

고속 머시닝센터의 주축계 진동특성과 가공성 평가

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

Evaluation of vibration property and machinability of spindle system in high speed machining center

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 center(HMC) has been widely applied to manufacture a die and trial product in many machine industry. Because the evaluation for the HMC is not sufficiently performed and the efficient cutting conditions aren't selected a great loss has been caused in the cost aspect. In this study, the need of preliminary running time and unstable spindle speed is presented from the analysis of acceleration in idling. The Machinability for the TiAlN coated flat end mill and STD11(H_RC60) is evaluated from the trends of tool wear and cutting force according to cutting conditions and slenderness ratio and a low response of tool dynamometer in high speed is proved. The resonance spindle speed is identified through the tool wear and natural frequency test.

Key Words : High speed machining center(고속 머시닝센터), Machinability(가공성), Flat end mill(평 엔드밀), Tool wear(공구마멸), Tool holder(공구홀더), Slenderness ratio(세장비), Resonance(공진)

1. 서론

국내외적으로 고속 머시닝센터의 개발과 수요가 활발하게 이루어지고 있으며, 고속가공기술을 적용하여 보다 빠르고, 정밀하게 금형 및 시작품을 제작하고 있다. 하지만, 고속가공기에 대한 평가나 고속가공시에 나타날 수 있는 현상들에 대한 연구가 미진하여 발생할 수 있는 문제점에 신속한 대처가 어렵고, 고속가공기가 가지고 있는 많은 장점을 충분히 활용하지 못하고 있으며, 적절한 가공조건을 선정하지 못해 비용적으로 막대한 손실을 초래하고 있는 실정이다.

공작기계의 성능평가에서 가장 중요한 부분은 주축계이며, 실제 가공공정을 수행하면서 가공성을 파악할 수 있는 대표적인 인자는 공구마멸이다. 공구마멸 중에서도 엔드밀의 경우에는 여유면마멸(Flank wear)의 특성이 가공성을 평가하는 주요한 인자가 된다. 특정 공구와 공작물에 대한 가공성을 평가하기 위해 다양하게 변화시킬 수 있는 조건에는 주축회전수, 이송, 반경절입, 축절입, 세장비, 절삭유제 등이 있으며, 공구마멸은 다양한 조건들에

대한 가공성을 평가하기 위한 척도가 된다. 또한, 절삭력은 공구마멸과 함께 가공성을 평가하는 주요한 측정신호이며 저속영역에서는 상용화된 공구동력계가 적용되고 있지만, 10,000rpm 이상의 고속영역에서는 응답에 문제가 되고 날당 고주파신호의 획득이 곤란하기 때문에 고속에서의 절삭력신호는 신뢰성이 떨어지게 된다⁽¹⁻⁴⁾.

본 연구에서는 42,000rpm 급 주축을 가진 고속 머시닝센터에 대해 가속도계를 사용하여 주축회전수별 진동특성을 파악하고, 3 축 힘센서를 사용한 고속가공용 공구동력계의 성능을 평가하였으며, 기본적인 주축회전수, 날당이송 변화와 엔드밀의 오버행(Overhang) 변화를 통해 가공조건별 공구마멸 경향과 특성을 분석하였다. 결과적으로 주축의 이상 주축회전수 영역과 안정화되기 위한 시간과 고유진동수 측정을 통해 공진주파수를 측정하여 공구마멸 실험결과로부터 공진 발생 주축회전수를 제시하고, 고속가공용 공구동력계의 응답특성을 파악하며, 가공조건과 오버행에 따른 공구마멸과 절삭력 특성을 분석하여 평엔드밀에 대한 측면가공의 가공성을 평가하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 방법

최대 주축회전 42,000rpm, 최대 이송속도 32m/min 인 5축 머시닝센터(Mikron UCP -710)를 사용하였다. Fig. 1에 실험장치도, Table 1에 실험에 사용된 장비와 사양을 나타내었다.

가공조건에 따른 절삭력과 가속도신호의 특성을 파악하기 위하여 개발된 공구동력계에서 주축 회전수, 반경절입, 날당이송을 변화시키면서 절삭력과 가속도신호를 획득하였고, 공구동력계의 응답특성을 분석하였다. 또한, 주축회전수에 따른 공구마멸 특성을 파악하기 위하여 날당이송과 반경절입, 축절입은 고정하고 주축회전수를 증가시키면서 공구마멸 실험을 행하였고, 고정된 이송률(Feedrate)을 줌으로써 속도와 이송에 대한 가공효율 특성을 파악하였다. 40,000rpm 급과 20,000rpm 급 주축의 가공

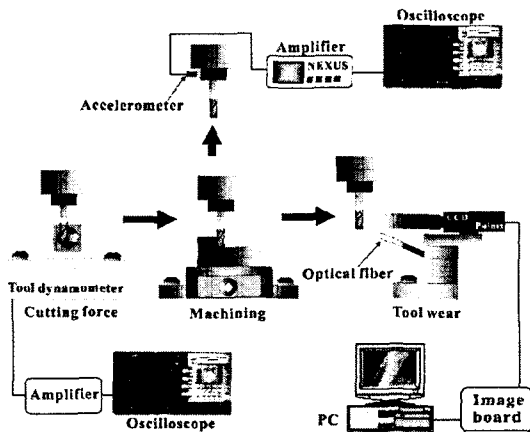


Fig. 1 Experimental setup

Table 1 Specification of instrument

Instrument	Specification
Machining center	Mikron UCP710 : 42,000rpm Makino V-55 : 20,000rpm
Oscilloscope	Lecroy9300A, 200MHz
Tool dynamometer	3-axis force sensor(9251A)
FFT	B&K Dual channel type2034
Impact hammer	PCB 086B04
CCD	Neocom (x 200)
Accelerometer	B&K 4393, Resonance freq.=55kHz
Tool	TiAlN coated, 4 flute flat endmill
Tool holder	HSK40E, BT40
Workpiece	STD11(H _R C 60)

성 비교를 위하여 20,000rpm 급인 Makino V-55 에서는 한 조건에 대해 비교실험을 행하였다. 공구마멸 실험시에는 절삭력→ 가공→ 공구마멸 측정의 순으로 1 패스(Pass)가 10cm 인 가공시편에 대해 주기적인 패스(Pass)가공을 행하면서 절삭력을 획득하고, 공구마멸을 측정하였다.

세장비와 축절입, 반경절입에 따른 공구마멸 실험은 Makino V-55 에서 수행하였으며, 공구오버행, 축절입, 반경절입 각각에 대해 4 가지 조건에 대해 실험을 하였다.

절삭력과 가속도 신호는 샘플링주파수(Sampling frequency)를 50 ㎐로 하여 획득하였고, 절삭력은 3 ㎐로 저역통과(Lowpass) 필터링(Filtering)하였다. 가속도 신호 스케일(Scale)은 10mV/ms² 로 하였고, 0.5~3 ㎐로 대역통과 필터링하였으며, 1sec 동안의 신호를 획득하여 그 절대평균(Absolute mean)값을 전압값으로 나타내었다. 주축이 고속으로 회전할 경우, 이송이 상당히 빨라지므로, 길이가 2 cm 인 절삭력 시편에서 안정된 신호를 획득하기 위해 날당이송을 0.06mm/tooth 이하로 제한하였다.

여유면마멸이 0.26mm 이상 진전시에는 심한 칩핑(Chipping)으로 불꽃이 발생하고, 표면이 타는 현상이 나타나므로 0.26mm 를 마멸기준으로 정하였으며, 공작기계 테이블 위에서 가공 후 좌표이동을 통해 바로 기상에서 직접 측정할 수 있도록 제작된 전용지그(Exclusive jig)와 CCD(Charge Coupled Device)를 적용한 기상계측 마멸측정장치를 사용하여 여유면마멸의 측정정밀도를 높이고 측정시간을 단축시킬 수 있었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 주축회전수별 진동특성

2,000 ~ 40,000rpm 까지 2,000rpm 간격으로 주축회전수를 연속적으로 변화시키면서, x, y 축 가속도신호를 획득하였다. 1 회 주축구동시간은 7 분이며, 4 회에 걸친 실험 결과를 Fig. 2 에 나타내었다.

1 회 구동시 30,000~35,000rpm, 40,000rpm 에서 높은 가속도를 보이며, 점차적으로 줄어들다가 4 회 구동시에는 거의 안정된 경향을 보여주고 있다. 이로써 주축 구동초기에 불안정한 속도영역이 존재하므로, 가공전에 충분한 예비구동시간이 주어져야 할 것이다. 또한, 20,000rpm 이하에서는 x, y 축 가속도가 동일하나, 20,000rpm 이상에서는 y 축이 x 축보다 큰 경향을 보이고 있다. 이는 실험에 사용된 머시닝센터가 y 축에 대해 테이블이 이동하는 것이 아니라 주축이 이동하므로 20,000rpm 이상에서는 특정 조건에 따라 y 축 이송이 가공성에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

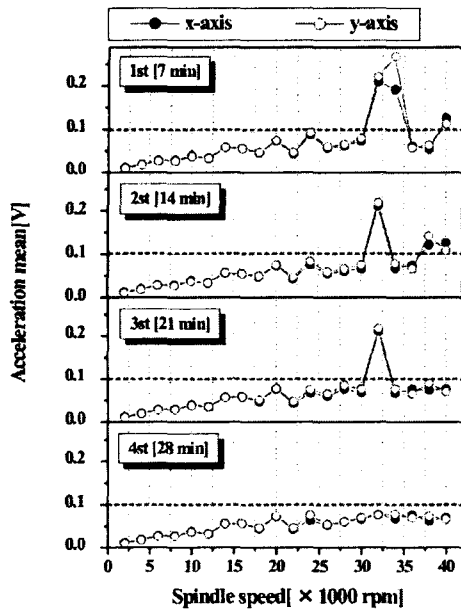


Fig. 2 Acceleration property according to spindle speed

3.2 절삭력과 공구마멸을 통한 가공성 평가
가공조건에 따른 절삭력과 가속도 신호의 특성을 파악하기 위하여 Table 2 와 같은 조건으로 실험하여 Fig. 3 의 결과를 얻을 수 있었다.

Table 2 Cutting condition

Experiment	Feed per tooth (mm/tooth)	Radial depth (mm)	Spindle speed (rpm)
Feed per tooth variation	0.02, 0.04, 0.06	0.04	25,000
Radial depth Variation	0.04	0.02, 0.04, 0.06	25,000
Spindle speed variation	0.04	0.04	2,000-40,000 (Step 2,000)

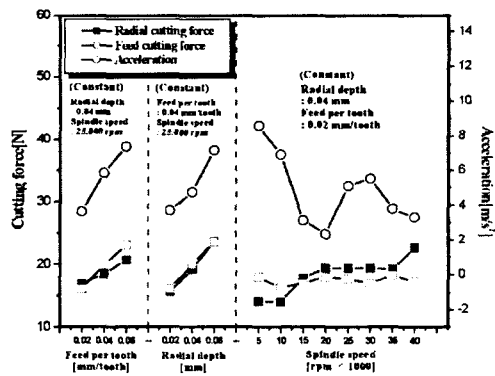


Fig. 3 Trends of cutting force and acceleration according to cutting conditions

Table 3 Cutting condition

Experiment	Feed per tooth (mm/tooth)	Radial depth (mm)	Spindle speed (rpm)
Spindle speed variation	0.05	0.05	10,000, 20,000, 30,000
Constant feedrate	0.09, 0.045, 0.03	0.05	10,000, 20,000, 30,000

날당이송이 증가하면 공구 여유면과 공작물과의 접촉이 크게 되어 마찰이 증가하고, 절입이 증가하면 칩두께가 커져서 칩에 의한 부하가 증가하기 때문에 절삭력이 증가하게 된다. 주축회전수가 증가함에 따라 절삭력은 일정한 경향을 보이는 데 이는 이론적인 날당 금속제거량과 잘 일치하며, 주축이 고속에서도 안정되었음을 나타낸다. 가속도 신호의 경우 날당이송과 절입의 증가로 주축에 작용하는 부하로 인해 증가함을 알 수 있으며, 주축회전수의 증가는 10,000rpm 이하와 30,000rpm 부근에서 큰 가속도 특성을 보이고 있다.

공구마멸 실험에 대한 가공조건을 Table 3 에 나타내었다. 주축회전수에 따른 공구마멸 경향을 Fig. 4 에 나타내었으며, 10,000rpm 을 기준으로 회전수가 2 배로 증가하면 공구수명이 약 4 배, 3 배로 증가하

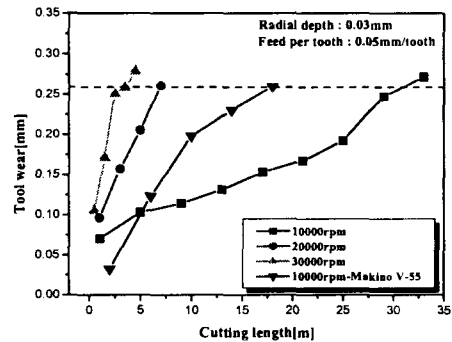


Fig. 4 Tool wear trends according to spindle speed

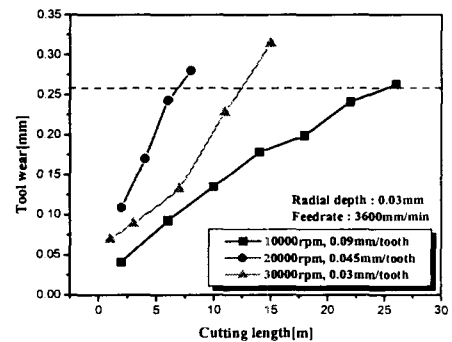


Fig. 5 Tool wear trends in constant feedrate

면 약 8 배정도로 감소함을 알 수 있다. 하지만, 20,000rpm 의 경우에는 심한 소음과 함께 공작물 표면에 채터무늬가 발생하였다. 20,000 rpm 급 주축과의 비교를 위하여 3 축 머시닝센터인 Makino V-55 에서도 10,000rpm 에서 동일한 조건으로 가공을 행한 결과 Fig. 4 에서 알 수 있듯이 40,000rpm 급 보다 공구수명이 절반정도로 떨어졌다. 이는 공구홀더의 강성문제로 인한 것으로 사료되며 고속가공에서는 Makino V-55 의 공구홀더인 BT type 보다, Mikron 의 HSK type(HSK 40E)이 적합하다는 것을 알 수 있다.

이송률이 3,600mm/min 으로 고정된 경우의 가공 효율은 Fig. 5 에서처럼 이송이 높은 10,000 rpm 에서 공구수명이 가장 우수하였고, 고속으로 갈수록 공구수명이 저하되는 경향을 보였지만, 20,000 rpm 에서는 30,000rpm 보다도 공구수명이 현저히 저하됨을 재현실험을 통해서도 확인하였다. 또한, 표면도 10,000rpm 보다 20,000, 30,000rpm 에서 나쁜 경향을 보였다. 따라서, 주축회전수가 날당이송보다 공구마멸에 더 큰 영향을 미치므로, 동일한 가공효율을 갖는 금속제거량에서는 주축회전수를 증가시키는 것보다는 날당이송을 높이는 것이 유리할 것이다.

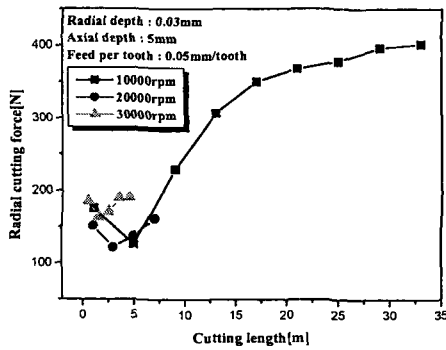


Fig. 6 Radial cutting force according to spindle speed

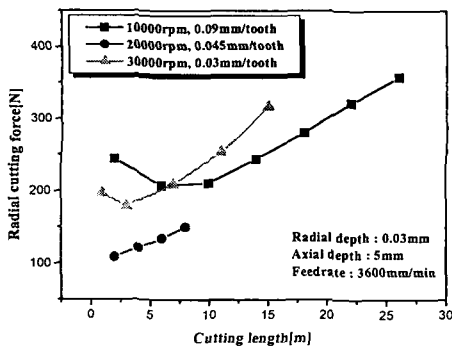


Fig. 7 Radial cutting force in constant federate

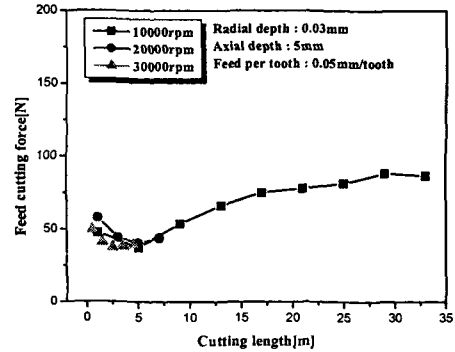


Fig. 8 Feed cutting force according to spindle speed

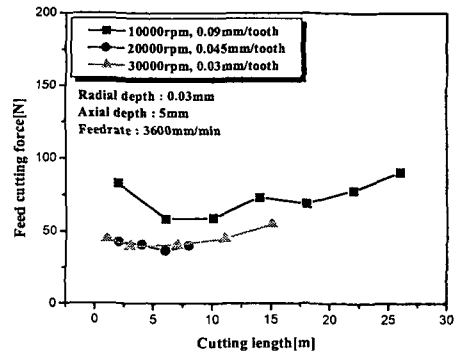


Fig. 9 Feed cutting force in constant feedrate

Fig. 6 과 7 의 결과로부터 30,000rpm 의 경우 이송이 6,000mm/min 일 때는 공구동력계의 응답속도가 낮아지므로 공구마멸이 증가하여도 200N 이하의 낮은 값을 지니지만, 이송이 3,600mm/min 일 때는 정상적으로 공구수명시까지 300N 이상으로 계속해서 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 공구동력계의 응답특성이 주축회전수 증가뿐만 아니라 이송의 증가에도 신속하게 반응하도록 설계되어야 함을 암시해 주고 있다.

20,000rpm 의 경우에는 심한 소음과 표면 악화로 인해 큰 절삭력이 가해졌을 것으로 예상은 되었으나 의외로 공구수명이 진전되어도 절삭력이 200N 이하로 낮은 수준에 머물러 있음을 알 수 있다. 응답에 문제가 없는 경우에는 Fig. 6 과 7로부터 반경방향 절삭력이 공구마멸과 함께 선형적으로 증가함으로써 감시에 유효하다는 것을 알 수 있다.

이송방향 절삭력은 공구마멸이 증가함에 따라 어느 정도 증가하는 경향을 보이지만, 모든 조건에서 Fig. 8 와 9 에서처럼 100N 이하로 일정한 수준에

머물러 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 이

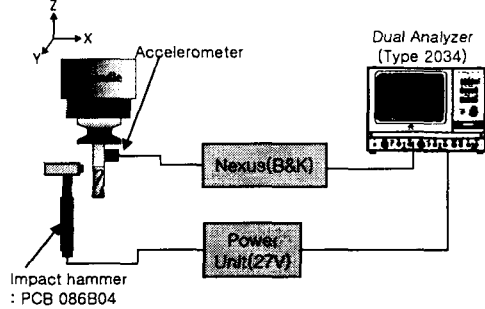


Fig. 10 Experimental setup for the measurement of natural frequency in spindle

송방향보다는 반경방향의 절삭력이 공구마멸에 직접적인 영향을 미치고, 이송방향 절삭력은 감시에 유효하지 않음을 알 수 있다.

3.3 공진 발생 회전수와 고유진동수 측정

주축회전수 변화와 동일 이송률 실험의 경우에서 20,000rpm 에서는 심한 소음과 함께 공작물 표면 곳곳에 채터무늬가 발생하고, 날이 절삭을 하지 못해 공작물을 미는 현상까지 발생하였다. 고속가공에서의 이러한 문제점이 주축의 고유진동수로부터 기인한 것인지를 파악해보고자 동일 엔드밀을 사용하여 Fig. 10 과 같이 주축의 고유진동수 측정실험을 행한 결과 Table 4 와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

정적인 상태에서의 고유진동수 측정결과 1 차 고유진동수 1.76 kHz와 일치하는 4 날 엔드밀의 주축 회전수는 26,400rpm 이다. 하지만, 동적인 가공시에는 공구마멸로 인해 공구의 강성이 약해지고, 공작물과의 접촉으로 인한 부가질량의 영향으로 인해 고유진동수가 낮아질 수 있으므로 20,000rpm 에서의 이상마멸과 채터현상은 1 차 고유진동수와와의 공진에 의한 현상으로 사료되며, Fig. 11 의 재현실험시 4m 정도 가공을 하자 가공이 되지 않고 공작물이 밀리며 심한 소음을 발생하여 가공을 멈추었다. 비슷한 날당이송 0.05mm/tooth 에서도 유사한 수명을 가지며, 이상 현상을 나타남을 파악하였다. 앞서 언급한 Fig. 6 과 7 의 절삭력 신호에서도 20,000rpm 의 경우에는 공진현상으로 인해 정상적인 절삭이 이루어지지 않아서 반경방향 절삭력이 공구마멸이 진전

Table 4 Natural frequencies of spindle

Order	Natural frequency(kHz)
1	1.76
2	3.00
3	3.74

4	4.63
---	------

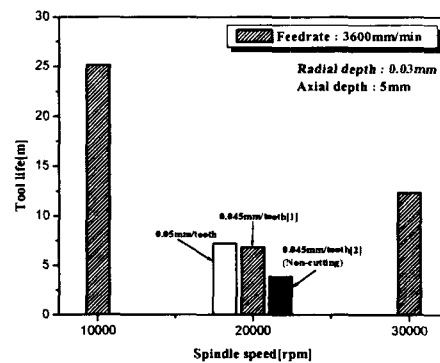


Fig. 11 Comparison of tool life in 20,000rpm

됨에도 불구하고, 200N 이하로 낮은 값을 유지함을 알 수 있다.

3.4 세장비에 따른 가공성 평가

세장비에 따른 가공성을 평가하기 위하여 공구 오버행을 32mm 와 25mm 로 하여 반경방향 절입, 축절입을 변화시키면서 4 가지 경우에 대해 공구마멸 실험을 행한 결과 Fig. 12 와 같은 결과를 얻었다. 가공조건이 점차적으로 가혹해질수록 비례해서 공구수명들이 감소하고 있다. 공구 오버행이 증가할수록 런아웃과 공구처짐이 증가하기 때문이다. 이로써, 세장비도 가공성에 영향을 미치는 중요한자이며, 공구수명 측면에서 기본적인 가공 조건들과 함께 일정한 관계를 유지하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 가공시에는 기본적인 가공조건 외에 세장비도 반드시 제시되어야 하고, 세장비와 가공조건들에 대한 관계식이 성립되어야 할 것이다. 마멸기준을 0.26mm 로 하여 각 조건들에 대한 공구수명을 다시 Fig. 13 에 나타내었다.

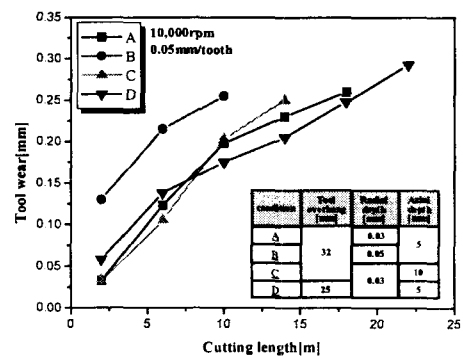


Fig. 12 Tool wear trends according to tool overhang.

radial and axial depth

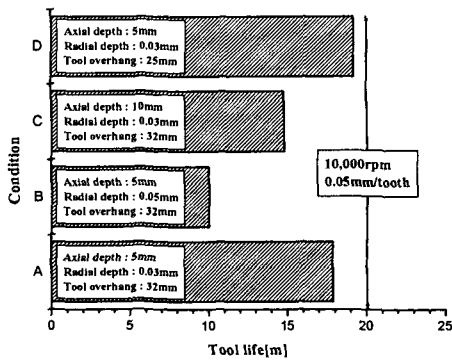


Fig. 13 Tool life comparison according to tool overhang, radial and axial depth. (Wear criteria : 0.26mm)

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. D. Yan, T. I. El-wardancy, and M. A. Elbestawi, "A multisensor strategy for tool failure detection in milling," MTM, Vol. 35, No. 3, pp. 383 - 398, 1995.
3. J. T. Roth, and S. M. Pandit, "Early prediction of impending end-milling tool failure using acceleration signals," Transactions of NAMRI/SME, Vol. 26, pp. 243-248, 1998
4. 김정석, 이득우, 강명창, 이기용, 김정훈, "고속 가공에서 가공성 평가를 위한 3 축 공구동력계 개발," 한국 정밀공학회지, 제 16 권, 제 5 호, pp. 11-18, 1999.

4. 결론

본 연구에서는 40,000rpm 급 고속 머시닝센터의 진동특성과 가공성을 평가하였으며, 이를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 주축회전수별 가속도신호 분석을 통해 구동 초기 30,000rpm 이상 고속에서 주축의 불안정성과 함께 예비구동시간의 필요성을 제시하였다.
- 2) 주축회전수, 반경절입, 날당이송에 따른 절삭력은 금속제거량과 일치하는 경향을 나타내며, 30,000rpm 이상에서는 3 축 힘센서를 이용한 공구동력계의 응답이 낮아짐을 알 수 있었다.
- 3) 주축회전수가 증가하면 공구마멸이 지수적으로 감소하며, 가공효율이 동일한 경우 주축회전수보다는 이송을 증가시키는 것이 공구마멸 측면에서 유리하다.
- 4) 고속가공에서는 2 면이 구속되는 HSK 형 공구홀더가 BT 형 보다 유리하며, 세장비는 기본적인 주축회전수, 반경절입, 축절입과 같은 가공조건과 함께 가공성에 영향을 미치는 중요한 인자이다.
- 5) 공구수명 저하, 낮은 절삭력, 심한 소음발생과 표면악화 현상을 나타낸 20,000rpm 이 주축의 고유진동수 측정을 통해서 공진을 유발하는 주축회전수임이 검증되었다.

후 기

본 연구는 2002 년도 산업자원부의 중기거점과제의 일환으로 화천기공(주) 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에 감사 드립니다.