

## AE센서에 의한 다중 절삭트러블 감시에 관한 연구

원종식\*(창원기능대학), 정윤교(창원대학교 기계공학과)

### A Study on the Monitoring of multi-Cutting Troubles Using an AE Sensor

Jong-Sik Won\*(changwon polytech college), Yoon-Gyo Jung (Changwon Univ.)

#### ABSTRACT

This paper describes the fundamental investigations on the in-process monitoring techniques focused on Acoustic Emission(AE) based on analytical method. Experiments were conducted on a CNC lathe using conventional carbide insert tools under various cutting conditions. As the result of this study a suggestion is given about the multi-purpose use of AE-signals detected with a single sensor for the monitoring of tool wear, built-up edge and chatter vibration in turning process.

**Keywords** :  $AE_{rms}$ (AE 실효치전압), Tool wear(공구마모), Built-up edge(구성인선), Chatter vibration(채터진동)

#### 1. 서 론

최근 산업발전이 가속되고 수요자의 요구(Needs)가 다양화·고급화함에 따라 생산시스템은 공장 자동화(FA), 유연 생산시스템(FMS), 컴퓨터 원용 종합생산시스템(CIM) 등과 같은 자동화 생산 시스템을 지향하고 있다. 이러한 생산시스템이 항상 최적의 상태를 유지토록 하려면 종래에 작업자의 시각, 청각, 촉각, 등에 의해 수행되던 감시기능을 대신할 수 있는 신뢰성 있는 감시시스템의 구축이 필수적이다.

특히 가공분야에서 많은 비중을 차지하고 있는

절삭가공은 기구 구성의 복잡성과 다수의 불확정한 요인들로 인하여 다양한 가공상의 문제점을 내포하고 있으며, 또한 한 공정에서 발생한 가공 트러블이 후속공정에 미치는 영향이 지대하므로 운전 중에 가공상태를 감시할 수 있는 기법의 개발이 절실히 요구되고 있다.

따라서 최근 많은 연구자들은 절삭공정에서 매우 중요한 문제점이라 할 수 있는 공구마모, 구성인선, 채터진동 등의 감시에 관한 연구에 관심을 갖고 많은 연구결과들을 발표한 바 있다.<sup>1~6)</sup>

그러나 지금까지 이루어진 많은 연구들은 주로 단일센서에 의한 단일 트러블의 감시 또는 다중센서에 의한 단일 트러블의 감시방법에 관한 연구가 주를 이루고 단일센서를 사용하여 다중 트러블을 감시하는 방법에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 뛰어난 민감성을 갖으며 최근에 사용도가 급증하고 있는 AE센서를 활용하여 공구마모와 구성인선 및 채터진동을 동시에 감시할 수 있는, “단일센서(AE 센서)에 의한 다중 절삭 트러블의 감시기법”을 제안함과 동시에 자동화·무인화 생산시스템에서 요구되는 절삭 트러블의 In-process 감시에 활용 가능한 데이터를 축적하고자 한다.

#### 2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에 사용한 실험장치의 사양은 Table 1과 같고 실험장치의 구성은 Fig.1과 같으며 실험 조건은 Table 2와 같다.

공구마모와 구성인선을 감시하기 위한 AE신호의 처리 과정은 센서로부터 감지된 AE신호를 Pre - amplifier(40 dB)에서 증폭하여 Band pass filter(100~1200kHz)에서 필터링한 다음 AEDSP

- 32/16에서 Digital 신호로 변환시켜 PC에 입력되게 하였다. 입력된 Digital 신호는 AE 전용 software인 Mistras 프로그램을 사용하여 처리하였다.

채터진동을 감지하기 위한 AE신호는 증폭후 광대역형 AE센서의 민감대역인 100~300kHz의 밴드패스필터에서 여과된 다음, Full-wave rectifier를 거쳐 전파 정류시킨 후, 200 Hz~1 kHz의 밴드패스필터를 통과시켜 관심 있는 주파수대의 신호<sup>8)</sup>를 획득하였다. 여기서 5~200 Hz의 대역은 칩 변화에 민감하기 때문에 이들 범위들은 좀더 신뢰할 수 있는 채터진동 감시를 위해 삭제

Table 1. Specifications of experimental equipments

Instruments		Specifications
CNC Lathe		Hi-ECO 10 (Hwacheon Co.)
Work piece	Tool Wear	STD11 ( D:100 mm, L:50 mm)
	B.U.E.	SM45C(O.D:97.5 mm, I.D:25 mm)
	Chatter Vib.	SM45C(D:20 mm, L:140 mm)
Insert Tip		Cemented Carbide
AE Sensor		WD (PAC.)
Pre-amplifier		1220A (PAC.)
AE Main		AEDSP-32/16 (PAC.)

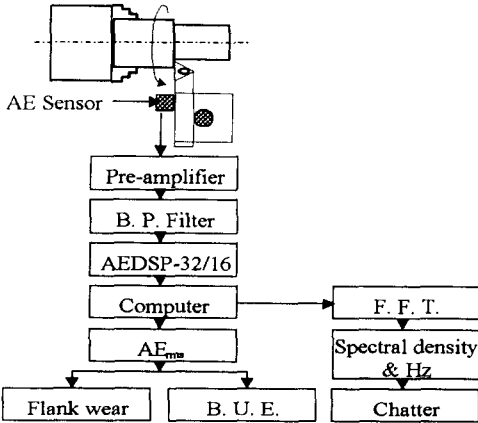


Fig. 1 Experimental setup

시켰고, 1 kHz 이하의 주파수 범위를 택한 것은 본 연구에 앞선 연구에서 알게 되었던 채터진동 주파수(700 Hz)<sup>8)</sup>에 여유값을 준 것이다. 이런 과정을 거쳐 얻은 AE신호를 FFT에서 주파수 분석하여 채터진동 발생에 따른 주파수의 거동특성을 고찰하였다.

절삭 시 발생된 AE 신호 파형으로부터  $AE_{rms}$  값은 다음의 식(1)에 의해 구하여진다.<sup>9)</sup>

$$AE_{rms} = \left[ (1/\Delta T) \int_0^{\Delta T} V^2(t) dt \right]^{1/2} \quad \dots (1)$$

여기서,  $V(t)$  : 신호함수,  $t$  : 시간  
 $\Delta T$  : 신호발생주기이다.

Table 2. Experimental conditions

Items		Conditions
Cutting Velocity (m/min)	Tool Wear	120, 140, 160, 180
	B.U.E.	46~180
Feed (mm/rev)	Chatter Vib.	130, 160, 190, 220
	Tool Wear	0.10, 0.15, 0.20, 0.25
	B.U.E.	0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30
Depth of Cut (mm)	Chatter Vib.	0.10, 0.15, 0.20, 0.25
	Tool Wear	0.2, 0.4, 0.6
	B.U.E.	0.15, 0.20, 0.25, 0.30
Coolant		Dry

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 공구마모의 감지

Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4는 각각 절삭깊이, 이송 및 절삭속도를 변화시킬 때  $AE_{rms}$ 의 거동을 나타내는 그림이다.  $AE_{rms}$ 는 절삭속도 및 절삭깊이가 증가함에 따라 비교적 큰 폭으로 증가하나 이송의 증가에 따라서는 완만하게 증가하는 경향을 나타낸다. 이들 3가지 조건의 영향을 종합적으로 검토한 그림이 Fig. 5이다. Fig. 5는 절삭률 $Z_w$ (절삭깊이×이송×절삭속도)의 변화에 대한  $AE_{rms}$ 의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이  $AE_{rms}$ 의 값은 절삭률의 증가에 거의 비례함을 알 수 있다.

따라서, 측정된  $AE_{rms}$  값으로부터 플랭크 마모폭을 추정하기 위해서는 절삭률을 이용하여, 각각의 절삭 조건이  $AE_{rms}$  신호에 미치는 영향을 배제하는 것이 바람직하다. Fig. 6은 절삭률을 2400 mm<sup>3</sup>/min, 4800 mm<sup>3</sup>/min, 7200 mm<sup>3</sup>/min, 14400 mm<sup>3</sup>/min로 일정하게 하였을 때 절삭량의 변화에 대한  $AE_{rms}$  및 플랭크 마모폭의 변화를 나타낸 것이다. 양자간에는 상관관계가 있으며 절삭량의 증가에 따라  $AE_{rms}$ 가 증가하는 양상을 보이고 있다. Fig. 7에서는 절삭률이 7200 mm<sup>3</sup>/min인 경우 플랭크 마모폭과  $AE_{rms}$ 와의 관계를 도식하고 있다. 선삭가공에서 절삭률을 알고 그때의  $AE_{rms}$ 의 값을 측정하여 플랭크 마모폭을 추정할 수 있고, 한계 플랭크 마모폭을 설정해 두면 적절한 시기에 공구를 교환할 수 있으리라 판단된다.

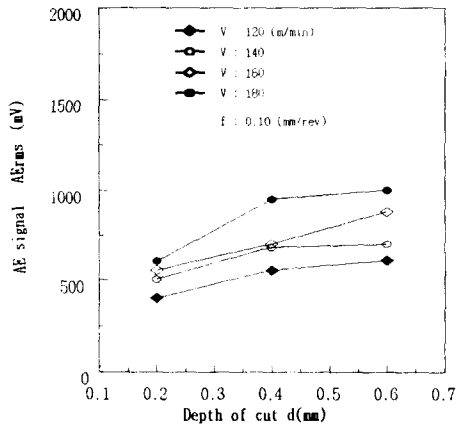


Fig. 2 AE signal versus depth of cut

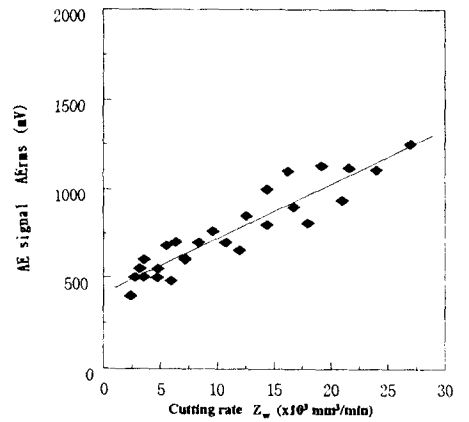


Fig. 5 AE signal versus cutting rate

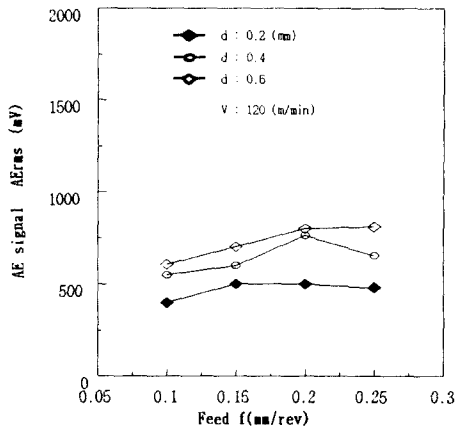


Fig. 3 AE signal versus feed

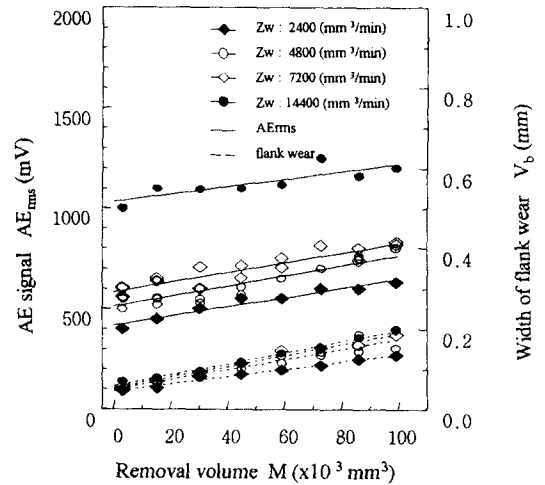


Fig. 6 Variations of AE signal and width of flank wear versus removal volume

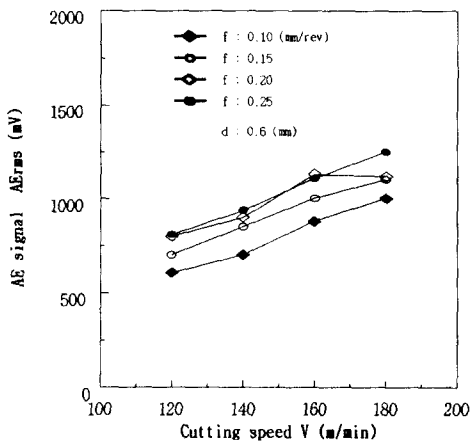


Fig. 4 AE signal versus cutting speed

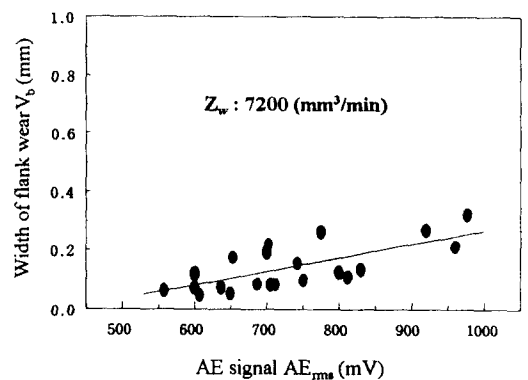


Fig. 7 Width of flank wear versus AE signal

### 3.2 구성인선의 감시

Fig. 8은 구성인선이 발생하지 않는 경우의 절삭속도 변화에 대한  $AE_{rms}$ 의 거동은 나타난다. 그림에서  $AE_{rms}$ 는 절삭속도가 감소함에 따라 거의 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있으며 이는 이미 보고된 바 있는 여러 연구자들의 연구결과<sup>5,10)</sup>와 일치하는 현상이었다

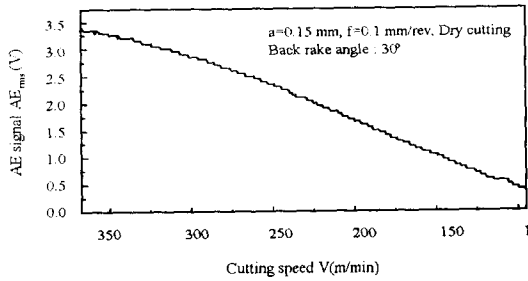


Fig. 8  $AE_{rms}$  versus cutting speed(without B.U.E.)

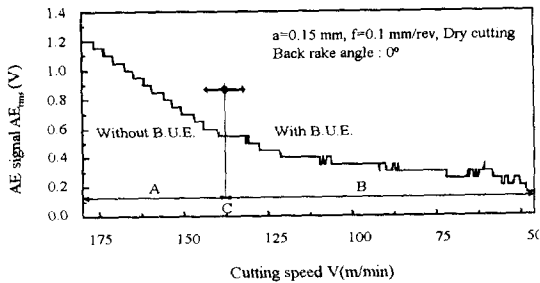


Fig. 9  $AE_{rms}$  versus cutting speed(with B.U.E.)

Fig. 9는 절삭속도를 46~180 m/min 범위로 변화시키며 절삭할 때에 절삭속도 변화에 대한  $AE_{rms}$ 의 변화양상을 나타낸 것이다. A 구간에서  $AE_{rms}$ 는 절삭속도의 감소에 따라 일정한 기울기로 감소하다가 C점 근방을 경계로 하여 완만해지는 것을 볼 수 있는데 이러한 현상은 C점 근방에서부터  $AE_{rms}$ 값을 증가시키는데 어떤 원인이 있기 때문이라고 판단된다.

D. V. Hutton과 Q. Yu에 의하면 구성인선의 발생에 따라 바이트의 실제 경사각은 증가되고 따라서 전단각이 변화하게 되며 동시에 구성인선이 실제 절삭날 역할을 하게되어 공작물과 공구의 재질이 동일해 지면서 마찰조건이 변하게 되어  $AE_{rms}$ 값이 증가된다고 하였다. 따라서 C점 근방에서부터  $AE_{rms}$ 의 감소 추세가 완만해지는 현상은 구성인선의 발생에 따른  $AE_{rms}$ 의 증가요인 때문이라고 보이며, 그 상쇄 효과로 인하여 C점 근방에서부터  $AE_{rms}$ 거동의 변화가 나타난다고 판단된다. 그러나 그 지점은 불명확하므로 수학

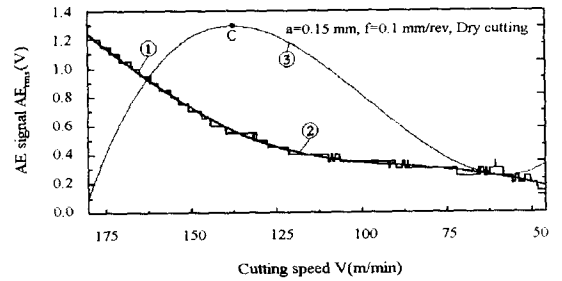


Fig. 10  $AE_{rms}$ (①), curve fitted  $AE_{rms}$ (②), and second order derivative(③) of curve ② versus cutting speed

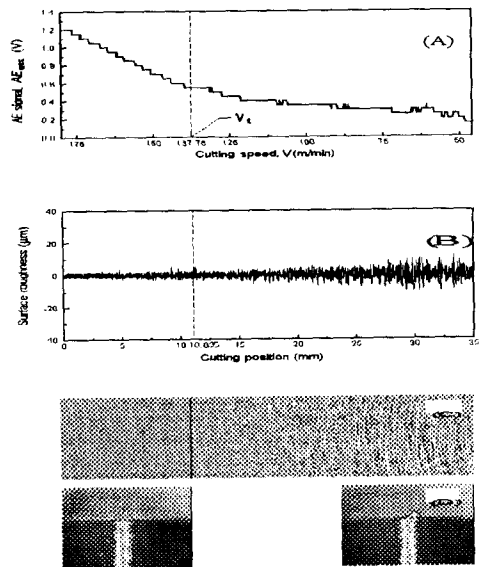


Fig. 11 (A)  $AE_{rms}$  versus cutting speed (C) Surface roughness versus cutting position (D) Photo of cut surface (D) Photo of used tool edge

적 해석에 의하여 그 정확한 위치를 정의할 필요가 있다.

따라서 Fig. 10에서 보는 바와 같이 측정된  $AE_{rms}$ 의 변화곡선(①)을 곡선 보간한 곡선(②)에 대한 2차 도함수(곡선(③))값이 최대가 되는 곳, 즉C점이 곡선(②)의 기울기 변화가 가장 심한 곳이며, 바로 이 점을 구성인선 발생의 시작점(임계절삭속도  $V_c$ )이라 할 수 있다.

Fig. 11의 (A)는 절삭속도의 변화에 대한  $AE_{rms}$ 의 변화, (B)는 각 절삭속도에 대응하는 가공면의 위치에 대한 표면거칠기의 변화, (C), (D)는 임계절삭속도를 경계로 한 고절삭속도 영역과 저절삭속도 영역에서의 가공 표면과 공구인

선의 사진이다.

(C)에서 보듯이 가공표면은 임계절삭속도를 기점으로 한 저절삭속도 영역에서 구성인선의 흔적과 저친 가공면을 확인할 수 있었다.

또한(D)에서 보는 바와 같이 임계절삭속도를 기점으로 한 고절삭속도 영역을 가공한 공구인선에서는 구성인선이 관찰되지 않았으며 저절삭속도 영역을 가공한 공구인선에서는 구성인선의 존재가 확인되었다. 따라서 AE<sub>rms</sub>에 의한 구성인선 감시방법은 신뢰성이 있다고 할 수 있다.

### 3.3 채터진동의 감시

Fig. 12와 Fig. 13은 각각 채터가 일어나기 어려운 절삭조건(절삭속도 130 m/min, 이송 0.2mm/rev, 절입 0.1mm) 및 채터가 쉽게 발생하는 절삭조건(절삭속도 190 m/min, 이송 0.2 mm/rev, 절입 0.2 mm)으로 절삭하였을 때 얻은 AE신호의 동적성분을 주파수 분석하여 주파수에 대한 주파수 밀도의 관계를 나타낸 그림이다. 이 경우 Fig. 12의 사진에서 보는 것처럼 가공품의 선단에서만 약간의 채터 마크가 관찰될 뿐, 전 가공 길이에 걸쳐 안정된 절삭이 이루어진 경우에는 어느 주파수 대에서도 스펙트럼 밀도의 피크는 나타나지 않는 반면, Fig. 13처럼 가공 표면의 전 구간에 걸쳐서 선명한 채터 마크가 관찰되는 경우에는 스펙트럼 밀도(Spectrum density)가 주파수 약 700 Hz근방에서 피크(Peak)값을 나타내는 것이 확인되었다. 따라서 AE신호의 주파수분석에 의한 채터의 감시가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 14는 공작물 자유단으로부터 각각 5 mm, 50 mm, 90 mm 만큼 떨어진 A, B, C 위치에서 획득한 AE신호의 동적 성분을 주파수 분석한 결과를 비교한 그림이다. 공작물의 강성이 낮은 위치 A에서는 채터진동의 발생을 상징하는 스펙트럼 밀도의 피크가 약 700 Hz 정도에서 발생했으며, 스펙트럼 밀도의 피크값이 점차 감소하는 위치 B를 경과하여 척(chuck)의 가까운 위치 C에서는 공작물의 강성이 상대적으로 증가함에 따라 스펙트럼 밀도의 피크값을 볼 수 없었다.

Fig. 15(A)는 전술한 조건으로 가공하여 얻은 AE신호들을 1초 간격으로 끊어서 각각을 주파수분석 한 결과를 주파수와 시간 및 스펙트럼 밀도와의 관계를 3차원적으로 도시한 것이다. 그림에서 시간의 경과에 따라(가공 위치가 척 부근으로 접근함에 따라) 스펙트럼 밀도의 크기가 급격하게 줄어들고 동시에, 더욱 흥미 있는 것은 스펙트럼 피크의 위

치는 항상 일정한 700 Hz근방에서 머물고 있음을 알 수 있다.

Fig. 15(B)는 가공시간을 공작물 선단에서의 가공거리로 환산한 값에 대한 스펙트럼 밀도의 값과 대응하는 주파수 값을 동시에 나타낸 그림이다. 그림에서 나타나듯이 가공길이 40 mm부근에서 스펙트럼 밀도의 값이 현저히 떨어지며 스펙트럼 피크의 위치도 700 Hz에서 Noise에 해당되는 주파수 대역으로 바뀌는 것으로 보아 가공길이 40 mm부근을 채터가 발생 또는 발생하지 않는 경계영역이라고 할 수 있다. 따라서 Fig 7-15(B)에서 볼 수 있는 것처럼 주파수와 주파수밀도의 현저한 변화가 있는 위치가 채터임계거리라고 판단된다.

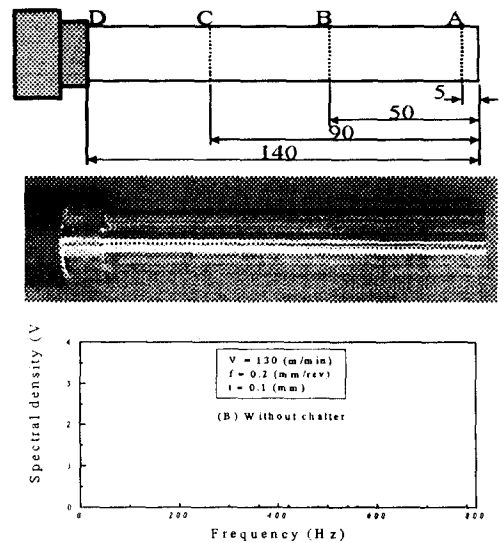


Fig. 12 Frequency analysis of AE signals without chatter

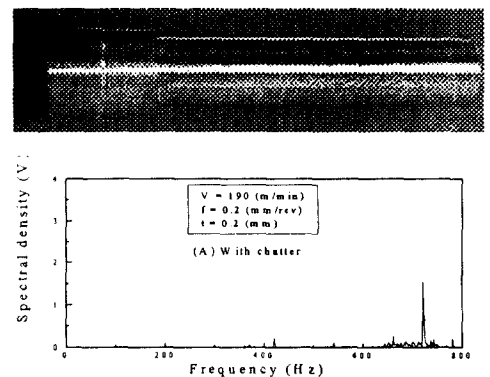


Fig. 13 Frequency analysis of AE signals with chatter

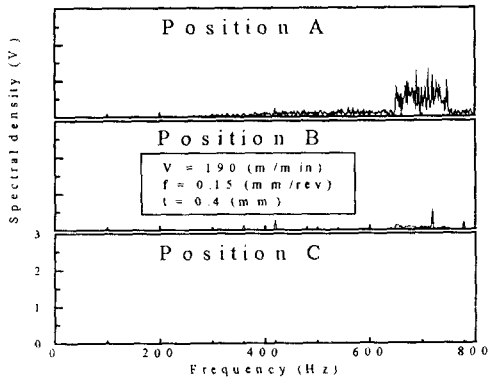


Fig. 14 Power spectra of AE signals sampled during cutting with and without chatter vibration

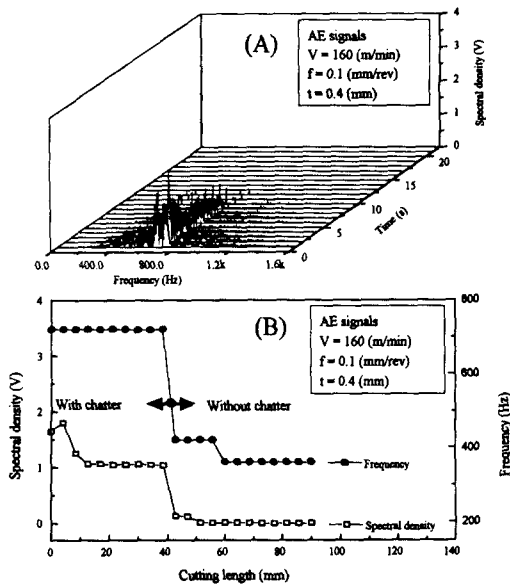


Fig. 15 Behavior of maximum power spectral density of AE signals and its frequency

#### 4. 결 론

본 연구에서는 공구마모와 구성인선 및 채터진동과 같은 절삭 트러블이 발생할 경우 획득한 AE신호의 거동을 분석함으로써 이들 신호에 의한 각 트러블의 감시 가능성을 검토함과 동시에, 단일(AE) 센서에 의한 다중 절삭 트러블의 In-process 감시에 적용할 수 있는 데이터를 축

적할 목적으로 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 플랭크마모폭의 증가에 따라  $AE_{rms}$ 는 증가하며,  $AE_{rms}$ 에 의한 플랭크마모폭의 감시기법을 제시하였다.
2. 구성인선의 발생은  $AE_{rms}$ 의 거동에 큰 영향을 미치며,  $AE_{rms}$  곡선의 2차 도함수곡선을 활용하여 구성인선을 감시할 수 있다.
3. 채터 발생시 AE신호의 스펙트럼 밀도와 주파수는 특별한 거동을 보이며, AE신호를 주파수 분석하는 방법에 의해 채터진동을 감시할 수 있음을 확인하였다.
4. 단일(AE) 센서에 의한 다중 절삭 트러블의 감시에 적용할 수 있는 데이터를 축적하였다.

후기

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

#### 참고문헌

- 1) A. G. Ulsoy, Y. Koren and F. Rasmussen, "Principal Developments in the Adaptive Control of Machine Tools", Trans. ASME, J. Dyn. Sys., Vol. 105, pp. 107-112, 1983.
- 2) I. Inasaki, S. Aida and S. Fukuoka, "Monitoring System for Cutting Tool Failure Using an Acoustic Emission Sensor", JSME International Journal, Vol. 30, No. 261, 1987.
- 3) T. Blum, I. Suzuki and I. Inasaki, "Development of Condition Monitoring System for Cutting Tools Using an Acoustic Emission Sensor", Bull. Japan Soc. of Prec. Eng., Vol. 22, No. 4, pp. 301-308, 1988.
- 4) I. Inasaki and S. Sukvittayawong, "Monitoring and Optimization of Turning Process", doctoral thesis, Keio University, 1993.
- 5) D. V. Hutton and Q. Yu, "On the Effects of a Built-Up Edge on Acoustic Emission in Metal Cutting", Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 112, May, pp.

184-189, 1990.

- 6) M. Rahman, "In-Process Detection of Chatter Threshold", Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 110, pp. 44~50, 1988
- 7) S. C. Lin and M. R. Hu, "Low Vibration Control System in Turning", Int. J. Mach. Tools Manufact, Vol. 32, No. 5, pp. 629~640, 1992.
- 8) 원종식, 조대현, 이상태, 정윤교, "절삭저항의 주파수분석에 의한 채터진동의 감시", 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp.97-102, 1999.
- 9) D. A. Dornfeld and E. Kannatey-Asibu, "Acoustic emission during orthogonal metal cutting" Int. J. Mech. Sci. Vol. 22, pp. 285-296, 1980
- 10) E. Kannatey-Asibu Jr. and D. A. Dornfeld, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting", Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 103, August, pp. 330-340, 1981.