

음압을 이용한 선삭작업에서의 채터 감시 및 제어

Monitoring and Control of Turning Chatter using Sound Pressure

이성일*, 정성중

한양대학교 공과대학 기계설계학과, 생산시스템 및 제어 실험실

S.I. Lee*, S.C. Chung

MANufacturing Systems & Control Laboratory

HANYANG UNIVERSITY

Abstract : In order to detect and suppress chatter in turning processes, a stability control methodology was studied through manipulation of spindle speeds regarding to chatter frequencies. The chatter frequency was identified by monitoring and signal processing of sound pressure during turning on a lathe. The stability control methodology can select stable spindle speeds without knowing a prior knowledge of machine compliances and cutting dynamics. Reliability of the developed stability control methodology was verified through turning experiments on an engine lathe. Experimental results show that a microphone is an excellent sensor for chatter detection and control.

1. 서론

절삭가공에서 공구와 공작물사이의 상대진동으로 야기되는 채터는 공작물의 표면조도를 나쁘게 하며, 공작기계 베어링의 수명을 단축시키고 공구를 쉽게 마멸, 파손시키는 등 생산성에 영향을 미친다. 따라서 이를 감시하고 억제할 수 있는 진단과 제어법이 필요하다. 특히 선삭작업에서는 공작물 컴플라이언스의 영향을 많이 받기 때문에 가늘고 긴 봉이나 강성이 낮은 재료를 쓸

경우에는 공작기계보다도 공작물 자체가 채터발생의 원인이 될 수가 있다. 따라서 방진구나 보조 방진기구들을 이용하기도 한다. 그러나 가공공정이 자동화됨에 따라 이러한 채터의 발생을 수작업에 의존하지 않고 지능화된 NC에 의해 제어하여 생산성을 높이는 방법이 강구되어야 할 것이다.

채터의 예측과 제어에 대한 연구는 크게 두 가지로 구분될 수 있다. 첫째, 가정된 동역학적 모델에서 채터의 안정도 곡선 (Stability Chart)을 구하여 절삭조건을 선정하는 방법^[1,2]과 둘째, 온라인 상에서 채터신호를 채취하여 전달함수로 근사화(Curve fitting) 시키는 DDS(Dynamic Data System)방법^[3,4]으로 구분될 수 있다. 전자는 Tobias, Tlusty 등에 의해 연구되어 왔으며 후자는 Eman, Wu 등에 의해 이루어졌다.

본 논문에서는 Smith와 Tlusty가 밀링가공에서 제시한 음압을 이용한 채터 측정방법^[5]을 사용하여 선삭가공에서 안정도 곡선이나 공작기계의 동특성에 대한 지식 없이도 채터를 제어할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 범용선반에 음압을 이용한 채터측정시스템을 구성하였고 스피들의 회전수 변경을 통한 안정도 제어법을 개발하였으며, 실험을 통해 채터판별의 우수성과 안정도제어법을 이용한 채터제어효과를 입증하였다.

2. 선반작업에서의 안정도 제어법

채터의 모델링은 주로 공작기계와 절삭과정에서 일어나는 힘의 전달과정이 피드백되어 나타나는 폐루프로 이루어진다.^[6] 이 때 가공조건에 따른 공구와 공작물간의 착탈현상을 고려하느냐에 의해 선형 채터와 비선형 채터로 모델링 된다.^[2] 선형 채터시 안정한 절삭을 위한 한계절삭폭은

$$b_{lim} = \frac{-1}{2k_{cb}Re(G(j\omega))} \quad (1)$$

$Re(G(j\omega))$: 공작기계 전달함수의 실수 부분

k_{cb} : 공작물의 비절삭강성

b_{lim} : 한계절삭폭

로 주어지며, 이 한계를 넘어서면 채터진동이 유발된다. 선삭에서 채터발생 스피indle속도^[2]를 구하면

$$n = \frac{f}{(N + \frac{\epsilon}{2\pi})} \quad (2)$$

f : 채터 진동수 (Hz)

n : 스피indle 속도 (rpm)

N : 스피indle 1회전 동안의 채터진동 주기수

ϵ : 절삭날의 이전 절삭경로와 현재 경로간의 위상차

이 된다. Nyquist 안정도 조건^[2]으로부터 $\epsilon=0$ 인 경우 안정한 절삭이 이루어지므로 안정한 절삭이 이루어지는 스피indle 속도 n_s (rpm)는

$$n_s = \frac{60f}{N}, \quad N=1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

f : 채터진동수(Hz)

이 된다. 즉, 채터의 진동수가 판명되면 식 (3)으로부터 채터를 제어할 수 있는 안정한 스피indle 속도가 구해진다.

3. 음압을 이용한 채터 판별 실험

Fig.1은 채터의 판별과 제어 실험을 위한 장치의 개략도이다. 본 연구에 사용된 실험장치의 사양은 Table 1과 같다. 절삭실험은 범용선반을

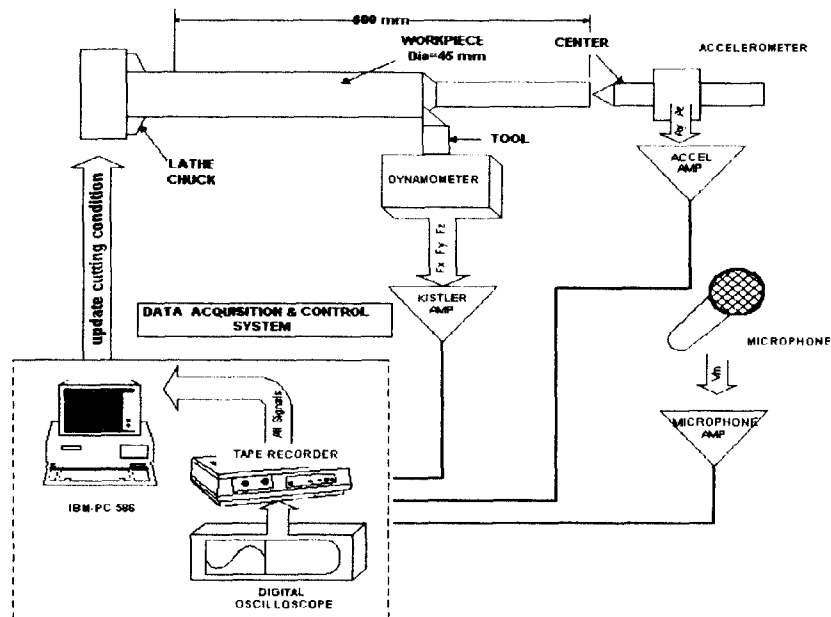


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup for monitoring and control of turning chatter

이용하였고 공작물은 채터가 쉽게 일어날 수 있도록 긴 환봉모양을 선택하였다. 이송테이블 위에 공구동력계와 공구를 장착하고 가속도계는 선반의 심압대 위에 부착하였다. 마이크로폰은 공구에서 2m 떨어진 곳에 집음장치와 함께 설치하였다. X, Y, Z 축에서 측정된 절삭력과 Y, Z축 가속도 신호, 음압신호를 디지털 오실로스코프로 감시하면서 전하증폭기(Charge Amplifier), 테이프 레코더, A/D변환기를 통하여 PC에 저장하였다. 데이터는 12kHz로 샘플하였다. 절삭조건은 Table 2 와 같다.

Table 1. Specification of experimental setup

Turning Machine	화천기계공업(주) 380B
Workpiece	SM45C (dia.45 × length900)
Insert	대한중석 CNMG120404 KT300
Tool holder	대한중석 PCLNR2020K12 절입각 95°, 날끝각 8° 주경사각 -6°
Tool Dynamometer	KISTLER 9257B
Accelerometer	PCB 303A03, 342A
Microphone	ACC-M8
Personal Computer	IBM-PC 486
Charge Amplifier	KISTLER 5019A (3-channel)
Tape Recorder	TEAC RD-135T

Table 2. Cutting conditions

Spindle speed	900 (rpm)
Feed	0.18 (mm/rev)
Depth of cut	0.4 (mm)

Fig.2는 선반의 고유진동수를 주파수 응답 실험을 통해 얻은 결과를 보여 준다. 202Hz에서 고유진동수를 가지고 있음을 볼 수 있다. Fig.3과 Fig.4에 절삭시 음압과 절삭력 신호의 시간에 따른 spectrum을 도시하였으며 절삭이 진행되어 감에 따라 채터가 진화해 가는 과정을 볼 수 있다. Fig.3의 음압신호와 공구동력계로부터 얻어진 Fig.4의 배분력신호가 유사함을 볼 수 있으며 이로부터 음압신호가 3분력 중 배분력(Fig.5 참조)에 밀접한 영향을 받는 것으로 판단할 수 있다. 절삭개시 후 1초 뒤부터 채터가 시작된 것을 볼 수 있으며 채터 진동수는 채터가 심화될수록 공

작기계의 고유진동수보다 약간 높게 접근해 가는 것을 볼 수 있다.

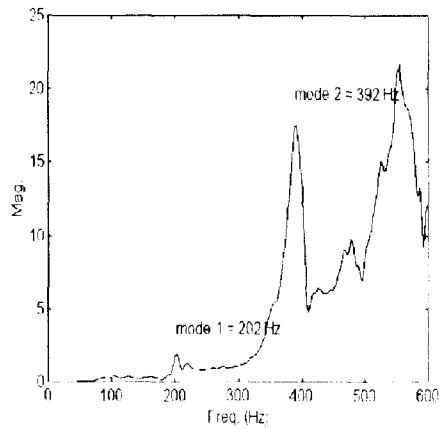


Fig. 2 Frequency response of Hwacheon 380B Lathe. (Inertance)

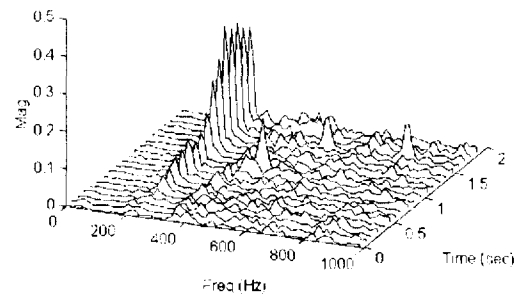


Fig. 3 Spectrum of sound pressure signal

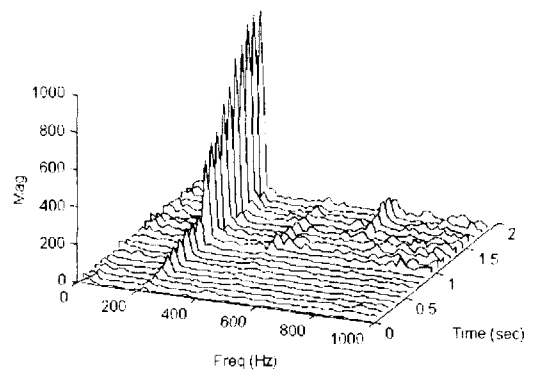


Fig. 4 Spectrum of force signal (Y-axis)

Fig.5는 12kHz 샘플링으로 A/D처리된 공구동력계의 신호들을 시간과 주파수영역에서 나타낸 것이다. 절삭력의 크기는 주분력(Z축), 이송분력

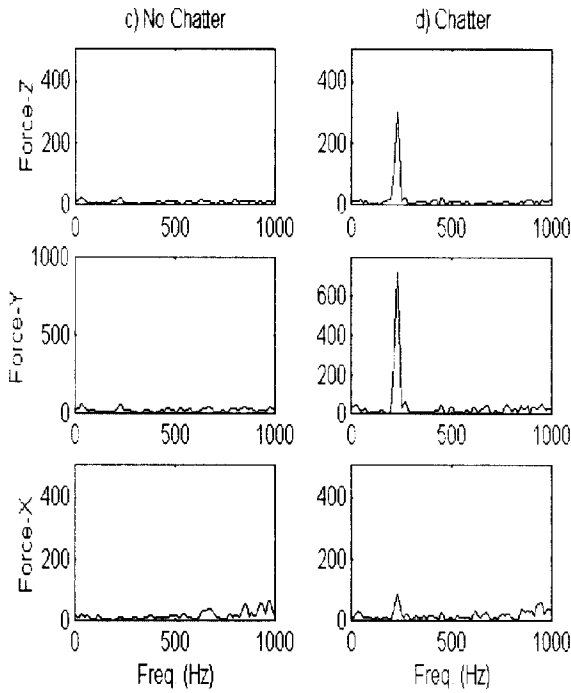
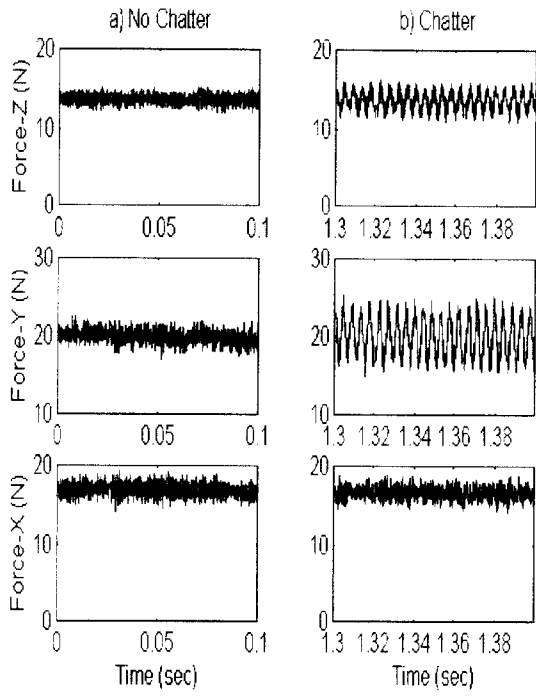


Fig. 5 Force signal from dynamometer.
 (a),(b)time domain records; (c),(d) freq. domain records; chatter and no chatter cases (feedrate = 0.18mm/rev, spindle speed = 900rpm,depth of cut = 0.4mm, work material : SM45C)

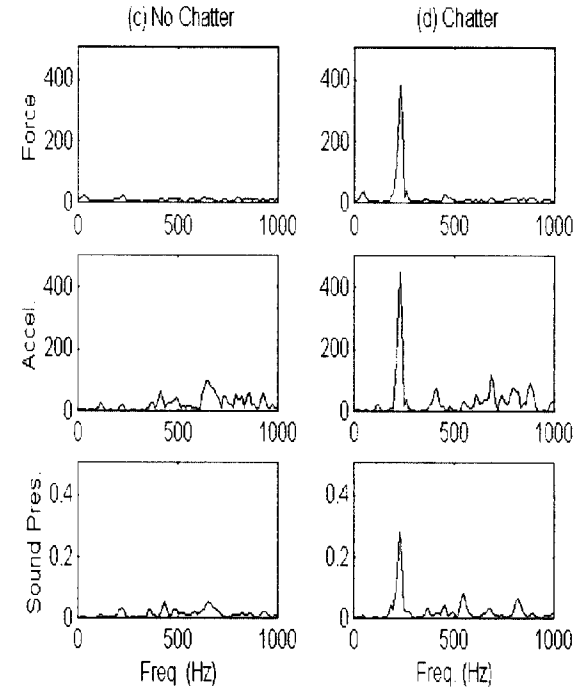
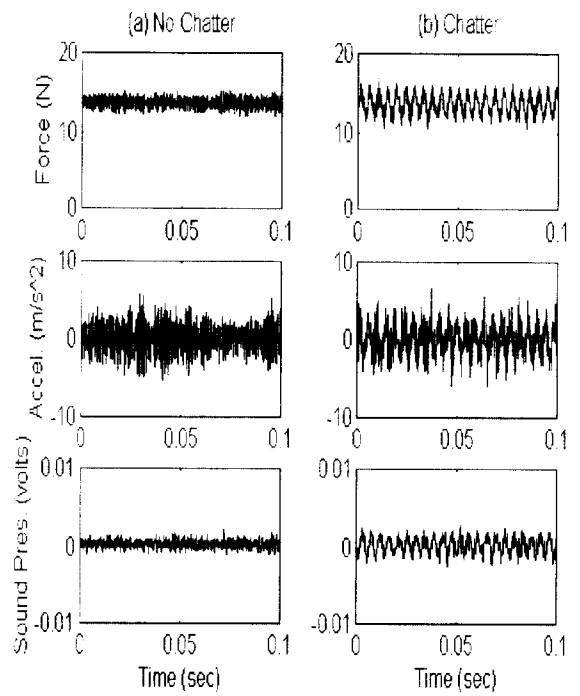


Fig. 6 Signal comparisons for different sensors;
 chatter and no chatter cases
 (a),(b)time domain records; (c),(d) freq. domain records. (feedrate = 0.18mm/rev, spindle speed = 900rpm, depth of cut = 0.4mm, work material : SM45C)

(X축), 배분력(Y축)의 순으로 커지며 이는 작은 절삭깊이에 비해 상대적으로 빠른 이송속도, 공구의 모양, 진동 모우드의 방향 등에 영향을 받기 때문이다. 3분력 중 크기가 가장 큰 배분력(Y축)의 신호가 채터의 특징을 가장 잘 나타내고 있다. 채터가 발생되지 않았을 때는 시간영역의 진폭이 미약하고 주파수 영역에서도 채터진동수가 거의 보이지 않는다.

Fig.6은 절삭력, 가속도, 음압의 신호를 비교한 것이다. 절삭력의 신호와 음압신호가 매우 유사한 것을 볼 수 있으며 가속도계는 S/N비가 낮아 잡음이 많이 실린 것을 볼 수 있다. 마이크로폰의 주파수 대역폭이 공구동력계보다 크고 설치 또한 간편한 것을 감안할 때 방음장치와 필터링을 더욱 보완한다면 마이크로폰이 채터판별의 센서로서 우수하게 적용될 수 있음을 알 수 있다.

4. 선반에서의 채터 제어 실험

본 실험의 절삭조건을 Table 3에 표기하였다. 장치사양은 Table 1과 같다. Fig.7 a), b)는 심압대로부터 180mm 떨어진 곳에서 초기 스핀들 속도 370rpm, 이송속도 0.18mm/rev으로 가공했을 때의 음압신호이다. 시간영역에서의 채터 진폭이 크게

Table 3. Cutting conditions

RPM	Feedrate (mm/rev)	Depth of cut (mm)	MRR (mm ³ /min)	N
370	0.18	0.4	26.64	36,37사이
440	0.18	0.4	31.68	≈ 31
620	0.18	0.4	44.64	≈ 22

증가하고 채터진동수 228Hz에서 spectrum의 최대 값이 나타나는 것으로 보아 채터가 발생함을 알 수 있다. 채터를 제어하기 위한 안정회전수를 식 (4)에서 구하면 N=1, 2, 3...에 해당되는 13680rpm, 6840rpm, 4560rpm...등이 구해진다. 그러나 범용 선반의 회전수 범위가 한정되어 있으므로 최대 1800rpm미만에서 회전수를 선정하였으며 안정회전수도 근사치에서 선정하였다. Fig.7의 c), d)는 식 (4)에 의해 안정회전수 $n_s=440\text{rpm}$ (N=31)으로 제어했을 때의 음압신호이다. 채터가 나타나지

않고 있다. Fig.7의 e), f)는 안정회전수 $n_s=620\text{rpm}$ (N=22)으로 제어했을 때의 음압신호이다. 시간과 주파수 영역에서 채터 특성이 보이지 않으며 안정한 절삭이 이루어지고 있다. 안정도제어법을 적용한 결과 MRR(Metal Removal Rate)이 증가한 상태에서도 채터 없이 안정한 절삭을 수행할 수 있음을 확인하였다. (Table 3 참조)

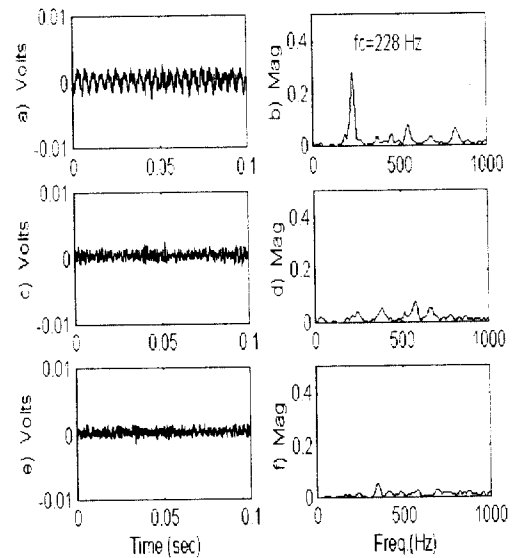


Fig. 7 Sound pressure signals and spectrums (feedrate=0.18mm/rev, depth of cut=0.425mm, spindle speed : 370, 440, 620 rpm)

5. 결론

범용선반에서의 선삭가공에서 채터신호를 음압으로 검출하여 그 판별과 제어법을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 음압신호는 가속도 및 절삭력 신호에 비해 장치비용이 저렴하고, 설치가 간단하며, S/N비도 우수하여 채터 검출능력이 우수하였다. 공구동력계와 가속도계에 비하여 음압신호가 채터감시와 제어에 유용하게 쓰일 수 있음을 입증하였다.
- 공작기계 동특성의 사전지식이 없이도 스핀들 속도 제어를 이용한 안정도 제어법의 채터 억제 효과의 우수성을 선삭실험을 통해 증명하였다.

3. 안정도제어법을 이용함으로써 chatter발생을 피하면서 생산성을 높일 수 있었다.

참고문헌

[1] S.A.Tobias, Machine Tool Vibration , John wiley & Sons, Inc 1965.

[2] J.Tlusty, Machine Dynamics ,Handbook of High-Speed Machining Technology , Chapman and Hall,1985.

[3] Eman, Machine Tool System Identification And Forecasting Control Of Chatter, Ph.D Thesis, Univ. of Wisconsin-madison, 1979.

[4] S.M.Wu and Pandit, Time Series and System Analysis with Application , John wiley & Sons. Inc 1983.

[5] S.Smith, " Use of Audio Signals for Chatter Detection and Control ", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.114, pp.146-157, 1992.

[6] M.Weck, K.Teipel, 절삭공작기계의 동특성, 대광문화사, 1985.