

## 미세 음향방출 감시장치 개발 - 고정도 미세입자 가공상태 감시에의 적용 -

김성렬#, 김화영\*, 안중환\*\*

### Development of Acoustic Emission Monitoring System for Fine Machining - Application to Cutting State Monitoring in a Fine Fixed-abrasive Machining -

Sung Ryul Kim<sup>#</sup>, Hwa Young Kim<sup>\*</sup> and Jung Hwan Ahn<sup>\*\*</sup>

#### ABSTRACT

In case of fine machining processes, the cutting state monitoring by a skilled operator is impossible because the physical changes generated during fine machining are very weak. To realize the high efficient and precise fine machining, it is necessary to develop the sensor based monitoring system which is able to detect the fine changes of cutting state. In this paper, the fine acoustic emission monitoring system is developed to monitor the state of the fine machining process. The developed system consists of the AE sensor and the AE signal processing unit. And this has the high-sensitivity and bandwidth which can detect fine AE signal generated during fine machining process. In order to investigate the feasibility of the developed system, evaluation experiments were performed in the fine fixed-abrasive machining processes such as polishing and glass ferrule slicing. Experimental results show that the developed monitoring system possesses an excellent real-time monitoring capability at fine machining processes.

**Key Words :** Fine machining (미세가공), Acoustic emission (음향방출), Monitoring system (감시장치), polishing (연마), Slicing (절단)

#### 1. 서론

메카트로닉스, IT 기술의 발전에 힘입어 기계부품 및 장치의 소형화, 고정도화 그리고 다기능화가 급속히 진행되고 있으며, 이런 추세에 힘입어 고정도 기계부품 및 장치 제작에 필요한 고품위 미세 가공의 중요성이 점차 커지고 있다.

미세가공(Fine Machining)이란 공구와 가공물 사

이의 마찰접촉에 의한 탄성충돌, 국부적 소성 및 파괴와 같은 재료의 미시적 거동을 이용하여 고품위·고정도 형상을 창출하는 가공으로 반도체금형, 렌즈금형, 광부품 가공 등에 많이 사용되는 폴리싱(Polishing), 래핑(Lapping), 슬라이싱(Slicing)과 같은 미세고정입자 가공이 대표적인 미세가공이다. 미세가공은 가공기계의 정밀도뿐 아니라 가공조건, 공구의 열화정도, 가공상태 등에 따라 가공면의 품위

접수일: 2004년 12월 22일; 게재승인일: 2005년 4월 15일

# 교신저자: 부산대학교 지능기계공학과

Email : ncomecha@pusan.ac.kr, Tel. (051) 510-3087

\* 부산대학교 기계기술연구소

\*\* 부산대학교 기계공학부

가 달라지므로 이들에 대한 충분한 고려가 필요하다.

이런 미세가공들은 한번에 작은 가공에너지를 여러 번 가해 가공물을 미소제거 하면서 진행하기 때문에 물리적 현상변화가 미약해 가공상태 검출이 힘들다. 특히 미세가공은 고품위 형상창출을 목적으로 하는 경우가 많기 때문에 가공상태 감시에 대한 필요성이 범용가공보다 훨씬 크다.

미세가공용 감시센서는 가공공정에 방해를 주지 않으며 미세한 가공상태 변화를 신뢰성 있게 실시간 검출할 수 있어야 하며 주변잡음이나 가공조건 변화에 대한 강인성(Robustness)이 요구된다.

현재 미세가공 상태감시 센서로는 공구동력계, AE 센서 등이 주로 이용되고 있다. 공구동력계의 경우에는 미세한 가공력을 검출할 수는 있으나 공구동력계 설치문제로 인해 실제 가공공정에 적용하기에는 한계가 있다. 반면 AE 센서의 경우에는 고가이고 신호처리가 힘든 단점을 갖고 있으나 미약한 가공상태 변화를 잘 검출할 수 있고, 공구동력계에 비해 작업에 지장을 주지 않기 때문에 다이아몬드 절삭, 연마와 같은 미세가공 상태감시에 많이 사용되고 있다.<sup>14</sup>

상용 AE 감시장치의 경우 가격이 고가이며 범용 목적으로 개발되어 있어 미세가공 상태감시에 만족할 만한 성능을 내지 못하는 경우가 많다. 따라서 AE 신호를 이용한 미세가공 상태감시의 가공기 적용과 신뢰성 향상을 위해서는 저가이며 동시에 미세가공 상태감시에 적합한 진폭 및 주파수 특성을 갖는 AE 감시장치의 개발이 필요하다.

이를 위해 본 연구에서는 압전소자를 이용하여 미세 AE 센서 및 고증폭 계인과 필터특성을 갖는 AE 신호처리장치를 개발하였으며, 미세고정입자가공 - 연마와 유리페를 절단가공 - 상태 감시에 적용하여 개발한 AE 감시장치의 미세가공 상태감시 가능성(Feasibility)을 평가하였다.

## 2. 미세가공에서의 음향방출

AE 는 고체내의 균열 및 미세소성변형 등으로 인해 생긴 탄성에너지가 매질을 통해 탄성파(Elastic wave) 형태로 전달되는 에너지방출의 한 형태이다. AE 신호는 그 파형에 따라 소성변형에 의해 발생하는 진폭의 변화가 크지 않고 연속적으로 발생하는 연속형 AE 신호(Continuous-type AE

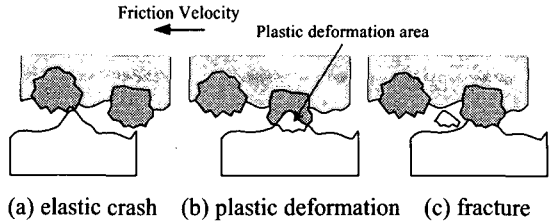


Fig. 1 Source of acoustic emission in a fixed abrasive machining

signal)와 크랙이나 파괴 등에 의해 발생하는 진폭의 변화가 불규칙하며 간헐적으로 발생하는 돌발형 AE 신호(Burst-type AE signal)로 구분된다. Fig. 1 은 고정입자 가공에서의 음향방출 과정을 보여주고 있다. 미세고정입자에 의한 AE 방출은 마찰되는 두 물체의 실접촉점간의 상호작용에 의해 발생하며 미세표면돌기(Micro-asperities)의 탄성충돌, 국부적인 소성 및 파괴 등 서로 다른 물리적 메커니즘의 복합작용에 의해 일어난다.

탄성에너지를 방출하는 세가지 메커니즘 중에서 돌기의 탄성충돌은 소성변형이나 파괴와 비교할 때 극히 작으므로 무시할 수 있으며 소성변형과 파괴가 AE 발생의 주된 원인이 된다.

가공에 있어서 재료의 소성변형은 전위이동에 의해 발생하며 전위의 평균속도가 클수록 소성변형량이 커져 AE 에너지가 증가하게 된다.<sup>5</sup>

가공시 재료파괴에 의한 탄성에너지는 재료의 탄성 에너지방출율(Energy release rate)이 재료의 크랙저항율(Crack resistance rate)보다 크게 될 때 발생하며 이때 AE 에너지가 일시적으로 방출되어 돌발적인 AE 파가 생기게 된다.

일반적으로 AE 에너지 크기는 주로 소성변형량에 의존하며 AE 의 주파수 대역은 재료의 특성에 의존한다.<sup>6</sup> 금속재료 가공의 경우 100 ~ 300kHz 대역에서 주로 발생하며 세라믹과 같은 취성재료 가공의 경우 금속재료보다 높은 주파수 대역에서 발생하며 재료의 경도나 물성치에 따라 수 백 kHz ~ 수 MHz 까지 발생하는 경우도 있다.

## 3. AE 감시장치 설계 및 제작

### 3.1 AE 센서의 설계

AE 는 주파수 특성에 따라 광대역 센서와 공진

역 센서로 구분된다.

광대역 센서의 경우는 표면의 진위 또는 속도를 충실히 전달해주는 장점을 지니고 있는 반면에 감도나 S/N 비가 낮다. 반면, 공진역 센서의 경우에는 이와는 반대로 파형 전달과정에서 공진특성을 나타내어 파형을 왜곡시키는 경우도 있으나 높은 감도 및 S/N 비 특성을 지니고 있다. 일반적으로 연마가공과 같은 미세가공 상태감시에서는 높은 감도와 S/N 비를 얻을 수 있는 공진역을 갖는 공진형 센서가 적합하다.

AE 센서를 구성하는 주요 요소로는 압전소자 (Piezoelectric element), 손상방지판(Wear plate), 후면층(Backing material), 하우징(Housing) 등이 있으며 압전소자의 소재와 형상 선정이 센서의 주파수 특성 및 감도에 크게 영향을 미친다.<sup>7</sup> 미세가공 상태감시용 AE 센서는 미세한 신호에 대한 높은 감도와 미세가공의 소재로 많이 사용되는 경취재료 (Hard and brittle material) 가공시 발생하는 고주파 대역의 AE 신호를 검출할 수 있는 주파수특성을 갖고 있어야 한다.

본 연구에서는 여러 형상과 두께를 갖는 압전소자에 대한 예비실험을 통해 직경 10mm, 두께 2mm 의 원판형상의 PZT 세라믹소자를 압전소자로 결정하였다.

Fig. 2 는 본 연구에 사용된 압전소자에 대한 기본 공진주파수 특성을 HP 사의 Impedance Analyzer (LF4194A)를 사용하여 측정한 결과이다. 임피던스 측정시 공진·반공진 측정법에 따라 압전체의 양단을 고정하지 않고 측정하므로 압전체의 한쪽 끝을 피검출체에 고정한 상태로 측정하는 음향방출센서의 경우 공진·반공진 측정법으로 구한 공진주파수의 1/2 이 된다.<sup>8</sup>

따라서 Fig. 2 에서 압전소자가 840kHz 부근에서 공진을 보이므로 음향방출센서로 사용될 때에는 약 420kHz 에서 공진주파수를 가지게 된다. 손상방지판의 부착에 의해 공진특성이 약간 감쇠되나 미세고정일자 가공시 발생하는 100 ~ 500kHz 의 신호를 검출하기에는 어려움이 없을 것으로 생각된다.

Fig. 3 은 압전소자, 손상방지판, 하우징으로 구성된 센서의 내부구조와 실제 제작된 센서의 외형을 나타낸다. PZT 소재는 출력 임피던스가 높기 때문에 금속 하우징으로 차폐하였고, 손상방지판 ( $\phi=12\text{mm}$ ,  $t=1\text{mm}$ ) 은 음향특성 및 내마멸성을 고려하여 백색 알루미늄( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )를 사용하였으며 음파

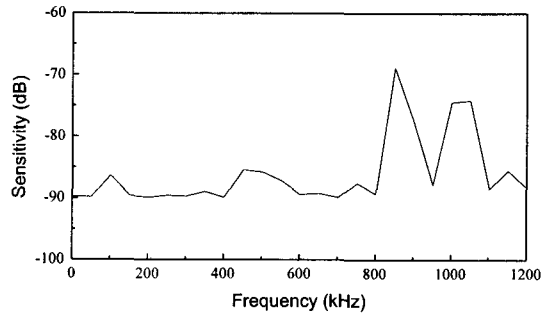


Fig. 2 Frequency characteristics of a PZT element

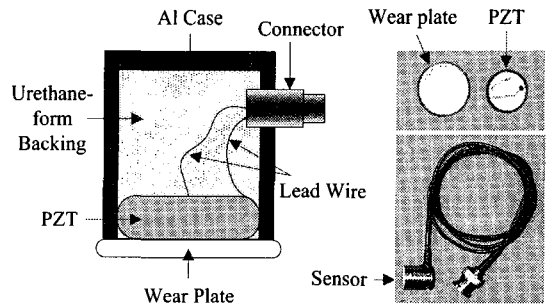


Fig. 3 Structure and photograph of the fabricated AE sensor

손실을 최소화 하도록 두께 1mm 로 선정하였다.<sup>9</sup> 압전소자와 손상방지판은 에폭시(Epoxy bond)를 사용하여 접착하였으며 센서의 빈 공간은 흡음효과가 있는 우레탄 폼(Urethane form)으로 충진하였다.

### 3.2 AE 신호처리장치 설계

미세 AE 신호를 처리하는 신호처리장치는 고증폭 기능과 우수한 필터링 기능을 갖고 있어야 한다.

Fig. 4 는 개발된 AE 신호처리장치의 블록도를 나타낸다. AE 신호처리장치는 전하증폭기(Charge amplifier), 전압증폭기(Voltage amplifier), 밴드패스필터(Band pass filter), RMS-DC 컨버터(RMS-DC converter)로 구성되어 있다. 전하증폭기는 공구와 재료 사이의 마찰·마멸에 의한 미세가공시 발생하는 수 mV 의 음향신호를 수십 ~ 수백 배로 증폭하는 역할을 담당한다. 이때 증폭기의 게인을 너무 크게 하면 고주파 신호성분의 주파수이득이 나빠지기 때문에 고주파의 특성을 위해 수백 배로 제

한하였다. 전압증폭기는 A/D 컨버터와 같은 주변 장치에서 신호처리하기 쉽도록 수백 ~ 수천 배로 가변 증폭할 수 있도록 설계하였다. 밴드패스 필터는 전압증폭기에서 증폭된 음향신호 중에서 기계의 진동이나 전원잡음 등의 저주파신호와 주변기기에서 들어오는 고주파잡음을 제거하기 위한 목적으로 사용되었다. 필터의 통과대역(Pass band)은 예비실험을 통해 획득한 원신호(Raw signal)의 주파수분석에 의해 설정하였다. RMS-DC 컨버터의 평균 시간은 검출신호의 주파수특성을 고려해 설정해야 한다. 일반적으로 고주파일수록 평균시간을 짧게 설정해야 가공중에 발생하는 미세음향신호의 변화 검출이 가능하다. 이를 위해 본 연구에서는 10msec 와 50msec 로 선택하여 신호처리 할 수 있도록 설

계하였다. AE 신호처리장치에서 출력된 신호는 오실로스코프로 직접 관찰 가능하거나 A/D 컨버터(Analog to Digital converter)를 통해 컴퓨터에서 감시 가능하도록 하였다. 또한 신호처리의 내부는 주위의 잡음에 강인하도록 동판으로 완전히 차폐되어 있다. Fig. 5 는 AE 신호처리장치 사진을 나타낸다.

#### 4. AE 감시장치의 성능평가

일반적으로, AE 센서의 특성평가는 표준탄성파원을 발생시켜 표준전달매질을 통하여 전달된 AE 신호를 분석하는 방법을 사용한다.<sup>10</sup> 본 연구에서는 산업체나 학계 등에서 흔히 사용하는 간이형 AE 센서 교정방법을 이용하여 제작한 AE 센서와 신호처리장치의 성능을 평가 수행하였다. 제작한 AE 감시장치의 성능비교 평가용으로 기계가공 감시에 많이 사용되는 상용 AE 센서(NANO 30, Operating frequency: 125 ~ 750kHz, PAC)와 신호처리장치(Pre-amplifier: 1220A, Post-amplifier - filter and RMS converter -: AE1A, PAC)를 사용하여 실험하였다. Fig. 6 은 본 연구에서 사용한 AE 감시장치 성능 평가 실험장치도를 나타낸다.

표준탄성파원은 값싸고 손쉽게 큰 진폭을 얻을 수 있는 직경 0.5mm 의 유리관(Glass capillary)을 사용하였고, 표준전달매질로는 길이와 폭이 300mm, 두께 30mm 의 주철 단조강 평판을 사용 하였다. 상용 AE 센서와 제작한 AE 센서로부터 얻어진 신호는 고속 A/D 컨버터(12bit)를 사용하여 2MHz 로 샘플링된다.

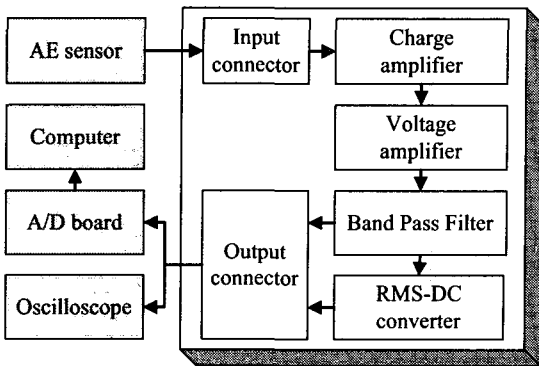


Fig. 4 Block diagram of the developed AE signal processing unit

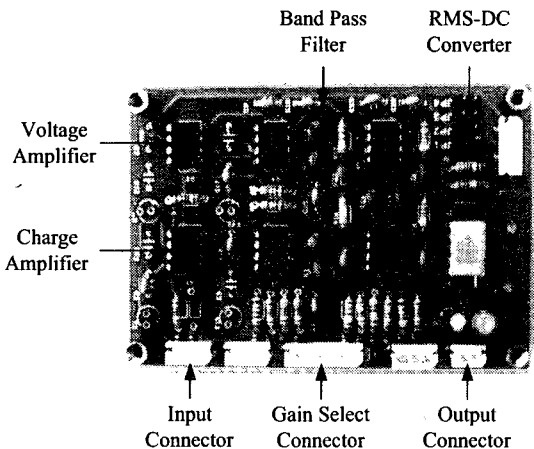


Fig. 5 Photograph of the AE signal processing unit

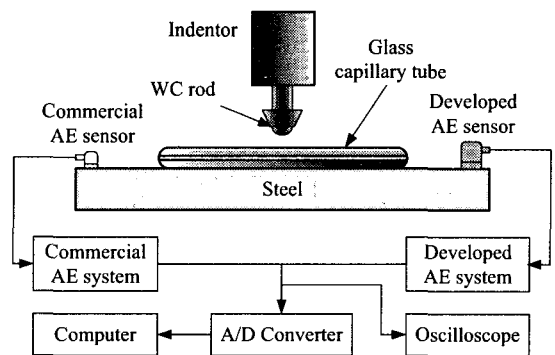


Fig. 6 Schematic diagram of experimental setup for evaluating of AE sensors

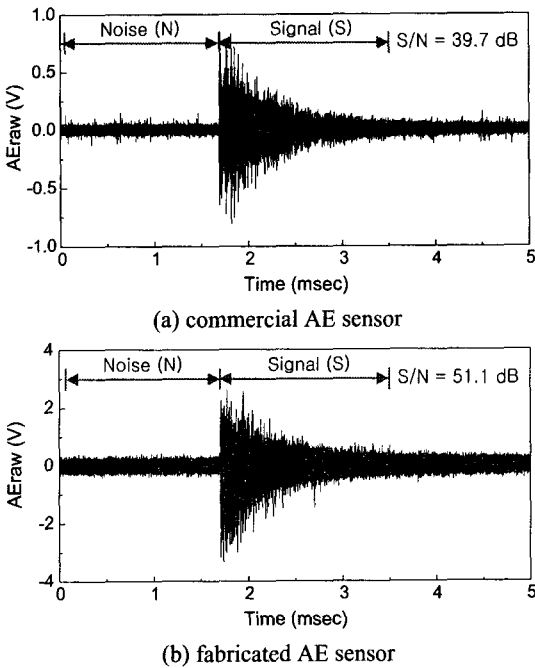


Fig. 7 Comparison of AE raw signals acquired by the two sensors on the breakage of the glass capillary tube

Fig. 7은 각각의 센서에서 얻은 AE 원신호로 센서의 출력과 S/N 비 특성을 나타낸다. 제작한 센서의 출력이 상용센서에 비해 큰 것은 신호처리장치의 고증폭특성에 의한 것으로 전하증폭기(Charge amplifier)로 압전소자에서 발생된 전하를 증폭한 후, 전압증폭기(Voltage amplifier)에 의해 신호처리에 필요한 전압으로 출력하는 2 단 증폭구조로 되어 있기 때문이다.

유리관 파괴전의 신호를 잡음으로 해서 분석한 S/N 비의 경우 상용센서는 약 40dB 이고 제작한 센서는 약 51dB 를 나타내며, 이는 제작된 AE 센서가 상용센서보다 S/N 비가 우수함을 나타낸다.

Fig. 8은 원신호를 FFT 신호처리한 것으로 100 ~ 1MHz 까지 전 영역에 걸쳐 신호특성이 나타나며, 특히 제작한 센서의 경우 100 ~ 500kHz 에서 상용센서와 비교할 때 높은 민감도를 가지고 있다.

따라서, 위의 결과로부터 본 연구에서 관심을 가지는 100 ~ 500kHz 내의 주파수영역에서는 제작한 AE 센서의 S/N 비와 민감도가 우수함을 알 수 있다.

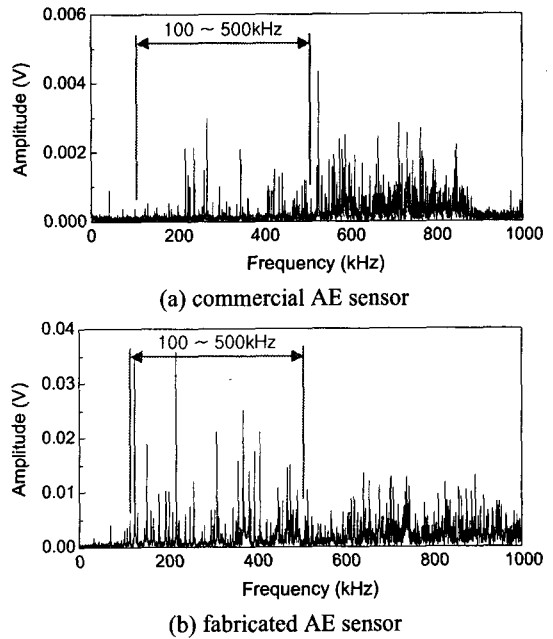


Fig. 8 Comparison of FFT signals acquired by the two sensors on the breakage of the glass capillary tube

## 5. 가공상태 감시

### 5.1 연마가공상태 감시

Fig. 9는 본 연구에서 개발한 AE 감시장치의 연마가공상태 감시를 위한 실험장치도를 나타낸다.

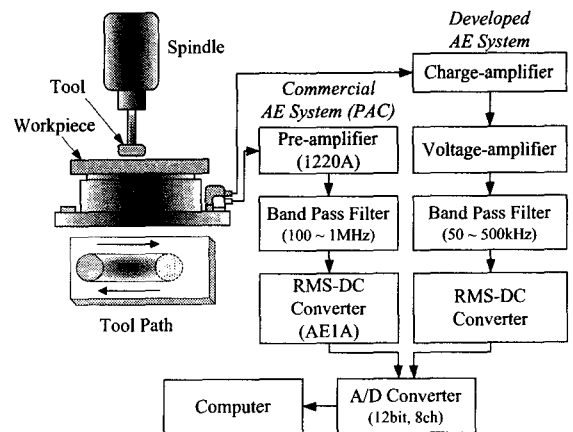


Fig. 9 Schematic diagram of experimental setup for polishing monitoring status

Table 1 Polishing conditions

Spindle Speed ( $\text{min}^{-1}$ )	500
Grain size (mesh)	#100, #600, #1000, #2000
Feedrate (mm/min)	400
Pressure ( $\text{kgf/cm}^2$ )	4
Workpiece(mm)	SKD-11 (250 x 250 x T20)

Table 1 은 실험에 사용된 연마조건이다.

상용 AE 센서와 함께 나란히 지그(Jig)에 부착된 AE 센서로부터 고속 A/D 컨버터를 이용하여 신호를 획득하였다. 본 실험에 사용된 가공물은 금형 재료로 많이 이용하는 금형강(SKD-11)이며 입도 #100, #600, #1000, #2000 의 연마패드(3M)를 연마공구로 사용하였다. Fig. 10, 11 은 연마가공시 AE 의 주파수특성을 알아보기 위해 #100 공구로 가공할 때의 AE 원신호 및 이때의 주파수분석 결과를 나타낸다. 검출한 AE 신호는 각각의 신호처리장치를 통해 증폭한 후 1MHz 로 샘플링하였다. 연마가공에 사용된 금형강의 경우 AE 신호는 소성변형에 의해 대부분 발생되기 때문에 진폭의 변화가 크지 않고 연속형 AE 신호가 발생하게 된다. Fig. 11(b) 에서 25kHz 부근의 주파수성분은 잡음성분으로 연마기의 기구적 진동 및 전기적 잡음이 완전히 차폐되지 않았고, 또한 밴드패스필터가 2 차 버터워스(Butterworth) 필터로 제작되어 50kHz 이하의 신호를 완전히 차단하지 못했기 때문이다. 따라서 이 성분은 필터의 차수를 높이고 신호케이블 및 감시장치의 실딩(Shielding)을 통해 제거가 가능하리라 본다.

Fig. 12 는 상용 AE 감시장치와 제작한 AE 감시장치의 연마가공 상태감시 특성을 비교 평가하기 위해 연마공구를 교체해 가면서 실험을 수행한 결과이다. 상용 AE 감시장치(PAC)의 경우 RMS 평균시간은 최소인 50msec 로 설정했고, 제작한 AE 감시장치에서는 10msec 로 설정하였으며 증폭은 각 감시장치에서 설정 가능한 최대 증폭비로 하였다.

그림에서 입도 #100 에서의 경우 연마제거량이 큰 관계로 제작된 AE 장치에 의해 획득된 신호가 상용 AE 센서로부터 얻은 신호와 거의 비슷함을 알 수 있다. 그러나 입도 #600 이후의 경우 상용 AE 감시장치에 의한 AErms 변화는 거의 알 수 없으나 제작한 AE 센서의 경우 연마공구의 입도변화

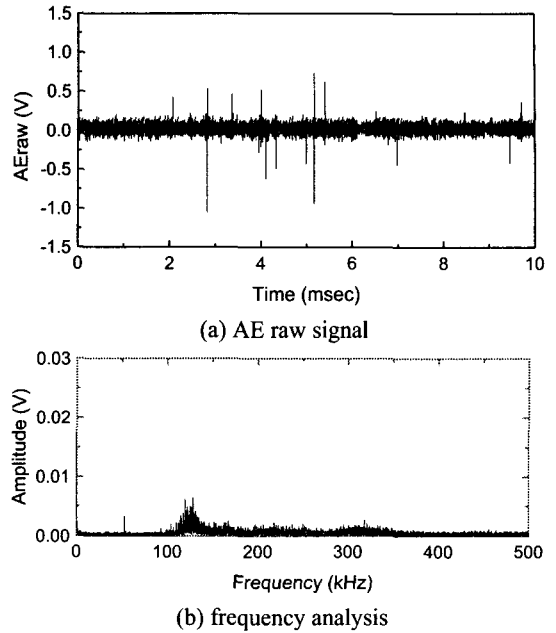


Fig. 10 AE signals acquired by the commercial AE system in polishing with #100 abrasives

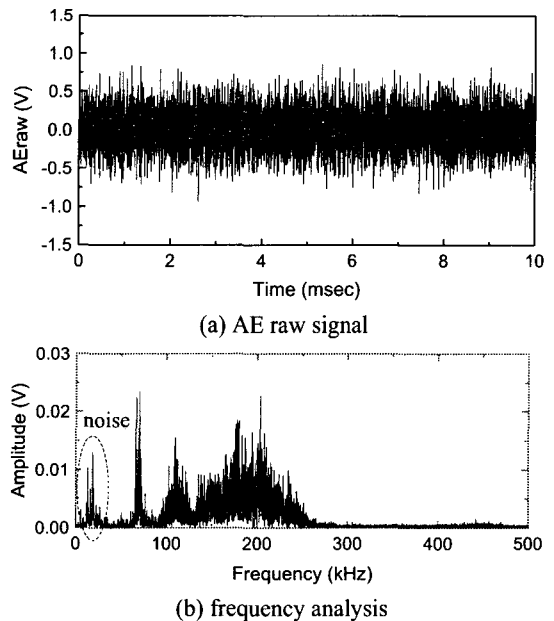


Fig. 11 AE signals acquired by the fabricated AE system in polishing with #100 abrasives

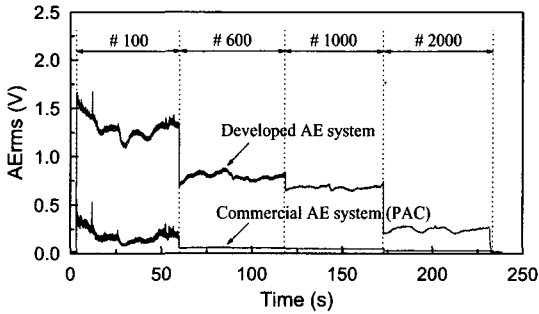


Fig. 12 Comparison of AERms signals acquired by the two sensors in sequentially finer polishing

에 따른 연마상태 변화를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 이것은 각 AE 감시장치의 민감도와 S/N 비의 차이에 의한 결과로 개발한 AE 감시장치가 연마가공 상태변화에 더 민감하게 반응함을 보여 준다.

### 5.2 유리절단가공상태 감시

Fig. 13 은 광커넥터에 사용되는 유리페룰의 절단가공상태 감시를 위한 실험장치도이다. 유리와 같은 취성재료의 경우 금속재료 가공때보다 발생하는 AE 주파수대역이 일반적으로 높기 때문에 밴드패스필터를 고역통과필터(차단주파수 100kHz)로 사용하여 불필요한 저주파 성분만 제거하였다. Table 2 는 유리절단가공에 사용된 실험조건이다.

절단가공의 경우 면에 가해지는 수직 및 접선 연삭저항으로 인하여 가공면에 발생한 크랙이 성

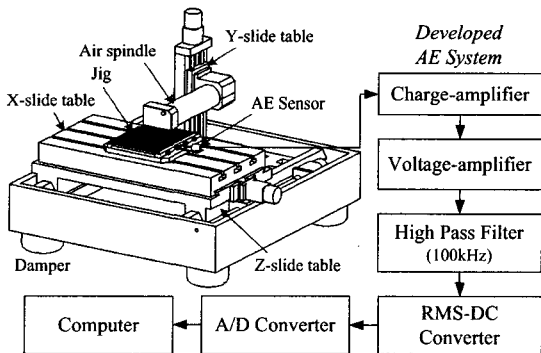


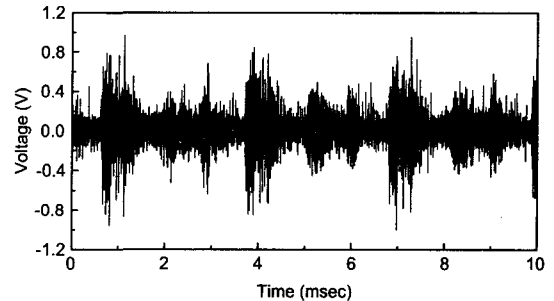
Fig. 13 Schematic diagram of experimental setup for monitoring of slicing

Table 2 Slicing conditions

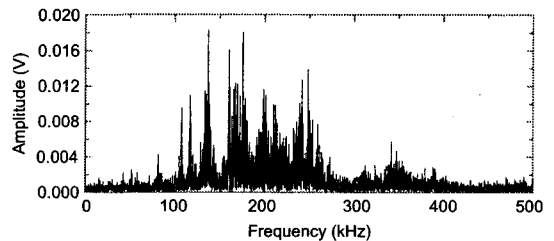
Tool (mm)	Metal bonded diamond blade (56 x 40 x T0.15)
Spindle speed ((min <sup>-1</sup> ))	30000
Feedrate (mm/min)	30, 40, 50
Workpiece(mm)	glass ( . 1.8)
Cutting fluid	water (2 L /min)

단면에 스크래치(Scratch)나 칩핑(Chipping)이 발생하기 쉽다. 절단가공중 블레이드의 원주날끝뿐만 아니라 측면부도 중요한 역할을 담당한다. 블레이드 측면부는 이미 생성된 절단면과의 마찰작용에 의해 절단면을 연마하며, 이때 간헐적인 취성파괴와 함께 소성변형이 일어나게 된다. 따라서 유리절단 가공시 발생하는 AE 신호는 크랙 성장·파괴에 의해 생기는 돌발형 AE 신호와 소성변형에 의한 연속형 AE 신호가 중첩되어 나타나게 된다.

Fig. 14 는 유리페룰 절단가공시 발생하는 AE 신호를 나타낸 것으로 취성파괴에 의한 돌발형 AE 성분과 소성변형에 의한 연속형 AE 성분이 중첩되어 있음을 알 수 있다. AE 주파수도 연마가공이 약



(a) AE raw signal



(b) frequency analysis

Fig. 14 AE raw signal and frequency analysis during glass ferrule slicing

50 ~ 250kHz 에서 나타나는 것에 비해 100 ~ 450kHz 에서 주로 나타난다.

Fig. 15 는 Fig. 14(a)의 AE 원신호를 AErms 로 변환한 신호로서 10msec 의 평균시간으로 획득한 것이다. Fig. 15(a)는 유리페를 가공시 정상상태의 AErms 신호로서 A 는 블레이드가 페를에 접촉해서 가공이 점차 진행되는 부분, B 는 유리페를의 내부 구멍 가공부분, C 는 점차 가공되는 부분이 줄어들어 블레이드가 빠져나가는 부분, D 는 절단 후 블레이드 측면에 의한 연마가 일어나는 부분이다. D 부분은 블레이드의 마멸이 발생하면 메탈본드의 탈락으로 인하여 입자의 돌출이 커져 가공제거량이 증가하여 AErms 레벨이 높게 된다. 또한, B 부분 가공시 AErms 가 상대적으로 크게 튀는 것은 구멍가장자리 가공시 충격에 의해 AE 신호의 진폭이 크게 증가하기 때문이다.

Fig. 15(b)는 마멸된 블레이드를 이용하여 가공했을 때 얻어진 이상상태 신호이다. 공구마멸로 인해 Fig. 15(a)의 정상상태 가공에 비해 AErms 의 변동이 심함을 알 수 있다. 또한 Fig. 15(b)에서는 끝단부에서 절단이 일어나기 전에 블레이드 날끝에

작용하는 힘에 의해 치핑이 먼저 발생했음을 보여 준다.

## 6. 결론

본 연구에서는 미세음향신호를 검출할 수 있는 높은 S/N 비와 민감도가 갖는 AE 센서와 신호처리 장치를 개발하고, 이를 연마가공 및 유리페를 절단 가공과 같은 고정도 미세고정입자 가공상태 감시에 적용하여 그 가능성을 평가하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

1. 미세 AE 신호 검출을 위해 개발한 신호처리 장치는 전하증폭기와 전압증폭기로 구성된 이중 증폭구조로 설계되었고 미세가공감시에 적용 가능함을 실험을 통해 확인하였다.
2. 가공물의 재질에 있어서 금형강의 경우 AE 원신호는 연속형으로 100 ~ 300kHz 에서 발생하고, 유리페를 절단시에는 연속형에 돌발형 신호가 중첩되어 100 ~ 500kHz 사이에서 발생함을 알 수 있었다.
3. 미세가공에 사용된 AErms 신호의 평균시간을 10msec 로 설정하여 감시한 결과 연마입도에 따른 공구교체시기, 블레이드 마모 및 치핑 등 이상상태 감시가 가능함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. Varghese, B., Pathare, S., Gao, R., Guo, C. and Malkin, S., "Development of a sensor-integrated intelligent grinding wheel for in-process monitoring," Annals of the CIRP, Vol 49/1, pp. 231-234, 2000.
2. Inasaki, I., "Application of acoustic emission sensor for monitoring machining processes," Journal of Ultrasonics, Vol 36, pp. 273-281, 1998.
3. Osada, T., Ohuchi, H. and Kasai, T., "Monitoring of lapping process with piezoelectric ceramic sensor (1nd Report) - relation between lapping conditions and detected acoustic signals -," Journal of the JSPE, Vol.63, No.12, pp.1710-1714, 1997.
4. Hwang, T. W., Whinton, E. P., Hsu, N. N., Blessing, C. J. and Evans, C. J., "Acoustic emission monitoring of high speed grinding of silicon nitride," Journal of Ultrasonics, Vol. 38, pp 614-619, 2000.

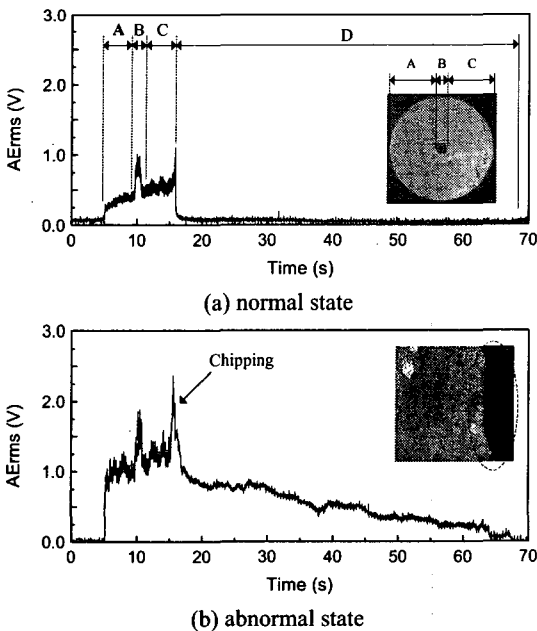


Fig. 15 Monitoring states by AErms signals during glass ferrule slicing



5. Klamecki, B. E. and Hanchi, J., "Wear process description based on acoustic emission," ASME Journal of Tribology, Vol. 112, pp 468-476, 1990.
6. Lim, Y. H., Kwon, D. H., Joung, I. K., Choi, M. Y. and Lim, S. J., "Detection of abnormal conditions and monitoring of surface grinding characteristics by acoustic emission," Journal of the KSPE, Vol. 12, No. 4, pp 100-110, 1995.
7. Dunegan, H. L., Brown, A. E. and Knauss, P. L., "Piezoelectric transducer for acoustic emission measurement," University of California, UCRL 50553, 1968.
8. Onoe, M. and Jumonji, H., "Useful formulas for piezoelectric ceramic resonators and their application to measurement of parameters," Journal of Acoust. Soc. America, Vol. 41, No. 4, pp. 974-980, 1967.
9. Proctor, T. M., "An improved piezoelectric acoustic emission transducer," Journal of Acoust. Soc. America, Vol. 71, No. 5, pp. 1163-1168, 1982.
10. Lee, J. K. "Response characteristics of the PZT transducers during glass capillary breakage," Journal of the KSNT, Vol. 18, pp. 33-41, 1998.