

마이크로 가공에서 절삭깊이 보정을 위한 AE 센서의 적용

Application of AE Sensor for Calibration of Depth of Cut in Micro-machining

강익수^{1,✉}, 김정석², 김전하³
Ik-Soo Kang^{1,✉}, Jeong-Suk Kim² and Jeon-Ha Kim³

¹ 부산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Pusan Nat'l Univ.)

² 부산대학교 기계공학부 / 정밀정형 및 금형가공연구소 (School of Mechanical Engineering / ERC/NSDM, Pusan Nat'l Univ.)

³ 레베산업 (LeBe Industrial Co., LTD)

✉ Corresponding author: is kang@pusan.ac.kr, Tel: 051-510-3441

Manuscript received: 2008.9.29 / Revised: 2009.1.7.4.20 / Accepted: 2009.5.26

There are technical requirements to manufacture large size functional parts with not only simple geometries like a flat or spherical surface but also sculptured geometries. In addition, the required machining accuracy for these parts is becoming more severe. In general, the form accuracy of machined parts is determined by the relative position between workpiece and tool during machining process. To improve machining accuracy the relative position errors should be maintained within the required accuracy. This study deals with the estimation and calibration of depth of cut using the AE signal in micro-machining. Also, this sensing technique can be applied to detect the initial contact between workpiece and tool.

Key Words: Signal (음향방출 신호), Micro-machining (마이크로 가공), Depth of Cut (절삭깊이), Calibration (보정)

기호설명

DOC = depth of cut (μm)

F = feed rate (mm/min)

T = actual cutting time (sec)

1. 서론

복잡한 미세형상을 자유롭게 가공할 수 있는 방법으로 종래부터 기계적인 가공법(mechanical machining method)이 광범위하게 이용되어 왔다. 그러나 이러한 기계적인 가공법은 일반적으로 절삭 부하가 상대적으로 커서 미세 구조물 가공에 적합하지 않다고 여겨져 1980 년 이전에는 마이크로 구조물의 가공에 관한 연구가 많지 않았다. 이후 초정밀 가공기술(ultra-precision machining technology)

은 공작기계의 정밀운동제어, 초정밀가공 공구 및 계측 기술의 발전에 따라 서브 마이크론(sub-micron) 치수의 가공이 용이한 수준에 도달했다. 이에 따라 최근에는 미세형상 부품의 가공에 적용 가능한 기계적 절삭가공법과 미세공구의 개발에 초점이 모아지고 있으며, 연구도 활발히 진행되고 있다.¹⁻⁵

복잡한 자유곡면 형상의 미세부품 및 금형가공 수요가 점점 증가하고 미세해짐에 따라 이런 부품 및 금형은 상당한 가공 정밀도를 요구하고 있다. 일반적으로 가공 부품의 형상은 절삭과정에서 공구(tool)와 공작물(workpiece)의 상대적인 위치에 의해 결정되어지기 때문에 정밀도를 향상시키기 위해서는 이런 상대오차를 줄여야 한다. 하지만 가공이 이루어지는 동안 공작기계(machine tool), 공구, 공작물 등 가공시스템의 예상치 못한 변형이나 공작기계 구조물 정밀도의 불확실성으로 인해 원하

는 정밀도를 내기가 어렵다. 따라서 가공 중에 발생하는 현상들의 온라인 감시(on-line monitoring)는 중요한 기술로 여겨지고 있으며, 다양한 센서신호를 이용한 연구가 진행되어져 왔다.⁶⁻⁸ 특히, 마이크로 밀링(micro milling) 가공에서는 공구의 크기가 수백에서 수십 μm 수준이기 때문에 직접적인 방법으로 원점 세팅 시 공구와 공작물의 상대오차가 크기 발생하여 정밀도에 상당한 영향을 미친다. 이런 상대오차를 줄이기 위해서는 초기 원점 세팅 시 오차를 최소화하거나 오차만큼의 절삭깊이를 보정함으로써 마이크로 부품의 가공정밀도를 향상시킬 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 AE (acoustic emission) 신호를 이용하여 절삭깊이를 예측하고 오차보정에 관한 연구를 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 AE 센서의 특성

일반적으로 AE 는 고체의 내부구조가 외부하중의 영향에 의해 재배치를 이루면서 변형에너지가 급격히 풀림에 따라 방출되는 일종의 탄성응력파로 알려져 있다. 정적인 균열이나 파괴 등의 감지에 유효한 레이저, 초음파 등과 달리 AE 는 동적인 상태에서 발생하는 균열이나 파괴 등의 감지에서 실효를 거두고 있다. Fig. 1 은 각종 센서별 적용예를 보여주고 있다.⁹ 그림에서 보는 바와 같이 AE 센서는 높은 민감도를 가지고 있고, 진동이나 잡음보다 높은 주파수 대역을 가지고 있기 때문에 마이크로 가공 현상 파악에 유용하게 적용되고 있다.¹⁰⁻¹²

2.2 AE 센서의 적용 원리

Fig. 2 는 AE 신호를 이용한 절삭깊이 보정 원리의 개략도이다. 먼저 CCD 카메라를 통해 공구와 공작물 사이의 거리를 측정 후 원점 세팅을 하였다. 하지만, CCD 카메라에 보여지는 이미지로 공작물과 공구 접촉점이나 간격의 측정은 정적인 상태에서 이루어지게 된다. 이러한 경우 측정오차와 기계의 주축회전이나 이송시 운동오차가 발생하게 되므로 초기 정적인 상태에서 발생한 오차의 보정은 가공이 진행된 상태에서 이루어져야 된다. 따라서 일정한 이송속도 F 로 가공 시 발생하는 AE 신호를 획득하였다. 원점세팅에서 공작기계의 이송시 가감속 영향을 최소화하기 위하여 공구와 공작물 간의 거리를 충분히 설정하였다. AE 신

호로부터 실제 가공시간 T 를 측정하면 가공된 절삭깊이 DOC 의 예측이 식 (1)로부터 가능하며, 예측된 절삭깊이의 오차가 발생했을 시에 그 오차를 보정하고 재가공을 수행하는 연구를 수행하였다.

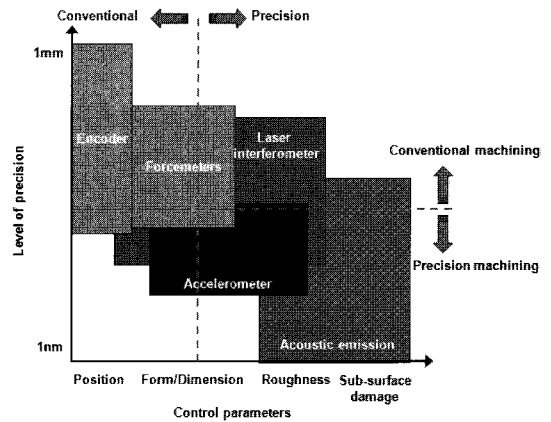


Fig. 1 Sensor application range in precision level

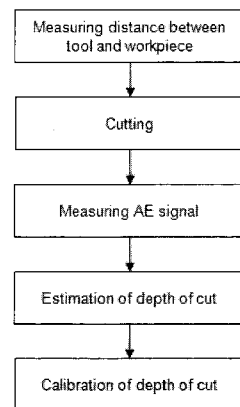


Fig. 2 Calibration method of depth of cut using AE signal

$$DOC = F \times T \quad (1)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

가공실험은 고속 머시닝센터(MAKINO V55)에서 직경 $400\mu\text{m}$ 의 2 날 플랫 엔드밀(2-flute flat end mill)을 이용하여 알루미늄 7075 에 구멍가공을 수행하였다. AE 센서는 PAC 사의 Pico 타입으로 주파수 범위는 200-750kHz 이다. Fig. 3 은 실험장치의 개략도이며, Table 1 에는 실험에 사용된 장치의 사양을 나타내었다.

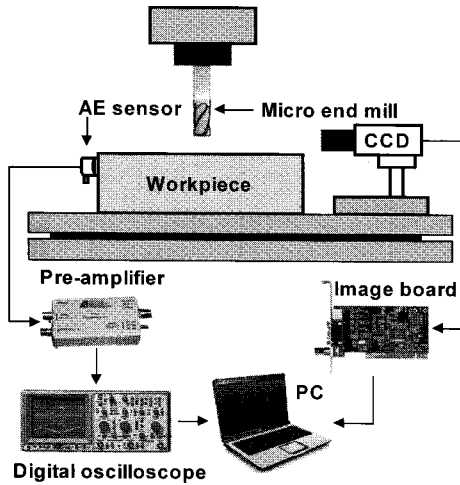


Fig. 3 Schematic of experimental set-up

Table 1 Specification of equipments

Machining center	Makino V55
AE sensor	PAC Pico(200-750kHz)
Pre-amp.	PAC 1220A (100-1220kHz Bandpass filter)
CCD camera	Neocom($\times 150$)
Oscilloscope	Lecroy 9330A(400MHz)
Surface profiler	Tencor P-11

3.2 실험방법

초기 원점 세팅을 위해 CCD 카메라를 통해 공구와 공작물 사이의 거리를 측정하였다. 원점은 300 μm 의 거리를 두고 세팅하였고, z 축 방향으로 10 μm 의 절삭깊이로 가공을 수행하였다. AE 신호의 샘플링 주파수는 500kHz 이고, 0.1 초 동안 신호를 획득하였다. 가공시 획득한 AE 신호로부터 절삭깊이를 예측한 후 오차가 있을 경우 보정 후 가공 실험을 행하였다. 그리고 실험의 검증을 위해 가공면의 윤곽(profile)을 측정하여 오차보정 결과를 평가하였다.

Table 2 Experimental conditions

Spindle revolution	5,000rpm
Feed rate	100mm/min
Tool	$\text{\O}400\mu\text{m}$, 2-flute flat endmill
Workpiece	Aluminum 7075
Depth of cut	10 μm

4. 결과 및 고찰

4.1 기초 실험결과

본 실험에 앞서 AE 신호의 파형분석을 위해 기초실험을 수행하였다. 기초 실험결과 AE 신호는 공구가 주어진 절삭 깊이만큼 가공하는 시간동안 진폭이 피크(peak)값까지 상승하다 하강하는 경향을 보였다. 실제 절삭하는 동안의 AE 신호는 진폭이 증가하는 구간이며, 피크값 이후는 주축 이송의 일시정지와 상승시 소재 바닥과 벽면의 잔여량의 가공에 의한 신호로 볼 수 있다. Fig. 4 는 절삭 깊이가 10 μm 일 때 획득한 AE 신호의 두 경우를 보여주고 있다. 설정깊이 10 μm 이지만 AE 신호로부터 예측된 절삭깊이는 각각 약 7 μm (0.004s), 9 μm (0.0056s)로 나타났다. 이러한 결과는 공구와 공작물 사이의 상대오차로 인한 것으로 절삭깊이의 보정이 필수적임을 보여주고 있다.

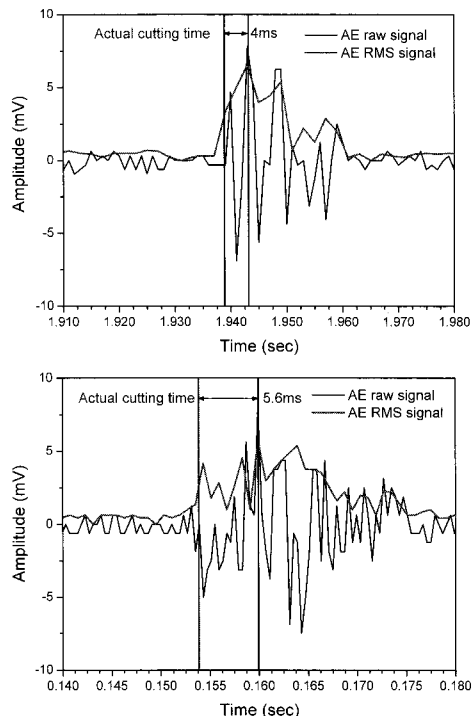


Fig. 4 AE signals measured in preliminary experiment

4.2 절삭깊이 보정 실험 결과

Fig. 5 와 7 은 절삭깊이 10 μm , 이송속도 100mm/min 으로 가공했을 때 얻어진 AE 신호를 보여주고 있으며, Fig. 6 과 8 은 가공면 윤곽의 측

정결과를 보여주고 있다. Fig. 5 에 나타난 AE 신호로 측정된 가공시간은 0.006s 로 나타났다. 공구상승에 의한 잔여 가공시간은 약 0.02s 로 실제 가공시간보다 길게 나타났는데, 이러한 이유는 세팅된 절삭 깊이만큼 가공을 한 후 상승하기 전에 수치 제어 데이터(NC data)를 읽어 들이기 위해 시간 지연이 발생하게 된다. 그리고 주축 상승시 세팅된 이송속도를 내기 위해 가속을 하는데, 초기에 가속구간은 실제 이송 속도보다 작기 때문에 피크값을 보인 후에 AE 신호가 길어진 것이다. 그리고 공구가 공작물을 빠져 나오는 순간 진동에 의해 상대적으로 큰 진폭의 AE 신호가 발생하였다.

식 (1)에 실제 가공시간 0.006s 를 대입하면 절삭 깊이는 10 μ m 로 오차발생이 없는 것으로 예측되었다. 따라서 절삭깊이의 보정없이 가공을 다시 수행하고, 가공깊이를 측정 한 결과 Fig. 6 과 같은 가공면 윤곽을 얻을 수 있었다. 보정하기 전의 절삭깊이는 9.3 μ m 이고, 재가공시 8.6 μ m 로 측정되었다. 예측된 값과의 오차는 0.7 과 1.4 μ m 으로 나타났는데 이는 표면형상 측정오차에 의한 것으로 보여진다. Fig. 7 에서 AE 신호로부터 측정된 가공시간은 0.004s 이며, 이 시간으로 예측된 절삭깊이는 6.7 μ m 이다. 실험에 사용된 머시닝센터의 정밀도가 1 μ m 이므로 3 μ m 의 절삭깊이를 보정하여 재가공을 수행하였고, 절삭깊이를 측정결과 Fig. 8 과 같다. 보정하기 전의 절삭깊이는 7.4 μ m 로 AE 신호로부터 예측된 값과 0.7 μ m 의 오차를 보였으며, 보정한 후의 절삭깊이는 10.6 μ m 로 보정값과 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

이상과 같은 결과로부터 AE 신호를 이용하여 초기 세팅시 발생할 수 있는 상대오차를 예측할 수 있었고, 예측된 값을 보정하여 1 μ m 이하의 수준으로 가공 정밀도를 향상시킬 수 있었다. 본 논문

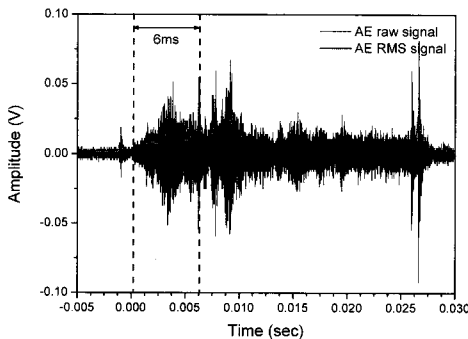


Fig. 5 AE signal in cutting time of 6ms

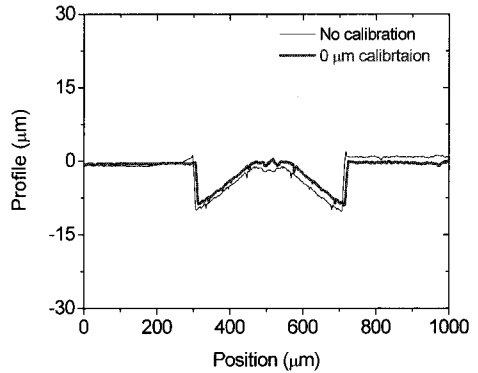


Fig. 6 Profile of machined surface in calibration of 0 μ m

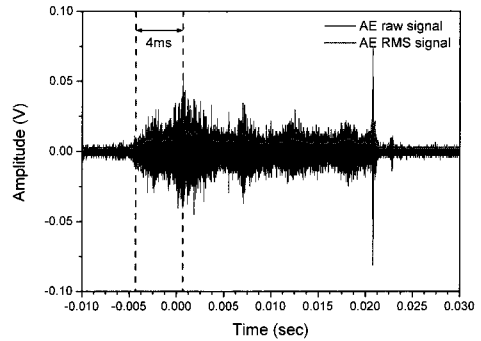


Fig. 7 AE signal in cutting time of 4ms

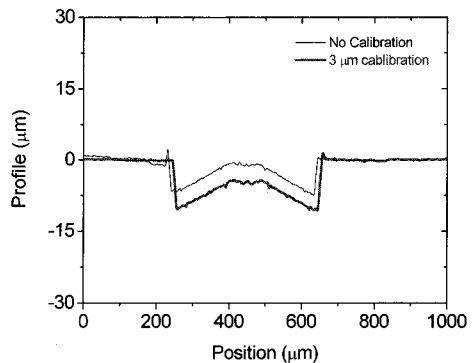


Fig. 8 Profile of machined surface in calibration of 3 μ m

에서는 가공 후에 절삭깊이를 보정하는 기법을 적용하였는데, AE 신호가 발생하는 시점을 감지하여 초기 원점값을 보정하는 원점세팅에도 적용될 수 있을 것이다.

5. 결론

본 논문에서는 마이크로 가공에서 초기 세팅과

공작기계 운동시 발생하는 오차를 예측하고 보정하기 위해 AE 신호를 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

측정 및 운동오차의 보정은 가공과 동시에 이루어져야 하므로 실제 가공시간을 측정하고 절삭깊이를 예측하였다. 예측오차는 $1\mu\text{m}$ 이하였으며, 초기 설정된 절삭깊이 $10\mu\text{m}$ 와의 차이를 구하고 이 값을 보정함으로써 공구와 공작물 사이에 발생하는 오차를 줄일 수 있었다. 이와 같은 간접적인 센싱기법은 향후 마이크로 가공 공정의 지능화에 응용될 수 있을 것이다. 또한, 마이크로 가공에서 오차보정뿐만 아니라 공구와 공작물의 접촉점 감시를 통해 간접적인 원점 세팅 기법으로도 적용될 수 있다. 그리고 향후 공작기계의 가감속 등을 고려한 실험을 통해 보다 정확한 절삭깊이의 예측 및 보정이 가능한 연구를 수행할 것이다.

참고문헌

- Ikawa, N., Donaldson R. R., Komanduri, R., König, W., Aachen, T. H., McKeown, P. A., Moriwaki, T. and Stowers, I. F., "Ultraprecision Metal Cutting - The Past, the Present and the Future," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, No. 2, pp. 587-594, 1991.
- Bao, W. Y. and Tansel, I. N., "Modeling Micro-end-milling Operation. Part I: Analytical Cutting Force Model," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 40, No. 15, pp. 2155-2173, 2000.
- Tansel, I. N., Arkan, T. T., Mahendrakar, N., Shisler, B., Smith, D. and McCool, M., "Tool Wear Estimation in Micro-machining. Part I: Tool Usage-Cutting Force Relationship," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 40, No. 4, pp. 599-608, 2000.
- Lee, H. W, Choi, H. Z, Lee, S. W., Choi, J. Y. and Jeong, H. D., "A Study on the Micro Tool Fabrication using Electrolytic In-process Dressing," *J. of the KSPE*, Vol. 19, No. 12, pp.171-178, 2002.
- Dhanorker, A. and Özel, T., "Meso/micro Scale Milling for Micro-manufacturing," *Int. J. Mechatronics and Manufacturing Systems*, Vol. 1, No. 1, pp. 23-42, 2008.
- Nakao, Y. and Dornfeld, D. A., "Diamond Turning using Position and AE Dual Feedback Control System," *Precis. Eng.*, Vol. 27, No. 2, pp. 117-124, 2003.
- Choi, D., Kwon, W. T. and Chu, C. N., "Real Time Monitoring of Tool Fracture in Turning using Sensor Fusion," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 15, No. 5, pp. 305-310, 1999.
- El-Wardany, T. I., Gao, D. and Elbestawi, M. A., "Tool Condition Monitoring in Drilling using Vibration Signature Analysis," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 36, No. 6, pp. 687-711, 1996.
- Lee, D. E., Hwang, I., Valente, C. M. O., Oliveira, J. F. G. and Dornfeld, D. A., "Precision Manufacturing Process Monitoring with Acoustic Emission," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 46, No. 2, pp. 176-188, 2006.
- Kang, I. S., Jeong, Y. S., Kwon, D. H., Kim, J. H., Kim, J. S. and Ahn, J. H., "Tool Condition Monitoring using AE Signal in Micro Endmilling," *J. of the KSPE*, Vol. 23, No. 1, pp. 64-71, 2006.
- Kang, I. S., Kim, J. S., Kang, M. C. and Lee, K. Y., "Tool Condition and Machined Surface Monitoring for Micro-lens Array Fabrication in Mechanical Machining," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 201, No. 1-3, pp. 585-589, 2008.
- Dornfeld, D. A., Oliveira, J. F. G., Lee, D. and Valente, C. M. O., "Analysis of Tool and Workpiece Interaction in Diamond Turning using Graphical Analysis of Acoustic Emission," *Annals of the CIRP*, Vol. 52, No. 1, pp. 479-482, 2003.