

2차원 절삭시의 각종 파라미터와 음향 방출
신호와의 상호 관계에 관한 연구

김 재열*, 심 재기*, 박 환규*, 오 환교**

A Study on the Correlation of Orthogonal Cutting all
sorts Parameter and Acoustic Emission Signal

Kim Jae Yeol* Sim Jae Ki* Park Hwan Kyu* Oh Hwan Gyo**

Abstract

A study on the Correlation of Orthogonal Cutting Parameter (Cutting speed, Depth of cut, Feed Rate) and Acoustic Emission Signal.

It is well known that acoustic emission (AE) is the emission of elastic wave resulting from the deformation and fracture of materials.

This study established correlation of orthogonal cutting parameter and AE signal, and researched into in-process monitoring of tool wear and failure.

The results are as follow;

1. AE RMS was under the influence of cutting speed but hardly influenced by depth of cut and feed rate.
2. AE RMS was under the influence of flank wear.
3. AE count rate increased by increased cutting speed.
4. AE RMS value was rapidly increased in 130 m flank wear.

* 조선대학교 정밀기계공학과

** 조선대학교 기계공학과

NOMENCLATURE

Aa : Actual contact area of chip-tool interface.	ΔT : Time interval.
Ar : Apparent contact area of chip-tool interface.	V : Sliding velocity.
E : Energy of AE signal.	V(t) : Signal coefficient.
f : Feed rate.	Vo : Initial voltage.
F : Friction force.	V _{th} : Threshold voltage.
G : Elastic strain energy release rate.	W : Work rate in shear zone.
K : Stress intensity factor.	κ : Shear strength.
m : constant.	ϵ : Shear strain rate.
RMS : Root mean square value of AE signal.	τ_k : Shear strength of workpiece.
t : Time.	τ_m : Frictional shear strength.

1. 서론

최근 생산 시스템의 자동화에 있어 작업을 최적화할 수 있는 적당한 제어 기술의 필요성이 증대되고 있고, 특히 기계가공의 많은 부분을 차지하고 있는 절삭 가공은 기구가 복잡하고, 불확정한 요인을 내재하고 있으며, 선삭작업과 같은 연속 절삭의 경우 공구의 초기결함이 돌발적으로 일어나기 때문에 그것의 예측과 검출은 매우 어려운 문제이며, 특히 공구의 결함이 생산라인에 있어서는 생산성과 경제성에 중대한 영향을 미친다. 따라서 절삭에 사용되는 공작 기계의 효율적인 사용을 위해서는 마모와 파손 등의 공구의 손상에 대한 가동중 감시가 절대적으로 필요하다.

가동중 감시 기술로서 여러가지 방법이 제안되고 연구되어 왔는데, ITV카메라로 대별되는 직접적인 방법<1> 등과, 절삭력에 의해 발생하는 신호의 탐지 기술<2,3>, 절삭온도<4>, 진동<5>등에 의해 감시되는 간접적인 방법이 있다.

그러나 직접적인 방법은 측정과 감시에 정확성을 기할수는 있으나, 측정 장치가 비용이 많이들고 복잡하여 실제 절삭과정에 적용하기는 많은 제약이 따른다. 그러나 간접적인 방법은 측정이 비교적 쉬우나

신뢰성과 정확성이 부족한 실태이다. 그러나 간접적인 측정 방법으로 비교적 근래에 등장하여, 가동중인 설비의 진단 및 검사가 가능하고, 실시간 처리가 가능한 시험경비를 획기적으로 절약 할 수 있는 AE (Acoustic Emission)에 관한 연구가 진행되고 있다.

특히 Moriwaki등은 절삭중 AE Signal을 측정하여 해석함으로써 공구의 마모 및 파손을 감시 할 수 있는 방법을 제시하였다. <6,7>

따라서 본 논문에서는 절삭시의 여러가지 조건 실험을 통해 NC(Numerical Control) 선반을 이용하여, 2차원 절삭시의 각 Parameter와 AE Signal과의 상호관계를 확립하여, 공구의 마모와 파손에 대한 정보의 가동 중 감시에 대한 연구를 하였다.

2. 이론

2-1. 공구마모기구

절삭작업 중 절삭공구의 파손(failure)은 거의 다음과 같은 과정중의 하나 또는 그들의 조합에 의하여 복합적으로 일어난다.

(1) 진전하는 마모(여유면 마모 또는 경사면 마모)

(2) 소성변형

(3) Chipping 또는 파괴(fracture)

이들 과정의 중요성은 이들이 공구의 형태를 변형시키고 공구수명에 큰 영향을 미친다는 점이다.

공구의 외형으로 관찰되는 진전하는 마모의 형태는 여유면 마모(flank wear)와 경사면 마모(crater wear)이며 이들을 Fig. 1에 나타내었다.

여유면 마모는 주로 연마와 점착에 의한 마모로 보고 있으며 가공물의 거칠기, 가공물의 공차 및 절삭력에 미치는 영향과 마모 측정상의 편의 때문에 공구수명을 지배하는 주 마모인자로 취급되며 AE에 의하여 측정될 수 있는 측면마모의 효과는 공구측면과 절삭면사이의 마찰이다.

이장에서는 단지 AE신호에 미치는 여유면 마모의 효과만을 평가한다. 지금까지 텅스텐카바이드 공구와 HSS공구의 마모를 평가하는데 있어서 발생할 수 있는 5개의 주요한 기구로서 다음의 것들이 제안되어 왔다.

(가) 압축응력하의 소성변형(plastic deformation under compressive stress)

높은 경도의 재료를 절삭할 때 또는 고속이나 고이송속도로 절삭할 때 공구에 적용하는 높은 응력이나 높은온도에 기인한 공구강도의 저하 때문에 공구날끝은 소성적으로 변형될 수 있다. 비록 마모과정은 아니지만 공구에 작용하는 힘을 증가시키거나 HSS공구에서 마모과정을 가속시키는 결과를 가져온다.

탄화물공구는 높은 온도에서도 발생하는 균열과 제한된 변형을 견딜 수 있다.

(나) 확산마모(diffusion wear)

고체상태의 확산은 금속결정격자에서 원자가 높은 원자농도의 영역으로 부터 낮은 원자농도의 영역으로 이동할 때 발생한다.

확산마모는 900°C이상의 높은 절삭온도에서 칩과 공구접촉면, 공구와 공작물 접촉면에서 발생한다. 확산율은 온도와 포함된 원자의 상대적인 크기, 그들의 화학적 상호작용 그리고 서로 다른 재료들의 용해도

(solubility)등과 같은 요인에 의존한다.

(다) 점착마모(adhesion wear)

높은 절삭온도에서 공구와 가공물의 큰 접촉응력에 의하여 공구와 가공물의 실제 접촉면은 용접현상을 일으키게 되고 있다든 공구와 가공물의 상대적 이동에 의하여 이 부분이 전단됨으로써 물질이 이동하는 물질이동의 마모이다. 상대적으로 낮은 절삭속도에서 절삭날을 통과하는 금속의 흐름은 더욱 불규칙적이며 BUE가 형성되고 공구와의 접촉이 덜 연속적일 수 있다.

이런 조건에서는 국부적인 인장응력때문에 공구재료의 크고 작은조각들이 떨어져 새로운 가공물면 또는 칩의 아래에서 떨어져 나간다.

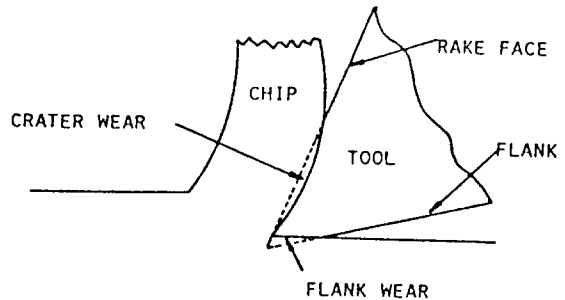


Fig.1 Regions of tool wear in metal cutting

(라) 연마마모(abrasion wear)

연마마모는 칩의 아래쪽에 부터있는 경질원자가 공구윗면을 통과하면서 기계적인 작용(연마)에 의하여 공구재료를 제거할 때 발생한다.

HSS 공구를 연마하기 위하여는 마르텐사이트 matrix보다 공작물에 더욱 단단한 입자가 있어야 한다. 텅스텐카바이드의 높은 경도때문에 카바이드 공구에 대하여는 연마마모가 덜 일어난다.

(마) 미끄럼상태하의 마모(wear under sliding condition)

가속된 마모는 미끄럼접촉이 발생하는 곳 즉 공구와 공작물의 접촉면에서 종종 발생한다. 공기중의 산

소 또는 윤활제에 들어 있는 염소 또는 황의 새로운 결합은 공구에 대한 그들의 친화력(affinity)과 활동도(activity)를 감소시키며 따라서 접촉면적을 감소시키게 되므로 미끄럼접촉을 증가시킨다. 미끄럼 영역에서 마찰율은 주로 주위의 분이기와 화학적 상호작용에 의하여 조정되며 공구재료의 조성에 더욱 의존한다.

2-2. 공구파손의 AE 신호

정상적인 절삭중 발생하는 AE 신호는 연속형 신호라 볼 수 있으며 공구가 파손될 때에는 돌발형 AE가 발생한다.

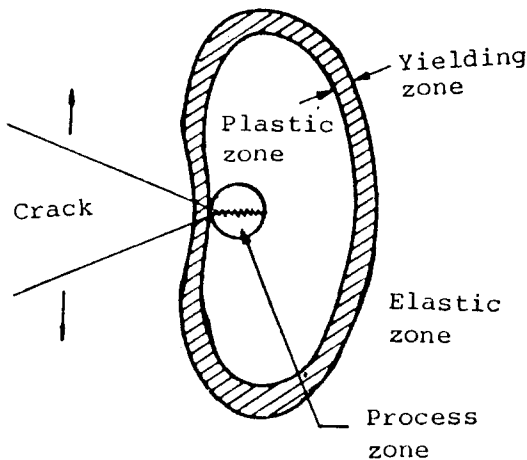


Fig. 2 Zones contributing to AE at a crack tip

Fujimoto(18)는 금속에 파괴중에 발생하는 AE에 대한 광범위한 연구를 하여 파괴에 관한 AE는 전위의 이동과 집적 등 다양한 미소과정을 포함한다는 결론을 내렸다.

절삭공구로 광범위하게 쓰이는 W-C-Co 합금공구와 같이 높은 응력을 받는 연성이 작은 재료의 파괴인성은 응력파대계수 또는 탄성변형 에너지 방출율과 같은 선형파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics) 변수에 의하여 표시될 수 있다. 이런 형태의 자료에서 느린 균열진전에 대하여 다음에 세 과정이 AE발생과 밀접한 관계를 가지며 Fig. 2에 나타내었다.

- (a) 균열선단 근처의 소성영역의 성장(growth of plastic zone)
- (b) 균열선단 근처에 process 영역에서의 미소균열(micro cracking)
- (c) 생성된 균열의 확장(extention of the primary crack)

절삭과정에서 발생하는 AE에너지에 비하여 공구파괴 과정에서의 미소균열과 소성변형에 밀접한 낮은 레벨의 AE에너지 해석은 앞에서 이미 언급한 높은 온도와 충격등의 원인에 기인하여 균열의 불안정한 진전의 결과로 마침내 공구파손이 일어난다고 가정한다. 선형파괴역학(8)에서 응력을 받고 균열길이 L을 포함하는 재료의 탄성에너지는 다음과 같다.

여기서 E는 탄성계수이다.

$$U = \frac{\pi \sigma^2 L^2}{4E} + \text{contant} \quad (2-1)$$

$$\Delta U = \frac{\pi \sigma^2 L \Delta L}{2E} \quad (2-2)$$

$$\begin{aligned} (\text{RMS})^2 &\propto \frac{\Delta U}{\Delta t} \propto \frac{\Delta U}{\Delta L} = G = \frac{\pi \sigma^2 L}{2E} \\ &= \frac{K^2}{E} \end{aligned} \quad (2-3)$$

균열길이가 ΔL만큼 늘어나면 대응하는 탄성에너지는 균열성장은 응력파의 발생을 동반하고 방출된 에너지의 일부는 AE신호로 탐지된다. 신호의 RMS 값(신호의 에너지율)은 AE의 측정 가능한 특성으로서 사용되어 왔으며 AE 발생원의 에너지원의 에너지율에 관계한다. 인서트에서 균열진전의 속도가 상수라고 가정하면 파괴에 동반하는 AE 에너지는 다음과 같이 표시된다.

식(3)은 균열길이가 가해진 응력의 함수이며 균열전파 동안의 AE에너지로서 정의되지만 절삭중 공구파괴 에너지와 발생한 AE에 대한 관계는 공구형상과 공구에 분포되는 응력포의 복잡성으로 인하여 명확히 규명하기는 어렵다.

2-3. AE Parameter

1) Ring down count (N)과 Count rate (N)

AE Signal의 분석에 가장 흔히 쓰여져 왔던 AE parameter가 ring down count이다. Ring count는 AE signal을 설정치(threshold level)를 넘는 peak의 수로서 event duration과 에너지에 비례하게 되는 것인데 다음식과 같다.

$$N = \frac{f}{\beta} \text{Log} \frac{V_0}{V_{th}} \quad (2-4)$$

Ring down count를 이용하는 방법은 시험편의 기하학적 형태, 탐촉자의 특성 및 탐촉자와 시험편과의 접촉성 여부에 많은 영향을 받으며, 적절한 설정치 결정 문제도 분석 결과에 영향을 주는 문제점이 있으므로 측정 결과에의 재현성이 떨어져 분석 방법으로 표준화하는데 어려움이 있으나, AE의 Activity에 비례하므로 가장 많이 쓰여지고 있는 방법이며, Count Rate는 count의 시간에 대한 비분값이다.

2) AE RMS 전압

AE 신호의 에너지량을 나타내며, 수학적으로는 어떤 주기에 대한 신호의 제곱 평균의 제곱근으로 정의하며 다음과 같다.

$$\text{RMS} = \left[\frac{1}{\Delta T} \int V(t)^2 dt \right]^{1/2} \quad (2-5)$$

여기서 V(t)는 신호 함수이며, T는 시간 간격이다.

식 (2-2)로부터 신호의 에너지율은 으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dE}{dT} = (\text{RMS})^2 \quad (2-6)$$

으로 나타낼 수 있다.

2-4. 금속의 절삭과 AE의 이론적 관계

절삭 작업에서 발생하는 AE 신호값의 함수는 다음과 같다.

$$AE_{rms} = f(\tau_k \epsilon v A_1 A_2) \quad (2-7)$$

여기서, τ_k : 공작물의 전단강도 (shear strength)
 ϵ : 전단 변형 속도 (shear strain rate)
 v : 변형부분의 체적
 A_1 : 칩과 공구 경사면 사이의 면적
 A_2 : 가공표면과 공구측면 사이의 접촉면적

이 외에도 AE신호와 관계되는 인자는 여러가지가 있으나, 주된 인자는 위의 것이다.

AE신호와 마찰일과의 관계로부터 AE신호와 flank 마멸의 관계는 다음과 같다.

$$F = \tau_s A_r \quad (2-8)$$

F : 마찰력
 τ_s : 마찰면 사이의 물 전단강도
 A_r : 실제 접촉면적

여기에서

$$A_r = \eta A_a \quad (2-9)$$

A_a : 외관상 접촉면적
 η : 재료의 표면 거칠기와 탄성에 관계되는 함수

식 (2-5)와 (2-6)으로 부터

$$F = \eta \tau_s A_a$$

에너지 발생을 W는 다음과 같다.

$$W = F V$$

V : 미끄럼 속도

$$W = \eta \tau_s A_a V \quad (2-10)$$

AE 에너지 발생율은 W의 역함수 (power function)로 표시될 수 있으므로

$$\text{AE energy rate} = (KW)^m = \quad (2-11)$$

여기서 K와 m은 두 마찰 물질의 성질과 AE 측정 장치에 관계되는 상수이다.

그러므로 Flank 마모와 AE 신호관계를 나타내

는 식은

$$\begin{aligned}
 AE_{rms} &= (AE \text{ energy rate})^{1/2} \\
 &= (K \eta \tau_s A_a V)^{m/2} \quad (2-12)
 \end{aligned}$$

이다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

3-1. 실험 장치

Fig. 3, Fig. 4는 실험에 공작물의 형상을 나타내고 있다.

Photo 1, Photo 2는 실험 장치에 대한 사진이다.

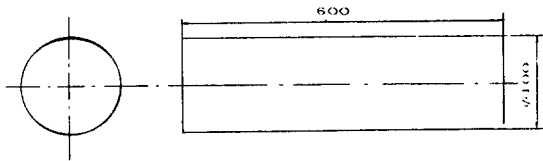


Fig. 3 Specimen for continuous cutting

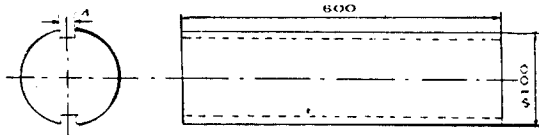


Fig. 4 Specimen for interrupted cutting

3-2. 실험 방법

본 실험에 사용한 피삭재는 SM45C 탄소강이며 그 화학적 성질과 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다. 공구는 4각형 Insert Type의 대한 중석의 P20을 사용하였으며 그 화학적 성분을 Table 3에 나타내었다. 절삭은 NC선반에서 수행하였고, 공구 홀더의 측면에 AE Sensor를 부착하였다.

AE Sensor의 부착위치는 공구에서 가까울수록 민감한 신호를 얻을 수 있으나 Chip의 부딪힘이 큰 영향을 미치므로 이것을 고려하여 약 10cm 떨어진 공구 홀더의 측면을 부착 위치로 선정하였다. NC선반에서 절삭이 진행됨에 따라 공작물의 직경이 감소하기 때

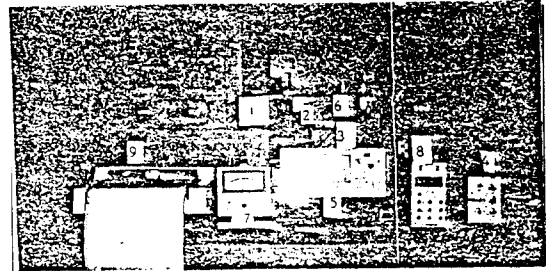


Photo. 1 Experimental apparatus for AE measurement measurement

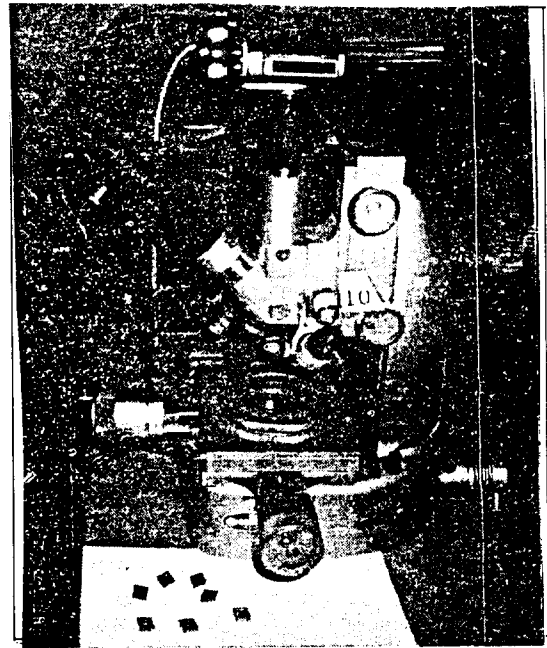


Photo. 2 Tool micrometer and insert

문에 절삭 속도를 일정하게 유지하기 위해서 주속일정 제어기능으로 제어 하였다. 또 공구의 마모를 측정하기 위하여 5분동안 절삭하고 공구가 프로그램의 시각점으로 복귀하도록 하였다.

절삭을 멈췄을 때 Insert를 탈착하여 공구 현미경을 사용하여 여유면 마모(flank wear)를 측정하였다.

검출된 AE신호는 preamplifier에서 20dB 증폭하고, discriminator에서 40dB 증폭하여, 총 60dB 증폭하였으며, noise제거를 위하여 discriminator에서 100KHz-1MHz의 band pass filter를 거쳐 전파

Table1. Item and specification

ITEM	SPECIFICATION
1. NC Lathe	Model Puma 10 by DAE Woo
2. AE Sensor	AE 905 A by NF Circuit Co.
3. Pre Amplifier	Model AE 911 by NF Circuit Co.
4. Discriminator	Model AE 921 by NF Circuit Co.
5. Digital Oscilloscope	Model DSS 6531 by Kikusul Electronics Co.
6. Magnetic Holder	Model AE 991 M by NF Circuit Co.
7. True RMS AC Voltmeter	Model M 170 by NF Circuit Co.
8. Dual Counter	Model AE 931A by NF Circuit Co.
9. Pen Recorder	Model FBR-252A by TOA Electronics Ltd.
10. Tool Microscope	SMS-50B UNION

정류 하였다. 이 신호의 원파형을 oscilloscope를 통하여 보았으며 이 전파정류한 신호를 RMS voltmeter와 dual counter에서 측정하여 pen recorder에 기록 하였다. 이때의 count rate는 1초당 threshold를 넘는 AE사상수를 계수하였으며, threshold level은 0.1V로 하였다.

Fig. 5는 실험 장치의 block diagram을 나타내고 있다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 6은 절삭시의 절삭속도와 AE RMS와의 관계

Table2. Chemical composition and mechanical properties of testing material (SM45C)

works	Chemical Composition (WT. %)					Mechanical Properties		
	C	Mn	Si	P	S	Yield point (kgf/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)
SM45C	0.46	0.75	0.25	0.019	0.035	32.75	65.71	18

Table3. Chemical Composition

Cutting tool	Chemical Composition (WT. %)				
	W	Co	Ti	Ta	C
P20	60-83	5-10	5-15	0-15	6-9

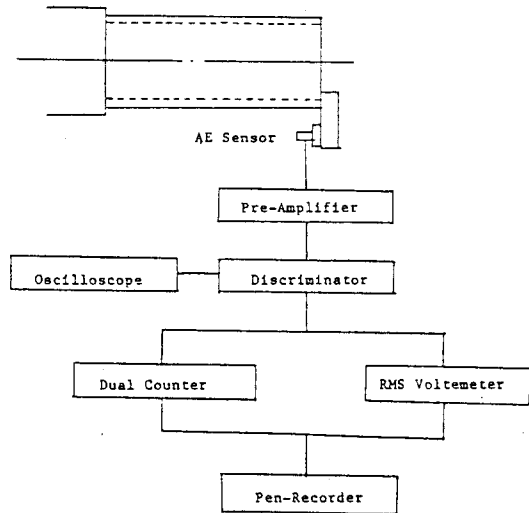


Fig. 5 Block diagram of measuring system

를 보이고 있다. 각각 같은 절삭 깊이와 같은 이송 속도에서 5번의 반복 실험을 행하였다. 이 실험에서 RMS의 값이 절삭 속도에 따라 비례적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 7과 8은 이송속도와 절삭깊이를 변화시켰을 때 각각의 속도에 대한 RMS값과의 관계를 나타내고 있다. 이송속도와 절삭깊이의 변화에 대한 RMS값은 약간 변화지만 거의 일정함을 알 수 있다. 여기서 RMS값에 크게 영향을 미치는 것은 절삭속도임을 알 수 있다.

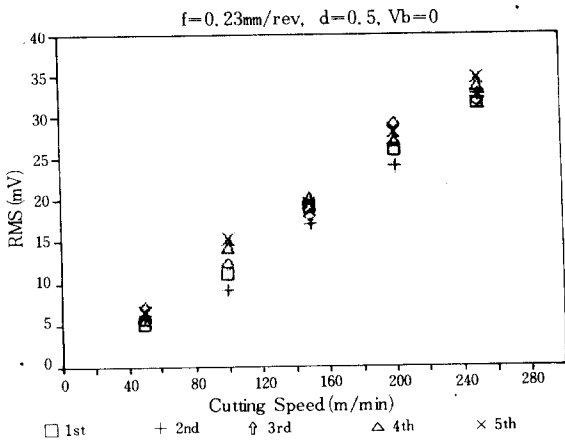


Fig. 6 Relationship of cutting speed and AE RMS in cutting speed ($f=0.23\text{mm/rev}$, $d=0.5\text{mm}$, $V_b=0$)

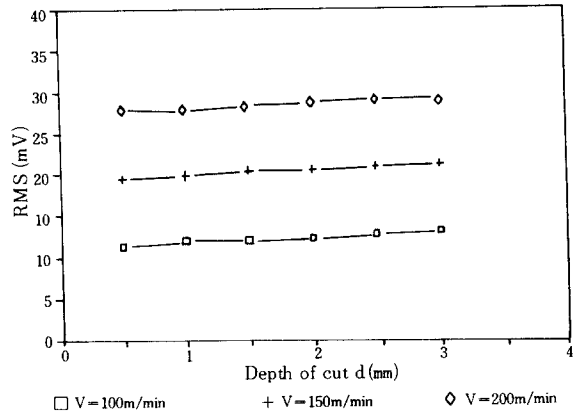


Fig. 8 Relationship of AE RMS and depth of cut in cutting time ($f=0.23\text{mm/rev}$, $V_b=0$)

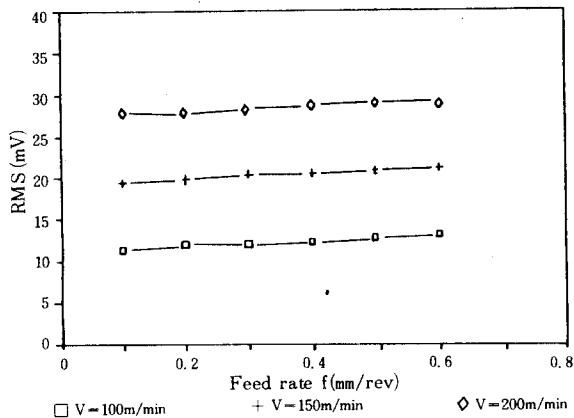


Fig. 7 Relationship of AE RMS and feed rate in cutting time ($d=0.5\text{mm}$, $V_b=0$)

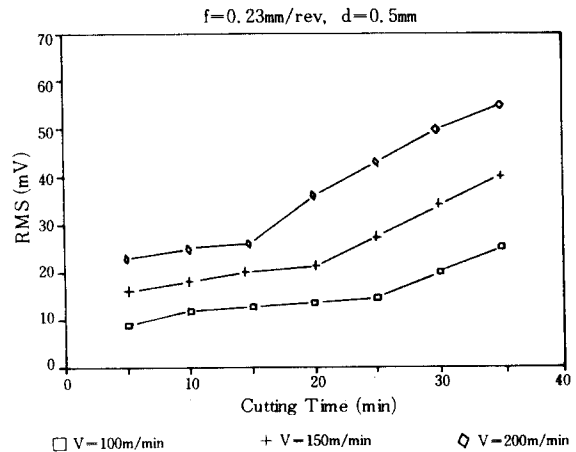


Fig. 9 Relationship of AE RMS and cutting time ($f=0.23\text{mm/rev}$, $d=0.5\text{mm}$)

Fig. 9는 AE RMS값과 경과시간에 대하여 나타낸 것이다.

절삭초기에는 RMS값의 증가가 거의 나타나지 않고 일정한 수준을 유지하다가 어떤시간 즉 절삭속도가 100m/min인 경우에는 30분, 150m/min인 경우에는 25분, 20m/min에서는 20분에서 RMS값이 급격한 증가를 보인다. 이것은 RMS값이 일정하게 유지되는 시간동안에도 마모는 계속 증가하여 어느 임계점에 도달하면 RMS값에 큰 영향을 미치는 것을 알 수

있다.

Fig. 10은 절삭시간에 대한 Total count를 나타낸 것이다.

절삭시간에 대하여 count가 일정하게 증가함을 알 수 있다.

공구마모의 형태는 여유면 마모(flank wear)와 경사면 마모(creator wear)가 있다. 여유면 마모는 연마와 접촉에 의한 마모라 말할 수 있으며 피삭재의 거칠기와 절삭력에 미치는 영향과 공구수명을 나

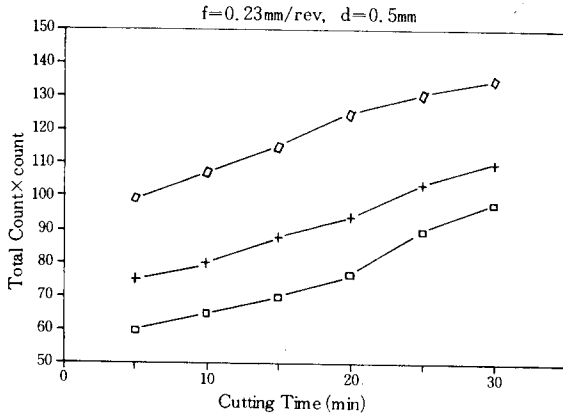


Fig. 10 Relationship of AE total count and cutting time ($f=0.23\text{mm/rev}$, $d=0.5\text{mm}$)

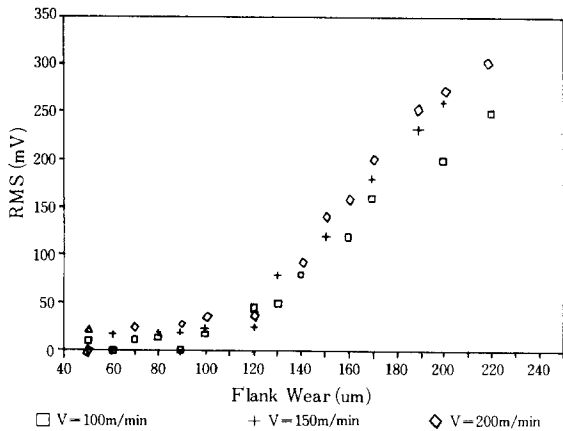


Fig. 11 Relationship between AE RMS and flank wear in cutting speed ($f=0.23\text{mm/rev}$, $d=0.5\text{mm}$)

타내는 주마모인자로 취급하고 있다. 따라서 본 연구는 여유면 마모에 따른 AE 신호의 영향에 대해서만 평가하겠다.

Fig. 11은 여유면 마모의 증가에 따른 AE RMS값의 변화를 나타낸 것이다.

절삭속도의 변화와 무관하게 여유면 마모가 130um 일 때 부터 AE RMS값이 지속적으로 증가함을 알 수 있다.

Fig. 12는 AE RMS값과 비교하기 위하여 사상울을

계수하여 여유면 마모에 대한 사상울의 분포도를 나타낸 것이다. 이 경우 사상울은 절삭속도가 100m/min일 때 180um, 15m/min일 때 60um 이고, 200m/min일 때 80um에서 증가함을 나타내고 있다.

사상울에서는 절삭속도의 변화에 따라 여유면 마모의 임계값이 달라지므로 공구마모에 적절한 신호는 일정한 임계값을 나타내는 AE RMS 값을 측정하는 것이 타당하다고 생각한다.

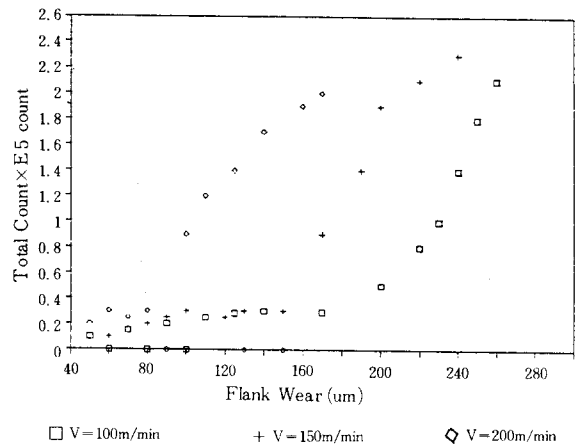


Fig. 12 Relationship between total count and flank wear in cutting speed ($f=0.23\text{mm.rev}$, $f=0.5\text{mm}$)

5. 결론

2차원 절삭시의 Parameter와 AE Signal과의 상호 관계에 대한 실험의 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. AE RMS값은 이송속도와 절삭깊이에 거의 무관하고 절삭속도에만 관계됨을 알 수 있었다.
2. 여유면 마모는 절삭속도가 빠를수록 커지며, RMS값은 여유면 마모에 크게 영향을 받음을 알 수 있었다.
3. 절삭속도가 증가함에 따라 AE Count rate가 증가함을 알 수 있었다.
4. AE RMS은 여유면 마모(flank wear)가 130um부근에서 급격히 증가함을 알 수 있었다.

이와 같은 결과로서 AE Signal을 이용하여 절삭과정의 가동중 검출이 가능하다 할 수 있으며, 앞으로 noise의 영향을 배제하고 감도높은 sensing을 위해서 wireless sensing기법의 활용이 요구되며 이를위한 sensor의 출현이 시급하다.

참고문헌

1. Takeyama, H. et al : Study on Optimal of Machine Tool, Trans of JSME, Vol 34, No 261(1968), 992-1000.
2. Honda, Y. et al : On-Line Control of Tool life in Turning, Trans of JSME, Vol 39, No 317(1973), 424-41.
3. Cowel, L. V. and Mazer, J. C : Tool wear Tracking in the Production Shop, Proc, 4th North American Metal Working Research Conference (1976), 420-427.
4. Cowel, L. V. : Cutting Temperature Versus Tool wear, Annals of the GIRP, Vol 24, No 1(1975), 73-76.
5. Martin P, Mutels B and Draper J.P. : Influence of Lathe Tool Wear on The Vibration Sustained in Cutting, Proc. of The 15th MTDR Conf, (1974), 252-257.
6. Iwatw. K and Moriwaki. T : An Application of Acoustic Emission Measurement to In-Process Sensing of Tool Wear. Annals of GIRP. Vol 25, No 1, (1977), 21-26.
7. Moriwaki, T : Application of AE Measurement to Sensing of Wear and Breakage of Cutting Tool. Bull Japan, Soc of Prec. Eng, Vol 17, No 3, (1983).
8. Gills, P. P. and Hamsted, M. A, Some Fundamental Aspect of The Theory of AE : Material Science and Engineering, Vol 14, (1974).
9. H. N. G. Wadley, C. B. Scurby and J. H. Speake : Acoustic Emission for Physical Examination of Metals. Int. Metals Review, No 2, (1980), 139-151.
10. Chao. B. T. and Trigger. K. T. : Controlled Contact Cutting Tools. ASME Journal of Engineering For Industry. Vol 81, (1959), 139-151.
11. Usui. E and Takeyama. H : A Photo Elastic Analysis of Machining Stresses. ASME Tournal of Engineering for Industry. Vol 82, (1960), 303-308
12. Zorev. N. N : Interrelationship Between Shear Process Occuring Along the Tool Face and on Shear Plane in Metal Cutting. International Researching Production Engineering, ASME, (1963), 42-49.
13. Finnie. I and Shaw. M. C : The Friction Process in Metal Cutting Trans ASME, Vol 78, (1965), 1649-1657,
13. Finnie. I and Shaw. M. C : The Friction Process in Metal Cutting trans ASME, Vol 78, (1965), 49-67.
14. W. N. Findley and R. M. reed : The Influence of Speed and Rake Angles in Metal Cutting. Journal of Engineering for Inderstry, (1963), 49-67.