論文 한국공작기계기술학회지 제 6 권 제 4 호 1997. 12.
Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers

음압신호와 안정도제어법을 이용한 선삭작업에서의 채터 감시 및 제어

이성일*, 정성종**

Monitoring and Control of Turning Chatter using Sound Pressure and Stability Control Methodology

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

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.

Keywords : Chatter(채터), Monitoring(감시), Sound pressure(음압), Cutting dynamics(절삭동역학), Signal processing(신호처리), Stability control methodology(안정도 제어법)

1. 서 론

절삭가공에서 공구와 공작물 사이의 상대진동으로 야기되는 채터는 공작물의 표면조도를 나쁘게 하며, 공작기계 베어링의 수명을 단축시키고 공구를 쉽게 마멸, 파손시키는 등 공작정도와 생산성에 영향을 미친다. 따라서 이를 감시하고 억제할 수 있는 진단과 제어법이 필요하다. 특히 선삭작업에서는 공작물 및 공구 컴플라이언스 (Compliance)의 영향을 많이 받기 때문에 가늘고 긴 봉이나 강성이 낮은 재료를 쓸 경우에는 공작기계보다도 공작물 자체가 채터발생의 원인이 될 수 있다. 따라서 방진구 등을 이용하기도 한다. 그러나 가공공정이 자동화됨에 따라 이러한 채터의 발생을 수작업에 의존하지 않고 지능화된 NC에 의해 자동으로 제어함으로써 생산성을 높이는 방법

* 한양대, 기계설계학과 대학원
** 한양대, 기계공학부

이 강구되어야 할 것이다.

채터의 예측과 제어에 대한 연구는 크게 두가지로 구분될 수 있다. 첫째, 규명된 동역학적 모델에서 채터의 안정도곡선 (Stability chart)을 구하여 절삭조건을 선정하는 방법과 둘째, 온라인 (On-line) 상에서 채터신호를 채취하여 전달함수로 근사화 시키는 DDS(Dynamic Data System)방법으로 구분될 수 있다. 전자는 Tobias[1], Tlusty[2] 등에 의해 연구 되어졌으며, 후자는 Eman과 Wu[3,4,5] 등에 의해 이루어졌다.

채터 발생은 공작물 표면상의 채터무늬나 특유의 소음, 진동 그리고 절삭력의 변화 등으로 판별할 수 있다[3,6,7]. 기존 연구에서는 공구동력계와 가속도계, 변위계를 이용하여 절삭력과 진동변위의 변화에 초점을 두고 연구를 진행해 왔다. 그러나, 공구동력계를 이용할 경우, 작업방해는 물론 절삭계의 컴플라이언스에 영향을 미치며 공구동력계 자체의 대역폭 제한 때문에 채터평가에 오차의 여지가 있으나, 변위계나 가속도계는 대역폭의 문제는 줄어들지만 필터링 기술의 요구와 설치의 어려움, 복수개의 센서설치 등이 요구되므로 현장 적용이 어렵다[8,9,10]. 이에 비해 채터 진동의 음압신호는 주위 소음에 대한 분리기술이 보완된다면 절삭시 발생하는 공구와 공작물의 진동에 따라서 소음이 야기되므로 효과적으로 채터를 판별할 수 있는 적합한 신호라고 할 수 있다[6,7].

본 논문에서는 Tlusty가 밀링가공에서 제시한 음압을 이용한 채터 측정법[6]을 사용하여 선삭가공에서 안정도 곡선이나 공작기계의 동특성에 대한 사전 지식 없이도 채터를 감시하고 제어할 수 있는 방법에 대하여 연구하였다. 범용선반에 음압을 이용한 채터 측정시스템을 구성하였고, 공구동력계 및 가속도계와 신호처리를 통하여 비교함으로써 채터판별의 우수성을 입증하였다. 그리고 Nyquist 안정도 조건과 재생효과 (Regenerative effect)의 위상차를 조절하기 위한 스핀들 회전수 변경을 이용한 안정도 제어법을 개발하였으며, 실험을 통해 음압을 이용한 채터 판별의 우수성과 안정도 제어법을 이용한 채터제어 및 생산성 향상 효과를 입증하였다.

2. 선삭작업에서 재생채터

채터진동은 크게 재생효과에 의한 채터와 모우드커플링 (Mode coupling)에 의한 채터로 구분된다. 모우드커플링에 의한 채터는 스핀들속도에 관계 없이 일정 주파수에서만 발생되며 중복계수 μ가 0일 때 발생되는 경우에 해당되므로 나사절삭을 제외한 일반적인 선삭에서는 나타나지 않는다[2]. 따라서 본 논문에서는 재생채터만을 고려하였다.

재생채터는 Fig.1 과 같이 절삭속도가 V_0 인 경우 이전 절삭날의 궤적과 현재 절삭날의 궤적이 위상차 ε을 가지고 가공될 때 나타난다. 이러한 공구와 공작물 사이의 상대진동은 공작물 표면에 채터무늬를 야기시켜 칩두께에 변화를 가져오는데 평균칩두께 s_m은 이송속도가 f_r (mm/rev)인 경우 다음과 같이 주어진다.

$$s_m = f_r \tag{1}$$

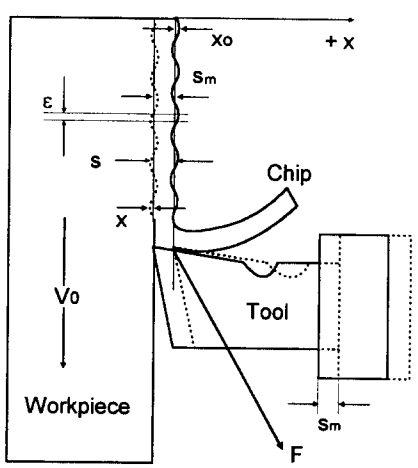

Fig1. Regenerative effect during turning operation

Fig.1 에서 이전 절삭궤적 (Previous undulation) x_0 와 현재의 절삭궤적 (Current undulation) x와의 차이를 변동칩두께 s_v로 정의하면 칩두께 s는

$$s = s_m - x + \mu x_0 = s_m + s_v \tag{2}$$

여기서, μ : 중복계수 ($0 < \mu \leq 1$)

s_m : 평균칩두께

s_v : 변동칩두께

이다. 칩두께의 변화로 인한 절삭력 F는 칩두께 s와 칩폭 (Chip width) b의 곱에 비례한다고 가정하면

$$F = k_{cb} bs = F_m + F_v \qquad (3)$$

여기서, k_{cb} : 절삭강성(N/mm^2)

$F_m = k_{cb} bs_m$: 평균절삭력

$F_v = k_{cb} bs_v$: 변동절삭력

이다. 이와같은 재생채터의 과정은 Fig.2 와 같은 폐루프로 나타낼 수 있다. 변동절삭력 F_v가 공작기계를 가진하면 구조물의 전달함수 G_m를 거쳐 공구와 공작물의 상대변위 x가 발생한다. 이 상대변위가 위상차 T시간 (T : 공작물 회전주기) 이전의 x_0와 중복정도를 나타내는 중복계수 μ

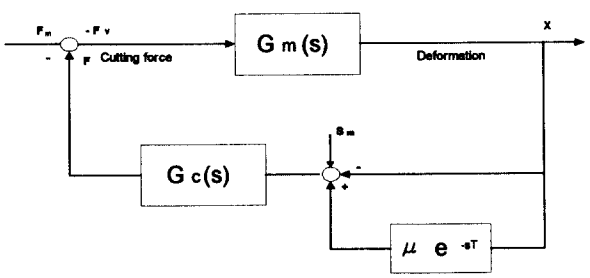

Fig.2 Block diagram of turning process

를 지나 평균칩두께와 더해져서 변동칩두께를 형성하고, 이 칩두께가 절삭강성 G_c를 거쳐 평균절삭력에 대한 변동절삭력을 재생성하게 된다.

3. 안정도 제어법

절삭가공의 고강력화, 고생산화 추세에 따라 고속의 이송속도와 회전속도 그리고 절삭깊이의 증가가 요구된다. 고속 강력가공시 절삭력이 증가하게 되며, 공작기계의 구조강성 (Structural stiffness)이 충분치 못할 경우 채터가 야기되므로 절삭계수 변경을 통한 채터 억제방법이 요구된다.

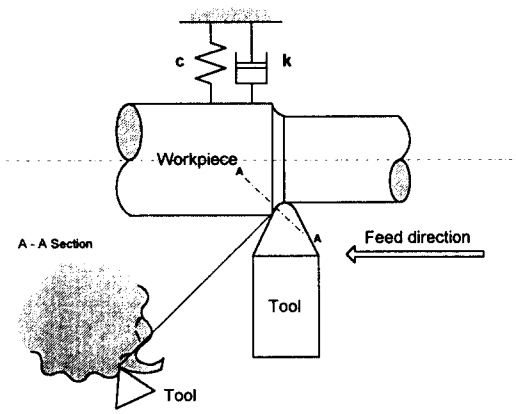

Fig.3 Chatter vibration model during turning operation

Fig.3 은 일반적인 선반작업에서의 공구와 공작물간의 기하관계를 나타낸 것이다. 이송방향 절삭면에 대하여 중복절삭이 일어나므로 식 (2)에서 중복계수 $\mu = 1$ 로 가정할 수 있다. 이러한 가정하에 Fig.2 에 제시한 채터루프의 게인을 구하면

$$gain = G_m(s)\, G_c(s)\, (1 - e^{-sT}) \qquad (4)$$

이 되고, Nyquist 안정도 조건은 식 (5)와 같이 된다.

$$| Re\{ G_m(s) G_c(s) (1 - e^{-sT}) | s = j\omega \} | < 1 \qquad (5)$$

단, $Im\{ G_m(s) G_c(s) (1 - e^{-sT}) | s = j\omega \} = 0$

여기서, $G_c = k_{cb} b$ 이다.

Fig.1 과 같은 선삭작업에서 채터는 이전 절삭궤적과 현 절삭궤적간의 위상차 ε 의 존재로 발생하고 ε 은 시간지연 T와 채터진동수 ω의 곱으로 나타낼 수 있으므로 식 (5)는

$$| Re\{ G_m(j\omega) G_c(j\omega) (1 - e^{-j\varepsilon}) \} | < 1 \qquad (6)$$

과 같이 표현될 수 있다. 채터는 위상차 $\varepsilon \neq 0$ 인 상태에서 발생하고, $\varepsilon = 0$ 으로 접근할 때 식 (6)의 왼쪽항이 $G_m(j\omega)$과 $G_c(j\omega)$ 값에 관계없이 1보다 작게 되어 Nyquist 안정도를 만족하여 채터진동이 없는 안정한 절삭이 이루어지게 된다.

채터 발생시 채터진동수 f 와 공작물 상의 채터 무늬수 N, 그리고 위상차 ε 사이의 관계는 식 (7)과 같이 주어진다[2].

$$n = \frac{f}{(N+\frac{\varepsilon}{2\pi})} \tag{7}$$

여기서, f : 채터 진동수 (Hz)
n : 스핀들 속도 (rps)
N : 스핀들 1회전 동안의 채터진동 주기수
ε : 절삭날의 이전 절삭경로와 현재 경로간의 위상차

따라서 식 (6)으로부터 얻어진 안정도 조건 $\varepsilon = 0$ 을 선삭에서 채터발생 스핀들속도 식 (7) 에 대입하면 안정절삭속도의 범위가 구해진다. 즉, 안정한 스핀들 속도 n_s(rpm)는 절삭공정 중 채터진동수 f (Hz)가 규명된 경우

$$n_s = \frac{60\,f}{N}, \quad N=1,\ 2,\ 3,\ \ldots. \tag{8}$$

가 된다.

4. 음압을 이용한 채터 판별실험

4.1 실험장치

Fig.4 는 채터의 판별과 제어실험을 위한 장치의 개략도이고, Table 1 은 실험장치의 사양이다.절삭실험은 범용선반을 이용하였고, 공작물은 채터가 쉽게 일어날 수 있도록 SM45C 재질의 긴 환봉(dia.45×length900) 을 선택하였다. 이송테이블 위에 공구동력계와 공구를 장착하고 가속도계는 선반의 심압대 위에 부착하였다. 마이크로폰은 공구에서 50cm 떨어진 곳에 설치하였다. X, Y, Z 축에서 측정된 절삭력과 Y, Z축 가속도 신호, 음압신호를 디지털 오실로스코프로 감시 하면서 전하증폭기(Charge Amplifier), 테이프 레코더, A/D변환기를 통하여 PC에 저장하였다. 데이터는 12kHz로 샘플하였다. 절삭조건은 Table 2와 같고, Fig.5 는 실험장치를 보인 것이다. Fig.6 은 채터가 발생되었을 때 공작물 표면을 보인 것이다.

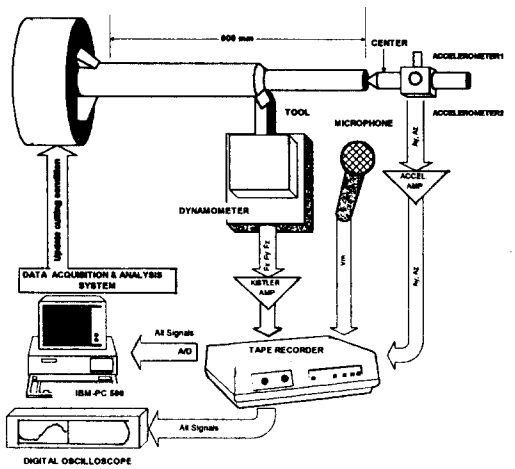

Fig.4 Schematic diagram of the experimental setup for monitoring and control of turning chatter

Table 1 Specification of experimental setup

Turning Machine	Hwacheon.co. 380B
Workpiece	SM45C(dia.45×length900)
Insert	Korea Tungsten CNMG120404, KT300
Tool holder	Korea Tungsten PCLNR2020K12

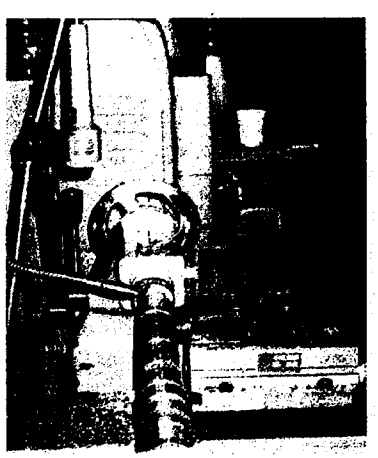

Fig.5 Overall view of experimental setup

Table 2 Cutting conditions

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

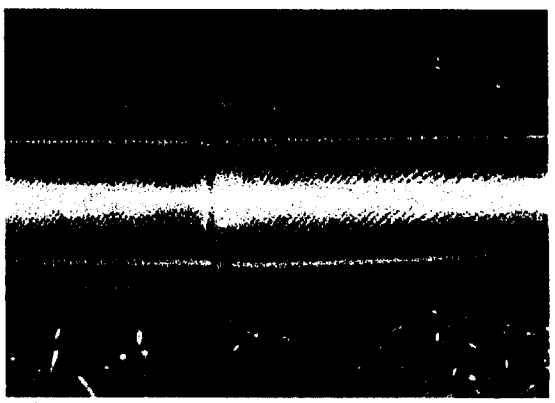

Fig.6 Lathed workpiece with chatter mark

4.2 채터 판별실험

Fig.7 은 12kHz 샘플링으로 A/D처리된 공구동력계의 신호들을 시간 (Fig. 7 중 a), b)) 과 주파수영역 (Fig. 7 중 c), d)) 에서 나타낸 것이다. 절삭력의 크기는 주분력(Z축), 이송분력(X축), 배분력(Y축)의 순으로 커지며 이는 작은 절삭깊이에 비해 상대적으로 빠른 이송속도, 공구의 모양, 진동 모우드의 방향 등에 영향을 받기 때문이다. 채터가 발생되지 않았을 때는 시간영역의 진폭이 미약하며, 주파수 영역에서도 채터진동수에서의 스펙트럼의 크기 변화가 보이지 않는다.

Fig.8 은 시간영역 (Fig. 8 중 a), b)) 과 주파수영역 (Fig. 8 중 c), d)) 에서 절삭력, 가속도, 음압의 신호를 비교한 것이다. 절삭력의 신호와 음압신호가 매우 유사한 것을 볼 수 있으며, 가속도계는 민감도가 크고 S/N비가 낮아 잡음이 많이 실린 것을 볼 수 있다. 마이크로폰의 주파수 대역폭이 공구동력계보다 크고 설치 또한 간편한 것을 감안할 때 음압신호가 채터판별의 신호로서 우수하게 적용될 수 있음을 알 수 있다.

Fig.9 에 심압대 근처에서부터 공작물 중앙으로 절삭을 진행해 감에 따라서 발생되는 절삭시 음압신호의 시간에 따른 스펙트럼 (Spectrum)을 도시하였다. 절삭이 진행되어 감에 따라 채터가 진화해 가는 과정을 볼 수 있다. 절삭개시 후 약 1.2sec 뒤부터 채터가 시작된 것을 볼 수 있으며, 채터진동수는 채터가 심화될수록 공작기계의 고유

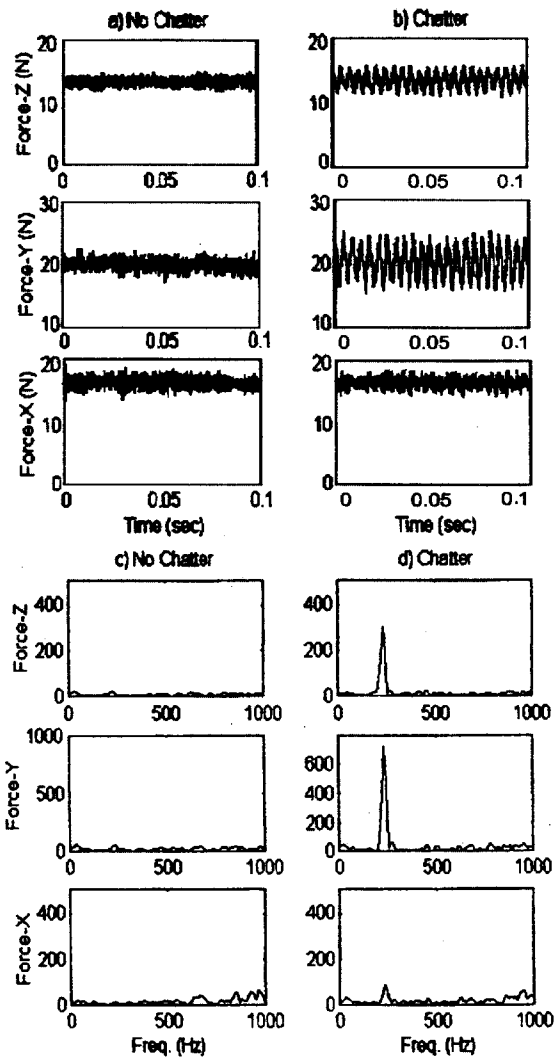

Fig.7 Comparisons of force signals in time and frequency domain

진동수 (정적상태에서 약 202Hz) 보다 약간 높은 228 Hz에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 채터 발생시에는 주파

수 영역에서 스펙트럼의 최고치가 두드러질 뿐만 아니라, 채터신호의 진폭이 크게 증가하므로 이를 채터판별에 이용할 수 있다. Fig.10 은 약 1.2sec에서 채터가 발생했을 때 음압신호의 표준편차이다. 채터가 발생하면 음압신호의 스펙트럼뿐만 아니라 표준편차가 크게 증가하게 됨을 알 수 있다.

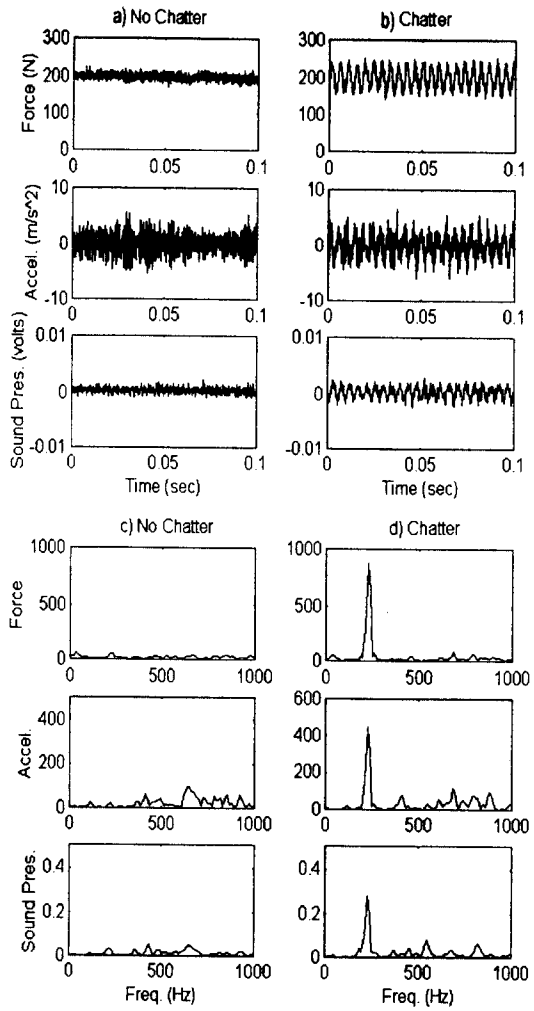

Fig 8 Signal Comparisons for different sensors in time and frequency domain

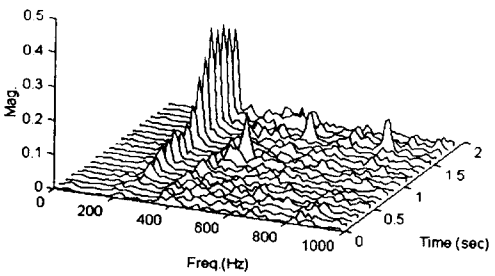

FIg9. Spectrum of sound pressure signal

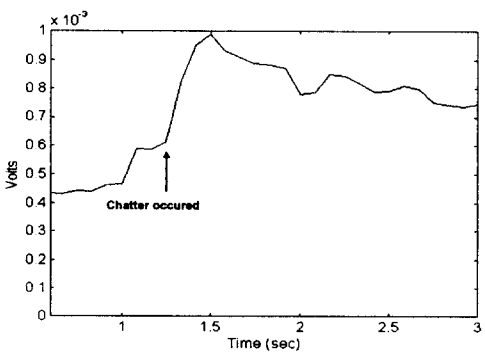

Fig.10 Standard deviation of the sound pressure signal

5. 선반에서의 채터 제어 실험

채터 제어실험의 절삭조건은 Table 3과 같다. Fig.11 a)는 공구에서부터 50cm 떨어진 곳에 마이크로폰을 설치하고, 초기 스핀들 속도 370rpm으로 가공했을 때의 음압신호를 보인 것이다. 시간영역에서의 채터진폭이 크게 증가하고, 채터진동수 228Hz에서 스펙트럼의 최대값이 나타나는 것으로 보아 채터가 발생함을 알 수 있다. 실험에서 인식된 채터진동수에 기초하여 채터를 제어하기 위한 안정회전수를 식 (8)에서 구하면 N=1, 2, 3...에 해당되는 스핀들속도 13680rpm ,6840rpm ,4560rpm...등이 구해진다. 그러나 범용선반의 회전수 범위가 한정되어 있으므로 허용 회전수는 최대 1800rpm미만에서 근사적으로 선정하였다. Fig.11 의 b)는 식 (8)에 의해 안정회전수 n_s=440rpm (N=31)으로 제어했을 때의 음압신호이다. 채터가 발생하지 않았다. Fig.11 의 c)는 안정회전수 n_s=620rpm (N=22)으로 제어했을 때의 음압신호

이다. 시간과 주파수 영역에서 채터 특성이 보이지 않으며 안정한 절삭이 이루어지고 있다. 3절에서 유도된 안정도 제어법을 적용한 결과 MRR(Metal Removal Rate)이 증가한 상태에서도 채터 없이 안정한 절삭을 수행할 수 있음을 확인하였다. (Table 3 참조)

Table 3 Cutting conditions

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

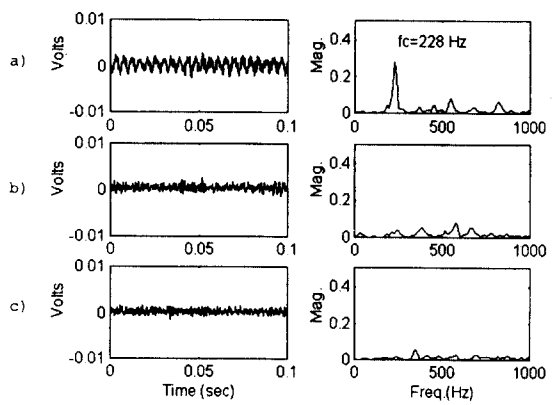

Fig.11 Sound pressure signals
(spindle speed : a) 370, b) 440, c) 620rpm)

6. 결 론

범용선반을 이용한 선삭가공에서 채터를 음압신호를 이용하여 검출하고, 채터발생을 판별하고, 스핀들속도 제어를 통한 채터 억제 제어법을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 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.
2. 채터 발생의 판별은 음압신호의 스펙트럼을 이용하여 채터 진동수에서 스펙트럼의 최고치의 증가나 음압신호 진폭의 표준편차 증가를 이용하여 판별할 수 있다.
3. 공작기계 동특성에 대한 사전지식이 없이도 스핀들속도 제어를 이용한 안정도 제어법의 채터 억제효과의 우수성을 선삭실험을 통해 증명하였다.
4. 안정도제어법을 이용함으로써 선삭 공정에서 채터발생을 피하면서 생산성을 높일 수 있었다.

참고문헌

1. Tobias, S. A., Machine Tool Vibration, John Wiley & Sons, Inc., 1965.
2. Tlusty, J., Handbook of High-Speed Machining Technology, Chapman and Hall, New York, Chapter 3, 1985.
3. Eman, K. F. and S.M. Wu, "A Feasibility Study of On-Line Identification of Chatter in Turning Operations", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.102, pp.315-321, 1980.
4. Eman, K. F. and S.M. Wu, "Forecasting Control of Machining Chatter", Computer Applications in Manufacturing Systems, Winter Annual Meeting of the ASME, pp.37-52, 1980.
5. Wu, S. M. and S.M.Pandit, Time Series and System Analysis with Application, John Wiley & Sons, Inc., 1983.
6. Delio, T., J.Tlusty and S.Smith, "Use of Audio Signals for Chatter Detection and Control", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.114, pp.146-157, 1992.
7. Trabelsi, H. and E.Kannatey-Asibu,Jr., "Tool Wear and Sound Radiation in Metal Cutting", Modeling of Machine Tools, Winter Annual Meeting of the ASME, pp.121-131, 1990.
8. Tlusty, J. and G.C.Andrews, "A Critical Review of Sensors for Unmanned Machining", Annals CIRP, Vol.32, No.2, pp.563-572, 1983.
9. Dornfeld, D. A., "In-Process Recognition of Cutting State", JSME International, Series C, Vol.37, No.4, pp.638-650, 1994.
10 이성일, 정성종, "음압을 이용한 선삭작업에서의 채터 감시 및 제어", '96년도 추계학술대회 논문집, 한국공작기계기술학회, pp. 85-90, 1996.