

밀링가공에서 공구마모와 스피들의 비틀림 진동과의 상관관계에 관한 연구

김석관*

Research on the Effect of Cutter Wear on the Torsional Vibration of Spindle in Milling

Seogwan Kim*

ABSTRACT

In milling, cutting tool is directly attached to spindle and this tells that spindle can provide very useful information on the cutting tool condition such as wear or breakage. Since spindle is rotating at a high speed, measuring spindle velocity using a noncontacting measurement system gives the best information which can be obtained. Due to the force applied to spindle through cutting tool, velocity of spindle changes. And any change in cutting tool condition affects cutting force and consequently spindle vibration. With the intent of continuously monitoring cutting tool condition in intermittent machining operations in a benign manner, a noncontacting velocity measurement system using a laser Doppler velocimeter was assembled to measure spindle torsional vibration. Spindle vibration was measured and analysis of it in the frequency domain yielded a measure which corresponded to amount of cutting tool wear in milling.

Key Words : Milling(밀링가공), Cutting tool(공구), Wear(마모), Spindle(스핀들), Torsional vibration(비틀림 진동), Laser Doppler velocimeter(레이저 속도계), Frequency spectrum(주파수 스펙트럼)

기호설명

f : frequency
 v : velocity of object
 c : speed of light
 λ : wavelength of light
 ϕ_1, ϕ_1', ϕ_2 : angle between laser beams and velocity
 vector of object under measurement
 α : $\phi_1' - \phi_1$
 β : $(\phi_1 + \phi_1' - \pi) / 2$

1. 서론

여러 형태의 기계적인 가공에 있어 가공 상태를 자동으로 판단하여 필요한 조치를 취할 수 있는 능동적인 가공기를 개발하는 것은 무인 가공을 가능케 하는 데 필요한 가장 기본적인 과제 중 하나이다. 이를 위하여 많은 연구가 진행되어왔으며 대표적인 것이 공구 상태를 판단할 수 있는 방법들의 개발이다. 그 중에서도 가장 성공적으로 이루어진 것은 선반 가공과 같은 연속적인 절삭 가공에서 공구 마모를 관찰하는 방법이었으며 여기

* LG 생산기술원 CAE Center

에는 주로 공구 동력계를 활용한 절삭력 측정, 가속도계를 활용한 베드의 진동 측정, Acoustic Emission(AE) 신호 등이 활용되어왔다^(1,2,3).

본 연구에서는 우선 이러한 방법들이 밀링가공과 같은 비연속적인 가공에 적용될 수 있는지에 대해 고찰하였다. 밀링가공에서는 선반가공과는 달리 공구가 스핀들에 고정되어 빠른 속도로 회전하고 있으므로 공구로부터 직접 절삭력을 측정하는 것은 불가능하다. 따라서 공구 지지대 대신 공작물의 밑에 공구동력계를 설치하여 절삭력을 측정하거나 간접적인 방법으로 측정하여야 한다. 공작물의 밑에서 절삭력을 측정하는 것은 공구마모와 비교적 잘 일치하는 절삭력의 변화를 보여주었다⁽⁴⁾. 그러나 이 방법은 공작물을 장착하는 데 제약을 가져올 수 있다. 밀링가공에서 간접적으로 절삭력을 측정하는 방법 중 가장 간단한 것은 스핀들 모터에 공급되는 전류를 측정하는 것이다. 그러나 모터에 공급되는 전류의 변화가 확실히 측정되기 위해서는 공구마모와 같은 미세 변화가 아닌 공구 파손과 같은 커다란 변화가 발생할 때만 가능하다는 연구 결과가 발표되었다^(5,6). 가속도계를 활용하여 진동신호를 측정, 공구마모의 상태를 분석한 연구 결과는 일련의 상관관계를 보여주었으나 가공 중 발생하는 여러 잡음 성분을 효과적으로 분리시키기 어려운 문제를 보여주었다^(7,8). AE 신호의 활용은 선반가공과 같은 연속 가공에서는 공구마모에 대한 유용한 정보를 제공할 수 있다^(3,9). 그러나 밀링가공과 같은 비연속적인 가공에 있어서는 여러 개의 공구날이 교대로 공작물에 진입할 때 발생하는 충돌로 인한 신호와 공구 상태 변화로 인한 신호 변화를 분리해야 하는 것과 같은 고도의 신호처리 기술이 필요하다.

밀링가공에서 공구상태를 정확하게 판단할 수 있는 방법을 개발하기 위해서는 공구로부터 가장 근접한 부위에서 다른 잡음의 영향 없이 공구상태에 민감한 신호를 찾아내는 것이 핵심 과제라 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 신호가 될 수 있는 것으로 스핀들의 진동을 선정하였다. 스핀들은 공구가 직접 부착되어 공구에 발생하는 절삭력이 가장 민감하게 반응하는 부품이라 할 수 있다. 그러므로 공구마모로 인한 절삭력의 변화가 스핀들의 운동에 가져오는 변화를 관찰하는 것은 공구마모를 간접적으로 측정할 수 있는 효과적인 방법이 될 수 있다.

2. 본론

2.1 비틀림 진동 측정 시스템 구성

밀링가공에서 스핀들은 빠른 속도로 회전하고 있기 때문에 일반적인 가속도계로 스핀들의 진동을 측정한다는 것은 베어링에 부착해야 하는 것과 같은 제약을 가지고 있고 베어링의 상태에 따른 영향을 받게 되므로 공구마모만의 영향을 관찰하기 위해서는 베어링의 상태변화를 분리할 수 있는 방법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 일반 가속도계에 의한 진동 측정보다는 공구에 가해지는 절삭력이 스핀들에 발생시키는 비틀림 진동의 변화를 관찰하는 방법을 선택하였다. 전통적으로 회전하는 기계의 비틀림 진동을 측정하는 데는 스트레인 게이지, slip ring 또는 각종 기계적/전기적 비틀림 측정기가 사용되어 왔다. 그러나 이러한 센서들은 회전하는 축과의 물리적인 접촉을 필요로 하기 때문에 공진현상으로 인한 측정 범위의 제약과 내구성에 한계가 있다.

본 연구에서는 스핀들의 비틀림 진동을 정확히 측정하기 위하여 비접촉식 속도계를 활용하는 것을 검토하였다. 일반적으로 회전하는 물체의 속도를 측정하는 데는 홈이 파진 원판과 proximity transducer를 활용할 수 있으나 이는 홈의 수와 transducer의 정밀도에 따라 측정할 수 있는 비틀림 진동주파수에 한계가 있으며 일반적으로 10Hz 미만의 진동만을 측정할 수 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 본 연구에서는 레이저 속도계를 활용하는 레이저 비틀림 진동측정기를 활용하였다⁽¹⁰⁾. 이 측정기는 Fig. 1과 같이 거의 동일한 세기를 가진 두 개의 레이저 빔(Beam)을 속도를 측정하고자 하는 지점에 맞춘 후 반사된 레이저 빔을 photodetector를 통해 받아들이는데 이 때 photo-

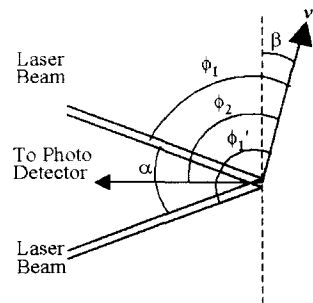


Fig. 1 Differential Doppler technique

detector는 받아들인 빛의 세기와 비례하고 동일한 주파수를 갖는 전류를 생성시킨다. 이렇게 얻어진 신호는 도플러 효과에 의해 물체의 속도에 대한 정보를 갖고있어 이를 분석하면 물체의 속도를 알 수 있다. 즉, 첫번째 빔의 주파수 변화를 Δf 라 하고 두번째 빔의 주파수 변화를 $\Delta f'$ 라고 하면,

$$\Delta f = \frac{fv}{c} (\cos\phi_1 + \cos\phi_2) \quad (1)$$

$$\Delta f' = \frac{fv}{c} (\cos\phi'_1 + \cos\phi'_2) \quad (2)$$

이 된다. Photodetector에서는 주파수 변화가 일어난 이 두개의 빔이 합해져 아래와 같은 주파수를 가진 신호가 생성된다.

$$\Delta f - \Delta f' = \frac{fv}{c} (\cos\phi_1 - \cos\phi'_1) \quad (3)$$

Fig. 1에 보여진 α 와 β 를 활용하여 이 수식을 다시 써보면,

$$\Delta f - \Delta f' = \frac{2v}{\lambda} \sin(\alpha/2) \cos\beta \quad (4)$$

가 된다. 이 수식을 활용하여 측정된 물체의 속도 v 를 계산할 수 있다. 이때 속도 v 에 의해 야기된 레이저 빛의 주파수 변화를 도플러 효과라고 하며 이를 활용한 속도측정 시스템을 레이저 도플러 속도계라 부른다. 본 연구에서는 1picosecond의 rise time을 갖고있어 GHz 대역의 주파수를 가진 신호를 생성할 수 있는 Photodetector와 Photodetector로부터 생성된 전류의 주파수 측정을 위해서 1KHz에서 150MHz까지 측정할 수 있는 주파수 Counter가 활용되었다. Fig. 2는 본 연구에서 활용된 측정 시스템의 전체적인 구성을 보여 주고있다. 이 시스템의 정확도를 평가하기 위하여 1KHz에서 4KHz의 고유진동수를 가지는 지름이 다른 알루미늄봉의 비틀림 진동을 측정하고 이론에 의해 계산된 값과 비교하여보았다. Fig. 3은 측정된 비틀림 진동의 한 예를 보여주고 있으며 Table 1에 보여진 것처럼 측정과 계산 결과는 약 4%에서 7%의 오차를 보여주었다. 이는 알루미늄봉이 장착된 선반과의 조립 관계, 비틀림 진동을 생성시키기 위해 힘을 가하는 과정에서 발생하는 오차를 감안할 때 충분히 정확한 값으로 판단되었다.

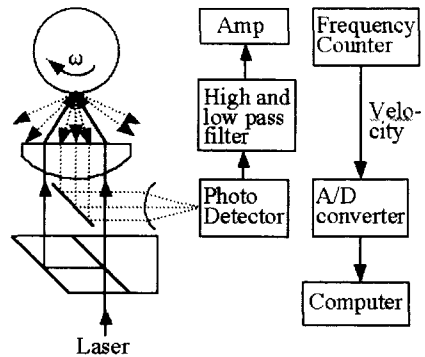


Fig. 2 Torsional vibration measurement system using laser Doppler velocimeter

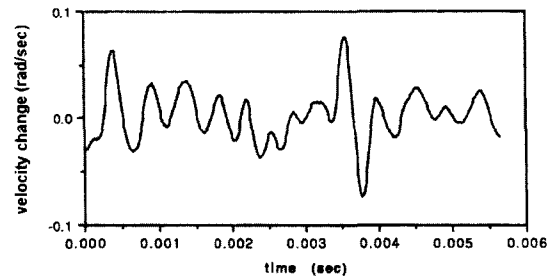


Fig. 3 Free torsional vibration of an aluminum shaft measured by the laser Doppler velocimeter

Table 1 Comparison of calculated and measured first torsional natural frequency of aluminum shafts

Length (m)	Diameter (m)	1st torsional natural frequency (KHz)	
		calculated	measured
0.21	0.025	3.76	3.52
0.44	0.025	1.80	1.71
0.62	0.045	1.27	1.22

2.2 밀링가공에서 스피들의 비틀림 진동 측정

밀링가공에서 스피들의 비틀림 진동을 측정하기 위해 가장 적합한 장소는 공구를 장착하는 공구 고정부로 선정되었다. 실제 스피들은 밀링기 내부에 위치해 있어 측정을 위한 구멍을 내야하는 번거로움이 있다. 반면 공구 고정부는 스피들의 하단에 고정되어있어 스피들과 한 물체를 이룸과 동시에 상당한 무게를 가지고 있어 스피들의

고유진동수에 직접적인 영향을 주며 비틀림 진동에 가장 큰 위상이기도 하다. 위에서 설명된 비틀림 진동 측정 시스템을 활용하여 스피들의 진동을 측정된 결과 약 79Hz 에서 1차 고유진동수가 관찰되었다. 비틀림 진동에 대한 고유진동수 계산을 위해 가장 간단한 1자유도계 모델을 활용하였으며 이때 계산에 필요한 비틀림 강성은 Torque Meter 를 활용하여 실제 측정된 값을 활용하였다. 계산 결과 약 92Hz 가 얻어졌으며 이는 실험과 10% 이상의 오차를 보여주었다. 이러한 차이는 스피들이 밀링기에 부착되면서 발생하는 주파수 변화와 공구고정부의 복잡한 형상으로 인한 Moment of Inertia 값의 계산상 오차가 가져오는 차이라 할 수 있다.

본 연구에서는 비틀림 진동 발생 현상을 이해하는 데 도움을 얻기 위하여 공구동력계를 공작물 고정부 하단에 장착하여 비틀림 진동과 동시에 가공시 발생하는 절삭력을 측정하였고 이때 공작물의 크기는 공구동력계를 장착하는데 문제를 일으키지 않는 것으로 선정하였다. 밀링가공에서는 날이 1개인 공구뿐 아니라 여러 개의 날이 있는 공구가 사용될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 완전한 불연속 절삭이 이루어지도록 날이 2개인 공구를 사용하였고 2개의 날에 의한 절삭이 동시에 일어나는 날이 4개인 공구를 사용하여 비틀림 진동 현상을 관찰하였다. 절삭 조건은 Table 2 에 보여진 것과 같다.

Fig. 4 에 보여진 것처럼 본 연구에서 측정된 스피들의 비틀림 진동은 절삭력과 비교해볼 때 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 즉, 공구의 날이 공작물에 진입할 때 큰 절삭력이 발생하며 진행함에 따라 절삭력은 감소하게 된다. 이러한 절삭력에 의해 발생하는 스피들의 비틀림 진동 역시 공구 날이 공작물에 진입할 때 순간적인 힘의 발생에 의해 크게 생성되었다가 절삭력이 감소하면서 함께 감소하게 되고 공구 날이 공작물과 분리되면서 시스템에 존재하는 Damping 에 의해 급격히 감소하게 된다. 이에 대한 주파수 분석을 수행해 보면 날이 2개인 공구의 경우 공구 날의 진입과 분리에 따른 진동, 즉 강제진동에 의한 주파수인 11Hz 와 고유진동수인 79Hz 성분이 크게 나타남을 볼 수 있다. 공구 날이 4개인 경우는 강제진동수가 11Hz 에서 22Hz 로 변화됨을 볼 수 있었다.

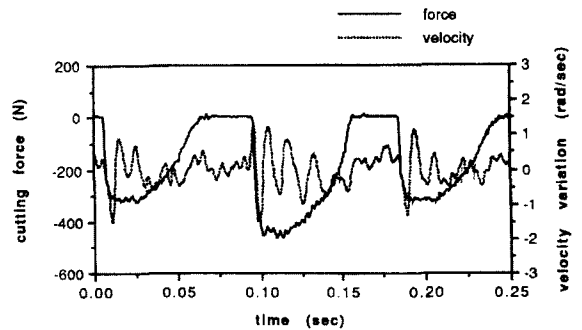
Table 2 Machining condition used in the experiment

(a) 2-tooth tool

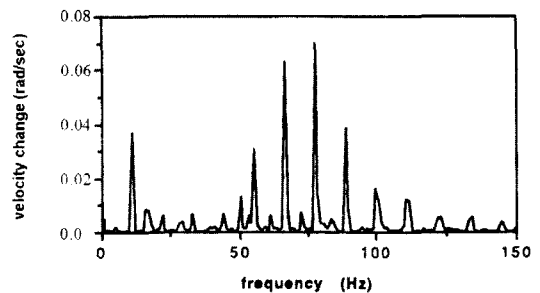
	feed rate u (mm/tooth)	axial depth of cut, d (mm)	cutting speed, v (m/sec)
down milling	0.4	0.5	0.30
	0.2	0.5	0.30
	0.4	1.0	0.30
	0.4	0.5	0.69
up milling	0.4	0.5	0.30

(b) 4-tooth tool

feed rate u (mm/tooth)	axial depth of cut, d (mm)	cutting speed, v (m/sec)
0.4	0.5	0.30



(a) cutting force and velocity variation of the spindle



(b) frequency spectrum of the spindle velocity

Fig. 4 Typical measured cutting force and torsional vibration of the spindle (2-tooth tool)

2.3 공구마모와 스펀들 비틀림 진동의 상관 관계 분석

공구마모가 스펀들의 진동에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 지속적으로 절삭을 수행하면서 절삭력의 변화와 스펀들의 비틀림 진동의 변화를 관찰하였다. 충분한 양의 공구마모가 일어날 수 있도록 각 날에 대해 50m 이상의 소재를 가공하였다. Fig. 5 (a)는 기존의 연구 결과[4]와 같이 절삭 길이가 증가함에 따라 절삭력이 증가하고 있음을 잘 보여 주고있다. 최종 절삭력은 초기 절삭력에 비해 30%에서 70%까지 증가하였다. Fig. 5 (b)는 스펀들의 비틀림 진동 중 강제진동 성분에 대한 주파수 Power의 증가를 보여 주고있다. 절삭력과 마찬가지로 절삭 길이에 따라 지속적으로 증가하고 있고 절삭력과 그 변화가 매우 유사함을 볼 수 있다. 최종 주파수 Power가 초기 값에 비해 50%에서 170%까지 증가하고있음을 볼 수 있다. Fig. 5 (c)는 스펀들의 비틀림 진동 중 고유진동 성분에 대한 주파수 Power의 증가를 보여 주고있다. 강제진동 성분에 비하여 매우 불규칙한 변화를 보여 주고있으며 이는 공구마모가 증가됨에 따라 절삭 중에 발생하는 감쇠가 불규칙하게 변화하고 있음을 말해준다. 즉, 절삭의 진행에 따른 공구 날과 공작물 간의 접촉면적의 증가와 함께 접촉면의 상태가 불규칙하게 변화하고있음을 알 수 있다.

3. 결론

본 연구에서는 공구상태 관정을 위해 이미 연구된 여러 방법이 밀링과 같은 불연속적 절삭의 경우 적용되기 어려운 점이 있음을 극복하기 위해 스펀들의 비틀림 진동과 공구마모 간의 상관관계를 관찰하였다. 이를 위해 고속으로 회전하고있는 스펀들의 비틀림 진동을 정확히 관찰하기 위한 레이저 도플러 속도계를 활용, 성공적으로 비틀림 진동을 관찰하는 데 성공하였다. 이 방법은 측정하고자 하는 대상 물체에 접촉이 없이 원하는 정보를 추출할 수 있어 가공에 전혀 영향을 미치지 않는다는 장점을 가지고있으며 측정할 수 있는 주파수 대역이 넓어 광범위하게 활용될 수 있다. 또한 본 연구를 통해 밀링가공에서 스펀들의 비틀림 진동 중 강제진동 성분은 공구마모와 밀접한 관계를 가지고있으며 공구마모 양을 예측 함으로써 향후 자동 공구 교환 등 무인 가공을 가능케 하는데

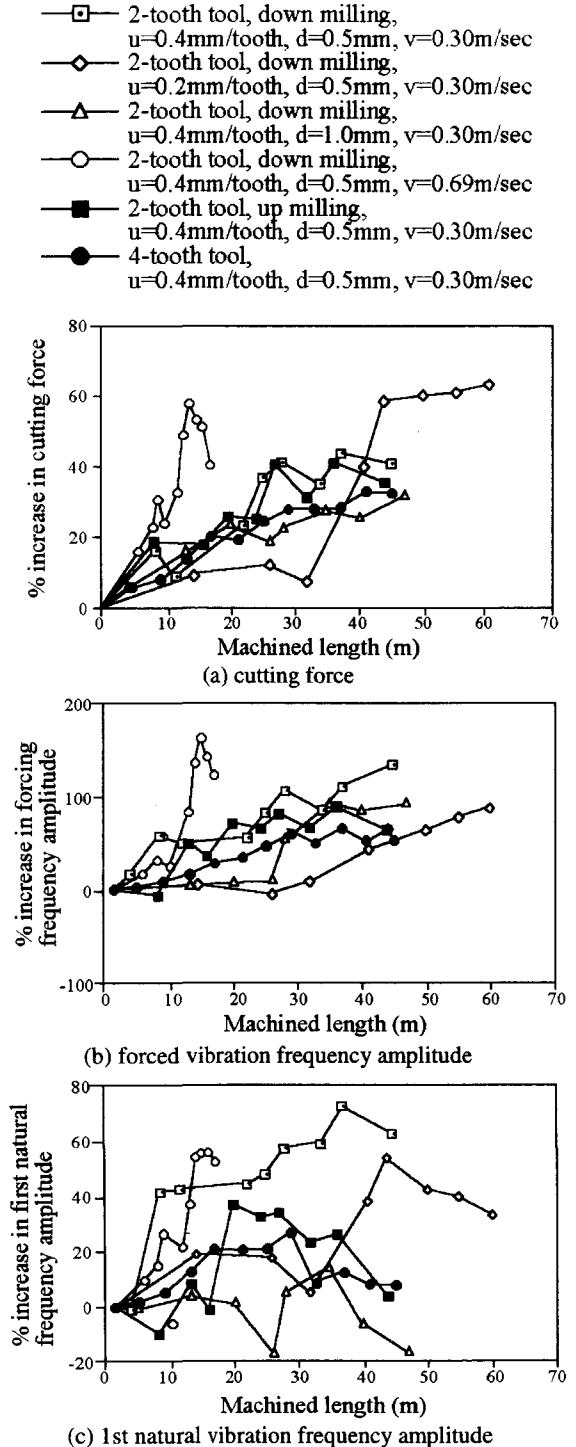


Fig. 5 Change in cutting force and vibration frequency amplitude with machined length

활용될 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Tlusty, J., and Andrews, G. C., "A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining," Annals of CIRP, Vol. 32, No. 2, pp. 563-572, 1983.
2. Cook, N. H., "Tool Wear Sensors," Wear, Vol. 62, pp. 49-57, 1980.
3. Iwata, K., and Moriwaki, T., "An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear," Annals of CIRP, Vol. 25, No. 1, pp. 21-26, 1977.
4. Victor, H., "Computer-Aided Measurement of Cutting Forces Applied to the Wear of an End Milling Cutter," Wear, Vol. 62, pp. 185-195, 1980.
5. Matsushima, K., Bertok, P. and Sato, T., 1982, "In-Process Detection of Tool Breakage by Monitoring the Spindle Motor Current of a Machine Tool," Measurement and Control for Batch Manufacturing, Production Engineering Division, American Society of Mechanical Engineers, pp. 145-153, 1982.
6. Takata, S., Ogawa, M., Bertok, P., Ootsuka, J., Matsushima, K. and Sata, T., "Real-Time Monitoring System of Tool Breakage Using Kalman Filtering," Robotics and Computer Integrated Manufacturing, Vol. 2, pp. 33-40, 1985.
7. Shteinhaus, G., Braun, S. and Lenz, E., "Automated Vibration Based Tool Wear Monitoring: Application to Face Milling," Proceedings of ASME International Computers in Engineering Conference, pp. 401-406, 1984.
8. Jiang, C.Y., Zhang, Y.Z. and Xu, H.J., "In-Process of Tool Wear Stage by the Frequency Band-Energy Method," Annals of CIRP, Vol. 36, pp. 45-48, 1987.
9. Kannatey-Asibu E. and Dornfeld, D.A., "A Study of Tool Wear Using Statistical Analysis of Metal-Cutting Acoustic Emission," Wear, Vol. 76, pp. 247-261, 1982.
10. Halliwell, N.A., Pickering, C.J.D. and Eastwood, P.G., "The Laser Torsional Vibrometer: A New Instrument," Journal of Sound and Vibration, Vol. 93, No. 4, pp. 588-592, 1984.