서 공구홀더(Tool holder)를 분리할 때 발생할 수 있는 위치정밀도 등의 오차를 방지하기 위하여 Fig. 3과 같이 CCD카메라를 베드위에 설치하였다. 한편 고속가공에서는 주축회전수가 높아서 매우 높은 고주파가 발생하게 된다. 기존의 공구동력계(Kistler 9257B)는 고유진동수가 낮아 고주파의 절삭신호를 획득하기 어렵다. 그래서 Fig. 4와 같이 고주파수 영역에서 안정된 응답특성을 갖도록 개발된 고속가공용 공구동력계로 절삭력을 획득하였다.<sup>[3]</sup> 그의 절삭력과 공구마모의 측정시스템에 사용된 장치들은 Table 1에 나타내었다.



(a) Tool wear (b) Cutting force

Fig. 2 Workpiece (unit: mm)

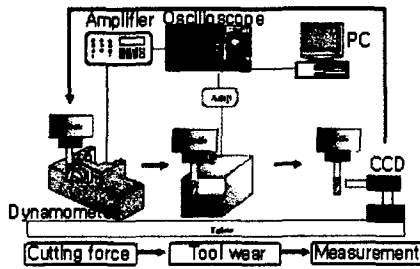


Fig. 3 Cutting & measuring system

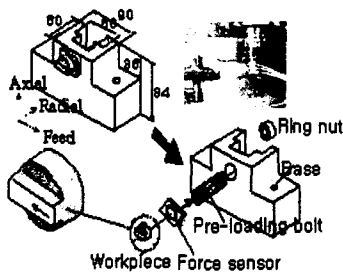


Fig. 4 Schematic diagram of tool dynamometer

Table 1 Instrument for experiment

Instrument	Specification
Machining center	Max 20,000rpm
Dynamometer	3 Axis, Freq. range : 5~10kHz
Oscilloscope	4Ch, Max Sampling: 400kHz
CCD Camera	PULNIX( $\times 200$ )

#### 4. 절삭조건의 선정 및 공구제작

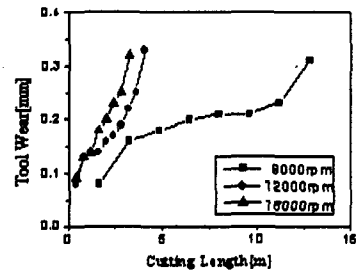
##### 4.1 절삭조건의 선정

고속가공에서 머시닝센터의 가공안정성을 실험하기 위하여 Table 2에서와 같이 주축회전수(S)와 날당이송(Fz)을 변화시켜 가공성 평가를 하였다. 그 결과 Fig. 5와 같은 결과를 얻었다. Fig. 5(a)는 회전수(S) 변화에 따른 공구수명을 비교한 것으로 12,000rpm에서도 8,000rpm같은 안정된 공구마멸패턴을 보이므로 본 실험에서는 주축회전수를 12,000rpm로 하였다. Fig. 5(b)는 날당이송(Fz) 변화에 따른 실험결과로써 날당이송을 0.04~0.06mm/teeth로 변화시킨 결과 0.05mm/teeth에서 양호한 결과를 보여 실험조건

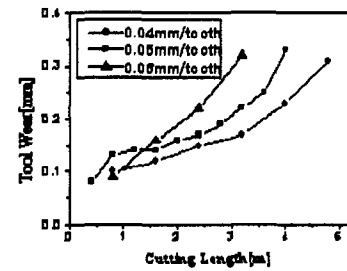
으로 선정하였다. 그리고 반경방향 절입(D)은 0.06mm, 축방향 절입은 10mm로 가공성 평가실험을 수행하였다.

Table 2 Cutting condition

Condition	S	d	Fz
Spindle revolution	8,000	0.06	0.05
	12,000		
	16,000		
Feed per tooth	12,000	0.06	0.04 0.05 0.06



(a) Variation of spindle speed



(b) Variation of feedrate

Fig. 5 Tool wear according to cutting length

##### 4.2 공구의 형상변화

공구의 성능을 지배하는 많은 인자 중에서 우선 날수와 헬릭스각(Helix angle)이 공구성능에 가장 많은 영향을 미치므로 본 연구에서는 우선 이들 인자에 대해서 가공성 평가를 하고 분석을 행하였다.

일반 범용절삭에서는 30° 헬릭스각, 4날 엔드밀이 많이 사용되는데 본 실험에서는 2장에서 살펴보았듯이 고속가공시 공구의 강성측면을 고려하여 4날·6날, 30°·45° 헬릭스각을 조합하여 총 4가지 공구를 제작하였다.

또 코팅에 의한 공구성능의 영향을 배제하고

순수하게 공구형상에 대한 영향을 분석하기 위해서 초경모재만 가지고 공구를 제작하였다. 특히 초경합금의 특성을 결정하는 가장 주된 원소는 텅스텐 카바이드(WC)와 코발트(Co)인데 일반적으로 코발트 함유량이 작을수록 경도 및 압축강도, 탄성계수가 증가하는 것으로 알려져 있다. 그래서 코발트, 텅스텐 등의 성분이 조금 다른 초경소재(A, B 형태)로 공구를 제작하였다.

A소재는 코발트(Co)가 6.75(Atomic%), 텅스텐(W)이 52.17(Atomic%)포함된 초경합금이고, B소재는 코발트(Co)가 12.72(Atomic%), 텅스텐(W)이 49.30(Atomic%)포함된 초경합금이다.

## 5. 실험결과 및 고찰

### 5.1 공구수명 특성

정상적인 마멸거동에 있어서 공구수명의 기준을 0.3mm까지하고 절삭거리를 측정된 결과를 Fig. 6에 나타내었다. A와 B의 공구 소재에 있어서 모두 날수와 헬릭스각이 증가할수록 공구수명이 개선됨을 알 수 있다. 헬릭스각의 증가에 따라 약 30~60%, 날수의 증가에 따라서는 약 35~75%의 수명이 증가하였다. 공구수명을 기준으로 판단할 때는 45° 헬릭스각과 6날을 가지는 공구가 고속가공에 가장 적합하다는 것을 알 수 있다.

A소재 공구중 30° 4날 공구의 마멸형태를 Fig. 7에 나타내었다. A, B 소재 모두 30° 4날 공구에서만 상단부 즉 절삭영역과의 경계부에서 파다칩핑이 나타났다. 이와 같은 이상 마멸은 공구가 코팅이 안된 모재만으로 제작되었고 계속해서 단속 절삭에 의한 충격력이 공구에 가해지면서 공구에 파다칩핑이 일어난 것으로 판단되어진다.

그리고 B 소재의 공구 중에서 특별하게 45° 4날 공구만 A 소재 공구에 버금가는 성능을 나타냈는데 이는 모재인 초경합금 입자의 입도 분포, 미세조직, 기공도등 재료특성의 영향으로 생각되며 B 소재 공구에는 45° 4날이 최적형상일 가능성이 클 것으로 파악된다.

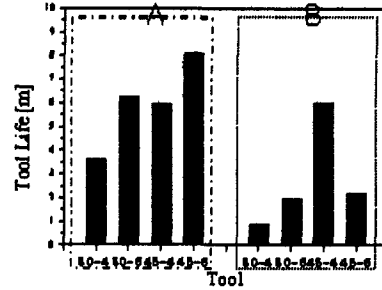


Fig. 6 Tool life according to tool shape

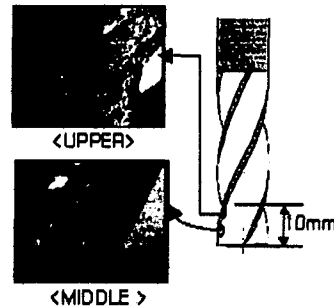
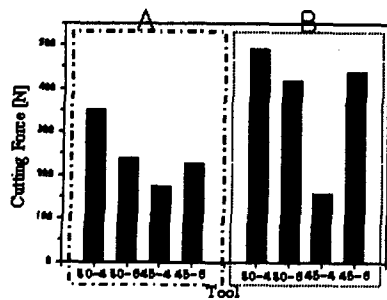


Fig. 7 Wear shape of 30° helix angle and 4 tooth tool (A type)

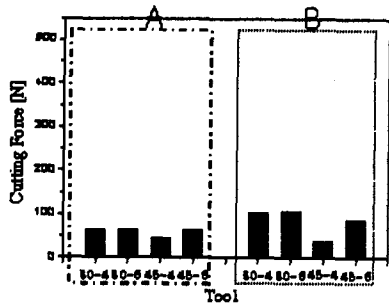
### 5.2 절삭력 특성 평가

절삭초기 공구에 걸리는 절삭력을 분석하였다. Fig. 8는 절삭력을 비교한 그림으로 0.1초 동안 획득한 신호의 평균값을 나타내었다. Fig. 8(a)는 반경방향 절삭력(Radial force)이고, Fig. 8(b)는 이송방향 절삭력(Feed direction force)이다. 반경방향과 이송방향의 절삭력은 약 4:1의 크기비를 보였으며 거의 유사한 경향을 보였다.

A소재의 공구인 경우 헬릭스각이 커질수록 절삭력이 감소하였다. B소재의 경우는 45° 4날 공구를 제외하고 A소재와 비교해서 절삭력이 두 배 가까운 크기를 보였다. A, B소재 모두 평균치로 계산한 절삭력 크기로서는 날수에 관해 특별한 경향을 찾을 수 없었다.



(a) Radial force



(b) Feed direction force

Fig. 8 Cutting force of the new tool  
(ex : 30-4 = 30° 4edge)

각 공구의 절삭력과 형태 특성을 파악하기 위하여 절삭에 관여하는 절삭날들의 기하학적 형태를 Fig. 9에 나타내었다. 또 공구 한 회전당 각 절삭날의 물림시간을 계산하여 Table 3에 나타내었다. 30° 4날의 경우는 비절삭시간이 존재하는 단속절삭의 형태를 보였으며, 다른 공구들은 최소 1날이 절삭에 관여하는 연속절삭의 형태를 나타내었다. 5.1절에서 살펴본 것과 같이 30° 4날 공구의 경우 단속절삭으로 인해 과도한 충격력이 반복작용하여 Fig. 7과 같은 이상 마모형태가 나타난 것으로 생각된다.

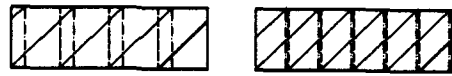
공구재종별로 가공 초기 절삭력 파형을 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 나타내었다. Fig. 10과 Fig. 11의 (a)에 단속절삭의 파형이 잘 나타나있고, Table 3와 같이 2날이 절삭에 참여하는 시간이 길어질수록 Fig. 10과 Fig. 11의 (b), (c), (d)와 같이 진폭이 줄어들어 차츰 연속적인 절삭력 파형이 됨을 알 수 있다.

5.1절에서 살펴보았듯이 B소재의 45° 4날 공구의 절삭파형을 보면 다른 B 소재공구에 비해서 그 평균 절삭력 크기가 80~200N 정도 작은 값을 나타내었다. 공구수명이 현저히 긴 현상이 절삭력 특성에서도 잘 나타난다.



(a) 30° 4edge

(b) 30° 6edge



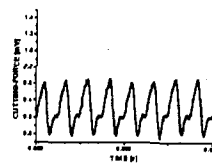
(c) 45° 4 edge

(d) 45° 6edge

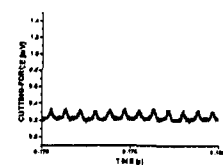
Fig. 9 Geometric shape of edge according to tool shape

Table 3 The time when edge is involved in cutting

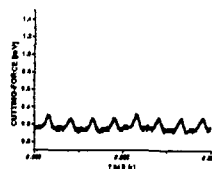
Tool	Involved cutting edge [No]	Time [ms]
30° 4edge	0	0.33
	1	0.92
30° 6edge	1	0.74
	2	0.09
45° 4edge	1	0.91
	2	0.34
45° 6edge	1	0.07
	2	0.76



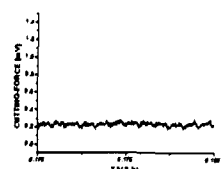
(a) 30° 4edge



(b) 30° 6edge



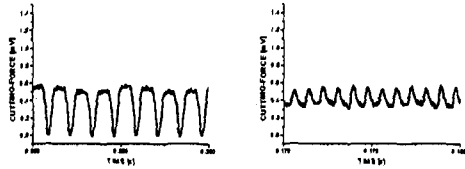
(c) 45° 4edge



(d) 45° 6edge

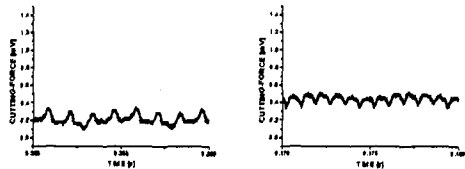
Fig. 10 Cutting force waveform according to

tool shape (A type)



(a) 30° 4edge

(b) 30° 6edge



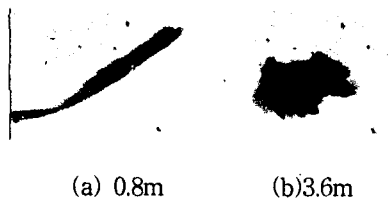
(c) 45° 4edge

(d) 45° 6edge

Fig. 11 Cutting force waveform according to tool shape (B type)

### 5.3 칩 특성

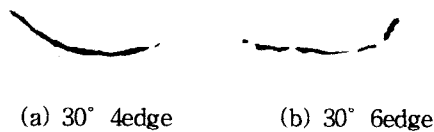
공구의 마멸이 진행될수록 Fig. 12와 같이 칩의 형태가 변화한다. 절삭초기에는 가늘고 긴 유동형 칩이 배출되다가 공구가 마멸되면 길이가 짧은 전단형 칩이 배출되었다.



(a) 0.8m

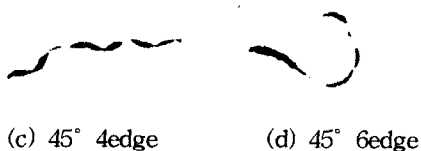
(b) 3.6m

Fig. 12 Chip shape according to cutting length (A type tool : 30° 4edge )



(a) 30° 4edge

(b) 30° 6edge



(c) 45° 4edge

(d) 45° 6edge

Fig. 13 Chip shape according to tool shape at the beginning of cutting

그리고 공구형태에 따른 칩의 특성을 파악하기 위해 절삭초기의 칩의 형태를 관찰하여 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 13에 나타나듯 칩의 길이는 날수의 영향을 거의 받지 않으며, 헬릭스각이 커짐에 따라 칩배출 길이가 길어지고 칩두께가 얇아져서 많은 감김(Curl)이 나타났다.

### 5. 결론

본 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 전체적으로 코발트 함량이 12.72%인 B소재보다 코발트 함량이 6.75%인 A소재의 공구가 고속가공에 더 적합하였다.
- (2) 반경방향과 이송방향의 절삭력의 크기는 약 4:1 정도였으며 헬릭스각과 날수에 따른 초기 절삭력크기의 경향이 거의 유사하였다.
- (3) 칩은 헬릭스각이 증가할수록 칩배출 길이가 길어지고 칩 두께가 얇아져서 더 많은 감김이 나타났다. 공구마멸이 진행될수록 배출되는 칩은 유동형에서 전단형 칩으로 바뀌었다.
- (4) 공구수명 측면에서, 헬릭스각의 증가에 따라 약 30~60%, 날수의 증가에 따라서는 약 35~75%의 성능 개선을 보였다. 절삭력도 이에 상응하는 결과를 보였다.

향후 경사각(Rake angle)등 다른 인자들의 특성을 연구하여 고속가공에 적합한 고속가공용 공구의 형상을 설계하고 추천 절삭조건을 제시하고자 한다.

### 후기

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

### 참고문헌

1. 김정석, 강명창, 박상봉, 이형국, "고속가공기술의 노하우(20)", 금형저널, 2001년 2월호
2. 이종선, "엔드밀의 모든 것", 성안당, 1997,
3. 김정석, 이득우, 강명창, 이기용, 김정훈, "고속가공에서 가공성 평가를 위한 3축 공구동력계 개발", 한국정밀공학회, 제16권, 제5호, pp. 11-18, 1999. 5