

TiAlN 코팅 평 엔드밀의 성능평가에 관한 기초 연구

유중학*, 국정한**, 김문기*

A Basic Study on the Evaluation of Flat End-mill Coated TiAlN

Joong-Hak Yoo*, Jeong-Han Kook**, Moon-Ki Kim*

Abstract

The purpose of this study is an evaluation of flat 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.

Key Words : High Speed Machining(고속가공), Flat End-mill(평 엔드밀), Cutting Condition(절삭조건), Cutting Force(절삭력), Tool Wear(공구마멸), Surface Roughness(표면거칠기)

1. 서 론

고속가공기술 개발의 필요성은 가공정밀도 및 생산성 향상에 있다. 가공정밀도의 개선은 가공 부가가치를 높여 주고, 생산성의 향상은 가공경비를 줄임으로써 경쟁력을 강화시킨다. 즉, 고속절삭의 실현은 생산성 개선을 위한 가장 유력한 수단으로 현재 고속가공에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.⁽¹⁻³⁾ 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 기

술적인 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. 이와 같이 절삭공구와 공작기계의 성능 개선은 상호 밀접한 관련을 갖으며 이들 모두의 발달이 이루어져야만 절삭속도의 고속화가 가능해진다. 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.^(4,6) 본

* 한국기술교육대학교 메카트로닉스 공학부(유중학: jhyoo@kut.ac.kr)
** 한국기술교육대학교 기계공학부

연구는 고속가공용 평 엔드밀의 개발을 위한 성능평가를 목적으로, 자료조사를 통하여 공구재종과 성능이 우수한 국내외의 대표적인 고속용 평 엔드밀을 선정하여 절삭실험에 의하여 평가하였다. 성능평가는 절삭력, 공구마모 및 표면거칠기를 중심으로 실시하였으며, 이를 이용하여 고속용 평 엔드밀의 개발을 위한 재종, 코팅 및 형상설계의 기초자료와 산업현장에서 생산성향상의 적정조건을 제시하고자 한다.

2. 공구 마멸

공구마멸은 치핑이나 마모 등의 기계적 마모에 의한 것과 열피로, 열확산, 응착, 용착, 연화 등의 열화학적 마모에 의한 것으로 대별할 수 있다. 공구마모는 공구 및 피삭재의 재질, 공구형상, 절삭유체의 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 공구 마모량과의 관계를 확립함으로써 마모량을 측정하는 것이다. 직접적인 방법은 정확한 결과를 얻을 수 있지만 적용시킴이 어려운 반면에 간접적인 방법은 적용시킴이 쉽지만 신뢰성이 조금 떨어지는 단점이 있다. 그러나 마이크로 프로세서 및 전자기술의 발전과 함께 계산속도가 빨라지고 신뢰성이 향상되면서 간접적인 방법에 의한 측정이 많이 활용되고 있는 추세이다.⁽⁷⁾ 직접적인 방법에는 크게 오프라인방법과 온라인방법이 있으며, 오프라인 방법은 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.^(8,9) 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 산출한

다. 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.⁽¹⁰⁾

3. 실험장치 및 방법

본 연구의 실험은 고속용 평 엔드밀의 성능평가를 위하여 절삭력, 공구마모 및 표면거칠기 등을 관찰하였다. 실험장치의 사양은 Table 1과 같으며, Fig. 1은 절삭력 측정 시스템 개략도이다. 자료조사를 통하여 선정된 4사의 고속용 TiAlN 코팅 평 엔드밀을 사용하여, 피삭재로는 합금공구강 STD11[HRC40]과 구조용 합금강 SCM4의 시편크기를 150 × 40 × 30으로 가공하여, Table 2와 같은 절삭조건으로 건식, 하향절삭을 행하였다. 여기에서 절삭조건은 공구 제조회사에서 추천한 절삭조건과 산업현장에서 사용하는 조건을 바탕으로 예비실험을 통하여 적정 조건으

Table 1 Specifications of measuring system

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

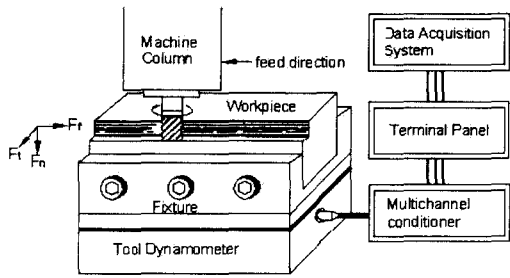


Fig. 1 Schematic diagram of cutting force measuring system

Table 2 Cutting conditions

Machine Tools	D [mm]	Ad [mm]	Rd [mm]	fz [mm/tooth]	N [rpm]	V [m/min]	F [mm/min]
MC	6	6	0.12	0.012	3000	57	216
MC	10	10	0.02	0.02	1800	57	216
HSM	6	6	0.3	0.03	10000	188	1080
HSM	10	10	0.5	0.05	6000	188	1080

Table 3 Characteristics of Flat Endmill

Maker	K		H		F		S
Label of sample	K2M	KM	HH	HR	F60	F63	S
Number of flute	2	6	6	6	6	6	6
Helix angle(°)	30	45	45	45	45	55	45
Clearance angle(°)	15	10	10	10	10	5	10
Rake angle(°)	1	-25	-24	-20	3	-20	-13

로 선정되었다. Table 3은 본 실험에 사용된 공구의 특성을 나타낸 것이다.

실험방법은 고속가공기(high speed machine:HSM)와 머시닝센터(machining center:MC)에서 압전소자형 공구동력계로 절삭력을 측정하였고, 공구마모는 오프라인 측정 방식을 채택하여, 영상 공구현미경 시스템을 사용하여 외주절삭날 상면마모폭을 측정하였으며, 가공면의 표면거칠기는 접촉식 측정기를 사용하여 바닥면과 측면의 중심선 평균거칠기 값을 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 절삭력

공구마모와 절삭력의 관계를 알아보기 위해 고속가공기

와 머시닝센터에서 피삭재와 절삭조건을 달리하여 이송분력(F_f)과 접선분력(F_t)의 초기값[N]을 측정하였다. Fig. 2는고속가공기에서 공구 $\phi 6$ 으로 STD11 [HRC40]을 Table 2의 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. 동일 제조회사 제품에서도 나선각이 크거나, 여유각이 작은 고경도용 KM, HR, F63 등의 엔드밀이 절삭력은 크게 나타났다.

공구제조 회사별 비교에서는 F사의 F60과 F63의 경우가 타 회사의 제품과 비교하여 절삭력이 높게 나타났다. 그 원인은 일정거리 절삭 후에 미시적(30배율 확대)으로 마모상태를 관찰한 결과, 6날 중 4개 날의 경우 마모가 진행되었으나 2개 날의 경우는 상대적으로 마모량이 극히 미미한 것으로 보아 나선각의 크기, 외주 절삭날의 바깥지름의 공구형상 정밀도가 낮으면서 기인한

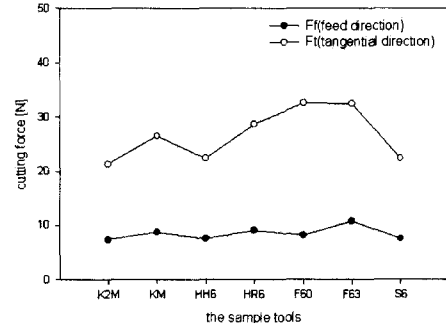


Fig. 2 Relationship between cutting force and the sample tools in high speed machining

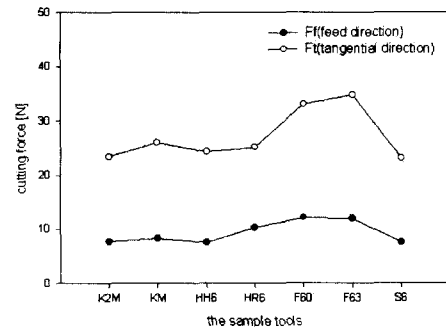


Fig. 3 Relationship between cutting force and the sample tools in machining center

결과라 사료된다.

Fig. 3은 머시닝센터에서 Table 2의 절삭조건으로 $\phi 6$ 엔드밀을 사용하여 SCM4를 절삭한 것이며, 고속가공기에서의 절삭실험 결과인 Fig. 2와 유사한 경향을 보였다.

4.2 공구마멸 특성

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

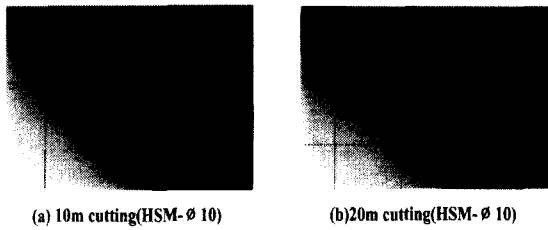


Fig. 4 Tool wear with high speed machining

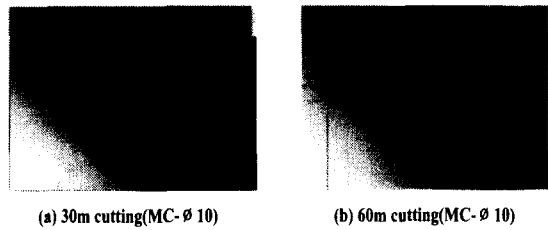
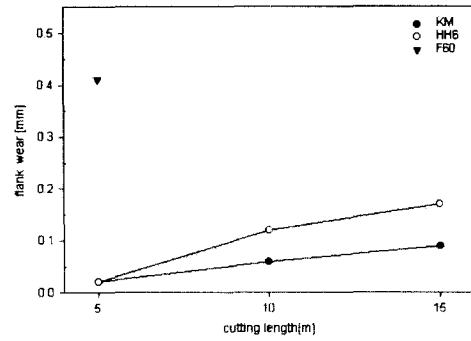


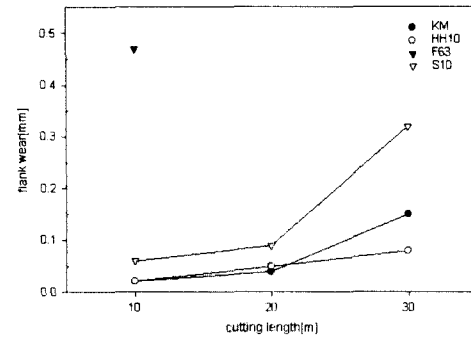
Fig. 5 Tool wear with machining center

Fig. 4는 고속가공기에서 선정공구 중 S10($\phi 10$)으로 STD11을 Table 2의 절삭조건으로 10[m]와 20[m]를 각각 절삭한 후에 공구현미경으로 측정된 것이며, Fig. 5는 머시닝센터에서 동일한 공구와 피삭재로 Table 2의 절삭조건으로 30[m]와 60[m]를 각각 절삭한 후의 외주절삭날 상면의 마모상태를 보여주는 것으로서 절삭조건이 강한 고속가공기에서 마모가 큰 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 고속가공기에서 STD11을 Table 2의 절삭조건으로 절삭한 후에 절삭길이에 따른 공구마모량을 측정된 것이다. Fig. 6(a)의 $\phi 6$ 일 때는 절삭길이 15m까지 측정된 마모의 평균값이 KM이 0.06[mm], HH6는 0.10[mm]이고, F60의 경우는 절삭길이 5[m]에서 0.41[mm]로 매우 심한 마모량을 나타내어 주어진 절삭조건으로는 더 이상 절삭이 불가능하였다.



(a) $\phi 6$ Flat End-mill



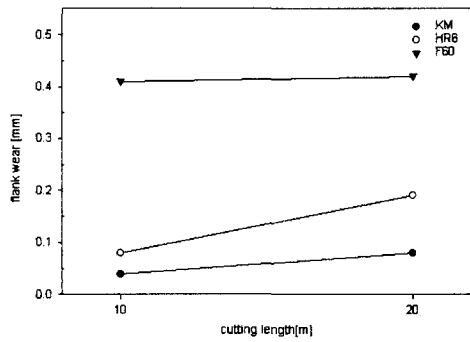
(b) $\phi 10$ Flat End-mill

Fig. 6 Relationship between flank wear and cutting length with high speed machine

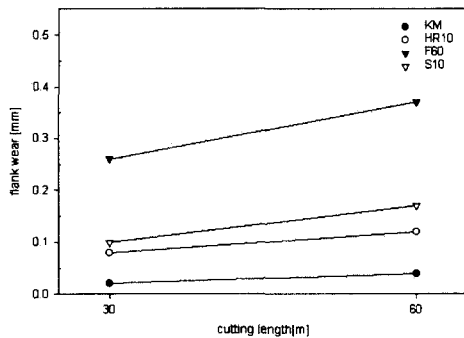
Fig. 6(b)의 $\phi 10$ 일 때는 절삭길이 30[m]까지 측정된 마모의 평균값이 HH10은 0.05[mm], KM은 0.07[mm], S10은 0.16[mm]로 나타났다. F63의 경우는 절삭길이 10[m]에서 0.47[mm]의 마모량이 측정되어 더 이상 절삭이 불가능하였는데, 이는 고경도재의 절삭보다는 엔드밀에 인성을 요구하는 절삭을 목표로 제작된 것으로 보인다. 또한 공구마모는 경사각보다는 여유각이 더 큰 영향이 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 머시닝센터에서 STD11을 Table 2의 절삭조건으로 절삭한 후에 절삭길이에 따른 공구마모량을 측정된 것이다. Fig. 7(a)의 $\phi 6$ 일 때는 절삭길이 20[m]까지 측정된 마모의 평균값이 KM이 0.06[mm], HR6은 0.14[mm], F60은 0.42[mm]로 나타났다.

Fig. 7(b)의 $\phi 10$ 일 때는 절삭길이 60[m]까지 측정된 마모의 평균값이 KM이 0.03[mm], HR10은 0.10[mm], S10은 0.14[mm], F60은 0.32[mm]로 나타났다. 이러한 실험



(a) ϕ 6 Flat End-mill



(b) ϕ 10 Flat End-mill

Fig. 7 Relationship between flank wear and cutting length with machining center

결과에서 동일 제조회사 제품에서도 F60과 같이 나선각이 작고 여유각이 크거나, HH와 같이 경사각이 작은 저경도용일 경우에 마모가 작은 것을 알 수 있다.

공구마모는 각 회사의 추천절삭조건보다도 낮게 적용하였음에도 매우 심하게 나타났으며, 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 다르므로 인하여 인성과 내마모성 중 어느 하나를 중시하여 제조하는데서 기인한다고 판단된다.

4.3 표면거칠기

표면거칠기의 측정은 Fig. 8과 같은 방향으로 컷오프 (cut-off)를 0.8[mm]로 하여 평가길이 5.6[mm]에 걸쳐 중심선평균거칠기(Ra)로 나타내었다.

Fig. 9~Fig. 10은 고속가공기에서 Table 2의 조건으로 절삭길이에 따른 중심선평균거칠기(Ra)를 측정 한 결과이다. Fig. 9에서 6평엔드밀의 경우는 전 절삭길이에 측정된 이송방향의 중심선평균거칠기(Ra)의 평균값(Ra)이 KM은 0.23[μ m], HH6은 0.38[μ m], F63은 0.47[μ m]의 순으로 그 값이 크고, 반경방향의 중심선평균거칠기(Ra)의 평균값이 KM은 0.90[μ m], HH6은 1.27[μ m], F63은 1.53[μ m]의 순으로 그 값이 크게 나타났다.

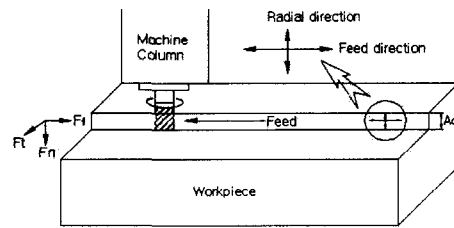
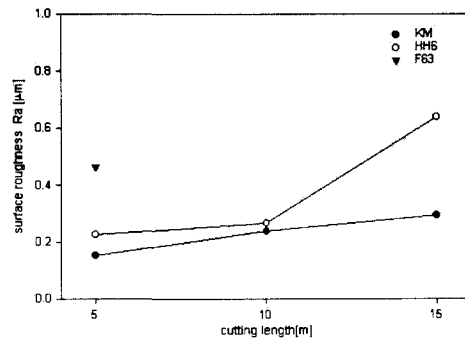
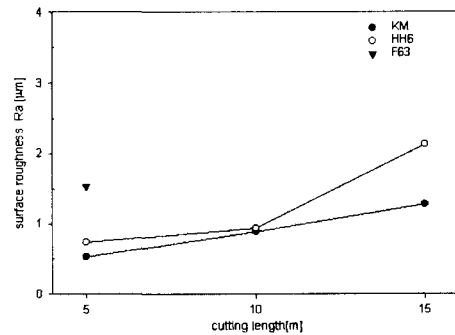


Fig. 8 Measuring direction of surface roughness



(a) feed direction



(b) radial direction

Fig. 9 Surface roughness vs. cutting length (ϕ 6 Endmill)

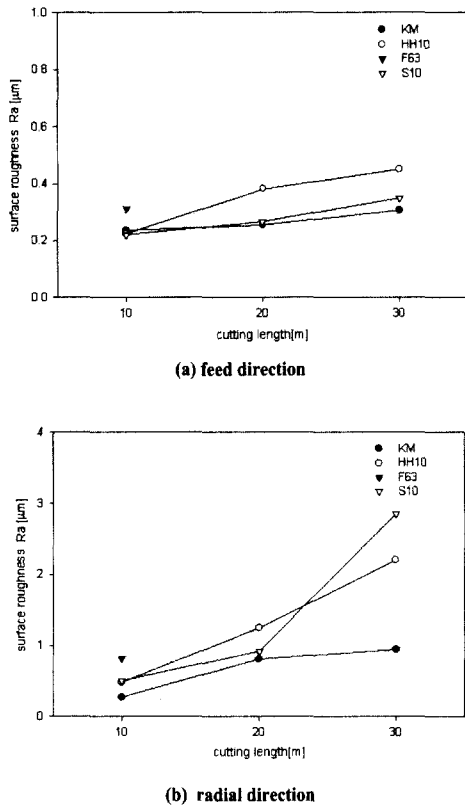


Fig. 10 Surface roughness vs. cutting length (ϕ 10 Endmill)

Fig. 10은 ϕ 10엔드밀의 경우로 이송방향의 중심선평균 거칠기(Ra)의 평균값(Ra)이 KM은 0.27[μ m], HH10은 0.35[μ m], S10은 0.28[μ m], F63은 0.31[μ m]으로 나타났고, 반경방향의 중심선평균 거칠기의 평균값이 KM은 0.67[μ m], HH10은 1.31[μ m], S10은 1.42[μ m], F63은 0.82[μ m]으로 측정되었다. Fig. 9와 Fig. 10의 결과에서 절삭길이가 각각 15[m]와 20[m]를 상회하면 중심선평균 거칠기가 급속히 증가하여 정밀도를 필요로 하는 가공에는 절삭길이를 고려하여야 할 것이다.

평엔드밀의 사용목적이 공작물의 완성 가공면을 얻는 가공보다는 거친가공에 주로 사용하기 때문에 표면 거칠기 측정값이 주는 의미도 적지만, 사용된 공작기계의 동적 안정성, 절삭조건 및 공구의 형상 등과 관계가 있으며, 마모와 표면 거칠기와의 관계는 좀 더 연구가 필요할 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 고속가공용 TiAlN 코팅 평엔드밀 개발을 위한 기초작업의 일환으로서 엔드밀 성능 평가를 실시하였다. 국내외의 대표적인 고속용 엔드밀을 선정하여 절삭력, 공구마모 및 표면 거칠기 등의 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 초기 절삭력이 큰 엔드밀의 마모가 크게 나타남을 통하여 절삭력의 크기와 여유각, 경사각 등의 형상인자가 마모에 직접적으로 관련됨을 확인하였다.
- (2) 마모는 각 회사의 추천 절삭조건보다도 낮게 적용하였음에도 매우 심하게 나타났으며, 산업현장에서 고속가공의 효율을 높이기 위한 기초자료의 제공이 필요함을 알 수 있었다.
- (3) 평 엔드밀의 마모와 표면 거칠기의 관계는 일정한 구간에서 선형적인 변화를 확인하였지만, 지속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) 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.
- (2) Y. Okazaki, "Trochoid Cutting and Helical Cutting for High Speed Machining," TOOL & TECH, No. 2, pp. 17-19, 1999.
- (3) P. Collin, "고속가공기술 및 고속가공용 절삭공구의 설계 및 평가요소," 선진전문가 초청 특별세미나 자료, 한국기술교육대학교 능력개발교육원, 2000.
- (4) 손창수, 강명창, 김정석, 이득우, 황경현, 김종관, "볼 엔드밀을 이용한 난삭재의 고속가공 특성", 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 139-142, 1997.
- (5) 김석원, 안철수, 이득우, "난삭성 재료의 가공환경 변화에 따른 고속가공 특성 평가", 한국공작기계학회지, 제9권, 제6호, pp. 158-163, 2000.
- (6) 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.
- (7) K. B. Pedersen, "Wear Measurement of Cutting Tools by Computer Vision," Int. J. of Machine

- Tools Manufacture, Vol.30, No.1, pp.131-139, 1990.
- (8) L. C. Lee, K. S. Lee, and C. S. Gan, "On the Correlation Dynamic Cutting Force and Tool Wear," Int. J. of Machine Tool and Manufacture, Vol.29, No.3, pp.295-303, 1989.
- (9) Y. Ito, "In-process measurement of cutting force and its application to identification of machining status," KISTLER Seminar spectrum, 2000.
- (10) E. N. Dici and D. A. Dornfeld, "Acoustic Emission Sensing of Tool Wear in Face Milling," Transaction of the ASME, J. of Engineering for Industry, Vol.109, pp.234-240, 1987.