

# AE 신호 분석에 의한 구성인선의 감지

오민석\*, 원종식\*\*, 정윤교\*\*\*

## Detection of Built-up Edge by AE Signal Analysis

Min Seok Oh\*, Jong Sik Won\*\*, and Youn Gyo Jung\*\*\*

### ABSTRACT

This paper investigates the feasibility of using acoustic emission signal analysis for the detection of built-up edge during machining. Experiments were conducted on a CNC-lathe using conventional carbide insert tools under various cutting conditions. The cutting forces were also measured for comparisons. Experimental evidence is presented which indicates that the presence of a built-up edge can significantly affect the generation of acoustic emission in metal cutting. It is shown that under conditions in which a built-up edge is generated, the variation of  $AE_{rms}$  signal with cutting speed can be quite different from the generally accepted linear, monotonic increase as previously reported. The feasibility of utilizing  $AE_{rms}$  in built-up edge sensing is suggested.

**Key Words** : Acoustic emission sensor(AE 센서), Cutting speed(절삭속도), Cutting force(절삭저항) Built-up edge(구성인선), AE RMS voltage(실효치전압), Surface roughness(표면거칠기) Threshold of cutting speed(임계절삭속도)

### 1. 서론

산업이 발전함에 따라 생산시스템은 그 효율을 높이기 위하여 자동화·무인화를 지향하고 있다.

이에 따라 최근의 생산시스템은 숙련된 기계운전자들의 감각에 의존하여 판단했던 절삭현상 즉 공구파손, 공구마모, 구성인선 등을 각종 센서에 의하여 감시하는 기법의 도입을 필요로 하고 있으며 이와 관련한 많은 연구<sup>(1~4)</sup>가 활발히 진행되어 왔다.

가공 중 구성인선이 생기게 되면 가공물의 표면 거칠기 상태가 나빠지게 된다. 따라서 자동화·무인화된 절삭가공 시스템에서 고품위의 가공물을 얻기 위해서는 작업자를 대신하여 구성인선의 발생여

부를 감시하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 이와 관련하여 I. Inasaki<sup>(5)</sup>는 절삭저항값의 크기와 변동폭의 분석에 의한 구성인선 감지법을 제안하였고, D. V. Hutton과 Q. Yu<sup>(6)</sup>는 구성인선의 발생이  $AE_{rms}$ 값을 증대시킨다고 제안하여  $AE_{rms}$ 에 의한 구성인선의 감지 가능성을 제시한 바 있다.

그러나, I. Inasaki<sup>(5)</sup>의 절삭저항 분석에 의한 구성인선의 감지 방법은 첫째 Force 센서를 장착함에 따른 가공시스템의 강성 저하, 둘째 센서의 가격이 현재로서는 고가인 경제적인 측면을 고려할 때 생산현장에서 실용화하기에는 다소 문제가 있다고 하겠다. 한편 AE 센서는 공구의 생크 부분에 부착하여 사용하므로 절삭시스템의 강성을 거의 감소시키지 않으며 크기도 작아서 취급이 용이하다.

\* 창원대학교 대학원 기계공학과

\*\* 창원대학교 기계공학과

이 때문에 최근 이를 이용한 절삭현상의 인 프로세스 감시에 관한 많은 연구가 이루어지고 있다. (1,3,4,7,8) AE 신호와 구성인선과의 관계는 D. V. Hutton과 Q. Yu<sup>(6)</sup>에 의하여 밝혀진 바 있으나 구체적인 구성인선 감지 방법에 대한 연구는 아직 발표된 바가 없다.

따라서 본 연구에서는 AE 신호를 분석하여 구성인선을 감지할 수 있는 가능성을 검토하고 구성인선의 인 프로세스 감시에 사용 가능한 기초적인 데이터를 축적하기 위하여  $AE_{rms}$ , 절삭저항, 가공면의 표면거칠기, 가공면의 형상, 공구인선의 형상 등을 비교 검토하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서는 주축모터의 소비동력이 7.5 kW 인 CNC선반을 사용하여 외경 97.5 mm, 내경 25 mm, 재질이 SM45C인 중공형 공작물을 단면 절삭하였다.

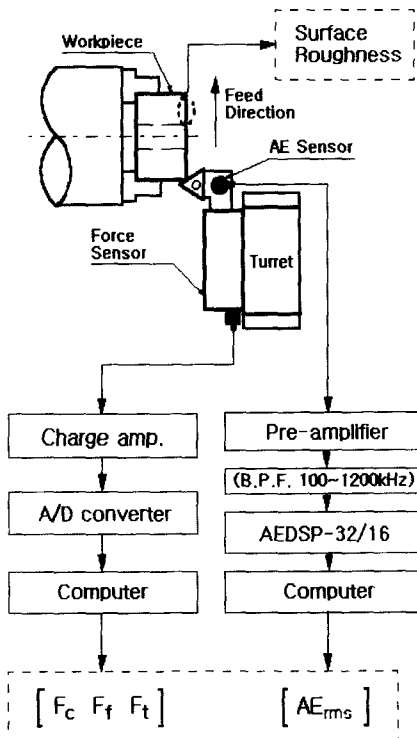


Fig. 1 Schematic of experimental setup

Fig.1은 실험장치의 개략도 이다. 절삭저항(주분력:  $F_c$ , 배분력:  $F_f$ , 이송분력:  $F_t$ )은 압전소자형 공구동력계(Tool-dynamometer)로 측정하였고 AE 신호는 광대역 AE 센서로 측정하였다. 측정된 AE 신호는 전치 증폭기(40dB)에서 증폭된 후 대역 통과 필터(100~1200kHz)에서 필터링된 다음 AEDSP-32/16에서 디지털 신호로 변환되어 컴퓨터에 입력되도록 처리하였다. 입력된 디지털 신호는 AE 전용 소프트웨어인 Mistras 프로그램을 사용하여 처리하였다. 공구 홀더는 대한중석의 WTENN2525 M16을, 인서트는 TNMG160404 P20을 채택하였다. 공구인선의 선단과 가공표면의 관찰은 실물 현미경으로 관찰하고 가공면의 표면거칠기는 접촉식 표면거칠기 측정기를 사용하였다. Table 1,2는 각각 실험장치 사양 및 실험에 사용한 절삭 조건을 나타낸다.

Table 1 Specifications of experimental equipments

Instruments	Specification
CNC lathe	Hi-ECO 10(Hwacheon Co.)
Workpiece	SM45C(O.D.=97.5 mm, I.D.=25 mm)
Tool holder	WTENN2525 M16(Korea Tungsten Co.)
Insert tip	TNMG160404 P20(Korloy Inc.)
AE sensor	WD(PAC.)
Pre-amplifier	1220A(PAC.)
AE main	AEDSP-32/16(PAC.)
Tool - dynamometer	Piezo Type 9257B(Kistler Co.)
Charge amp.	5019A(Kistler Co.)
A/D converter	PCL-812(Advantech Co., Ltd.)
Surface roughness-tester	SV-624(Mitutoyo)
Object microscope	KSZ-1A(Samwon Scientific Ind, Co.)

Table 2 Cutting conditions used for experiments

Items	Conditions
Feed direction	Outer diameter → Inner diameter.
Cutting speed(m/min)	46 ~ 180
Feed rate(mm/rev)	0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30
Depth of cut(mm)	0.15, 0.20, 0.25, 0.30
Coolant	Dry
Sampling rate	AE : 2 MHz, Cutting force : 100 Hz

절삭 중에 발생된 AE 신호 파형으로부터  $AE_{rms}$  값은 다음의 식에 의해 구하여진다.

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

여기에서,  $V(t)$ : 신호함수  $t$ : 시간

$\Delta T$ : 신호발생주기

본 연구에서는 각 절삭 조건마다 신호획득 시간을 약 5초로하고 이 시간 내에서 0.256ms 시간의 AE 신호파형(Hit)을 30개 추출하여 각 Hit별로  $AE_{rms}$ 를 구한 다음, 이들의 평균값을  $AE_{rms}$ 로 정의하였다.

### 3. 구성인선과 $AE_{rms}$ 와의 관계

먼저 구성인선이 발생하지 않을 경우의  $AE_{rms}$ 의 거동을 알아보기 위하여 구성인선이 발생하지 않을 절삭조건(바이트의 상면경사각을  $30^\circ$ 로 성형하고 절삭속도는 94.2~367.5 m/min의 고속으로 하였음.)으로 절삭실험을 하였다. Fig.2는 이 경우의 절삭속도 변화에 대한  $AE_{rms}$ 의 거동은 나타낸다. 그림에서  $AE_{rms}$ 는 절삭속도가 감소함에 따라 거의 선형적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었으며 이는 이미 보고된 바 있는 여러 연구자들의 연구결과<sup>(6~7)</sup>와 일치하는 현상이었다.

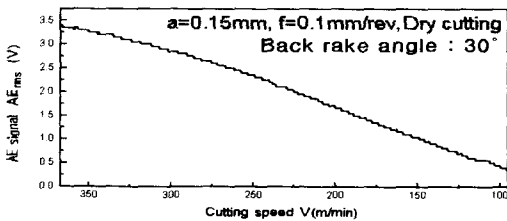


Fig. 2  $AE_{rms}$  versus cutting speed(without B.U.E.)

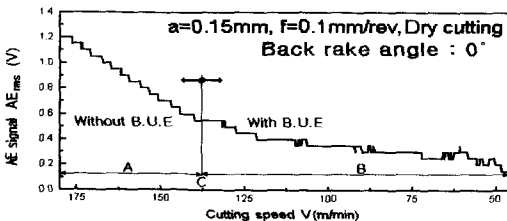


Fig. 3  $AE_{rms}$  versus cutting speed(with B.U.E.)

그리고 구성인선이 발생할 때와 발생하지 않을 때의  $AE_{rms}$  거동을 알아보기 위하여 상면경사각이  $0^\circ$ 인 바이트를 사용하여 절삭속도를 46m/min에서 180 m/min으로 변화시키며 절삭실험을 하였다.

이 때의 절삭속도 변화에 대한  $AE_{rms}$ 의 변화양상을 나타낸 것이 Fig.3이다. Fig.3의 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 증가시키는 어떤 원인이 있기 때문이라고 판단된다. 그 원인은 "구성인선의 발생이  $AE_{rms}$ 값을 증가시킨다"고 주장한 바 있는 D. V. Hutton과 Q. Yu<sup>(6)</sup>가 밝힌 내용과 관련지어 해석할 수 있다고 사료된다.

D. V. Hutton과 Q. Yu<sup>(6)</sup>에 의하면 구성인선의 발생에 따라 바이트의 실제 경사각은 Fig.4에서 보는 바와 같이  $\alpha$ 에서  $\alpha_a$ 로 증가됨에 따라 전단각이 변화하게 되고 동시에 구성인선의 높이 b부분이 실제 절삭날 역할을 하게되어 공작물과 공구의 재질이 동일해짐에 의한 마찰조건의 변화로 인하여  $AE_{rms}$ 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. 그러므로 구성인선의 발생은  $AE_{rms}$ 의 변화 추세를 변경시킨다는 사실을 확인할 수 있었다.

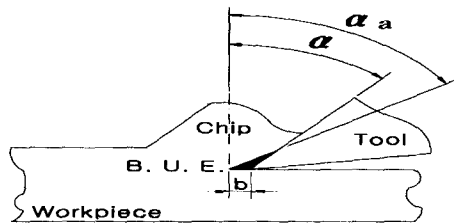


Fig. 4 Chip tool interface with built-up edge

### 4. $AE_{rms}$ 신호 분석에 의한 임계절삭속도 결정

Fig.3에서 보는 바와 같이 절삭속도의 감소에 따른  $AE_{rms}$ 의 변화 추세는 C점 근방에서부터 감소 추세가 완만해지는 것으로 보아 이 점 근방에서 구성인선의 발생이 시작된다고 사료된다. 그러나 그 지

점은 불명확하므로 수학적 해석에 의하여 그 정확한 위치를 정의할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 Fig.5에서 보는 바와 같이 측정된  $AE_{rms}$ 의 변화곡선(①)을 곡선 보간한 곡선(②)에 대한 2차 도함수(곡선(③))값이 최대가 되는 곳, 즉 C점이 곡선②의 기울기 변화가 가장 심한 곳이며 바로 이 점을 구성인선 발생의 시작점(임계절삭속도  $V_l$ )으로 결정하였다. 이후 모든 절삭조건에서의 임계절삭속도는 이와 같은 방법에 의하여 결정하였다.

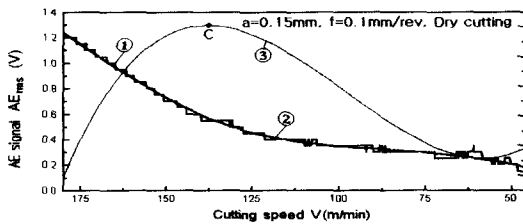


Fig. 5  $AE_{rms}$ (①), curve fitted  $AE_{rms}$ (②), and second order derivative(③) of curve ② versus cutting speed

### 5. 임계절삭속도 결정법에 대한 신뢰성 검토

본 절에서는 앞 절에서 기술한 임계절삭속도의 신뢰성을 검토하기 위하여  $AE_{rms}$ 의 측정과 병행하여 절삭저항의 변화, 가공면 표면거칠기의 변화 및 공구인선의 구성인선 부착 여부 등을 비교하였다.

Fig.6 (A)는 절삭속도의 변화에 대한  $AE_{rms}$ 의 변화, Fig.6 (B)는 절삭속도의 변화에 대한 절삭저항의 3분력( $F_c$ ,  $F_t$ ,  $F_f$ )의 변화, Fig.6 (C)는 각 절삭속도에 대응하는 가공면의 위치에 대한 표면거칠기의 변화, Fig.6 (D), (E)는 임계절삭속도를 경계로 한 고절삭속도 영역과 저절삭속도 영역에서의 가공표면과 공구인선의 사진을 나타내고 있다.

Fig.6 (B)에서 보듯이 절삭저항은 임계절삭속도 보다 낮은 절삭속도 영역에서 점차 감소하는데 이는 구성인선의 발생에 따라 절삭날의 실제 경사각이 Fig.4의  $\alpha$ 에서  $\alpha_a$ 로 증가됨에 따른 현상으로 판단되고 Fig.6 (D)에서의 가공표면은 임계절삭속도를 기점으로 한 저절삭속도 영역에서 구성인선의 흔적과 거친 가공면을 확인할 수 있었다.

또한 Fig.6 (E)에서 보는 바와 같이 임계절삭속도를 기점으로 한 고절삭속도 영역을 가공한 공구인선에서는 구성인선이 관찰되지 않았으며 저절삭

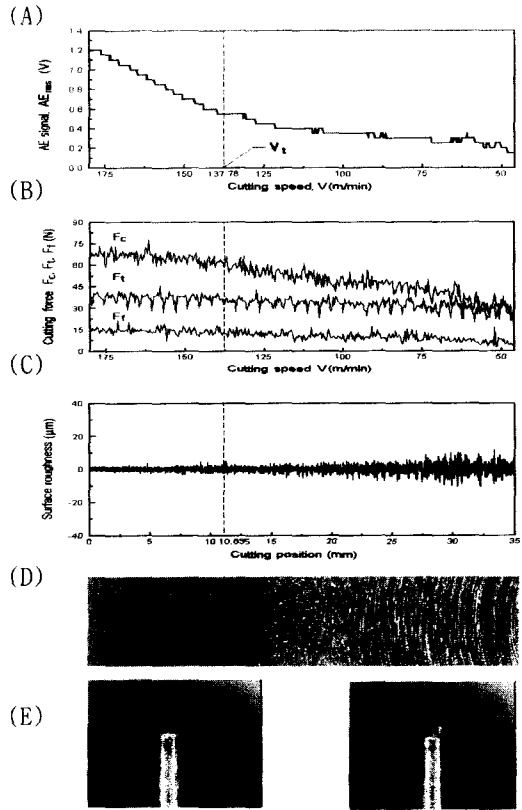


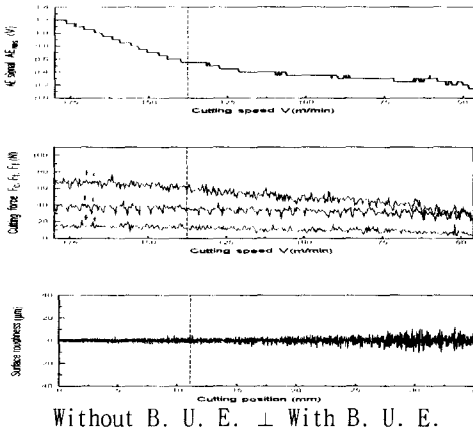
Fig. 6 (A)  $AE_{rms}$  versus cutting speed  
(B) Cutting forces versus cutting speed  
(C) Surface roughness versus cutting position  
(D) Photo of cut surface  
(E) Photo of used tool edge

속도 영역을 가공한 공구인선에서는 표면거칠기에 영향을 주는 구성인선의 존재가 확인되었다.

한편 여기서 주목할 사실은 Fig.6 (C)에서 보는 바와 같이 표면거칠기가 임계절삭속도점부터 바로 나빠지는 것이 아니라 임계 절삭속도 점보다 약 15~20 m/min 정도 낮은 절삭속도부근에서 명확한 변화가 있다는 사실이다. 이는 임계절삭속도 근처에서는 구성인선이 발생하더라도 그 크기가 작으며 구성인선의 탈락물이 칩과 함께 떨어져 나가므로 표면 거칠기에 별 영향을 미치지 못하고 임계절삭속도보다 약 15~20 m/min 정도 낮은 저속이 되면 구성인선의 발생, 성장, 분열, 탈락이 활발해지며 가공면의 표면을 더욱 거칠게 한다는 사실을 뒷받침하는 현상이다. 따라서  $AE_{rms}$ 는 가공면의 표면거

칠기에는 직접적으로 영향을 미치지 않는 미세한 구성인선의 발생까지도 감지할 수 있는 민감성을 갖는다고 할 수 있다.

(A)  $a = 0.15 \text{ mm}$ ,  $f = 0.10 \text{ mm/rev}$



(B)  $a = 0.30 \text{ mm}$ ,  $f = 0.10 \text{ mm/rev}$

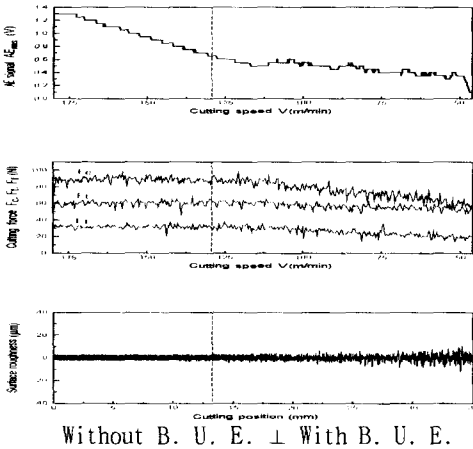


Fig. 7  $AE_{rms}$  and cutting forces versus cutting speed and surface roughness versus cutting position for various cutting conditions

Fig.7 (A),(B)는 이송을 0.1 mm/rev로 하고 절삭깊이를 각각 0.15, 0.30 mm로 변화시켰을 때 절삭속도의 변화에 대한  $AE_{rms}$ 와 절삭저항의 변화 및 각 절삭속도에 대응하는 가공면의 위치에 대한 표면거칠기의 변화를 비교 도시한 그림이다. Fig.7

(A)와 Fig.7 (B)는 예상한 바와 같이 유사한 거동을 보였으며 또한 절삭저항 및 표면거칠기의 변화는  $AE_{rms}$ 의 변화에 의해 결정된 임계절삭속도보다 약 15~20 m/min정도 낮은 절삭속도에서 명확하게 나타남이 확인되었다.

이러한 현상들을 종합해 볼 때 본 실험에서 제시한  $AE_{rms}$  신호분석에 의한 임계절삭속도 결정법에 대한 신뢰성과  $AE_{rms}$ 에 의한 구성인선의 감지가 절삭저항의 분석에 의한 구성인선의 감지보다 민감성을 가짐을 확인할 수 있었다.

### 6. 절삭조건과 임계절삭속도와와의 관계

본 절에서는 전술한 방법으로 결정한 임계절삭속도와 절삭조건(절삭깊이 및 이송)과의 관계를 고찰하였다.

Fig.8은 AE센서를 이용하여 구한 임계절삭속도와 절삭깊이 및 이송의 관계를 도시한 그림이고 Fig.9는 Force센서를 이용하여 구한 임계절삭속도와 절삭깊이 및 이송의 관계를 도시한 그림이다.

이 두 그림에서의 공통적인 현상은 절삭깊이와 이송의 증가에 따라 임계절삭속도가 감소하는 경향을 가진다는 것이다. 그러나 AE센서를 사용한 경우가 Force 센서를 사용한 경우보다 데이터의 산포가 크게 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 AE센서의 특성상 신호 전달 경로에 영향을 받기 쉬운 민감성을 갖는 데에서 기인한다고 판단된다.

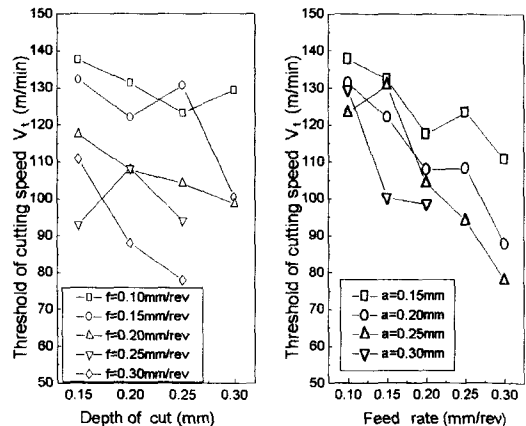


Fig. 8 Threshold of cutting speed(deduced from  $AE_{rms}$ ) versus (A) depth of cut and (B) feed rate

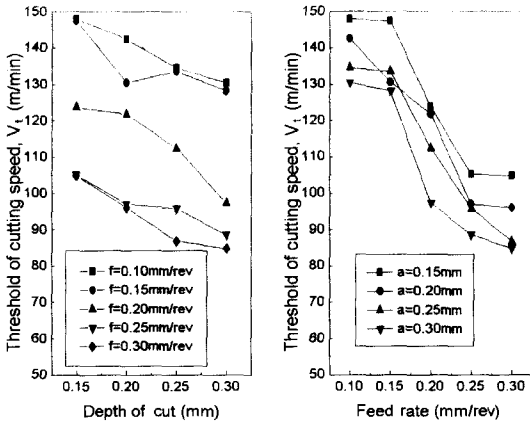


Fig. 9 Threshold of cutting speed(deducted from force signal) versus (A) depth of cut and (B) feed rate

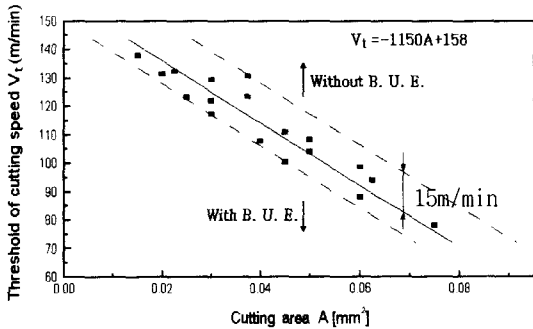


Fig. 10 Threshold of cutting speed versus cutting area

이상의 결과를 종합적으로 고찰하기 위하여 Fig.10에서는 절삭면적 A(이송×절삭깊이)와 임계 절삭속도와와의 관계를 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 임계절삭속도는 절삭면적의 증가에 따라 어느 정도 산포를 가지면서 선형적으로 감소되는 것을 알 수 있다. 그림에서 상·하부의 점선은 실제 데이터 값의 최대 산포 범위를 나타내고 두 점선 사이의 실선은 절삭면적에 대한 임계절삭속도를 나타내는 임계선이다. 여기서 상부 점선과 임계 절삭속도선과의 산포는 15 m/min 정도이며 이 정도의 산포는 제 5절에서 전술한 내용, 즉 "표면거칠기의 변화는  $AE_{rms}$ 의 변화에 의해 결정된 임계절삭속도보다 약 15~20 m/min정도 낮은 절삭속도에서 명확하게 나타남"을 고려할 때 상부 점선과 임계선

사이의 절삭속도 조건으로 절삭하는 경우에는 설령 구성인선이 다소 발생한다 하더라도 가공면의 표면 거칠기에는 중대한 영향을 미치지 않는 영역이라 할 수 있다.

따라서 임의의 절삭면적을 갖는 절삭시 구성인선에 의한 가공면의 표면거칠기 악화를 염려하지 않아도 되는 임계절삭속도는 Fig.10의 임계선을 기준으로 하여 결정할 수 있다고 판단된다.

## 7. 결론

본 연구에서는  $AE_{rms}$ 를 분석하여 구성인선의 감지방법을 찾고자 하였으며 다음의 결론을 얻었다.

- (1)  $AE_{rms}$ 의 측정에 의하여 구성인선을 감지할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 절삭깊이와 이송의 증가는 임계절삭속도를 감소시킨다.
- (3) 구성인선이 가공면의 품질을 악화시키지 않는 안정된 절삭조건의 범위를 설정할 수 있었다.
- (4)  $AE_{rms}$ 에 의한 구성인선의 감지방법은 절삭저항에 의한 구성인선감지 방법에 비하여 센서의 특성상 측정치의 산포는 있지만, 민감성에서는  $AE_{rms}$ 에 의한 쪽이 더 우수함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. I. Inasaki, "In-process Detection of Cutting Tool Breakage with Acoustic Emission Signals," Faculty of Science and Technology, Keio University, Yokohama, Japan, 1985.
2. M. S. Lan and D. A. Dornfeld, "In-Process Tool Fracture Detection," Trans. ASME, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.106, pp. 111-118, 1984.
3. 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.
4. 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.
5. I. Inasaki and S. Sukvittayawong, "Monitoring and

- Optimization of Turning Process," doctoral thesis, Keio University, 1993.
6. 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.
  7. E. Kannetey-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.
  8. Y. Miwa, I. Inasaki and S. Yonetsu, "In-Process Detection of Tool Damage by Acoustic Emission," Trans. JSME, Ser. C, pp. 1680-1689, 1981.