

# 고속 머시닝센터의 성능평가 기술에 관한 연구

강익수\*, 강명창<sup>+</sup>, 김정석<sup>++</sup>, 김기태<sup>+++</sup>

## A Study on the Performance Evaluation Technology in High Speed Machining Center

Ik-Soo Kang\*, Myung-Chang Kang<sup>+</sup>, Jeong-Suk Kim<sup>++</sup>, Ki-Tae Kim<sup>+++</sup>

### Abstract

The high speed machining center(HMC) has been widely applied to manufacture a die and machine elements product in industrial field. Because the evaluation for HMC is not sufficiently performed, ineffective machining is occasionally conducted in machining industry. In this study, the dynamic characteristics of newly developed machining center is evaluated under running condition and the machinability is investigated experimentally. Also, the in-process measuring instrument which can measure the tool wear on the machine were developed by using the CCD and exclusive jig and calibration instrument for tool wear measurement.

**Key Words :** 9폰트

### 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, 고속가공기의 장점을 충분히 활용하지 못하고 있으며, 적절한 가공조건을 선정하지 못해 비용적으로 막대한 손실을 초래하고 있는 실정이다. 이러

한 문제점들을 해결하기 위해서는 다양한 방법으로 가공기의 성능을 파악하여 최적의 성능을 발휘할 수 있는 조건을 제시하고, 유용한 정보를 제공하는 것이 필요하다. 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. 또한, 절삭력은 공구마멸과 함께 가공성을 평가하는 주요한 측정신호이며 저속영역에서는 상용화된 공구동력계가 적용되고 있지만, 10,000rpm

\* 발표자. 부산대학교 정밀기계공학과(iskang@pusan.ac.kr)

주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산30번지

+ 부산대 기계공학부

++ 부산대 정밀정형 및 금형가공 연구소

+++ 화천기공(주)

이상의 고속영역에서는 응답에 문제가 되고 날당 고주파 신호의 획득이 곤란하기 때문에 고속에서의 절삭력신호는 신뢰성이 떨어지게 된다<sup>(1-3)</sup>.

지금까지 공구마멸에 대한 평가와 감시에 대한 연구가 많이 진행되어 왔지만, 많은 연구 결과들이 조건별 마멸경향에 대한 평가만 있거나, 마멸에 따른 센서신호를 정량화하여 직접적인 측정없이 마멸량을 감시(Monitoring)하고자 하는 연구가 대부분이었다. 신중한 분석과 평가가 이루어지지 않으면 이러한 연구는 일회적인 실험에 불과할 수 있으며, 신뢰성을 잃는 경우도 발생하게 된다<sup>(4-5)</sup>.

주축의 진동특성에 대한 파악도 주요한 성능평가 척도이다. 가속도계(Accelerometer)를 사용한 주축의 성능평가 방법에는 주축을 회전시켜 신호의 변화로부터 특이 회전수를 찾은 것과 정지한 주축에 대해 고유진동수를 측정하여 공진 유발가능 회전수를 찾는 방법이 있으며, 가공실험을 통해 검증하게 된다. 이외에도 열변위 오차, 주축 및 테이블 이송 오차, 런아웃(Runout) 등의 측정을 통해 공작기계 주축계의 성능을 평가하게 된다.

본 연구에서는 기존에 상용화된 외국의 40,000 rpm급 수직형 고속 머시닝센터(Mikron UCP710)와 2단계 사업에서 개발한 50,000rpm급 수평형 고속 머시닝센터(Hwacheon HS-HMC)에 대하여 상호 특성들을 조사하였고, 주축계의 진동특성과 고속가공 대응평가 시스템을 구축하였으며, 절삭 실험 및 평가를 수행하였다.

## 2. 고속 공작기계 성능평가

### 2.1 주축의 진동 특성

주축계의 고유진동수를 가진시험법을 이용하여 측정하였다. 임팩트해머로 가진하여 가진력과 응답신호를 FFT 변환(Fast Fourier Transformation)하여 고유진동수를 측정하였고, 가속도계를 통해서 주축의 진동가속도를 측정하였다. 주축의 동적특성 실험장치 개략도를 Fig. 1에 나타내었고, Table 1과 2에 실험에 사용된 고속 머시닝센터의 재원과 장비의 사양을 나타내었다.

주축의 동적 특성은 가공물의 표면조도 및 절삭깊이를 결정하는 주요한 요소이므로 절삭조건 선정시 이에 대한 고려가 필요하다. 따라서 주축에 대한 고유진동수를 측정하였다. 측정결과 40,000rpm급의 경우 이송방향의 1차 고유진동수는 88Hz(5,280rpm)이고, 반경방향은 184Hz(10,800rpm)로 나타났다. 그리고 50,000rpm급의 경우는 이송방향

과 반경방향의 1차 고유진동수가 168Hz (10,080rpm)으로 동일하게 나타났다.

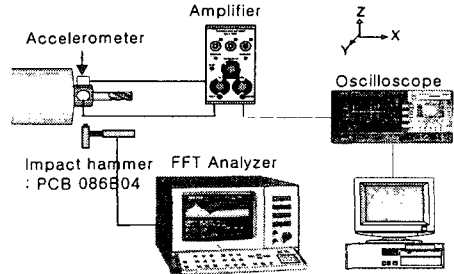


Fig. 1 Experimental set-up for dynamic characteristics of spindle system

Table 1 Specification of machining center

	40,000rpm급 (수직형)	50,000rpm급 (수평형)
Model	Mikron UCP710	Hwacheon HS-HMC
Max. rpm	42,000	50,000
Max. feed	32m/min	120m/min
Spindle power	14kW	14kW
Controller	Heidenhain	FANUC

Table 2 Specification of experiment instrument

Instrument	Specification
Accelerometer	B&K 4393
Oscilloscope	4Ch, Max Sampling : 400Mhz
FFT analyzer	B&K, Type 2034
Amplifier	B&K 4Ch. Type 3022

### 2.2 주축회전수별 진동 특성

주축의 회전수를 2,000rpm간격으로 40,000rpm까지 증가시키며 이송방향(x-축)과 반경방향(y-축) 가속도신호를 획득하였고, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

40,000rpm급의 경우 초기에는 안정적이고, 20,000rpm과 24,000rpm에서 진동이 다소 커지며, 34,000-36,000rpm에서 진동이 상당히 증가함을 알 수 있었다. 50,000rpm급인 경우 1차 고유진동수 영역인 10,000rpm 부근에서 이송

방향 진동이 심하고, 26,000rpm 부근과 34,000-36,000rpm에서 다시 진동이 증가함을 알 수 있었다. 그리고 25,000rpm까지는 이송방향이 진동이 크나, 그 이후로는 반경방향 진동이 크게 나타났다. 두 머시닝센터 주축의 진동 특성이 유사하게 나타났다.

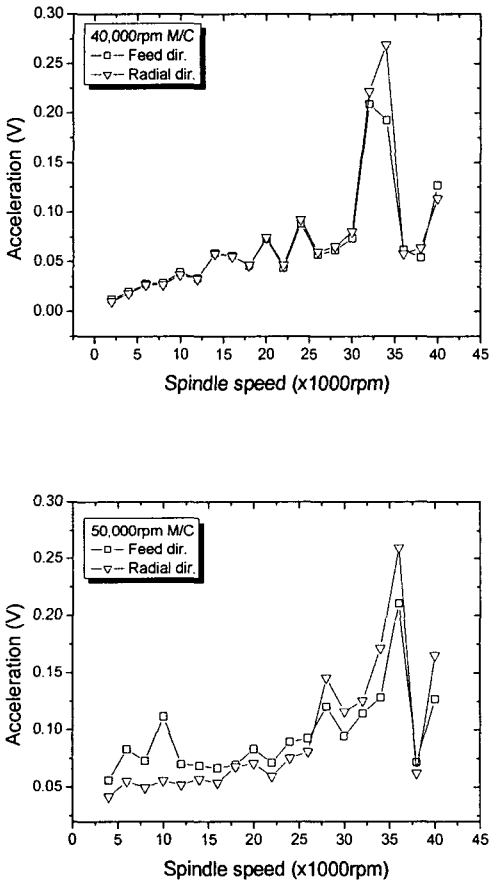


Fig. 2 Vibrational acceleration according to spindle speed

### 2.2 개발된 HMC 주축의 특성 평가

개발된 50,000rpm급 주축의 평가 결과 Mikron 사의 고속 머시닝센터 주축과 유사한 동특성을 보였다. 50,000rpm급 HMC의 특성이 40,000rpm급 상용화 머시닝센터와 유사한 걸로 보아서 주축계의 설계와 제작이 잘 되었음을 알 수 있다. 하지만, 26,000과 35,000rpm에서의 진동 문제 해결이 필요할 것으로 보인다.

## 3. 고속 가공성 평가

### 3.1 공구마멸과 절삭력 특성

가공조건에 따른 절삭력과 가속도신호의 특성을 파악하기 위하여 고속가공용 공구동력계에서 주축회전수를 변화시키면서 절삭력과 가속도신호를 획득하였다. 또한, 주축회전수에 따른 공구마멸 특성을 파악하기 위하여 날당이송과 반경절입, 축절입은 고정하고 주축회전수를 증가시키면서 공구마멸 실험을 행하였다. 고속 머시닝센터의 가공성 평가 실험은 다음과 같은 순서로 이루어졌다. 공구마멸 실험시에는 절삭력→가공→공구마멸 측정의 순으로 1패스(Pass)가 100mm인 가공시편에 대해 주기적인 패스가공을 행하면서 절삭력을 획득하고, 공구마멸을 측정하였다. 주축이 고속으로 회전할 경우, 이송이 상당히 빨라지므로 길이가 2cm인 절삭력 시편에서 안정된 신호를 획득하기 위해 날당이송을 0.1mm/tooth 이하로 제한하였다.

40,000rpm급 머시닝센터에서는 여유면마멸이 0.26mm 이상 진전시에는 심한 치핑(Chipping)으로 불꽃이 발생하고, 표면이 타는 현상이 나타나므로 0.26mm를 마멸기준으로 정하였고, 50,000rpm에서는 0.28mm를 기준으로 하였다. 공구마멸은 여유면마멸을 측정하였으며, 공작기계 테이블 위에서 가공 후 좌표이동을 통해 바로 기상에서 직접 측정할 수 있도록 개발된 전용지그(Exclusive jig)와 CCD를 적용한 기상계측 마멸측정장치를 사용하여 측정정밀도와 측정시간을 단축시킬 수 있었다. Fig. 3과 Table 3에 실험장치도 실험조건을 각각 나타내었다.

Fig. 5는 주축회전수에 따른 절삭력 특성을 보여주고 있다. 보는 바와 같이 이송방향 절삭력은 주축회전수가 증가하더라도 변화가 없지만, 반경방향 절삭력은 주축회전수가 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. 이러한 절삭력 특성에 기준하여 주축설계시나 고속가공용 공구설계에 있어서 반경방향 힘을 고려한 설계가 중요할 것이다.

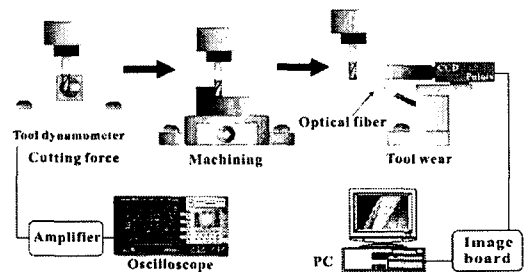


Fig. 5 Cutting force according to spindle speed

Fig. 6은 공구마멸 특성을 보여주고 있다. 40,000rpm급에서 10,000rpm을 기준으로 회전수가 2배로 증가하면 공구수명이 약 4배, 3 배로 증가하면 약8배정도로 감소함을 알 수 있다. 하지만, 20,000rpm 급방에서는 심한 소음과 함께 공작물 표면에 채터(Chatter)무늬가 발생하였다. 50,000 rpm급의 경우 추축회전수 10,000rpm에서 가공길이 10m 까지 공구마멸이 서서히 증가하다 그 이후부터 약 25m까지 정상상태를 보인다. 그 이상 가공을 하면 공구마멸이 급격히 증가하였다. 그리고 25,000rpm에서는 불꽃이 심하게 발생하며, 초기부터 공구마멸이 심하게 일어나 가공이 어려움을 확인하였다. 이런 내용의 정보가 사용자에게 제공되어야 할 것이다. 또한 40,000rpm에서는 초기에 공구마멸이 일어나다 안정화 단계를 거치고 후기에 공구마멸이 증가하는 고속가공의 특성을 잘 보였다.

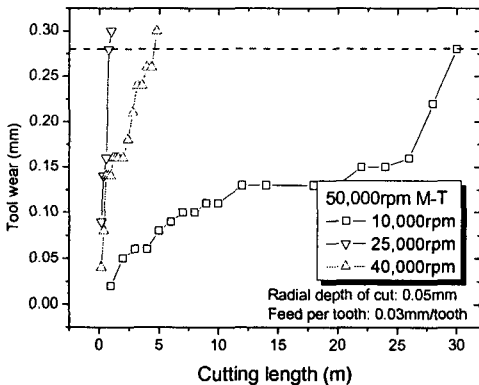
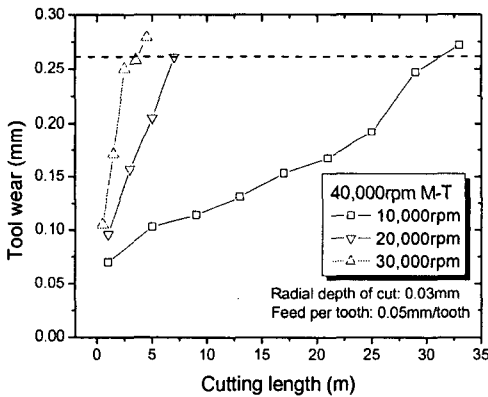


Fig. 6 Tool wear according to cutting length

Table 4는 절삭거리에 따른 조건별 여유면 마멸 형태의 변화 추이를 나타내었다. 마멸이 진전될수록 코너부마멸이 급진전됨을 알 수 있으며, 고정도재 가공으로 인해 코팅층이 완전히 없어지고 공구소재 자체가 소멸되는 심각한 현상을 보이고 있다. 특히 25,000rpm에서는 초기부터 코너부마멸이 진행되어졌음을 사진으로부터 알 수 있고, 이로 인한 급격한 공구마멸이 발생하였다. 이로써 절삭부하가 증대되어 소음과 과도한 마멸을 유발하고, 표면조도가 나빠지게 된다.

Table 4 Trends of flank wear shape according to cutting length

0m	0m	0m
3m(0.06mm)	0.2m(0.09mm)	0.2m(0.04mm)
6m(0.1mm)	0.4m(0.14mm)	0.6m(0.14mm)
11m(0.13mm)	0.6m(0.16mm)	24m(0.18mm)
26m(0.16mm)	0.8m(0.28mm)	28m(0.21mm)
30m(0.28mm)	1mm(0.3mm)	48m(0.3mm)
10,000rpm	25,000rpm	40,000rpm

### 3.2 정밀도평가 실험계획

50,000rpm급 수직형 고속 머시닝센터의 운동정밀도를 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 시편을 모델링하였다. 이를 통해 공작기계의 정밀도(진원도, 동축도, 진직도, 단차정밀도 등)를 파악하기 위하여 가공시편을 디자인하였다.

시편의 재질은 알루미늄이고, 공구는  $\phi 10$  4날 플랫엔드 밀을 사용하였으며, 가공 중 공구에 소재의 응착이 발생해서 오일미스트를 분사하여 가공을 수행하였다. Table 5에는 실험조건을 나타내었다.

고속 머시닝센터에서 황삭과 정삭가공을 다 수행했으며, 3차원 측정기로 가공한 시편의 치수를 측정하였다. 총 가공 시간은 2시간 정도 소요되었다.

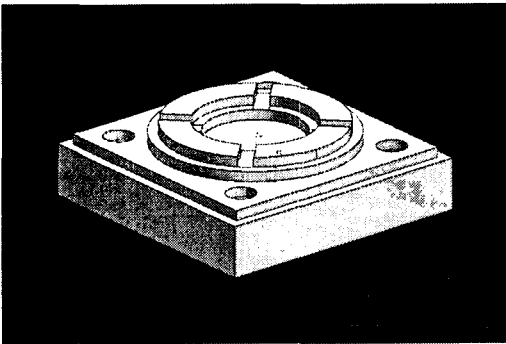


Fig. 7 The specimen model for machining precision evaluation

Table 5 Cutting conditions

Workpiece	Al6061
Tool	4 Flute $\phi 10$ Flat Endmill
Spindle speed	20,000rpm
Feed rate	4,000mm/min(황삭) 3,000mm/min(정삭)
Radial depth of cut	6.0mm(황삭), 0.1mm(정삭)
Axial depth of cut	1.0mm(황삭), 0.1mm(정삭)
Cutting fluid	Oil mist

### 3.3 개발된 HMC의 가공정밀도 평가

Fig. 8은 가공된 시편의 사진이고, Fig. 9에는 시편의 크기와 가공정밀도 평가를 위해 측정하고자 하는 부분을 나타내었다. z축 단차정밀도 평가를 위해 시편의 모든 단차를 10mm로 하였고, 원호가공 정밀도 평가를 위해 원의 치수

를 달리하여 가공하였으며, 진직도를 알아보기 위해 충분한 직선가공을 수행하였다. 또한 동축도 평가를 위해 구멍가공을 통해 구멍의 중심축간 거리를 측정하였고, 그 결과를 Table 6에 나타내었다.

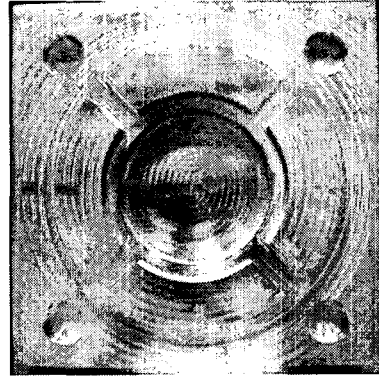


Fig. 8 Photograph of machined specimen

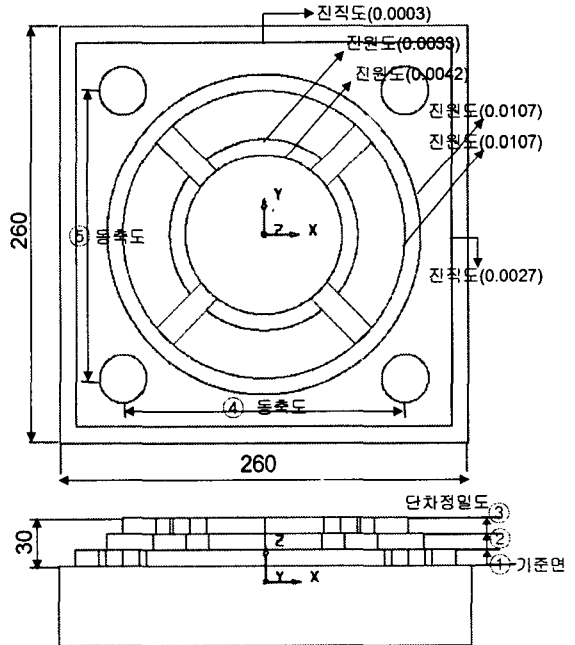


Fig. 9 Measuring position of specimen for machining precision evaluation

Fig. 9에서 보는 바와 같이 기계의 진직도는 2/1000 mm 이하로 상당히 우수함을 알 수 있었다. 진원도 또한 최대

1/100mm 정도 양호한 결과를 보였는데, 원호가공시 기계 진동이 다소 발생하였다.

Table 6에서 보면 단차정밀도가 5/1000mm 이하로 우수함을 알 수 가 있었으며, 동축도는 2/100mm이하로 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

Table 6 Measuring results of machined specimen  
(단위: mm)

	치수 (측정치)	정밀도
① 단차정밀도	10 (9.9946)	-0.0054
② 단차정밀도	10 (9.9956)	-0.0044
③ 단차정밀도	10 (9.9924)	-0.0076
④ 동축도	180 (179.9813)	-0.0187
⑤ 동축도	180 (179.9797)	-0.0203

#### 4. 결론

초고속 머시닝센터의 성능평가를 통해 고속 가공성능 평가 기술을 확립할 수 있었고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

개발된 머시닝센터(주축회전수 50,000rpm)의 주축계 1차 고유진동수는 168Hz(10,080rpm)으로 나타났다. 기계동작중 진동가속도는 1차 고유진동수 영역인 10,000rpm 부근에서 이송방향 진동이 심하고, 회전수 증가에 따라 감소해가다가 26,000rpm 부근과 34,000-36,000rpm에서 다시 진동이 증가함을 알 수 있었다.

고속 가공성평가 결과 양호한 고속가공특성을 보였으나, 25,000rpm에서는 불꽃이 심하게 발생하며, 초기부터 공구 마멸이 심하게 일어나 가공에 어려움이 있음을 확인하였다. 이는 40,000rpm급의 머시닝센터에서도 나타나는 현상으로서 사용자에게 가공기의 정보를 구체적으로 전달하여 효과적인 고속가공기 운용이 되도록 해야 할 것이다.

가공정밀도 측정 결과 HMC의 주요정밀도 특성중에서 진직도와 진원도, 단차정밀도는 매우 우수한 결과를 보였다.

#### 후 기

본 연구는 2004년도 산업자원부의 중기거점과제의 일환으로 화천기공(주) 연구비 지원에 의해 수행된 것으로 이에

감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Yan, D., El-wardancy, T. I. and Elbestawi, M. A., 1995, "A Multisensor Strategy for Tool Failure Detection in Milling," *MTM*, Vol. 35, No. 3, pp. 383-398.
- (2) Roth, J. T. and Pandit, S. M., 1998, "Early Prediction of Impending End-milling Tool Failure using Acceleration Signals," *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 26, pp. 243-248.
- (3) Kim, J. S., Lee, D. W., Kang, M. C., Lee, K. Y. and Kim, J. H., 1999, "Development of 3-Component Tool Dynamometer for Evaluation of Machinability in High Speed Machining," *Journal of the KSPE*, Vol. 16, No. 5, pp. 11-18.
- (4) Martin, K. F., 1994., "A Review by discussion of condition monitoring and fault diagnosis in machine tools", *MTM*, Vol. 34, No. 4, pp. 527-551.
- (5) (財)工作機械技術振興財團, 1992., "超高速工作機械用主軸系と性能評價とその性能向上に關する研究".