

## 고속용 엔드밀의 성능평가에 관한 연구

이정길\*, 유중학, 김문기, 국정한(한국기술교육대학교)

### A Study on the Evaluation of End Mills for High Speed Machining

J. K. Lee, J. H. Yoo, M. K. Kim, J. H. Kook(KUT)

#### ABSTRACT

The purpose of this study is an evaluation of end mills to develop appropriate tools for the high speed machining. First of all, several flat end mills which are produced by different makers are selected to analyze the performances of the tools. Experimental works are also executed to measure cutting force, tool wear and surface roughness for different cutting conditions. And then the results are compared and analyzed for developing optimal cutting tool in the high speed condition. Especially, analysis about tool wear is introduced in this research.

**Key Words** : High Speed Machining(고속가공), End Mill(엔드밀), Cutting Condition(절삭조건), Cutting Force(절삭력), Tool Wear(공구마모), Surface Roughness (표면거칠기)

#### 1. 서론

고속가공기술 개발의 필요성은 가공정밀도 및 생산성 향상에 있다. 가공정밀도의 개선은 가공 부가 가치를 높여주고, 생산성의 향상은 가공경비를 줄임으로써 경쟁력을 강화시킨다. 즉, 고속절삭의 실현은 생산성 개선을 위한 가장 유력한 수단으로 현재 고속가공에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 여기서 대두되는 과제로써 고속, 고정밀도 가공을 가능하게 하는 공작기계의 개발과 공구의 개발이다. 일반적으로 절삭능률, 즉 단위시간당 칩 배출량을 늘리기 위해서는 이송, 절입량, 절삭속도 중 어느 하나를 크게 하여 높일 수 있다. 실제적으로 경제성과 기술적인 면에서 이들 3요소를 자유자재로 조작하는 것은 어렵다. 예를 들어, 주축을 고속으로 회전시켜 이송속도를 증가시킬 경우 가공형상오차는 커지게 되고, 주축의 회전을 증가시키면 진동이 커지게 되어 공구수명이 짧아지게 된다. 이와같이 절삭공구와 공작기계의 성능 개선은 상호 밀접한 관련을 갖으며 이들 모두의 발달이 이루어져야만 절삭속도의 고속화가 가능해진다. 본 연구에서는 두가지 중 절삭공구에 관한 내용을 다루고자 한다.

절삭가공의 효율성을 결정하는 인자로는 피삭재,

절삭조건, 공작기계의 강성, 절삭공구 등을 들 수 있다. 최근 각종 신소재개발에 따른 난삭재의 출현과 가공제품의 신속, 고품질이 요구되고 있기 때문에, 고속가공에 적합한 새로운 절삭공구 개발의 지속적인 연구는 고속가공이 가능한 토대가 되고 있다.

본 연구는 고속가공용 엔드밀의 성능평가를 그 목적으로 한다. 이를 위해 자료조사를 통한 공구재종 및 용도면에서 성능이 대등한 국내외의 대표적인 고속용 공구를 선정하여 절삭실험에 의한 정량화 된 결과를 비교 분석하여 선정공구들을 평가한다. 본 논문에서는 성능평가를 위해 고려해야할 많은 항목 중 공구마모에 관련된 부분을 중심으로 기술하고자 한다.

#### 2. 공구의 마모

공구마모는 치핑이나 마모 등의 기계적 마모에 의한 것과 열피로, 열확산, 응축, 용착, 연화 등의 열화학적 마모에 의한 것으로 대별할 수 있다. 공구마모는 공구 및 피삭재의 재질, 공구형상, 절삭유제의 특성 등에 따라 좌우되며, 마모의 형태는 프랭크 마모, 크레이터 마모, 치핑 등의 형태로 나타난다. 이들 중 프랭크 마모가 가장 보편적인 경우이므로 정상

조건하에서 공구의 마모를 판단하는 기초 자료로 많이 사용된다.

마모의 측정방법은 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 구분할 수 있으며, 직접적인 방법은 공구로부터 마모량을 직접 측정하여 체적 손실을 평가하는 방법이고, 간접적인 방법은 측정하기가 수월한 다른 절삭변수를 측정하여 공구마모량과의 관계를 확립함으로써 마모량을 측정하는 것이다. 직접적인 방법은 정확한 결과를 얻을 수 있지만 적용시키기가 어려운 반면에 간접적인 방법은 적용시키기는 쉽지만 신뢰성이 조금 떨어지는 단점이 있다. 그러나 마이크로프로세서 및 전자기술의 발전과 함께 계산속도가 빨라지고 신뢰성이 향상되면서 간접적인 방법에 의한 측정이 많이 활용되고 있는 추세이다.

직접적인 방법에는 크게 오프라인방법과 온라인방법이 있으며, 오프라인방법은 공구의 형상이나 떨어져나간 공구의 미립자량을 센서로 자동 측정하거나 인간이 공구 현미경 등을 이용하여 직접 측정한다. 이 방법은 비교적 정확하지만 마모측정시 시간 지연의 문제가 있으므로 온라인 적용시엔 적당하지 않다. 온라인 방법에는 광학센서류, 전기저항센서류, 공압센서 등을 이용한다. 이들 중 가장 보편적이고 신뢰할 수 있는 기술이 광학적인 방법이다. 간접적인 방법은 센서를 이용하여 공구마모와 간접적인 관계를 갖는 요소들을 측정하여 마모를 추정하는 방법으로서, 절삭력, 표면거칠기, 온도 및 열적 효과, AE, 진동 등과 같이 절삭공정에서 발생하는 측정신호를 기초로 하여 마모량을 산출한다. 이들 중 측정하기 쉽고 보편적으로 활용되는 요소가 절삭력이다. 절삭력 성분을 측정하는데 있어서의 문제점은 절삭력이 일정한 값을 갖는 것이 아니라 불규칙하게 변한다는 것이다. 따라서 평균값이 사용되어야 한다. 절삭가공에서 발생하는 절삭력은 피삭재의 재질에 따라 크게 달라진다. 그리고 또 다른 중요한 변수는 공구의 형상이다. 공구의 형상은 구성인선이나 프랭크 마모 및 크레이터 마모에 영향을 미치며, 이는 절삭력 성분에 변화를 줄 수 있다. 이와 관련하여 많은 연구자들이 절삭력 성분과 공구마모와의 관계를 규명하기 위하여 많은 연구를 행하여 왔고, 연구 결과는 절삭력 성분이 공구마모 상태를 추정할 수 있는 유용한 방법임을 입증하였다.

### 3. 실험장치 및 방법

본 연구의 실험은 고속용 평엔드밀의 성능평가를 위하여 절삭력, 공구마모 및 표면거칠기 등을 관찰하였다. 실험장치로는 Table 1과 같으며, Fig. 1은 절삭력 측정시스템 개략도이다. 자료조사를 통하여 선정된 4社の TiAlN 코팅 평엔드밀을 사용하여, 피삭

재로는 합금공구강 STD11[HRc40]과 구조용 합금강 SCM4의 시편크기를 150×40×30으로 Table 2, Table 3과 같은 절삭조건으로 건식, 하향절삭을 행하였다.

실험방법은 고속가공기와 머시닝센터에서 압전 소자형 공구동력계로 절삭력을 측정하고, 공구마모는 직접적인방법의 오프라인 측정방식을 채택하여 공구현미경으로 외주절삭날 상면마모폭을 측정하였으며, 가공면의 조도는 접촉침방식으로 바닥면과 측면의 중심선 평균거칠기 값을 측정하였다.

Table 1 성능평가 측정시스템

List	Name	Model name	Maker
Machine tool	HSC-Machine	RFM-600	Röderse
	Machining center	SERJUS-2	Hwacheon
Cutting force	Tool dynamometer	9254	Kistler
		9257B	
	Multichannel conditioner	5223A	Data translation
	Terminal panel	STP300	
	DAQ board	DT301	
	DAQ software	HP VEE 4.0	HP
	PC system	Intel PII	LG-IBM
Tool wear	Microscope measuring system	VM-20	Olympus
Surface roughness	Surface roughness measuring system	Surfanalyzer 5000	Federal

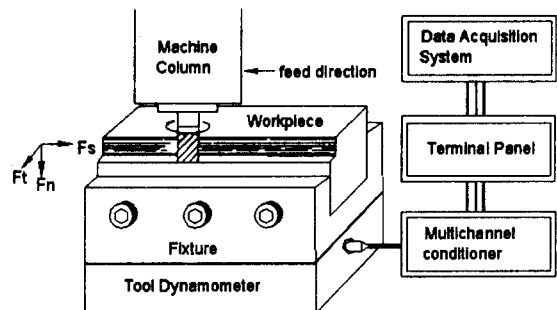


Fig. 1 절삭력 측정 시스템

Table 2 머시닝센터의 절삭조건(STD11)

D	Ad	Rd	fz[mm/tooth]	N[rpm]	V[m/min]	F[mm/min]
6	6	0.12	0.012	3000	57	216
10	10	0.02	0.02	1800	57	216

Table 3 고속가공기의 절삭조건(STD11, SCM4)

D	Ad	Rd	fz[mm/tooth]	N[rpm]	V[m/min]	F[mm/min]
6	6	0.3	0.03	10000	188	1080
10	10	0.5	0.05	6000	188	1080

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 절삭력

공구마모와 절삭력의 관계를 알아보기 위해 고속가공기와 머시닝센터에서 피삭재와 절삭조건을 달리 하여 이송분력과 접선분력의 초기값을 측정하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 고속가공기에서 공구  $\phi 6$ 로 STD11[HRc40]을 Table 3의 절삭조건으로 절삭력을 측정된 결과이다. 절삭력이 6날 공구의 경우보다 2날 공구의 경우가 상대적으로 낮게 나타났다. 그리고 절삭력 평균값의 비교에서 이송분력이 접선분력의 31.8%로 낮게 나타났다. 그리고 피삭재의 경도에 따른 용도상의 분류에서 상대적으로 고경도용의 공구가 절삭력이 큰 것으로 나타났으며, 동일 제조사 제품만의 비교에서도 동일한 결과를 얻었다.

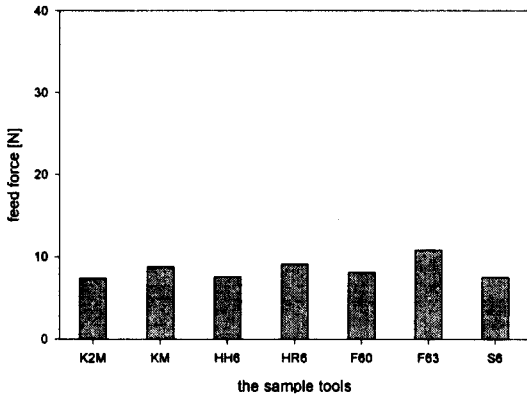


Fig. 2 STD11 절삭시의 이송분력

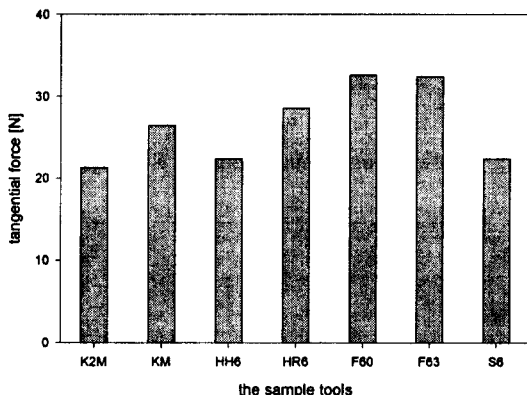


Fig. 3 STD11 절삭시의 접선분력

공구제조 회사별 비교에서는 F社의 F60과 F63의 경우가 타 회사의 제품과 비교하여 절삭력이 높게 나타났다. 그 원인은 일정거리 절삭 후에 미시적(50배율 확대)으로 마모상태를 관찰한 결과, 6날 중 4개 날의 경우 마모가 진행되었으나 2개 날의 경우는 상

대적으로 마모량이 극히 미미한 것으로 보아 외주 절삭날의 바깥지름 혹은 높이가 동일하지 않은, 공구형상 정밀도가 낮은데서 기인한 결과라 사료된다.

Fig. 4와 Fig. 5는 머시닝센터에서  $\phi 6$ 로 SCM4를 절삭한 결과이다. 고속가공기에서 STD11을 동일한 절삭조건에서 측정된 절삭력과의 차이가 거의 없는 것으로 보아 절삭면적(Ad, Rd)이 큰 경우에 피삭재의 경도가 절삭력에 크게 영향을 끼치는 것으로 나타났다.

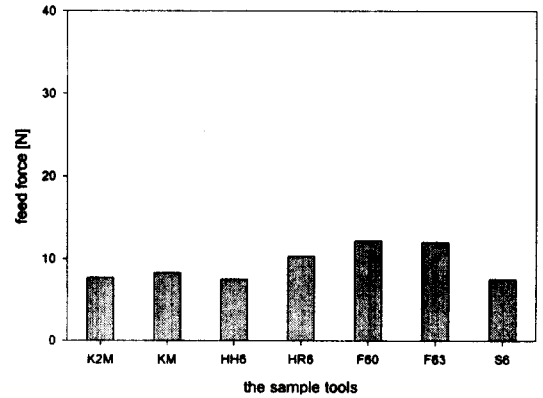


Fig. 4 SCM4 절삭시의 이송분력

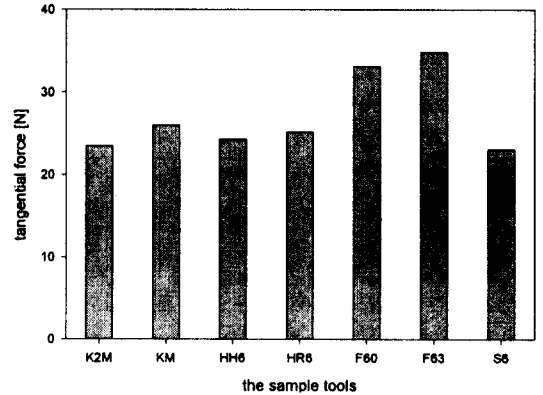


Fig. 5 SCM4 절삭시의 접선분력

### 4.2 공구마모

공구마모는 선정공구로 동일한 절삭조건에서 일정 절삭길이마다 직접적인방법의 오프라인 측정방식을 채택하여 공구현미경으로 외주절삭날 상면마모폭을 측정하였다.

Fig. 6과 Fig. 7은 고속가공기에서 선정공구 중 S10( $\phi 10$ )로 STD11을 Table 3의 절삭조건으로 10m와 20m를 각각 절삭한 후에 공구현미경으로 측정된 것이고, Fig. 8과 Fig. 9는 머시닝센터에서 동일한 공구와 피삭재로 Table 2의 절삭조건으로 30m와 60m를 각각 절삭한 후의 외주절삭날 상면의 마모상태를 보

여주는 것으로써 절삭조건이 강한 고속가공기에서 마모가 큰 것을 알 수 있다.

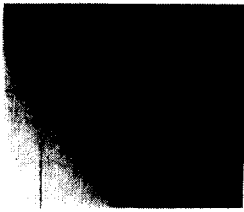


Fig. 6 10m 절삭 후의 마모 (HSM-Ø10)

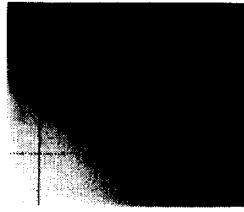


Fig. 7 20m 절삭 후의 마모 (HSM-Ø10)

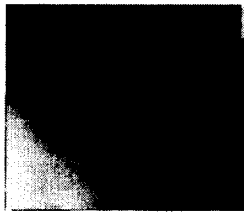


Fig. 8 30m 절삭 후의 마모 (MC-Ø10)

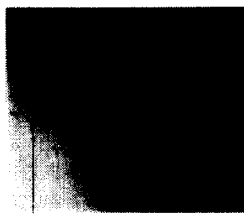


Fig. 9 60m 절삭 후의 마모 (MC-Ø10)

Fig. 10과 Fig. 11은 고속가공기에서 STD11을 Table 3의 절삭조건으로 절삭한 후에 절삭길이에 따른 공구마모량을 측정된 것이다.

φ6의 경우에 절삭길이 15m까지 측정된 마모의 평균값이 KM이 0.06mm, HH6는 0.10mm이고, F63의 경우는 절삭길이 5m에서 0.41mm로 극심한 마모량을 나타내어 주어진 절삭조건으로는 더 이상 절삭이 불가능하였다.

φ10의 경우에는 절삭길이 30m까지 측정된 마모의 평균값이 HH10은 0.05mm, KM은 0.07mm, S10은 0.16mm로 나타났다. F63의 경우는 절삭길이 10m에서 0.47mm의 마모량이 측정되어 더 이상 절삭이 불가능하였다.

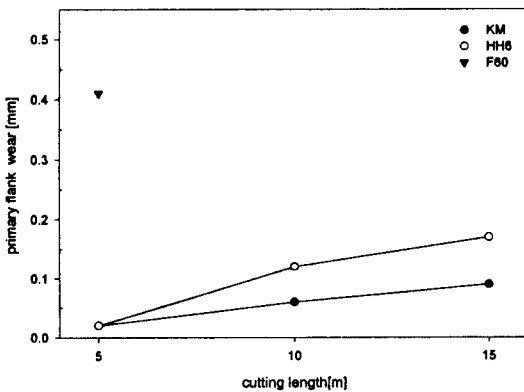


Fig. 10 φ6-1080mm/min, 10000rpm, STD11[HRc40]

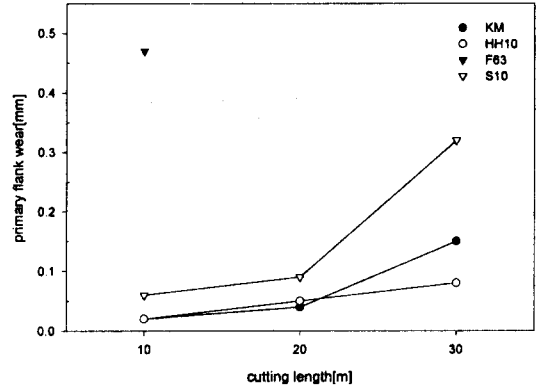


Fig. 11 φ10-1080mm/min, 6000rpm, STD11[HRc40]

Fig. 12와 Fig. 13은 머시닝센터에서 STD11을 Table 2의 절삭조건으로 절삭한 후에 절삭길이에 따른 공구마모량을 측정된 것이다.

φ6의 경우에 절삭길이 20m까지 측정된 마모의 평균값이 KM이 0.06mm, HR6은 0.14mm, F60은 0.42mm로 나타났다.

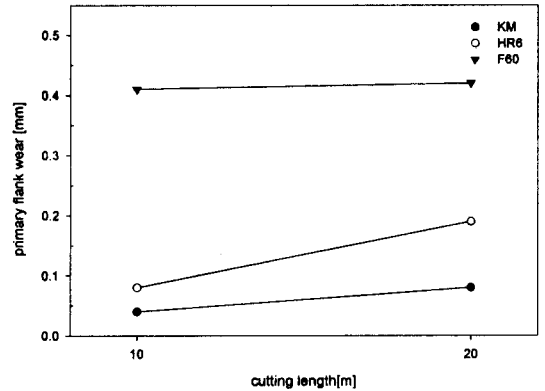


Fig. 12 φ6-216mm/min, 3000rpm, STD11[HRc40]

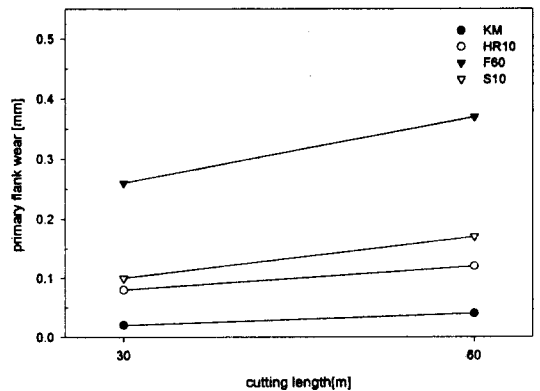


Fig. 13 φ10, 216mm/min, 1800rpm, STD11[HRc40]

φ10의 경우에 절삭길이 60m까지 측정된 마모의 평균값이 KM이 0.03mm, HR10은 0.10mm, S10은 0.14mm, F60은 0.32mm로 나타났다.

위 실험결과에서 동일 제조회사 제품의 경우 회사에서 추천하는 저경도용 공구모델이 고경도용 공구보다 마모가 적은 것을 알 수 있는데, 이는 용도에 따른 공구 경사각의 차이에서 기인하는 것으로 사료된다. 이와같이 공구마모는 공구형상에 따른 영향과 공작기계의 강성도, 그리고 절삭조건에서 고경도 피삭재의 고속절삭시 고온, 진동 등이 주요 원인이 될 수 있다.

공구마모는 각 회사의 추천절삭조건보다도 낮게 적용하였음에도 매우 심하게 나타났으며, 본 연구의 일정한 절삭조건하에서 제조회사에 따라 마모 정도가 크게 다르게 나타났다. 특히, K사 공구의 경우 아주 작게 나타났으며, 반면 F사 공구의 경우는 상대적으로 매우 큼을 알 수 있었다. 이것은 제조회사별 고속가공시장에 대한 영역이 다름으로 인하여 인성과 내마모성 중 어느 하나를 중시하여 제조하는데서 기인한다고 판단된다.

앞에서 언급한 표면거칠기에 관해서는 평엔드밀의 사용목적이 완성 가공면을 얻는 가공에는 의미가 적기 때문에 측정값이 주는 의미는 적지만, 사용된 공작기계의 동적 안정성, 절삭조건 및 공구의 형상 등과 관계가 있고, 실험결과에 대해서는 차후에 소개하기로 한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 고속가공용 엔드밀 개발을 위한 기초작업의 일환으로 고속가공에 적합한 엔드밀 선정을 위한 공구성능 평가를 하였다. 국내외의 대표적인 고속용 공구들을 선정하여 이들을 종류별, 크기별 및 피삭재 별로 구분한 후, 절삭력, 공구마모 및 표면거칠기 등의 실험을 통하여 얻은 결과를 공구마모에 관련한 부분을 중심으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공구마모에 크게 영향을 주는 이송분력( $F_s$ )과 접선분력( $F_t$ )의 초기값은 6날의 경우보다 2날의 경우가 상대적으로 적었다.
- (2) 피삭재의 경도에 따른 공구의 분류에서 상대적으로 저경도용의 공구보다 고경도용의 공구가 절삭력이 큰 것으로 나타났으며, 동일 제조회사 제품만의 비교에서도 동일하였다.
- (3) 공구 제조회사별 비교에서는 F사의 경우가 타 회사의 제품과 비교하여 절삭력이 높게 나타났다.
- (4) 공구마모는 각 회사의 추천절삭조건보다도 낮게

적용하였음에도 매우 심하게 나타났으며, 엔드밀의 마모 정도는 K사, H사, S사, F사의 순으로 크게 나타났다.

## 참고문헌

1. J. Boehner, et al., "Effect of Carbide Tool Grades and Cutting Edge Geometry on Tool Life During High Speed Machining of Hardened Tool Steel," 2nd Int. Conference on High Speed Machining, pp. 37-46, 1999.
2. R. C. Dewes, et al., "High Speed Machining of Hardened Steels using Coated Tungsten Carbide Ball Nose End Mills," 2nd Int. Conference on High Speed Machining, pp. 165-174, 1999.
3. Y. Okazaki, "Trochoid Cutting and Helical Cutting for High Speed Machining," TOOL & TECH, No. 2, pp. 17-19, 1999.
4. S. Kitaura, et al., "Dry Cutting Performance of (Al,Ti)N Coated Carbide Endmills for High Speed Machining," TOOL & TECH, No. 2, pp. 4-7, 1999.
5. K사, F사, H사, J사, S사 제품 소개서 및 기술자료, 1999.
6. Y. Ito, "In-process measurement of cutting force and its application to identification of machining status," KISTLER Seminar spectrum, 2000.
7. P. Collin, "고속가공기술 및 고속가공용 절삭공구의 설계 및 평가요소," 선진전문가 초청 특별세미나 자료, 한국기술교육대학교 능력개발교육원, 2000.