

# 음압을 이용한 선삭공정에서의 채터제어 및 공구 상태감시

이성일\* , 정성종\*\*

## Chatter Control and Tool Condition Monitoring of Turning Processes Using Sound Pressure

S.I. Lee\* and S.C. Chung\*\*

### ABSTRACT

In order to make unmanned machining systems with satisfactory performances, it is necessary to incorporate appropriate condition monitoring systems in the machining workstations to provide the required intelligence of the expert. This paper deals with condition monitoring for chatter, tool wear and breakage during turning operation. To develop economic sensing and identification methods for turning processes, sound pressure measurement and digital signal processing technique were proposed. We suppressed chatter by stability control methodology, which was studied through manipulation of spindle speeds regarding to chatter frequencies. It was shown that tool wear and fracture were identified and to be estimated by using the wear indices. The validity of the proposed system was confirmed through the large number of cutting tests.

**Key Words:** Chatter(채터), Chipping(칩핑), Condition Monitoring(상태감시), Signal Processing(신호처리), Sound Pressure(음압), Tool Life(공구수명), Wear Index(마모지수)

### 1. 서 론

선삭가공 중 발생하는 여러 이상상태 중 채터진동, 공구의 마멸과 파손 감시 (Monitoring) 는 고정밀 고속가공은 물론, 공장자동화 및 무인화에 있어서 매우 필요한 부분임에도 불구하고 온라인 (On-line) 감시가 어려운 부분이다. 이는 공구상태 및 가공시스템의 동적특성이 미소한 절삭조건의 변화에도 다양하면서도 불규칙적인 반응을 보일 뿐만 아니라, 칩 및 절삭유 등으로 인한 열악한 환경 속에서 작업되므로 센서의 장착과 적용이 어렵기 때

문이다.<sup>(1)</sup> 더욱이 최근의 절삭공정이 고속화, 고정도화 및 강력화가 요구됨에 따라 공구수명에 이르기 전에 예측지 못한 파손과 손상이 일어날 뿐 아니라 채터로 인한 공작물의 표면조도 저하 및 마멸율의 증가 등으로 경제성과 생산성에 영향을 미치므로 이에 대한 효과적인 감시 대책이 요구된다.

채터의 예측과 제어에 대한 연구는 크게 두가지로 구분될 수 있다. 첫째, 가정된 동역학적 모델에서 채터의 안정도 곡선(Stability Lobes)을 구하여 절삭조건을 선정하는 방법과 둘째, 온라인 상에서 채터신호를 검출하여 전

\* 한양대학교 기계설계학과 대학원

\*\* 한양대학교 기계공학부

달함수로 근사화시키는 DDS(Dynamic Data System) 방법으로 구분될 수 있다. 전자는 Tobias<sup>(2)</sup>, Tlusty<sup>(3)</sup> 등에 의해 연구되어졌으며, 후자는 Eman과 Wu<sup>(4)(5)</sup> 등에 의해 이루어졌다. 전자의 안정도 곡선을 이용하여 채터를 제거할 경우 절삭조건외의 미소한 변화에도 안정도 곡선을 다시 그려야 하며 동작기계와 절삭과정의 주파수 응답특성을 정확히 파악해야 하는 등의 어려움이 따른다.

가멸 및 공구파손에 관한 연구는 주로 적용되는 센서에 많은 비중을 두고 진행되어 왔다. Ulsoy<sup>(6)</sup>, Koren<sup>(7)</sup> 등은 절삭력을 이용한 마멸의 모델링을 통해 마멸을 예측하였으며, Dornfeld<sup>(8)</sup>, Moriwaki<sup>(9)</sup> 등은 AE 센서를 이용한 공구파손의 연구 결과가 있었다. 그리고 Altintas<sup>(10)</sup>는 이송계 전류를 측정하여 절삭력을 예측하고 이로써 공구파손신호를 검출하고자 했다. 이 외에도 비전센서<sup>(11)</sup>에 의한 마멸길이의 측정 등이 있다.

이러한 이상 절삭상태 감시를 위한 연구들은 한정된 절삭상태와 환경에 대한 우수한 연구결과에도 불구하고 각기 적용된 센서의 한계로 인하여 다양한 생산현장에 적용될 수 있는 경제성 있는 기술개발이 늦추어 지고 있는 상황이다<sup>(1)</sup>. 또한 단일센서로서 다중의 상태감시에 이용될 경우 설치조건, 비용, 주파수 대역폭, S/N 비, 신호처리 등의 한계점이 문제되고 있으며 모든 상황에 부합되기 어렵다. 이러한 이유로 최근에는 복수개의 센서들을 이용하여 복합적인 예측과 판단 알고리즘을 고안하고 있는 추세이다.<sup>(12)</sup>

본 논문에서는 상태감시 센서로서 마이크로폰의 우수성을 확인하고, 무인가공에서 전문가를 대신할 수 있는 신뢰성 있는 채터, 공구마멸, 미소파손(Chipping) 그리고 파손 감시장치를 연구하였으며, 경제적이며 효율적인 감시시스템에 대하여 연구하였다. 음압을 이용한 채터, 공구마멸 및 파손 감시 실험장치를 범용선반에 설치하고, 공구동력계 및 가속도계 신호와 비교를 통해 음압을 이용한 채터판별과 공구마멸 및 파손 예측의 우수성을 증명하였다. 그리고 Nyquist 안정도 조건과 재생효과의 위상차 조건을 위한 스핀들 회전수 변경을 이용한 안정도 제어법을 개발하였으며, 동작기계 동특성에 대한 사전지식 없이도 실험으로써 채터를 감시하고 제어할 수 있음을 증명하였다. 또한 음압신호의 신호처리 기법을 이용한 처리를 통해 마멸기준을 세울 수 있는 차원 무차원 특징인자를 추출하여 공구의 수명한계 제시와 아울러 마멸과 파손에 측의 적용가능성을 제시하였다.

## 2. 음압을 이용한 채터의 안정도 제어법

채터의 모델링은 절삭과정에서 일어나는 변동 절삭력이 동작기계를 가진하여 다시 절삭과정에 피드백되는 폐루프로 이루어진다.<sup>(2),(3)</sup> 이 폐루프 시스템이 한계절삭속을 초과하여 절삭강성이 동작기계 구조강성보다 기준치 이상으로 증가하면 채터의 폐루프에 불안정성이 야기되어 채터가 발생한다. 이 때 채터 특유의 진동음이 발생한다. 이 채터진동의 주파수와 스핀들 속도와의 관계를<sup>(3)</sup> 구하면

$$n = \frac{f}{\left(N + \frac{\epsilon}{2\pi}\right)} \quad (1)$$

여기서,  $f$ : 채터 진동수 (Hz)

$n$ : 스핀들 속도 (rpm)

$N$ : 스핀들 1회전 동안의 채터진동 주기수

$\epsilon$ : 절삭날의 이전 절삭경로와 현재 경로간의 위상차가 된다. Nyquist 안정도 조건<sup>(3)</sup>으로부터  $\epsilon = 0$ 인 경우 안정한 절삭이 이루어지므로 안정한 절삭이 이루어지는 스핀들 속도  $n_s$ (rpm)는

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

여기서,  $f$ : 채터진동수(Hz)

가 된다. 즉, 음압신호로부터 채터의 진동수가 판명되면 식 (2)으로부터 채터를 제어할 수 있는 안정한 스핀들 속도가 구해진다.

## 3. 음압신호와 마멸지수

### 3.1 마멸지수

마멸이 발생할 때의 이상진동은 공작물, 공구, 동작기계 구조부를 진동시키고 이 때 발생하는 소음은 공기중으로 전달되어 음압의 변화로 나타난다. 공구마멸이 발생될 때는 주로 공구와 구조물의 진동이 주요원인이 되므로, 이로 인해 발생하는 소음의 특징을 추출하기 위해서는 마멸지수(Wear Index)의 정의가 필요하다. Fig.1은 선삭작업에서 절삭이 이루어지는 횡수에 따라서 발생하는 Flank마멸량을 보인 것이다. 초기와 최종상태에서 급격한 Flank마멸이 일어나며 이로 인한 공구기하의 변화는 마멸지수에 영향을 주게된다.

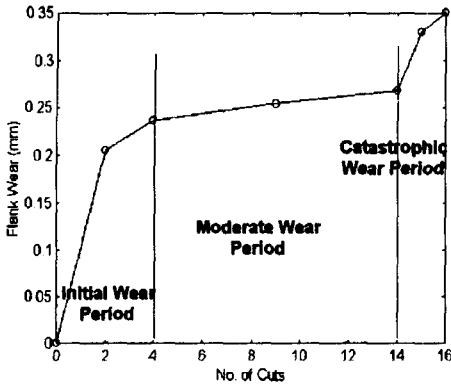


Fig.1 Flank wear and wear mode

음압의 마멸량에 따른 변화를 관찰하고 그에 따른 마멸 지수를 규명하기 위해 소음 에너지양의 척도로서 다음과 같은 음압의 실효치를 정의하였다.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3)$$

여기서,  $x_i$ :  $i$ 번째 음압신호,  $N$ :데이터 수

절삭소음은 그 평균치가 증가함에 따라 표준편차가 증가하는 경향이 있으므로 평균치에 따른 표준편차의 변동값으로 다음과 같은 무차원 변동계수(Coefficient of Variation, CV)를 정의하였다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (5)$$

여기서,  $\sigma$ : 표준편차,  $\bar{x}$ : 평균치

절삭소음 중에는 미소파손이나 공구파손 등으로 인한 충격파가 실려 있으므로 신호의 평균치를 중심으로 한 왜곡성을 나타내는 무차원의 비대칭분포 (Skewness)와 첨예성을 나타내는 도수분포의 첨도 (Kurtosis)를 각각 정의하였다.

$$\beta_1 = \frac{\mu^3}{\sigma^3} \quad (6)$$

$$\beta_2 = \frac{\mu^4}{\sigma^4} \quad (7)$$

$$\mu^k = \frac{1}{(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^k \quad (8)$$

여기서,  $\beta_1$ : Skewness,  $\beta_2$ : Kurtosis

$\mu^k$ :  $k$ -th moment

절삭소음은 백색잡음이 입력으로 작용할 때 발생하는 출력으로 가정할 수 있으며, 이는 자동회귀모형 (Autoregressive model : AR model)으로 모델링 된다.<sup>(5),(10)</sup> 마멸의 진전에 따라서 특정한 AR계수에 변화가 야기되며, 이를 이용하면 소음신호의 모델링을 통한 마멸을 정의할 수 있다.

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} \dots + \phi_n x_{t-n} + e_t \quad (9)$$

여기서,  $x_t$ : 계의 응답

$\phi_1, \phi_2 \dots \phi_n$ : 자동회귀 (AR)계수

$e_t$ : 백색잡음

#### 4. 실험장치 및 방법

##### 4.1 음압을 이용한 채터 판별

본 연구에 사용된 실험장치의 사양은 Table 1과 같다. 절삭실험은 범용선반을 이용하였고, 공작물은 채터가 쉽게 일어날 수 있도록 긴 환봉을 선택하였다. 이송테이블 위에 공구동력계와 공구를 장착하였다. 음압 측정용 마이크로폰은 공구에서 0.5m 떨어진 곳에 설치하였다. X, Y, Z 축에서 측정된 절삭력과 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	Hwacheon.co. 380B Lathe
Workpiece	SM45C (dia.45 × length900)
Insert	Korea Tungsten CNMG120404, KT300
Tool holder	Korea Tungsten PCLNR2020K12 entering angle 95° point angle 80°
Tool Dynamometer	KISTLER 9257B
Microphone	DM835 Condenser Microphone
Charge Amplifier	KISTLER 5019A (3-channel)
Tape Recorder	TEAC RD-135T

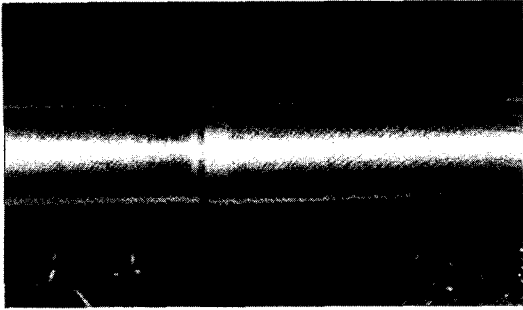


Fig.2 Photograph of the machined surface with chatter mark

Fig.2에는 채터가 발생되었을 때 공작물 표면의 채터마크 사진을 나타내었다.

Fig.3, Fig.4는 각기 12kHz 샘플링으로 A/D처리된 비분력, 음압 신호의 시간과 주파수 영역에서의 특성이며, 채터 발생시와 미발생시에 비교한 것이다. 채터 발생시에는 채터신호의 진폭이 크게 증가하고 주파수 영역에

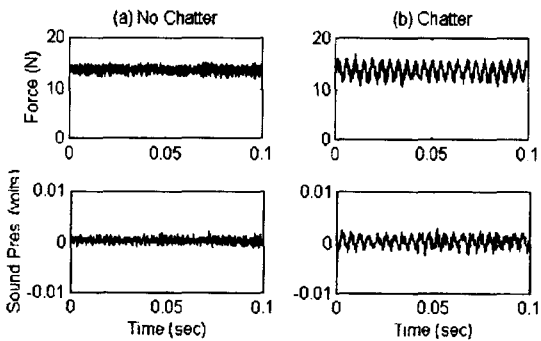


Fig. 3 Signal comparison for sound pressure and cutting force signals in time domain: a) No chatter, b) Chatter

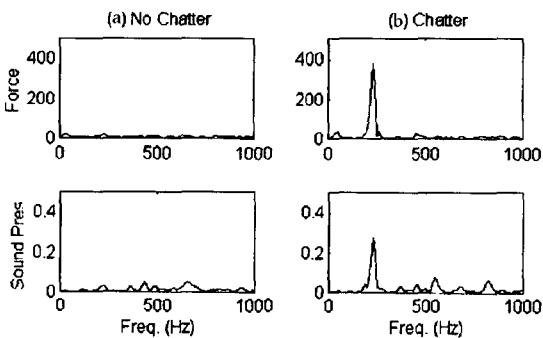


Fig.4 Signal comparison for sound pressure and cutting force signals in frequency domain: a) No chatter, b) Chatter

서의 최고치가 두드러진다. Fig.5는 약 1.2sec에서 채터가 발생했을 때의 음압신호이다. 이 신호의 표준편차를 이용하면 채터발생여부를 판단할 수 있다. (Fig.6 참조) 절삭력의 신호와 음압신호가 시간과 주파수 영역에서 유사한 특성을 나타내고 있으며, 주파수 대역폭이 1 kHz 미만인 공구동력계에 비해 마이크로폰은 10 kHz 이상이어서 보다 넓은 주파수 영역의 특성을 잡아낼 수 있고, 설치와 비용면에서도 우수한 것을 감안할 때 방음장치와 필터링을 더욱 보완한다면 마이크로폰이 채터판별의 센서로서 우수하게 적용될 수 있음을 알 수 있다.

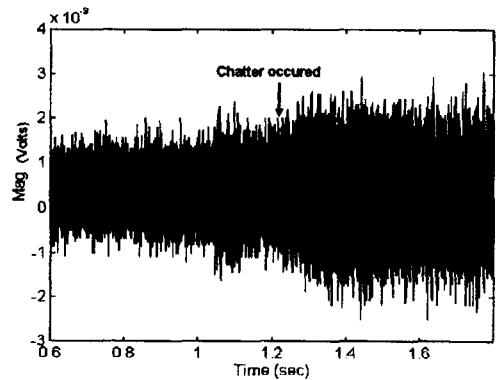


Fig. 5 Sound pressure signal

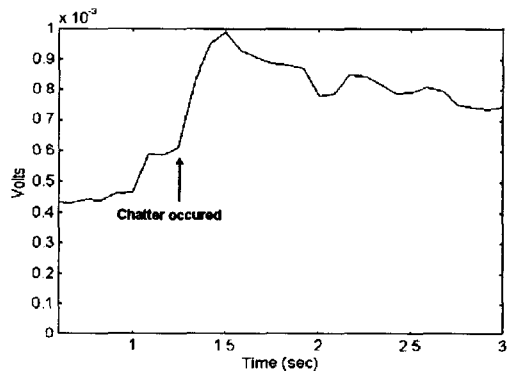


Fig.6 Standard deviation of the sound pressure signal

#### 4.2 채터 제어 및 실험 결과

Fig.7 a), b)는 초기 스피들 속도 370rpm, 이송속도 0.18mm/rev으로 가공했을 때의 음압신호이다. 시간영역에서의 채터 진폭이 크게 증가하고 채터진동수 228Hz에서 spectrum의 최대값이 나타나는 것으로 보아 채터가 발생함을 알 수 있다.

Table 2. Cutting conditions

RPM	Feedrate (mm/rev)	Depth of cut (mm)	MRR (mm <sup>3</sup> /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

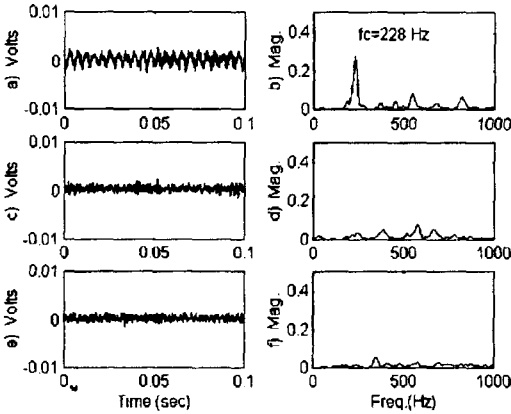


Fig. 7 Sound pressure signals and spectrums (spindle speed(rpm): a,b) 370, c,d) 440, e,f) 620)

채터를 제어하기 위한 안정회전수를 식 (2)에서 구하면  $N=1, 2, 3...$ 에 해당되는 13680rpm, 6840rpm, 4560rpm...등이 구해진다. 그러나 범용선반의 회전수 범위가 한정되어 있으므로 최대 1800rpm미만에서 회전수를 선정하였으며, 안정회전수도 근사치에서 선정하였다. Fig.7의 c), d)는 식 (2)에 의해 안정회전수  $n_s=440$ rpm ( $N=31$ )으로 제어했을 때의 음압신호이다. 채터가 나타나지 않고 있다. Fig.7의 e), f)는 안정회전수  $n_s=620$ rpm ( $N=22$ )으로 제어했을 때의 음압신호이다. 시간과 주파수 영역에서 채터 특성이 보이지 않으며 안정한 절삭이 이루어지고 있다. 안정도 제어법을 적용한 결과 MRR(Metal Removal Rate)이 증가한 상태에서 채터 없이 안정한 절삭을 수행할 수 있음을 확인하였다. (Table 2 참조)

4.3 음압을 이용한 마멸, 파손 실험

Fig.8은 실험장치의 실제 사진이다. 1회 (1 pass)절삭에 50초씩 16회 가공하였으며, 환봉의 선삭시 직경 감소에 따른 절삭속도의 저하를 줄이기 위해 본 실험에 사용

된 범용선반의 최대 허용 직경인 150mm의 공작물을 선택하였다. 또한 마멸량은 2회 절삭마다 공구현미경으로 Flank 마멸길이(VB)를 측정하였다. 절삭력과 절삭진동, 절삭소음을 각각 테이프레코더에 저장한 후 디지털 오실로스코프로 신호를 감시하면서 테이프레코더의 A/D변환기를 통하여 PC에 저장하였다. 저장된 데이터를 3.1절에 정의된 5가지의 마멸지수들을 이용하여 PC상에서 신호처리 및 분석하였다.

Table 3은 본 연구에 사용된 실험장치의 사양을 보인 것이다. 공구는 중절삭용 칩브레이커(chip breaker)를 사용하였고 마멸이 일어나기 쉽도록 코팅처리가 안된 초경공구를 사용하였다. Table 4에는 마멸실험의 절삭조건을 보인 것인데 마멸현상을 현저하게 나타내기 위해 중절삭조건을 적용하였다.

공구파손 규명은 Fig.9와 같이 EDM으로 홈을 낸 공구인서트를 장착하여 실험하였다.

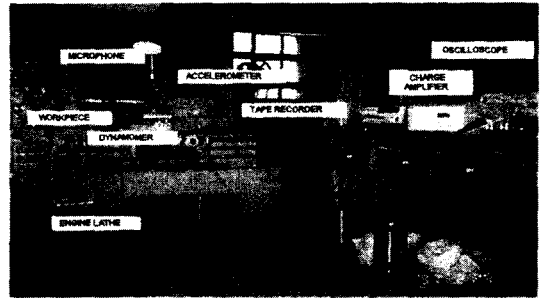


Fig.8 Photograph of the overall experimental setup

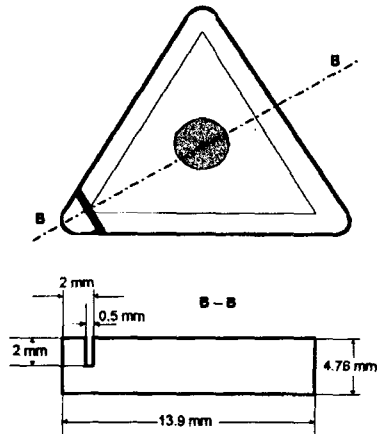


Fig.9 Slotted insert for fracture test

Table 3. Specification of experimental setup

Turning Machine	Hwacheon.co. 380B Lathe
Workpiece	SM45C (dia150×length250)
Insert	Korea Tungsten SNMG120408, P20 TNMG160404, KT250
Tool holder	Korea Tungsten PSDNN2020K12 entering angle 45° point angle 90°
Microscope	Toolmakers Microscope TM-301, MITUTOYO. Zoom Stereo Microscope SZ4045TR, OLYMPUS.

Table 4. Cutting conditions for tool wear

Cutting speed	292.2 (m/min)
Feed	0.3 (mm/rev)
Depth of cut	1.2 (mm)

4.4 마멸실험 결과

Fig.10은 마멸이 진행되는 과정에서 주파수 변동을 절삭회수에 따라 보인 것이다. 마멸이 진행될수록 공구의 단선이 마멸되어 댄핑이 감소하면 공작물의 고유진동수인 564Hz와 공구홀더의 고유진동수인 4,928Hz에서 스피크트럼의 최고치가 증가되어 감을 알 수 있다.

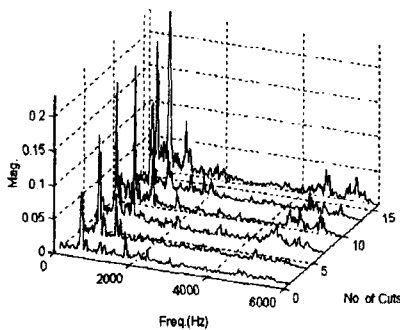


Fig.10 Waterfall spectrum of sound pressure

Fig.11은 배분력의 평균치를 마멸량 VB에 따라 보인 것이다. VB 0.255mm에서 절삭력이 크게 줄어든 것은 공작물을 교체했기 때문이다. 한 공작물을 연속적으로 가공할 경우 절삭속도가 감소하여 오차를 유발할 가능성이 있다. 따라서 절삭속도가 약 10 % 감소한 부근에서 새 공작물로 교체하였다. 이 때 절삭저항이 갑자기 저하되어

절삭력이 줄어드는 것은 열경화현상이 일어나지 않았기 때문이라 사료되며 이는 곧 신호가 증가하는 것으로 보아 연속된 신호라 보아도 무방할 것이다. 또한 VB 0.33mm에 이르렀을 때는 공구선단이 파손되었다.

Fig.12, Fig.13은 마멸진행에 따른 마멸지수들의 변화

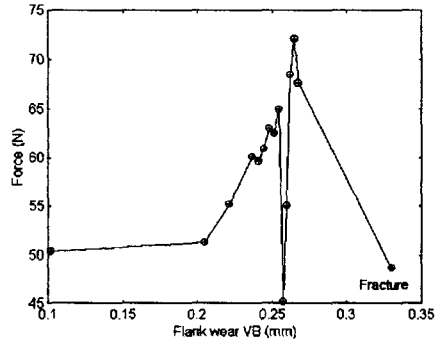


Fig.11 Radial force according to wear length

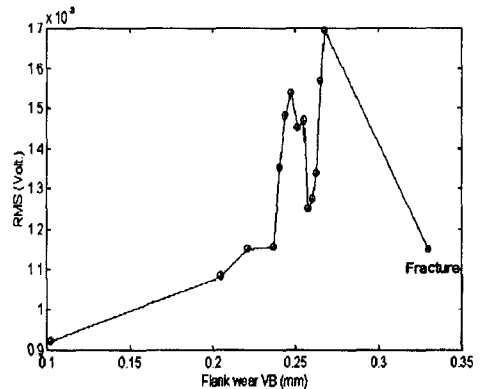


Fig.12 Sound pressure (RMS) according to wear length

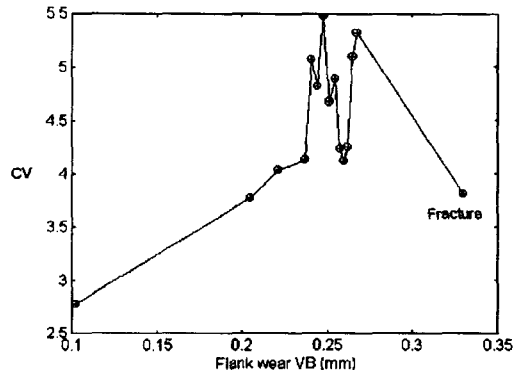


Fig.13 Sound pressure(CV) according to wear length

를 보인 것이다. 절삭력의 변화와 유사한 변화를 나타내고 있으며, VB값이 0.25mm에서 급격한 마멸지수 (RMS, CV)의 증가를 보이는데 그 경향은 Fig.11의 절삭력 변화보다 더욱 뚜렷한 경향을 보인다. 그리고 마멸 상태는 최종마멸상태로 진입하는 것을 알 수 있다. 실시간에서 음압을 이용한 마멸 여부 평가시 급격한 마멸지수 (RMS, CV)의 변화가 일어나는 이 지점을 공구수명으로 볼 수 있다.

Fig.14에는 절삭시간에 따른 Skewness와 Kurtosis의 변화를 보인 것이다. 마멸 중간상태의 초기와 최종상태의 초기부분에서 미소파손이 많이 발생했음을 보여주고 있으며 13분경에는 파손되었음을 나타내고 있다.

Fig.15에는 식 (9)와 같은 모델링을 통하여 음압신호를 AR(8)로 모델링한 결과를 마멸상태에 따라 보인 것이다. 마멸이 진전됨에 따라서 5, 6번째 계수가 증가함을 알 수 있다.

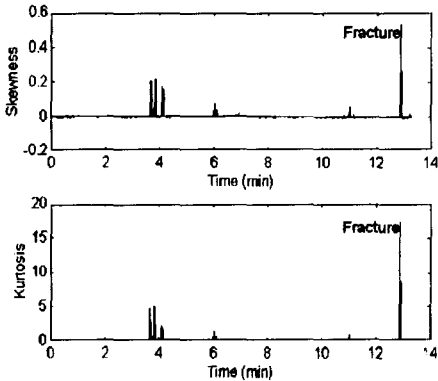


Fig.14 Skewness and kurtosis of sound pressure according to cutting time

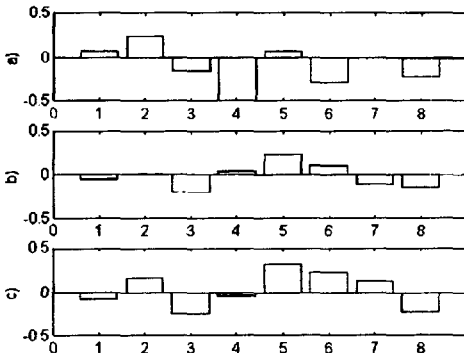


Fig.15 AR parameters of sound pressure  
a) initial wear, b) moderate wear, c) catastrophic wear

#### 4.5 파손실험 결과

파손실험에서는 위의 마멸실험에서 이용한 지수들을 사용하여 공구가 파손될 때의 한계치를 규명하였다. Fig.16에 파손이 일어났을 때의 절삭 주분력과 음압신호를 보였다. 0.7sec에서 파손이 발생했으며, 1.5sec에서는 공구가 완전히 파단되었다. Fig.17에는 파손과정을 음압의 RMS로 나타내었다. 공구가 파손되는 시점인 0.7sec 보다 약 0.4sec (4회전) 전에 RMS값이 급히 상승하게 되며 파손을 예측할 수 있음을 보여준다.

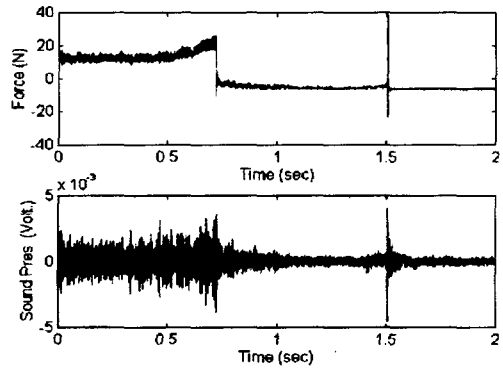


Fig.16 Force and sound pressure signals during fracture

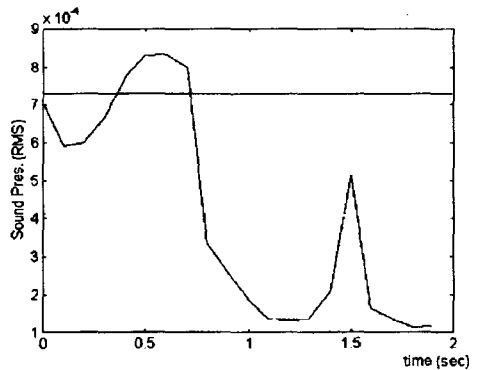


Fig.17 Sound pressure (RMS) during fracture

#### 5. 결론

범용선반에서의 선삭가공에서 채터, 공구마멸 및 파손 신호를 음압으로 검출하여 그 판별과 제어법을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 공구동력계와 가속도계에 비하여 음압신호가 선삭작

- 업에서의 이상상태 감시 및 제어에 유용하게 쓰일 수 있음을 입증하였다.
2. 공작기계 동특성의 사전지식이 없이도 스핀들 속도 제어를 이용한 안정도 제어법의 채터 억제효과의 우수성을 선삭실험을 통해 증명하였다.
  3. 안정도 제어법을 이용함으로써 채터발생을 피하면서 생산성을 높일 수 있었다.
  4. 중절삭 조건에서의 마멸실험을 통해 음압을 이용하여 정의한 마멸지수가 공구수명 예측과 감시에 적합함을 입증하였다.
  5. 주파수 분석을 통하여 마멸이 진전될수록 공작물과 공구의 고유진동수에서 스펙트럼의 최고치가 증가하는 것을 알 수 있었다.
  6. 음압의 kurtosis는 마멸과정 중 상태가 변하는 과도기 부분에서 일어나는 미소파손 현상을 잘 규명하였다.
  7. 공구파손실험을 적용한 결과 음압의 RMS값을 이용하여 0.4sec 전에 파손을 예측할 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. T.Delio, 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.
2. S.A.Tobias, Machine Tool Vibration, John wiley & Sons, Inc 1965.
3. J.Tlusty, Handbook of High-Speed Machining Technology, Machine Dynamics (Chapter 3), R.I.King ed., Chapman and Hall, New York, 1985.
4. K.Eman 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. S.M.Wu and S.M.Pandit, Time Series and System Analysis with Application, John Wiley & Sons, 1983.
6. A.Galip Ulsoy, "On-Line Tool Wear Estimation Usig Force Measurement and a Nonlinear Observer", ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.114, pp.666-672, 1992.
7. Y.Koren, "Flank Wear Model of Cutting Tools Using Control Theory", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.100, pp.103-109, 1978.
8. M.S.Lan, D.A.Dornfeld, "In-Process Tool Fracture Detection", ASME, Journal of Engineering Materials and Technology", Vol.106, pp.111-118, 1984.
9. Toshimichi Moriwaki, "Sensing and Prediction of Cutting Tool Failure", JSPE, Vol.18, No.2, pp.13-19, 1984.
10. Y.Altintas, "Prediction of Cutting Forces and Tool Breakage in Milling from Feed Drive Current Measurements", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.114, pp.386-392, 1992.
11. Jong-Jin Park, A.Galip Ulsoy, "On-Line Flank Wear Estimation Using an Adaptive Observer and Computer Vision, Part 1, Part 2", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.115, pp.30-43, 1993.
12. Y.B.Chen, S.M.Wu, "A Real-Time Automated Diagnostic Monitoring System For Manufacturing Processes", Manufacturing Intelligence, Vol.5, pp.51-56, 1990.