

# AE 신호의 주파수분석에 의한 Chatter진동의 감시

조대현\*, 이상태\*\*, 원종식\*\*, 정윤교\*\*\*

## Monitoring of Chatter Vibration by Frequency Analysis of AE Signals

Dae-hyun Cho\*, Sang-tae Lee\*\*, Jong-sik Won\*\*, Yoon-gyo Jung\*\*\*

### Abstract

A machine tool generally has some serious stability problems in the form of tool chatter during the cutting process. Chatter vibration deteriorates the surface finish, reduce tool and machine life, accelerates machine tool system component wear, and may lead to an unacceptable noise sound in the working environment. In this study, the behavior of spectral density of AE signal and principal cutting force signal in order to monitor the chatter vibration in the cutting process has been investigated. From the results, the reliability of proposed monitoring method has been confirmed.

**Key Words :** AE signal(음향방출신호), Cutting force(절삭저항), Chatter vibration(채터진동), Spectral density(스펙트럼 밀도), Critical distance for chatter(채터임계거리), Band-pass filter(대역통과필터), Full wave rectifier(전파 정류기)

### 1. 서 론

공작기계 운용에 있어서의 궁극적인 목표는 주어진 시간동안 일정한 정밀도를 유지하면서 절삭량을 최대로 올리는 데 있다고 한다면, 공작기계는 동적 한계 내에서 가능한 한 고속 및 중절삭을 하도록 요구되어지나, 이는 절삭트러블의 발생에 의해 종종 제약을 받는다. 절삭트러블의 종류는 다양하고 그에 대한 감시방법 또한 많은 연구가 이루어져 있지만<sup>(1-3)</sup>, 그 중에서 특히 채터(Chatter)는 금속 절삭 시 공구와 공작물 사이에서 발생하는 심한 상

대진동현상으로서, 채터의 발생은 가공정밀도, 공구 및 공작기계 자체의 수명에 악영향을 미친다.

이러한 채터 진동에 관한 연구는 Talyor<sup>(4)</sup>에 의해 채터 진동발생기구에 대하여 최초로 연구되어진 이후 많은 연구자에 의해 다양한 연구가 진행되어 지고 있다. 현재까지 채터를 가공 중에 감시할 수 있는 실용적인 시스템은 개발되지 않고 있으며, 지금까지는 채터의 In-process 감시를 위한 초보적인 연구단계에 지나지 않는다고 하겠다.

채터를 계측하는 방법 중에서 소음<sup>(5-6)</sup>에 의한 채터의 예측은 직접적으로 채터의 감시가 가능하지만, 실시간 제어

\* 창원대학교 대학원  
\*\* 창원기능대학  
\*\*\* 창원대학교

가 어렵고, chatter 발생 점의 위치확인도 어렵다는 단점 이외에 측정 대역폭이 제한된다는 단점을 가지고 있다. 반면 절삭에 관여되는 신호를 직접 측정하는 방법은 상기 방법의 단점을 보완하고 있지만 방법에 따라서 신뢰성 및 경제성 측면에서 문제점을 가지는 경우가 많다. 가속도 센서의 사용은 센서의 부착 위치를 정확히 결정해야 신뢰성 있는 측정이 가능하다는 문제점을 가지며, 공기동력계를 이용하는 방법<sup>(7~9)</sup>은 절삭시 발생하는 안정된 절삭신호인 절삭저항을 측정함으로써 chatter를 감지할 수 있기 때문에 결과의 신뢰성을 보장받을 수 있으나 경제적인 측면이나 절삭 가공계의 강성저하, 운전의 간편성 저하에 문제점이 있다. 그러나, AE<sup>(10)</sup>를 이용한 측정방법은 영향인자들이 무수히 많아 절삭 파라미터의 규명에 기술적 숙련이 필요하다는 어려움은 있으나, AE 센서의 특성을 이용한 계측시스템을 구축함으로써 이 문제를 해결할 수 있다고 본다.

따라서, 본 연구에서는 선삭가공시 발생하는 chatter진동을 In-process로 감지하기 위한 기초연구로, AE 센서를 이용하여 절삭가공시 발생하는 AE 신호를 주파수분석에 의해 chatter 감지의 가능성을 검토하고자 하였다. 이를 위하여 신뢰성이 검증되어있는<sup>(11)</sup> 절삭저항 센서에 의한 절삭저항 성분의 주파수분석을 동시에 수행하여 AE에 의한 감시 결과에 신뢰성을 부여하였다.

또한, 절삭조건(절삭속도, 절입 및 이송)의 변화가 chatter진동에 미치는 영향을 파악하여 공작기계의 자동화 및 무인화를 위한 데이터베이스의 축적이 본 연구의 궁극적인 목적이다.

## 2. 실험장치 및 실험 방법

본 실험에서 사용되어진 CNC선반은 화천(주)제작으로 주축동력 7.5kW이며, 사용되어진 공작물은 SM45C로서 외경 20mm, 길이 140mm로 외주절삭을 수행하였다. 사용되어진 공구는 초경합금으로 곡율반경 0.8mm, 공구경사각 -6°이며, 공구마멸이 chatter진동에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 매 실험마다 새로운 팁으로 교환하였다. chatter진동의 감시를 위한 AE sensor는 광대역센서를 사용하였고, 칩의 발생 시 마찰음이나 케이블 파손의 영향을 최소화하기 위하여 공구홀더의 뒷부분에 센서를 부착하였다. 발생되어진 AE신호는 전치증폭기(Pre-amplifier)에서 증폭 후, AE센서의 민감대역인 100kHz~300kHz의 대역필터를 통과시켜 AE신호의 특성을 부각시켰다. 이 신호를Computer에서 분석 및 처리를 용이하게 하기 위해 전파전류기를 거친

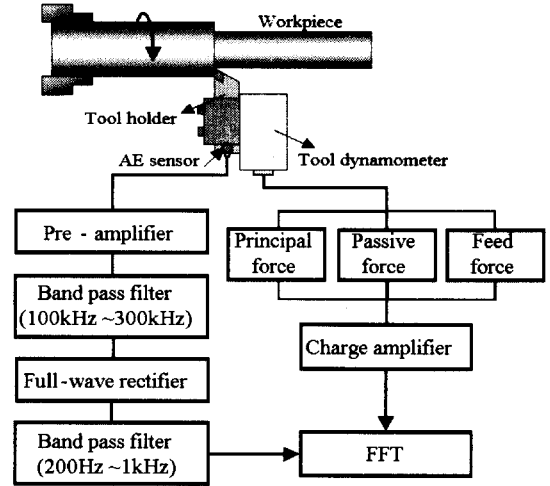


Fig. 1 Experimental setup for chatter vibration detection

Table 1 Experimental equipments

Instruments	Specifications
CNC lathe	Hi-ECO 10 (Hwacheon Co.)
Workpiece	SM45C (D:20mm, L:180mm)
Tool holder	PCLNL2525-M12 (Korloy Inc.)
Insert tip	NC330 CNMG120808 (Korloy Inc.)
AE sensor	WD (PAC.)
Pre-amplifier	1220A (PAC.)
Tool-dynamometer	Piezo type 9257B (Kistler Co.)
Charge amplifier	5019A (Kistler Co.)
FFT	2035 (B&K)

Table 2 Experimental conditions

Items	Conditions
Cutting velocity (m/min)	130, 160, 190, 220
Feed (mm/rev)	0.10, 0.15, 0.20, 0.25
Depth of cut (mm)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
Coolant	Dry

다음, chatter진동의 민감대역인 저주파영역(200Hz~1kHz)의 대역필터를 통과시킨 후, FFT를 이용하여 스펙트럼 분석을 수행하였다. 본 실험에서 사용한 대역필터 및 전파전류기는 자체제작 하여 그 신뢰성을 검토하였다. 신뢰성을 확인하지 않으면 실험 자체의 신빙성이 결여될 것이다.

AE에 의한 채터진동의 감시에 대한 타당성을 확인하기 위하여 절삭저항신호를 AE신호의 처리와 유사한 방법으로 신호처리를 하여 AE신호에 의한 결과와 비교 검토하였다. 절삭저항신호는 스위스의 Kistler사의 공구동력계를 사용하여 측정하였다. Fig. 1은 본 실험에서 사용되어진 실험장치의 개략도를, Table 1은 실험장치의 사양을 Table 2는 실험조건을 각각 나타내었다.

### 3. 대역필터 및 전파정류기의 신뢰성 검토

광대역 AE sensor는 100kHz~300kHz에서 가장 민감한 대역이기 때문에 이 대역 이외의 신호의 영향을 최소화하기 위하여 원신호를 대역필터에 의해 정제할 필요가 있다. 또한, AE신호의 처리 및 분석을 원활히 하기 위하여 전파정류의 필요성이 있어, 본 연구에서는 사용할 필터 및 전파정류기를 자체 제작하여 사용하였다.

Fig. 2의 (A, B, C, D)는 대역필터를 거치지 않은 진폭 2V, 주파수 20kHz, 60kHz, 200kHz, 400kHz의 함수발생기에서 발생된 원신호를 보여주고 있으며, Fig. 2(a, b, c, d)는 진폭 2V, 각각 주파수로 대역필터(100kHz~300kHz)를 통과시킨 신호를 나타내고 있다. 원신호와 비교하여, 60kHz 및 400kHz 대의 신호와 같이, 필터의 대역을 벗어난 주파수의 신호는 그 진폭이 크게 감소되어있는 반면, 대역을 통과한 200kHz의 신호(Fig. 2(C))는 그 진폭이 원신호와 거의 차이가 없음을 알 수 있다. 이러한 결과를 종합적으로 고찰하여 본 그림이 Fig. 2(E)에서 보는바와 같이, 100kHz~300kHz 대역에서의 진폭의 감소보다도, 필터의 대역을 벗어난 주파수의 진폭의 감소가 훨씬 크게됨을 알 수 있어 자체제작의 대역필터의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

또한, Fig. 3은 전파정류기의 신뢰성을 검토한 결과로서 Fig. 3(A)는 함수발생기에서 발생된 진폭 2V, 주파수 60Hz의 원신호이며, Fig. 3(B)는 자체제작의 전파정류기를 통과시킨 결과를 나타내고 있다. 그림에서와 같이, 만족스러운 전파정류의 결과를 확인할 수 있었다

### 4. 채터 감시의 가능성

절삭시 채터가 발생하면 AE 신호와 절삭저항의 동적성분의 급격한 변동이 예상되며 이러한 급격한 변동성분은 주파수 분석을 행함에 의해 채터의 발생 유무를 명확히 판단할 수 있다고 사료된다.

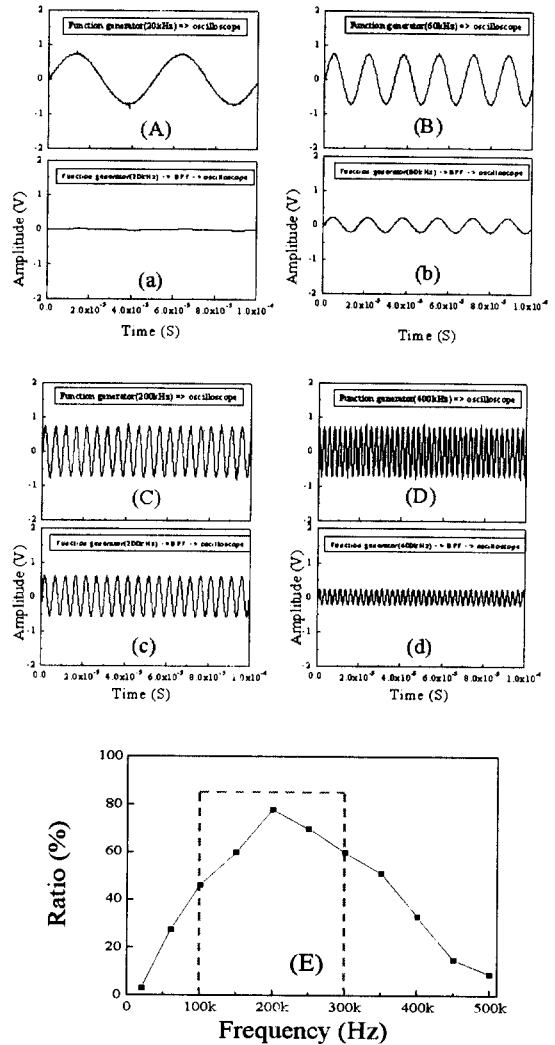


Fig. 2 Comparison of original signal and band-pass filtered signal

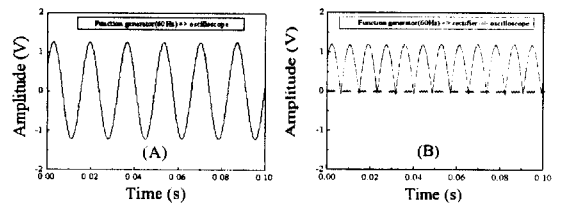
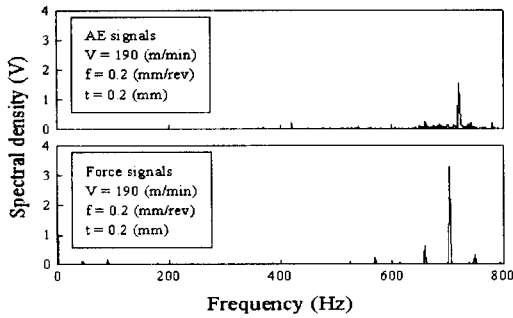
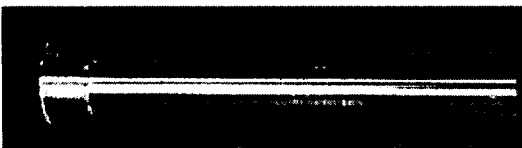
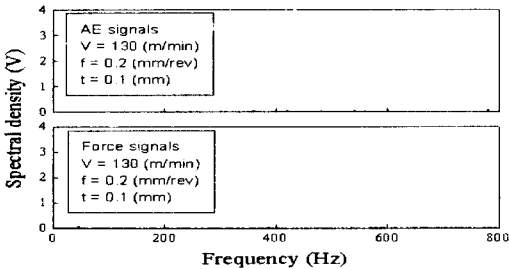


Fig. 3 Comparison of original signal and full-wave rectified signal

Fig. 4(A)는 공작물 전 영역에 걸쳐 충분히 채터가 발생되는 절삭조건(절삭속도 190 m/min, 이송 0.2 mm/rev, 절입 0.2 mm, 척에서의 돌출길이 140mm)으로 절삭을 행하였을 때 AE 신호와 주분력의 동적성분에 대하여 주파수 분석을 행한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, 주파수 약 700Hz 근방에서 스펙트럼 밀도(Spectrum density)의 피크(Peak)가 선명하게 확인되었을 뿐만 아니라 공작물 표면의 관찰 사진에서도 전 절삭표면에 걸쳐 채터 자국이 확연히 관찰되어짐을 알 수 있다.



(A) With chatter



(B) Without chatter

Fig. 4 Frequency analysis of cutting force signals with and without chatter

Fig. 4(B)에서는 채터가 일어나기 어려운 절삭조건(절삭속도 130 m/min, 이송 0.2 mm/rev, 절입 0.1mm, 척에서의 돌출길이 140mm)로 절삭하였을 때 AE 신호와 주분력의 동적 성분을 주파수 분석한 그림이다. 스펙트럼 밀도의 피크는 나타나지 않았으며, 공작물 표면의 관찰 결과도 공작물 선단에서 약간의 채터 무늬가 관찰되었을 뿐, 전반적으로 채터무늬가 없는 안정된 절삭이 이루어졌다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 채터진동과 AE 신호의 주파수 분석결과와는 무관하지 않음을 입증하고 있다.

절삭 중 채터의 크기는 절삭조건 뿐만 아니라 절삭위치에 따라서 달라질 수 있으며, 실제 공작물의 품위에 영향을 주는 채터의 크기를 파악할 필요가 있다. Fig. 5는 선반의 척에 공작물(직경20mm, 길이140mm)을 장착하여 선삭가공을 행했을 때 Position A, B 및 C의 각각의 위치 근방에서 획득한 AE 신호와 절삭저항의 동적 성분을 주파수 분석한 결과를 비교하고 있다. 척에서 가장 먼 위치

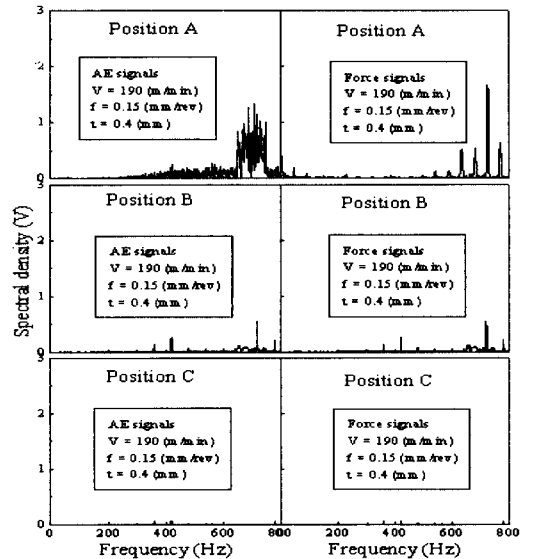
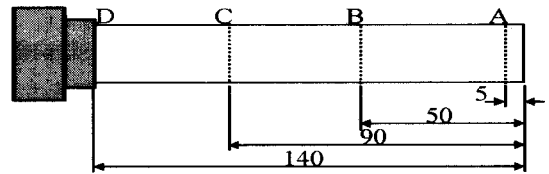


Fig. 5 Power spectra of AE & force signals sampled during cutting with and without chatter vibration

(Position A)에서는 채터에 가장 민감한 위치로서, 스펙트럼 밀도의 피크값이 가장 크게 나타났으며, 척에서 가장 가까운 위치(Position C)에서는 공작물의 강성이 크게 되기 때문에 채터가 거의 발생되지 않음을 알 수 있다. Position B의 위치에서는 Position A의 위치에서와 마찬가지로 700Hz근방에서 채터에 의한 피크가 확인되었으나, 그 크기는 Position A의 그것에 비해 현저히 작아짐을 알 수 있었다. 따라서, 이러한 결과로부터 AE 신호의 주파수 분석에 의해 채터의 감시의 가능성 뿐 아니라 채터의 크기도 정성적으로 파악할 수 있음을 알 수 있었다.

### 5. 채터 감시 방법의 결정

Fig. 6(A)는 척에서부터 돌출길이 140mm인 공작물의 선단을 가공하여 얻은 AE 신호의 변동성분을 1초 간격으로 끊어서 각각을 주파수 분석한 결과를 주파수와 시간 및 스펙트럼 밀도와의 관계를 3차원적으로 plot한 것이다. 1초보다 더 작은 구간으로 나누면 채터의 발생시점을 더욱 정밀히 감시할 수 있으나, 장비의 한계로 본 실험에서는 1초의 구간으로 하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 시간이 지남에 따라(가공의 위치가 척 부분으로 가까이 감에 따라) 스펙트럼 밀도의 크기가 급격하게 줄어들고 동

시에 스펙트럼 피크의 위치는 항상 일정한 700Hz근방에서 머물고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과를 명확하게 하기 위하여 가공시간을 공작물 선단에서의 가공 거리로 환산한 값에 대한 스펙트럼 밀도의 값과 대응하는 주파수 값을 동시에 plot한 것이 Fig. 6(B)이다. 가공길이 60mm부근에서 스펙트럼 밀도의 값이 현저히 떨어지며 스펙트럼 피크의 위치도 700Hz에서 노이즈(Noise)에 해당되는 주파수 대역으로 바뀌는 것으로 보아 가공길이 60mm부근을 채터의 발생 및 미 발생 경계영역으로 구분할 수가 있다.

이는 각각 주분력, 배분력 및 이송분력으로 동시에나뉘어진다. 이 중 배분력이 채터에 가장 민감하다고 알려져 있으나, 본 연구에 사용할 시스템에서 어떤 분력이 채터에 가장 민감한지를 평가할 필요가 있다. 여기에서, Fig. 6의 (A) 및 (B)와 동일한 절삭조건에서 주분력, 배분력, 이송분력에 대하여, 전술의 방법에 의해 신호분석 하여 plot한 그림이 각각 Fig. 7(A)와 (B), Fig. 8(A)와 (B) 및 Fig. 9(A)와 (B)이다. 주분력에 대한 결과와 비교하여 배분력과 이송분력의 피크값 크기도 현저히 감소하고 있으며, 채터의 발생경계도 명확하지 않음을 알 수 있다.

따라서 본 실험에서는 채터에 가장 민감한 주분력의 동적성분을 선정하여 AE 신호와 비교하기로 하였다. 이러한

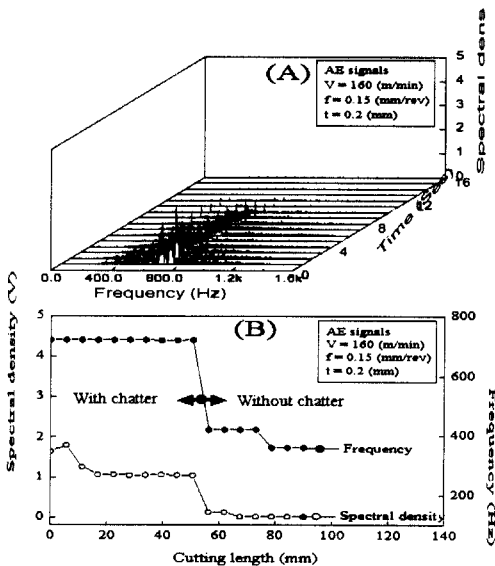


Fig. 6 Behavior of maximum power spectral density and its frequency for AE signals

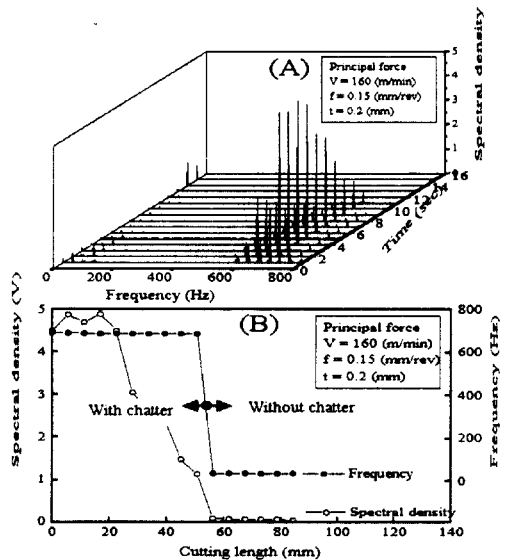


Fig. 7 Behavior of maximum power spectral density and its frequency for principal force signals

결과로부터 주목할 사실은, AE 신호와 3분력 어느 것이나 스펙트럼 밀도의 Peak치의 발생주파수가 700Hz근방이라는 것이며, 또한, AE에 의한 결과는 주분력에 의한 결과에

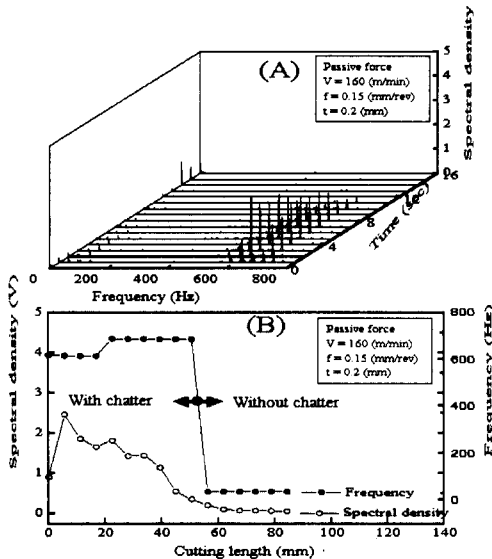


Fig. 8 Behavior of maximum power spectral density and its frequency for passive force signals

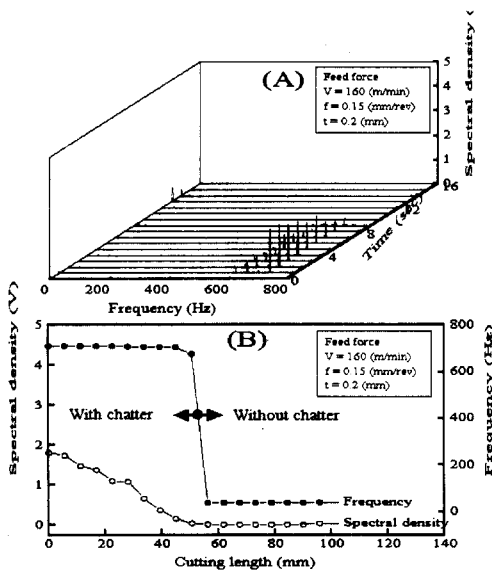


Fig. 9 Behavior of maximum power spectral density and its frequency for feed force signals

비교하여 주파수 700Hz근방에서 Peak가 뚜렷한 양상을 띄지 못함을 알 수 있으며 이는, 고민감성 AE센서의 특성에 기인하는 것으로 사료된다. 이러한 사실로부터, 본 실험에서 제안된 AE 센서의 주파수 분석에 의한 채터의 감시가 당위성이 있음을 알 수 있다.

### 6. 절삭조건에 따른 채터의 거동

채터의 발생원인은 다양하지만 가공 시스템의 동적거동이 일정하다고 본다면, 채터는 절삭조건에 지배되어 진다고 할 수 있다.

Fig. 10은 공작물 직경의 변화가 채터의 거동에 미치는 영향을 나타낸 그림이다. 횡축에는 공작물의 직경, 종축에는 채터임계거리( $l_c$ )로 나타내었다. 채터임계거리  $l_c$ 는 척으로부터 채터의 발생 시작 위치까지의 거리이며, 이 거리는 Fig. 6(B)에서 보여주는 것처럼 주파수의 현격한 변화가 인정되어지는 위치를 결정함으로써 구할 수 있다. 이러한 채터임계거리가 길면 그 조건에서 채터에 대해 안정하다는 것이며 이 거리가 짧으면 채터에 민감하게 거동함을 의미한다. 그림에서 보는 바와 같이, 공작물의 직경이 증가함에 따라 절삭시스템은 채터에 안정함을 보여주고 있으며 공작물은 척에서의 돌출길이가 140mm임을 감안하면, 공작물의 직경이 40mm 이상일 때는 공작물의 어느 위치에서도 채터에 대해 안정하다는 사실을 보여주고 있다. 그러나 본 실험에서는, 가공이 실행됨에 따라 절삭깊이(100~400 $\mu$ m)로 인하여 감소되어지는 공작물의 직경에 따른 채터임계거리의 변화는 아주 작은 값이므로 무시하였다.

Fig. 11~Fig. 13은 각각 절삭속도, 이송 및 절삭깊이의 변화에 대한 채터임계거리의 거동을 나타내고 있다. 그림

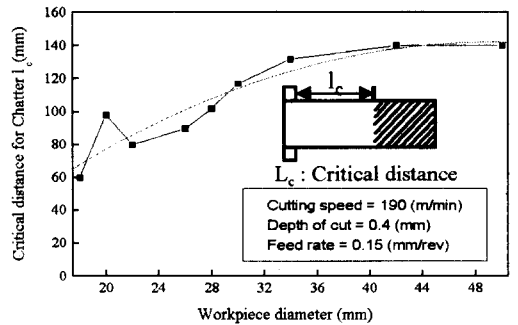


Fig. 10 Relationship between workpiece diameter and critical distance for chatter

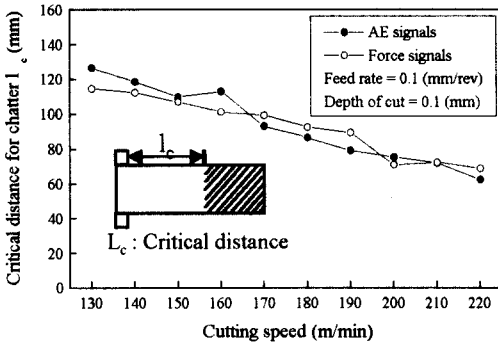


Fig. 11 Relationship between cutting speed and critical distance for chatter

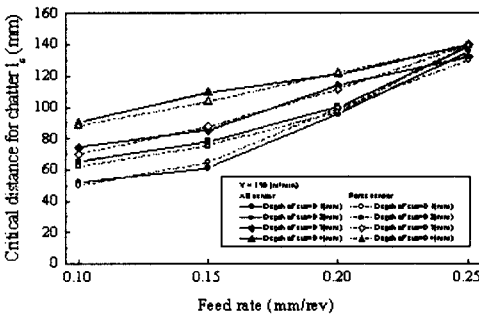


Fig. 12 Relationship between feed rate and critical distance for chatter

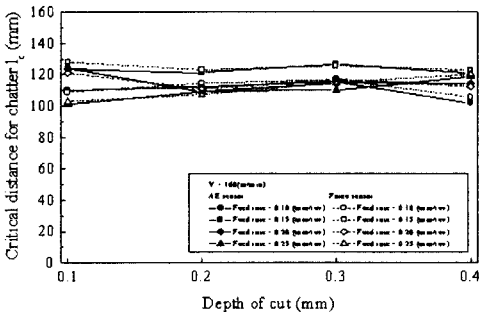


Fig. 13 Relationship between depth of cut and critical distance for chatter

에서 보는바와 같이, 절삭속도가 빠를수록 채터는 쉽게 발생되고, 이송은 클수록 절삭시스템이 채터에 안정되게 작

용함을 알 수 있다. 또한, 절삭깊이는 본 실험조건 범위에서는 채터에 대하여 무관함을 보여주고 있다. 이는 노즈반경보다 절삭깊이가 클 경우 채터진동에 불안정해지며, 어떤 절삭깊이에서 채터마크가 발생한다면 절삭깊이를 작게 하여도 일정범위 안에서는 불안정한 진동이 지속되거나 현재까지 만족스런 해석이 얻어지지 않고 있다. 어느 그림에서도 AE 신호 및 절삭저항 신호의 결과를 동시에 보여주고 있으며 그 결과 또한 동일한 양상을 띄고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로 보아 AE 센서에 의한 채터진동 감시의 타당성을 재확인할 수 있었다.

## 7. 결론

본 연구에서는 선삭가공에서 발생하는 채터진동의 감시를 위한 기초적인 작업으로서 AE sensor를 이용하여 절삭가공 시 발생하는 신호를 주파수 분석하여 각 절삭조건에서 비교 및 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) AE 신호의 주파수 분석에 의한 채터 감시의 가능성이 확인되었다.
- (2) AE 신호를 1초 간격으로 분석함에 의해 시간에 따른 채터 거동의 변화를 추적할 수 있어 채터 감시의 In-process 감시를 위한 기초자료를 구축 할 수 있었다.
- (3) 공작물의 직경이 클수록, 절삭속도가 작을수록, 이송이 클수록 절삭시스템은 채터에 대해 안정하며, 절삭깊이는 본 실험의 절삭조건 범위 내에서 채터에 대해 영향이 크지 않음을 알았다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단지정 창원대학교 공작기계기술연구센터의 지원에 의한 것입니다. 관계자에게 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 맹민재, 정준기, "선삭가공에서 공구마멸에 따른 절삭저항과 AE 신호의 특성 연구", 한국공작기계학회, Vol. 4, No. 2, pp. 18~24, 1995
- (2) 원종식, 조종래, 정운교, "절삭조건과 AE 신호들과의 관계에 관한 실험적 연구", 한국공작기계학회, Vol. 7, No. 6, pp. 64~71, 1998.

- (3) M. S. Lan, D. A. Dornfeld, "In-process Tool Fracture Detection", ASME, Journal of Engineering Materials and Technology", Vol. 106, pp. 111~118, 1984.
- (4) F. W. Taylor, "On the art of the Cutting Metals", Trans. ASME, J. Eng. Ind., pp. 30~35, 1907.
- (5) T. Delio, J. lusty and S. Smith, "Use of Audio Signals for Chatter Detection and Control", ASME, Vol. 114, pp. 146~157, May 1992.
- (6) 이성열, 정성중, "음압신호와 안정도제어법을 이용한 선삭작업에서의 chatter감시 및 제어", 한국공작기계학회, Vol. 6, No. 4, pp. 101~107, 1997.
- (7) K. Emam, S. M. Wu, "A Feasibility Study of On-line Identification of Chatter in Turning Operations", Trans. ASME, J. Ind., Vol. 102, pp. 315~322, 1980.
- (8) E. Marui, S. Ema and S. Kato, "Chatter vibration of Lathe Tools : Part 1 : General Characteristics of chatter vibration", Trans. ASME, J. Ing., Vol. 105, pp. 100~107, 1983.
- (9) K. Jemielniak, A. Widota, "The Development of Frequency and Amplitude of chatter vibration", Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 29, pp. 249~258, 1989.
- (10) D. A. Dornfeld, "Acoustic Emission during Orthogonal Cutting" Int. J. Mech. Sci, Vol. 22, 1980.
- (11) 구연욱, 정의식, 남궁석, "선삭가공에 있어서 chatter진동의 인프로세스 검출에 관한 연구(1)", 한국공작기계학회, Vol. 8, No. 3, pp. 73~81, 1991.