

멀티센서를 이용한 마이크로 절삭 공정 모니터링

신봉철[#] · 하석재¹ · 강민형¹ · 허영무² · 윤길상² · 조명우³

The Cutting Process Monitoring of Micro Machine using Multi Sensor

B. C. Shin, S. J. Ha, M. H. Kang, Y. M. Heo, G. S. Yoon, M. W. Cho
(Received February 23, 2009)

Abstract

Recently, the monitoring technology of machining process is very important to improve productivity and quality in manufacturing field. Such monitoring technology has been performed to measurement using vibration signal, acoustic emission signal and tool dynamometer. However, micro machining is limited small-scale parts machining because micro tool is very small and weakness to generate signal in micro machining process. Therefore, this study has efficient sensing technology for real monitoring system in micro machine that is proposed to supplement a disadvantage of single-sensor by multi sensor. From experimental result, it was evaluated tool wear and cutting situation according to repetitive slot cutting condition and changing cutting condition, and it was performed monitoring spindle rpm and condition according to compare acceleration signal with current signal.

Key Words : Monitoring, Micro Machining, Hall Sensor, Tool Dynamometer, Accelerometers, Acoustic Emission

1. 서 론

최근 마이크로 연료전지, 마이크로 액추에이터, 바이오 칩 등과 같은 초소형 및 고 기능을 갖는 제품의 수요가 증가함에 따라 MEMS(Micro Electro Mechanical System)기반 기술을 이용한 미세 형상 제작에 많은 관심이 집중되고 있다. 주로 마이크로 형상 가공을 위해서는 레이저, 초음파, 리소그래피, 건식 및 습식 식각 또는 방전 가공등과 같은 특수 가공법이 적용되어 왔다[1~2]. 하지만 이러한 방법은 미세 형상 제작에 있어 가공시간이 길고 적용 가능한 소재가 제한적인 단점이 있다. 따라서 가공 시간이 빠르고 소재의 제한이 적으며 다양한 미세 형상 가공이 가능한 기계적인 마이크로 가공법의 적용이 증대되고 있다[3~4]. 하지만 마이크로 절삭

가공은 일반적인 절삭가공에 비해 사용되는 공구와 공작물의 크기가 작아서 공구의 마모 및 파손, 외부 진동 등에 영향을 받게 되어 가공품의 품질과 정밀도에 큰 영향을 미치게 된다[5]. 또한 마이크로 가공에서는 절삭 부피를 줄이기 위해 주축 회전이 수만~수십만 rpm으로 회전하므로 날당 절삭력과 절삭 상태를 기존의 측정 장비로는 측정하기가 쉽지 않다. 따라서 마이크로 가공에서 이상 상태를 감시할 수 있는 모니터링 시스템이 필수적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 마이크로 절삭 가공 중 공구의 마모와 가공 상태 모니터링은 다양한 센서를 이용하여 모니터링 시스템을 구축하였다. 마이크로 가공기에 멀티 센서 장착을 통해 측정 신호의 신뢰성 확보 및 절삭 공정 모니터링을 하는데

1. 인하대학교 기계공학과 대학원
2. 한국생산기술연구원 정밀금형팀
3. 인하대학교 기계공학부
교신저자: 인하대 기계공학과 대학원, kenny77b@empal.com

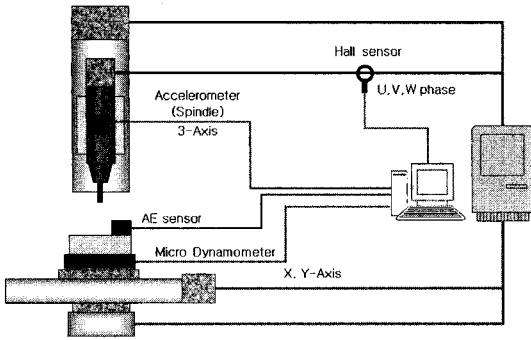


Fig. 1 Concept of monitoring system

목적을 두고 있다. 따라서 마이크로 기계 가공의 상태 감시기술을 적용하기 위해 절삭력, 진동, 음향 방출 및 전류 신호를 검출할 수 있는 센서들을 장착하였다(Fig. 1). 이러한 멀티 센서를 이용한 각각의 센서 신호의 신뢰성 확보를 통해 단일센서의 측정 한계를 극복하고, 마이크로 절삭 가공 전 공정을 모니터링을 할 수 있었다.

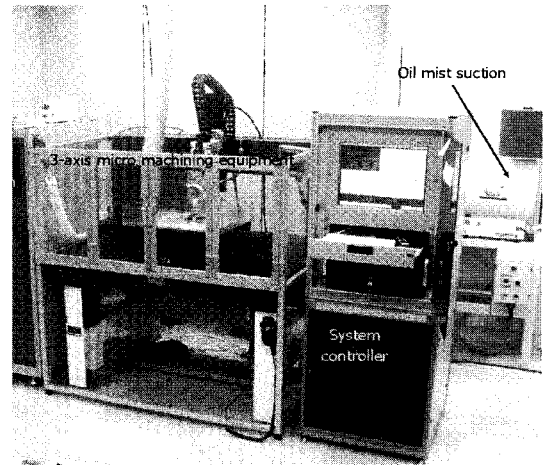
2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

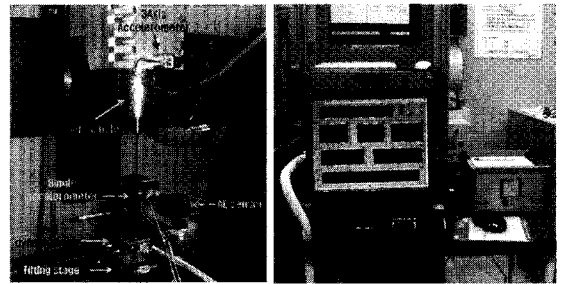
Fig. 2는 본 논문에서 사용된 마이크로 엔드밀링 가공 시스템과 모니터링 시스템을 나타낸 것이다. 가공 시스템은 3축 CNC공작기계와 동일한 구조이며, 이송계의 3축은 고정밀도 리니어 스테이지를 설치하였다. 주축은 최고 100,000rpm까지 가속할 수 있는 AC 인덕션(induction)모터를 사용하였고, 회전 시 진동을 최소화 할 수 있는 에어베어링 스피들들을 적용하였다. 또한 가공 시편의 미세한 기울어짐(tilting error)을 보상할 수 있도록 이송계 스테이지 상부에 별도로 Tilting stage를 장착하였다.

미세 절삭 가공의 상태감시를 위해 진동과 전류 신호 및 AE 신호를 이용하였고, 각 센서의 신뢰성을 높이기 위해 공작물 아래에 마이크로 공구동력계를 설치하였다. 가속도 센서는 민감도를 고려하여 주축 스피들에 3축 가속도계(SA12ZSC-TI)를 설치하였다. 마이크로 공구의 상태를 측정하기 위해 광 대역 AE(AE204SA)센서를 지그에 장착 하였다.

또한 주축의 회전을 조절하는 인버터에서 AC 인덕션 모터로 인입 되는 U상과 V상에 홀 센서를 장착하였고, 고주파 잡음을 제거하기 위해 1kHz의



(a) Micro machining system



(b) Multi sensors & monitoring system

Fig. 2 Micro monitoring system set-up

lowpass filter를 사용하여 측정하였다. 이러한 센서의 신호는 A/D 보드(PCI-NI 9133)를 통해 데이터를 획득하였다.

2.2 가공 조건

본 연구에서는 마이크로 절삭 공정 시 마이크로 공구마모 상태 감시와 절삭력 간접 측정을 위한 모니터링을 2파트로 나누어서 실험을 진행하였다. 실험에 사용한 절삭공구는 $\varnothing 200\mu\text{m}$, $\varnothing 500\mu\text{m}$ 2날 플랫(flat)엔드밀을 사용하였고, 가공 시편의 재질은 SM45C를 사용하였다. 마이크로 공구의 마모 실험에서의 가공 실험 조건은 절삭깊이, 이송속도 및 절삭속도를 고정된 상태에서 절삭 가공 길이는 30mm를 유지하고, 슬롯(slot)가공을 수행하였다. 여기서 이송속도와 절삭속도는 마이크로 공구 제작사에서 제공하는 가공 조건으로 선정하였고, 절삭 깊이는 마모의 발생을 유도하기 위해 기준 값에 비해 크게 주었다.

Table 1 Cutting condition of experiment

Condition for micro tool wear		
	Tool	Ø200µm
	DOC	0~52 µm
	Feedrate	50mm/min
	Cutting speed	30,000rpm
Condition for indirect cutting force measurement		
Micro tool	500µm	
Cutting speed	30,000rpm	
Feedrate	100mm/min	
Depth of cut	100 ~ 500µm	

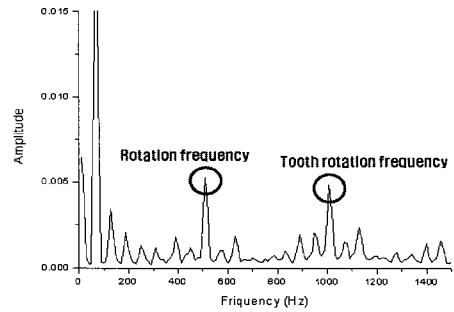
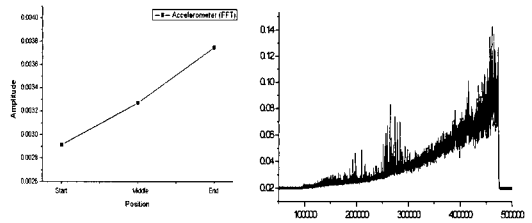


Fig. 3 FFT analysis of acceleration (30,000rpm)



(a) Accelerometer signal (b) AERms signal
Fig. 4 Relationship of accelerometer and AE sensor

또한 절삭 깊이 변화에 따른 마모 상태를 관찰하기 위해 공작물의 기울기를 설정하였다. 각 실험 조건에 따라 비전 시스템을 이용하여 절삭 가공 전, 후에 공구의 형상 및 상태를 관찰하였고, 가속도계와 AE센서의 신호들을 분석하였다. 절삭력 간접 측정 실험에서는 절삭깊이의 변화를 주어 실험을 수행하였으며, 각 조건마다 주축 모터의 전류 신호와 가속도계의 진동 신호 변화를 분석하여 공구 동력계에서 얻은 절삭력과 비교를 하였다. 두 실험의 조건은 Table 1과 같다.

3. 측정 결과

3.1 공구 마모

공구 마모 실험은 Ø200µm 공구로 5 회에 걸쳐 슬롯 가공을 수행하였다. 절삭 가공의 상태를 감시하기 위해 주축 스피indle에 장착한 가속도계의 신호를 시간영역(Time domain)이 아닌 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 통한 주파수 영역(Frequency domain)분석을 수행한 결과 회전주파수(500Hz)와 2 날 공구를 사용시 날당 절삭주파수(1,000Hz)가 확인되었다(Fig. 3). 이를 통해 회전주파수는 주축 rpm 측정에 사용 하였고 날당 절삭주

파수는 마이크로 공구의 마모 감시에 사용하였다. 가공 시편에 첫 번째 슬롯 가공에 대한 가속도계 신호를 획득한 결과, 날당 절삭 주파수는 절삭깊이 변화에 따라 증가하는 것을 Fig. 4(a)를 통해 확인할 수 있다. Fig. 4(b)는 AERms 신호를 보여주고 있는데 여기에서도 절삭 깊이의 변화에 따라 증가하는 경향을 확인할 수 있어, 이를 통해 절삭깊이 변화에 대한 상태 감시를 센서의 신호를 이용해 구분할 수 있었다.

일반적으로 공구 마모의 단계는 증가, 안정, 급격한 마모 순서로 발생한다. 하지만 본 연구에서는 각 슬롯에 대한 절삭력의 경향을 분석한 결과 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 5). Fig. 6 에서 확인할 수 있듯이 슬롯 가공 완료 후 각각의 마이크로 공구의 날 형상 이미지를 확인한 결과 마모의 진행에 대한 절삭력 신호도 동일한 경향을 나타내고 있다. 또한 Fig. 7(a)에서 보듯이 주축에 설치한 가속도계의 날당 절삭주파수도 각 슬롯 단계에 따라 상승하는 경향을 보이고 있다. 하지만 AERms 의 경우에는 실험한 결과 1 번과 2 번 슬롯에서는 AERms 가 증가하다가 이후 부터는 감소하기 시작한다(Fig. 7(b)).

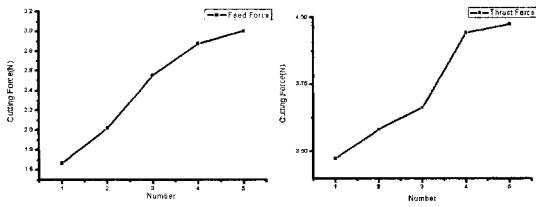


Fig. 5 Cutting force according to slot number

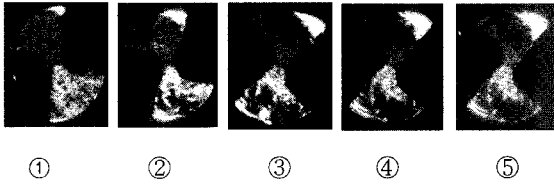
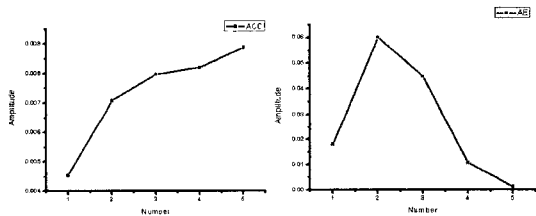


Fig. 6 Tool wear

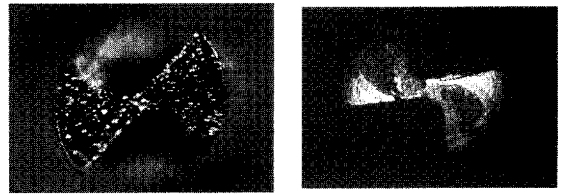


(a) Accelerometer signal (b) AErms signal
Fig. 7 Relationship of accelerometer and AE sensor (1~5 line)

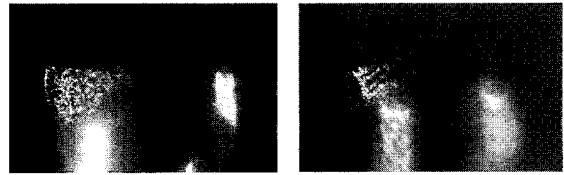
마이크로 공구 동력계의 절삭력 신호와 가속도계 신호에서의 날당 절삭주파수는 공구 마모로 인해 공구와 공작물 사이에 절삭부하와 주축의 진동은 증가하지만 AErms신호의 감소는 급격한 공구 마모로 인해 절삭깊이의 변화로 인한 절삭부하의 감소로 예상된다.

따라서 공구의 마모가 증가되면서 AErms 신호는 구분하기 힘들지만, 가속도계 신호에서는 초기 공구 마모 및 마모의 증가에서도 절삭 주파수의 변화를 통해 확인할 수 있다.

실험 결과 AErms와 가속도계 신호를 이용해 마이크로 공구의 마모 분석과 더불어 절삭깊이 변화 즉, 마이크로 공구의 마모에 의한 절삭깊이 변화와 절삭 가공 조건에 의한 절삭깊이 변화를 구분할 수 있다. 마이크로 공구의 마모에 대한 신호의 확인 및 공구 상태를 확인 하기 위해 Fig. 8은 가공 전과 마모 진행 후의 공구 사진을 나타낸다. Fig. 9는 1번과 5번 슬롯 가공 완료 후의 가공

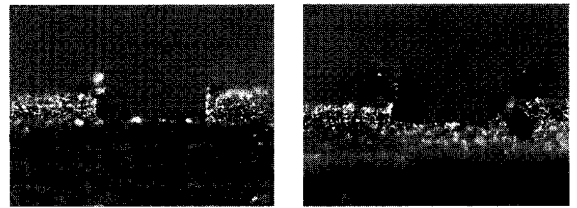


(a) The top of new tool (b) The top of worn tool

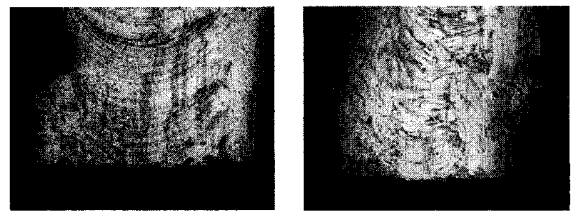


(c) The side of new tool (d) The side of worn tool

Fig.8 Photograph of micro tool



(a) The side of ① line (b) The side of ⑤ line



(c) The top of ① line (d) The top of ⑤ line

Fig. 9 Photograph of workpiece

형상을 측정하였다. 여기에서도 확인할 수 있듯이 마이크로 공구의 형상은 마모로 인해 공구 폭의 직경 감소와 절삭날의 끝이 둥글게 변하는 것을 확인할 수 있었다. 공작물의 형상은 1번 슬롯의 경우 바닥 면에 날이 지나간 흔적을 확인할 수 있으나, 5번 슬롯의 경우 바닥 면에 공구날의 마모로 인한 비정상적인 절삭면의 흔적이 나타난 것을 보여주고 있어 멀티 센서를 이용한 절삭 모니터링 신호가 유용하다는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 절삭력 간접 측정

일반적으로 마이크로 절삭 가공 시 절삭력을 측정하는 센서로는 마이크로 공구동력계가 있지만, 가격이 고가이고, 공작물의 크기 및 활용에 제약이 있다. 본 연구에서는 주축 모터의 전류를 이용해 모터 토크로서 절삭력을 간접 측정하고자 하였다.

범용 CNC 공작기계에서는 모터에 인입된 3상 전류의 RMS(Root Mean Square)을 이용해 주축 모터의 rpm 과 절삭 중 모터 토크를 이용한 절삭력 간접 측정이 가능하였다[6]. 반면에 마이크로 가공기에 장착된 주축 스피들의 모터는 소용량 모터를 사용하고, 에어베어링을 사용하여 고속 회전을 가능하게 하여, 주축 모터 자체에 걸리는 부하가 적게 작용한다. 또한 회전수를 조절하는 인버터에서 전류의 변화 보다는 펄스 주기로 컨트롤을 수행하고 있다. 실험을 통해 확인한 결과 절삭 가공을 수행을 하여도 절삭 부하량이 적게 걸려 기존의 방법으로는 아이들링과 절삭 상태를 구분하기에도 무리가 따른다.

본 연구에서는 전류 와 진동 신호의 분석을 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)을 이용하여 절삭력을 간접 측정하고자 하였다. 홀센서를 사용하여 전류의 변화를 확인하기 위해서 아이들링 상태에서 rpm 을 증가하면서 신호 획득을 수행하였다. 먼저, 절삭 무부하 상태에서 전류 신호의 회전 주파수와 가속도계 신호의 회전 주파수 및 이론적 주파수를 비교한 결과 미소한 오차 범위는 있었으나, 이를 통해 주축의 회전속도 및 상태 감시를 할 수 있었다(Fig.10).

본 실험에서의 가공 조건은 이송속도와 주축 회전수는 마이크로 공구 제작사에서 제공하는 피삭재 별 가공 조건을 참고하여 선정하였고, 절삭깊이의 변화를 통해 절삭력을 간접 측정하였다.

Fig.11 은 주축 모터의 전류 신호를 이용한 회전 주파수의 진폭 크기를 이용하여 절삭력 간접 측정을 한 결과를 나타낸다. 여기에서 확인한 결과 절삭 깊이 변화에 따라 주축의 전류 신호의 FFT 를 이용해 7.6%로의 오차를 갖는 절삭력을 간접 측정할 수 있었다. 또한 절삭력과 동일 방향인 X 축, Z 축의 가속도 신호를 비교한 결과 각 방향에 대해서 유사한 경향을 나타내고 있다(Fig. 12). 따라서 주축 모터 전류와 가속도 신호의 비교를 통해 정확한 절삭력은 측정하기 힘들지만 가공 중 절삭력 경향과 공구의 절삭 부하 상태를 실시간으로 모니터링이 가능하다고 예상된다.

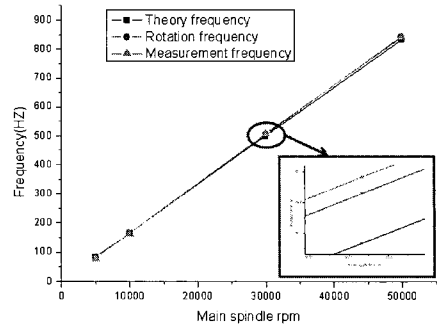


Fig.10 Relationship of spindle rpm and acceleration

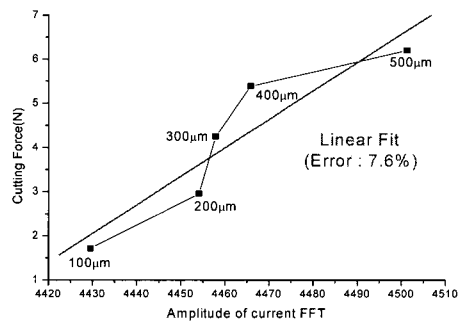
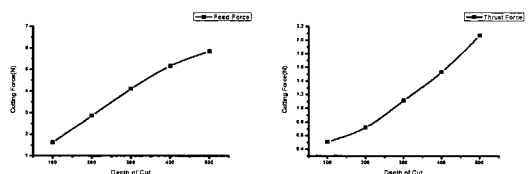
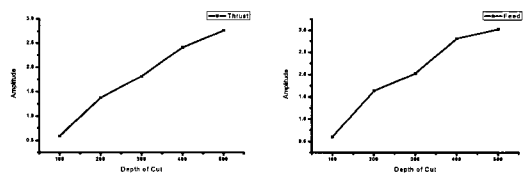


Fig.11 Relationship of cutting force and amplitude of current(FFT)



(a) Feed and thrust force signal



(b) X-axis and Z-axis accelerometer signal

Fig.12 Relationship of cutting force and acceleration signal

4. 결론

본 연구에서는 매크로 가공에서 절삭공정 상태 감시에 사용해 왔던 센서들을 이용해 마이크로 절삭가공 시 발생하는 신호들을 멀티 센서의 조합을 통해 마이크로 공구 및 가공기에 대해 효과적으로 모니터링을 수행하였다. 실험 내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) AErms 신호를 이용해 절삭 깊이의 변화와 공구 마모의 진행은 측정 할 수 있었으나, 절삭 부피의 감소로 인한 마모에 대해서는 상태 감시를 할 수 없었다.

(2) 공구 마모의 증가로 인한 절입량 감소는 가속도센서를 이용해 절삭 주파수의 진폭 변화로 측정 할 수 있었고, 회전 주파수로는 현재 rpm을 감시할 수 있었다.

(3) 주축 모터 전류의 신호를 FFT 변환을 통한 진폭의 변화와 주축의 가속도 신호의 비교를 통해 절삭력과 주축 스피들의 rpm을 간접 측정하였다.

(4) 단일 센서의 측정 한계를 멀티 센서를 이용해 입체적인 측정과 분석 결과의 신뢰성을 부여하였으며, 향후 이러한 기초 연구를 바탕으로 보다 다양한 조건하에서 모니터링 연구가 추가적으로 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] E. S. Lee, C. W. Park, 2003, The National Technology Roadmap of Nano-scale Processing and Equipments, Journal of Korean Society of Precision Engineering, vol. 20, No.12, pp. 19~24.
- [2] J. H. Kim, K. H. Shin, 2007, Development of a Hot-Embossing Process using Ceramic Glass Molds for Polymer Micro Structures, Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, vol.16, No.6, pp. 168~174.
- [3] W. Wang, S. H. Kweon, S. H. Yang, 2005, A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniature machine tool, Journal of Materials Processing Technology, vol.162-163, pp. 702~708.
- [4] D. H. Kwon, I. S. Kang, J. H. Kim, M. C. Kang, J. S. Kim, 2005, A Study on the Machining Characteristics for Micro Endmilling by using Ultra-Speed Air Turbine Spindle, Journal of Korean Society of Precision Engineering, vol.10, pp. 608~613.
- [5] J. Chae, S. S. Park, T. Freiheit, 2006, Investigation of micro-cutting operations, International Journal of Machine tools & Manufacture, No. 46 pp. 313~332.
- [6] B. C. Shin, G. H. Kim, J. H. Choi, B. C. Jeon, H. H. Lee, M. W. Cho, J. Y. Han, D. S. Park, A Web-based machining process monitoring system for E-manufacturing implementation, 2006, Journal of Zhejiang University SCIENCE A, Vol. 7, No. 9, pp. 1467~1473.