

## 고속·지능형 마이크로머시닝을 위한 진단시스템 및 특성평가

김흥배\*(한국기술교육대학교 대학원), 이우영, 최성주(한국기술교육대학교)

### Development of Diagnosis System for Intelligent High-Speed Micro-Machining and Evaluation of Micro-Machining Characteristics

H. B. Kim(Graduate School, KUT), W. Y. Lee, S. J. Choi(Mech. Eng. Dept., KUT)

#### ABSTRACT

The advanced technology of micro-machining is starting to penetrate our lives. This technology, with which it is possible to make micro-structures by means of processing on the order of  $\mu\text{m}$  (micrometer = 1/1,000 mm) or less, is realizing machines that were only part of our wildest imagination. However, the fact is that many issues remain in the quest for a variety of applications. With the advent of computing technologies, information technologies, and telecommunications technologies, we foresee the need for new approaches in design, process, and the use of materials, technologies, and people in a globalized manufacturing enterprise. A new thinking paradigm is needed to focus on quality of service on the products we design and manufacture. Factories in different regions need to be co-ordinated through use of the state-of-the-art information on productivity, diagnostics, and service evaluation of manufacturing systems could be shared among different locations and partners. In this research, We develop the internet based Diagnosis system for micro machining and evaluate its characteristics by using mechatronic sensor like Dynamometer, acoustic emission, Acceleration sensor, micro phone, vision, infra-red thermometer.

**Key Words** : Micro-machining(마이크로머시닝), High-Speed Machining(고속가공), Diagnosis(진단), AE(음향방출), micro phone(소음계)

#### 1. 서론

최근 에너지와 환경에 대한 인식과 정보통신, 전자산업, 생명산업의 발달로 소형화와 미세화의 기술 개발의 요구되고 있다. 그 예로 크기가 micron 혹은 sub-millimeter 단위인 초소형기계(Micro Machine)가 등장하게 되었고, 이러한 부품 및 시스템을 제작하는 미세 가공 기술을 Micro Machining이란 할 수 있다. 일반적으로 마이크로 머시닝기술은 반도체 공정기술을 응용한 MEMS 기술이 주로 이용되어왔다. 이것은 마스크 패턴의 전사에 의한 가공기술로 매우

미세한 가공과 대량 생산이 가능하고 가공과 조립이 동시에 진행할 수 있는 특징이 있다. 그러나 현재 마이크로 센서 혹은 미세구조물의 제작에 있어 3차원 구조물의 제작이 힘들고 적용재료가 한정되어 있으며 고품위의 표면조도를 실현하기 힘든 문제점 등으로 기술적 응용이 제한되고 있다. 또한 가공물의 크기가 너무 작아 부품의 조립 및 취급이 어렵고, 실제로 응용 가능한 힘을 전달하기 어려우므로 기계적 부품으로 사용하기가 힘들다. 최근 서브 마이크론의 정밀도와 1mm이하의 치수로 가공 제작할 수 있는 전용공작기계류의 개발에 힘입어 기계적인 미세 가

공을 통해서 반도체 기술로는 얻지 못하는 3차원 미세 형상의 생성 등 다양한 요구에 대응 하고자 하고 있다. 이러한 기계적인 미세 가공 기술은 생산활동에 응용되어 현재 일본 등의 기술선진국의 첨단산업을 떠받치는 핵심기술이 되어 왔다. 대표적인 미세 가공 기술로서는 절연삭, 방전 및 전해가공, 초음파 가공, 레이저가공, 드릴링 및 밀링 기술을 비롯하여 기계화학적 또는 전자장을 이용하는 복합가공 기술 등이 있다. 그 외에도 반도체 프로세스, LIGA, 비임 가공, 광조형, 사출성형, 이온주입, STM 등이 있다.

이번 연구에서는 고속·저능형 마이크로머시닝을 위한 CAD/CAM 시스템을 개발하였으며 메카트로닉스 기술인 각종 정밀 센서들을 이용하여 인터넷기반 진단 모니터링 시스템을 개발하였다. 또한 이를 이용하여 마이크로머시닝 가공 기술과 초 미세 가공 특성을 평가하는 기술을 확립하였다.

## 2. 초 미세 가공

### 2.1 미세 절삭 가공기술

3차원 형상을 자유로이 가공 가능한 방법으로서 전통적인 절삭/연삭 가공방법이 널리 이용된다. 기존의 절연삭 가공은 가공력이 커 미세한 구조물의 가공에는 적합하지 않은 것으로 생각되어지기 때문에 많은 예가 없었지만, 최근에는 정밀 운동제어, 계측, 정밀 가공용 공구의 진보에 의해 서브 마이크론 단위까지 쉽게 가공할 수 있는 단계에 이르렀다. 그러나 현재 실험적으로는 이미 절입 1nm에서 절삭이 이루어지고 있고, nm 오더의 절입에서 절삭력도 측정되고 있다. 초정밀 절삭가공에서 치수정밀도는 공작물의 치수에 따라 현재 0.1~0.01 $\mu$ m 수준이고 표면조도는 이 보다 이 보다 한 단위 아래인 것으로 판단된다. 주로 단결정 다이아몬드 공구를 이용하여 공구의 형상정밀도를 그대로 공작물에 전사하는 경우이다. 그러나 다이아몬드 공구의 재질 특성상 알루미늄, 구리, 플라스틱 등 연질금속에 주로 이용되고 세라믹, 철 등의 가공에는 크게 응용되지 못하고 있다. 초미세 절삭 가공의 공구로는 단결정 다이아몬드 바이트를 이용한 선삭, 플라임 커팅, 또는 특수 형상의 다이아몬드 엔드밀을 이용한 마이크로 부품의 밀링 가공이 시도되고 있다.

### 2.2 국내 관련 기술개발현황

종래의 초정밀 절삭가공기술로는 소재의 고품위 가공면을 달성할 수 있지만 선반을 이용한 실제적인 초미세 부품화로의 적용 예는 그다지 많지 않다. 따라서 초정밀 가공기 상에서 단결정 다이아몬드 바이트를 이용한 밀링가공을 수행하기 위하여 3차원 형상의 3차원 형상의 초정밀 마이크로 부품을 생산하

기 위한 관련 연구가 진행 중에 있다.

국내의 경우에는 한국기계연구원에서 직경 50~100 $\mu$ m의 마이크로 드릴을 제조할 수 있는 공정 및 평가 기술에 관한 연구를 수행하는 한편, 스테핑 모터를 적용한 전용가공시스템을 활용하여 박판에 대한 고세 장비의 천공실험을 준비하고 있다. 또한 한국기계연구원에서는 초정밀 경면 절삭 가공기술개발의 일환으로 초정밀 경면 가공기를 개발하였으며, 각종 재료 및 제품형상의 경면 가공기술 개발에 대한 연구를 수행하였다. 이와 더불어 최근 한국기계연구원에서는 차세대 신기술개발 사업의 일환으로 초소형 부품 즉, Milli-Structure 또는 Micro Machine용의 미세 부품을 개발하기 위한 미세 금형 가공 기술에 대한 연구를 진행하고 있다.

### 2.3 국외관련 기술개발현황

일본은 마이크로 절삭가공 기술 분야에서 세계에서 가장 활발하다고 볼 수 있다. 기계 기술 연구소(MEL)에서는 기존에 축적된 초정밀 기계 가공 기술들을 기반으로 하여 미세 가공기의 새로운 체계 구축을 위한 요소 기술 측면에서 관련기술 개발을 시도하고 있다. 현재 미소 기능요소 기술, 에너지공급 기술, 시스템 제어 기술, 평가 기술 및 종합 시스템 기술 등에 관한 연구들을 수행하고 있으며 마이크로 공장의 실현을 위한 기초 연구를 수행하므로써 세계에서 가장 작은 미소 선반을 제작한바 있다.

기존의 연구에 의하여 미소 절입량 부가 방식에 의한 연성제거모드 방식의 가공으로 취성재를 가공할 수 있다는 보고가 있으나 미소형상 가공에 대한 초정밀 3차원 고품위화의 적용은 매우 힘들다고 할 수 있다. 일본의 동경대에서는 각종 정보 기기와 관련한 분야의 기술이 고도화되면서 이러한 기기를 구성하는 부품이나 장치가 점차 고밀도화, 초소형화됨에 따라 마이크로 메커니즘의 가공, 제작 및 응용에 관한 연구를 진행 중에 있으며, 최대 속도 100,000rpm의 초고속 스펀들을 탑재한 마이크로 선반을 시제작하여 직경 10 $\mu$ m 정도의 마이크로 구조를 가공하는 실험을 수행 중에 있다.

미국의 로체스터대에서는 Moore Tool사와 공동으로 Micro Grinding M/C을 개발하여 직경 10mm급의 비구면 마이크로 렌즈에 대하여 진원도 1nm급, 가공면 결합층 1-2nm급의 정밀 성형가공을 수행하고 있으며, REMMELE Engineering 사에서는 8축 초정밀 소형 선반으로 미소 형상의 부품을 가공하고 있다.

캐나다의 MEMStek Products, LLC에서는 스위스의 RMB Miniature Bearings사와 공동으로 DC 마이크로 브러쉬리스 모터를 개발하여 모터와 기어 트레인 등의 각종 초소형 공작 기계류 부품에 적용할 수 있는 응용 연구를 수행 중에 있다. 독일의 Fraunhofer

연구소에서는 미세 절삭과 밀링 가공을 적용하여 마이크로 구조 요소 부품을 가공 제작하였으며, 초미세 선반을 이용하여 미세한 축을 가공하였다. 큰 직경은 50 $\mu$ m, 작은 직경은 8 $\mu$ m이며 가공면 거칠기는 약 10nm(Ra)이다. 일본 Kanazawa 대학에서는 Micro lathe turning system을 개발하여 다이아몬드 공구를 이용한 다양한 형상의 Micro Parts 가공기술을 개발하고 있다. 기계의 크기는 200mm이고, 15,000rpm의 스피들을 장착하여 공작물 직경 0.3mm를 최소 10 $\mu$ m까지 가공할 수 있으며, 3방향의 Force Sensor로 절삭력을 측정할 수 있게 하였다. 가공공구는 직경 0.25mm 봉에 경사각이 0° 또는 60° 인 삼각 피라미드형 단결정 다이아몬드 공구를 부착사용하며, 공구대는 회전이 가능하여 facing, forming, taper turning, internal cutting 등 다양한 형태의 절삭에도 적용 가능하도록 되어있다. 공구 동력계는 가공 중 3방향의 절삭력을 측정할 수 있도록 0.3mm 평판 위에 스트레인게이지를 부착하는 형식으로 구성되었으며 하중측정 범위는 1mN~1N 이다.

### 2.4 고속가공기술

고속가공(High-Speed Machining)이라는 개념은 피삭재의 관점에서 볼 때는 매우 상대적이라고 할 수 있다. 그것은 피삭재의 종류에 따라 공구마모를 최소화하면서 가공할 수 있는 절삭속도에 큰 차이가 나기 때문이다. 따라서 고속가공을 주 변형역(Primary deformation zone)에서 전단의 국부화가 완전히 일어나는 속도이상에서의 가공으로 정의하기도 한다. 그러나 이러한 정의는 정량적이지 못하므로 현재 생산현장에서 사용되는 절삭속도보다 현저히 높은 속도에서의 가공을 고속가공이라 부르는 것이 보다 일반적이다.

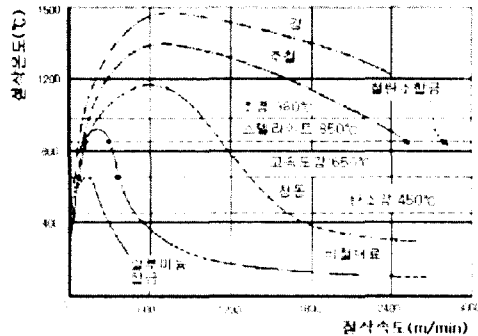


Fig. 1 Salomon's experimental results

고속가공에 대한 개념은 가공품의 정밀도 향상과 가공시간의 단축으로 생산원가를 절감하고자 하는

목적 아래 1924년 독일의 Carl J. Salomon 박사에 의하여 착안되었으며 1931년 독일 특허를 받으면서 시작되어 왔다. Fig. 1에는 Salomon의 고속가공에 대한 개념을 설명해 주고 있다.

이 고속가공의 개념은 절삭가공 시 발생하는 절삭온도와 절삭속도의 관계에 근거를 두고 있다. 즉, 절삭온도는 어떠한 임계속도에서 최대치가 되며 그 임계속도를 초과하게 되면 온도는 감소한다는 것이다. 그러나 최근의 여러 실험데이터들은 절삭속도의 증가에 따라 절삭온도가 감소하는 것이 아니라 절삭온도는 절삭속도와 함께 증가한다는 것을 보여 주고 있다. 이러한 실험 연구결과에서 보듯이 고속가공에서 Salomon의 주장대로 절삭속도가 고속화됨에 따라 절삭온도가 감소하는 효과를 보는 것은 아니며, 절삭속도의 증가에 따른 생산성의 향상, 가공정밀도의 향상, 표면 거칠기의 향상 등의 효과를 얻어내는 것이다.

### 3. 연구방법

#### 3.1 연구 방법

Sensor	Sensor	Type
Cutting Force	Tool Dynamometer	9272(Kistler)
Cutting Temp.	Thermocouple	K type
Vibration	Accelerometer	1Hz-1kHz
Noise	Micro Phone	NL-05(Rion)
Machinability	Acoustic Emission	Dytran

Table 1. The Specification of Sensor

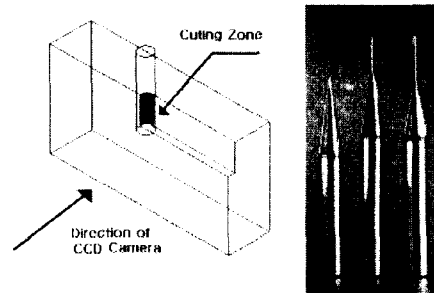


Fig. 2 Apparatus of experiment and Tools

이번 연구에서는 고속가공기를 이용한 마이크로 머시닝의 특성을 연구하기 위하여 공구동력계, AE, 가속도센서, 마이크로 폰, 열전쌍(Thermocouple) 등의 각종 센서를 이용하였으며, 센서로부터 신호수집 및

그 신호의 처리를 위하여 C++ 및 LabVIEW 언어를 사용하여 전용 신호처리 프로그램을 개발하였다. Table 1에는 이번 실험에 사용된 센서들의 종류를 나타내고 있다.

인터넷 기반 원격 계측을 수행하기 위하여 TCP/IP를 이용한 서버와 계측 시스템과의 데이터 전송을 구현하였으며, SQL 서버를 이용하여 데이터의 저장 및 처리를 수행하였다. 원격 계측 시스템의 원활한 수행을 위하여 CCD 카메라를 이용한 비전(Vision) 시스템을 구축하였다. 또한 LabVIEW 6i를 사용하여 각 센서별 데이터 수집 및 처리 프로그램을 개발하였으며, MS Visual Studio 6를 사용하여 DLL를 만듦으로써 데이터 수집 모듈에서 주요한 로직의 속도를 향상 시켰다.

또한 GBIP 컨트롤러를 이용하여 원격지의 계측기를 원격지에서 조작할 수 있게 구성하였다.

개발된 프로그램을 이용하여 마이크로 머시닝 특성을 연구하였으며, 사용된 공구는 Jabro사(독일)의  $\emptyset 0.5$ ,  $\emptyset 1$ ,  $\emptyset 1.5$ 의 공구로 알루미늄 부재를 가공하여 그 특성을 파악하였다. Fig. 2에는 가공방법과 공구의 모습을 그리고 Fig. 3에는 실험방법과 실험 장치들의 구성을 보여주고 있다.

Specification	Value
Max. Spindle Speed	42,000 rpm
Max. Feed Rate	30,000 mm/min
Max. Acceleration	2.0g

Table 2. The Specification of HSM

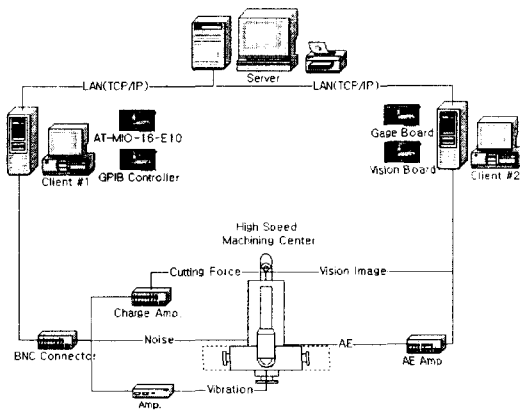


Fig. 3 Diagram of Experiment

### 3.2 연구 장비

이번 연구에 사용한 고속가공기의 사양은 Table

2와 같다

Sensor	DAQ Board	Maker
Cutting Force	AT-MIO-16-E10	National Instrument (USA)
Cutting Temp.	AT-MIO-16-E10	
Vibration	AT-MIO-16-E10	
Noise	AT-MIO-16-E10	
Machinability	Gage Board	Gage(Canada)

Table 3. The Specification of Sensor

Tool	Edge	RPM	Feed/tooth (mm/tooth)	Axial depth	Radial depth	Maker
$\emptyset 0.5$	2	100 - 37500	0.03	0.2m m 0.4m m	0.1mm 0.2mm	Jabro (Germany)

Table 4. Experimental Cutting Conditions

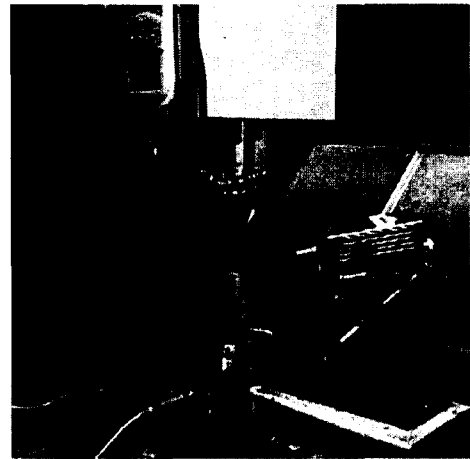


Fig. 4 Picture of Experimental Setup

데이터 수집을 위하여 National Instrument 사의 보드와 Gage 보드를 상용하였으며 각 센서별 사양은 Table 3과 같으며, Table 4에는 절삭조건을 나타내고 있다. CCD 카메라는 Panasonic 제품을 사용하였으며, 이미지 수집을 위하여 NI의 IMAQ을 사용하였다. 실제 실험에 사용한 장비와 그 설치모습은 Fig. 4에 나타나 있다.

### 4. 진단 시스템

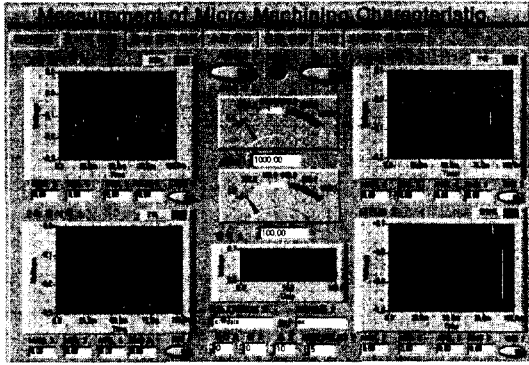


Fig. 5 Front Panel of Developed Diagnosis software

이번 연구에서 개발한 CAD/CAM 및 진단 시스템은 각 센서별로 5개 및 비전을 위한 모듈 1개로 총 6개의 기본 모듈로 구성되어있으며, 계측부(클라이언트)에서는 각 모듈별로 서로 다르게 그 기능을 수행하여 TCP/IP를 이용하여 서버 프로그램과 데이터를 공유한다. 서버 프로그램은 각 모듈별 계측 프로그램을 기본적으로 제어할 수 있으며 고유한 데이터를 실시간으로 처리한다. 또한 SQL 서버 프로그램으로 데이터를 원하는 형태로 가공 처리할 수 있는 기능을 수행할 수 있다. Fig. 5에 개발된 프로그램의 모습이 나타나있다.

## 5. 마이크로머시닝 미세가공 특성

### 5.1 절삭력 특성

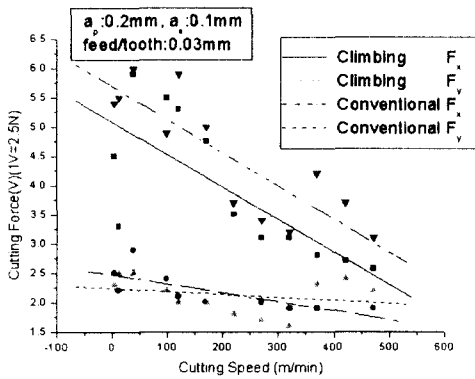


Fig. 6 Cutting Force Variation according to cutting Speed

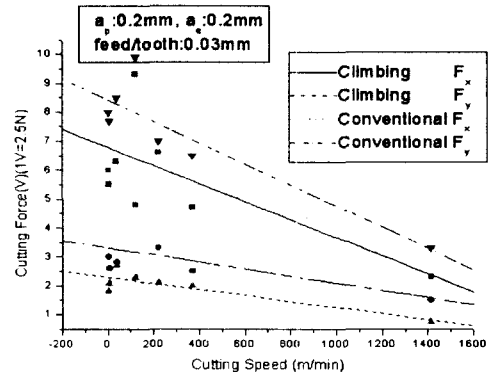


Fig. 7 Cutting Force Variation according to cutting Speed

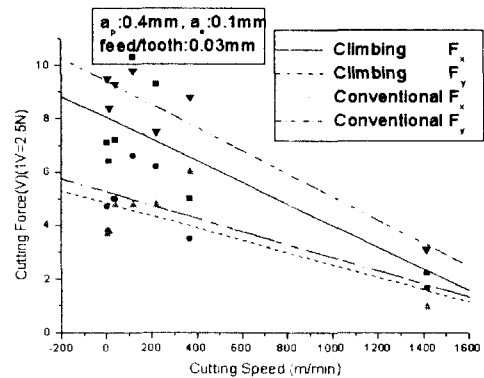


Fig. 8 Cutting Force Variation according to cutting Speed

절삭속도가 증가할수록 절삭력은 감소하는 경향을 보였다. 반경방향 절삭깊이, 축 방향 절삭깊이 그리고 날당 이송이 같은 경우, 일반적으로 상향절삭의 이송방향 힘이 제일 크게 나타났다. 상향절삭과 하향절삭의 경우 상향절삭이 하향절삭보다 더 큰 절삭력을 나타냈다. 상향 절삭의 경우 절삭 속도의 증가에 따라 칩 배출이 원활하지 않아 가공 면이 매우 불량하였다. 이송방향 힘과 반경방향 힘의 경우 반경방향의 힘이 크게 작용하는데, 이것은 반경방향의 절입깊이(RDOC)에 따라 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 축 방향 절삭깊이의 증가에 모든 절삭력은 증가하는 경향을 나타냈으며, 반경방향의 힘보다 이송방향의 힘이 더 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 또 하향절삭보다 상향절삭이 축방향 절삭깊이의 증가에 따라 더 큰 절삭력이 증가하는 경향을 나타냈다. 이송방향 절삭깊이의 증가에 모든 절삭력은

증가하는 경향을 나타냈으며, 이송방향의 힘 보다 반경방향의 힘이 더 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 또 하향절삭보다 상향절삭이 축방향 절삭깊이의 증가에 따라 더 크게 절삭력이 증가하는 경향을 나타냈다.

### 5.2 절삭 온도 특성

일반적으로 절삭열의 70~80%는 절삭시 칩(chip)에 의하여 배출되는 것으로 알려져 왔다. 이번 연구에서는 열전쌍을 피삭재에 부착하여 피삭재의 온도 분포를 파악하였다. 마이크로 가공으로 인한 피삭재의 온도는 상승하는 것으로 나타났다.

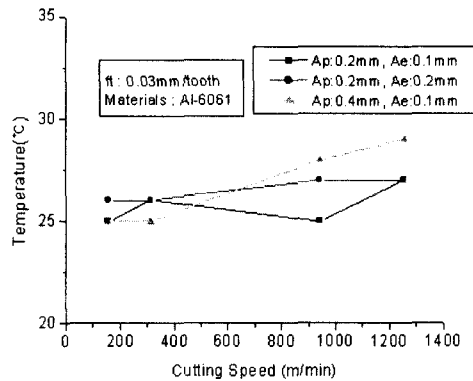


Fig. 9 Temperature Variation according to cutting Speed

### 5.3 절삭성(AE)

음향방출(Acoustic Emission, AE)는 외부적 자극을 받게 될 때 재료에 의해 방출되는 음향파로 정의될 수 있다. AE는 많은 많은 발생기구들에 의해서 발생될 수 있다. 결정의 파괴, 균열의 발생 및 성장, 전위에 의한 몇몇의 기구들, 재료내의 개재물의 파괴, 고체내의 상변형, 비등 그리고 전기적 방전등이 원인이 된다. 이런 모든 기구들은 원자그룹의 빠른 집단적 운동에 의해 특정 지어진다. AE 신호의 RMS 값을 이용하여 신호의 진폭을 평균화하는 것이다. 고속 마이크로 머시닝에서 이 RMS 값의 경향을 추정하는 것이 이 실험의 목적이다.

음향방출(Acoustic Emission) 특성 실험에서는 고속 데이터 획득 위하여 최대 5MHz의 샘플링 속도의 Gage 보드를 사용하였으며, 데이터 처리는 LabVIEW를 이용하여 오실로스코프를 제작하였다. 고속가공시의 음향방출특성 실험에서는 돌출형 신호 보다 연속형 신호가 주를 이루었으며, 회전수의 증가에 따라 AE 신호의 RMS 값은 증가하는 경향을 나타낸다.

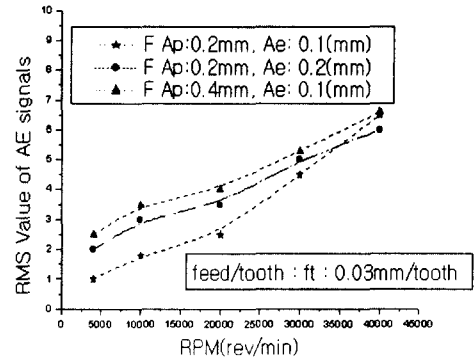


Fig. 10 RMS of AE according to cutting Speed

## 4. 결론

고속가공기를 이용한 마이크로 머시닝 특성 평가 실험에서는 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 각종 센서를 이용하여 마이크로머시닝을 위한 평가 시스템을 구축하였다.
2. TCP/IP 및 서버와 클라이언트 모델을 이용한 원격 계측데이터의 실시간 처리 및 SQL을 이용한 데이터 처리 시스템을 구축하였다.
3. 회전수의 증가에 따라 X 방향 힘은 감소하고, Y 방향 힘은 증가하는 경향을 보인다.
4. 상향·하향 모두 X방향보다 Y방향으로 크게 감하다가, 하향 절삭에서만 0.01mm/tooth의 경우에는 30,000rpm 부근에서, 그리고 0.03mm/tooth의 경우 35,000rpm 부근에서 반전되어 X방향의 힘이 크게 작용한다.
5. 날당 이송량의 증가에 따른 절삭력은 상향 및 하향에서 X, Y 방향 힘 모두 증가하고 절삭속도가 낮은 영역에서는 이송방향으로 날당 이송량이 증가할수록 절삭저항이 커진다는 것을 알 수 있다.
6. 고속가공시의 음향방출특성은 돌출형 신호 보다 연속형 신호가 주를 이루었으며, 회전수의 증가에 따라 AE 신호의 RMS 값은 증가하는 경향을 나타낸다.

## 참고문헌

1. T. Moriwaki, "High-Speed Machining", CIRP, Vol.41, 1992
2. H. Schut, "High-Speed milling of Dies and Moulds-Cutting Condition and Technology", CIRP, Vol.44 1995