

# 범용 머시닝센터에서 주축증속기를 이용한 고속절삭에 관한 연구

- 주축의 회전정도(Run-Out)가 가공특성에 미치는 영향 -

Study on the High-Speed Machining Using High Speed  
Tooling System in Machining Center

김 경 균\*(부산대 원), 이 용 철(연암공전),  
이 득 우, 김 정 석(부산대 ERC/NSDM) 황 경 현(KIMM)

## ABSTRACT

In order to realize the high-speed machining, the relative technologies for high speed machining tool and high speed machining are required now. The machining accuracy is influenced on the disturbance by the synchronized working conditions(cutting force, spindle Run-out, thermal deformation etc.) In this paper, the effect of spindle Run-out for the high speed machining is investigated. The results show that the spindle Run-out has a great influence on the machining accuracy in high speed machining.

Key Words : Spindle Run-Out(주축회전정도), High Speed Machining(고속가공),  
Cutting Force(절삭력), Machining Accuracy(가공정도)

## 1. 서론

최근 산업의 급속한 발전과 더불어 그 구성 부품의 고정밀 및 고능률 가공에 대한 요구가 급증하고 있는 실정이다. 가공정밀도의 개선은 제품의 부가가치를 높여 주고, 생산성의 개선은 가공경비를 줄임으로 경쟁력을 강화시킨다. 고속절삭은 생산성 향상과 매우 밀접한 관계에 있으며, 자동차, 항공기, 전기·전자산업 등에 적용되어 가공능률과 생산성을 향상시킬수 있어 이에대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.<sup>[1]</sup>

고속가공을 실현하기 위해서는 고속공작기계, 고속가공용 공구 및 가공기술 등의 관련기술이 요구된다. 공작기계의 고속화기술에 대한 연구는 주축스핀들의 고속화로부터 진행되고 있으며, 주축의 고속·고정밀화를 위해 연구가 진행되고 있다.<sup>[2]</sup>

그런데 고속가공에 있어 큰 문제점은 주축 시스템이 고속화 됨에 따라 불평형질량에 의한

회전오차 및 공구의 설치 정도가 가공정밀도, 그리고 공구의 마모에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.

End-Mill 가공과 같은 단속절삭에서는 변동 절삭력과 여러날의 동시 가공에 의한 절삭력의 교란 때문에 표면거칠기가 저하하고, 공구의 수명이 짧아지는 문제가 있다.<sup>[3,4]</sup> 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 기계구조의 강성을 증가시켜 진동을 줄이거나, 새로운 공구개발과 최적 절삭조건 등이 선정되어야 하며, 최적절삭조건을 선정하기위한 동절삭력 모델해석에 관한 연구도 수행되고 있다.<sup>[5,6]</sup>

E.J.A. Armarego etel.<sup>[7]</sup> 는 평면 밀링가공(Face Milling)에서 계산모델을 통해 공구의 회전오차와 절삭력 변동의 관계를 모델링하고 실험과의 비교를 통해 예측모델을 제시하였다. 그러나 현재까지의 연구들은 저속영역에서 평면

밀링의 설치오차에 따른 영향에 의한 것만을 고려하고 있다.

그러므로 본 연구에서는 고속가공영역에 대한 주축의 회전정도가 가공정밀도에 미치는 영향 및 절삭력과 상관계수를 파악함으로써 고속가공을 실현하기 위한 최적의 가공조건 선정 및 가공시스템의 보정 등에 대한 기초자료를 제시하고자 한다. 범용 공작기계에 주축증속기를 이용하여 고속가공시 공구의 회전오차량과 절삭력, 표면거칠기의 상관관계를 실험적으로 살펴본다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치의 구성

본 실험에 사용된 실험장치의 제원을 Table 1에 나타내었고, 실험장치를 photo 1에 나타내었다.

Table 1. Experimental set-up

공작기계	수직형 머시닝센터 최대회전수 4,000 rpm 테이블 면적 1100×280
공작물	HP-4M(100×100×65(mm <sup>3</sup> ))
공구	볼엔드밀(φ10, 초경TiAlN코팅)
주축증속기	증속비 1 : 5
A/D convertor	Conversion rate : 100KHz Resolution : 12bit Input range : ±10[V]
공구동력계	KISLER 9257B 용량 20kg
Gap sensor	분해능 0.5μm 측정범위 0 - 2.0mm
표면조도기	Mistubishi Sufitest 401

주축증속기의 원리는 기어 치차열을 이용하여 최대 증속비 1 : 5배 까지 증속할 수 있어 최고 회전수 4,000 rpm 인 범용 머시닝센터에서 주축회전수를 2,600~10,400rpm 까지 증속시켰다. 그리고 머시닝 센터의 테이블 위에 공구동력계를 고정시키고, HP급형강을 공구동력계에 위에 설치하여 절입깊이, 피크피드, 이송속도 등 절삭조건을 각기 다르게 선정하였다. 공구 하단 부위에 공구의 반경방향으로 갭센서를

부착한 상태에서 볼엔드밀로 급형강을 가공할 때, 각 절삭조건에 따른 공구의 편심량과 절삭력을 공구동력계와 갭센서를 통해 받은 신호를 A/D변환기를 거쳐서 획득하였다.

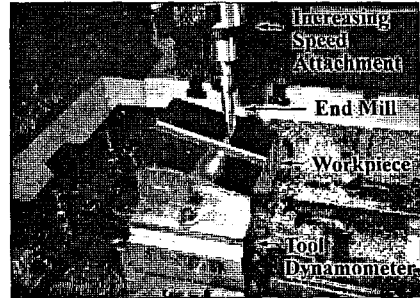


photo. 1

### 2.2 실험방법

볼엔드밀로 평행한 평면을 가공시 볼엔드밀의 중심은 이론상으로는 절삭속도가 0이되어 완전한 절삭이 이루어지지 않는다. 따라서 칩배출과 함께 효율적인 절삭을 위해서 공구와 공작물간에 Tilt각을 15°로 설정을 하였다.

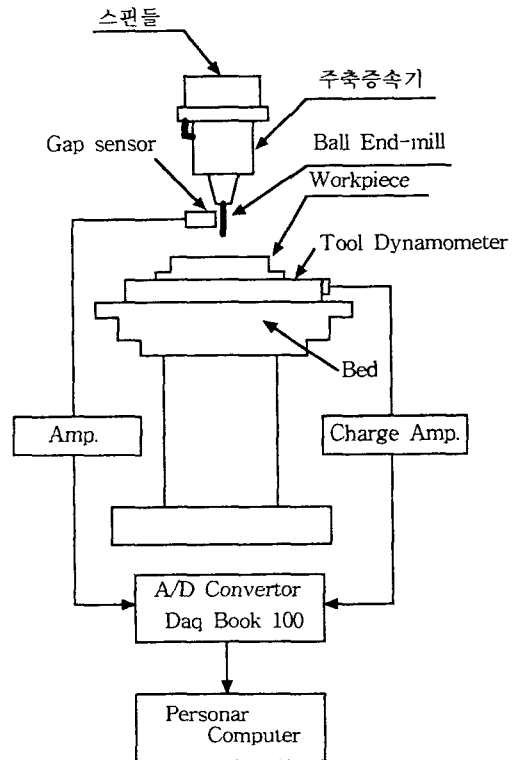


Fig. 1 Schematic Diagram of the experiment equipment

**Table 2.** Mechanical properties of the workpiece

구분	항복점 (Kgf/mm <sup>2</sup> )	인장 (Kgf/mm <sup>2</sup> )	연신율 (%)	충격치 (J)	경도 (HRC)
HP-4	70~ 85	85~ 100	~13	~55	32~38

Fig. 1에서 나타내는 바와 같이 측정장비를 설치하고, 갱센서와 공구동력계의 샘플링 시간을 0.2초로 하며 동시에 회전오차와 절삭력의 신호를 A/D변환기로 받았다.

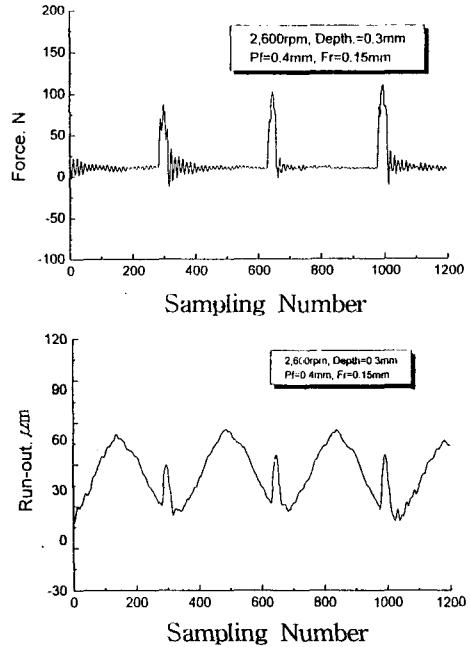
절입깊이를 0.3mm으로 했을 때, 주축회전수를 2,600rpm, 5,200rpm, 7,800rpm, 10,400rpm 으로 증가 시키면서, 피크피드 0.2mm, 피드 0.3mm 와 피크피드 0.4mm, 피드 0.15mm 로 변화시키면서 절삭을 하였다.

절삭속도의 증가와 함께 이송속도도 증가시켜, 공구의 날당 이송량을 일정하게 유지하여, 볼랜드밀의 절삭폭을 항상 일정하게 하였고, 공구의 재장착에 따르는 설치오차를 줄이기 위해서, 모든 조건을 한 면에다 동시에 가공한 후에 표면조도기로 최대표면거칠기 Rmax 값을 구하여 회전오차에 따른 절삭력과 표면거칠기와의 상관관계를 살펴보았다. 본 실험에 사용된 HP-4금형강의 특성을 Tabel 2에 나타내었다.

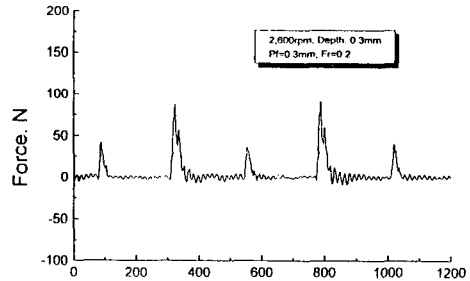
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 절삭속도에 따른 절삭력과 공구 회전 정도와의 관계

Fig. 2는 주축회전수 2600rpm으로 절삭하는 경우의 접선방향 절삭력 및 공구 회전정도를 보여주고 있다. 볼랜드밀에 의한 가공은 단속절삭으로 절삭력의 변화는 절삭이 이루어지는 동안에만 얻어지며 절삭력은 100N이다. 공구의 흔들림은 절삭이 이루어지는 동안에 급격히 변화되는 것을 볼 수 있다. 본 실험에서 사용한 볼랜드밀은 2개의 공구날로 구성되어 있어 2개의 절삭력변화를 얻어야 하나 결과에서 보듯이 1개의 공구날에 의해서만 가공이 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 특히 증속기를 사용하여 실험을 수행할 경우에는 가공기의 주축에 증속기를 부착함에 따른 편심 및 설치오차 등에 의해 공구의 회전정도가 좋지않다. 그에 따라 공구가 편마모 되며, 가공정도가 나쁘게 될 것으로 보인다.



**Fig. 2** Comparison with the tangential cutting force with Run-Out in 2600 rpm



**Fig. 3** Cutting signal

Fig. 3는 공구의 설치가 교정되어 두 날에 의해 가공이 이루어지는 경우의 절삭력의 변화를 보여주고 있다. Fig. 2와는 달리 두 날에 의해 가공이 이루어지므로 회전정도가 향상되었다고 볼 수 있다. 그러나 이 경우에 있어서도 한 주기에 대해 절삭력의 차이가 있으며, 역시 공구의 회전오차에 따른 칩 발생 뚜께의 차이로 절삭력의 변동이 있는 것으로 보아진다. 그러므로 증속기를 사용하여 고속절삭을 수행할 경우에 있어서는 공구의 설치정도 및 고속에서의 회전정도가 가공특성에 주요한 인자이며, 가공정도 향상을 위해서는 공구설치 및 편심량 조절에 주의가 필요하다. Fig. 2와 Fig. 3

의 경우에 있어 표면거칠기( $R_{max}$ )의 차이는 2.3  $\mu\text{m}$ 였다.

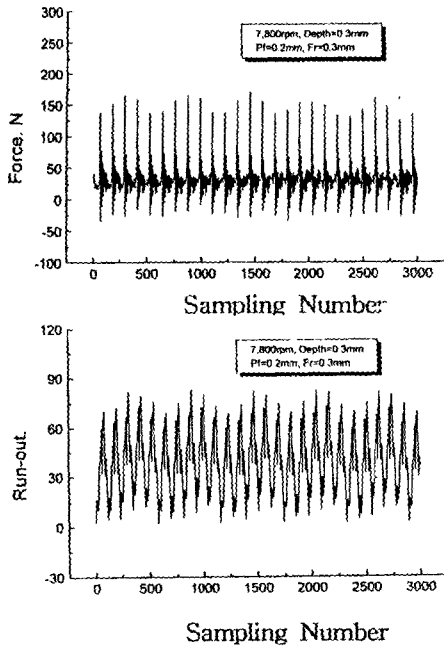


Fig. 4 Comparison with the tangential cutting force with Run-Out in 7800 rpm

Fig. 4는 주축회전수 7800rpm에서의 절삭중의 절삭력의 변화와 공구 회전정도의 변화를 보여 주고 있다. 본 연구에서 사용된 주축 증속기는 치차방식의 5배 증속시스템을 채용하고 있어 절삭력 및 회전정도의 측정결과에 증속에 따른 주기적인 진동의 발생을 볼 수 있다. 진동의 진폭은 회전수 2600rpm 72 $\mu\text{m}$ 에서 10400rpm 86 $\mu\text{m}$ 으로 회전수가 증가할수록 증가하며 이러한 진동은 가공면의 가공정도에 직접적으로 영향을 미칠 것으로 생각된다. 따라서 증속기의 사용에 의한 고속가공에서는 증속기의 특성을 파악하여 공구의 회전오차를 최대한 개선할 수 있는 조건 선정과 공구의 설치오차를 최소화할 수 있도록 주의가 필요하다.

Fig. 5은 주축 회전속도의 증가에 따른 3방향 절삭력의 변화 및 공구의 회전정도 변화를 보여주고 있다. 절삭속도가 증가하면 절삭력과 공구의 회전오차는 증가하고 있음을 볼 수 있다. 회전 속도의 증가에 따른 절삭력의 축방향, 접선방향, 그리고 반경방향분력의 변화를 보면 접선방향의 분력과 축방향의 분력의 변화는 회전수의 증가에 비해서 50N 정도만 증가되었지만, 반경방향의 분력은 90N 정도의 급격한 증

가를 나타내고 있다. 이것은 주축의 회전 편심량의 증가에 따른 반경방향으로의 절삭력이 증가함에 따른 결과이다.

여기서 가공조건으로 공구 한날당 절삭량을 일정하게 했음에도 전반적으로 절삭력은 증가하고 있는데, 이것은 절삭속도의 고속화에 따른 공구의 편심때문에 변동절삭력이 커지고 있기 때문으로 보인다.

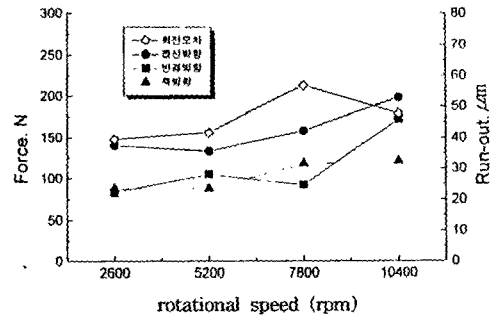
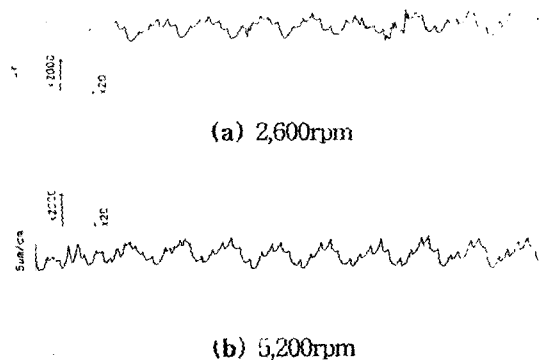


Fig. 5 Comparison cutting force with Run-out in proportion to the speed of rotation

Fig. 6은 피크피드 0.4mm, 피드 0.15mm 에서 주축회전수 2600rpm, 5200rpm, 7800rpm, 10400rpm으로 가공한 절삭표면의 표면거칠기를 측정된 결과이다. 절삭속도에 따른 표면거칠기의 변화는  $R_{max}$ 로 각각 6.35 $\mu\text{m}$ , 6.3 $\mu\text{m}$ , 6.55 $\mu\text{m}$ , 6.9 $\mu\text{m}$ 이며, 표면형상에 나타나 있는 주기적인 진동의 진폭이 공구의 회전오차와 절삭력의 진동주기 형태와 비슷함을 알 수 있다. 이것은 회전축의 회전오차가 표면형상의 형태를 결정하는데 주요한 영향을 미치는 것을 알 수가 있다. 그러므로 주축의 회전정도의 향상이 가공면의 가공정도에 영향이 매우 크며 이의 개선을 위해서는 회전정도를 향상시키는 것이 매우 중요하다.





(c) 7,800rpm



(d) 10,400rpm

Fig 6. Comparison the surface roughness with the shape accuracy in proportion to the speed of rotation

#### 4. 결론

범용 머시닝센터에서 주축증속기를 이용하여 고정도 금형재의 고속가공특성을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 증속기 주축의 회전정도, 절삭력 및 가공정도를 측정하여 상관관계를 살펴본 결과 다음의 결론을 얻었다.

1) 고속절삭에서는 공구의 설치정도 및 고속에서의 회전정도가 가공특성에 주요한 인자이다.

2) 절삭속도가 증가하면 주축의 회전정도의 증가와 함께 반경방향의 절삭력이 증가한다.

3) 주축의 회전정도의 향상이 가공면의 가공정도에 영향이 매우 크며 이의 개선을 위해서는 회전정도를 향상시키는 것이 매우 중요하다.

#### 참 고 문 헌

- 1) George Schneider, Jr., "High Speed Machining -Solutions for Productivity", Proceedings of the SCTE'89 Conference, 1989
- 2) Tosnimichi Moriwaki., "High-Speed Machining" CIRP, 41(2), 1992
- 3) F. Ismail and A. Bastami, "Improving stability of slender end mills against chatter", Trans. ASME J. of Eng. Ind. 108, 264-268, 1986
- 4) J. W. S. therland and R.E.Devor, "An imprved method for cutting force Surface

error Prediction flexible and milling system", Trnas. ASME J. of Eng. Ind. 108, 269-279, 1986

- 5) J. Tlustý, "Dynamics of high-speed milling", Trans ASME J. of Eng. Ind. 108, 59, 1986
- 6) 조현덕, 양민양 "볼엔드밀 가공에서의 공구 처짐예측과 정밀가공에 관한 연구", 대한기계학회논문집, Vol.16, No.9, pp.1669~1680, 1992
- 7) E.J.A.Armarego, "Computerized Predictive Cutting Models for Forces in End-Milling Including Eccentricity Effects", CIRP, 38(1), 1989