

# 마이크로 엔드밀링에서 음향방출 신호를 이용한 상태감시

정연식\*, 강익수+, 김전하+, 강명창\*\*, 김정석\*\*\*, 안중환\*\*\*

## State Monitoring using AE Signal in Micro Endmilling

Yun-Shick Jeong\*, Ik-Soo Kang+, Jeon-Ha Kim+, Myung-Chang Kang\*\*

Jeong-Suk Kim\*\*\*, Jung-Hwan Ahn\*\*\*

### Abstract

Ultraprecision machining and MEMS technology have been taken more and more important position in machining of microparts. Micro endmilling is one of the prominent technology that has wide spectrum of application field ranging from macro parts to micro products. Also, the method of micro-grooving using micro endmilling is used widely owing to many merit, but has problems of precision and quality of products due to tool wear and tool fracture. This investigation deals with state monitoring using acoustic emission(AE) signal in the micro-grooving. Characteristic evaluation of AE raw signal, AE hit and frequency analysis for state monitoring is also presented in the paper.

**Key Words :** AE Signal(음향방출 신호), Micro Grooving(미세홈 가공), Tool Fracture(공구파손)

## 1. 서론

최근 정밀기술의 진보와 함께 각종 광학소자, 전자소자의 소형화 고집적화의 요구가 높아지고 있다. 광학소자분야에서는 광학소자를 이용한 광학계가 더 정밀해지고 복잡해짐에 따라 광학소자를 구성하는 가공기술도 비약적으로 발전하였다. 이러한 미세형상부품 중 고세장비의 다중 미세 구조물 제품, 복잡형상의 마이크로 채널, 도파로, PZT 센서, 필터, PDP(Plasma Display Panel) 등은 그 구조가 격벽 구조로 되어 있다.

일반적으로 PDP 격벽의 수치오더는 기계적인 절삭가공으로도 충분히 가공이 가능하며, 따라서 최근에는 미세부품의 가공에 적용 가능한 기계적 절삭 가공법의 개발 및 미세공구에 초점이 모아지고 있는 추세이다<sup>(1-3)</sup>.

기계적인 절삭가공에 의한 미세홈 가공방법은 우수한 면조도, 짧은 가공시간과 가공의 용이성 등 많은 장점을 가지고 있으나, 미세공구의 마모 또는 파손에 따른 가공물의 정밀도 및 품질의 저하를 초래하기도 한다. 따라서

\* 발표자, 부산대 정밀기계공학과(pig1914@pusan.ac.kr)

주소: 609-735 부산시 금정구 장전동 산30번지

+ 부산대 정밀공학과 정밀공학연구소

++ 부산대 정밀정형 및 금형가공연구소

+++ 부산대 기계공학부

양호한 표면상태를 얻기 위해서 공구마모 및 공구파손과 같은 이상상태 감시가 필요하다<sup>(4)</sup>.

일반적으로 공구의 상태감시 방법에 있어서 공구와 공작물 사이에 발생하는 절삭력을 측정하는 방법이 대표적이지만 미세가공에서는 절삭력이 아주 미약하고, 감시 장비의 고가로 인해 실제 현장에서 사용하기에는 난점이 있다. 특히 마이크로 엔드밀을 사용한 가공에 있어서 고 회전수로 인하여 정확한 신호를 획득하기 어렵다. 따라서 최근에는 저가, 유연성, 정확성 등을 만족시키기 위해 모터 부하 전류, AE(Acoustic Emission), 진동 측정 등으로 공구상태를 감시하고자 하는 연구가 진행되고 있다<sup>(5-6)</sup>.

본 연구에서는 미세홈 가공에서 가공조건 및 미소 응착에 따른 AE 신호의 특성변화를 조사하고, 주파수 특성을 통하여 미세공구의 상태감시에 유용함을 밝히고자 한다.

## 2. 실험적 배경

### 2.1 AE 신호특성

일반적으로 AE는 고체의 내부구조가 외부하중의 영향에 의해 재배치를 이루면서 변형에너지가 급격히 풀림에 따라 방출되는 일종의 탄성응력파로 알려져 있다. 종래의 레이저, 초음파 등의 파괴과 검사는 대부분 정적인 균열이나 파괴 등의 감지에는 유효하지만, 실제 동적인 상태에서 발생하는 균열이나 파괴 등의 감지에는 AE 신호의 검출에 의한 상태 감시 및 진단이 많은 분야에서 실효를 거두고 있다.

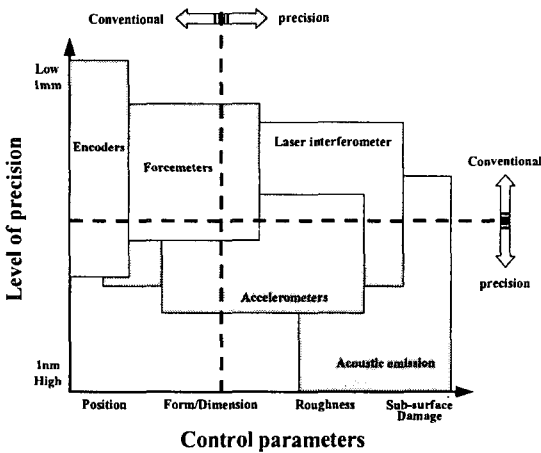


Fig. 1 Sensor application in accordance with level of precision

Fig. 1은 각기 다른 정밀도를 요하는 경우에 있어서 센서의

적용 예를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 AE 센서는 높은 민감도를 나타내며, 또한 AE 측정법은 다른 방법에 비하여 기계진동이나 잡음보다 훨씬 높은 주파수 범위를 가지고, 설치 및 측정이 비교적 용이하고, 작업에 간섭이 발생하지 않기 때문에 초정밀 가공 시의 가공상태 감시에 널리 사용되고 있다.

## 3. 실험장치 및 방법

### 3.1 실험장치

미세홈 가공의 상태감시를 위해 본 실험에서 사용한 가공기와 상태감시시스템의 구성을 Fig. 2에서 나타내었다.

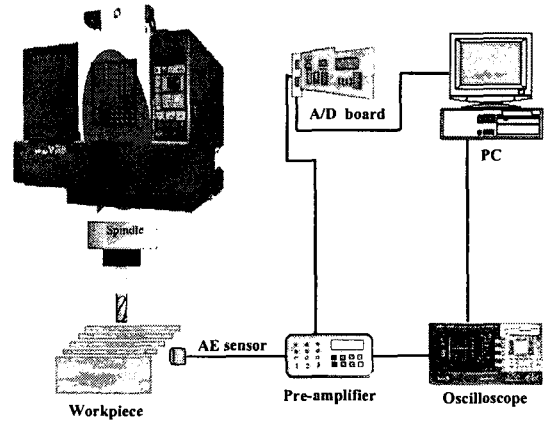


Fig. 2 Experimental Set-up for Cutting Condition Monitoring

Table 1 Specification of Instrument

Instrument	Specification
AE Sensor	PICO Type[PAC]
Oscilloscope	Lecroy9300A, 200MHz
Pre-Amplifier	100~1200kHz Band pass filter
A/D board	AE DSP 16/32- [PAC]
Tool	2 Flute Flat Endmill (TiAlN-coated Tool)
Workpiece	Al6061, STD11(HrC25)

최대주축회전수 20,000rpm인 고속머시닝센터(MAKINO

V55)에서  $\varnothing 0.2$  초경플랫엔드밀을 사용하였으며, 공작물에 AE 센서를 부착하여 신호를 검출하였다. AE 신호는 오실로스코프를 통하여 관찰함과 동시에 A/D보드를 거쳐 PC로 전송하여 처리 하였다. 실험에 사용된 장비사양은 Table 1과 같다.

### 3.2 실험방법

먼저 마이크로 엔드밀을 이용한 미세홈 가공에서 가공조건에 따른 AE 신호의 특성을 파악하기 위하여 여러 조건에서의 가공실험에서 발생하는 AE 신호를 비교하였으며, 가공조건을 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Cutting condition of experiment

	Spindle revolution(rpm)	20,000rpm
STD11	Feed rate(mm/sec)	0.2 ~ 0.8
	Depth of cut( $\mu\text{m}$ )	5 ~ 40
Al6061	Feed rate(mm/sec)	5
	Depth of cut( $\mu\text{m}$ )	30

마이크로 엔드밀을 사용한 미세홈 가공에서 가공조건의 변화와 응착 및 파손과 같은 이상상태를 평가, 분석하고자 신호처리 시 여러 가지 파라미터를 사용하였다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 가공조건에 따른 AE 특성

#### 4.1.1 피드 변화에 따른 AE 특성

Fig. 3은 STD11의 미세홈 가공 시 피드 변화와 AE RMS 사이의 관계를 조사하기 위하여 회전수 20,000rpm과 20 $\mu\text{m}$ 의 절삭 깊이로 반복 실험하여 공구파손이 일어날 때까지의 실험한 결과이다.

피드가 증가할수록 AE RMS가 증가함을 볼 수 있는데 이는 공구와 공작물 사이의 응력의 증가에 기인한 것으로 사료된다. 또한 피드 0.8mm/sec에서 공구파손이 발생하였으며, 이때 AE RMS의 값이 급속히 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 4는 피드 변화에 따른 AE hit와 AE 에너지의 평균값을 나타내었다.

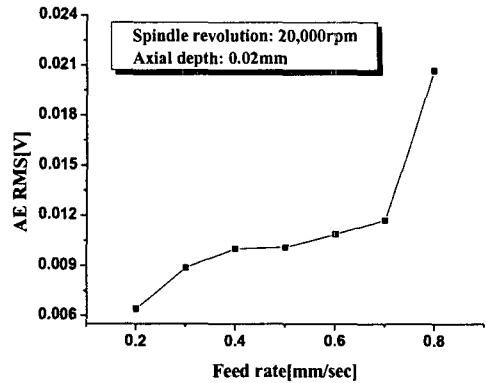


Fig. 3 AE RMS according to feed rate

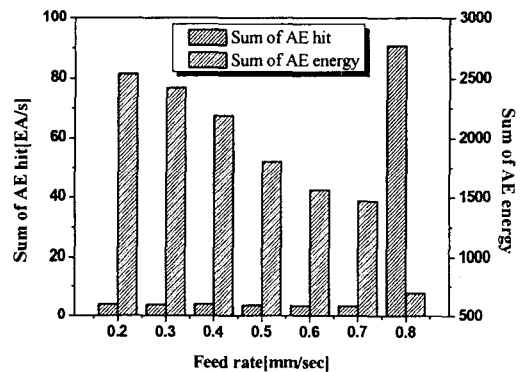


Fig. 4 AE hit and energy according to feed rate

피드가 증가함에 따라 AE hit는 거의 일정하지만 AE 에너지는 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는 피드의 증가에 따라 유사한 주파수가 발생하지만 공구와 소재와의 접촉되는 시간이 감소하여 나타나는 현상으로 사료된다.

공구의 파손 시는 급속히 AE hit가 증가하고, 에너지가 감소됨을 볼 수 있는데 이것은 공구에 응력이 집중되고 이때의 응력 변화는 AE를 발생시키며, 고주파수의 신호가 발생 된다. 또한, 공구파손은 순간적으로 일어나기 때문에 에너지가 낮은 것으로 사료된다.

#### 4.1.2 절입 변화에 따른 AE 특성

Fig. 5는 STD11의 미세홈 가공 시 절입 변화에 따른 AE RMS와의 관계를 조사하기 위하여 회전수 20,000rpm과 0.2mm/sec의 피드로 반복 실험하여 공구파손이 일어날 때

까지의 실험한 결과이다.

절삭 깊이의 증가에 따라 AE RMS의 크기가 증가함을 볼 수 있는데 이는 절삭속도의 증가에서와 마찬가지로 공구와 공작물 사이의 응력의 증가에 기인한 것으로 사료된다. 또한 절삭 깊이 30 $\mu$ m에서 공구파손이 발생하였으며, 이때 AE RMS의 값이 급속히 증가함을 볼 수 있다.

공구파손 시 AE RMS의 크기는 정상적인 가공에서의 신호와 확연히 구분될 수 있을 정도로 크기 때문에 AE RMS를 이용하여 마이크로 엔드밀의 상태를 감시하기에 유효한 것으로 사료된다.

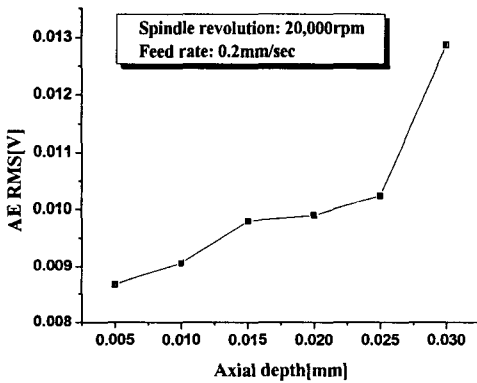


Fig. 5 AE RMS according to depth of cut

Fig. 6은 절삭 깊이의 변화에 따른 AE hit와 AE 에너지의 평균값을 나타내었다.

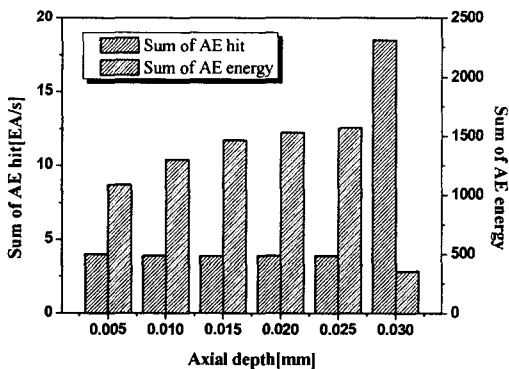


Fig. 6 AE hit and energy according to feed rate

절삭 깊이의 증가에 따른 AE hit의 변화는 미소하지만 AE 에너지는 증가함을 볼 수 있는데 이는 절삭 시 거의 유사한 주파수가 발생하였고, 단지 절삭 깊이의 증가에 따라 공구와 공작물 사이의 접촉면적의 증가로 절삭부하가 증가하며, 이는 AE 신호의 진폭을 증가시켜 나타나는 현상으로 사료된다.

절삭 깊이가 30 $\mu$ m 일 때 공구의 파손이 발생하였고, 이때의 AE 신호 변화를 보면 앞서 피드 변화에서의 공구파손과 마찬가지로 공구에 응력이 집중되어 공구의 파손직전 고주파의 신호와 낮은 에너지를 발생하기 때문인 것으로 사료된다. 그리고 Fig. 4와 5에서 보는 바와 같이 AE hit는 가공 중 이상상태 감시에 유효한 파라미터임을 알 수 있다.

#### 4.2 이상상태에서의 AE 특성

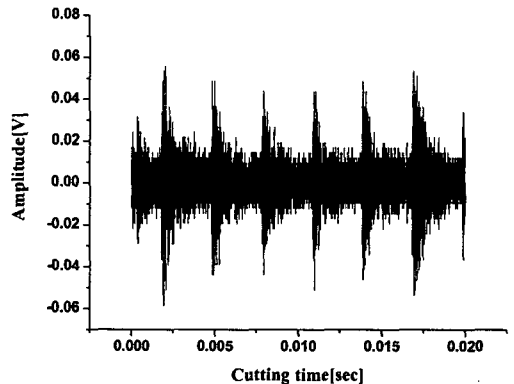
Al6061의 미세홈 가공 시 응착 및 공구 파손등과 같은 이상상태를 감시하기 위하여 회전수 20,000rpm, 절삭깊이 30 $\mu$ m, 피드 5mm/sec.으로 가공을 수행하였다.

Fig. 7은 각각의 상태에서 마이크로 엔드밀의 CCD 사진이다. Fig. 7의 (b)는 Al6061의 소재 가공 시 공구에 응착이 발생한 것이며, (c)는 공구 파손을 나타내었다.

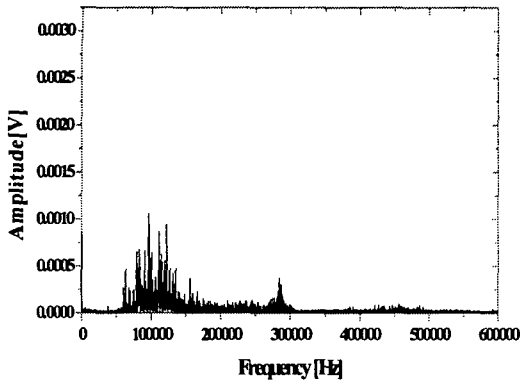


(a) New tool (b) adhesion tool (c) tool fracture

Fig. 7 Photograph of micro end mill tool



(a) AE raw signal



(b) FFT analysis

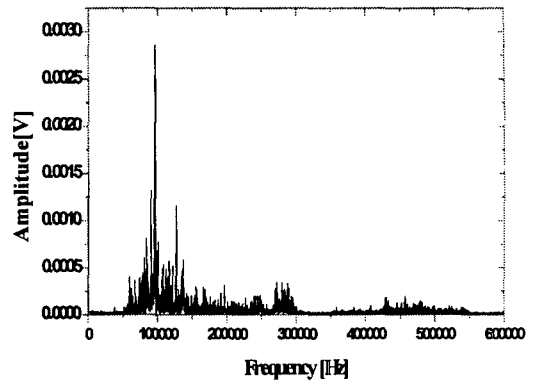
Fig. 8 AE raw signal and frequency characteristics in stable state

Fig. 8은 알루미늄 가공 시 안정된 상태에서 획득한 AE 신호이다.

AE 주파수 분석은 가공 시 발생하는 결함의 특징을 파악하기 위함으로, 특정 주파수 영역에서의 하이 피크 값을 기준으로 이상상태와 비교함으로써 AE 주파수 특성을 검토하고자 하였다.

Fig. 8(a)의 AE 원 신호에서 엔드밀의 날당 진폭을 볼 수 있으며, (b)의 주파수 분석에서는 가공 시 70~130kHz 대역에서 높은 피크 값을 보이고 있다.

Fig. 9는 마이크로 엔드밀에 응착이 발생하였을 때의 획득한 AE 신호이다.



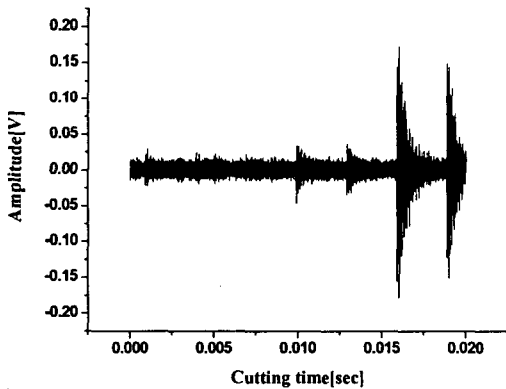
(b) FFT analysis

Fig. 9 AE raw signal and frequency characteristics in adhesion state

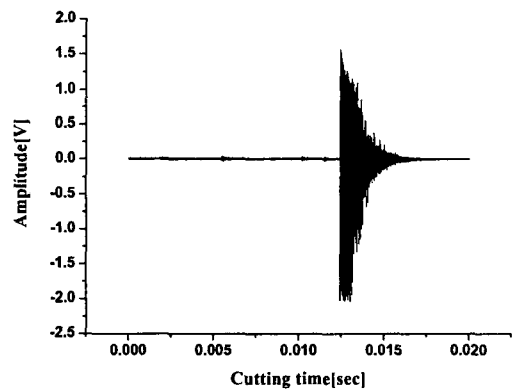
Fig. 9(a)의 AE 원 신호에서 응착 발생 시 진폭이 급속히 증가함을 볼 수 있으며, (b)의 주파수 분석에서는 90~100kHz 영역에서 안정된 상태에서의 주파수와는 확연히 다르게 진폭이 증가함을 볼 수 있다.

Fig. 10은 마이크로 엔드밀의 완전 파손이 일어났을 때 획득한 AE 신호이다.

안정된 상태에서 AE 원 신호의 고진폭 레벨은 약 0.05~0.06V 정도이며, 공구의 완전 파손이 발생하였을 때의 진폭 레벨은 Fig. 10(a)의 AE 원 신호에서 보는 바와 같이 고진폭 레벨이 약 2.0V 로 안정된 상태에 비해 33배 이상 증가 하였다.

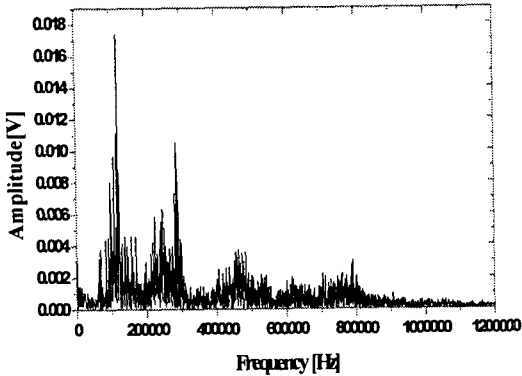


(a) AE raw signal



(a) AE raw signal

## 참고 문헌



(b) FFT analysis

Fig. 10 AE raw signal and frequency characteristics in tool fracture state

또한 Fig. 10(b)의 주파수 분석에서 보면 90~100kHz의 진폭의 증가와 800kHz 영역까지의 고주파수가 발생함을 볼 수 있다. 주파수 분석에서 고주파수 영역의 신호가 발생한 것은 Al6061의 미세홈 가공 시 공구에 응착 발생 및 칩배출의 불안정성의 원인으로 공구의 완전 파손이 발생한 것으로 사료되며, 이때 공구와 공작물 사이의 가공 시 발생된 AE 신호가 아닌 공구의 완전 파손에서 발생된 AE 신호인 것으로 사료된다.

## 5. 결론

마이크로 엔드밀을 이용한 미세홈 가공 시 AE 센서를 이용한 상태감시를 통해 다음과 같은 결과를 얻었다.

가공조건의 변화에 따라 여러 가지 파라미터를 사용하여 AE 특성을 분석한 결과 AE RMS는 피드 및 절삭깊이가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있었으며, AE hit는 안정된 상태에서 변화가 미미하지만 이상상태에서 변화가 확연함을 볼 수 있으므로 이상상태 감시에 유효한 파라미터임을 알 수 있었다.

이상상태 감시에 있어서 AE 신호를 획득하여 주파수 분석을 한 결과 결함 발생 시 주파수의 진폭이 증가함을 알 수 있었으며, 공구의 완전 파손 시에는 주파수의 진폭 증가와 더불어 고주파수 영역의 신호가 발생함을 알 수 있었다.

따라서 이러한 주파수 분석의 결과가 이상상태와 연관되어 나타남을 확인할 수 있으며, 분석된 결과를 바탕으로 AE를 이용한 인-프로세스 감시가 가능할 것으로 사료된다.

- (1) Seung Ki, M., Sun Woo, L., Dong Ju, L., Eung Sook, L., and Tae Jin, J., 2002, "A Study on the Machining Characteristics for Micro Barrier Ribs by using Micro Endmilling", *Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 11, No. 3
- (2) Jemielniak, K., 2000, "Some aspects of AE application in tool condition monitoring", *Ultrasonics*, Vol. 38, pp. 604~608.
- (3) Prickett, P. W., 1999, "An overview of approaches to end milling tool monitoring", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 39, pp. 105~122.
- (4) Takata, S. and Nakajima, T., 1987, "Tool Breakage Monitoring by means of Fluctuations in Spindle Rotation Speed", *Annals of the CIRP*, Vol. 36, No. 1, pp. 49~52.
- (5) Tansel, I., Rodriguez, O., and Trujillo, M., 1998, "Micro-end-milling- I. Wear and breakage", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 38, pp. 1419~1436.
- (6) Liang, S. Y., and Dornfeld, D. A., 1989, "Tool Wear Detection Using Time Series Analysis of Acoustic Emission", *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 111, No. 8, pp.199~205.