

영상처리를 이용한 초정밀가공용 다이아몬드 공구의 마멸 측정 (Wear Measurement of Single Crystal Diamond Tool Using Image Processing)

양 민 양(한국과학기술원 기계공학과), 권 오 달*(한국과학기술원 기계공학과)
Min Yang Yang (KAIST), Oh Dal Kwon (KAIST)

Key words : SDT (single diamond tool), 영상처리(image processing), 공구마멸(tool wear)

ABSTRACT : In this paper, a new method to measure the wear of the single crystal diamond(SCD) tool using image processing is presented. To increase resolution, high magnifying lens is used and to enlarge the measurement field of view, a image region matching method is applied. The shape of SCD tool is modeled by mathematical analysis. Cutting edge chipping and wear are calculated by the model. This method is proved to be efficient in detecting a few micron of wear and cutting edge loss by chipping along the whole cutting edge.

1. 서론

최근 정밀 측정기기, 전기, 전자, 반도체, 광학 관련기기 및 제어기기 등의 분야에서 초정밀가공의 필요성이 증가하고 있다. 초정밀가공 방법은 여러가지가 있으며, 근자에는 형상정도와 가공면거칠기를 동시에 만족시키기 위해, 고정도 고정성의 공작기계와 마멸이 거의 생기지 않는 절삭공구를 이용한 초정밀 절삭가공 기술이 급속히 발전하고 있다. 여기에 대표적인 절삭공구로서 단결정 천연다이아몬드 공구가 많이 사용되고 있다. 그러나 절삭 시 재료에 따라 공구의 마멸이 문제가 되어 적용이 제한되고 있으며, 동 및 동합금, 알루미늄 및 알루미늄 합금, 무전해 니켈도금 등의 비철금속과 플라스틱, 유리, 세라믹 등의 비금속 재료에 주로 사용되고 있다.

다이아몬드 공구의 파손은 크게 절삭날의 칩핑(chipping)과 마멸에 의해 발생하고 있다. 칩핑은 국부적으로 공구의 강도를 초과하는 응력이 발생함으로 생시되며, 마멸은 산화, 흑연화, 또는 확산 등에 의한 열적 마멸이 주 원인으로 알려져 있다. 현재 공구수명에 대한 확립된 기준은 없으며 공작물의 표면품질 정도에 따라 수명을 판단하고 있는 실정이다.^{1,2}

다이아몬드 공구의 절삭날은 매우 예리하여 끝단반지름이 수십nm이하로 추정되고 있다. 끝단의 예리함에 따라 공작물의 표면거칠기가 많은 영향을 받게 되므로 이를 SEM(Scanning Electron Microscope)이나 AFM(Atomic Force Microscope) 등으로 날 끝 형상을 측정한 연구가 있다.^{3,4} 그러나 칩핑이나 마멸에 의한 절삭날 손실량을 정

량적으로 측정하는 방법은 없었으며, 공구가 고가이며 공구수명이 일정하지 않다는 것을 고려할 때 공구교환시기, 가공정밀도, 갑작스러운 이상상태 감지 등을 하기 위해서는 공구마멸의 진행을 감시할 수 있는 정량적 측정장치가 필요하다.

본 연구에서는 다이아몬드 공구를 고배율 현미경으로 확대하여 여러 프레임의 부분 영상을 얻고 이를 영상처리 기법을 이용하여 조합함으로써 확대된 전체 영상을 얻으며, 수학적 모델링을 통하여 절삭날의 손실된 양을 정량적으로 측정하고자 한다.

2. 영역맞춤기법 (Region matching method)

다이아몬드 공구의 마멸량을 측정하기 위해서는 마멸된 양이 매우 작아 육안으로 분별하기 어려우며 확대를 하여도 높은 배율로 해야 하기 때문에 시야(field of view)가 작아져서 공구의 일부분만을 보게 되고 전체 형상을 볼 수 없는 문제가 있다. 따라서 정밀한 공구의 전체를 측정하려면 부분영상을 연결하기 위하여 서브 마이크론으로 구동할 수 있는 2축 테이블이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 영역맞춤기법을 도입하였다. Fig.1에서 보는 것처럼 다이아몬드 공구의 절삭날을 확대한 여러장의 부분영상으로 얻어서 이를 영상처리로 조합함으로써 전체 형상을 비교적 간단한 장치로 용이하게 측정할 수 있다.

영역맞춤기법은 본래 움직이는 영상을 예측하는 데 이용하는 방법으로 임의의 영상에 작은 영역을 고려하여 인접한 영상의 가능한 영역을 탐색함으로써 가장 잘 맞는 영

역을 찾고 그때의 거리의 차를 구하는 방법이다. 영역맞춤 기법에서 거리 차의 벡터 (d_x, d_y) 는 다음 식을 최소화함으로써 구할 수 있다. [5]

$$Error = \iint_{(x,y) \in R} C[f(x,y,t_0), f(x-d_x, y-d_y, t_1)] dx dy \quad (1)$$

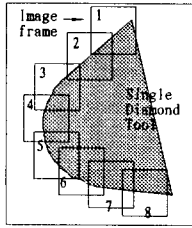


Fig.1 The part images of SDT

여기서 $C[\cdot, \cdot]$ 는 두 영상간의 불일치하는 정도를 나타내는 척도를 의미한다. 함수 $C[\cdot, \cdot]$ 를 선택하는 방법은 여러가지가 있을 수 있지만 보통 두 인자간의 절대값 차나 제곱 차를 많이 쓰고 있다. 두 인자 간의 절대값 차는

$$C[\cdot, \cdot] = |f(x,y,t_0) - f(x-d_x, y-d_y, t_1)| \quad (2)$$

으로 표현되고 영상을 이진(binary) 값으로 나타낼 경우 농도값(intensity)은 1 또는 0 이므로 두 인자의 차이를 농도값이 1 인 화소(pixel)의 거리 차로 생각할 수 있다. t_0 시간의 영상에 대하여 각 점을 벡터 행렬 \mathbf{A} 라 하고 $\mathbf{A}_{nm} = x_n i + y_m j$ 이며 t_1 시간의 영상에 대해 벡터 행렬 \mathbf{B} 라 하면 $C[\cdot, \cdot] = \|\mathbf{A} - \mathbf{B}\|$ 와 같다. 여기에서 거리 차에 대한 평균값을 빼고 적분기호를 시그마로 표현하면 오차함수는 거리 차에 대한 표준편차와 같은 식이 된다.

영상의 윤곽에 공구의 절삭날에 대한 모든 정보가 있다는 것을 고려하면 영상처리를 통하여 각 영상들의 윤곽을 찾고 이 윤곽들을 이용하여 보다 간단히 계산을 수행할 수 있다.

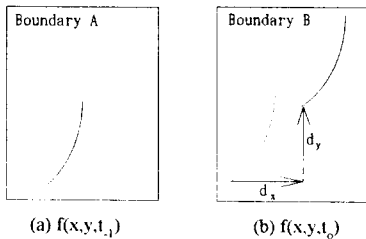


Fig.2 Image translated with displacement of (d_x, d_y) . (a) $f(x,y,t_1)$ and (b) $f(x,y,t_0)$

Fig.2에서 보여 주는 것처럼 t_1 에서의 영상이 t_0 일 때 (d_x, d_y) 만큼 이동되어졌으며 이를 구하기 위해 윤곽 A의 각 점들은 일차원 행렬 $\mathbf{A} = [\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2 \dots \mathbf{A}_m]$ 로 윤곽 B는 행렬 $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2 \dots \mathbf{B}_n]$ 로 하면 두 윤곽 간의 거리의 표준편차는

$$s_i = \alpha \sum_{j=1}^N (\|\mathbf{A}_{i,j} - \mathbf{B}_j\| - \mu_i) \quad (3)$$

여기서 α 는 상수, μ_i 는 거리 차의 평균값이다.

식 (3)에서 표준편차 행렬 $S = [s_1, s_2, \dots, s_N]$ 를 구하고 이중 최소가 되는 값을 일차원 최적 추적 알고리즘을 이용하여 구하면 그때의 거리 (d_x, d_y) 가 원하는 값이 된다.

일차원 최적 추적 알고리즘은 Fibonacci 방법을 이용하여 구현할 수 있고 알고리즘은 다음과 같다. [6]

Fibonacci search method

begin

Initialize

while surpass min. point

$$\text{do } \alpha_p = \sum_{j=0}^p \delta(1.618)^j, \quad p = 0, 1, 2, \dots$$

end while

determine $\alpha_0 = \alpha_p, \alpha_1 = \alpha_{p-2}, l = \alpha_0 - \alpha_1, \alpha_a = \alpha_{p-1},$

$$\alpha_b = \alpha_1 + 0.618l$$

while $l < \epsilon$

if $f(\alpha_a) < f(\alpha_b)$ then

min. point exist between α_1 and α_b

$$\text{update } \alpha'_a = \alpha_b, \alpha'_1 = \alpha_1, l = \alpha'_a - \alpha'_1,$$

$$\alpha'_b = \alpha_a, \alpha'_a = \alpha'_1 + 0.382l$$

end if

else if $f(\alpha_a) > f(\alpha_b)$ then

min. point exist between α_a and α_0

$$\text{update } \alpha'_1 = \alpha_0, \alpha'_a = \alpha_a, l = \alpha'_1 - \alpha'_a,$$

$$\alpha'_a = \alpha_b, \alpha'_b = \alpha'_1 + 0.618l$$

end else if

end while

$$\text{min. point} = (\alpha'_a + \alpha'_1) / 2$$

stop

3. 다이아몬드 공구의 수학적모델 및 마멸 계산

공구를 수학적으로 모델링하는 방법으로 공구가 마멸되어도 절삭날의 양 끝부분은 절삭에 참여하지 않아 마멸 전의 상태와 같으므로 이 부분의 절삭날을 이용하여 마멸되기 전의 절삭날을 창생할 수 있으며, 주, 부 절삭날을 직선

으로 노우즈를 거기에 접하는 원호로 표현할 수 있다. [7]

다이아몬드 공구의 칩핑 또는 마멸된 양을 측정하는 것은 먼저 영상처리를 통하여 공구의 윤곽을 찾고 원래 마멸전의 공구를 창생한 후 두 윤곽의 차이를 계산함으로써 가능하다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 임의의 마멸된 점에서 창생된 원래 공구 모델에 수선을 내려 접하는 점 1, 2, 3, 4를 얻고 이 점들 중에 영역 A, B, C에 해당하는 점 하나를 구하여 그 점까지의 수직거리를 계산하면 바로 마멸된 거리가 된다.

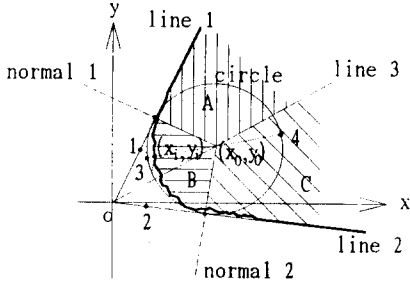


Fig. 3 Mathematical model of cutting edge

직선 1과 직선 2는 부 절삭날과 주 절삭날에 대하여 최소자승법을 통하여 기울기 m_1, m_2 와 절편 b_1, b_2 를 구하여 얻을 수 있다. 이때 최소자승법의 오차를 최소로 하기 위해 직선과 수직인 방향의 오차를 계산하여 기준값을 넘으면 그 점을 제외하고 다시 최소자승법을 수행함으로써 점 밀도를 향상시켰다. 직선 3은 두 직선이 이루는 각을 이등분하는 즉 원의 중심을 지나는 직선이다.

임의의 점 (x_i, y_i) 에서 직선에 수직인 길이를 구하는 것은 Fig. 4 (a)와 같다. 직선 1, 2방정식 $y = m_{1,2}x + b_{1,2}$ 이고 지나는 법선 1, 2의 방정식은 $y - y_i = -(x - x_i)/m_{1,2}$ 이며 두 직선의 교점으로부터 $(x_t, y_t)_{1,2}$ 를 구할 수 있다. 한 점에서 직선까지의 수직거리는 다음과 같다.

$$h = \frac{|y_i - mx_i - b|}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad (4)$$

또한 임의의 점 x_i, y_i 에서 원에 수직인 길이를 구하는 것은 Fig. 4 (b)와 같다. 원의 내부에 임의의 한 점에서 원에 수직하게 접하는 점을 지나는 법선은 원의 중심을 지나게 되므로 다음과 같은 법선의 방정식을 얻을 수 있다. $y = mx - mx_i + y_i$, 여기서 $m = (y_0 - y_i)/(x_0 - x_i)$ 이다. 접선의 방정식은 다음과 같이 되며

$$y = -\frac{1}{m}x + \frac{1}{m}x_0 + y_0 \pm \frac{r}{m}\sqrt{1+m^2}$$

두 식에서 접점 $(x_i, y_i)_{3,4}$ 를 구할 수 있다. 이때 수선의 길이 h 는 다음과 같다.

$$h = \frac{|(x_i - x_{i3,4}) + (y_i - y_{i3,4})|}{\sqrt{1+m^2}} \quad (5)$$

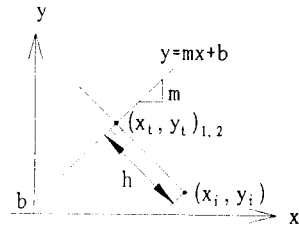
위의 방법으로 한 점에 대해 4개의 접점을 구했으며 각에 대하여 영역을 판정하면

영역 A : 법선 1 < 영역 A이고 직선 3 < 영역 A

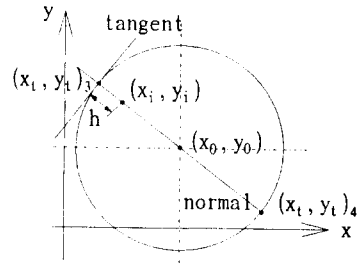
영역 B : 법선 2 < 영역 B < 법선 1

영역 C : 법선 2 > 영역 C이고 직선 3 > 영역 C

즉 점 1은 영역 A일 때 점 2는 영역 C일 때 점 3, 4는 영역 B일 때만 유효하고 그 외에서는 유효하지 않다. 따라서 영역에 맞는 점은 하나만 결정되며 그 점까지의 수직거리가 마멸된 값이 된다.



(a) a perpendicular distant between a point and the line



(b) a perpendicular distant between a point and the circle

Fig. 4 The shortest distance from an arbitrary point to (a) the line, (b) the circle

4. 실험장치

본 시스템은 광학 현미경, 조영 장치, CCD 카메라, 영상처리장치, PC 등으로 구성되어 있다. Fig. 5에 실험 장치에 관한 개략도를 보여 주고 있다.

현미경은 x10의 대안렌즈와 x40의 대물렌즈를 가지고 있다. 카메라는 512x480 화소를 가지고 있고, 수평 수직 크기는 17μm(H) x 13μm(V) 이다. 공구는 현미경의 X-Y 테이블

블 위에 놓여지고, 조명으로는 할로겐 램프를 사용하고 있으며 하단에서 빛을 비추는 것과 같은 효과를 얻기 위하여 공구의 아래에 반사 거울을 사용하였다. 조준 된 빛은 공구 상면에 수직으로 조명 되며 이 빛의 밝기는 스위치로 조절이 가능하다. 공구의 영상은 CCD 카메라를 통해 프레임 임그레버 (frame grabber)에 의해 256 밝기 등급으로 컴퓨터에 저장되며 이 영상을 컴퓨터로 분석하게 된다.

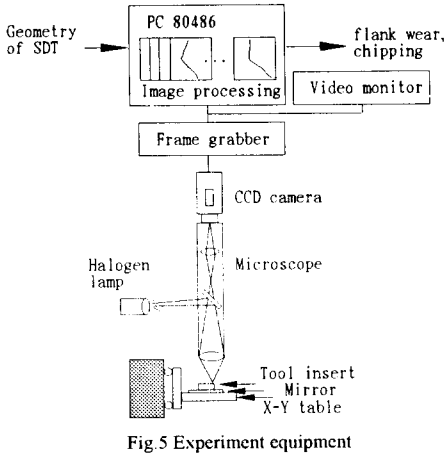


Fig.5 Experiment equipment

시스템이 갖는 분해능으로 영상 화소의 분해능은 x40 대물렌즈의 확대 계수가 28.56이고 이에 따라 화소의 분해능은 $0.59\mu\text{m}$ (H) x $0.45\mu\text{m}$ (V) 이 된다. 광학계의 분해능은 사용하는 조명 광원의 파장에 비례하고 렌즈의 집광 능력을 나타내는 NA (numerical aperture) 값에 반비례하며 다음의 식과 같다. [8]

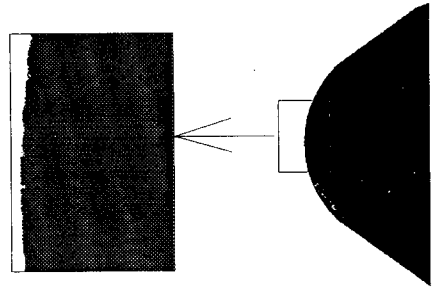
$$\text{resolution} = 0.6 \frac{\lambda}{NA} \quad (6)$$

대물렌즈 (x40) 에 대한 NA 값은 0.65이며 광원으로 할로겐 램프를 사용하였는데 백색광의 경우 평균 파장을 560nm 로 생각할 때 분해능이 $0.5\mu\text{m}$ 이다.

5. 결과 및 고찰

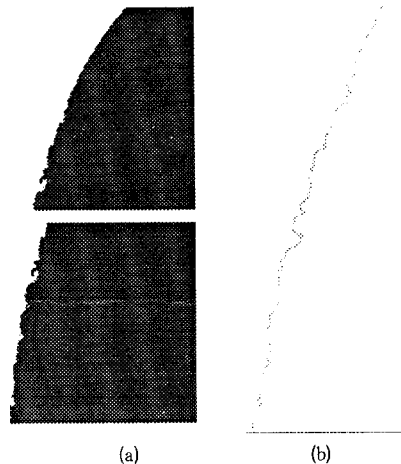
Fig. 6 (b) 에 SDT의 절삭날을 하나의 프레임으로 잡은 것을 보여 주고 있으며, (a)에는 확대된 부분영상 중의 하나를 보여 주고 있다. 확대된 영상에서 칩핑으로 인해 절삭날 인선이 떨어져 나간 것을 볼 수 있다. Fig. 7에는 두 개의 이웃하는 확대된 영상과 (a), 영역맞춤기법을 이용하여 임의의 시간에서 두 영상간의 잘 맞는 영역의 거리를 구하고 그 결과로 두 개의 윤곽을 조합하여 하나의 윤

곽으로 표현한 것을 보여 주고 있다. (b)



(a) a magnified image (b) whole image

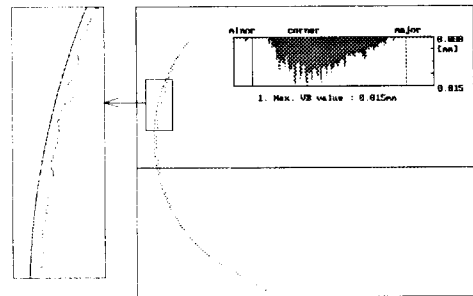
Fig.6 The image of SDT



(a) (b)

Fig.7 Image region matching

(a) magnified images of t_{-1} and t_0
(b) matching result



(a) a magnified shape (b) whole shape and loss map
Fig. 8 Rake face shape and loss map of cutting edge

Fig. 8에는 8개의 부분영상으로 조합된 전체 형상과 그 때의 마멸값을 보여 주고 있으며, 전체 형상 중의 일부분

을 확대하여 보면 (a)와 같이 칩핑으로 인해 절삭날이 손상되었음을 알 수 있다.

일반적으로 공구의 전체 영상을 한 프레임에 잡을 경우 분해능이 $3\mu\text{m}$ 정도이어서 다이아몬드 공구의 경우 마멸된 양이나 칩핑을 측정할 수 없으나 본 연구에서 개발한 방법으로 할 경우 분해능을 $0.5\mu\text{m}$ 로 낮출 수 있어 공구의 상태를 측정할 수 있다.

6. 결론

본 연구는 단결정 천연다이아몬드 공구의 플랭크 마멸 및 칩핑을 측정하기 위해 영상처리 기법 및 수학적 모델링을 이용하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

여러 프레임의 영상을 기본적 영상처리로 윤곽을 얻고 그 윤곽들의 거리의 차에 대한 표준편차로서 영역맞춤을 시행하여 그 결과 영상들을 정확하게 연결할 수 있었다. 칩핑이나 마멸로 인해 절삭날의 손실된 양을 수학적 모델링을 통하여 계산하였고 실제 형상과 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 다이아몬드 공구의 경우에 마멸 또는 칩핑 되는 양이 매우 작아서 영상처리를 통하여 공구의 전체 형상을 측정하기 어려웠으나 본 연구에서 제시한 영역맞춤기법을 이용하여 효과적으로 측정할 수 있었다.

7. 참고문헌

- (1) 김정두, '천연 다이아몬드 인선 형태에 의한 AI 합금의 경면절삭에 관한 연구', 대한기계학회, Vol. 14 No. 6 1990, pp. 1515~1522
- (2) N. Ikawa, 'Ultraprecision Metal Cutting-The Past, the Present and the Future', Annals of the CIRP, Vol. 40/2/1991, pp. 587~594
- (3) S. Asai, 'Measuring the Very Small Cutting-Edge Radius for a Diamond Tool Using a New kind of SEM Having Two Detectors', Annals of the CIRP, Vol. 39/1/1990, pp. 85~88
- (4) D. A. Lucca, Y. W. Seo, 'Effect of Tool Edge Geometry on Energy Dissipation in Ultraprecision Machining', Annals of the CIRP, Vol. 42/1/1993, pp. 83~86
- (5) Jae S. Lim, 'Two-Dimensional Signal and Image processing', Prentice-Hall, Inc. 1990, pp. 451~523
- (6) Jasbir S. Arora, 'Introduction to optimum design', McGraw-Hill, Inc., 1989
- (7) 권오달, 양민양, '컴퓨터 비전 및 패턴인식기법을 이용한 공구상태 판정시스템 개발', 대한기계학회, Vol. 17, No. 1, 1993, pp. 27~37
- (8) Max Born, Emil Wolf, 'Principles of optics', Pergamon Press, 6th Ed. 1983, pp. 370~458