

고속가공의 상태 감시를 위한 실험적 평가 기술

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

Experimental evaluation technique for condition monitoring of high speed machining

J. H. Kim(Graduate School, Pusan National Univ.), M. C. Kang(ERC/NSDM, Pusan National Univ.)

J. S. Kim(ERC/NSDM, Pusan National Univ.), K. T. Kim(Hwacheon Machinery Co.)

ABSTRACT

The high speed machining which can improve the production and quality has been remarkable in die/mold industry with the growth of parts and materials industries. The speed of machine tool increases, but on the other hand, the response of sensors is not being improved. Therefore, the condition monitoring techniques for the machine tool, tool and workpiece in high speed machining are incomplete. In this study, characteristics of the tool edge roughness were verified from the high frequency components of cutting force signals acquired by the high speed dynamometer. Also, the experimental evaluation technique for the machinability and condition monitoring in high speed machining was established by analyzing the cutting force, acceleration and surface roughness

Key Words : High speed machining (고속가공), Cutting force(절삭력), Acceleration(가속도), Tool wear(공구마멸) Surface roughness(표면조도), 3-D scanning(3 차원 스캐닝), Tool edge roughness(공구인선 조도)

1. 서론

21 세기 부품과 소재산업의 발달로 고품질·고정도 금형의 생산이 주목받고 있는 현 상황에서 절삭가공은 이러한 금형산업의 큰 근간을 이루고 있다. 절삭가공 중에서도 기존의 생산위주인 범용가공에 비해 생산과 품질을 동시에 향상시킬 수 있는 고속가공이 현재 크게 대두되고 있는 실정이다.

절삭가공공정에서 제품의 품질을 좌우하는 부분은 크게 공작기계, 공구, 피삭제의 세 부분으로 나눌 수 있다. 특히, 국외 공작기계 메이커(Maker)들은 고속가공기를 상용화한 상태이지만, 국내는 현재 개발중이거나 수입에 의존하고 있다. 고속가공기는 강성과 정밀도 측면에서 우수하게 설계되고, 제작되므로 구축된 후 생산자 측면에서는 금형생산 비용을 줄이기 위해 공구와 피삭제의 상태를 감시하는 것이 중요한 문제이다^(1,2) 저속영역의 범용가공은 기존의 공구동력계, 가속도계, 변위센서 등으로 센싱(Sensing)이 가능하므로 많은 공구와 피삭제의 상태를 감시하기 위한 연구가 가능하였지만, 고속가공에서는 기존 센서들의 응답이 문제가 되기

때문에 연구가 미진한 상태이다

따라서, 본 연구에서는 캘리브레이션과 고속의 응답성이 검증된 3축 힘센서(Force sensor)를 이용하여 제작한 고속의 공구동력계와 가속도센서를 사용하였으며, 절삭력으로 금형소재로 많이 사용되는 금형강(STD11)의 정도에 따른 절삭메커니즘을 규명하고, 초기 미소한 치핑(Chipping)으로 인한 공구인선의 조도 특성이 절삭력에서 추측될 수 있음을 규명하였으며, 주축진동과 피삭제의 거시적 정밀도를 평가하였다.⁽³⁾

이를 바탕으로 본 연구는 특정 공구와 피삭제에 대한 가공조건에 따른 실험과 공구마멸에 따른 실험을 병행함으로써 가공성 평가와 함께 공구와 피삭제의 정밀도를 평가할 수 있는 기술을 마련하고자 한다

2. 실험 및 분석방법

2.1 실험장비 및 장치도

최대 주축회전 20,000 rpm, 최대 이송속도 50 m/min 인 고속 머시닝센터(Machining center)를 이용

하여, 플랫엔드밀의 측면가공을 수행하였다. 가속도 신호는 질삭력신호 획득시 동시에 획득하였고, 틸니바퀴형 시편을 특수 제작하여 조건별 순차적 가공 후 표면조도를 측정하였다 Fig. 1 에는 개략적인 실험장치도를 나타내었고, Table 1 에는 사용한 장비, 센서, 공구, 공작물과 각각의 사양을 나타내었다.

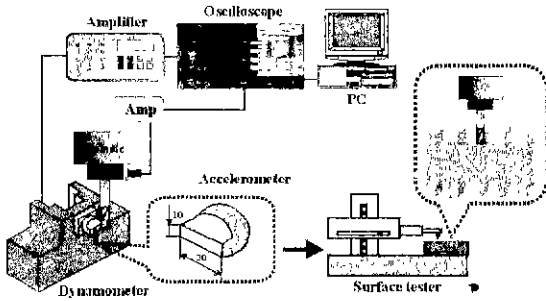


Fig 1 Schematic diagram of experimental setup

Table 1 Specification of instrument

Instrument	Specification
Machining center	Makino V-55 20,000rpm
Surface tester	Taylor Hobson(2D, 3D)
Microscope	Olympus, Optical($\times 500$)
Oscilloscope	Leeroy9300A, 200MHz
Tool dynamometer	3-axis force sensor(9251A)
Accelerometer	B&K 4393, Resonance freq.=55kHz
Tool	TiAlN coated, 4 flute flat endmill
Workpiece	STD11-HRC30, HRC60

2.2 가공조건 및 분석방법

Table 2 는 초기 주축회전수, 날당이송, 반경절입의 변화에 따른 조건별 실험에 사용된 가공조건이다. 축절입은 10 mm 로 고정하였고, 건식절삭을 행하였으며, 공구마멸은 이전 실험에서 얻어진 마멸공구 세 가지에 대해서 실험을 행하였다

Table 2 Cutting condition

Experiment	Feed per tooth (mm/tooth)	Radial depth (mm)	Spindle speed (rpm)
Feed per tooth variation	0.03, 0.05, 0.07	0.05	10000
Radial depth Variation	0.05	0.03, 0.05, 0.07	10000
Spindle speed variation	0.05	0.05	6000, 10000, 14000, 18000
Cutting fluid	Dry		
Tool wear(mm)	0.09, 0.2, 0.35		

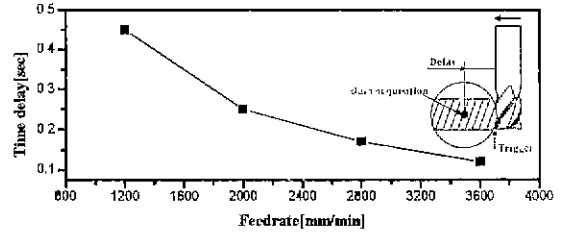


Fig 2 Data acquisition by time delay

초기 절입시의 과도상태와 이송속도의 가속을 고려하여 Fig. 2 와 같이 가공의 시작 시점에서 트리거(Trigger)하고, 이송속도(Feedrate)에 따라 시간지연을 줌으로써 동일시점의 데이터를 획득하였다. 0.1 sec 동안 획득하고, 공구 10 회전 데이터를 추출하여 분석하였다. 가속도 신호는 공구 회전주파수의 신호만 획득하기 위해 회전속도별로 필터링(Filtering)하여 회전가속도를 분석하였다.

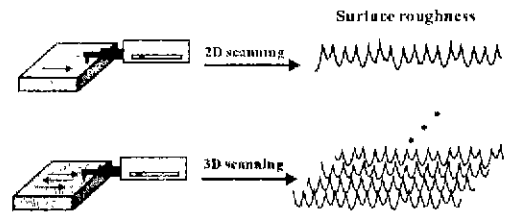


Fig. 3 Surface roughness measurement

조도 측정시 컷오프길이(Cutoff length)는 0.8 mm 로 총 3.2 mm 를 측정하였다. 초기 조건실험은 동일공구이고, 공구마멸이 거의 없는 상태이므로 측방향 중심위치에서 2 차원적으로 1 회 스캐닝하였고, 마멸공구로 가공된 표면은 국부적으로 심각한 마멸이 존재하므로, 3 차원적으로 20 회(4 \times 4 mm) 스캐닝하고, 형상으로 변환하여 조도를 측정하였다. Fig. 3 에 각각의 조도 측정방법을 개략적으로 나타내었다.

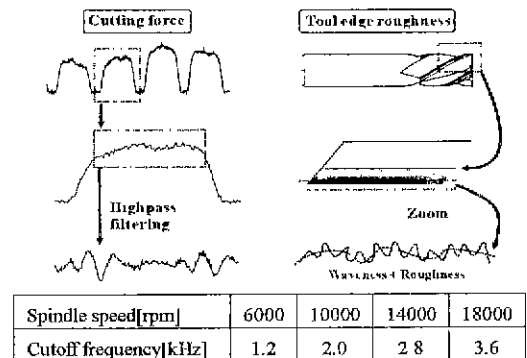


Fig 4 Relation of cutting force and tool edge roughness

고속의 절삭력 획득이 가능함으로써 날당 절삭력의 획득이 가능함과 동시에 미소 치핑에 의한 공구인선의 들기에 의한 미소 절삭력이 고주파 신호로 획득될 수 있다. 따라서, Fig 4와 같이 절삭력 신호를 고역통과(High-pass) 필터링시켜 공구인선의 조도 특성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가공조건에 따른 가공성

Fig 5에서처럼, 절삭력은 이송과 반경절입의 증가와 함께 증가하며, 주축회전수의 증가에 대해서는 일정한 경향을 보인다. 이는 이송과 절입의 증가는 칩제거량(MRR : Metal Removal Rate)에 비례하고, 주축회전수 증가는 칩제거량이 일정하기 때문이다. 저경도(HRc30)재료에서는 이송과 반경절삭력이 유사하지만, 고경도(HRc60)재료에서는 반경절삭력이 이송절삭력에 비해 4 배정도 크다. 이는 재료의 경도가 커질수록 절삭시의 절입이 힘들다는 것을 의미하며, 가공공정중 반경방향 절삭력이 공구마멸에 큰 영향을 미칠 것이다

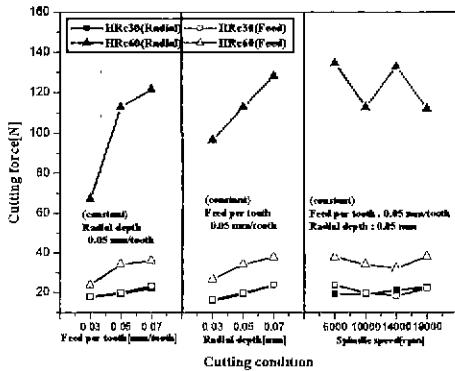


Fig 5 Cutting force according to cutting condition

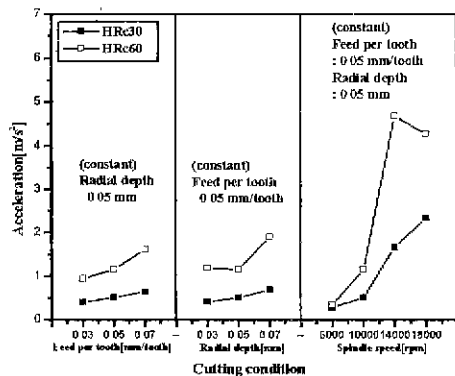


Fig. 6 Vibrational characteristic of spindle

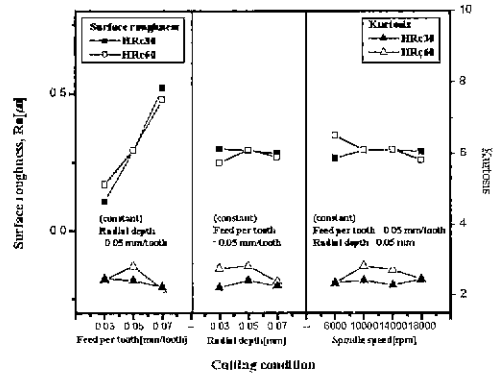


Fig. 7 Surface roughness and kurtosis

이송, 절입, 주축회전수의 증가로 가공조건이 극심해질수록 주축진동이 증가하며, 특히, 고속영역에서는 급격히 증가함을 Fig. 6에서 알 수 있다. 이로 부터 주축진동은 재료의 경도와 칩제거량, 회전수 증가에 큰 영향을 받음을 알 수 있다.

Fig. 7에서 알 수 있듯이, 표면조도는 이송 증가에 민감하며, 재료의 경도차와는 무관하지만, 초기의 미소한 치핑으로 인해 조도분포의 첨도가 고경도재료에서 크게 나타난다.

3.2 공구마멸에 따른 가공성

Fig 8과 같이 이전 실험에서 얻어진 마멸공구를 사용하여 마멸정도에 따라 한 가공조건에서 가공을 행하고, 3 차원형상을 필터링하여 조도값을 얻는 과정을 Fig 9에 나타내었다.

공구마멸에 따라 주축의 진동은 재료의 경도에 영향을 받지 않으며, 고경도재료가 저경도에 비해 절삭력은 여전히 크고, 공구인선의 큰 탈락으로 인해 표면조도와 조도분포의 첨도가 증가함을 Fig 10에서 알 수 있다

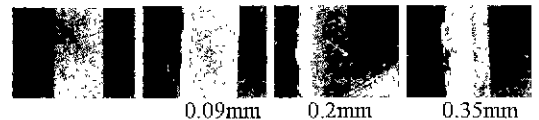


Fig 8 Tool shape according to tool wear

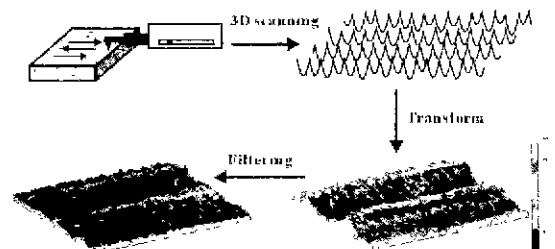


Fig. 9 3-D transform and filtering process

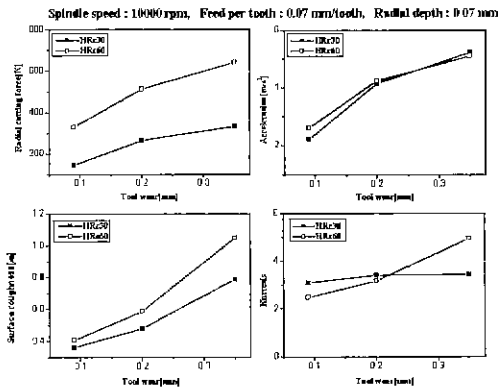


Fig. 10 Characteristics of cutting force, acceleration, surface roughness and kurtosis value

3.3 공구 인선의 정밀도

공구인선은 코팅 상태와 가공초기 치핑으로 형성되는 많은 돌기부를 가짐으로써, 피삭재의 표면조도와 같은 조도를 형성하게 된다. 고속의 절삭력 획득이 가능함으로써 앞에서 언급되었듯이(Fig. 4), 공구인선의 조도가 절삭력 신호에 함께 나타나게 된다. 주축회전수에 따른 고주파수 신호를 돌기부에 의한 절삭력으로 정의하고, 이것의 절대평균치를 가공조건과 공구마멸에 따라 Fig. 11에 나타내었다. 가공초기 가공조건에 따라 거의 일정한 치핑과 돌기부를 가짐을 알 수 있지만, 마멸이 진행됨에 따라 증가함을 알 수 있다. 절입을 50 μm 라 할 때 날당 절삭력에 비해 10 배정도 낮으므로, 대략적으로 돌기부의 크기가 약 5 μm 정도임을 알 수 있다. 마멸이 진행됨에 따라 미소한 치핑에 의해 생성되는 돌기부는 사라지고, 큰 치핑에 의한 공구인선의 탈락에 의해 공구인선 조도에 의한 절삭력이 증가함을 Fig. 12에서 알 수 있다. 이는 공구절체와 마멸 메커니즘 규명의 중요한 자료가 될 것이다.

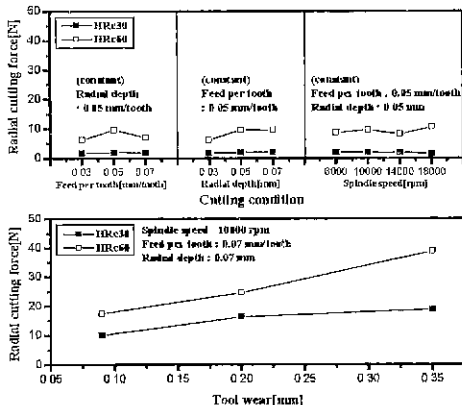


Fig. 11 Cutting force by tool edge roughness

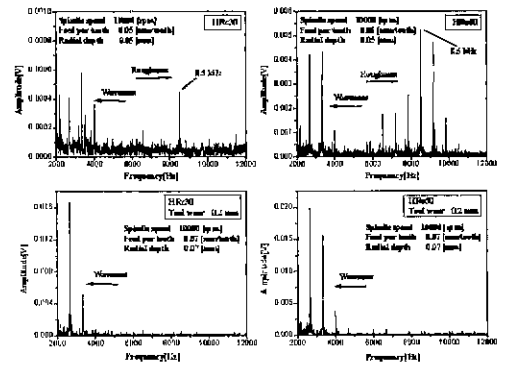


Fig. 12 High frequency characteristics of cutting force

4. 결론

본 연구를 통해 고속가공시 절삭력, 가속도, 표면조도로부터 TiAlN 코팅공구의 금형강 사이의 가공성이 평가되었다. 가공 초기 표면조도는 2 차원적으로 측정하고, 공구마멸 진행시에는 공구인선의 탈락으로 국부적 마멸이 측방향으로 존재하기 때문에 3 차원적으로 측정함으로써 좋은 경향을 얻을 수 있었다. 공구마멸 실험시 절삭력, 가속도, 표면조도, 표면조도 분포의 점도값들이 공구마멸 감시에 유효함을 확인하였으며, 고속의 절삭력 획득이 가능하기 때문에 미소 치핑에 의한 공구인선부의 조도 특성이 절삭력으로부터 획득 가능하고, 초기 돌기부의 크기는 평균적으로 약 5 μm 정도이다.

특정 공구와 피삭재에 대해 가공조건과 공구마멸에 따른 실험을 병행함으로써 고속가공시의 상태 감시를 위한 실험적 평가 기술이 확립되었다.

후기

본 연구는 2001년도 산업자원부의 중기거점과제의 일환으로 화천기공(주) 연구비지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. K. F. Martin, "A Review by discussion of condition monitoring and fault diagnosis in machine tools", MTM, Vol 34, No. 4, pp 527 - 551, 1994
2. Di Yan, T. I. El-wardancy, M. A. Elvestawi, "A multisensor strategy for tool failure detection in milling", MTM, Vol 35, No. 3, pp. 383 - 398, 1995.
3. 김정석, 이득우, 강명창, 이기용, 김정훈, "고속가공에서 가공성 평가를 위한 3 축 공구동력계 개발", 한국정밀공학회지, 제 16 권, 제 5 호, pp. 11-18, 1999.