

# AE 및 Force 신호의 주파수분석에 의한 Chatter진동의 감시

조대현\*, 원종식\*\*, 이상태\*\*, 정윤교\*\*\*

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

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

### ABSTRACT

A machine tool 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, accelerate machine tool system component wear, and may lead to an unacceptable noise sound in the working environment. In this study, in order to monitor of the chatter vibration on the cutting process, the behavior of spectral density of AE signal and principal cutting force signal has been investigated. Furthermore, its reliability from obtained the results has been studied to evaluate and confirm the proposed method with the application procedure and the experimental results.

**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. 서론

공작기계 운용에 있어서의 궁극적인 목표는 주어진 시간동안 일정한 정밀도를 유지하면서 절삭량을 최대 로 올리는 데 있다고 한다면, 공작기계는 동적 한계 내에서 가능한 한 고속 및 중절삭을 하도록 요구되어 지나, 이는 채터(Chatter) 발생으로 인하여 종종 제약을 받는다. 채터는 금속 절삭 시 공구와 공작물 사이에서 발생하는 심한 상대진동현상으로서, 채터의 발생은 가공정밀도, 공구 및 공작기계 자체의 수명에 악영향을 미친다.

채터 진동에 관한 연구는 Talyor<sup>(1)</sup>에 의해 채터 진동발생기구에 대하여 최초로 연구되어진 이후 Anord<sup>(2)</sup> 및 Hahn<sup>(3)</sup>등은 절삭속도와 채터 발생기구와의 상관관계 및 채터 발생기구의 복잡성에 대하여 시사한 바가 있다. 또한, 실용적인 채터 문제의 해석은 Tobias와 Fishwick<sup>(4)</sup>에 의해 절삭조건과 채터 발생한계와의 상관관계는 해석적으로 규명하려 하였으며, Tlusty와 Polacek<sup>(5)</sup>는 재생효과가 채터에 미치는 영향을 제시하였고 Merritt<sup>(6)</sup>는 제어이론에 의해 자러 진동기구를 해석한 바 있다. 이외에 채터에 대한 여러 연구가 진행되고 있으나 현재까지 채터를 작업 중에 감시할 수 있는 실용적인 시스템은 개발되지 않고 있으며 현재로서는 채터의 In-process감시를 위한 초보적인 연구단계에 지나지 않는다고 하겠다.

채터를 계측하는 방법 중에 소음<sup>(7)</sup>에 의한 채터의 예측은 직접적으로 채터의 감시가 가능하지만, 실시

간 제어가 어렵고, 채터 발생 점의 위치확인이 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 문제성을 가지는 경우가 많다. 가속도 센서의 사용은 센서의 부착 위치를 정확히 결정해야 신뢰성 있고 측정이 가능하다는 문제점을 가지며, 공구동력계를 이용하는 방법은 절삭 시 발생하는 안정된 절삭신호인 절삭력을 측정함으로써 채터를 감시할 수 있기 때문에 결과의 신뢰성을 보장받을 수 있으나 경제적인 측면이나 절삭가공계의 강성저하, 운전의 간편성 저하에 문제점이 있으며, AE<sup>(8)</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 연구는 선삭가공 시 발생하는 채터진동을 In-process로 감시하기 위한 기초연구로서, AE 센서를 이용하여 절삭가공 시 발생하는 신호를 고속 Fourier 변환시켜 채터진동의 감시 가능성을 검토하고, Force 센서로 신호의 변화를 상호 비교하여 data의 신뢰성을 확보하였다. 절삭속도, 절입 및 이송과 같은 각 절삭 조건의 변화가 채터에 미치는 영향을 파악하여 공작기계의 자동화 및 무인화를 위한 지식을 축적하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

\* 창원대 대학원  
\*\* 창원기능대  
\*\*\* 창원대

## 2. 실험장치 및 실험 방법

본 실험에서는 주축모터의 소비동력이 7.5kW인 CNC선반을 사용하고 공작물의 외경 20mm, 길이 140mm인 SM45C를 편심을 제거하기 위하여 전 가공을 실시하였고 절삭에 있어서 마찰특성이나 공작물의 진동 영향을 일정하게 유지하기 위하여 절삭유는 사용하지 않았으며 공구마멸이 채터진동의 변동에 미치는 영향을 최소화하기 위해 매 실험마다 새로운 팁으로 교환하여 실험하였다. 재질은 초경합금으로서 곡률반경 0.8mm이고 공구경사각  $-6^\circ$  인 홀더를 사용하였다. 절삭실험에 앞서 절입깊이 0.5mm로 전가공 후 Table. 2와 같은 조건으로 실험하였다.

채터진동의 감시를 위한 AE 신호를 정제하는데 사용되는 실험 장치는 광대역형 WD(PAC)의 AE sensor를 칩 발생 시 마찰음이나 케이블 파손의 영향을 최소로 하기 위해 공구홀더의 뒷부분에 부착하였고 Pre-amplifier에서 증폭된 신호를 다시 AE 센서의 민감 대역인 100kHz~300kHz 대역필터(Band pass filter)를 거쳐 전파정류기(Full wave rectifier)를 통과시키고 다시 밴드패스필터(200Hz~1kHz)를 사용하였다.

AE의 결과를 검증하기 위해 본 실험에서는 Force 센서를 사용하여 절삭저항의 3분력신호도 FFT를 통하여 동시에 분석하였다. 신호분석에서 주파수 대역의 Full scale은 관심 있는 주파수의 약 2배인 1.6kHz로 하였다. 또한, 척으로부터 채터의 발생점까지의 공작물 길이를 채터임계거리( $l_c$ )라고 정의하고 이 거리의 대소를 평가함에 의해 채터 발생 용이성을 판단하였다.

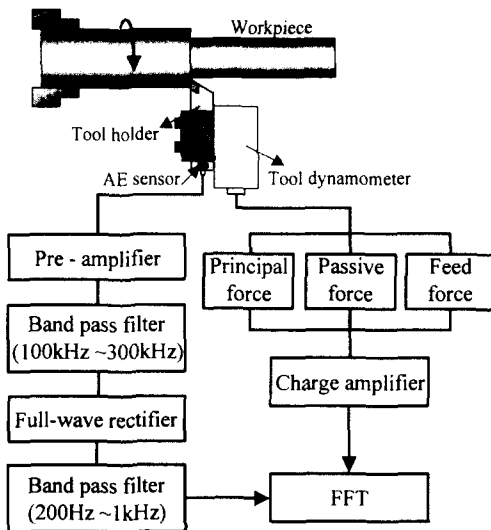


Fig. 1 Experimental setup for chatter vibration detection

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.)
Band-pass filter	자작
Full-wave rectifier	자작
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

## 3. 자작 Band-pass Filter 및 Rectifier의 신뢰성 검토

AE sensor를 이용한 채터진동의 감시에 있어서 WD sensor(15kHz~1MHz)는 100kHz~300kHz에서 가장 민감한 대역이기 때문에 그 외 신호의 영향을 최소화할 필요가 있다. 이때 AE sensor의 민감 대역인 100kHz~300kHz만을 검출하기 위한 Band-pass filter를 사용할 필요가 있으며 고주파 Band-pass filter의 회로도 작성은 OrCAD를 이용해 시뮬레이션 하여 회로도작성의 정확성을 검증하고 본 실험에 사용할 필터를 자체 제작하였다.

제작한 밴드패스회로를 본 실험에 사용하기 전에 시뮬레이션 한 것과 비교하기 위해 함수발생기에서 신호를 발생시켜 오실로스코프로 확인하였다. Fig. 2(A)는 5V의 전압을 함수발생기에서 발생시켜 오실로스코프로 받은 원신호이고 Fig. 2(B), Fig. 2(D)는 밴드패스대역을 벗어나는 신호로 Fig. 2(C)의 밴드패스대역인 200kHz와 비교해서 신호가 많이 감소됨을 볼 수 있다. Fig. 2(E)는 10kHz~500kHz까지의 신호를 밴드패스필터(100kHz~300kHz)를 통과시켜 최대전압으로 작성한 것이다. 여기서 시뮬레이션 하여 제작한 밴드패스필터는 검증 결과 시뮬레이션 한 것과의 동일함을 볼 수 있다.

본 실험에서 제작한 전파정류기의 신뢰성을 확인하기 위하여, 함수발생기에서 60Hz의 신호를 자작 전파정류기로 통과시킨 경우와(Fig. 3(B)), 통과시키지 않은 경우(Fig. 3(A))를 비교한 것이 Fig. 3이다. Fig. 3에서 보는바와 같이 전파정류기를 통과한 것은 진폭 0을 기준으로 부의 신호가 모두 양의 신호로 전파정류 되었음이 확인되어 본 실험에서 제작된 전파정류기의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

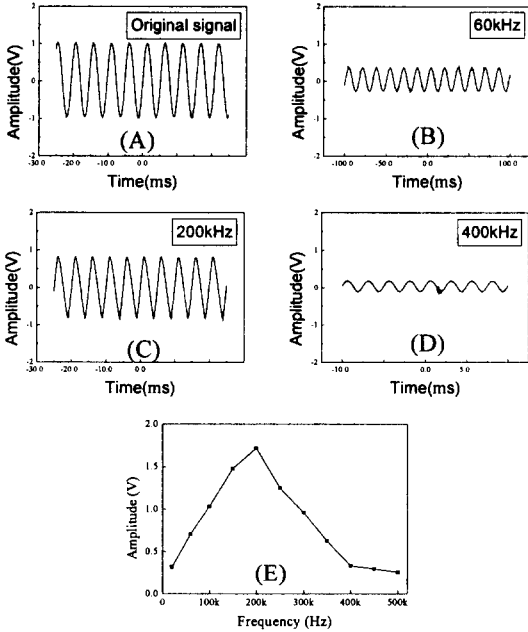


Fig. 2 Signal of band-pass filter after

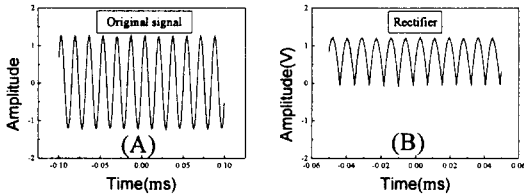


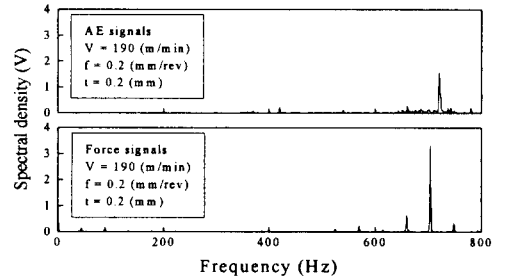
Fig. 3 Original signal and Signal of full wave rectifier after

#### 4. 채터 감시의 가능성

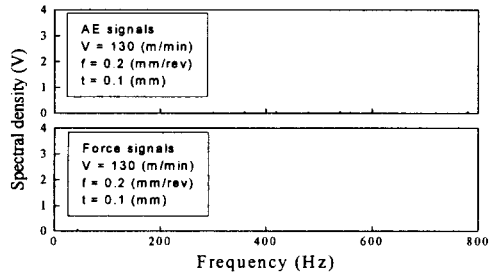
절삭 시 채터가 발생하면 AE 신호와 절삭저항의 동적 성분의 급격한 변동이 예상되며 이러한 급격한 변동성분은 주파수 분석을 행함에 의해 채터의 발생 유무를 명확히 판단할 수 있다고 사료된다.

Fig. 4(A)는 공작물 전 영역에 걸쳐 충분히 채터가 발생하는 절삭조건 (절삭속도 190 m/min, 이송 0.2 mm/rev, 절입 0.2 mm)으로 절삭을 행하였을 때 AE와 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. 이러한 사실들은 선삭 과정 전 영역에 걸쳐서 채터가 발생되고 있다는 사실을 뒷받침한다 할 수 있다. Fig. 4(B)에서는 채터가 일어나기 어려운 절삭조건(절삭속도130 m/min, 이송 0.2 mm/rev, 절입 0.1mm)로 절삭하였을 때 AE 신호와 주분력의 동적 성분을 주파수 분석한 그

림이다. 스펙트럼 밀도의 피크는 나타나지 않았으며, 공작물표면의 관찰 결과도 공작물 선단에서 약간의 채터 무늬가 관찰되었을 뿐, 전반적으로 채터무늬가 없는 안정된 절삭이 이루어졌다는 것을 알 수 있다. 절삭 중 채터의 크기는 절삭조건 뿐만 아니라 절삭 위치에 따라서 달라질 수 있으며, 실제 공작물의 품위에 영향을 주는 채터의 크기를 파악할 필요가 있다. Fig. 5은 선반의 척에 공작물(직경 20mm, 길이 140mm)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(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



(A) With chatter



(B) Without chatter

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

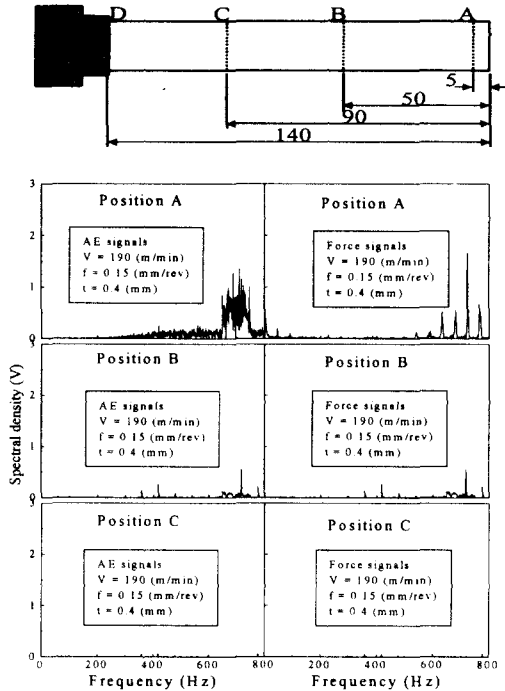


Fig. 5 Power spectra of AE & force signals sampled during cutting with and without chatter vibration 작아짐을 알 수 있었다. 따라서 이러한 결과로부터 AE 신호의 주파수 분석에 의해 채터의 감시의 가능성 뿐 아니라 채터의 크기도 정성적으로 파악할 수 있음을 알 수 있었다.

### 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 밀도와와의 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 줄어들며 동시에 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 Noise에 해당되는 주파수 대역으로 바뀌어져 버리는 것으로 보아 가공길이 60mm부근을 채터의 발생 및 발생 경계영역으로 구분할 수가 있다.

3차원 절삭에서는 절삭저항의 3분력이 발생되며 이는 각각 주분력, 배분력 및 이송분력으로 나뉘어진다. 이 중 배분력이 채터에 가장 민감하다고 알려져 있으나, 본 절에서는 본 연구에 사용할 시스템에서 어떤 분력이 채터에 가장 민감한지를 평가할 필요가 있다.

Fig. 6의 (A) 및 (B)와 같은 절삭조건에서 삼분력에 대하여 전술한 방법에 의해 신호분석 하여 plot한 것이 각각 Fig. 7(A), (B) 및 Fig. 8(A), (B), Fig. 9(A), (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. 그러나 주목할 사실은 AE 신호와 3분력 어느 것이나 스펙트럼 밀도의 peak치의 발생주기가 700Hz근방이라는 것이며, 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 동적거동은 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 절입깊이(100~400 $\mu$ m)로 인하여 감소되어지는 공작물의 직경에 따른 채터임계거리의 변화는 아주 작은 값이므로 무시하였다.

Fig. 11, Fig. 12 및 Fig. 13은 각각 절삭속도, 이송 및 절입깊이의 변화에 대한 채터임계거리의 거동을 나타내고 있다. 그림에서 보는바와 같이 절삭속도가 빠를수록 채터는 쉽게 발생되고, 이송은 클수록 절삭시스템이 채터에 안정되게 작용함을 알 수 있다. 또한, 절입깊이는 본 실험조건 범위에서는 채터에 대하여 무관함을 보여주고 있다.

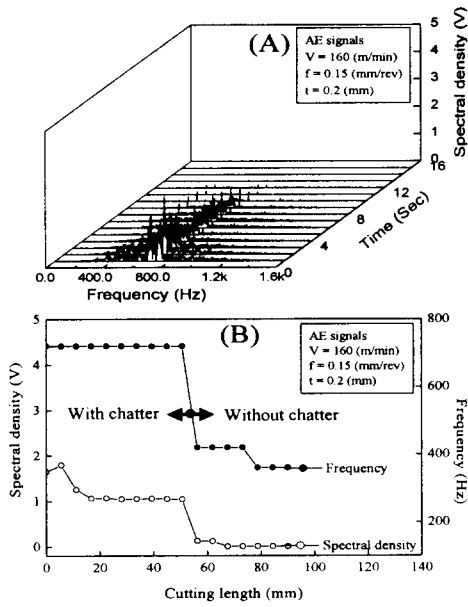


Fig. 6 Behavior of maximum power spectral density and its frequency for AE

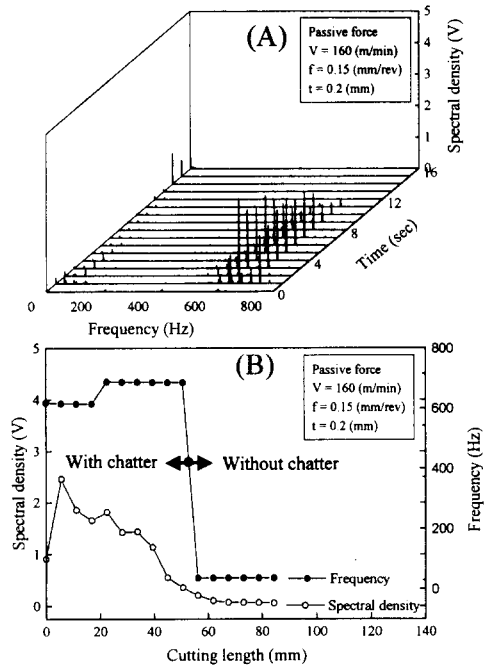


Fig. 8 Behavior of maximum power spectral density and its frequency for passive force

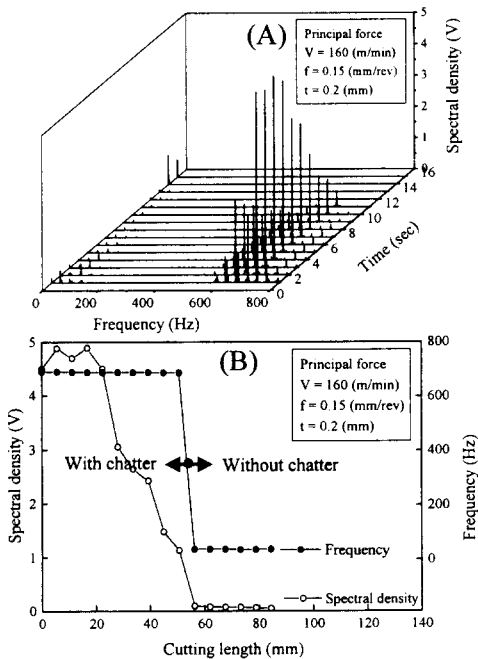


Fig. 7 Behavior of maximum power spectral density and its frequency for principal force

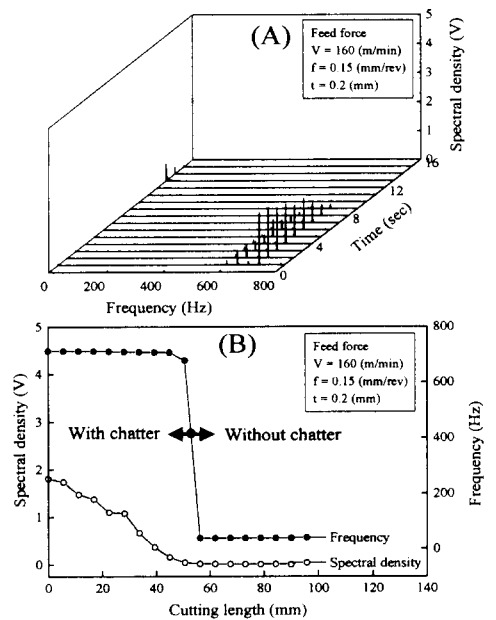


Fig. 9 Behavior of maximum power spectral density and its frequency for feed force

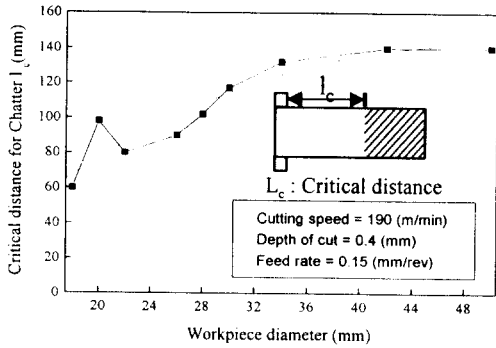


Fig. 10 Relationship between workpiece diameter and critical distance for chatter

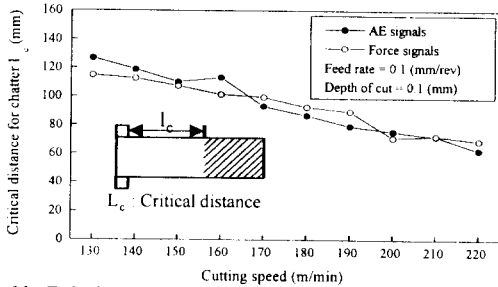


Fig. 11 Relationship between cutting speed and critical distance for chatter

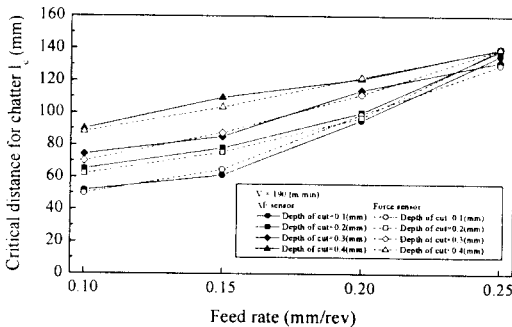


Fig. 12 Relationship between feed rate and critical distance for chatter

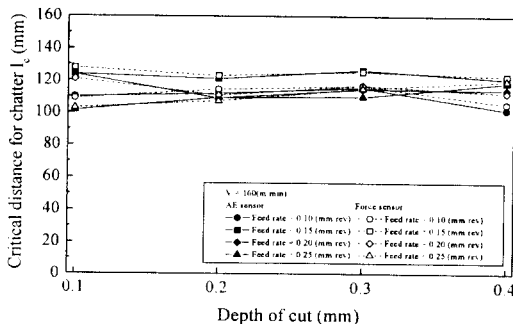


Fig. 13 Relationship between depth of cut and critical distance for chatter

## 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 signals의 주파수 분석에 의한 채터 감시의 가능성이 확인되었다.
2. AE signals를 1초 간격으로 분석함에 의해 시간대에 따른 채터 거동의 변화를 추적할 수 있어 채터 감시의 In-process 감시를 위한 기초자료를 구축할 수 있었다.
3. 공작물의 직경이 클수록, 절삭속도가 작을수록, 이송이 클수록 절삭시스템은 채터에 대해 안정하며 절깊이는 본 실험의 절삭조건 범위 내에서 채터에 대해 영향이 크지 않음을 알았다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단지정 창원대학교 공작기계 기술연구센터의 지원에 의한 것입니다. 관계자에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) F.W. Taylor, "On the art of the Cutting Metals", Trans. ASME, J.Eng. Ind., 1907.
- (2) R.N. Arnold, "the Mechanism of Tool Vibration in the Cutting of Steel", Proc. I. Mech. E, Vol. 154, pp. 261~284, 1946.
- (3) R.S. Hahn, "Metal Cutting Chatter and its Elimination", Trans. ASME Vol. 75, pp. 1073~1080, 1953.
- (4) S.A. Tobias and W. Fishwick, "The Chatter of the Lathe Tools under Orthogonal Cutting Conditions", Trans. ASME.80, pp.1079, 1959.
- (5) J. Tlustý and M. Poláček, "The Stability of Machine Tool Against Self-Excited Vibration in Machining", Proc. of the Int. Prod. Eng. Research, pp.465~474, 1963.
- (6) H.E Merritt, "Theory of Self-excited Machine Tool Chatter", Trans. ASME, J. Eng. Ind, pp. 44 7~454, Nov.1965.
- (7) T. Delio, J. lusty, S. Smith, "Use of Audio Signals for Chatter Detection and Control", ASME, Vol. 114, May 1992.
- (8) D.A Dornfeld, "Acoustic Emission during Orthogonal Cutting" Int. J.Mech. Sci, Vol. 22, 1980.