

절삭조건과 AE 신호들과의 관계에 관한 실험적 연구

원종식*, 조종래*, 정윤교**

Experimental Study on the Relationship between Cutting Conditions and AE Signals

Jong-Sik Won*, Jong-Rae Cho*, Yoon-Gyo Jung**

Abstract

This paper investigates the relationship between cutting conditions and Acoustic Emission(AE) signals: AE_{avg} , AE_{rms} , AE_{mode} , as the base working to monitor the tool wear with in-process. For this purpose, cutting tests were conducted on a CNC lathe with comprehensive cutting conditions. It is known that AE_{avg} and AE_{rms} are increased as the increasing of cutting velocity and depth of cut respectively. The new parameters, derived from AE_{avg} and AE_{rms} , which may be used for the in-process detection of tool wear is discussed. It is also known that AE_{mode} may also be applied for in-process monitoring to make the self diagnosis system because of its stability to the variation of cutting conditions.

Keyword : Acoustic emission signal(음향방출신호), AE_{avg} (AE 평균진폭레벨), AE_{rms} (AE 실효치전압), AE_{mode} (AE 최빈치), Tool wear(공구마모), Cutting velocity(절삭속도), Feed(이송), Depth of cut(절삭깊이).

1. 서론

자동화, 무인화 생산시스템에서는 그 시스템을 구성하고 있는 하나의 공정에서 발생한 trouble이 후속공정에 미치는 영향이 지대하므로, 시스템을 원활히 동작시키기 위해서는 제반 공정을 감시하여 항상 최적의 상태를 유지해 줄 필요가 있다. 1960년대 후반 NC공작기계가 생산현장에 도입된 이래로 생산시스템에 컴퓨터를 이용하고자 하는 소위 CIM System에 관한 연구와 함께 생산시스템

의 제반 상태 변화를 각종 Sensor를 통하여 감시 진단할 수 있는 시스템(Monitoring & Diagnosis System)에 관한 연구가 이루어지고 있다^{1,2)}.

절삭가공이 추가 되는 생산시스템에서는 기계 자체에서 발생할 수 있는 고장이나 절삭과정에서 발생할 수 있는 중요한 현상, 즉 공구의 마모, 칩핑, 파손, 채터, 구성인선 등을 자동적으로 진단할 수 있는 시스템의 도입이 필수적이다. 이들 중 특히 공구마모 및 파손의 감시는, 공구교환의 최적 시점을 찾아냄으로써, 생산시스템의 고 능력

* 창원대학교 기계공학과 대학원

** 창원대학교 기계공학과

화를 실현할 수 있는 중요한 요소라 할 수 있으며 이에 관한 연구³⁻⁴⁾는 활발한 편이다. 또한 근래에는 AE Signal을 적절하게 변환한 AE 실효치, 전압(AE_{rms}), 카운트(Count), 히트(Hit), AE 평균진폭레벨(AE_{avg}), AE 최빈치(AE_{mode}) 등의 parameter를 이용한 공구마모 감시에 관한 연구⁵⁻⁹⁾가 활발히 진행되고 있다. 그러나 종래의 연구들은 마모에 따른 AE parameter 들의 거동을 단편적으로 규명하였으며, 아직 AE 신호와 절삭조건들 사이의 관계에 대한 종합적인 거동 규명에 대한 연구는 희박한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 AE 신호가 공구마모의 영향을 받을 뿐 아니라 절삭조건들의 종류 및 변화에 따라서도 영향을 받는다는 데 주목하고, 절삭속도, 절삭깊이, 이송 등의 절삭조건과 AE_{avg}, AE_{rms}, AE_{mode} 등의 AE parameter와의 관계를 고찰하여 절삭조건들의 변동에는 영향을 받지 않으면서, 공구마모에만 영향을 받는 AE 신호의 parameter를 찾아, 공구마모 In-process감시에 AE의 적용가능성을 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 실험방법

본 실험에서는 주축모터의 소비동력이 7.5 kW인 CNC 선반으로 직경 100 mm, 길이 50 mm인 STD11 재질의 피삭재를 외주가공하였다. 신호측정에 사용되어진 AE 센서는 PAC.(Physical Acoustic Corporation)사의 광대역형 센서를 이용하였고, 적절한 치구를 제작하여 공구홀더의 샹크에 AE 센서를 부착시켰다. Table 1은 실험장치의 사양을, Fig. 1은 실험장치의 개략도를 보여주고 있으며, 본 실험의 실험조건 Table 2와 같다.

AE 신호의 처리 과정은, 센서로부터 감지된 AE 신호를 Pre-amplifier(40dB)에서 증폭하여 Band pass filter(100~1200kHz)에서 필터링한 다음 AEDSP-32/16에서 Digital 신호로 변환되어 PC에 입력되게 하였다. 입력된 Digital 신호는 AE 전용 software인 Mistras 프로그램을 사용하여 처리하였다.

Table 1. Experimental equipments

Instruments	Specifications
CNC Lathe	Hi-ECO 10 (Hwacheon Co.)
Workpiece	STD11 (D:100mm, L:50mm)
Tool Holder	PTGNI.2525-M16 (Korloy Inc.)
Insert Tip	NC30P TNMG160404 (Korloy Inc.)
AE Sensor	WD (PAC.)
Pre-amplifier	1220A (PAC.)
AE Main	AEDSP-32/16 (PAC.)

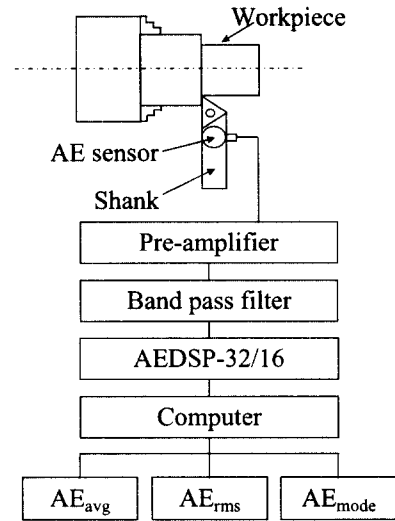


Fig. 1 Experimental setup

Table 2. Experimental conditions

Items	Conditions
Cutting Velocity (m/min)	100, 120, 140, 160, 180, 200, 220
Feed (mm/rev)	0.10, 0.15, 0.20, 0.25
Depth of Cut (mm)	0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5
Coolant	Dry
Sampling Rate	2MHz

3. AE 신호의 측정 방법

본 연구에 사용된 AE parameter는 AE_{avg}, AE_{rms}, AE_{mode}이며, 이들 중 AE_{avg}는 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이, 절삭 중에 발생된 AE신호파형을 전파정류하여 샘플링한 데이터의 평균치를 구한 AE평균진폭레벨을 AE_{avg}로 정의하였고, 식(1)에 의해서 구해진다.

AE_{rms}(Root Mean Square)값은 다음의 식(2)에 의해서 구해지는데, 본 연구에서는 각 절삭조건마다 신호획득 시간은 약 5초로하고, 이 시간 내에서 0.256ms의 AE 신호 파형(Hit)을 30개 추출하여 각 Hit별로 AE_{rms}를 구한 다음 이들 30개 data의 평균값을 AE_{rms}로 정의하였다.

AE_{mode}는 Fig. 2(c)에 나타난 것과 같이 전파정류시킨

AE신호에서 각 파형의 진폭 중에서 출현빈도가 가장 높은 진폭의 신호값을 AE_{mode} 라 정의하고, 식(3)으로 표현할 수 있다.

$$AE_{avg} = \frac{1}{n} \left| \sum_{i=1}^n f(x) \right| \quad (1)$$

여기서, $f(x)$: Rectified $AE_{waveform}$

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

여기서, $V(t)$: 신호함수, t : 시간

ΔT : 신호발생 주기이다.

$$AE_{mode} = Mo [AE_{amp}] \quad (3)$$

여기서, AE_{amp} : Amplitude of $AE_{waveform}$

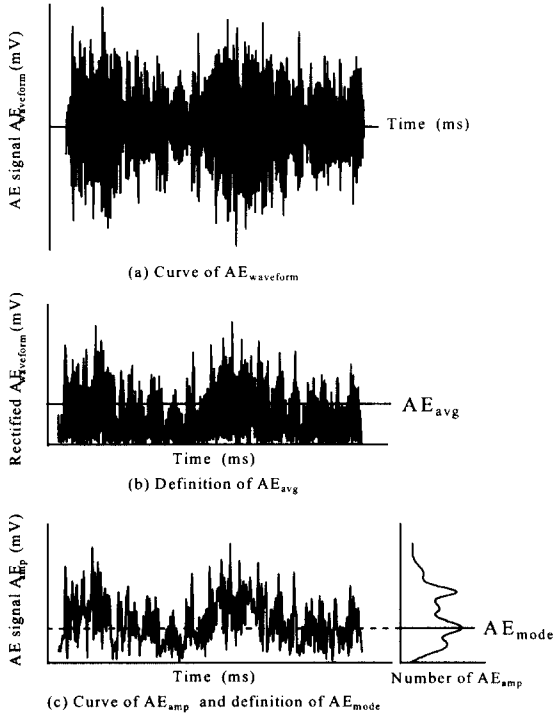


Fig. 2 Definition of AE_{avg} and AE_{mode}

4. 실험결과 및 고찰

4.1 AE_{avg} 와 절삭조건과의 관계

Fig. 3은 이송 0.15 mm/rev, 절삭깊이 0.1, 0.2, 0.3 mm일 때, 절삭속도의 변화에 따른 AE_{avg} 값의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 AE_{avg} 는 절삭속도가 커짐에 따라 증가하는 경향이 있음을 알 수 있는데, 이것은 전단면에서의 변형률속도(strain rate)의 증가에서 기인하는 것으로 판단되며 이러한 경향은 이송이 다른 조건에서도 동일한 경향을 보였다.

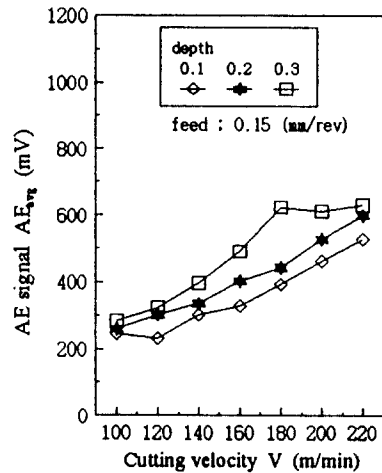


Fig. 3 Relation between AE_{avg} and cutting velocity

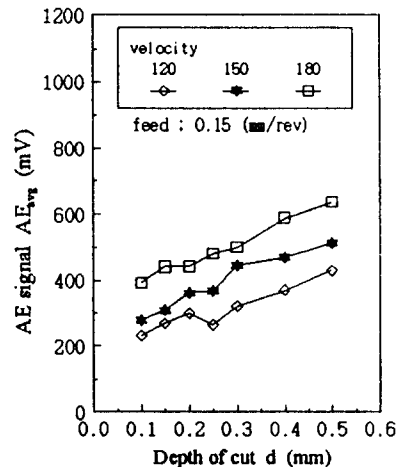


Fig. 4 Relation between AE_{avg} and depth of cut

Fig. 4는 이송이 0.15 mm/rev, 절삭속도를 각각 120, 150, 180 m/min로 하였을 때, 절삭깊이의 변화에 따른 AE_{avg} 값의 변화를 나타내고 있다. 여기에서도 AE_{avg} 는 절삭깊이가 증가함에 따라 비례적으로 증가함을 알 수 있고, 이는 변형을 받는 재료의 체적 증가에서 기인하는 것으로 보이며, 이러한 경향은 이송이 다른 조건에서도 동일하였다.

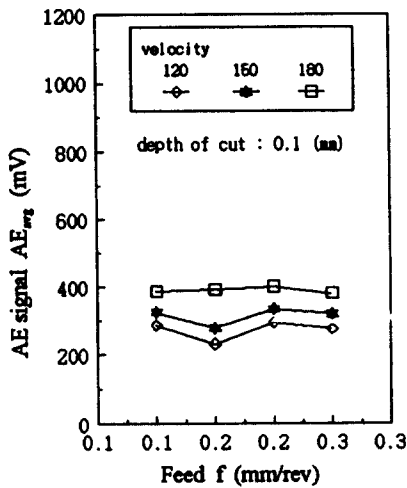


Fig. 5 Relation between AE_{avg} and Feed

Fig. 5는 절삭깊이를 0.1 mm로 하고, 절삭속도를 120, 150, 180 m/min으로 변화시켰을 때, 이송의 변화에 따른 AE_{avg} 값의 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서 이송이 증가하여도 AE_{avg} 값은 크게 변하지 않음을 알 수 있고, 이러한 경향은 절삭깊이가 다른 경우에도 유사한 양상을 보였다.

4.2 AE_{rms} 와 절삭조건과의 관계

Fig. 6은 이송을 0.15 mm/rev, 절삭깊이를 각각 0.1, 0.2, 0.3 mm로 한 경우의 절삭속도의 변화에 따른 AE_{rms} 의 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서 AE_{rms} 는 절삭속도가 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 것을 알 수 있는데 이것은 전단면에서의 변형속도의 증가에서 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 이송을 0.15 mm/rev, 절삭속도를 각각 120, 150, 180 m/min인 조건에서 절삭깊이를 0.1 mm에서 0.5 mm의 범위에서 변화시키며 실험한 경우의

절삭깊이에 대한 AE_{rms} 를 보여주고 있다. 이 그림에서도 AE_{rms} 는 절삭깊이의 증가에 따라 증가함을 알 수 있으며, 이는 변형을 받는 재료의 체적 증가에서 기인하는 것으로 판단된다.

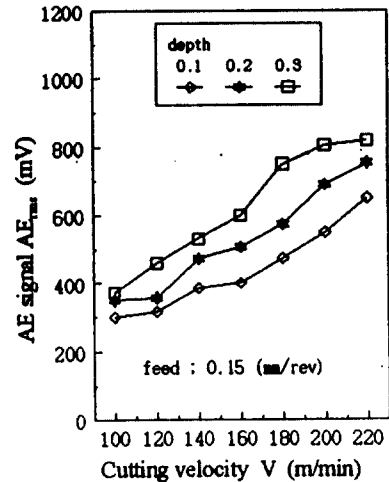


Fig. 6 Relation between AE_{rms} and cutting velocity

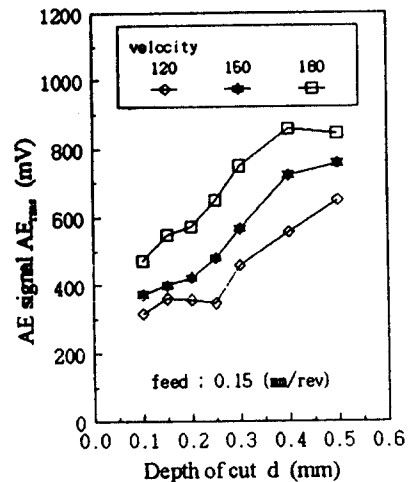


Fig. 7 Relation between AE_{rms} and Depth of cut

Fig. 8은 절삭깊이를 0.1 mm, 절삭속도를 각각

120, 150, 180 m/min로 하고 이송을 0.1 mm/rev에서 0.25 mm/rev의 범위에서 실험한 경우의 이송에 대한 AE_{rms} 를 보여주고 있다. 여기서 AE_{rms} 는 이송의 변화에 대하여 그다지 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 이송과 AE신호의 관계에 대하여 D. Kececioglu¹⁰⁾는 이송의 증가에 따라 변형률속도가 증가하고 AE_{rms} 가 감소한다고 보고한 바 있으며, D.A. Dornfeld 등¹¹⁾은 이러한 현상이 모든 절삭속도 영역에서 항상 나타나는 현상은 아니며 절삭속도에 따라서 이송의 변화에도 불구하고 일정한 AE_{rms} 값을 나타낼 수도 있으며 그 이유는 공구와 칩 사이의 마찰길이의 증가에 따른 AE_{rms} 의 증가 요인 때문이라고 보고한 바 있다. 본 실험의 절삭속도 범위에서 이송의 증가에 따라 AE_{rms} 가 그다지 영향을 받지 않는 것은 이송의 증가에 따른 AE_{rms} 감소요인과 이송의 증가에 따른 공구와 칩 사이의 마찰길이 증가에 따른 AE_{rms} 증가요인의 상호 상쇄효과에서 기인하는 것으로 판단된다.

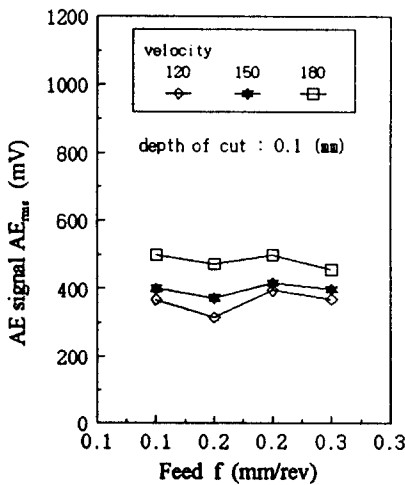


Fig. 8 Relation between AE_{rms} and Feed

4.3 AE_{mode} 와 절삭조건과의 관계

Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12는 각각 이송이 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 mm/rev인 조건에서, 절삭속도를 120, 150, 180 m/min로 변화시켰을 때, 절삭깊이에 따른 AE_{mode} 를 나타내고 있는데 이 그림들로부터 AE_{mode} 값이 이송, 절삭속도, 절삭깊이 등의 절삭조건의 변화에 무

관하게 거의 일정한 값을 나타냄을 알 수 있다. 이는 4.1절과 4.2절에서 설명한 AE_{avg} 와 AE_{rms} 가 절삭속도 및 절삭깊이의 증가에 따라 비례적으로 증가하는 것과는 대조적인 현상이었다.

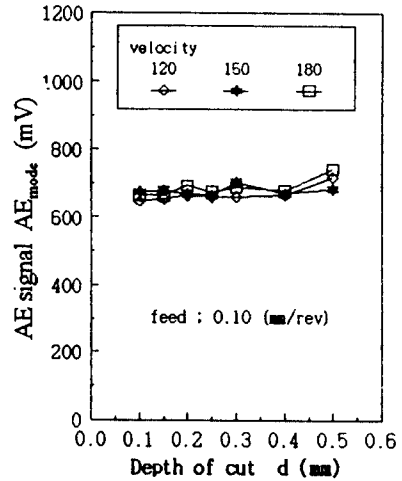


Fig. 9 Relation between AE_{mode} and Depth of cut

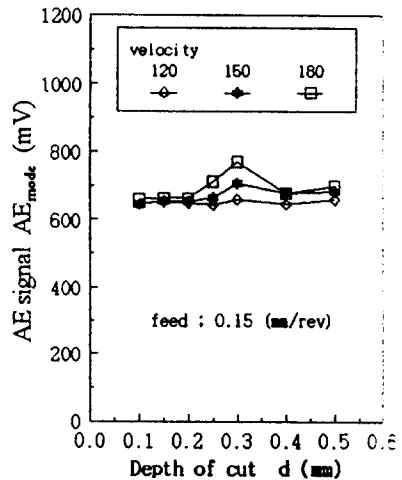


Fig. 10 Relation between AE_{mode} and Depth of cut

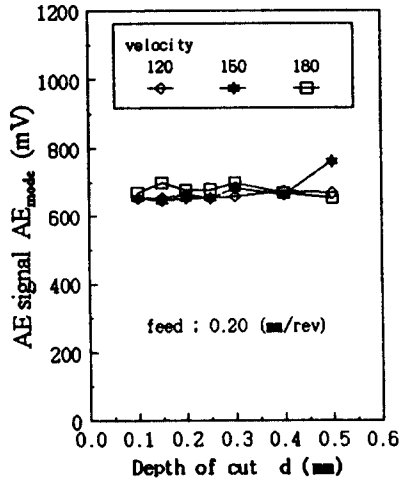


Fig. 11 Relation between AE_{mode} and Depth of cut

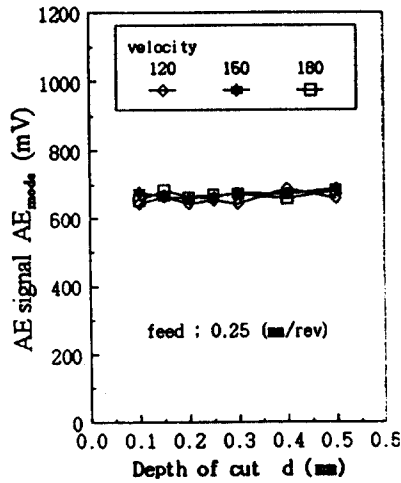


Fig. 12 Relation between AE_{mode} and Depth of cut

4.4 종합적 고찰

4.1절에서부터 4.3절까지 절삭조건에 대한 AE parameter들과의 관계를 고찰한 결과 AE_{avg} 와 AE_{rms} 는 절삭속도 및 절삭깊이의 증가에 따라 비례적으로 증가함을 확인하였다. 그러나 측정되어지는 AE_{avg} 와 AE_{rms} 값의 변화가 공구마모에서 기인한 것인지 혹은 절삭속도 및 절삭깊이의 변화에서 기인하는 것인지는 아직 명확하지가 않다.

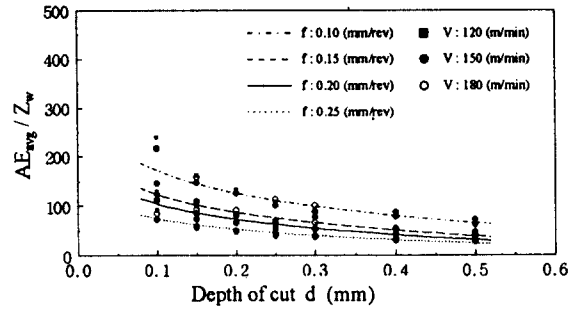


Fig. 13 Relation between AE_{avg} and Depth of cut

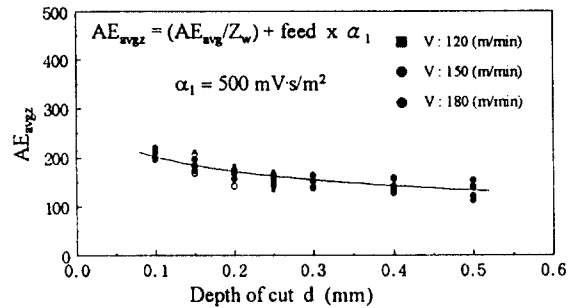


Fig. 14 Relation between AE_{avgz}/Z_w and Depth of cut

따라서 본 절에서는 절삭속도, 절삭깊이 및 이송 등이 각각 상이한 절삭조건 하에서도 공구의 마모 상태를 명확히 나타내 줄 수 있는 새로운 parameter를 설정하고자 한다.

Fig. 13은 가로축에 절삭깊이를 나타내고, 세로축에는 AE_{avg} 를 절삭률(Z_w : 절삭깊이 \times 이송 \times 절삭속도)로 나눈 값인 AE_{avg}/Z_w 를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 AE_{avg}/Z_w 는 절삭깊이의 증가에 따라 점차로 감소하며, 이송의 증가에 따라서도 감소함을 확인할 수 있는데, 이는 AE_{avg}/Z_w 가 절삭깊이와 이송이라는 두 가지 변수의 영향을 받고 있음을 나타내는 것이다. 따라서 이 두 가지 변수 중에서 이송에 따른 AE신호(AE_{avg}/Z_w)의 변화를 제거할 필요가 있다. 이를 위하여, 각 이송 조건에서의 AE_{avg}/Z_w 의 값에 이송 $\times \alpha_1$ (α_1 은 fitting 계수)의 값을 더한 AE_{avgz} 를 정의하였다. α_1 의 값은 이송의 영향을 배제하기 위하여, 각 이송별 AE_{avg}/Z_w 와 절삭깊이와의 관계를 나타내는 곡선의 방정식을 이용하여, 절삭깊이가 0.1 mm인

경우의 각 이송별 AE_{avg}/Z_w 을 구하고, 같은 방법으로 절삭깊이가 0.5 mm 인 경우의 각 이송별 AE_{avg}/Z_w 을 구한 후, 절삭깊이가 0.1 mm일 때의 각 이송별 AE_{avg}/Z_w 의 차의 합과 절삭깊이가 0.5 mm일 때의 각 이송별 AE_{avg}/Z_w 의 차의 합을 가장 작게 하는 값을 α_1 으로 결정하는 수치해석적인 과정을 거쳐 계산되었으며, 그 값은 $\alpha_1=500(mV \cdot s/m^2)$ 이 된다. 여기에서 정의된 AE_{avgz} 와 절삭깊이와의 관계를 나타낸 것이 Fig. 14이다. 이 그림에서 본 실험 조건하에서의 AE_{avgz} 값은 이송과 절삭속도가 상이한 조건하에서도 절삭깊이의 변화에 대하여서만 상관관계를 가짐을 알 수 있다.

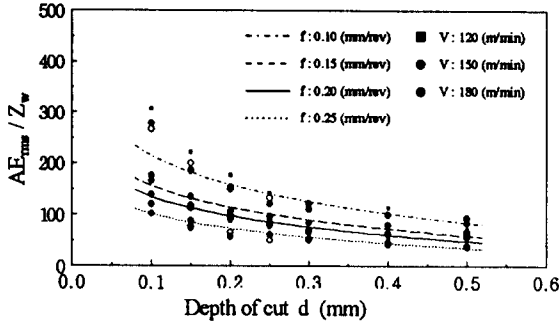


Fig. 15 Relation between AE_{avgz}/Z_w and Depth of cut

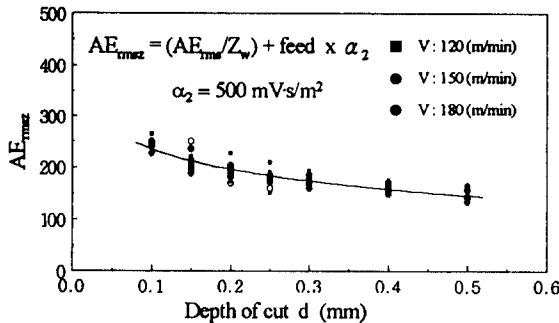


Fig. 16 Relation between AE_{avgz}/Z_w and Depth of cut

따라서, 절삭깊이와 AE_{avgz} 의 관계를 나타내는 곡선의 방정식을 이용하면, 주어진 절삭깊이의 조건에서의 AE_{avgz} 를 수학적으로 구할 수 있으며, 실제 절삭시 이 값을 초과하는 증가값들은 순수하게 공구마모에서 기인하는 것으로

볼 수 있으므로, Fig. 14의 곡선의 방정식은 공구마모를 In-process 감시 할 수 있는 자료로 사용 가능하다고 판단된다.

Fig. 15 및 Fig. 16은 동일한 방법으로 AE_{rms}/Z_w 와 AE_{rmsz} 를 구하여 절삭깊이와의 관계를 도시한 그림이며, Fig. 16의 곡선의 방정식 역시 공구마모의 In-process 감시에 적용할 수 있는 자료라고 판단된다.

한편, Fig. 17은 각 절삭조건과 AE_{mode} 의 관계를 종합하여 표현한 그림이다. 그림에서와 같이 AE_{mode} 는 절삭조건에 상관없이 일정한 값을 나타내므로, AE_{mode} 역시 공구마모의 In-process 감시에 적용 가능한 parameter임을 알 수 있다.

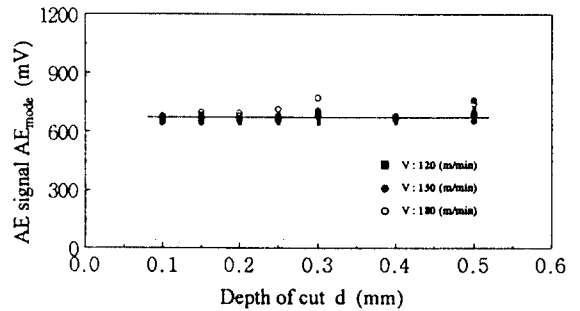


Fig. 17 Relation between AE_{mode} and Depth of cut

5. 결론

AE 신호를 이용하여 선삭 과정에서 절삭조건, 즉 절삭속도, 절삭깊이, 이송 등에 따른 AE_{avg} , AE_{rms} , AE_{mode} 등의 거동을 검토한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) AE 신호중 AE_{avg} 와 AE_{rms} 는 절삭속도 및 절삭깊이의 증가에 따라 급격하게 증가하는 양상을 보이지만, 이송의 증가에 대해서는 민감하게 거동하지 아니한다.
- 2) AE_{avgz} 와 AE_{rmsz} 는 절삭속도와 이송이 변하는 절삭 조건하에서도 절삭깊이에 대한 곡선의 방정식으로 표현될 수 있으며, 공구마모의 In-process 감시에 적용가능한 parameter임을 확인하였다.
- 3) AE_{mode} 는 절삭조건에 변화에도 불구하고 일정한 값을 나타내므로 공구마모의 In-process 감시에 사용 가능한 parameter임을 확인하였다.

6. 참고 문헌

- 1) J. Tlustý, "A critical review of sensors for unmaned machining," Annals of the CIRP, Vol. 32, pp. 563-572, 1983.
- 2) S. Takata, and T. Sata, "Model referenced monitoring and diagnosis-Application to the manufacturing system," Computers in Industry, Vol. 7, pp. 31-43, 1986.
- 3) Y. Koren, T. Ko, A. G. Ulsoy, and K. Danai, "Flank wear estimation under varying cutting conditions," Trans. ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol. 113, pp. 300-307, 1991.
- 4) E. Emel and E. Kannatey-Asibu Jr., "Tool Failure Monitoring in Turning by Pattern Recognition Analysis of AE Signals," Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 110, pp. 137-145, 1988.
- 5) 稲崎一郎, "アコースティック・エミッションによる切削プロセスの監視," 日本機械學會論文集(C編), Vol. 51-466, pp. 1163-1169, 1984.
- 6) S. Y. Liang, "Tool Wear Detection Using Time Series Analysis of Acoustic Emission," Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 111, pp. 199-205, 1989.
- 7) 小島治二外 2人, "アコースティック・エミッションを利用したドリル欠損の豫知," 日本機械學會論文集(C編), Vol. 51-467, pp. 1838-1843, 1984.
- 8) Dornfeld, D. and Cai, H. G., "An Investigation of Grinding and Wheel Loading Using Acoustic Emission," Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 106, pp. 28-33, Feb. 1984.
- 9) T. Blum and I. Inasaki, "A Study on Acoustic Emission from the Orthogonal Cutting Process," Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 112, pp. 203-211, 1990.
- 10) D. Kececioglu, "Shear zone size compressive stress and shear strain in metal cutting and their effects on mean shear flow stress" Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol.82, pp. 79-86, 1960
- 11) D.A. Dornfeld and E. Kannatey-Asibu, "Acoustic emission during orthogonal metal cuttion" Int. J. Mech. Sci. Vol. 22, pp. 285-296, 1980