

밀링 공정시 주파수 영역을 이용한 채터 진동의 진단

김 문 기*

Diagnosis of Chatter Vibration using Frequency Domain in a Milling Process

Moon-Ki Kim*

Abstract

Frequency domain has been used to detect chatter vibration and to decide commencing point of chatter for the milling processes. For this, power spectrum of acceleration signal is analyzed in the frequency domain. Also, the power spectrum and surface roughness are measured, compared, and evaluated according to the depth of cut by experimental works. As a result, it is known that the commencing point of chatter can be decided the behavior of the maximum amplitude of the power spectrum of acceleration signal and there is a correlation between the power spectrum of acceleration signal and the surface roughness. In conclusion, the power spectrum of acceleration signal can be used as a useful information for detection and estimation of chatter vibration in machining.

Key Words : Chatter Vibration(채터진동), Frequency Domain(주파수영역), Power Spectrum(파워스펙트럼), Acceleration Signal(가속도신호), Surface Roughness(표면거칠기), Milling Process(밀링가공)

1. 서 론

밀링 공정시 발생하는 공구와 공작물 사이의 상대진동, 즉 채터진동(chatter vibration)은 공작물의 정밀도, 공구 및 공작기계의 수명, 가공공정의 생산성에 영향을 미치며, 공작기계 부품의 설계 및 구성, 가공공정의 자동화를 위한 무인화 가공 시스템에 중요한 변수로 작용하고 있다^{1,2)}. 이는 공작기계 구조가 진동하여 변위를 일으키고, 변위는

칩두께 변화를 발생시켜 동절삭력을 유발하고 동절삭력은 다시 기계구조를 가진하는 폐회로 시스템으로 인하여 발생하는 재생진동(regenerative vibration)으로 나타난다. 이러한 채터진동은 공구와 공작기계에 손실을 일으키며 가공물의 표면조도를 나쁘게 하므로 이를 검출하고 제어하는 문제가 가공기술 향상을 위한 중요한 과제로 취급되고 있다.

지금까지 채터진동 발생에 관한 연구는 절삭 중에 절삭

* 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부 (mkkim@kut.ac.kr)

음을 검출하는 방법⁽³⁻⁴⁾, 공작물로부터 반사되는 반사광 강도의 증감을 검출하는 광학적인 방법, 가공후 표면 거칠기를 조사하는 방법⁽⁵⁾, 공구의 이상진동 현상을 미소 변위 센서를 이용하여 시간영역의 신호레벨을 조사하여 신호를 처리하는 방법, 공구동력계를 이용한 절삭력 신호를 측정하는 방법⁽⁶⁻⁷⁾, 선형제어계 해석을 통해 채터진동을 파악하는 방법⁽⁸⁾ 등이 있다. 이와 같이 절삭과정에서 발생하는 채터진동에 관한 연구가 발생기구나 이론적 해석방법에 관하여 그 동안 많이 이루어져 왔다. 그러나 이러한 검출 방법들은 채터의 발생점(commencing point)을 결정하는데 있어서 객관적인 판단 기준이 결여되어 있으며, 특히 외란(white noise)을 오인할 수 있다는 문제점이 있는 것으로 지적되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 밀링가공에서 채터진동의 검출 및 그 발생점 판정방법을 확립하기 위하여, 채터진동의 발생현상을 잘 반영하고 있는 것으로 판단되는 주파수 영역(frequency domain)을 이용하여 가속도 신호의 파워스펙트럼(power spectrum)⁽⁹⁻¹¹⁾, 절삭깊이(depth of cut) 및 절삭 후 측정된 표면거칠기(surface roughness: Rmax)간의 상관관계로부터 채터진동의 검출 및 그 발생점 판정에 파워스펙트럼의 이용 가능성을 실험을 통하여 검토하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 기계 가공시의 진동형태

기계 시스템이 안정된 상태를 벗어나면 초기의 교란에 대한 반응으로 진동을 하게 되는데, 이러한 작용을 시스템의 자유진동(free vibration)이라 한다.

강제진동(force vibration)은 공작기계의 외부로부터 기초를 통하여 전달되는 진동과 공작기계 동력원에서 발생하는 주기적인 힘에 의한 진동을 말하며, 공작기계 스펀들의 불균형 전동장치에서 회전하는 질량의 불균형, 절삭공구의 충격, 기어와 베어링의 유격, 양복운동 요소 및 다른 기계로부터 지반을 통해서 전달되는 외부의 가진 때문에 발생하는 진동으로서, 공구와 공작물간의 상대진동으로 발생되는데, 이것은 진동원의 적절한 조치를 통하여 진동을 방지할 수 있다⁽¹²⁾. 밀링가공과 같은 다인절삭에서는 각각의 절삭날이 칩(chip)을 단속적으로 절삭을 행하는 불연속 절삭이기 때문에 절삭력의 주기적 변화에 의해 일어난다.

자려진동(self-excited vibration)은 절삭과정의 고유한 특성에 의하여 발생하므로 절삭을 수행하는 공작기계의 형태, 절삭조건 및 공구계 구성의 형태에 따라 달라지며

이러한 진동의 해석은 공작기계-공구-공작물계의 동적특성과 절삭과정의 동적특성의 규명을 통해 이루어진다. 자려진동은 공구가 이전 절삭에서 생긴 작은 굴곡 표면을 다시 절삭할 때 절삭깊이가 변하게 되어 절삭력이 순간적으로 변하기 때문에 일어난다. 이 현상이 계속되면 절삭계가 불안정한 상태로 들어가며 점점 큰 진동이 발생하는데 이것이 기계가공에 있어서 가장 중요한 형태의 자려진동인 재생효과(regenerative effect)이다.

자려진동은 밀링이나 기어절삭과 같은 단속절삭 과정에서 뿐만 아니라 선삭이나 연삭가공 등과 같은 연속절삭에서도 일어날 수 있다. 자려진동의 진폭은 일반적으로 강제채터 보다 크고 현상이 복잡하며 기계가공시 진동 문제의 대부분을 차지하고 있다.

2.2 채터의 재생 효과

기계구조의 초기 진동은 정절삭력에 의해 시작되고 공구와 공작물간의 상대적 변위는 칩두께의 변화를 유발시켜 동절삭력이 발생된다. 이 동절삭력은 다시 공작기계의 구조에 영향을 미쳐서 재생진동을 발생시킨다. 채터는 이러한 재생효과에 의한 재생 자려진동의 대표적인 예로서 자려진동의 진동수가 공작기계의 고유 모드 중의 하나와 일치하는 주파수에서 발생하게 된다. 채터는 기계 프레임에 외란으로 작용되는 절삭력의 변화 특성과 기계 프레임의 진동 모드와의 공진현상이다.

자려채터는 원래 비선형 진동이고 이를 완전히 해석하기에는 어려움이 많다. 자려채터의 이론, 특히 동적안정성에 관한 이론은 1자유도 또는 2자유도의 집중계수로서 취급하는 경우가 있지만 실제로 중요한 것은 발달한 채터진동이 아니고 오히려 채터진동의 발생여부에 문제가 있다. 채터의 발생 원인이 되는 변동절삭력(dP)은 다음 세가지 요소에 의해 변화를 일으킨다.

$$dP = k_s dS + k_\gamma dy + k_\omega d\Omega \quad (1)$$

여기서 k_s 는 $\partial P / \partial S$, k_γ 는 $\partial P / \partial \gamma$ 그리고 k_ω 는 $\partial P / \partial \Omega$ 를 의미하고, dS 는 칩두께의 변화, dy 는 이송속도 변화, 그리고 $d\Omega$ 는 회전속도의 변화를 나타낸다.

채터의 재생효과는 주로 절삭깊이 변동인 칩두께 변화에 의해서 일어나고, 칩두께 변화는 어떤 순간 공구에 가해진 진동에 의해서 파형으로 가공된 공작물 표면 위를 공구가 다시 지나가면서 가공할 때 발생한다.

2.3 주파수 영역 채터 검출 특성 변수

이산신호 $x(n)$ 이 실제로 처리 가능한 신호이라면, 0이 아닌 값을 가지는 n 의 수가 유한이어야 하며, 이러한 n 은 유한영역 안에 존재해야 한다고 할 수 있다. 이와같은 이산신호를 유한기간함수 또는 유한기간신호라 부른다. 유한기간함수 $x(n)$ 은 주기함수 $x'(n)$ 의 1주기라 생각할 수 있다. 그러므로 주기함수 $x'(n)$ 의 이산 푸리에 시리즈인 $X'(k)$ 의 1주기를 뽑아서, 이것을 유한기간함수 $x(n)$ 의 $X(k)$ 로 정의하면 유한기간함수 $x(n)$ 의 변환은 유한한 이산함수가 된다. 이렇게 정의한 $X(k)$ 를 유한기간함수 $x(n)$ 의 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform)이라 하고, 다음과 같이 정의한다.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)\omega_k^n, \quad 0 \leq k \leq N/2 \quad (2)$$

여기서, $x(n)$ 은 이산신호, ω_k 는 $\exp[-j(2\pi nk/N)]$, N 은 $x(n)$ 의 주기이고 h 는 샘플링 간격이다.

이산 푸리에 변환의 직접 계산법은 하나의 주파수 성분 값을 구하기 위하여 N 회의 복소수 곱셈과 덧셈을 행하여야 하고, 전 주파수 성분을 구하려면 N^2 회의 연산이 실행되어야 하는데, 이것은 실수계산이 $4N^2$ 회 수행되어야 하는 것과 같다. 디지털 푸리에 변환에 필요한 이렇듯 많은 승수 횟수를 될 수 있는대로 적게 하도록 하는 알고리즘이 고속 푸리에 변환(FFT; Fast Fourier Transform)이다. 이를 이용하면 N 점을 보다 작은 부분으로 분할하여 보다 빠른 방법으로 행할 수 있다. 연산 횟수는 $N \log_2 N$ 번만의 독립적인 연산으로 계산이 끝나게 되고 정확한 결과 값을 얻을 수 있다. FFT 파워스펙트럼이란 디지털 연산으로부터 고속으로 주파수 분석을 하여 그 신호의 주기성과 크기를 동시에 나타내 주는 스펙트럼이다.

2.4 FFT 파워스펙트럼을 이용한 채터 검출

만일 신호의 FFT 파워스펙트럼에서 큰 피크(peak) 값의 파워가 나타났다면 이는 그 피크 주파수의 신호가 전체 신호에서 큰 비중을 차지하고 있음을 나타내고 있는 것이다. 그러므로 안전 상태에서 가공을 하다가 채터 진동이 일어나면 스펙트럼 상에서 큰 변화가 일어나 전체 파워가 커지며, 새로운 주파수에서 피크의 파워가 생기거나 아니면 더욱 큰 피크의 파워가 생긴다. 즉 FFT 파워스펙트럼에서 없었던 피크 값의 파워가 새로이 나타난다면 채터가 발생하였다고 판별한다.

3. 실험방법 및 장치

3.1 실험방법

본 실험에 사용된 공작기계는 범용 수직 밀링머시인이고, Fig. 1과 같이 이송테이블 위에 시편을 고정한 후, 가속도 센서를 부착하였다.

주축의 회전속도, 테이블의 이송속도 및 절삭깊이 등의 절삭조건들을 변화시켜가며 절삭을 수행하고, 절삭시 발생하는 가속도 신호를 1.6kHz로 샘플링하여 0.64초 동안에 1024개의 데이터를 FFT 분석기를 통해 디스켓에 저장하였다. 디스켓에 저장된 가속도의 성분 및 크기를 주파수영역에서 FFT 알고리즘을 이용⁽¹⁾하여 분석하고, 채터발생에 따른 특정 주파수대를 조사하였다. 또한 절삭깊이에 따른 파워스펙트럼을 구하여 가공후 측정치 측정기를 이용하여 측정된 표면거칠기와의 상관관계로부터 채터진동의 발생점 판정에 이용할 가속도 신호를 주파수영역에서 구하였다.

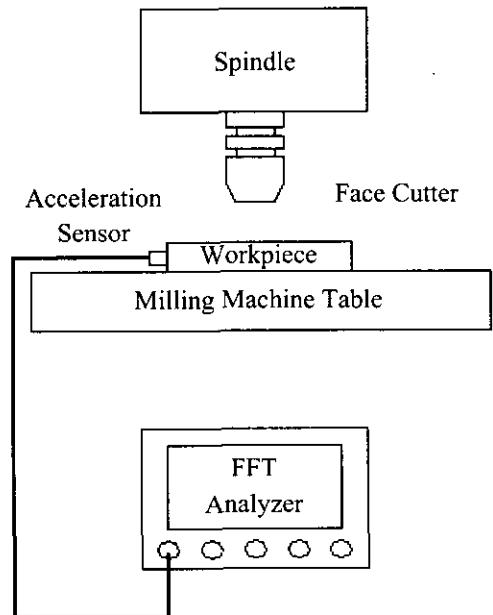


Fig. 1 Scheme for experimental set up

3.2 실험장치 및 절삭조건

본 연구를 위해 사용된 실험장치의 제원은 Table 1과

같고, 절삭조건은 chatter진동을 검출하기 위하여 Table 2와 같이 변화시켜가며 실험을 행하였다. 그리고 가공후 표면 거칠기를 측정하기 위하여 Mitutoyo사의 Surftest SV-400 측정기를 사용하였다.

Nyquist 주파수 (f_c)는 800Hz로 하였으며 샘플링 주파수 (f_s)는

$$f_s = 2f_c = 2 \times 800 = 1600 \text{ Hz} \quad (3)$$

샘플링 간격(Δt)은

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{1600} = 0.000625 \text{ sec} \quad (4)$$

이며, 측정시간(T_r)은 샘플링 갯수(N)가 1024개이므로 다음과 같이 계산된다.

$$T_r = N \cdot \Delta t = 0.64 \text{ sec} \quad (5)$$

샘플링된 데이터의 주파수 분해능 (Δf)은 다음과 같다.

$$\Delta f = \frac{1}{T_r} = 1.5625 \text{ Hz} \quad (6)$$

Table 1 Specification of experimental instruments

Milling Machine	통일중공업(TMV-2S)
Workpiece	SM20C(100 * 60 * 30 mm)
Face cutter	JEIL 545-5
Insert	대한중석 SPCN 1203EDTR-CT
FFT Analyzer	B & K (TYPE 2035)
Accelerometer	B & K (TYPE 4370)
Personal computer	COMPAQ PC (Pentium 166MHz)

Table 2 Cutting conditions for experiments

Spindle speed(rpm)	360, 500, 1000
Feed speed(mm/min)	15, 65, 140, 280
Depth of cut(mm)	0.3, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0
Width of workpiece(mm)	30

4. 실험결과 및 고찰

4.1 chatter진동의 주파수 특성

공구-공작물계의 고유진동에 대응하는 주파수영역의 성분은 chatter진동의 검출 및 그 발생점을 판정하는데 있어서 매우 유용하게 이용될 수 있으리라 사료된다. 그러므로 본 연구에서는 chatter진동의 주파수 특성변화를 조사하기 위하여, chatter발생 시 절삭실험에서 측정된 가속도신호를 주파수 분석하였다. 절삭깊이에 따른 주파수영역에서의 가속도신호의 파워스펙트럼을 측정된 결과, 절삭깊이가 0.3mm일때는 거의 나타나지 않다가 절삭깊이가 0.5mm 이상부터 chatter 발생 현상이 나타나기 시작하였다. 이에 대응하여 특정주파수 약 400~500Hz에서 파워스펙트럼의 진폭이 절삭깊이가 증가함에 따라 급격하게 증가하는 현상을 나타내고 있다. Fig. 2는 이에 대한 실험 결과를 보여 준다. Table 2에서 제시한 모든 절삭깊이별로 실험을 하였지만, 주파수영역 분포가 거의 일치하므로 본 그림에서는 5종류의 절삭깊이에 대해서만 나타내었다.

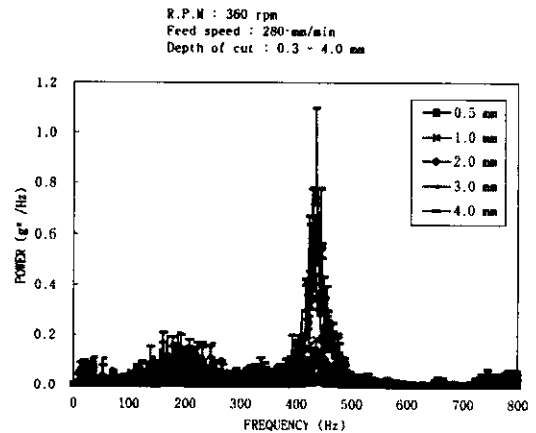
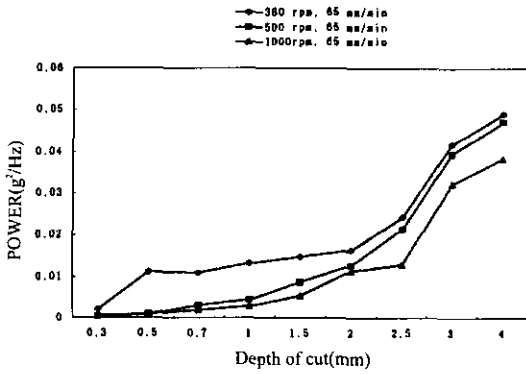


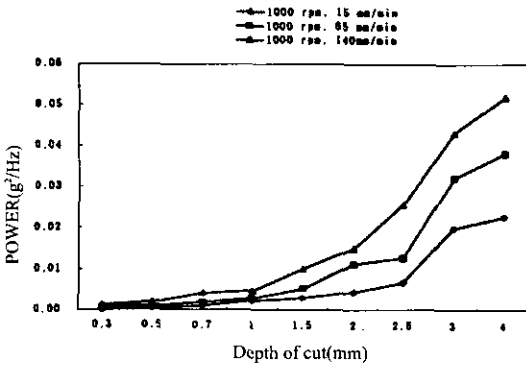
Fig. 2 Accelerations according to depth of cut in the frequency domain

4.2 절삭깊이와 파워스펙트럼과의 관계

절삭칩 단면적에 따른 절삭과정의 안정성을 고찰하기 위하여 가속도 신호의 파워스펙트럼의 변화를 절삭깊이의 변화에 따라 측정하였다. Fig. 3은 이에 대한 결과를 보여주는데, 이송속도를 동일하게 하고 주축회전수를 변화했을 경우와 주축회전수를 일정하게 유지한 상태에서 이



(a) Comparison at the same feed speed



(b) Comparison at the same spindle speed

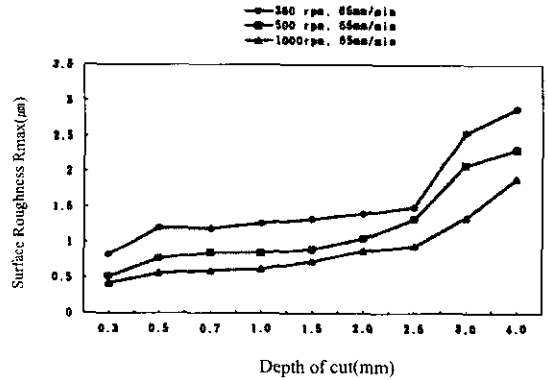
Fig. 3 Power spectrum according to depth of cut

송속도를 다르게 했을 경우로 구분하여 비교하였다. 여기에서, 절삭깊이가 2.0mm 이하 영역과 2.0mm 이상의 영역으로 변화특성이 구별되는 것을 볼 수 있다. 절삭깊이 2.0mm까지는 고유진동 모우드의 파워스펙트럼이 완만한 증가를 이루다가, 절삭깊이 2.5mm에서 급격한 증가세를 이루는 것을 볼 수 있다. 이것은 절삭과정 중 동적 불안정한 채터 상태에 이르렀다고 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 절삭저항의 동적 성분에 포함되어 있는 어느 특성의 주파수 성분에 착안하면, 채터진동의 검출은 물론 그 발생점의 판정이 가능함을 시사해 주고 있다.

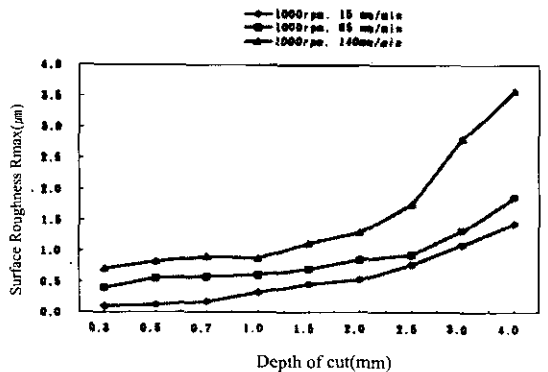
4.3 절삭깊이와 표면거칠기와의 관계

가속도신호의 파워스펙트럼이 채터진동의 검출 및 그

발생점 판정에 이용될 수 있는지 여부를 검토하기 위하여 가공후 측정된 표면거칠기 값과 비교하여 보았다. Fig. 4는 절삭깊이에 따른 표면거칠기의 변화를 가공조건별로 분류하여 나타낸 것으로 앞의 경우와 마찬가지로 이송속도를 동일하게 하고 주축회전수를 변화했을 경우 및 주축회전수를 일정하게 유지한 상태에서 이송속도를 다르게 했을 경우로 구분하여 비교하였다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭깊이가 증가함에 따라 채터발생에 따른 표면거칠기는 증가하며, 채터진동의 발생에 따라 그 증가율은 급격히 증대하고 있다. 표면거칠기의 값은 대체적으로 이송량 및 절삭깊이가 큰 절삭조건에서 크며, 절삭속도가 증가함에 따라 작아지는 경향을 나타내고 있다.



(a) Comparison at the same feed speed



(b) Comparison at the same spindle speed

Fig. 4 Surface roughness according to depth of cut

4.4 파워스펙트럼과 표면거칠기와의 관계

앞에서 기술한 바와 같이 가속도신호의 파워스펙트럼은 비교적 광범위한 절삭조건에서 발생하는 chatter진동의 현상을 명확히 반영하고 있는 것으로 생각된다. 일반적으로 chatter현상은 가공물의 표면 상태를 좌우하는 중요한 요인이 된다. 따라서 표면거칠기와의 대응관계로부터 가속도신호의 파워스펙트럼에 의한 chatter진동의 검출 가능성을 검토하였다. Fig.5는 절삭깊이의 변화에 따른 가속도신호의 파워스펙트럼과 표면거칠기와의 관계를 나타낸 것이다.

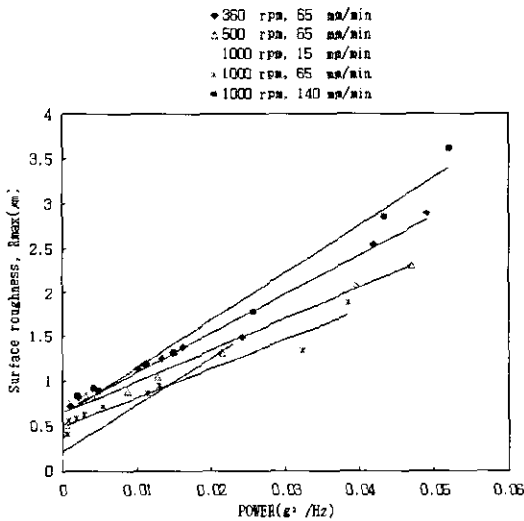


Fig. 5 Relations between power spectrum and surface roughness(R_{max}) in depth of cut

이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 가속도신호의 파워스펙트럼과 표면거칠기와의 사이에는 비교적 좋은 상관관계를 나타내고 있다. 즉 절삭조건에 따라 약간의 정도차이는 있으나, chatter발생에 따른 표면거칠기의 증가에 대응하여, 가속도신호의 파워스펙트럼은 거의 비례적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다.

이들 절삭실험의 결과에서 알 수 있는 바와 같이, 가속도신호의 파워스펙트럼과 표면거칠기에서 chatter발생 현상이 대체적으로 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5에서도 알 수 있듯이 가속도신호의 거동변화는 표면거칠기의 변화와 정성적으로 매우 일치하고 있으며, 이들 각 절삭조건에서 chatter진동 발생에 따른 공작물의 표면

품질 상태, 표면거칠기의 변화를 비교적 명확히 반영하고 있다. 또한, chatter진동이 발생하는 절삭깊이에 있어서도, 본 연구에서 chatter진동의 발생을 객관적으로 판정하기 위하여 사용한 표면거칠기의 측정결과와 매우 일치하고 있다. 따라서, 본 연구에서 절삭저항의 대표값으로 채용한 가속도신호의 파워스펙트럼은 chatter진동의 검출 및 그 발생점 판정에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 밀링 공정시 발생하는 chatter진동의 진단을 위하여 절삭깊이, 가속도신호의 파워스펙트럼 및 절삭 후 측정된 표면거칠기 사이의 상관관계로부터 chatter진동의 검출 및 그 발생점 판정을 위한 파워스펙트럼의 이용 가능성을 실험을 통하여 검토하였고, 이에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 파워스펙트럼의 값은 절삭깊이가 증가함에 따라 약 430Hz 주파수 영역에서 급격히 증가하는 경향이 있는데, 이곳이 chatter의 발생 판별을 가장 잘 반영하는 영역임을 말해준다. 또한, 스피들의 회전 속도가 클수록 작으며, 테이블의 이송속도가 클수록 크게 나타났다.
- (2) 표면거칠기의 값은 절삭깊이가 증가함에 따라 chatter가 발생하면서 급격히 증가하고, 절삭속도가 증가함에 따라 작아지는 경향을 나타낸다.
- (3) 파워스펙트럼과 표면거칠기에서 chatter 발생 현상은 절삭 조건에 따라 약간의 차이는 있으나 대체적으로 잘 일치하고 있으며, 이들 사이에는 비례적인 상관관계가 있다.
- (4) 가공시 절삭저항의 발생에 따른 가속도신호를 적절하게 신호처리 하여 이용한 파워스펙트럼은 chatter진동 발생의 전후 상황을 명확히 반영하고 있으므로 chatter진동의 검출에 유용한 정보로 이용될 수 있으리라 사료된다.

참고 문헌

- (1) J. S. Kim and M. C. Kang, "A Modeling of Dynamic Cutting Force and Analysis of Stability in Chatter Vibration", Journal of KSPE, Vol. 10, No. 2, 1993.

- (2) 정의식, 고준빈, 김기수, "신경회로망을 이용한 엔드밀 공정에서의 chatter검지", 한국정밀공학회지, 제12권, 제10호, pp. 149~156, 1995.
- (3) J. K. Lee, "Experimental Analysis of Chatter Vibration and Acoustic Emission of Cutting Tool", Journal of KSPE, Vol. 12, No. 1, 1995.
- (4) 김윤석, "절삭가공에서의 절삭음을 이용한 chatter 발생점 인프로세스 검출에 관한 연구", 충남대학교 대학원 석사학위논문, 1992.
- (5) 안상욱, "Vertical Milling에서 가공조건이 표면 조도에 미치는 영향", 인하대학교 산업과학기술연구소 논문집, 제10편, pp. 13~17, 1982.
- (6) 구연욱, 정의식, 남궁석, "선삭가공에 있어서 chatter진동의 인프로세스 검출에 관한 연구(I)", 한국정밀공학회지, 제9권, 제3호, pp. 73~81, 1991.
- (7) 구연욱, 정의식, 남궁석, "선삭가공에 있어서 chatter진동의 인프로세스 검출에 관한 연구(II)", 한국정밀공학회지, 제9권, 제3호, pp. 117~121, 1992
- (8) 이용성, 절삭 및 연삭이론, 동명사, pp. 145~165, 1990.
- (9) Y. S. Tarng, T. C. Li and M. C. Chen, "On-line Drilling Chatter Recognition and Avoidance using An ART2-A Neural Network", Int. Journal of Machine Tools Manufacture, Vol. 34, No. 7, pp. 949~957 1994.
- (10) B&K, "Frequency Analysis", Multichannel Analysis System Type 3550, Vol.1, pp. 1~17, 1996.
- (11) W. T. Thomson, Theory of Vibration with Applications, Prentice Hall, New Jersey, 1990.
- (12) 강명창, "chatter진동의 안정성 평가 및 감지에 관한 연구", 부산대학교대학원 정밀기계공학과 석사학위논문, 1995.
- (13) 윤재웅, "절삭력을 이용한 chatter의 감지에 관한 연구", 한국공작기계학회지, 제9권, 제3호, pp. 150~159, 2000.