

# 초정밀가공 시 임피던스 측정을 통한 시편 수평맞춤 및 공구의 기준위치 설정

## Workpiece Horizontality and Reference Positioning of Cutting Tool by Measuring Impedance in Ultra-Precision-Machining

이호철<sup>1</sup>, 김기대<sup>1,✉</sup>  
Ho Cheol Lee<sup>1</sup> and Gi Dae Kim<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부 (School of Mechanical and Automotive Engineering, Catholic Univ. of Daegu)  
✉ Corresponding author: gidkim@cu.ac.kr, Tel: 02-850-2724

Manuscript received: 2011.5.25 / Revised: 2011.7.26 / Accepted: 2011.9.2

*In ultra precision machining, it is necessary to adjust the horizontality and reference position of a workpiece in a noncontact manner. For this, a simple process by measuring impedance between a tool tip and a workpiece which are connected to impedance analyzer is proposed. As the distance between the tool and the workpiece gets closer, the reduction rate of impedance becomes higher over all frequency ranges. By setting threshold value of impedance reduction rate at specific frequencies through preliminary experiments, the distance between the tool and the workpiece can be predicted and it directly enables us to horizontalize the workpiece and to set the tool to the desired reference position.*

Key Words: Workpiece Horizontality (시편수평맞춤), Reference Positioning (기준위치설정), Impedance Reduction Rate (임피던스 감소율)

### 1. 서론

부품의 초소형화 및 고집적화 추세에 따라 초정밀 가공기술이 요구되고 있으며 이를 실현시키기 위해 다양한 기술이 개발되고 있다. 미세가공은 가공깊이가 수~수십 마이크로미터 수준으로, 가공 시편을 새롭게 장착하였을 경우 시편의 수평을 정확하게 맞추어야 하고, 또한 공구를 새롭게 교환하였을 경우 시편에 대한 공구의 초기위치를 정확하게 설정하는 절차가 필요하다.

Fig. 1은 시편 고정 시 수평을 정확하게 맞추지 않아 가공방향으로 약 0.038° 기울어진 상태에서 미세 V 홈을 가공했을 때 절삭력의 크기를 측정할 결과다. 그림에서 보는 바와 같이 시편이 기울어

짐으로서 절삭깊이가 5  $\mu\text{m}$ 에서 25  $\mu\text{m}$ 까지 변화하고 이에 따라 절삭력이 크게 변화하고 있다. 이 결과 가공된 미세 V 홈의 형상은 크게 왜곡된다.

가공깊이가 수백  $\mu\text{m}$  ~ 수 mm인 일반적인 가공공정에서는 이 정도의 절삭깊이의 변화는 무시될 수도 있다. 보다 일반적으로는 본격적으로 가공하기 전에 직경이 큰 공구로 가공 시편의 윗면을 선행 절삭함으로써 시편의 평면도(flatness) 및 수평 상태(horizontality)를 미리 맞춘다. 또한 회전 혹은 직선이송 운동을 하고 있는 공구를 시편에 점진적으로 접근시켜가면서 칩의 생성여부를 통해서 공구가 가공시편에 닿았는지를 육안으로 확인하는 과정을 거침으로써 공구의 초기 기준위치를 잡을 수 있다. 이러한 방법들로 가공시편의 평면

도 및 시편의 수평상태, 그리고 공구의 기준위치를 확인하는 절차는 불가피하게 가공 시편에 손상을 가져다 주기 때문에 초정밀가공을 수행하기 위해서는 적절한 방법이라 할 수 없다.

일반적으로 초정밀 가공을 수행하기 위해서는 가공시편을 래핑(lapping) 등 정밀입자가공으로 선행 가공함으로써 시편 자체의 평면도를 조정하고 표면조도를 아주 좋게 만든다. 또한 가공테이블에 고정된 시편의 수평을 잡기 위해서 Fig. 2 에 나타난 바와 같이 다이얼게이지(dial gauge) 등 1 $\mu$ m 이내의 변위를 측정할 수 있는 접촉식 센서를 이용하여 시편과 공구 사이의 상대변위를 측정한 후에 시편 아래에 부착되어 있는 고니오미터(goniometer) 등을 이용하여 2 방향의 기울기를 조정하여 시편의 수평을 맞춘다. 그러나 이와 같은 방법으로 접촉식 센서를 사용하면 가공시편 표면에 불가피하게 미세한 소성변형이 발생하게 되고 이것은 초정밀 수준의 가공에는 바람직하지 않다. 또한 시편에 대한 공구의 초기 기준위치를 정확히 알기 위해서는 공구가 직접 시편에 닿아 가공이 이루어질 때까지 공구를 접근시켜야 하기 때문에 가공시편의 손상은 불가피하다.

초정밀 가공 시에 가공시편에 어떠한 손상을 주지 않고 시편의 수평상태를 맞추고 공구의 기준위치를 정확히 파악하기 위해서 유도형 변위센서나 와전류식 변위센서 혹은 광학식 변위센서 등과 같은 기존의 비접촉 변위센서를 사용할 수 있다.<sup>1-4</sup> 하지만 유도형 변위센서와 와전류식 변위센서의 경우 비자성체 및 비전도체에 대해서 적용이 곤란하며 고정밀도 광학식의 경우 장비가 고가라는 문제를 안고 있다. 그리고 무엇보다도 이런 센서들을 이용하는 방법은 추가로 이들 센서와 공구 사이의 위치관계를 사전에 계측해야 하는 번거로운 작업이 요구되므로 이 역시 바람직스럽다고는 할 수 없다.

이에 본 연구에서는 정전용량을 이용한 측정기법을 도입하고자 한다.<sup>5,6</sup> 다만 일반적인 정전용량형 측정방법이 별도의 센서를 필요로 함에 반해 본 연구에서는 가공용 공구와 시편 자체가 정전용량 센서의 역할을 수행하게 된다는 점에서 차이가 있다.<sup>7</sup> 즉, 수 마이크로미터 수준의 초정밀가공을 위해 가공 시편을 테이블에 고정할 때 전체 가공 시스템에 큰 변화를 주지 않고 공구와 시편간의 임피던스(impedance)를 측정함으로써 시편의 수평상태 및 공구의 초기 기준위치를 간단하게 확인할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

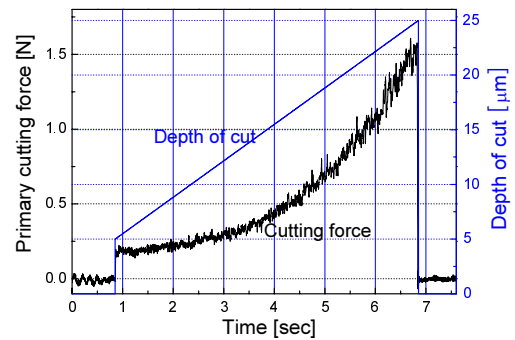


Fig. 1 Variation of depth of cut and cutting force due to workpiece inclination in micro V-grooving (workpiece: Brass, cutting tool: single crystal diamond tool)

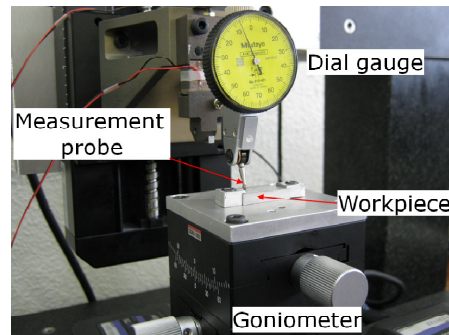


Fig. 2 Adjustment of workpiece horizontality using dial gauge

## 2. 실험장치 구성 및 모델링

절삭공구와 가공 시편 사이의 임피던스를 측정하기 위해, 공구 및 시편과 접촉되어 있는 테이블에 전선을 연결하였고(Fig. 3) 전선은 임피던스 측정기

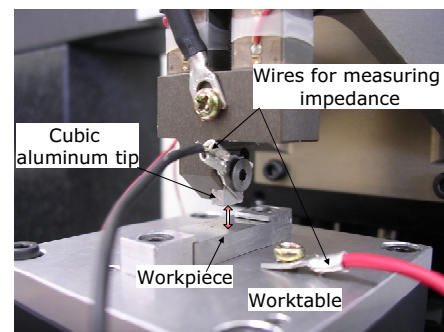


Fig. 3 Experimental setup for measuring impedance between tool tip and workpiece

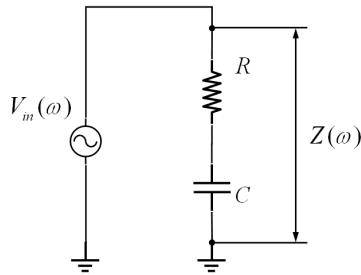


Fig. 4 Simplified electric circuit modeling for measuring impedance between tool tip and workpiece

(Agilent 4294A, BW: 40Hz~110MHz)로 연결되도록 하였다.

공구와 가공시편을 포함하는 전체 시스템을 전기적인 관점에서 해석하면 유도(inductance) 성분은 무시할 수 있으므로 Fig. 4 와 같이 R 과 C 만으로 모델링할 수 있다. 배선과정에서 발생하는 각종 기생(parasitic) 성분들의 영향은 상대적으로 작기 때문에 무시하였다. 따라서 공구와 시편을 포함하는 전체 시스템의 임피던스(Z(omega))를 구하면 Eq. (1) 과 같이 표현된다.<sup>8</sup>

$$Z(\omega) = R + jX_C = R + j \frac{1}{\omega C} \quad (1)$$

여기서 R 성분은 시편, 공구 그리고 전원공급을 위해서 사용된 전선 등의 전기저항 성분을 나타내는 고정값이며, C 는 주로 시편과 공구 사이에 존재하는 공극(air gap)에 의한 용량(capacitance) 성분이다.

2 개의 평행한 도체 판의 경우에 용량 성분 C 는 Eq. (2) 와 같이 도체 판 사이에 존재하는 물질의 상대유전율(relative permittivity) k 과 도체판 사이의 거리 d 및 도체판 면적 A 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{Ak\epsilon_0}{d} \quad (2)$$

여기서  $\epsilon_0$  는 진공상태에서의 유전율( $8.85 \times 10^{-12} \text{ coul}^2 / \text{Nm}^2$ )을 나타낸다. 본 연구에서 d 는 시편과 공구 사이의 거리에 해당하며 A 는 공구날 끝의 유효(effective) 표면적에 해당한다. 결국 전체 시스템의 임피던스는 Eq. (3)과 같이 표현된다.

$$Z(\omega) = R + j \frac{d}{\omega Ak\epsilon_0} \quad (3)$$

이 식은 비록 공구의 팁이 매우 작고 ( $A \ll 1$ ) 상대유전율이 작다고( $k \approx 1$ )해도 임피던스를 계측하는 주파수가 충분히 높게( $\omega \gg 1$ ) 확보된다면 시편과 공구 팁 사이의 거리가 작은 범위( $d \ll 1$ ) 내에서는 임피던스 Z(omega) 를 측정함으로써 시편과 공구 사이의 거리 d 를 예측할 수 있다는 것을 보여준다.

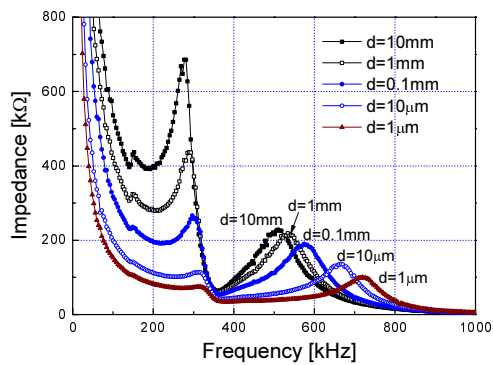
### 3. 실험 결과

알루미늄 가공시편과 공구 사이의 거리가 가까워짐에 따라 그리고 입력되는 정현파(sinusoidal) 전압의 주파수가 1 MHz 까지 증가함에 따라 임피던스 크기가 어떻게 변화하는지 관찰하였다. 우선, 각 변수간의 전체적인 상관관계를 확실히 파악하기 위하여 상용 절삭공구 인서트 팁(insert tip) 대신에 Fig. 3 에 나타나 있는 바와 같이 전도성이 큰 알루미늄 재료로 인서트 팁과 비슷한 크기( $6 \times 9 \times 2.8 \text{ mm}^3$ )의 직육면체 블록을 제작하여 실험을 수행하였으며, Fig. 5(a)에 그 결과가 나타나 있다. 커패시턴스의 고유한 성질에 따라 입력 정현파 전원의 주파수가 증가할수록 시편과 공구 사이의 임피던스는 감소하였고, 같은 주파수를 입력하였더라도 공구 팁과 시편 사이의 거리가 감소할수록 임피던스는 더욱 감소하고 있음을 보여주고 있다. 그러나 280kHz 와 530kHz 근처에서 임피던스의 피크치를 발견할 수 있는데 이는 모델링할 때 무시한 기생 유도성분과 용량성분이 병렬공진을 일으켜서 발생하는 것으로 판단된다. 이에 대해서는 향후 이 기생성분의 영향을 포함하는 보다 정확한 모델링 작업이 필요하며 현재 관련 연구가 진행 중에 있다.

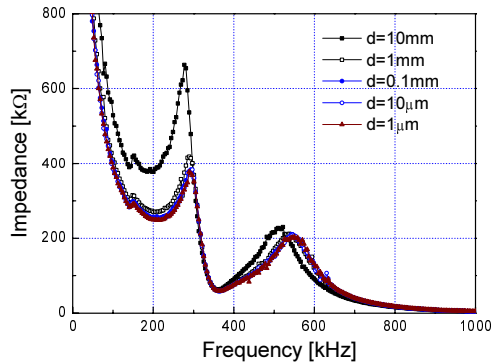
Fig. 5(b)는 Fig. 6 과 같은 노우즈 반경이 0.1mm 인 상용 CBN 인서트 팁을 장착하여 공구와 알루미늄 시편과의 임피던스를 측정한 결과이다. 공구 팁과 시편 사이의 거리가 1mm 이상 떨어져 있을 경우에는 직육면체 알루미늄 팁을 적용한 결과와 거의 일치한 결과를 보여주고 있으며, 이는 이 정도의 거리에서는 공구의 형상 및 재료의 변화가 측정 임피던스 값에 전혀 영향을 주지 않는다는 것을 말해준다. 또한 공구 팁과 시편 사이의 거리

가 1mm 이하로 더욱 접근하였을 경우 임피던스가 감소하지만 직육면체 알루미늄 블록을 사용했을 경우에 비하여 민감도(sensitivity)에 해당하는 임피던스 감소율이 현저히 떨어지고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 7(a)는 알루미늄 팁과 시편 사이의 거리가 10mm 일 때 측정된 임피던스 값을 기준으로 하여 거리가 가까워짐에 따라 임피던스가 감소하는 비율을 보여주고 있다. 100, 280, 500kHz 의 입력주파수 영역에서 공구 팁과 시편 사이의 거리가 가까워짐에 따라 모든 주파수 영역에서 전체적으로 임피던스가 감소하고 있는데, 거리가 가까워질수록 감소비율이 더욱 증가하고 있는 것을 보여준다. 이러한 경향성은 Eq. (3)의 유효성을 간접적으로 보여주는 증거다. Fig. 7(b)는 상용 CBN 인서트 팁을 장착한 경우로 V 형 공구를 사용하였을 때에는 직육면체 형의 알루미늄 팁을 사용하였을 때보다 유효표면적  $A$  가 크게 작아졌기 때문에 임피던스 변화율이 현저히 감소하였다.



(a) Using cubic aluminum tip



(b) Using CBN insert tip

Fig. 5 Impedance vs. frequency

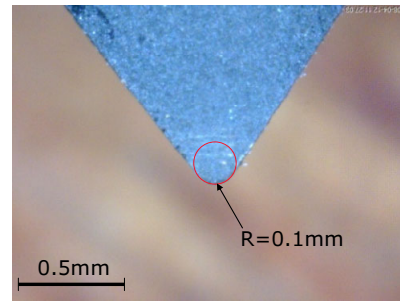
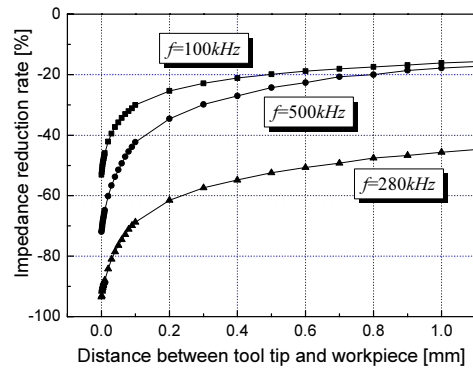
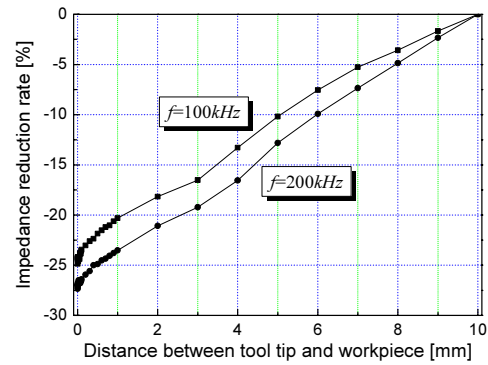


Fig. 6 Photograph of CBN insert tip



(a) Using cubic aluminum tip



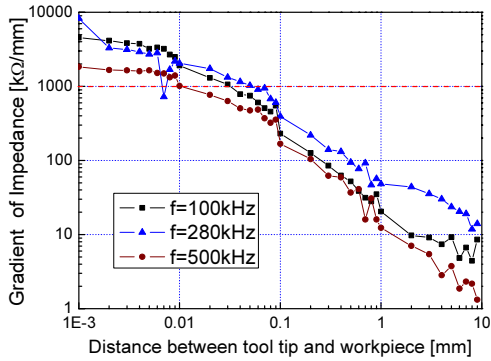
(b) Using CBN insert tip

Fig. 7 Impedance reduction rate according to the distance between tool tip and aluminum workpiece (reference distance=10mm)

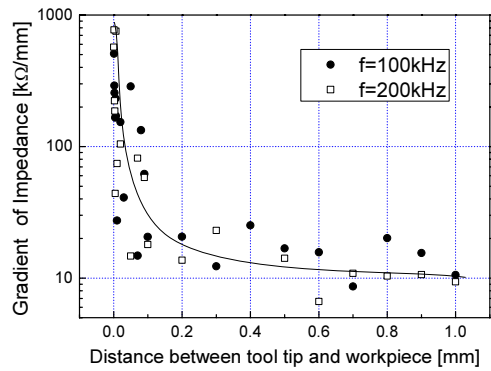
공구와 가공시편 사이에 측정된 임피던스의 변화를 통해서 공구와 시편 사이의 거리를 보다 정확하게 예측하고자 Eq. (4) 와 같이 표현되는 공구와 시편 사이의 거리 변화에 따른 임피던스 변화율을 정의하였다.

$$Z_G[k\Omega/mm] = \frac{\Delta Z}{\Delta d} = \frac{Z_2 - Z_1}{d_2 - d_1} \quad (4)$$

여기서  $Z_G$  는 임피던스 변화율(gradient of impedance),  $Z$  는 측정된 임피던스 [ $k\Omega$ ], 그리고  $d$  는 공구와 시편간 거리 [ $mm$ ]를 나타낸다.



(a) Using cubic aluminum tip



(b) Using CBN insert tip

Fig. 8 Variation of gradient of impedance according to the distance between tool tip and aluminum workpiece

Fig. 8(a)는 알루미늄 시편과 직육면체 알루미늄 팁 사이의 거리 변화에 대한 임피던스 변화율을 로그-로그 스케일로 나타낸 것이며, Fig. 8(b)는 상용 CBN 인서트 팁을 적용한 경우인데 임피던스 변화율을 보다 명확하게 보여주기 위해  $x$  축(거리)을  $1mm$  이내 범위에서 일반 스케일로 나타내었다.

직육면체 알루미늄 팁을 사용하였을 경우, 공구와 시편 사이의 거리가 감소함에 따라 임피던스 변화율이 지속적으로 증가하고 있으며 입력주파수가 100, 280, 500kHz 일 때 각각 공구가 30, 50, 10

$\mu m$  거리 이내로 시편에 접근하면 변화율  $Z_G$  크기가 처음으로  $1,000[k\Omega/mm]$  가 넘는 것으로 나타났다. 상용 CBN 인서트 팁을 사용한 경우, 공구와 시편 사이의 거리에 따른 임피던스의 전체적인 변화 추세는 직육면체 알루미늄 팁과 동일하게 나타났다. 그러나 상대유전율 및 공구의 유효표면적이 감소하여 측정데이터의 산포도(scatter)가 상대적으로 컸다. 이 문제를 극복 위해 이동평균(moving average) 기법을 도입하여 데이터 산포도를 최소화시키는 방법, 유도(L)성분을 추가한 RLC 공진회로를 꾸미고 공진주파수 부근에서 임피던스 변화율을 측정하여 측정민감도를 극대화하는 방법 등을 연구 중에 있다.

#### 4. 결론

초정밀 가공을 수행하기 위해서는 초기 래핑 가공되어 있는 시편에 어떠한 손상을 주지 않고 정확하게 시편을 수평으로 고정시키고 가공 시편에 대한 공구의 초기 기준위치를 정확하게 파악할 수 있어야 한다. 이를 위해 시편과 공구 사이 공극을 커패시턴스 성분과 저항성분으로 모델링하여 공극의 임피던스가 공극의 거리와 관련이 있음을 보였으며 실제로 임피던스를 측정함으로써 공구와 시편 사이의 거리를 정확하게 예측할 수 있는 방안을 제시하였다.

거리의 변화에 따른 임피던스 변화율은 공구와 시편 사이의 거리가 수십  $\mu m$  수준일 때 큰 폭으로 증가하였고, 선행 실험을 통해 특정한 기준값(threshold)을 설정한다면 공구와 시편 사이의 거리를 알 수 있고 이를 통해 시편의 수평맞춤과 초기 기준위치를 손쉽게 파악할 수 있다.

#### 후 기

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2010-0007438).

#### 참고문헌

1. Noh, M. G., Park, M. C., Ro, S. K., Kyung, J. H. and Park, J. K., "Development of an inductive position sensor using magnetic bearing," Journal of KSPE, Vol. 21, No. 4, pp. 72-78, 2004.

2. Kiangi, K. K. and Moys, M. H, "Measurement of the load behavior in a dry pilot mill using an inductive proximity probe," *Minerals Engineering*, Vol. 19, No. 13, pp. 1348-1356, 2006.
3. Sadler, D. J. and Ahn, C. H, "On-chip eddy current sensor for proximity sensing and crack detection," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 91, No. 3 pp. 340-345, 2001.
4. Coppo, M. C., Dongiovanni, C. and Negri, C., "A linear optical sensor for measuring needle displacement in common-rail diesel injectors," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 134, No. 2, pp. 366-373, 2007.
5. Zangl, H., "Capacitive sensors uncovered: measurement, detection and classification in open environments," *Procedia Engineering*, Vol. 5, pp. 393-399, 2010.
6. Albrecht, A., Park, S. S., Altintas, Y. and Pritschow, G., "High frequency bandwidth cutting force measurement in milling using capacitance displacement sensors," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, No. 9, pp. 993-1008, 2005.
7. Lee, H. C., Kim, G. D. and Jung, K. W., "Workpiece leveling and initial positioning by measurement of impedance in micro-machining," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 231-232, 2011.
8. Kim, T. O., Kim, H. Y., Kim, C. M. and Ahn, J. H., "Non-contact and in-process measurement of film coating thickness by combining two principles of eddy-current and capacitive sensing," *Annals of the CIRP*, Vol. 56, No. 1, pp. 509-512, 2007.