

# Burr의 In-process 계측에 관한 연구 (A Study on the In-process measurement of Burrs)

박동삼(인천대학교 기계공학과)

David A. Dornfeld (University of California, Berkeley)

Key words : Burr(버), Deburring(디버링), In-process measurement(인프로세스 계측), Capacitance sensor(정전용량센서), Calibration(보정)

ABSTRACTS : Accurate measurements of burr profile and burr size are very important for the automation of deburring. In this paper, a new burr measurement system using capacitance sensor is proposed. Ultra precision milling machine was used as a sensor positioning system. The possibility and limitation of employing a capacitance sensor to defect burrs are also investigated. The proposed system is proven to be relatively accurate, easy to setup and lower cost. This system will be applicable to a fully automated deburring system with minor modifications.

## 1. 서 론

버(burr)는 기계가공 도중 공작물의 소성변형에 기인하여 부품의 모서리부에 남게되는 바람직하지 못한 형상으로, 그 예방 방법도 거의 존재하지 않기 때문에 생산자동화를 가로막고 있는 큰 장애요인이 되고 있다. 특히, 모서리 부에 존재하는 미소량의 버도 부품조립시 fitting 문제야기, 치수정밀도나 표면거칠기의 악화, 디버링(deburring) 비용과 시간으로 인한 원가상승, 작업자의 안정성 문제 및 전기적 단락점이 될 수 있는 등의 많은 문제점을 일으킬 수 있다[1]. 특히, 정밀부품의 가공시 디버링이나 모서리 사상가공(edge finishing)에 소요되는 비용이 그 완성부품 가격의 30%를 차지하고 있으며 1974년 미국에서 디버링에 소요된 비용이 약 100억 달러에 이른다고[2] 추산되기도 하였다.

한편, 생산과정의 자동화를 위해서는 디버링 공정의 자동화가 반드시 이루어져야 하는데 이러한 디버링 자동화를 수행하는데 중요한 요소중의 하나가 버의 정확한 형상(profile)과 크기(size)의 계측이다. 또한, 버의 발생 억제와 효과적 제거를 위한 버 전문가 시스템의 구현이나 비행성 기구의 해석을 위한 데이터 베이스를 구축하는데도 버의 정확한 계측은 중요한 역할을 하게 된

다.

버의 계측에 관한 지금까지의 연구를 살펴보면 기본적으로 버의 형상과 크기를 각종 게이지류나 광학현미경 또는 SEM 등으로 측정하고 있는데 특히 Gillespie[3,4]는 여러 가공공정별로 발생 버의 성질(property)과 버 계측방법에 대하여 기술하였으며 버의 계측을 주 내용으로 한 것은 아니지만 디버링 자동화를 위한 feedback 신호로서 Acoustic Emission 센서[5], 레이저 거리센서[6], 레이저 시각(Vision) 센서[7] 등을 이용하여 버를 간접계측 하였다. 그러나 이러한 방법들은 버의 크기가 작아질 경우 분해능이 떨어져 정확한 버의 계측이 불가능할 뿐만 아니라 복잡한 장치구성과 작업 조건의 엄격성, 장비의 고가 등으로 인하여 효과적인 버 계측방법으로는 불합리한 것으로 보인다.

한편, 80년대에 들어 비접촉식 거리 계측 센서로서 정전용량센서(capacitance sensor)가 큰 각광을 받고 있는데 이는 표면의 거칠기 측정에 아주 효과적으로 사용될 수 있었다[8,9]. 따라서, 본 연구에서는 지금까지 어느 연구에서도 시도되지 않았던 방법으로 버의 in-process 계측을 위하여 정전용량센서를 사용하여 그 가능성과 문제점 및 적용 한계 등을 고찰하고자 하였다.

## 2. 정전용량센서의 특성

정전용량센서의 기본 원리는 두 전도체 즉, 센서부의 전극(electrode)과 피측정체사이의 간극변화에 따라 변하는 정전용량(capacitance)을 측정함으로써 비접촉식으로 피측정체의 표면 형상을 계측하는 것이다. 이와 같은 비접촉식 형상계측 방법은 형상 검사나 품질관리 측면에서 많은 장점을 지니고 있기 때문에 1960년대 이후 특히 1980년대에 들어 여러 산업분야에서 이 센서는 큰 각광을 받고 있다. 또한, 비접촉식 방법이라는 특징외에도 100kHz 이상의 높은 응답속도를 지니고 있다는 점, 높은 분해능, 도전체이기만 하면 피측정체의 재질이 변하더라도 센서의 보정(Calibration)을 할 필요가 없다는 점 등의 독특한 장점을 지니고 있다. 센서의 전극 형태는 기본적인 것으로 평면을 이용하는 것, Albrecht[10]가 설계한 얇은 금속판을 이용하는 것, 그리고 구(sphere) 형태를 이용하는 것 등의 3가지로 분류된다. 본 연구에서는 그 중에서도 Extrude Hone사가 개발한 전극이 구 형태인 Midas probe를 사용하였으며 그 형태를 Fig.1에, 그 주요 사양은 Table 1에 나타내었다.

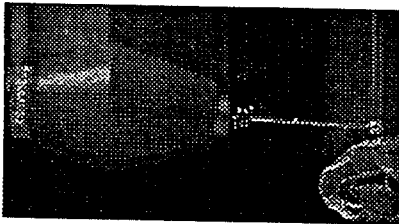


Fig.1 Midas capacitance sensor

Table 1. The specification of Midas probe

Probing Force	0 Grams
Sensor Size	3mm(Diameter)
Frequency Range	0.1-25kHz
Repeatability	4 μ in minimum
Range	0.1 in maximum
Mounting	M 8×1.25 thread

Fig.2와 같이 전극이 구이고 피측정물이 평면인 상태에서의 정전용량은 다음 식으로 표현된다.

$$C = 4\pi\epsilon r \left[ 1 + \frac{r}{2(r+h)} + \dots \right]$$

여기서, C : Capacitance

r : 구의 반경

h : 구의 하단으로부터 피측정물 사이의 간극

$\epsilon$  : dielectric constant

또한 민감도(sensitivity)는 정전용량 C를 h로 미분하면 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial C}{\partial h} = -\frac{2\pi\epsilon r^2}{(r+h)^2}$$

이 식에서 센서의 민감도는 h가 작으면 작을수록 커진다는 것을 알 수 있는데, 따라서 실제 버의 측정시에 probe를 가능한 한 피측정체에 근접하도록 해야 된다는 것을 알 수 있다.

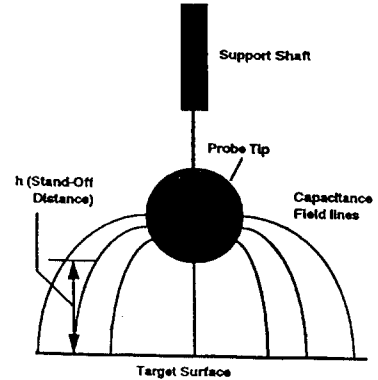


Fig.2 Midas probe tip and the capacitance field

## 3. 실험 장치

센서보정과 버 계측을 위한 실험장치 구성을 Fig.3에 나타내었다. 여기서 위치결정 기구장치는 초정밀 평면 가공용 밀링머신(독일, Kugler machine)을 사용하였으며 이는 0.1μm까지의 위치 결정이 가능한 구조로 되어 있다. 버의 계측을 위한 시편으로는 사각형상의 탄소강(ANSI 1045)을 정면 밀링가공을 통하여 한 모서리에 버를 발생시켜 사용하였다.

실험시편은 Kugler machine의 테이블에, 센서는 스피들 축에 각각 고정시켰으며 테이블의 이송에 의하여 센서의 보정신호 및 버 높이 신호가 출력되도록 하였다. 이 출력신호는 증폭 및 필터링을 거쳐 IBM PC에 장착된 Data acquisition system에 의하여 데이터 파일로 저장된다. 이때 증폭기의 이득(gain)은 100, Low pass filter는 100Hz로 설정하였으며 센서신호의 샘플링 주파수는 100Hz였다. Table 2에는 주요 장치의 사양을 간단히 나타내었다.

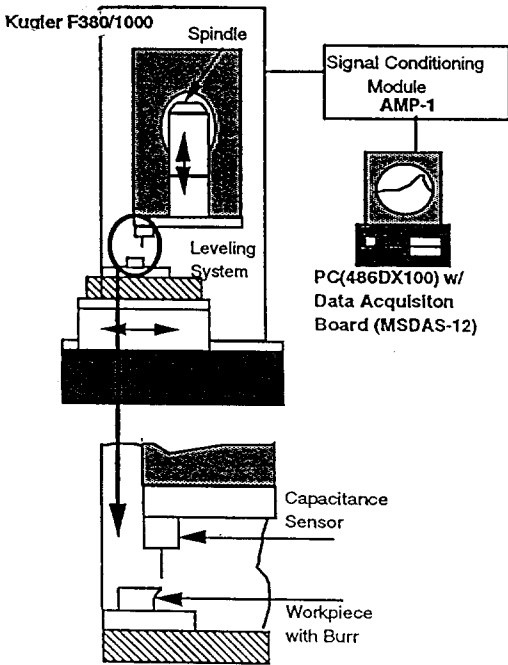


Fig.3 The experimental setup

Table 2 Experimental equipment

Kugler F380/1000	Travel speed: Transverse : 28-800mm/min Vertical : 0-430mm/min Vertical Resolutin : 0.1 $\mu$ m
AMP -1 (Amplifier/Filter)	Gain : upto 1000, Low pass filter : 0.1-25kHz
Analogic MSDAS-12	12bit, 16channel, Max.Sampling Freq. : 200kHz

#### 4. 센서의 보정

정전용량센서의 사용시 물체 진동이나 표면 형상의 계측시 가장 중요한 요소중의 하나가 센서의 정확한 보정이다. 정전용량은 기본적으로 센서부와 피측정체 사이의 거리와 상호 작용 면적에 따라 크게 변화하므로 센서를 특정한 것으로 선정하더라도 피측정체의 형상에 따라 반드시 보정을 해야만 한다.

본 연구에서는 측정대상이 균일한 평면이 아닌 불규칙적인 버가 되므로 어느정도 타당성을 지닌 보정 데이

터를 얻기 위해서는 버가 존재하는 부분과 버가 없는 표면부분을 동시에 고려하여 Fig.4와 같은 방법으로 보정을 하였다.

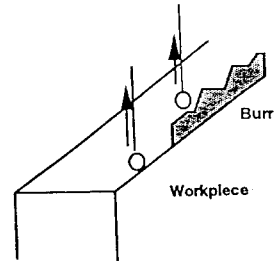


Fig.4 Sensor calibration

여기서, 센서의 이송 즉, 센서와 피측정체의 간극변화를 주는 방법은 이송을 중분적으로 주는 방법과 연속적으로 주는 방법을 고려하였으며 실제 보정결과 두 방법에 의한 출력차이가 상당히 존재하였다. 본 연구에서는 in-process로 버를 연속적으로 측정하는 것이 목적이기 때문에 이송을 연속적으로 하였으며 센서 이송속도를 1.3mm/sec로 설정하고 보정을 한 결과 Fig.5와 같은 결과를 얻었다. 여기서는 두 보정치의 비교를 위하여 200 $\mu$ m까지 결과만을 나타내었다.

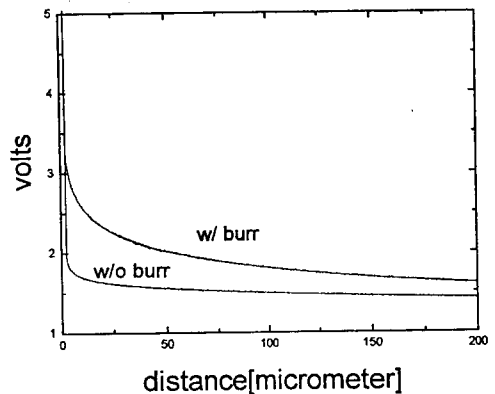


Fig.5 Calibration results

이 결과에서 알 수 있듯이 버가 있는 부분과 버가 없는 부분의 센서 보정치는 상당한 차이가 나타나고 있다. 또한 센서의 민감도는 센서팁과 피측정체사이의 간극이 작을 때 아주 높아진다는 것을 보여주고 있어 실제 버의 측정시 가능한 한 센서를 버에 가깝게 해야 된다는 것을 알 수 있다.

## 5. 버의 계측 결과 및 분석

버 형상과(profile)과 버의 높이(height)를 가능한 한 정확하게 계측하기 위하여 Fig.6과 같이 센서의 이송을 버에 평행한 방향과 버에 수직인 방향으로 주고 평행한 방향중에서도 센서를 버의 끝단(tip),버의 뿌리(base)부 및 버의 중간(middle) 위치에서 고정시키고 이송을 주면서 각 출력값을 측정하였다. 이때 이송속도는 보정시의 이송속도와 동일하게 하였다.

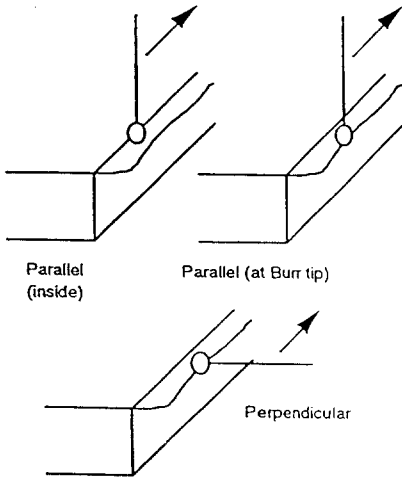
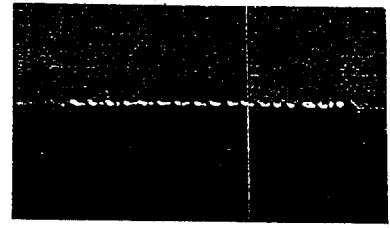


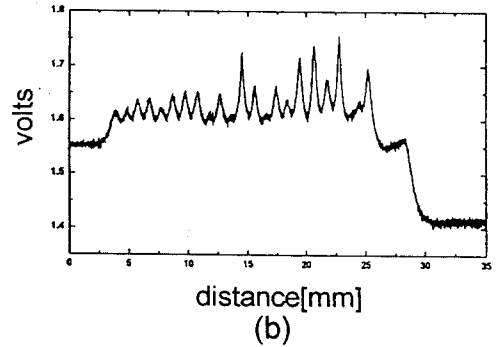
Fig.6 Orientation of sensor probe

Fig.7 (a)는 탄소강 시편의 실제형상을 나타낸 것으로 크게 3부분으로 이루어져 있다. 즉 버가 없는 원래 모서리 부분, 버가 발생한 부분 및 디버링을 위한 챔퍼링 부분로 평균 버 높이는 원래 모서리로부터 0.4mm, 디버링된 부분에서 0.8mm였다. Fig.7 (b)는 수직방향으로의 버 측정결과를, (c)는 버의 끝단 및 뿌리 부분에서의 측정결과를 나타낸 것이다.

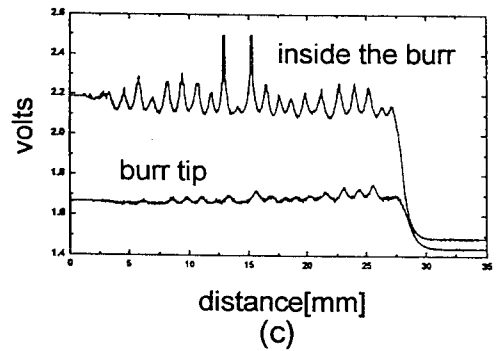
그림(b)에서 센서 출력값을 보면 원래 모서리 부분에서 1.55V, 디버링된 부분에서 1.4V인데 이는 버가 없는 경우의 보정 그래프로부터 약 0.4mm와 0.8mm에 상당하는 값이 된다는 것을 알 수 있다. 또한, 버가 발생한 부분에서는 약 1.58~1.75V로 나타났는데 이의 버가 있는 부분에서의 보정치로부터 7~44 $\mu$ m에 해당하는 높이이다. 또한 실제 버의 피크수와 시편의 버수는 정확하게 일치하였다. 또한 그림(c)의 버 뿌리부에서의 측정결과를 보면, 그림(b)에서는 왼편부터 10번째 신호가 피크를 이루고 있으나 여기서는 9번째와 10번째에서 피크를 보여주고 있다. 즉 버가 이 부분에서 높이도 크게 나타날



(a)



(b)



(c)

Fig.7 Burr profile and size measurements

뿐만 아니라 수평면에 대해서도 위로 약간 볼록하게 버가 형성되어 있다는 것을 의미하는데 이는 실제 시편 형상과 잘 일치하였다. 버의 끝단에서의 측정치를 보면 우선 센서와의 상대적 작용면적이 작아 신호가 전반적으로 낮게 나타나고 있으나 (b)의 결과와 비슷한 경향을 보여주고 있다. 즉 끝부분에서 전하용량 변화는 결국 버의 높이와 비슷한 경향을 지녀야 하므로 이는 당연한 결과인 것으로 판단된다. 이상의 실험 결과로부터 정전용량센서를 이용하면 버의 3차원 형상을 간접적으로나마 잘 계측할 수 있다는 것을 보여주고 있으며 버에 대해 수직 방향으로의 계측만으로도 어느 정도 버의 높이를 추정할 수 있으리라 판단된다. 그러나 실제로 버의

정확한 높이를 보정 결과를 이용한다 하더라도 정확하게 예측한다는 것은 불가능하다. 왜냐하면 버의 형상이 서로 각각 다르기 때문에 보정결과를 그대로 적용하기란 무리이기 때문이다. 그러나 버의 최대 높이를 예측하고 그 전체윤곽을 파악하는데는 아주 유용하다고 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 정전용량센서와 초정밀 위치 결정 장치를 사용하여 버의 형상과 높이를 in-process로 예측하고자 하였으며 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 센서 보정시 센서를 충분히 이송하는 방법과 연속적으로 이송하는 방법에 따라 보정 결과가 다르게 나타나고 있었는데 버의 in-process 예측을 위해서는 연속이송방법을 사용하여야 한다.

2) 버 예측시에는 버가 존재하는 부분과 버가 없는 부분에서의 보정결과를 따로따로 이용하여야 한다.

3) 버를 수직방향으로 예측한 결과와 수평방향에서의 버 끝단 예측 결과는 비슷한 경향을 보여 주었으며 이 두방법은 버의 높이와 형상 예측에 사용될 수 있다.

4) 정전용량 센서를 사용하면 버의 최대높이와 대체적인 형상을 예측할 수 있으나 각각의 버 끝단의 높이를 정확히 예측하는 것은 매우 어려워 보이므로 새로운 센서의 도입이 필요하다.

## REFERENCES

[1] D.A.Dornfeld, T. Masaki, "Acoustic Emission Feedback for Deburring Automation", Modeling and Control of Robot Manipulators and Manufacturing Process, ASME, DSA-Vol.6, 1987, pp. 81-89

[2] L.K.Gillespie, "Deburring Precision Miniature Parts", Precision Engineering, Vol.1, No.4, 1979. pp.189-198

[3] L.K.Gillespie, "Measurement of Burrs", SME Technical paper, MR 74-993, 1974

[4] L.K.Gillespie, "Effects of Measurement Technique and Experimental Design in the Analysis of Burrs", SME Technical paper, MR 95-985, 1975

[5] D.A.Dornfeld, V.Lisiewicz, "Acoustic Emission Feedback for Precision Deburring", Annals of the CIRP, Vol.41, Jan. 1992, pp. 93-96

[6] K.F.Shimokura, S.Liu, "Programming Deburring Robots Based on Human Demonstration with Direct Burr Size Measurement", IEEE, 1994, pp. 572-577

[7] G.Seliger, L.hsieh, "Sensor-Aided programming and Movement Adaptation for Robot-Guided Deburring of Castings", Annals of the CIRP, Vol.40, 1991, pp. 487-290

[8] J.L.Garbini et al., "Surface Profilometry Based on Fringing Capacitance Measurement", ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol.107, 1985, pp. 192-199

[9] J.M.Greenslet, I.E.Minis, "Design of a Real-Time Surface Roughness Measurement System for Turning", Proc. of Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, Kobe, Japan, 1994, pp. 1483-1490

[10] L.J.Albrecht, "Development of a Fringing Capacitive Profilometer for surface Roughness Measurements", M.S. Thesis, University of Washington, 1983