

동적 절삭과정에서 AE 신호의 특성에 관한 연구

김 정 석*, 강 명 창**, 김 덕 환**

A Study on the Characteristics of Acoustic Emission Signal in Dynamic Cutting Process

Jeong-Suk Kim*, Myeong-Chang Kang**, Duk-Whan Kim**

ABSTRACT

AE(Acoustic Emission) signal is correlated to workpiece material, cutting conditions and tool geometry during metal cutting. The relationship between AE signal and cutting parameters can be obtained by theoretical model and experiments. The value of CR(Count Rate) is nearly constant in stable cutting, but when the chatter vibration occurs, the value of CR is rapidly increased due to the vibration deformation zone. By experimental signal processing of AE, it is more effective than by RMS(Root Mean Square) measurement to detect the threshold of chatter vibration by CR measurement.

Key Words : Acoustic Emission(음향방출), Wave Cutting(파형절삭), Count Rate(카운트율), Additio-nal Deformation Zone(부가변형 영역)

1. 서 론

최근 많은 생산시스템의 자동화에 있어서 기계의 상태 진단 및 감시는 설비의 중요도 및 특수성을 고려할 때 매우 중요한 비중을 차지하게 되며 생산작업을 최적화할 수 있는 적당한 제어기술의 필요성과 그에 대한 관심이 날로 증가하고 있는 실정이다. 특히 가공분야에서 많은 부분을 차지하고 있는 절삭가공 작업은 기구의 구성이 복잡하고 불확정한 요인을 포함하고 있으며 공구의 파손이나 채터진동에 의한 공작물 정도의 변화가 급속히 발생하기 때문에 이를 위하여 인프로세스 감시가 절실히 요구되고 있다.^[1,2]

절삭작업에서 AE(Acoustic Emission)의 특징은 공구의 결함이나 금속재료간의 마찰에 의한 소음의 직접적인

원인에 근거한 신호로서 공작기계, 공구 그리고 피삭재 등의 동특성에 거의 영향을 받지 않으며 절삭 파라메타들이 직접 관계되는 영역에서 발생하는 특징을 가지고 있다. 절삭에서의 AE 이용은 채터진동시 발생하는 소음발생원이 AE 신호 발생에 직접적으로 관계하므로 이의 신호를 측정하여 인프로세스 가공에 적용시킬 수 있다.^[3,4]

최근에 그 이용도가 점점 증가하고 있는 AE 장비를 절삭에 응용하기 위해서는 많은 제약 조건이 따르나, 이는 적절한 장비와 센서의 선택과 부가적인 조건들을 절삭조건에 알맞게 설정하고, 절삭에서의 AE 발생기구를 잘 이해함으로써 절삭작업에 이용되어질 수 있다. 따라서 AE를 이용한 측정은 절삭작업 중 발생하는 공구 마모, 채터진동 등에 의한 절삭작업의 변화와 절삭과정의 공정감시에서 이용되

* 부산대학교 정밀기계공학과(정회원), 기계기술연구소, 정밀정형 및 금형가공 연구센터

** 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

어 질 수 있고, AE를 이용한 감시 및 해석이 절삭과정에 유효하다는 것이 이전의 많은 연구에서 알려져 왔다.^[5,6]

따라서 본 연구에서는 절삭과정 중에 채터진동이 발생할 때, AE 신호의 특성을 절삭 파라메타를 통한 해석적 모델로 나타내고, 절삭 실험을 통해 그 특성을 평가하도록 한다. 또한, 이러한 AE 신호의 분석을 통해 채터진동을 감지할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 채터진동에서의 AE 모델링

2. 1 음향방출(AE)에 대한 이론

AE 신호는 금속재료의 파단, 마찰, 전단변형에 의한 전위현상, 팽창등에 의하여 발생하는 에너지파의 전달로서 결정질 재료에서 나타나는 것으로 알려져 왔으나, 최근의 연구에서 비결정질 재료에서도 AE 신호가 발생, 전파된다고 보고되고 있다.^[7,8]

에너지를 측정하는 가장 단순한 방법 중 하나는 신호의 RMS(Root Mean Square)값 f_{RMS} 을 측정하는 것이다.

$$f_{RMS} = \left(\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} f(t)^2 dt \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서 $f(t)$: 신호 함수

ΔT : 주기

신호의 RMS값에 대한 에너지율 E 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{E} = \frac{\Delta E}{\Delta T} \propto f^2_{RMS} \quad (2)$$

또한 신호 검출에 기초한 AE 해석기법에서 에너지는 카운트(Count)와 관계가 있으며 카운트 율(Count Rate) \dot{C}_N 은 센서 출력신호값과의 관계에서 측정시간 동안에 나타나는 전체 히트당 카운트의 수이며, 다음과 같이 나타낸다.^[6]

$$\dot{C}_N = \frac{\text{전 카운트수 (Total Count Number)}}{\text{전 히트수 (Total Hit Number)}} \quad (3)$$

2. 2 채터진동계의 동절삭 모델링

채터진동기구의 동절삭력 모델은 한방향으로 진동하는 집중 정수계(Lumped Parameter System)라 가정한다.

강제진동에 대한 계의 동적거동의 운동방정식은 Fig. 1

에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = Ft \quad (4)$$

여기서 m 은 등가질량, c 는 감쇠계수, k 는 스프링상수 그리고 F_t 는 절삭력이다.

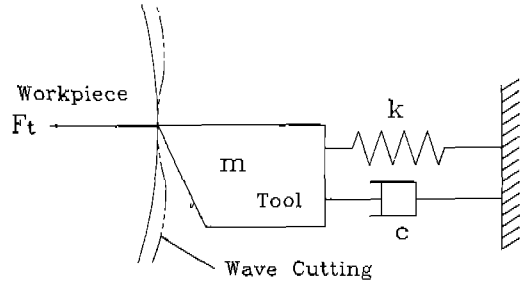


Fig. 1 Vibratory System of cutting Tool

공작물 반경방향의 진동이 발생할 때 파형절삭의 기하학적 특성은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

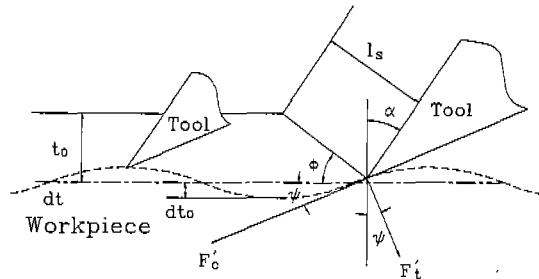


Fig. 2 Cutting Forces of Wave Cutting

여기서 미소절삭깊이 dt 는 $dt = dt_0 \sin \omega t$ 라 두면, 실제 절삭깊이 t 는

$$t = t_0 + dt = t_0 + dt_0 \sin \omega t \quad (5)$$

가 되고, 실제 전단면 길이 l_s 는 다음과 같다.

$$l_s = l + dl = \frac{t_0 + dt}{\sin \phi} \quad (6)$$

동절삭력(F'_c, F'_t)은 정절삭력(F_{cm}, F_{tm})과 미소 증분 절삭력(dF_{cm}, dF_{tm})함으로 나타나며 다음과 같이 표현되어진다.

$$F'_c = F_{cm} + dF_{cm}, \quad F'_t = F_{tm} + dF_{tm} \quad (7)$$

각각의 변동절삭력은 다음과 같이 주어진다.

$$F_{cm} = K_c \cdot b \cdot l = \frac{K_c \cdot b}{\sin \phi} t_0 \quad (8)$$

$$dF_{cm} = K_c \cdot b \cdot dl = \frac{K_c \cdot b}{\sin \phi} dt \quad (9)$$

$$F_{tm} = K_c \cdot b \cdot l \left(\frac{D \cos \phi - 1}{D \sin \phi} \right) \\ = \frac{K_c \cdot b}{\sin \phi} \left(\frac{D \cos \phi - 1}{D \sin \phi} \right) t_0 \quad (10)$$

$$dF_{tm} = K_c \cdot b \cdot dl \left(\frac{D \cos \phi - 1}{D \sin \phi} \right) \\ = \frac{K_c \cdot b}{\sin \phi} \left(\frac{D \cos \phi - 1}{D \sin \phi} \right) dt \quad (11)$$

여기서 b 는 절삭폭, K_c 는 주분력을 전단면으로 나눈 값, D 는 K_c/K_s , K_s 는 전단력을 전단면으로 나눈 값이다.

이때 진동의 진폭이 작을 때 절삭시의 순간절삭 방향각 ϕ 는 매우 작아지며 절삭력 관계는 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$F_c = F'_c \cos \phi - F'_t \sin \phi \cong F'_c - F'_t \phi \\ = (F_{cm} - F_{tm} \cdot \phi) + (dF_{cm} - dF_{tm} \cdot \phi) \quad (12)$$

이며, 주분력방향의 미소증분량 dF_c 는 다음과 같다.

$$dF_c = (dF_{cm} - dF_{tm} \cdot \phi) \quad (13)$$

여기서 ϕ 는 F'_t 와 공작물의 수직면과 이루는 각이다.

식 (9), (11)을 (13)에 대입하여 정리하면 주분력방향의 미소 증분절삭력은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$dF_c = \frac{K_c \cdot b}{\sin \phi} \left[\frac{D \sin \phi - \phi(D \cos \phi - 1)}{D \sin \phi} dt \right] \\ = \frac{K_c \cdot b}{\sin^2 \phi} [\{ \sin \phi - \phi(\cos \phi - D^{-1}) \} dt] \quad (14)$$

2.3 절삭과정의 AE 모델링

재료에서의 AE 에너지는 전단응력, 변형을 그리고 변형

하에서의 재료의 체적에 의존한다.^[9, 10] AE는 소성변형에 의한 에너지의 방출에서 발생하며 일률 \dot{W} 은 다음과 같이 표현된다.

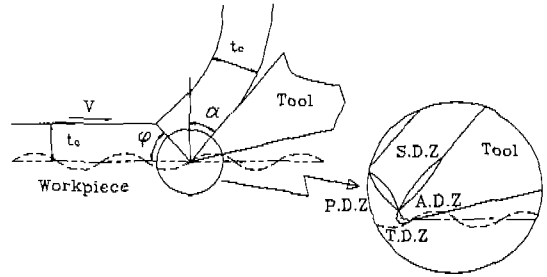
$$\dot{W} = \int_v \sigma \dot{\epsilon} dv \quad (15)$$

여기서 v 는 체적이고, 응력 σ 와 변형률 $\dot{\epsilon}$ 이 일정하다면 일률 \dot{W} 은

$$\dot{W} = \sigma \dot{\epsilon} v \quad (16)$$

이 된다.

AE의 발생 측면에서 본다면 동적 절삭에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 정상 절삭상태에서의 1~3변형영역과 체터진동에 의한 부가변형영역을 고려할 수 있다.



P.D.Z : Primary Deformation Zone
S.D.Z : Secondary Deformation Zone
T.D.Z : Tertiary Deformation Zone
A.D.Z : Additional Deformation Zone

Fig. 3 Deformation Zones of AE during Cutting

1 변형영역에서의 전단변형에 관계되는 일률 \dot{W}_s 은 다음과 같다.

$$\dot{W}_s = bt_0 \tau_k \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cdot \cos(\phi - \alpha)} V \quad (17)$$

여기서 b : 절삭폭, t_0 : 정절삭에서의 절삭깊이

τ_x : 평균 재료전단력, ϕ : 전단각, α : 공구경사각

2 변형영역에서 Sliding이 일어나는 영역의 전단응력은 실험에 의하면 Sticking이 일어나는 영역의 전단응력의 1/2 정도가 된다.^[6] 따라서 Sticking과 Sliding에 의한 일률

\dot{W}_{st} , \dot{W}_{sd} 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \vec{W}_{st} &= \tau_k b l_1 V_c \\ &= \tau_k b l_1 \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} V \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \vec{W}_{sd} &= \frac{1}{3} \tau_k b l_2 V_c \\ &= \frac{1}{3} \tau_k b l_2 \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} V \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 l_1 : Sticking 영역에서 칩과 공구의 접촉 길이

l_2 : Sliding 영역에서 칩과 공구의 길이

V_c : 칩 유출속도

3 변형영역 즉 공구의 여유면과 공작물 사이에서의 일을 \dot{W}_f 은 다음과 같다.

$$\dot{W}_f = \tau_k b V l_3 \quad (20)$$

여기서 l_3 : 여유면의 접촉길이

채터진동에 의한 부가적인 변형은 절삭속도, 절삭력의 함수로서 나타나며, 진동변형영역에서 발생하는 채터진동은 파형절삭이라 가정하였으므로 진동에 의한 부가변형영역의 일을 \dot{W}_v 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{W}_v &= dF_c \cdot V \\ &= \frac{K_c \cdot b \cdot V}{\sin^2 \phi} [\{\sin \phi - \phi(\cos \phi - D^{-1})\} dt] \end{aligned} \quad (21)$$

따라서 진동의 부가변형영역이 고려된 AE 신호의 RMS 값은 다음과 같이 전개되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{RMS} &= C_1 \left[bV\tau_k \left(C_2 \frac{\cos \alpha}{\sin \phi \cdot \cos(\phi - \alpha)} t_0 \right. \right. \\ &\quad + C_3 \frac{1}{3} (3l_1 + l_2) \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} + C_4 l_3 \left. \right) \\ &\quad + C_5 \frac{K_c \cdot b \cdot V}{\sin^2 \phi} \{ \sin \phi \\ &\quad - \phi(\cos \phi - D^{-1}) \} dt] \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 C_1 : 절삭공구와 AE측정장비의 영향에 의한 신호 감쇠 계수

C_2 : 전단이 발생하는 영역에서의 신호감쇠 계수

C_3 : Sliding과 Sticking이 발생하는 칩-공구 접촉부분에서의 신호감쇠 계수

C_4 : 공구절인의 극히 예리하지 않음에서 나타나는

신호감쇠 계수

C_5 : 진동의 부가변형영역에서 공구-공작물 접촉부분에서 나타나는 신호감쇠 계수

3. 측정 및 실험방법

신호해석의 중요한 방법 중 하나는 AE 신호의 에너지량을 측정하는 것이며 이 신호에 의한 에너지율은 초기 신호발생원에 의한 발생율과 직접적인 관계가 있다. RMS값의 측정을 통하여 절삭시의 각종 파라메타의 영향을 알 수 있고, 비정상적인 과도신호 입력을 측정하기 위하여 CR (Count Rate)을 측정하여 평균값의 비교를 통하여 정상입력상태와 과도입력상태의 AE 신호의 측정하였다.

3. 1 AE 장비를 이용한 측정

본 연구에서는 공작기계에서의 정상상태와 공구-공작물의 채터진동이 발생할 때의 마찰에 의한 신호를 분석함으로써 채터진동에 관계된 AE의 특성을 실험적으로 규명한다. 실험을 위한 장비는 AE 신호를 측정하기 위한 2ch LOCAN AT, 신호분석용 소프트웨어 LA DAQ, R계열 PAC-AE센서 그리고 프리앰프로써 구성하였으며 이를 Fig. 4에 나타내었다.

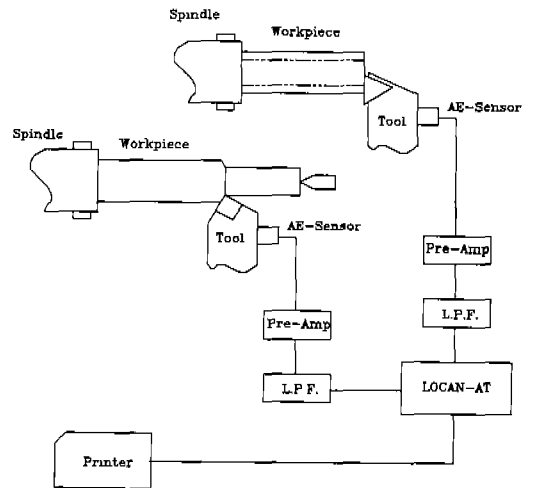


Fig. 4 Schematic Diagram of Experimental Set-up

3. 2 실험 방법

2, 3차원 절삭실험의 시편으로는 외경 150mm, 두께 4mm의 파이프 그리고 외경 150mm, 길이 300mm의 SM 45C 탄소강을 사용하며, 절삭시의 공작물의 돌출길이는 120mm, 공구의 돌출길이는 35mm로 하였고 2, 3차원 절삭과정은 Fig. 5에 나타내었다.

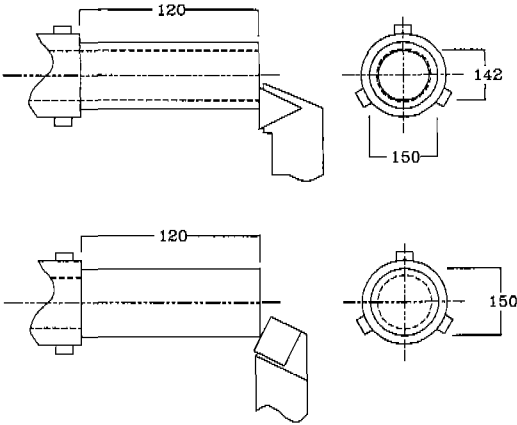


Fig. 5 Process of 2-Dim. and 3-Dim. Cutting.

2차원 절삭은 공구경사각 6°의 화이트(CTGPR)를 사용하며, 3차원 절삭은 공구여유각 6°, 공구경사각 -6°인 화이트(PSEBNR)와 6°인 화이트(CSBPR)를 사용하여 절삭실험을 하였다.

또한 2, 3차원 절삭실험을 위한 절삭조건은 Table. 1과 같다.

Table 1 Cutting Condition for 2-Dim. and 3-Dim.

Cutting Speed [rpm]	280, 460, 640, 1000
Feed Rate [mm/rev]	0.05, 0.1, 0.15
Width of Cut [mm]	1, 2, 3

4. 실험결과 및 고찰

2, 3차원 절삭에 있어서, AE를 이용한 이론적인 모델이 있음에도 불구하고 절삭의 많은 경우에서 이론적인 모델의 실제적인 적용은 실험을 위한 장비의 세팅, 장비 내부의 변화, 신호 전달경로 그리고 실험에 사용되어지는 미소 재질

변화 등으로 인하여 실험의 정확성에 다소 제한을 받는다.

본 연구에서 제시된 모델은 절삭 변수(절삭속도, 공구 경사각, 이송량, 절삭폭)의 영향을 관찰하기 위하여 2차원, 3차원 절삭실험을 행하였다.

4. 1 절삭조건에 의한 RMS값의 변화

Fig. 6은 2차원 절삭에서 절삭폭의 변화에 따른 AE 신호의 RMS값의 변화를 나타내고 있는데, 절삭폭의 증가에 민감하지 않는 특성을 보인다. Fig. 7은 이송량의 변화에 따른 RMS값의 변화특성을 나타내고 있는데, 이송량의 증가에 따라 완만한 감소특성을 보인다. Fig. 8, 9는 절삭속도와 RMS값과의 관련성을 나타낸다. 예측된 바와같이 절삭속도의 증가에 의한 변형에너지의 증가로 인해 RMS 값이 증가해 가는 특성을 나타내고 있다.

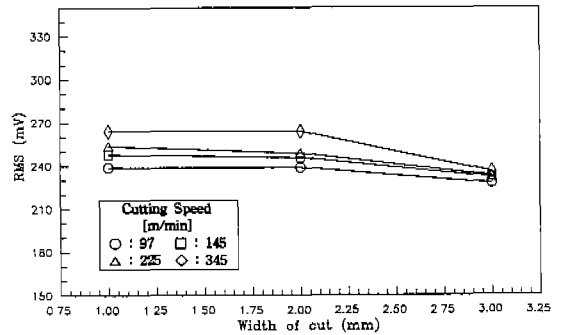


Fig. 6 Width of Cut versus RMS for 2-Dim. Cutting [Rake Angle : 6°, Feed Rate : 0.1 mm/rev]

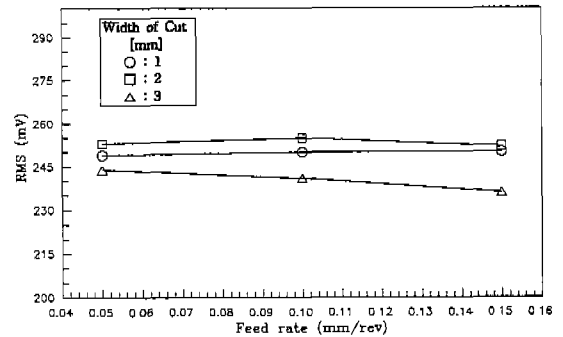


Fig. 7 Feed Rate versus RMS for 3-Dim. Cutting [Rake Angle : -6°, Cutting Speed : 40 m/min]

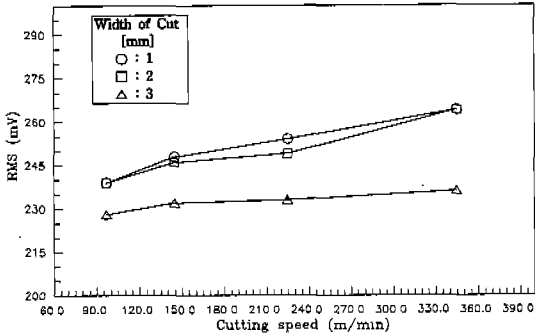


Fig. 8 Cutting Speed versus RMS for 2-Dim. Cutting [Rake angle : 6°, Feed Rate : 0.1 mm/rev]

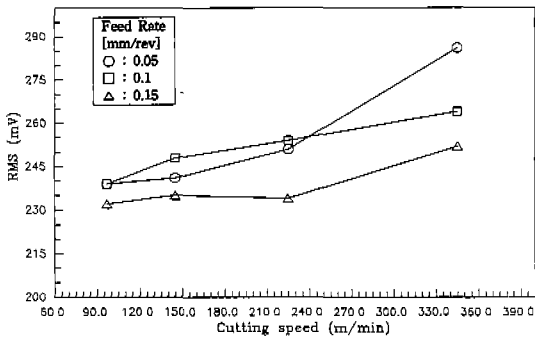


Fig. 9 Cutting Speed versus RMS for 2-Dim. Cutting [Rake angle : 6°, Width of Cut : 1 mm]

4. 2 절삭조건에 의한 Count Rate값의 변화

AE 신호의 히트에 대한 평균 카운트는 Threshold와 깊은 관계가 있다. 안정상태의 절삭에서보다 절삭과정 중 과도한 진동이 발생할 때에 평균 카운트는 증가하며 히트 당 카운트는 급격히 증가한다.

Fig. 10에서는 3차원 절삭(공구경사각 -6°)에서 절삭 폭 1mm일 때, 공구진동이 발생한 경우 CR값이 특정한 절삭속도 이상에서 높게 나타나고 있다. 즉 절삭작업중 chatter 진동이 발생할 때 AE 신호의 RMS값의 변화는 급격히 상승하지 않지만, CR값은 한계절삭조건 이상에서는 급격히

증가하는 특성을 갖고 있음을 알 수 있다.

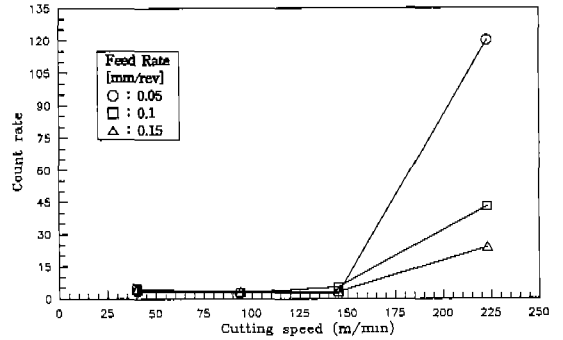


Fig. 10 Cutting Speed versus Count Rate for 3-Dim. Cutting [Rake Angle : -6°, Width of Cut : 1 mm]

4. 3 이론해석에 의한 RMS값의 고찰

절삭과정의 AE 발생기구를 해석적으로 파악하는 데는 약간의 제한이 따른다. 즉 AE 신호 발생에 영향을 주는 파라미터와 이와 상관관계로 표현되는 AE 신호의 이론적 모델을 실험적으로 규명하는 데는 한계가 있다. 따라서 식 (22)에서 제안한 AE 신호의 RMS값의 결정은 실험적으로 얻어진 RMS값을 이용하여 이루어지고 절삭파라미터에 따른 변화특성으로 나타내었다.

Fig. 11에서 절삭폭 1mm일 때, 이송량의 증가에 의하여 이론적인 RMS값은 거의 일정하고, 실험값이 높게 나타난 부분은 진동이 발생한 경우이다.

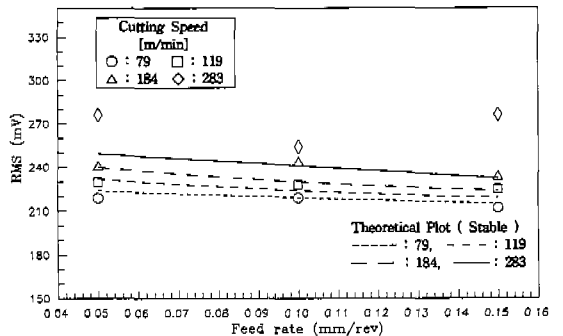


Fig. 11 Feed Rate versus RMS for 2-Dim. Cutting [Rake Angle : 6°, Width of Cut : 1mm]

공구경사각 6°인 경우, Fig. 12에서 절삭속도 119m/min일 때, 진동이 발생하지 않은 상태의 절삭과정이며 절삭폭의 증가에 의하여 이론값과 실험값이 거의 일치하고 있음을 보인다.

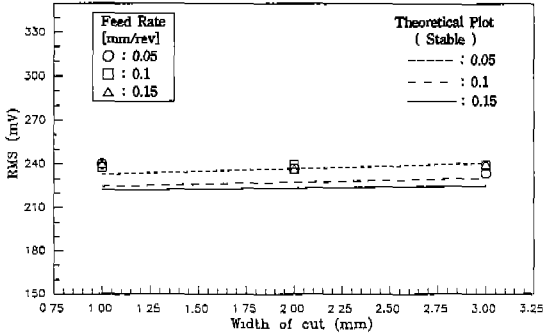


Fig. 12 Width of Cut versus RMS for 3-Dim. Cutting [Rake Angle : 6°, Cutting Speed : 119 m/min]

Fig. 13에서 절삭폭 3mm일 때, 절삭속도의 증가에 의하여 RMS값은 증가하며 진동이 발생한 경우는 다소 크게 나타난다. 이때 실험값이 이론치보다 다소 높게 나타나는 데 이는 칩의 배출에 의한 영향으로 RMS값이 부가되어진 것으로 사료된다.

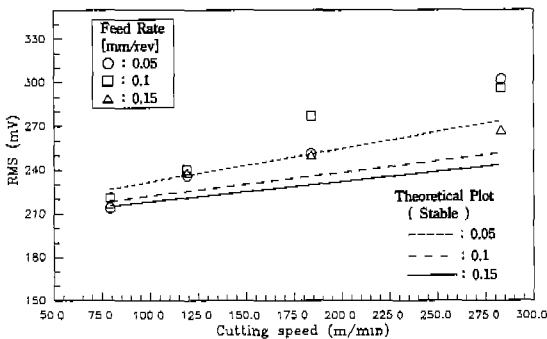


Fig. 13 Cutting Speed versus RMS for 3-Dim. Cutting [Rake Angle : -6°, Width of Cut : 3mm]

절삭과정의 제안된 모델링은 2차원 절삭의 경우에는 F_c 는 주분력, F_t 는 이송분력이 되며, 3차원 절삭에서 F_c 는 주

분력, F_t 는 이송분력과 배분력의 합력이며 전단각, 마찰각, 공구경사각 등은 칩의 진행방향에서 기하학적으로 결정되어지는 값들이다. 절삭과정에서 나타나는 RMS값은 실험과 이론에 있어서 거의 유사한 경향을 나타내고 있고 정량적인 값의 변화가 약간 나타나고 있다. 각 절삭조건 변화에 따른 이론과 실험의 정량적인 값의 차이는 칩이 공구표면에 미치는 영향으로 이론에 의한 값보다 실험에 의한 값이 다소 크게 나타난 것으로 사료된다. 또한 진동이 발생했을 때의 RMS값은 각 조건에서 안정된 상태의 이론 값보다 크게 나타남을 보인다.

진동이 발생할 때 CR의 측정에서 AE값의 변화가 진동의 영향으로 급격히 크게 나타나므로 절삭과정 중의 진동에 의한 불안정한 절삭상태를 예측할 수 있다.

5. 결 론

제안된 절삭과정의 AE 모델을 통해 절삭 파라미터와의 관계를 파악한 결과는 다음과 같다.

1. 정적절삭이 이루어지는 상태에서 AE신호의 RMS값은 공구경사각과 절삭속도에 민감한 영향을 받는다.
2. AE 신호의 CR값은 정적절삭에서는 일정한 값을 갖지만, chatter진동이 발생하는 동적절삭에서는 급격한 증가현상이 발생한다.
3. chatter진동의 감지를 위해서는 AE 신호의 RMS값보다는 CR값이 더욱 효과적임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. David Gee, et al, "Automatic Detection of Cutting Tool Failure", Cutting Tool Control National Machine Tool Builders Association Sep. 5-13, 1984
2. T.Delio, J.Thusty, S.Smith, "Use of Audio Signals for Chatter Detection and Control.", ASME, Vol. 114, May 1992
3. Y.Katino, "Monitoring of Metal Cutting and Grinding Processes by Acoustic Emission", J.

- of Acoustic Emission, Vol.3, No.3, 1984
4. Roberto Teti, "Tool Wear Monitoring through Acoustic Emission", Annals of CIRP, Vol. 38, 1989
 5. D.A.Dornfeld, "Acoustic Emission during Orthogonal Metal Cutting", Int. J.Mech. Sci, Vol. 22, 1980
 6. R.Teti, D.Dornfeld, "Modeling and Experimental Analysis of AE from Metal Cutting", ASME, Vol. 111, August 1989
 7. E.Kannatey Asibu, D.A.Dornfeld, "A Study of Tool Wear using Statistical Analysis of Metal Cutting Acoustic Emission", Wear, Vol. 76, pp.247-261, 1982
 8. K.Iwata, T.Moriwaki, "An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear", Annals of CIRP, Vol. 25/1, 1977
 9. Gillis, P.P "Dislocation Motion and Acoustic Emission", Acoustic Emission, ASTM STP 505, American Society for Testing and Materials, pp.20-29, 1972
 10. Tetelman and Chow.R, "Acoustic Emission and Microcracking Processes Acoustic Emission", ASTM STP 505, American Society for Testing and Materials, pp. 30-40, 1972