

## SUS304의 정면밀링 가공시 공구마모와 AE신호 특성에 관한 연구

오 성 훈,\* 김 성 일,\* 오 석 형,\*\* 김 태 영\*\*\*

### A Study on Tool Wear and AE Signal Characteristics in Face Milling of SUS304

Seoung-Hun Oh,\* Seong-Il Kim,\* Seok-Hyung Oh,\*\* Tae-Young Kim\*\*\*

#### ABSTRACT

In recent years, the automatization of cutting machine tools has been developed very fast. Hence, the in-process detection of cutting condition is very important for automatic manufacturing system in factory. Acoustic Emission(AE) has been widely used in monitoring the cutting conditions, because of high sensitivity of AE signal and low cost of AE equipment.

This experimental study deals with the relations between AE signal, cutting force characteristics and tool wear in the machining of SUS304. Face milling operation is used for the analysis between tool wear and AE signal.

**Key Word** : AE Signal, Tool Wear Detection, Cutting Force

#### 1. 서 론

최근 공작기계의 자동화 추세에 따라서 공구의 마모 및 파손을 자동적으로 감시할 수 있으며 실제 절삭상태에 대한 신뢰성 있는 탐지(in-line processing)에 대한 연구가 필요하게 되었다. 그러나 실제 절삭과정은 여러가지 절삭기구의 조합으로 이루어지기 때문에 절삭상태의 예측이나 공구파괴의 탐지에는 다소 어려운 점이 있지만, 생산라인의 절삭효율 증가를 위해 공구수명

예측과 절삭상태의 탐지 그리고 공구마모 및 파손의 감시가 절대적으로 필요하다.

절삭인자로는 절삭온도, 절삭력, 표면거칠기, 칩두께, 공구마모등이 포함되며 이들을 측정할 수 있는 방법<sup>(1-9)</sup>으로는 직접적인 방법과 간접적인 방법으로 크게 구별할 수 있다. 직접적인 방법으로는 광학센서,<sup>(1)</sup> 전기저항 센서,<sup>(2)</sup> 공기압 센서<sup>(3)</sup>등을 이용하여 마모면을 직접 관찰하거나 마모량을 직접 측정하며, 간접적인 방법으로는 공구동력계에 의한 절삭력 측정,<sup>(4,5)</sup> 절삭온도,<sup>(6)</sup>

\* 전북대학교 정밀기계공학과 대학원

\*\* 군산대학교 기관학과(정회원)

\*\*\* 전북대학교 정밀기계공학과(정회원)

진동,<sup>(7)</sup> AE(Acoustic Emission) 신호측정<sup>(8)</sup> 등이 있다. 직접적인 방법은 비교적 정확한 공구의 마모량과 마모상태를 탐지해 낼 수 있지만 비용과 장비의 복잡성 때문에 실제 적용에 문제점이 있고, 간접적인 측정방법은 장비가 간단하고 신호의 측정은 쉬우나 절삭공정의 다양성에 잘 부합되지 않는다는 문제점이 있다.

현재 비파괴 분야에서 사용되고 있는 AE측정법은 일반적으로 발생하는 진동, 소음에 큰 영향을 받지 않으며 절삭상태에 따라 민감하게 변화하기 때문에 절삭상태와 공구의 마모 여부를 파악하는데 좋은 탐지기법으로서 사용될 수 있다.

이전의 많은 연구들에 있어서, 선택된 재료들은 거의 가공이 용이하고 마모특성을 쉽게 관찰할 수 있는 재료들을 사용하고 있지만, 실제 현장에서 많이 사용되는 난삭재에 대한 연구는 부족한 실정이다.

현재 다양한 용도로 쓰이고 있는 SUS304는 절삭에 있어서 톱니형의 칩(chip)이 생성<sup>(9)</sup>되는 난삭재로서 절삭력의 변동이 심하고 열전도율이 낮기 때문에 칩보다는 공구쪽으로 열전도가 많아 공구마모에 큰 영향을 나타낸다고<sup>(10-12)</sup> 보고되었다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 SUS304를 밀링머신(milling machine)으로 절삭조건을 몇 가지로 바꾸어서 절삭하였을 때 발생하는 AE신호의 특성을 해석하며, 공구마모가 진행됨에 따라 가공물과 공구의 접촉마찰시 발생하는 AE신호와 절삭력 데이터를 비교분석하여 마모에 따른 AE 신호의 변화를 규명하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2-1. 절삭공구의 마모 특성

마모를 구분하는 데는 크게 정상마모와 비정상 마모로 분류할 수 있으며, 정상마모는 공구인선이 피삭재 및 칩과의 지속적인 접촉에 의해 발생하는 것이다. 정상마모를 완전히 감소시킬 수는 없지만 공구의 사용각도를 최적의 상태로 변환시켜 마모를 감소시키려는 노력은 지금도 여러 연구자들에 의해 진행<sup>(13)</sup>되고 있다.

선삭작업과는 달리 단속 절삭인 밀링작업은 절삭시 칩핑(chipping)과 파손등 공구손상이 많이 발생된다. 또한 일반적인 강철재의 경우에는 절삭시 발생한 절삭열은 칩에 의해서 대부분 제거되지만 난삭재인 스테인레스강은 절삭시 발생하는 많은 열이 전단면을 따라 흐르며, 전단면에 접촉되어 있는 공구인선으로 많은 열이

이동하며 일부는 자유표면으로 방출된다. 고속 절삭시에는 열에 의한 갑작스런 공구마모가 나타난다.<sup>(14)</sup>

본 연구에서는 공구여유면과 피삭재와의 접촉에 의한 마찰로 인해 생성되는 일종의 정상마모인 여유면 마모(flank wear)의 발생 및 진행 현상을 AE신호와 연관시켜 연구하였다.

여유면 마모는 다음과 같은 3가지 단계를 통해 진행<sup>(15)</sup>되어진다. 첫째, 가공을 시작하지 얼마 안되는 짧은 시간안에 예리한 공구인선(tool edge)이 쉽게 떨어져 나가는 손상을 입는다. 둘째, 점진적으로 마모가 일정한 비율의 증가를 보이며 커진다. 셋째, 어느 시간이 되면 갑작스럽게 마모율이 커진다. 이에 의해서 절삭력이 급증하게 되며 피삭재의 표면에 광택이 발생한다. 이와 같은 여유면 마모의 진행 경향에 의해 세번째 단계에 이르기 전에 공구의 교체는 필연적이라고 할 수 있다.

실험에 사용된 오스테나이트계 SUS304는 같은 재종의 스테인레스강 중에서도 난삭성의 정도가 심하며 가공경화성도 큰 편이라, Kazuo Nakayama는 오스테나이트계 스테인레스강과 같은 금속을 작은 경사각의 공구로 절삭할 때 매우 얇은 톱니형의 칩이 발생한다고<sup>(6)</sup> 보고했다.

### 2-2. 절삭성 특성

실제 절삭과정 중 칩이 발생하는 전단면, 칩과 공구 및 공작물 사이의 마찰작용등에 의해 절삭인선 부위에는 정상마모가 발생하는 것은 피할 수 없고, 또한 이러한 공구마모가 진전되고 있는 상태에 따라 절삭저항은 당연히 심하게 변동되는 특성으로 나타나게 되므로 실험 데이터(data)를 동적 특성으로 해석하는 것은 필수적이라 판단된다.

따라서 본 연구에서는 난삭재인 SUS304 절삭시 공구마모가 특히 심하게 진전될 것이므로 이러한 공구마모 진전 상태에 따르는 절삭저항의 변동 특성을 파악하고 규명하기 위해 절삭력 RMS(Root Mean Square) 특성을 이용하였다.

다음은 RMS특성 해석을 하기 위해 적용한 이론<sup>(16)</sup>이다.

Fig. 1과 같이 절삭저항의 변화폭을 임의의 미소구간으로 나누었을 때 시간에 대한 확률  $\text{Prob} [x_1 < x(t) < x_1 + \Delta x_1]$ 은 총 측정시간 T 동안에 각 구간의 힘의 변화와  $\Delta x_1$ 사이에서 발생된 시간의 합을  $Tx_1$ 로 나타내고

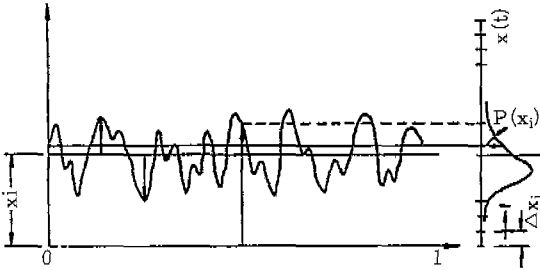


Fig. 1 Description of one-dimensional probability density distribution

다음과 같이 정의된다.

$$\text{Prob}[x_i < x(t) < x_i + \Delta x_i] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T x_i}{T} \quad (1)$$

따라서 확률밀도함수  $p(x_i)$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$p(x_i) = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \frac{\text{Prob}[x_i < x(t) < x_i + \Delta x_i]}{\Delta x_i} = \lim_{\Delta x_i \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta x_i} \left[ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{T x_i}{T} \right] \quad (2)$$

일정구간 내에서 절삭저항의 빈도수( $r$ )에 대한 확률  $P(x_i)$ 은 식 (3), 확률밀도  $p(x_i)$ 는 식 (4)와 같다.

$$p(x_i) = P(x_i) \Delta x_i = \frac{r_i}{N} \quad (3)$$

$$P(x_i) = \frac{p(x_i)}{\Delta x_i} = \frac{r_i}{\Delta x_i \cdot N} \quad (4)$$

(단,  $N = \sum_{i=1}^n r_i$ ,  $N$ : sampling number)

平均  $\bar{x}$ , 標準偏差  $\sigma_x$  및 RMS는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n r_i \cdot x_i = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot p(x) \cdot dx \quad (5)$$

$$\sigma_x = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n r_i \cdot (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \int_{-\infty}^{\infty} (x_i - \bar{x})^2 \cdot p(x) \cdot dx \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n r_i \cdot (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

### 2-3. AE 특성

AE는 재료 내부 구조의 동적 운동에 의한 국부적인 방출에 의하여 발생하는 탄성 응력파로서 정의<sup>(17)</sup>된다. AE의 발생 원인은 재료내의 국부적인 과도한 불안정성이라고 볼 수 있으며 국부적으로 불안정한 조건하에 있으면 전체가 불안한 상태로 되기 이전에 에너지(energy)가 가장 낮은 상태로 진행하려고 한다. 이러한 상태는 재료의 내부 구조가 변화되어 소성변형을 일으키게 되고 이때 방출되는 것이 AE이다.

칩의 생성에 따른 AE신호의 발생원은 크게 세가지로 구분된다. Fig. 2는 2차원 절삭시의 AE신호의 발생원을 도시한<sup>(18)</sup> 것이다.

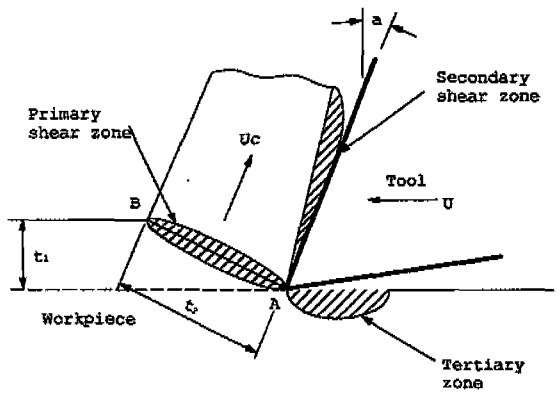


Fig. 2 Source of acoustic emission signals

이중 가장 큰 AE를 발생시키는 곳은 칩과 가공물 사이의 전단영역인 제1영역(primary shear zone)이다. 이곳에서는 공구의 절삭으로 인한 재료의 소성변형이 발생하여 AE 신호의 근원지가 된다. 두번째로 AE 발생원은 공구와 칩과의 마찰로 인한 공구와 칩의 접촉면(secondary shear zone)이다. 칩과 공구와의 마찰에 의해 AE를 발생하며, 공구는 연삭마모를 일으켜 크레이터 마모(crater wear)를 형성한다. 세번째로 공구의 여유면(tertiary zone)에서 공구의 압피력은 공구와 가공면사이의 마찰을 발생시켜 여유면 마모를 생성하며 AE를 발생시킨다. 이들 3가지의 발생원에서 생성된 AE신호는 공작물에 부착된 센서에 도달된다. 이들 AE신호는 도중에서 반사되거나 감쇄를 일으켜 실제 생성된 AE신호와 센서에 감지된 신호와는 다소 차이가 생길 수 있다.

### 3. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 피삭재는 오스테나이트계 스테인레스강 SUS304(180×50×10mm)이며, 절삭공구는 대한중석의 SPKN 1203 EDTR을 사용하였다. SUS304의 시편 형태는 Fig. 3과 같다. 사용한 밀링커터는 리이드각이 15°인 M115SP04R-12(대한중석)로서 8개의 인서트(insert)를 장착할 수 있다.

절삭실험은 주축 회전수를 9단으로 변화시킬 수 있는 만능밀링머신(universal milling machine)을 사용하였으며, 시편을 고정시키기 위한 지그를 제작하여 SUS304 시편을 고정시켰다. 시편과 지그의 합체를 공구동력계(tool dynamometer)에 고정하였고, 이 공구동력계는 밀링머신의 테이블(table) 위에 수평으로 고정하였다. 본 실험에서는 밀링커터에 하나의 인서트만을 장착하고서 시편을 정면밀링 커터내에 위치시키고, Table 1과 같은 절삭조건으로 물림깊이 0.3mm로 고정하여 한쪽 방향으로만 절삭하였다. 물림깊이를 정확하게 장입하기 위해 다이얼 게이지(1/100mm)를 사용하였으며, AE신호 검출을 위한 AE센서는 시편 측면에 부착하였다.

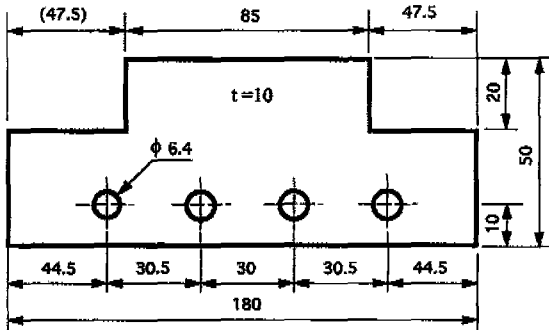


Fig. 3 The shape of specimens of SUS304

Table 1 Cutting condition for milling experiments

RPM \ Feed(mm/min)	370	715	1400
22	0.059	0.030	0.015
41	0.110	0.057	0.029
87	0.235	0.121	0.062

(Table내의 값들은 mm/rev)

밀링과정에서 생성된 절삭력 성분은 공구동력계를 통하여 나오게 되고, 여기서 나온 절삭력 성분들은 charge amplifier에서 증폭되고, IBM PC에 연결된 A/D converter로 입력되었다. A/D converter로 들어간 절삭력 성분들은 A/D converter를 빠져 나온 후 IBM PC에 전기적인 신호로 입력되고 이것은 캘리브레이션 된 값들과 관련하여 관련된 값으로 계산하였다.

AE센서로부터 나온 AE신호는 preamplifier에서 100~300 kHz의 plug-in filter를 사용하여 소음을 제거한 후 40dB로 증폭하여 LOCAN AT의 preamp input단자로 입력하였다. LOCAN AT에서 100~1200kHz의 필터를 통과한 후 시스템의 신호처리를 위해 A/D converter에서 digital화 되어 입력되었다. counts, duration, 에너지등의 측정을 위한 threshold는 55dB로 설정하였고 각각의 timing 인자들은 작은 시편의 경우에 맞춰 설정하였다. 필요한 결과를 얻기 위해 그래프를 설정하고 실험은 많은 데이터의 경우를 대비하여 activity mode로 설정하였다.

AE 데이터의 처리를 위해서 기본적으로 LOCAN AT장비가 사용되었고, 절삭력과 RMS를 측정하기 위한 보조장비로서 IBM AT 286과 A/D converter가 사용되었다. 인서트의 마모는 한번의 절삭행정이 끝나고 나서, IBM PC상에서 얻어진 절삭력과 RMS값을 관찰하여, 만일 절삭력 성분과 RMS성분의 급격한 증가가 있다면, 이것은 공구의 마모로 인한 것이라고 판단하여 일단 작업을 멈추고서 밀링커터내의 인서트 마모를 공구현미경으로 마모상태를 확인한 후, 윤곽투영기(profile projector)에서 자세하게 여유면 마모를 측정하였다. 공구면에 발생하는 여유면 마모가 ISO의 마모 판정기준(VB=0.3mm)을 초과했을 때를 공구수명 한계로 결정하였다.

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4-1 공구마모 특성

Fig. 4는 feed rate 0.12 mm/rev, 물림깊이 0.3 mm로 일정하게 고정시킨 후 절삭속도를 변화시키면서 절삭하였을 때 시간에 따른 공구의 여유면 마모를 보여주고 있다. 시간이 증가함에 따라 공구의 여유면 마모는 증가하고 있음을 알 수 있으며, 또한 절삭속도가 빠른 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 공구수명 한계인<sup>(9)</sup> VB=0.3 mm 근처에 도달하는 절삭시간이 짧아

침을 관찰할 수 있다.

본 실험을 통하여 관찰된 공구마모의 특성은 일반적으로 선삭시 나타나는 마모의 특성과는 상당히 다르게 나타남이 관찰되었다. 선삭작업중 SUS304 절삭시 나타나는 공구마모의 특성은 여유면 마모의 폭이 넓고 점진적으로 증가하는데 반해, <sup>(20)</sup> 정면밀링 작업중 SUS304 절삭시 나타나는 공구마모의 특성은 공구인선의 결손으로 인한 마모가 많이 나타나고, 여유면 마모 폭이 좁으며 Fig. 5의 SEM 사진에서 보여주는 것과 같이 V자 형태의 마모가 발생한다. 이것은 정면밀링 작업의 경우 단속 절삭이기 때문에 불연속 칩의 형태가 발생하고, 전단면을 따라 공구인선으로 흐르는 열로 인

해 급격한 공구마모가 이루어지기 때문이라고 판단된다.

#### 4-2 절삭력특성

Fig. 6, 7, 8은 RPM 370, feed 41 mm/min 물림깊이 0.3 mm로 일정하게 고정시킨 후 절삭을 하였을 때 여유면 마모의 진전에 따른 X축(이송분력), Y축(주분력), Z축(배분력)의 절삭력 신호를 보여주고 있다. 정면밀링 절삭은 선삭과는 다른 단속절삭이기 때문에 절삭력이 일정하게 나오지 않고 주기적 신호가 크게 변하는 것이 관찰되어진다. 공구마모가 진행됨에 따라 각 분력에 대한 절삭력의 최대값이 현저하게 증가하는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 9는 RPM 370, feed 41 mm/min, 물림깊이를 0.3 mm, Fig. 10은 RPM 715, feed 41 mm/min, 물림깊이 0.3 mm로 일정하게 고정시킨 후 절삭하였을 때, 각각 시간에 따른 여유면 마모와 X, Y, Z축의 절삭력 RMS값을 보여주고 있다.

마모가 진행됨에 따라 각분력의 절삭력 RMS값은 점진적으로 증가하며, 특히 마모가 공구수명 한계에 도달하는 0.25~0.3 mm 정도에서 급격히 증가함을 관찰할 수 있다. 이것으로 정면밀링 가공시 절삭력 RMS값으로 마모검출이 가능하다고 판단된다.

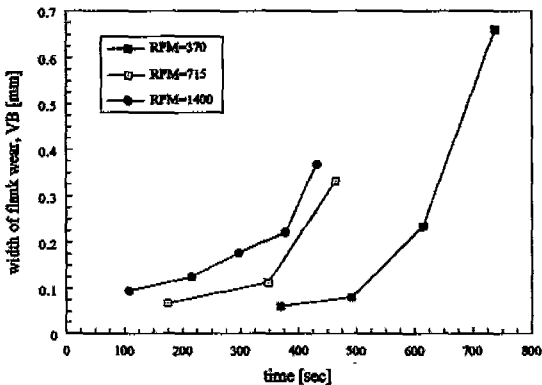


Fig. 4 The relation between flank wear and cutting time when depth of cut and feed are constant ( $f=0.12$  mm/rev,  $t=0.3$  mm)



Fig. 5 SEM micrograph of flank wear shape (RPM=715,  $f=87$  mm/min,  $t=0.3$  mm)

#### 4-3 AE신호 특성

절삭과정동안 AE는 주로 공구와 가공물 사이의 전단 영역과 칩과 공구의 마찰영역에서 발생된다. 또한 마모된 공구면과 가공물 사이에서 부가적인 마찰운동이 AE를 발생시킨다. 공구마모로 인해 접촉면적이 증가할 때 AE의 발생도 증가한다. 결과적으로 AE의 신호 특성은 공구마모가 진행할 때 변화할 것으로 생각된다.

Fig. 11은 RPM 370, feed 22 mm/min, 물림깊이 0.3 mm로 일정하게 고정시킨 후 절삭을 하였을 때, 절삭중 발생되는 AE가 LOCAN AT로 입력된 그림 중, 시간에 따른 에너지의 값을 표시한 것이다.

그림에서 볼 때 시간에 따른 에너지의 값은 여유면 마모가 0.05~0.26 mm로 증가함에도 불구하고 거의 일정하게 나타났다. 일반적으로 공구마모 탐지기법의 하나로 AE인자 중 시간에 따른 에너지를 사용하는데 본 연구에서는 뚜렷한 현상을 보여주지 않는다. 그 원인은 밀링절삭이 단속 절삭이기 때문에 AE신호가 연속적으로 발생되지 않았기 때문이라 판단된다. <sup>(21)</sup>

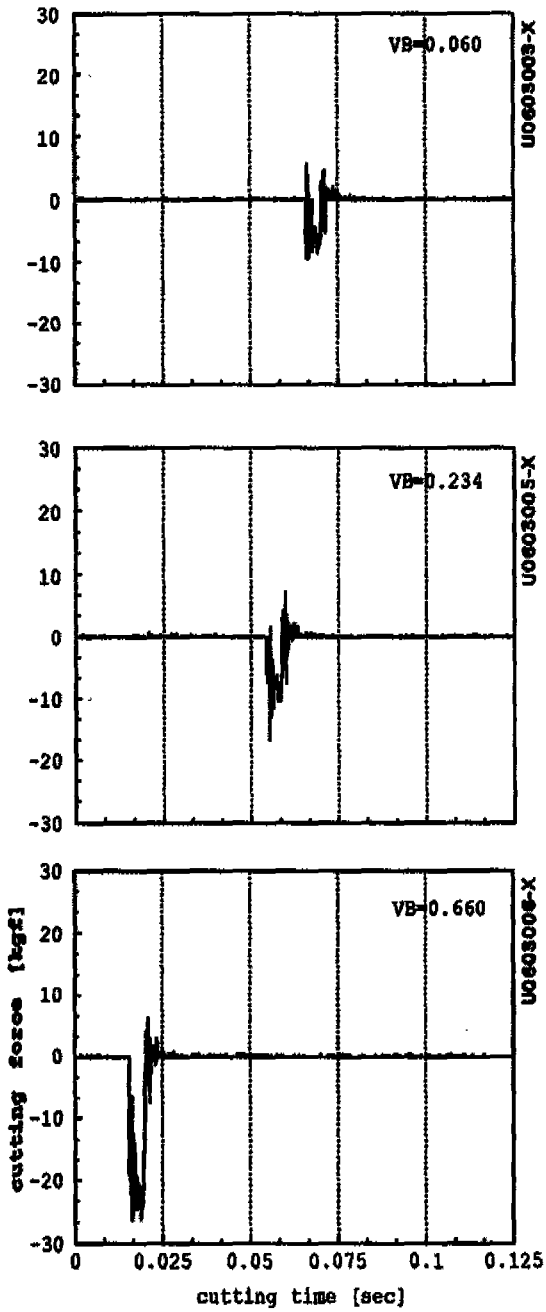


Fig. 6 The relation between X-force variation and flank wear. (RPM=370,  $f=41$  mm/min,  $t=0.3$  mm)

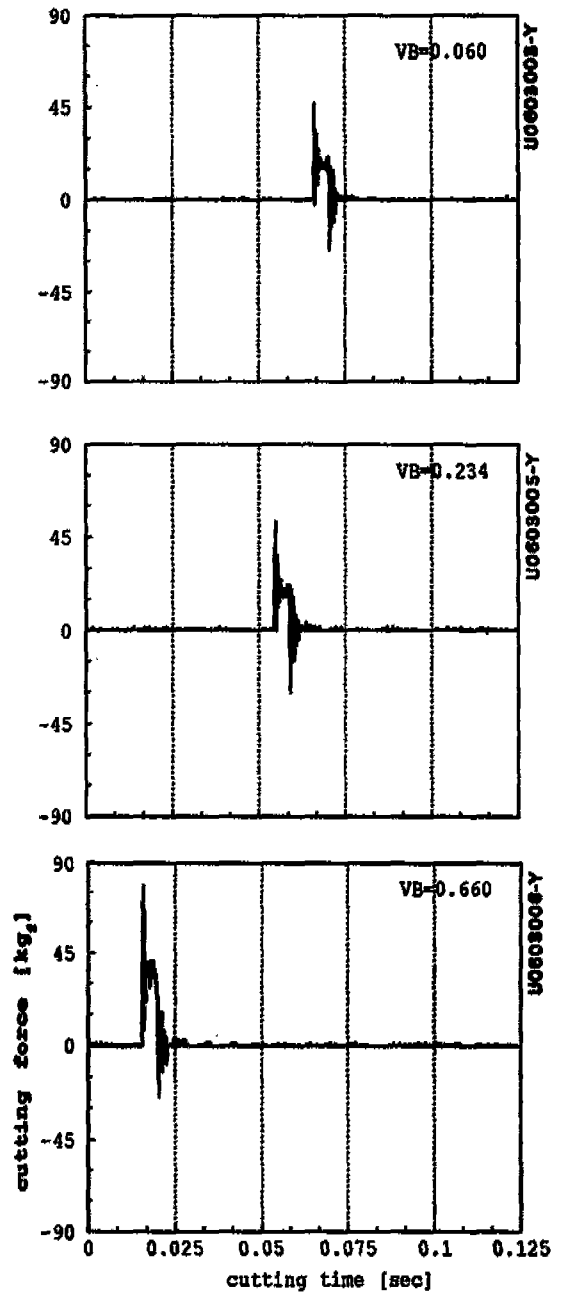


Fig. 7 The relation between Y-force variation and flank wear. (RPM=370,  $f=41$  mm/min,  $t=0.3$  mm)

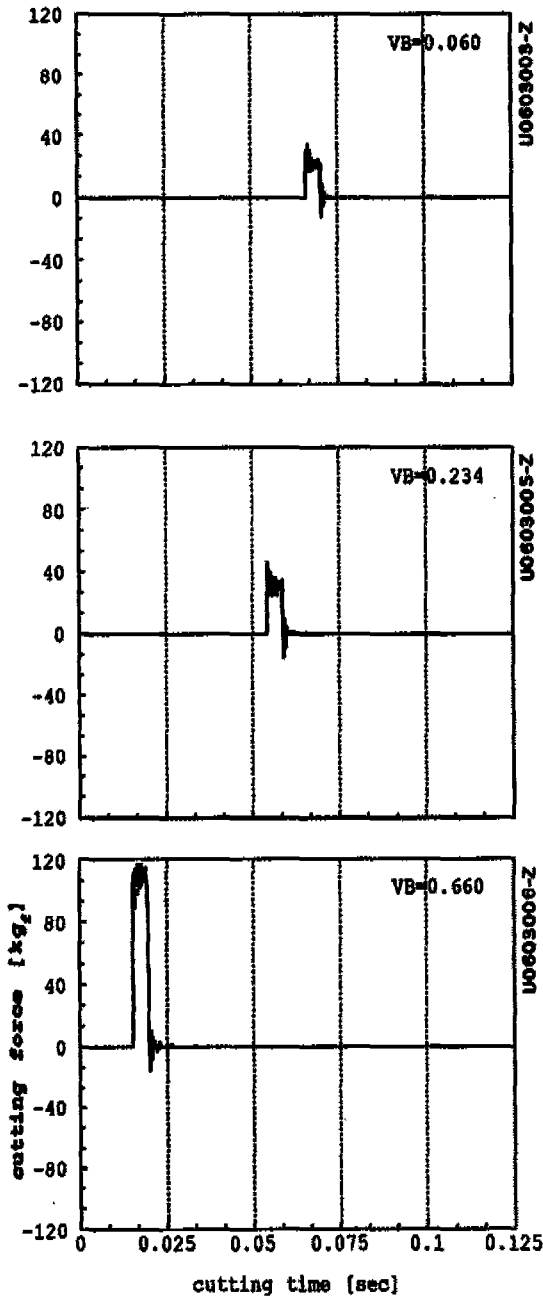


Fig. 8 The relation between Z-force variation and flank wear. (RPM=370, f=41 mm/min, t=0.3 mm)

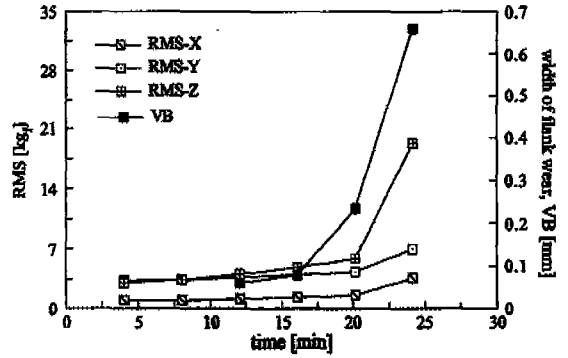


Fig. 9 The relation between RMS, VB and cutting time(RPM=370, f=41 mm/min, t=0.3 mm)

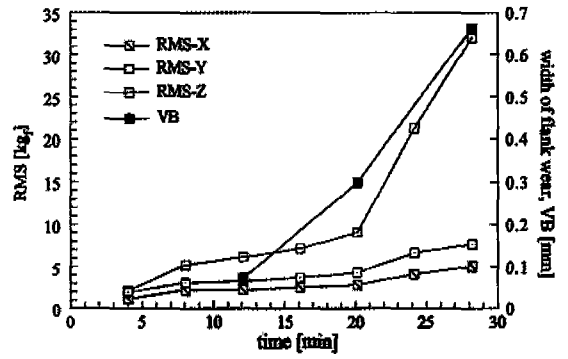


Fig. 10 The relation between RMS, VB and cutting time(RPM=715, f=41 mm/min, t=0.3 mm)

Fig. 12는 RPM 370, feed 22 mm/min, 물림깊이 0.3 mm 로 일정하게 고정시킨 후 절삭을 하였을 때 주파수 영역의 변화에 따른 count rate의 변화를 표시한 그림이다.

그림에서 볼 때 여유면 마모가 0.05~0.26 mm 로 증가함에 따라 count rate의 값이 90~180Khz의 주파수 범위에서 크게 변하고 있음을 알 수 있다. 이것은 공구가 마모될 때 나타나는 소리의 특성이 주파수의 범위가 90~180Khz임을 알 수 있으며, 이것으로 주파수 영역에서 count rate의 변화로 공구마모를 감지할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 RPM 370, feed 22 mm/min, 물림깊이 0.3 mm 로 일정하게 고정시킨 후 절삭을 하였을 때 count rate에 따른 에너지 값의 변화를 표시한 그림을 보여주고 있다.

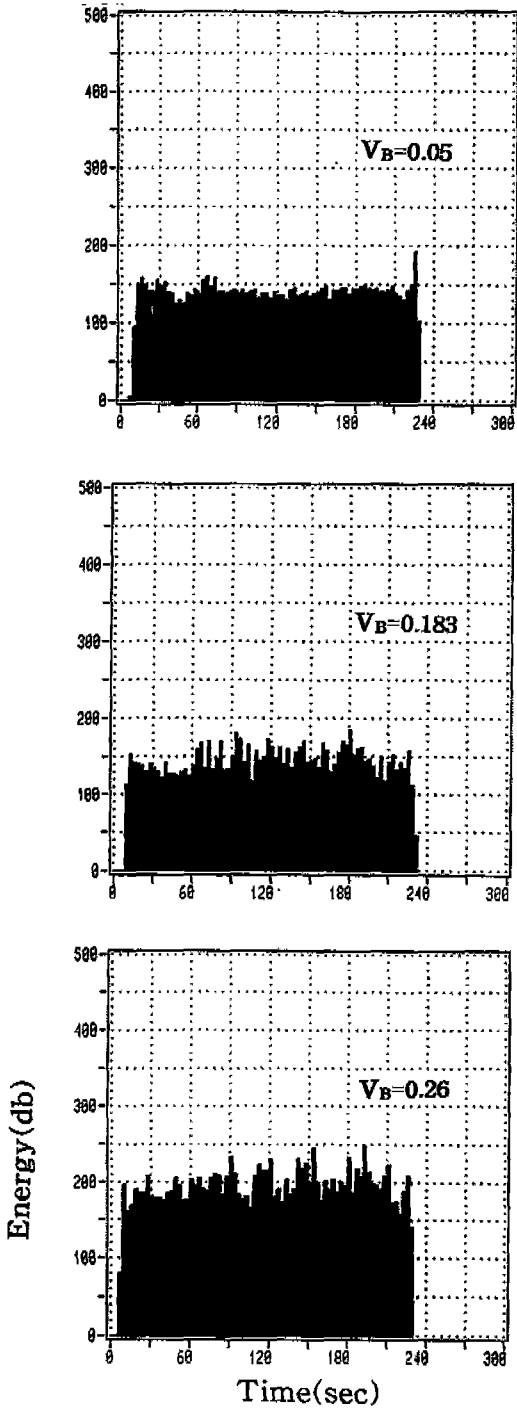


Fig. 11 Energy vs. Time  
(RPM=370,  $f=22\text{mm/min}$ ,  $t=0.3\text{mm}$ )

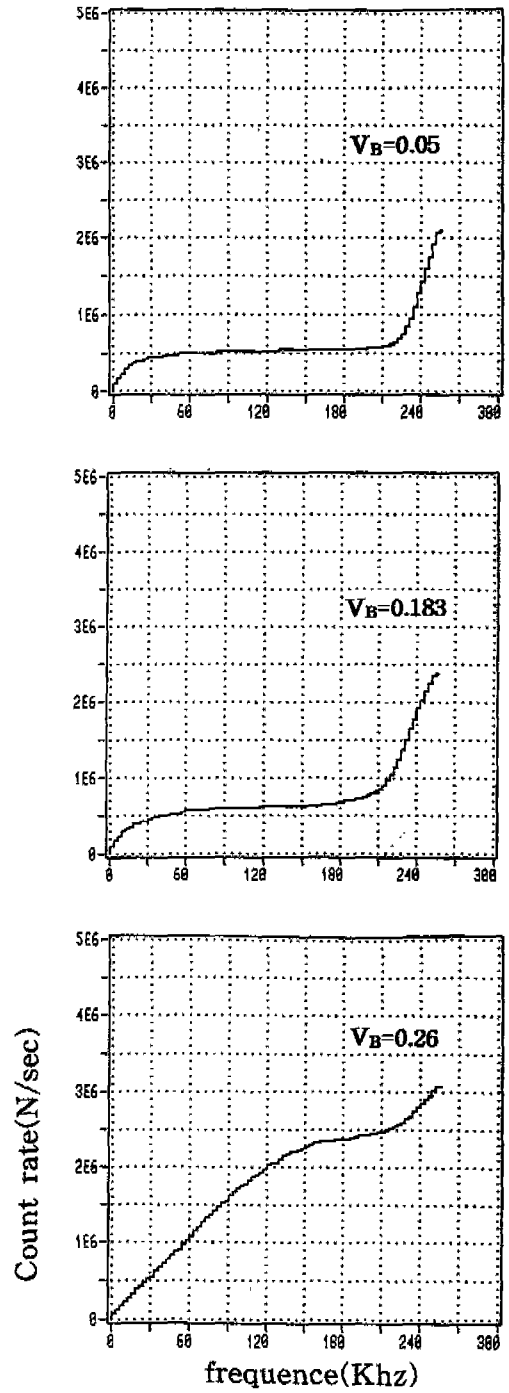


Fig. 12 Count rate vs. frequency  
(RPM=370,  $f=22\text{mm/min}$ ,  $t=0.3\text{mm}$ )



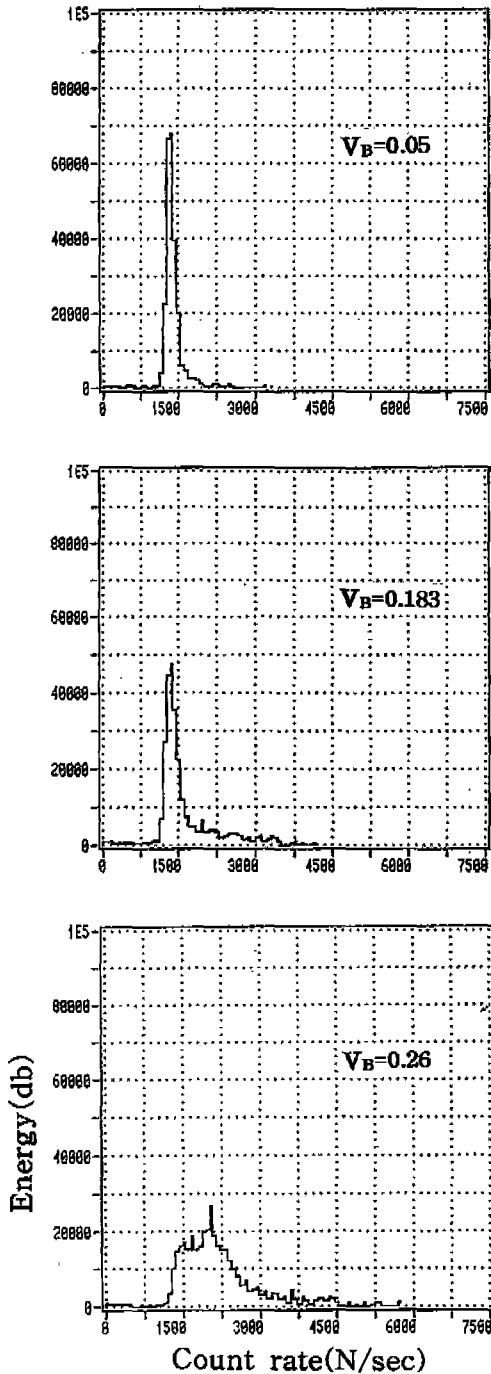


Fig. 13 Energy vs. Count rate  
(RPM=370, f=22 mm/min, t=0.3 mm)

절삭시 나타나는 소리의 특성은 공구가 마모되지 않았을 때 소리는 경쾌한 소리가 발생되고 마모가 증가함에 따라 둔탁한 소리가 발생된다. 마모가 발생하지 않은 공구로 절삭할 때 시간에 따른 count rate의 값은 일정한 주파수 대역에서 집중적으로 발생되며 마모가 증가함에 따라 count rate의 값은 여러 주파수 대역에서 산발적으로 발생된다. 그러므로 공구마모가 증가함에 따라 count rate에 대한 에너지의 최대값이 크게 감소하며 분산되는 현상이 나타난다. Fig. 13에서  $V_B$ 가 0.05 mm 일 때 count rate에 대한 에너지의 최대값이 크게 나타나는데 이것은 공구가 마모되지 않은 것을 알 수 있으며, Fig. 13에서  $V_B$ 가 0.26 mm 일 때 count rate에 대한 에너지의 최대값이 감소되었는데 이것은 공구가 마모되었음을 알 수 있다. 공구마모가 수명한계에 도달했을 때 count rate에 따른 에너지의 최대값은 매우 작은 값으로 감소된다. 그러므로 count rate에 따른 에너지의 최대값을 이용하여 공구마모 검출이 가능하다고 판단된다.

### 5. 결 론

이상으로부터 난삭재인 SUS304의 정면밀링 가공시 발생하는 공구마모와 AE신호의 해석을 요약하면 다음과 같다.

1. 절삭력 RMS특성치로 공구마모의 검출이 가능하다.
2. AE인자에서 시간에 따른 에너지보다 주파수 영역에서 count rate의 특성치를 공구마모의 검출 인자로 사용하는 것이 적절하다.
3. 공구마모가 진행됨에 따라 count rate에 대한 에너지의 최대값이 감소하고 분산되는 현상으로 공구마모 검출이 가능하다.

### 참고문헌

1. H. Takayama, et al., "Study on Adaptive Control in ACE Milling Machine", Annals of the CIRP, Vol.23, No.1, 1974.
2. A. J. Williamson, "Constriction-Resistance Concept Applied to Wear Measurement of Metal Cutting Tools", Proc. of the IEEE, Vol.18, No.2, 1971.
3. G.F. Micheletti, W. Koenig, H.R. Victor,

- "In-process Tool Wear Sensors for Cutting Operations", *Annals of the CIRP*, Vol.25, No.2, pp.483~488, 1976.
4. J.H. Tarn, M. Tomizuka, "On-Line Monitoring of Tool and Cutting Conditions in Milling", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol.111, pp.206~212, Aug., 1989.
  5. Y. Altintas, I. Yellowley, "In-process Detection of Tool Failure in Milling Using Cutting Force Models", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol.111, pp.149~157, May, 1989.
  6. L.V. Crowl, "Cutting Temperature vs Tool wear", *Annals of the CIRP*, Vol.24, No.1, pp.73~76, 1975.
  7. M. Rahman, "In-Process Detection of Chatter Threshold", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol.110, pp.44~50, Feb., 1988.
  8. T. Moriwaki, M. Tobito, "A New Approach to Automatic Detection of Life of Coated Tool Based on Acoustic Emission Measurement", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol.112, pp.212~218, Aug., 1990.
  9. Kazuo Nakayama, The Formation of "Saw-Toothed Chip" in Metal Cutting, pp.572~577, 1977.
  10. E. Kannatey-Asibu, Jr., "The Transport-Diffusion Equation in Metal Cutting and its Application to Analysis of the Rate of Flank Wear", *Trans. ASME*, Vol.107, pp.81~90, Feb., 1985.
  11. E. K. Levy, "Analytical Investigation of the Effect of Tool Wear on the Temperature Variations in a Metal Cutting Tool", *Trans. ASME*, pp.251~257, Feb., 1976.
  12. G. Boothroyd, "Effect of Tool Flank Wear on the Temperatures Generated during Metal Cutting", *MTDR*, pp.667~680, 1967.
  13. C. Sikdar, S. Paul, "Effect of Variation in Edge Geometry on Wear and Life of Coated Carbide Face Milling Inserts", *Wear*(157), pp.111~126, 1992.
  14. 狩野 勝吉, "難削材의 切削加工技術" 기술정보, pp.162, 1989.
  15. 서남섭, "金屬 切削 理論", pp.139~143, 동명사, 1990.
  16. 吳錫炯, "톱니형 Chip의 生成特性에 關한 研究", 全北大學校 博士學位論文, pp.103, 1990.
  17. R.G. Liptai, D.O. Harris, "An Introduction to Acoustic Emission", *Acoustic Emission*, ASTM ATP505, pp.308, 1972.
  18. E. Kannatey-Asibu, Jr., David A. Dornfeld, "Quantitative Relationships for Acoustic Emission from Orthogonal Metal Cutting", *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol.103, pp.330~341, Aug., 1981.
  19. International Standard, ISO-3685, pp.1~41, 1977.
  20. 정진용, 오석형, 김종택, 서남섭, "SUS304 절삭시 Carbide 공구의 Flank 마모에 관한 연구", 한국정밀공학회, 제8권, 제3호, pp.44~54, 1991.
  21. Edward Nkechi Diei, "Investigation of the Milling Process Using Acoustic Emission Signal Analysis", Ph.D. Thesis, University of California Berkeley, 1985.