

미세가공면의 상태 감시를 위한 다중신호특성에 관한 연구

장수훈*, 박진효*, 강익수**, 김정석#

Multi-signal characteristics for condition monitoring of micro machined surface

Su-Hoon Jang*, Jin-Hyo Park*, Ik-Soo Kang**, Jeong-Suk Kim#

(Received 10 October 2008; received in revised form 25 March 2009; accepted 27 March 2009)

ABSTRACT

Micro-machining technology has been adopted for shape accuracy of micrometer and sub-micrometer scale, surface roughness of tens nanometer in industries. In micro-machining process the quality of machined surface is derived from machining condition and tooling. This paper investigates AE(acoustic emission) and cutting force signals according to machined surface quality related to machining condition. Machined surface quality was analyzed by the AE and cutting force parameter which reflect surface morphology. The characteristics of signal were extracted for process optimization by monitoring both the tool condition and the machined surface texture in micro end milling process.

Key Words : Micro end milling(마이크로 엔드밀), Acoustic emission(음향방출), Cutting force(절삭력), Surface texture(표면상태)

1. 서 론

마이크로 형상부품의 외형 사이즈는 수 nm에서 수 μm 에 이르며 그 표면은 수십 μm 또는 그 이하의 사이즈의 마이크로 형상들로 구성되어 있다. 최근 이러한 초정밀 마이크로 부품은 공작기계의 정밀제어, 초정밀 절삭공구, 계측기계의 발전에 따라 수백에서 수 nm까지 가공이 가능하게 되었으며, 각

종 마이크로 부품의 미세형상가공기술은 크게 발전하고 있다.^[1] 또한, 최근에는 나노 치수의 정밀도로 다양한 형상의 미세 복합가공시스템이 개발되어지고 있으며, 현대의 기계에서 다양한 형상의 마이크로 부품을 제조 할 수 있는 다축 복합가공 시스템의 개발 등 생산성 향상을 위한 노력은 지속적으로 발전하고 있다.^[2,3] 이러한 지속적인 생산성 향상을 위해 생산 공정의 자동화에 있어 가공기의 상태진단 및 감시는 매우 중요한 비중을 차지하고 있으며, 고품질의 생산품을 얻기 위해 최적화된 감시기술의 필요성에 대한 관심은 날로 증가하고 있다.^[4] 이러한 목적을 위해 광학현미경 등을 사용하여 측정하는 직접적 방법이 있으나 이는 설치시간, 측정오차의 발생, 높은 장비의 가격 등 비효율적인 측면을 가지고 있

* 부산대학교 대학원

교신저자 : 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소

E-mail : juskim@pusan.ac.kr

** 부산대학교 기계공학부

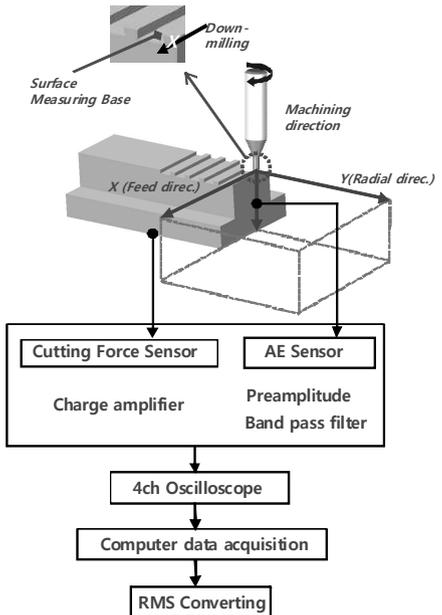
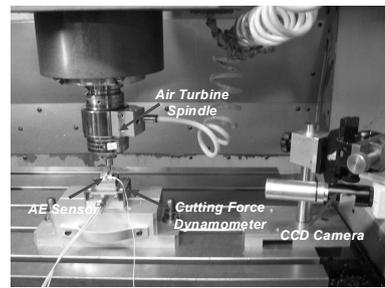
다. 이러한 단점을 충족시키기 위한 방법 중 AE(Acoustic emission), 절삭력(Cutting force) 신호를 이용한 간접적인 측정법을 상태감시에 적용하는 방법이 있다. 특히, AE 센서에 의한 측정법은 측정기 설치의 간소화로 측정을 위한 작업시간을 최소화할 수 있으며, 센서의 높은 응답성 등 절삭가공의 상태감시를 위해 적합한 측정방법중의 하나이다.^[5,6] AE 센서의 활용은 가공공정 상태감시 이외에 많은 분야 상태감시에 적용되어지고 있으며, 특히 가공공정 중 공구와 공작물 사이에서 발생하는 이상현상의 추적에 활용되어지고 있다. 본 논문에서는 마이크로 밀링시 가공조건별 AE 신호와 절삭력 신호를 획득하였으며, 신호특성에 따른 가공표면의 표면상태와 그에 따른 정량적 표면거칠기의 값을 분석하였다. 이러한 분석을 통하여 가공표면의 표면상태를 신호 특성으로 감시할 수 있는 효과적인 파라미터를 도출하는 알고리즘에 활용 하고자 한다.^[7]

2. 마이크로 밀링 실험

2.1 실험장치 및 조건

본 실험에 사용된 공작물은 Al6061로 5×20mm 면적을 가지고 있으며, 공구는 직경 200 μ m의 텅스텐 카바이드 마이크로 엔드밀을 사용하였다. 마이크로 밀링을 수행하기 위해 80,000rpm급 에어터빈 스피들(Air-turbine spindle)을 MAKINO V-55 머시닝 센터 주축에 장착하여 실험을 수행하였으며, 미세공구의 원점셋팅(Zero setting)을 위해 CCD 카메라를 활용하였다. Fig. 1(a)는 본 실험을 위한 장치사진을 나타내었으며, (b)는 실험방법과 실험순서도를 보여주고 있다. 또한, Table 1은 실험장치의 사양을 나타내고 있다. 주축회전수는 62,000, 66,000rpm이며, 이송속도는 124, 132, 620, 660mm/min로 정하였다. 그 외 절삭가공조건은 Table 2에 자세히 나타내었다. 또한, 본 논문에서는 마이크로 가공 중 발생 할 수 있는 여러 인자(공구마멸, 응착 등)들에 의한 가공면의 극한상황에서 신호를 분석하기 위해 Fig. 1에 나타내어진 가공순서를 하향절삭(Down-milling)으로 4회 반복하여 1,000mm의 가공이 이루어진 공구를 사용하였다. 미

세절삭조건의 현상파악을 위해 주파수 범위가 넓고, S/N비가 높은 센서가 요구되며, 회전공구를 사용할 경우에도 효과적으로 측정할 수 있도록 센서 설치가 용이해야 한다. 이러한 요구조건을 충족시키기 위해 AE센서, 공구동력계를 이용하여 신호분석을 수행하였다. 실험에 사용되어진 AE센서는 PAC사의 Pico-type 센서로 광대역에서 안정적인 응답성을 나타낼 수 있는 특성이 있다. 가공상태의 특성을 분석하기 위해 AE센서는 피삭재의 Y축에 부착하였으며, 절삭력을 획득하기 위해 마이크로 공구동력계를 머시닝센터 테이블에 설치하였다.



(b) Block diagram of experimental procedure

Fig. 1 Composition of multi-signal measurement system

Table 1 Specifications of experimental equipments

| | |
|----------------------------------|------------------------------|
| Machining center | MAKINO V-55 |
| Air-Turbine spindle | BIG BT40 (Max. 80,000rpm) |
| Pre-amplifier | PAC 1220A (100-1220kHz) |
| AE Sensor | PAC Pico & Wide band type |
| Cutting Force Sensor | Kistler 9251A |
| Oscilloscope | Lecroy 44Xi |
| CCD Camera | Neocom(x400) |
| Optical microscope | Olympus STM-MJS2 |
| Non-contact surface roughness | NV-E1000 |
| Contact surface profile | Tencor P-11 |

Table 2 Cutting conditions

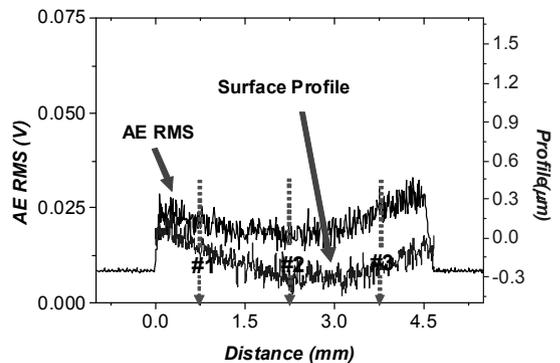
| No. | Feed (mm/min) | Feed per tooth ($\mu\text{m}/\text{tooth}$) | Spindle speed (rpm) |
|--------------------------------------|------------------|---|---|
| a | 124 | 1 | 62,000 |
| b | 620 | 5 | |
| c | 132 | 1 | 66,000 |
| d | 660 | 5 | |
| Axial depth of cut (μm) | | | 20 |
| Workpiece | | | Al6061 |
| Cutting Fluid | | | Dry |
| Tool | | | $\phi 200$ WC 2-flute Flat end mill |

AE 신호는 피삭재의 이송방향 길이(5mm)에 해당하는 전 영역에서의 신호를 획득하였으며, 가공되어진 피삭재의 이상신호 분석과 표면거칠기(Ra) 측정을 위해 피삭재 3구역을 선택하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 AE 신호와 표면형상 특성

AE신호는 5초 동안 50,000개의 데이터를 획득하였으며, 절삭력과 AE 원신호를 RMS(Root Mean Square) 값으로 변환하여 분석하였다. 가공조건별 전체 가공 길이에 대한 AE RMS와 표면윤곽(Surface profile)을 Fig. 2에서 볼 수 있다. 1,000mm 가공 후의 공구로 인하여 전체적으로 가공전반, 중반, 후반부 AE RMS가 불균일한 진폭을 가짐을 알 수 있다. 또한, 표면윤곽은 가공 중반부(#2)에 비해 가공 진입부(#1)와 가공 후반부(#3)에서 상승됨을 관찰할 수 있었다. 가공면의 불균일성(Waviness)은 가공 진입부와 가공 중반부 이후 절삭에너지 증가에 따른 마이크로 엔드밀의 강성 저하로 인해 엔드밀의 변형(Deflection)에 따른 것으로 사료되며, 표면윤곽의 경향과 유사하게 AE RMS 값이 변화함을 알 수 있다. AE RMS 값에서 볼 수 있듯이 가공 전반부보다 가공 후반부에서 AE RMS값이 증가함을 알 수 있다. 특히, 날당이송이 $5\mu\text{m}/\text{tooth}$ 인 조건 (b)와 (d)가 날당이송이 $1\mu\text{m}/\text{tooth}$ 인 (a)와 (c)



(a) $1.0\mu\text{m}/\text{tooth}$, 62,000rpm

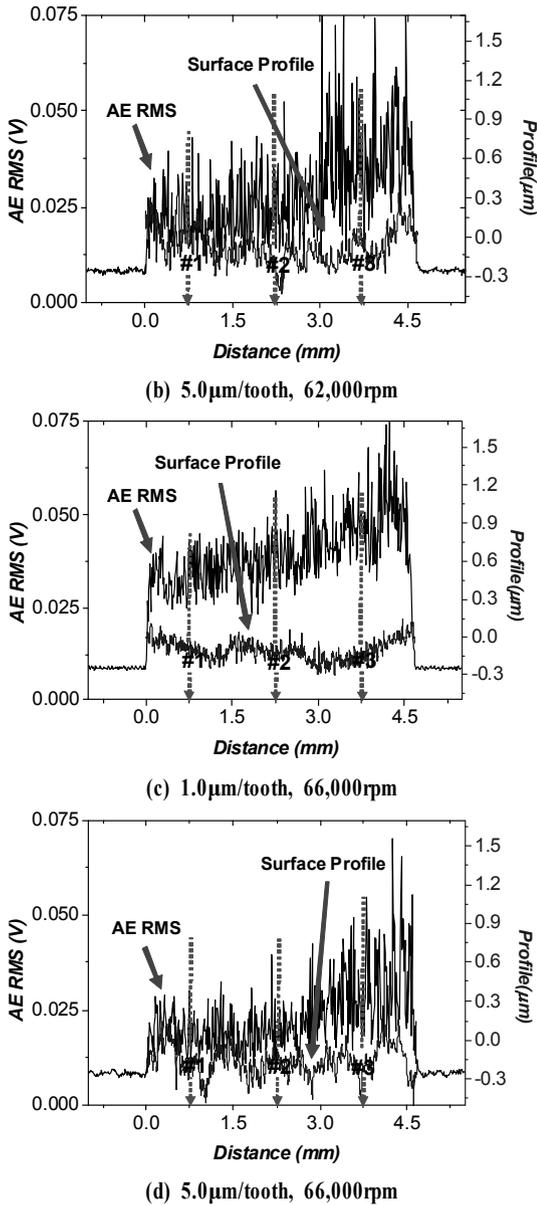


Fig. 2 Variation of AE RMS and surface profile

조건에 비해 AE RMS가 0.1V 이상의 높은 AE RMS 값을 나타내었으며, 표면거칠기 또한 크게 나타나고 있다.

3.2 절삭력과 표면형상 특성

Fig. 3은 Fig. 2 상의 #1, #2, #3에서 이송방향(Feed direction)절삭력과 반경방향(Radial direction)절삭력을 보여주고 있다. Fig. 2에서 AE RMS와 표면형상의 특성에서 알 수 있듯이 가공 진입부에서 절삭력이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. #1 위치에서 절삭력은 이송방향과 반경방향 모두 상대적으로 #2와 #3에 비해 크게 나타남을 알 수 있으며, 가공 후반부 #3에서도 중반부#2에 비해 높은 절삭력을 나타내었다. 이와 같은 절삭력 증가로 인해 미세공구의 변형이 발생하고 이로 인해 가공면 표면의 불균일성이 발생한 것이다. 또한, 마이크로 밀링시 가공면에 작용하는 힘은 반경방향보다 이송방향 절삭력이 약 50% 정도 크게 작용함을 알 수 있었다.

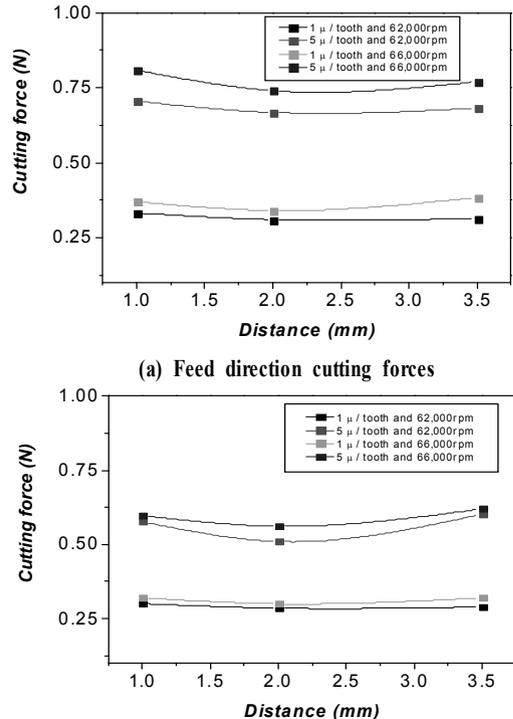


Fig. 3 Cutting forces according to cutting conditions

하지만, 마이크로 엔드밀링시 이송방향, 반경방향 모두 미세한 절삭력으로 가공 진입부(#1), 중반부(#2), 후반부

(#3)에서의 절삭력 모두 큰 변화는 측정되지 않았다.

3.3 표면거칠기와 공구상태

가공면을 광학현미경으로 관찰하였으며, 표면거칠기는 비접촉식으로 측정하여 정량화하였고. 측정된 표면거칠기 값은 Table 3에 나타내었다. 광학회절방식을 이용한 표면거칠기 측정으로 더욱 섬세한 표면형상을 관찰할 수 있었다. Fig. 2에서 AE RMS 진폭이 불균일한 조건의 결과는 광학현미경 사진에서도 알 수 있듯이 표면상태가 고르지 못한 것을 확인할 수 있었다.

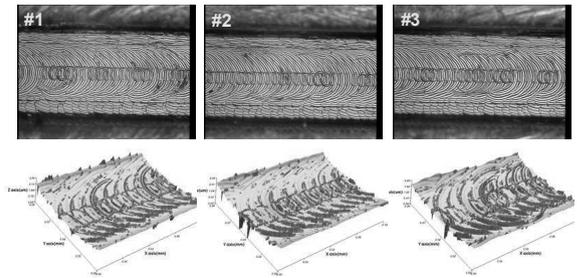
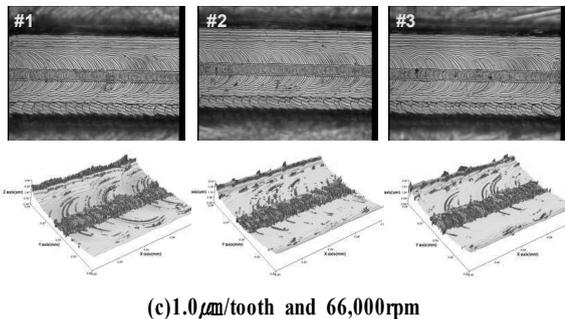
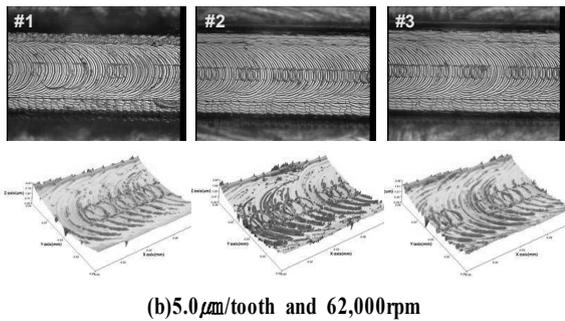
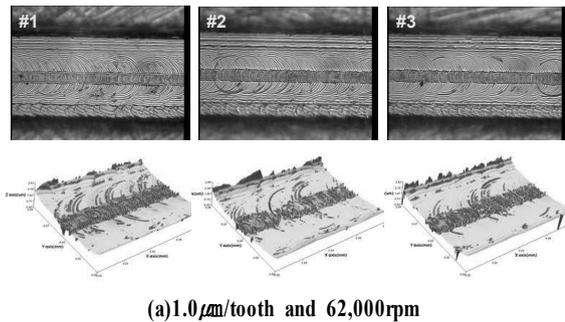


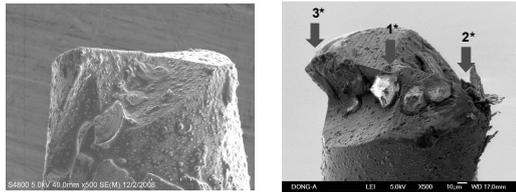
Fig. 5 Machined profiles and textures

특히 가공면 중간부에서 칩의 응착발생으로 이상표면이 관찰되었으며, 가공면 인근에서는 공구마멸발생에 따른 이상면이 발생함을 알 수 있다. 가공면의 이상상태는 Fig. 3에서 불규칙한 AE RMS 진폭과 표면형상에서 확인 할 수 있었으며, 표면거칠기의 측정 수치에서 또한 확인 할 수 있었다. 가장 높은 표면거칠기 값을 나타낸 Fig. 4 (b)와 낮은 표면거칠기 값을 나타낸 Fig. 4 (c)는 Fig. 2 (b)와 (c)의 AE RMS 신호의 결과로부터 감시가 가능하다는 것을 알 수 있었다. Fig. 6은 가공전과 후의 미세공구의 SEM 사진을 보여주고 있다.

Table 3 Comparison of Surface roughness(μm)

| | #1 | #2 | #3 | Mean |
|-----|------|------|------|------|
| (a) | 0.21 | 0.20 | 0.20 | 0.20 |
| (b) | 0.24 | 0.22 | 0.24 | 0.23 |
| (c) | 0.22 | 0.18 | 0.18 | 0.19 |
| (d) | 0.23 | 0.22 | 0.22 | 0.22 |

Fig. 4에서 가공면 중앙에 발생했던 이상현상이 Fig. 5 (b)에서 칩(Chip)의 응착에 의해 발생(1*)에 의한 것을 알 수 있으며, 2*, 3* 공구의 마멸현상으로 인해 가공면 인근에 영향을 미친 것으로 보여진다.



(a) Before machining (b) After machining
Fig. 6 SEM photograph of micro tool

4. 결론

본 연구는 마이크로 밀링가공시 가공면 상태감시를 위한 AE와 절삭력 신호가 유효한지를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. AE RMS와 표면상태 분석을 통해 절삭저항증가에 따른 마이크로 엔드밀의 변형을 알 수 있었으며, AE RMS 신호는 마이크로 밀링시 최적 가공조건 도출에 유효한 파라미터임을 알 수 있었다.
2. 가공면 이상상태를 AE RMS 및 절삭력 분석을 통해 예측할 수 있었으며, 표면형상 측정을 통해 이를 확인할 수 있었다.

본 연구와 연관된 많은 논문에서는 대면적의 가공 측정영역에서 한 부분을 추출(Sampling)하는 연구가 지속되었지만, 본 논문에서는 가공측정범위를 최소화하여 가공 전 공정(Process)에서 발생하는 가공현상을 파악하는데 중점을 두었다. 그리하여, 절삭력과 AE 신호분석을 통해 마이크로 가공 중 가공면 상태감시를 위한 효과적인 파라미터를 제시할 수 있었으며, 본 연구에서 제시한 기법을 적용함으로써 가공공정 지능화에 기여할 수 있을 것이다.

후기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고 문헌

1. Y. Yamazaki, K. Nakamura and H. Hashimoto, "Development of an LED with a fresnel lens", JSPE-59-04, pp.655-660, 1993
2. Dimla E., Dimla Snr. "Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting joperations-arevies of methods", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.40, pp.1073-1098, 2000
3. Lee, E. S, Je, T. J, Ohmori H, "Development of cylindrical grinding technology with electrolytic in-process dressing method", International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol.1, No.1, pp.127-132, 2006.6
4. P.G. Benardos and G.C. Vosniakos, "Predicting surface roughness in mahining: a revies", International Journal of Machine Tools Manufacture, Vol.43, pp.833-844, 2003
5. Steffan Soderberg and Strure Hogma, "Wear Mechanism and Tool Life of High Speed Steels related to Microstructure", 110, pp.315-329, 1986
6. K.H. Fuh and C.F. Wu, "A proposed statistical model for surface quality prediction in end-milling of A1 alloy", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.35, pp.1187-1200, 1995
7. Lee, D. E, Hwang I, Balentre, C.M.O., Oliveira, J.F.G. and Dornfeld D.A., "Precision Manufacturing Process Monitoring with Acoustic Emission", International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.46, pp.176-188, 2006