

고경도강(SKD11)의 고속가공에서 가공성 평가 및 감시

김전하*, 김경균(부산대 대학원), 강명창, 김정석(부산대 ERC/NSDM), 김기태(화천기공(주))

Monitoring and machinability evaluation in high-speed machining of high hardness steel(SKD11)

J. H. Kim*, K. G. Kim(Graduated School, PNU), M. C. Kang, J. S. Kim(ERC/NSDM, Pusan Univ.), K. T. Kim(Hwacheon Machinery Co.)

ABSTRACT

In modern manufacturing industry such as aerospace, vehicle and die/mold industry, the high hardness material which is remarkable in aspects of durability is effectively used. The high-speed and precision machining technology has been applied in these fields. In this study, efficient sensors in high-speed machining by observing similar tendency through comparing cutting force with AE signal, gap sensor signal and accelerometer signal are selected and machinability of high-speed machining is experimentally evaluated. We performed a basic research for sensing system construction to monitor a machine tool and machining condition.

Key Words : High-speed machining(고속가공), Machinability(가공성), Tool dynamometer(공구동력계) Acoustic emission(음향방출), Accelerometer(가속도계), Gap sensor(변위센서), Monitoring(감시)

1. 서론

산업의 발달로 항공산업, 자동차 산업, 금형산업 등에서 내구성과 내마멸성이 뛰어난 고경도 재료가 주류를 이루면서 정삭에 의한 고정밀도의 가공을 행하고, 마무리 가공을 불필요하게 만들 수 있는 고속가공이 보다 많이 대두되고 있다. 기존의 가공과는 달리 고속가공은 FF(Flash Fine)가공에 의해 빠르고, 정밀한 부품과 금형을 만들기 위해 필수적인 가공이 되고 있는 추세이다.

이러한 추세에 맞추어 본 연구에서는 SKD11을 일처리한 고경도강의 고속가공시 조건별 가공상태와 공구상태를 평가하였다. 일반적으로 가공시 공구가 가하는 힘을 정량화 된 힘으로 나타내는 절삭력이 가공실험에 많이 이용되고 있다. 그리고, 가시화 장비에 의한 실시간 이미지프로세싱(Image Processing) 기법들이 많이 연구되고 있다.

공구마멸과 가공물의 상태를 파악하는 데 절삭력은 유용하게 이용되고 있지만, 일반적으로 공구동력저는 크기가 제한적이고, 가공물의 치수도 한정되어 있어서 실제 현장에서의 사용은 어려우며, 실험용 시편에 의한 가공성평가에 주로 이용되고 있는 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 다양한 가공조건(회전

수, 날당이송)에서 고속가공기용으로 자체 개발한 3축 공구동력계를 이용한 절삭력 획득과 동시에 음향방출신호, 변위신호, 가속도신호 들로부터 조건별 경향을 파악함으로써 고속가공에 유효한 센서를 선정하였다. 이러한 센서들은 공구동력계와 비교해 가공물에 제한적이지 않고, 가공시 간섭이 없으므로 차후 고속가공용 공작기계에 장착하여 공구, 공작물, 가공기의 상태를 감시할 수 있는 시스템 구축을 위한 선행 연구를 수행하였다.⁽¹⁻³⁾

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 고속머시닝센터(Makino V55)는 최대 20,000RPM급이며, 최소 이송분해능은 2 μ m이고, 최대 이송속도는 50m/min이다. 절삭력은 자체 개발한 3축 공구동력계를 이용하였고, 음향방출센서는 광대역형으로 100~1,200kHz의 필터를, 가속도계는 0.1~3kHz의 필터로 필터링하였다. 음향방출센서와 잭센서는 각각 마그네틱 지그(Magnetic Jig), 마그네틱 척(Chuck)으로 고정하였다. 데이터 획득은 디지털 오실로스코프를 사용하였으며, 오실로스코프로부터 저장된 데이터를 PC에서 분석하였다. 실험장치의 개략도

와 장비의 사양을 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다.

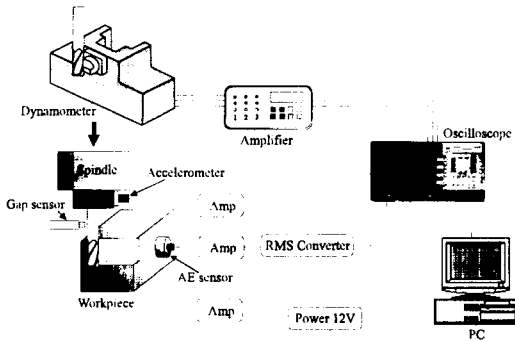


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Instruments and specifications

Instrument	Specification
Machining Center	Max 20,000RPM
Gap Sensor	Resolution:0.5 μ m, Range:0~2mm
AE Sensor	Wideband Type
Accelerometer	B&K Response Freq. : ~15kHz
Oscilloscope	4Ch, Max Sampling : 400Mhz
RMS Converter	Time constant : 0.25ms

2.2 실험방법 및 조건

본 실험은 4날 플랫 엔드밀(Flat Endmill)로 측면 가공을 행하였으며, 정량화된 신호인 절삭력으로 부터 경향을 파악하고, 이를 기준으로 복합신호들의 유사 경향을 파악하고자 하였다. 절삭거리가 짧으므로 공구의 마멸은 미소할 것으로 가정하여, 이송별로 단일 공구를 사용하였고, 절입은 0.05mm로 고정하여, 3단계로 날당이송을 변화시키면서 회전속도별 복합신호들의 변화를 측정하였다. 데이터는 10kHz의 샘플링으로 획득하였고, 1초동안의 신호를 획득하여 안정영역의 데이터를 추출하여 분석하였으며, 2번씩 재현실험을 하였다. Fig. 2에는 시편의 크기와 각 센서들의 부착위치들을 도시하였다.

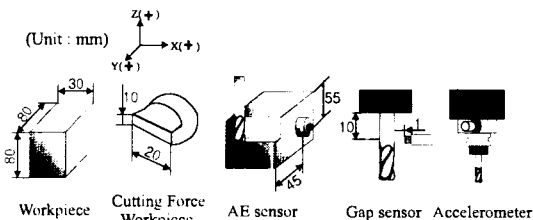


Fig. 2 Workpiece and sensor adhesion

Table 2에는 공구와 공작물 사양과 실험조건들을 나타내었다.

Table 2 Cutting condition

Condition	Content
Workpiece	SKD11(Hrc62)
Tool	4edge Flat Endmill(ϕ 10)
Axial Depth	10mm
Radial Depth	0.05mm
Feed per tooth	0.025, 0.05, 0.075 mm/tooth
Spindle Revolution	6,000-16,000RPM(Step,2,000)

3. 분석결과 및 고찰

고경도재에 대해 안정된 절삭력 신호의 획득을 확인하고, 이를 기준으로 음향방출, 가속도, 갭센서 신호들의 조건별 경향을 파악하고, 고찰하였다.

3.1 절삭력 신호의 특성

Fig. 3은 날당이송 0.05mm/tooth일 때의 주축회전수별 반경방향과 이송방향 절삭력을 나타내었으며, 고속에서도 안정된 절삭력이 획득됨을 알 수 있다.

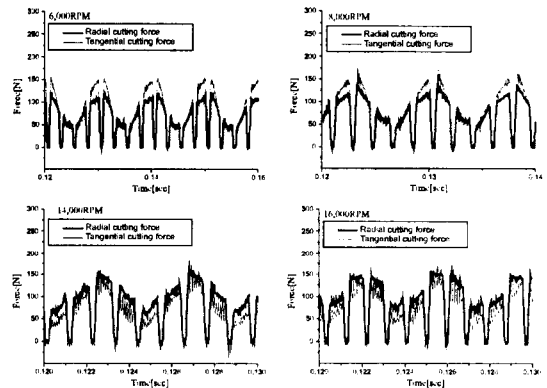


Fig. 3 Cutting force waveform

Fig. 4에는 절삭조건별 절삭력의 변화를 나타내었다.

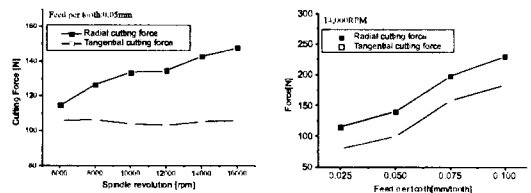


Fig. 4 Cutting force variation according to cutting condition

첫 번째 조건인 날당이송 0.05mm/tooth일 때 주축회전수별 반경방향의 절삭력은 증가하지만, 이송방향의 절삭력 변화는 일정한 경향을 나타내었으며,

두 번째 조건인 주축회전수가 14,000RPM일 때는 날당이송 증가에 따른 반경방향과 이송방향의 절삭력이 증가하는 경향을 나타내었다.

3.2 다중센서의 원신호 및 데이터 추출

복합신호들의 회전수별 원신호 형태를 Fig. 5에 나타내었다.

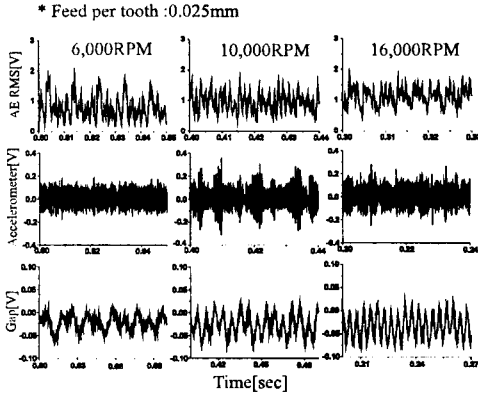


Fig. 5 Raw signals of multi-sensor

절삭력과 마찬가지로 AE신호는 고속에서도 날당 신호를 잘 반영하고 있지만, 고속이 될수록 시정수가 커져 신호가 완만해 짐을 알 수 있다. 가속도 신호는 회전수별로 상당한 차이를 보이고 있으며, 이는 회전시의 주축 상태이거나, 공구와 공작물 사이의 상관관계로 표면진도에 영향을 미칠 것으로 추정된다. 겹신호는 고속에서도 날당 신호를 잘 나타낼 수 있으나 주기적으로 회전수와 이송에 상관없이 52Hz의 저주파신호 신호가 발생하는 데 이는 저주파 잡음에 해당하며 이로 인해 날당신호들이 포함되어 있으므로 차후 필터링이 필요하다.

초기 절삭시 트리거(Trigger)되어 획득된 신호는 초기 불안정한 성분을 지니므로 안정된 데이터의 추출을 위해 직경 10mm 플랫폼밀의 측면가공시의 안정영역을 반경치 5mm가 가공된 후로 정상적인 절삭영역을 정하였다.

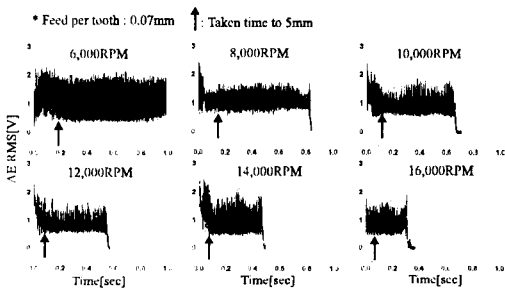


Fig. 6 Data extraction in stable region

이러한 추출법이 AE RMS신호와 잘 일치함을 Fig. 6에 나타내었으며, 이 시점으로부터 공구 40회전의 신호를 추출하여 분석하였다.

3.2.1 회전속도별 이송에 따른 음향방출 신호

RMS신호가 고속이 될수록 비절삭시간이 짧아지므로 최소값들이 증가하는 것으로부터 파라메타를 Fig. 7과 같이 설정하였고 이송별 주축회전수에 따른 경향이 Fig. 8에서처럼 증가함을 알 수 있었다.

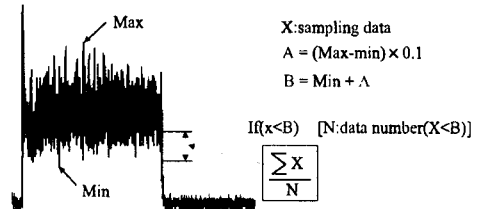


Fig. 7 Selection of AE RMS parameter

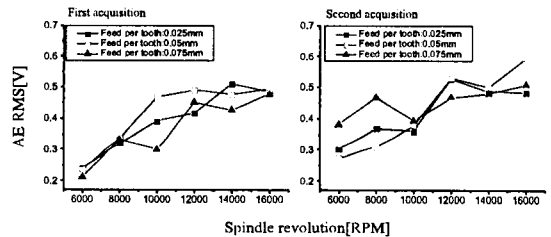


Fig. 8 Variation of AE RMS parameter according to increment of feed per tooth

3.2.2 회전속도별 이송에 따른 가속도 신호

공회전시 회전주파수를 기준으로 주축회전수별 이송에 따른 가속도 신호의 회전주파수 진폭과 날당 회전주파수 진폭을 Fig. 9에 나타내었다.

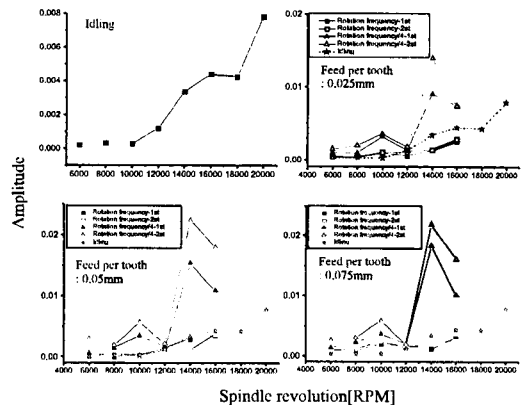


Fig. 9 Variation of FFT amplitude according to increment of feed per tooth

공회전시 주축회전수별 주과수의 특성으로부터 변곡점을 나타내는 12,000RPM을 기준으로 안정구간(6,000~12,000RPM)과 상승구간(12,000~16,000)에 대해 실험을 행하였다. 주축회전수별로 이송에 따라 회전주과수의 변화는 유사하나, 안정구간에서는 낮고, 상승구간에서는 높게 나옴을 알 수 있다.

특히, 12,000RPM에서는 회전주과수와 날당회전 주과수 진폭이 공회전시 회전주과수와 일치하는 특징을 보이고 있으며, 이것이 안정된 가공상태를 반영하는지, 고경도재-공구의 특성인지는 좀 더 연구가 되어야 할 것이다.

3.2.3 회전속도별 이송에 따른 갭센서 신호

갭센서의 부착위치와 이송에 따른 잡음, 주축진동 등으로 인해 고경도재의 가공시 갭센서에 의한 주축회전수별-이송에 따른 런아웃(Run-out) 경향을 파악하기는 곤란하였다. 하지만, 가공시 공구처짐이 지속적으로 발생한 상태로 가공이 되며, 절삭속도(m/min)가 증가할수록 공구처짐이 증가함을 알 수 있었다.

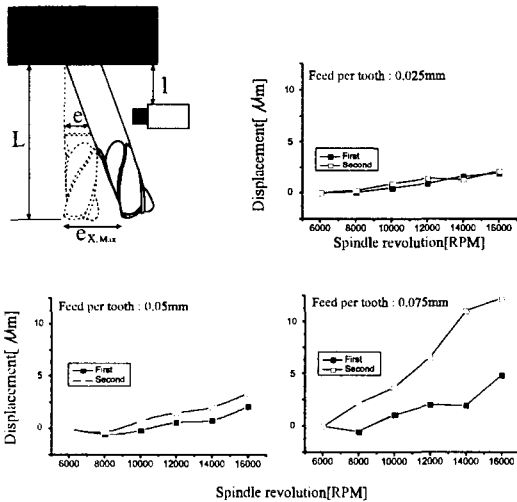


Fig. 10 Variation of tool deflection according to increment of feed per tooth

갭센서 신호가 상하대칭에 가까우므로 데이터의 산술평균을 통해 초기 오프셋(Offset)값을 정하여 공구처짐에 유효한 파라메타를 설정할 수 있었다. 6,000RPM에서의 오프셋을 0으로 기준을 잡고, 이송당 주축회전수 증가에 따른 공구처짐의 증분을 Fig. 10에 나타내었다.

이송이 빨라질수록 기공기가 급해짐을 알 수 있으며, 이송별 x축방향의 최대 공구처짐량($e_{x,max}$)을 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Maximum tool deflection according to feed per tooth(16,000RPM)

0.025mm/tooth	0.05mm/tooth	0.075mm/tooth
7~9 μ m	9~14 μ m	19~48.6 μ m

이러한 파라메타의 설정으로 특히, 직경이 작은 공구의 경우 가공시 공구처짐에 의한 파손이 많으므로 이에 대한 감시에 적절할 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 고경도재 고속 엔드밀 가공시 절삭력, 음향방출, 가속도, 갭센서 신호들이 날당 신호를 잘 반영한다.
- 2) 절삭력-공구의 부하, 음향방출신호-가공상태, 가속도신호-스핀들 진동, 갭센서신호-공구의 처짐상태를 대변할 수 있다.
- 3) AE RMS신호로부터 유효파라메타를 선정하였다.
- 4) 갭센서 신호로부터 공구처짐 측정이 가능한 유효파라메타를 선정하였다.
- 5) 가속도신호로부터 주축회전수에 대한 진동의 안정영역과 불안정영역의 경계를 설정하였다.

본 연구는 고속가공성 평가와 함께 차세대 공작기계에 장착될 여러 감시시스템들을 개발하기 위한 선행 연구로 진행되었으며, 앞으로 실용성 있는 센싱기법의 개발을 계속 진행할 것이다.

후기

본 연구는 2000년도 산업자원부의 중기거점과제 일환으로 화천기공(주) 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. J. Roget, "Use of Acoustic Emission for In-process Monitoring of Tool during Turning and Milling", Progress in Acoustic Emission III, The Japanese Society for NDI, 94-101, 1986
2. Minyoung Lee, Charles E. Thomas, Douglas G. Wildes, "Prospects for in-process diagnosis of metal cutting by monitoring vibration signals", Journal of Materials Science 22, 3821-3830, 1987
3. 이기용, 강명창, 이득우, 김정석 "절삭력 신호에 의한 공구 런아웃의 온라인 감시", 한국정밀공학회 추계 학술대회 논문집, pp. 195-198, 1998