

# 크레이터 마모의 체적계산 및 분석법

정진석\*, 조희근\*, 윤문철<sup>+</sup>

(논문접수일 2009. 1. 14, 심사완료일 2009. 3. 13)

## Crater Wear Volume Calculation and Analysis

Jin-Seok Jeong\*, Hee-Geun Cho\*, Moon-Chul, Yoon<sup>+</sup>

### Abstract

The worn crater wear geometry of coated tools after machining has been configured by using Confocal Laser Scanning Microscopy (CLSM) and the Wavelet-based filtering technique. The CLSM can be well suited to construct the three-dimensional crater wear on the rake surfaces of coated tips. However, The raw heightness data of HEI (height encoded image) acquired by CLSM must be filtered due to the electronic and imaging noise occurring in constructing the crater image. So the Wavelet-based filtering algorithm is necessary to denoise the shape features in a micro scales so as to realize accurate crater wear topography analysis. The crater wear patterns filtered enable us to predict the crater wear shape in order to study the tool wear evolution. The study shows that the technique by combining the CLSM and Wavelet-based filtering is an excellent one to obtain the geometries of worn tool rake surfaces over a wide range of surface resolution in a micro scale.

**Key Words** : Wavelet based filtering(웨이블렛 필터링), Confocal laser scanning microscopy (공초점 주사 레이저 현미경), Crater wear(크레이터마모), Tool wear volume(공구마모체적)

## 1. 서론

공구마모에 대한 그 동안의 연구는 주로 현미경 사진을 통한 실험적인 데이터 분석에 제한되어 있었고 컴퓨터 분석을 통한 구체적이고 실감나는 결과는 없는 실정이다. 그러나 공구마모가 진전되어가는 모양새에 대한 연구는 공구회사나

이를 사용하는 산업현장에서 가장 현실적인 문제로 보다 실감나는 공구 마모 거동에 관한 연구가 필요하다고 할 수 있다. 따라서 공구 마모가 진전되어가는 모습을 보여줄 수 있는 기법이 있다면 아주 효율적으로 공구마모의 거동 연구에 접근할 수 있고 이는 이 분야에서 아주 효과적인 방법이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이 방법을 구현하기

\* 부경대학교 기계공학부

+ 교신저자, 부경대학교 기계공학부 (mcyoon@pknu.ac.kr)

주소: 608-739 부산시 남구 용당동 산100

위한 목적으로 웨이블릿을 이용한 공구마모 형상 구현 법을 연구하게 되었다. 우선 연구를 위해서는 마모패턴을 측정하는 방법이 중요하고 공구 경사면의 형상을 정확히 측정하는 방법이 필요하다. 우선 공구 경사면을 3차원적으로 측정할 수 있는 방법이 필요하다. 일반적으로 이 형상을 측정하는 장치로는 원자현미경(Atomic Force Microscopy : AFM), Stylus Profilometry(SP), 전자주사현미경(Scanning Electron Microscopy : SEM), Reflected Light Interferometry Microscopy(RLIM) and Confocal Laser Scanning Microscopy(CLSM) 등이 이용되고 있다<sup>(1-5)</sup>. 이 중 CLSM는 z 축방향의 분해능이 RLIM 보다는 약간 떨어지나 타 방법과 비교하여 마이크론 이하로 잘 표현할 수 있고 샘플 준비에 수월하다는 장점이 있다.

더구나 CLSM은 축침의 접촉이 필요하지 않는 비접촉 측정법으로 마모와 같은 아주 작은 표면을 비교적 정확하게 측정할 수 있다는 특징을 갖고 있다. 최근 크레이터 마모에 대하여 비접촉식으로 3차원적으로 연구한 결과가 있다<sup>(6)</sup>. 그러나 실험적인 데이터 분석에 국한 되고 있으며 또한 필터링을 이용한 표면 연구도 되었으나 그 주된 내용은 bandwidth를 고려한 2차원 프로파일 연구였다<sup>(2)</sup>. 그러나 크레이터 마모형상 연구는 저주파의 큰 파장의 형상으로 필터링 하는 문제가 필요하게 되었다. 많이 사용되고 있는 가우시안 필터(Gaussian filter) 역시 미세한 bandwidth 필터의 역할을 내기에는 어려움이 있었고 특히 마모부의 급격한 순간 돌출부를 제거하여 스무싱하는 필터링이 필요하다고 할 수 있다. 이러한 점에서 웨이블릿 분해와 역변환을 이용한 필터뱅크를 이용한 기법을 사용하면 크레이터 형상을 부드럽게 필터링 할 수 있음을 알 수 있었고 특히 비접촉식의 CLSM 하드웨어 장치를 이용하여 이미지로 형상을 얻을시

피할 수 있는 이미지 잡음 성분을 이 필터링 기법을 통하여 크레이터 마모형상을 여러 레벨에서 완벽하게 구현 할 수 있었다.

## 2. 웨이블릿 변환을 이용한 마모 표면의 구현

### 2.1 웨이블릿 이론

다단계의 분석이 가능한 웨이블릿 변환을 마모형상의 구현에 이용하였고 이는 웨이블릿 필터링을 이용하여 부드럽게 고주파의 성분을 제거하여 표현 할 수 있었다<sup>(3,7-13)</sup>. 본 연구의 주된 결과는 기존 연구와 달리 2차원 웨이블릿을 이용한 마모형상의 구현에 있고 특히 필터뱅크를 이용하여 여러 단계에서의 다른 마모거동의 결과를 얻어 마모의 거동을 분석을 할 수 있었고 공구 경사면의 크레이터 마모의 진전 단계를 보다 실감나게 분석 할 수 있다.

### 2.2 2차원 웨이블릿 변환을 이용한 필터링

다단계의 이미지 프로세싱의 한 방법으로 두 변수를 이용한 2차원 웨이블릿 변환이 이용되고 있다. 마모 형상을 표현하기 위하여 형상 표면은 웨이블릿 함수로 볼 수 있고 따라서 2 차원 연속 표면 함수  $f(x,y)$ 에 의한 표면 웨이블릿 함수  $W_{b,a}(x,y)$ 는 다음과 같이 정의된다 :

$$W_{b,a}(x,y) = \frac{1}{\sqrt{a_x a_y}} \iint_{-\infty-\infty}^{\infty} f(x,y) \cdot \psi\left(\frac{x-b_x}{a_x}, \frac{y-b_y}{a_y}\right) dx dy \quad (1)$$

여기서  $a_x$ 와  $a_y$ 는 압축계수(contraction coefficients)라 할 수 있고 각각  $x, y$  방향으로의 변수라 볼 수 있고  $b_x$ 와  $b_y$ 는  $x, y$  방향으로 표면의 이동정도를 결정하는 전이계수(translation

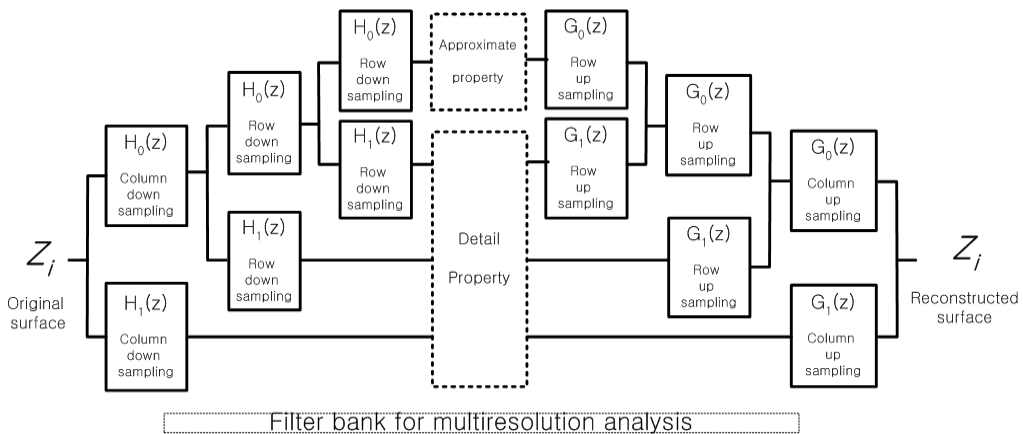


Fig. 1 Wavelet filtering using filter bank(Decomposition and reconstruction at i-th level)

coefficients) 라 할 수 있고 Parseval 이론에 의하면 2차원 웨이블릿 변환은 다음과 같이 표현 할 수 있다<sup>(10)</sup>.

$$\psi_{b,a}(x,y) = \psi\left(\frac{x-b_x}{a_x}, \frac{y-b_y}{a_y}\right) \quad (2)$$

따라서 Eq. (1)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$W_{b,a}(x,y) = \frac{1}{\sqrt{a_x a_y}} \iint_{-\infty-\infty}^{\infty} f(x,y) \cdot \psi_{b,a}(x,y) \, dx dy \quad (3)$$

그리고 표면의 필터링을 위해서는 필터 बैं크를 이용한 역 웨이블릿 변환이 사용되고 있으며 이것을 식으로 표현 하면 다음과 같이 표현 할 수 있다<sup>(10)</sup> :

$$f(x,y) = \frac{1}{C_g} \frac{1}{a_x^2 a_y^2} \iint_{-\infty-\infty}^{\infty} \iint_{-\infty-\infty}^{\infty} W_{b,a}(x,y) \cdot \psi_{b,a}(x,y) \, db_x db_y da_x da_y \quad (4)$$

역변환시 세부계수 성분을 생략하여 근사성분만을 고려하여 역변환하면 데이터의 수가 원래의 표면데이터의 수와 같고 필터링 효과를 얻는, 즉 필터 बैं크에 의한 역변환 필터링으로 보다 부드러운 표면을 얻을 수 있고 이 방법을 이용하여 각 레벨에서의 근사표면인 부드러운 표면을 다양하게 얻을 수 있다. 그리고 세부 표면형상도 얻을 수 있고 이는 형상의 부드러운 표면으로 부터의 미세 오차를 표현하게 된다고 할 수 있다<sup>(10)</sup>. Fig. 1은 임의의 레벨에서 웨이블릿 필터링을 할 경우 있게 되는 웨이블릿 분해(decomposition) 및 재구성(reconstruction) 과정을 나타내고 있다.

### 2.3 크레이터 마모체적

CLSM 측정기로부터 얻어진 HEI 데이터를 이용하여 팁 경사면에 있게 되는 크레이터 마모부의 체적을 계산 할 수 있다. 크레이터 마모의 체적을 계산하기 위해서는 Fig. 2에서와 같이 기준면 이하의 체적을 계산하여야 한다. 전체 크레이

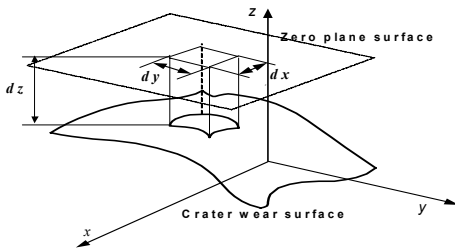


Fig. 2 Volume estimation

터 체적은 임의의 픽셀점  $(x_i, y_i, z_{ij})$ 에서의 미소면적을 고려하여 전체에 걸쳐 적분하면 되고 이산 형태로 표현하면 식 (5)와 같이 나타 낼 수 있다. 즉 요소의 수를 각각  $M, N$ 이라 하면 전체 체적은 다음과 같다.

$$Vol_{Total\ wear} = \sum_{i,j=1}^{M-N} \Delta V_{i,j} = C_1 \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta x \cdot \Delta y \cdot (\bar{z}_{i,j} - z_{i,j}) \quad (5)$$

### 3. 마모 표면형상 데이터의 수집

AIISI 1045 강( $\phi 15mm \times L48.7mm$ )의 강을 C6 팁(SNMA 190612 -ISO)을 이용하여 가공하였고 120분 가공한 후 크레이터 마모가 발생한 팁의 경사면을 CLSM 테이블에 올려 이미지를 얻었다. 이때의 절삭조건은  $V = 250m/min$ ,  $f = 0.3175mm/rev$ 와  $d = 1.905mm$ 로 하여 가공하였다. 이 이미지 형상데이터를 얻기 위하여 CLSM 측정 장치를 이용하여 이미지를 얻었고 이는 Fig. 3에 나타나 있다. CLSM 장치로는 MBI(maximum brightness image) 및 HEI(Height Encoded Image) 데이터를 얻을 수 있고 본 연구에서는 HEI를 이용하여 마모 형상을 구현하였다. 이 CLSM 장치에서는 초점이 표면에 일치할 때 최대의 빛의 강도가 얻어지고 이 최대 빛의 강도가 나타나는  $z$  축 위치  $z(x,y)$ 로 8비트의 범위의 수 구성되게 되는데 이 높이가 저장되는 데이터가 고도 코딩 이미지(Height Encoded Image : HEI)이고 같은 위치에 최대 빛의 강도를 8비트 범위의 수( $0 \sim 2^8-1$ )로 표현하여 저장된 데이터가 최대 밝기를 나타내는 이미지(MBI)가 된다. 보통 MBI는 보통 육안으로 보는 사진의 이미지와 유사하고 반면 HEI 데이터는 이와는 달리  $z$  데이터의 정보를 갖는 매트릭스 형태로 저장되게 된다<sup>(5,6)</sup>.

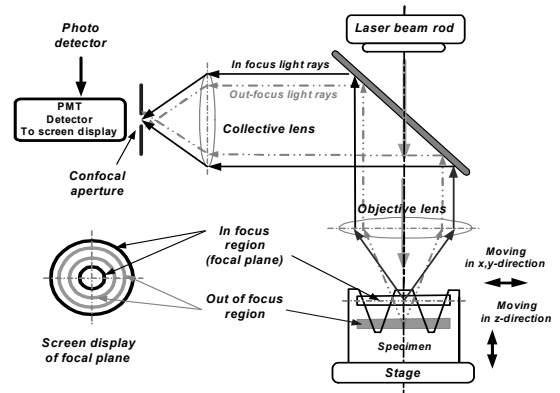


Fig. 3 The basic configuration of confocal laser scanning microscope(CLSM)

## 4. 연구결과의 분석

### 4.1 CLSM를 이용한 크레이터 형상 구현

사용된 팁은 TiCN으로 코우팅 되어 있고 이 공구로 120

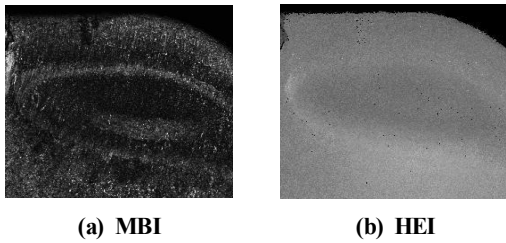


Fig. 4. Crater wear images on the rake face.

분 가공하여 크레이터 마모 생성 후 CLSM을 이용하여 MBI 및 HEI를 얻을 수 있었다. Fig. 4(a)는 크레이터 마모의 MBI 이미지를 나타내고 Fig. 4(b)는 같은 조건의 HEI 데이터 이미지를 나타내고 있다.

위 두 이미지 중 Fig. 4(b)를 이용하여 크레이터 마모의 형상을 구현하였다. 우선 HEI 이미지는  $z$  데이터를 8비트 크기의 수 0~255픽셀의 범위로 표현되어 있으며  $z$  방향 픽셀 1개의 크기는  $0.2\mu\text{m}$ 이고 따라서 이를 보정하여 3차원 마모형상을 구현 할 수 있다. 이 형상은 사진 이미지의 잡음 특성 때문에 많은 스파이크를 갖게 되고 이를 3차원으로 표현하면 Fig. 5(a)와 같은 잡음이 많이 포함된 표면으로 나타나게 된다. 따라서 이 스파이크 같은 고주파의 성분을 제거하고 부드럽게 하는 필터링 효과를 부여하여야 하며 이를 위하여 역웨이블렛을 이용한 필터뱅크를 사용하여 보다 부드러운 형상을 여

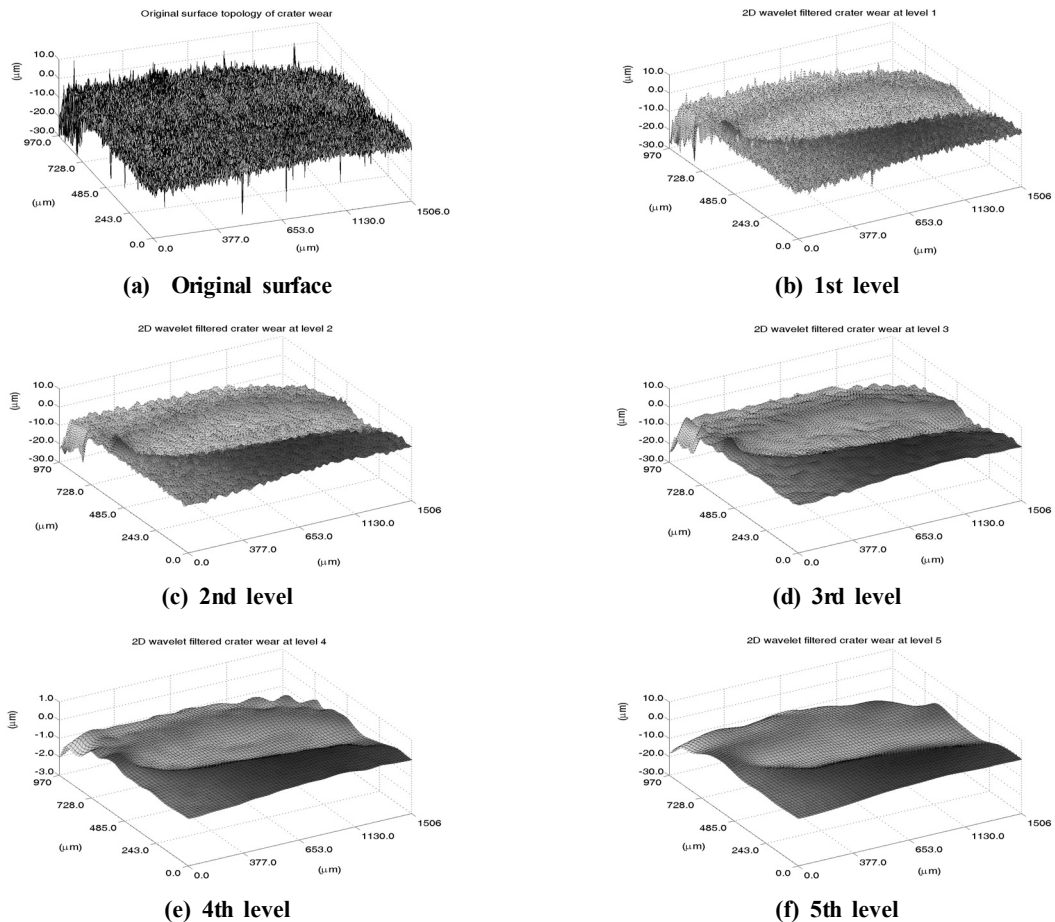


Fig. 5 Crater wear images at several levels after 2D wavelet transform

러 단계의 레벨에서 구할 수 있다. 또한 CLSM으로 측정 시에 스테이지에 놓이게 되는 팁의 틸팅 문제 때문에 이 기움을 보정하는 기술이 필요하다. 본 연구에서는 우선 마모표면을  $x, y$  각 단계별로 프로파일을 구하여 그 프로파일의 선형직선 기울기를 구하여 전체 각각 단면에서의 기울기를 구하고 이 단면 기울기들의 평균을 구하여 이 평균기울기 만큼 마모표면의 기움을 보정하여 최종 표면을 구하였다.

#### 4.2 웨이블릿 필터링

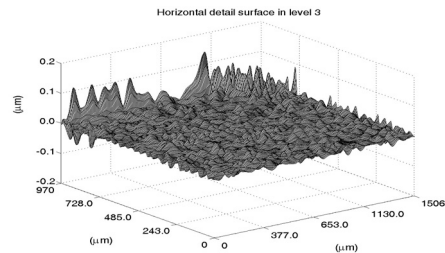
본 연구에서 Matlab 언어를 사용하여 웨이블릿 필터링 및 기움(tilting) 보정 소프트웨어를 개발 하였으며 그 연구결과는 다음과 같다. Fig. 5(a)는 HEI 이미지를 이용한 원래의 마모표현을 나타내고 있다. 그림에서 많은 스파이크가 포함되어 있는 것을 알 수 있고 이 형상을 2D 웨이블릿 변환 및 역변환을 통하여 좀더 필터링 된 다음 레벨의 마모형상을 얻을 수 있었다. 이 마모 형상은 120분 가공 후 팁의 형상으로서 경사면에 크레이터가 생성되어 있음을 확인 할 수 있다. 그림에서 크레이터 마모의 폭과 깊이도 비교적 미크론 단위로 정확하게 측정할 수 있었다. 또 여러 레벨에서 약간의 특성이 다른 마모형상을 구현 할 수 있었고 적절한 레벨의 자료로 마모형상의 진전되어가는 특성을 정확하게 유추할 수 있다. 그림에서 근사 계수를 이용한 마모표면은 높은 레벨로 갈수록 스무싱을 통하여 그 방향성이 사라지고 부드럽게 나타남을 알 수 있다. Fig. 5는 각 레벨(1~5)에서의 근사계수의 거동을 나타내고 있다.

Fig. 6은 HEI 데이터를 이용하여 레벨 3에서 3가지 세부계수의 거동을 보여 주고 있다. 그 중 Fig. 6(a)는 크레이터 마모패턴의 수평 세부계수를 나타내고 있으며 Fig. 6(b)는 크레이터 마모패턴의 수직 세부계수의 거동을 나타내고 있다. 또한 Fig. 6(c)는 대각선 세부계수를 나타내며 이는  $x, y$  방향의 근사 마모표면의 오차를 표현하고 있다고 할 수 있다. 또한 이 세부계수는 각 방향의 고주파 성분 오차라 할 수 있다. 즉 Fig. 6은 크레이터 패턴 경계의 고유한 방향특성을 나타낸다고 할 수 있으나 크레이터 마모분석에는 그다지 뚜렷이 나타내지 못하고 있다. 그러나 이 다분해 분석(multi-resolution analysis)을 통하여 구성된 형상에서는 높은 레벨에서 더욱더 필터링 효과가 증가하고 부드러운 마모형상을 얻을 수 있다.

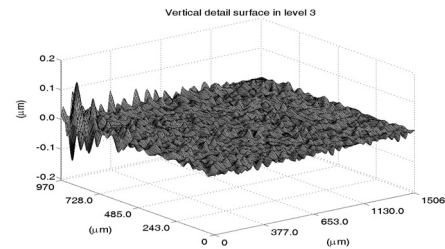
CLSM으로 작은 팁의 크레이터마모를 측정할 때에는 작은 마모시편의 특성상 약간의 기울어짐이 측정 시에 항상 나타나게 되며 이를 보정해주는 기술이 필요하다. 본 연구에서는 이 기움을 보정하기 위하여 마모형상을  $x, y$  방향으로 여러 섹션으로 나누어 2차원 프로파일 형상을 구한 후 각 섹션

별로 기울어져 있는 프로파일형상을 고려하여 각각의 기울기를 구하였고 이 각각의 전체 기울기 평균치를 구하여 그 기울기 만큼 기움 보정을 하였고 그 수직한 방향도 같은 절차를 수행하여  $x, y$  방향으로 기움이 보정된 형상을 구하였다. 그 최종 크레이터 마모표면을 고려하여 마모체적을 표현하면 Fig. 7의 영역이 되고 각 레벨에서 이 체적을 계산한 결과는 Fig. 8과 같다.

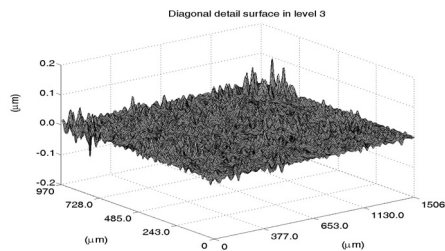
레벨 3의 표면을 이용하여 실제 마모 체적을 계산한 형상은 Fig. 7의 표면이 되고 이 마모면 위의 체적을 계산하였다. 다른 레벨에서도 유사한 형상을 이용하여 계산한 결과는 레벨 1~4에서는 거의 차이가 없이  $0.0046mm^3$ , 레벨 5에서는  $0.0042mm^3$ , 레벨 6에서는  $0.0046mm^3$  그리고 레벨 7에서는  $0.0068mm^3$ 로 체적이 약간 증가 하는 형태로 계산이 되었다.



(a) Horizontal detail surface



(b) Vertical detail surface



(c) Diagonal detail surface

Fig. 6 Detail surface of crater after wavelet filtering at 3rd level

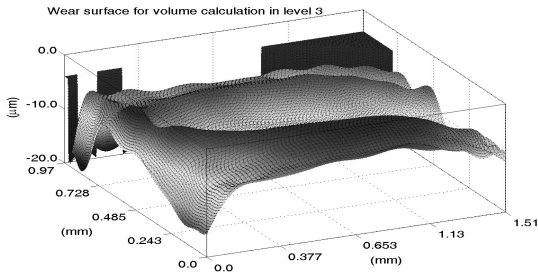


Fig. 7 Constructed wear volume

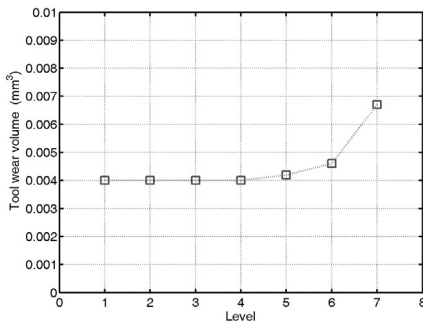
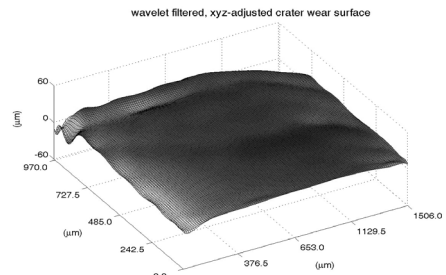


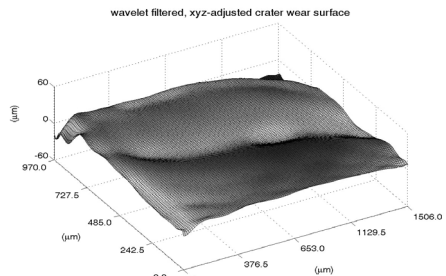
Fig. 8 Tool wear volume according to level

이는 레벨 1~4에서는 거의 같게 계산되어 스무싱 되어도 원래의 표면을 오차 없이 필터링 하여 체적을 구할 수 있음을 보여주고 있다. 이 결과는 Fig. 8에 잘 나타나 있다. 가공시간이 지남에 따라 마모가 되어가는 현상은 임의의 레벨에서의 마모표면의 거동을 분석하면 되고 Fig. 5에서 시간이 지남에 따라 마모체적이 변화하고 있음을 알 수 있다. 마찬가지로 각 레벨의 표면을 이용하여 체적을 구하여도 체적계산에 있어서는 레벨 1~4에서는 차이가 없이 나타났고 따라서 크레이터 마모체적 계산에는 웨이블릿 필터링을 이용한 분석 시에 레벨 1~4의 표면은 적당함을 알 수 있다. 그리고 레벨 5 이상에서는 약간의 오차를 나타 내게 되며 레벨 7 이상에서는 표면 형상이 상당히 왜곡됨을 알 수 있다.

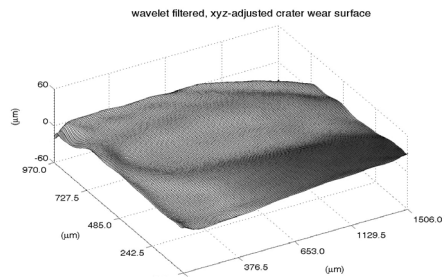
Fig. 9는 3분, 8분 및 15분 가공 후 크레이터 마모표면을 HEI 이미지를 웨이블릿 필터링 기법으로 3차원 형상을 구현한 것이고 공구는 코우팅 되지 않은 팁을 이용하여 같은 방법을 수행하여 마모거동을 구현한 형상이다. 이 그림을 볼 때 시간에 따라 공구 경사면에서 마모 형상이 어떻게 진전되어 가는 가를 뚜렷하게 3차원적으로 수월하게 볼 수가 있다.



(a) after 3 min



(b) after 8 min



(c) after 15 min

Fig. 9 Tool wear evolution

## 5. 결론

HEI 이미지 데이터를 이용하여 크레이터 마모 형상 표면을 생성하였다. 또한 웨이블릿 필터링을 이용한 표면 스무싱 기법을 개발하여 마모형상을 구현하였고 그 주된 결론은 다음과 같다.

- (1) CLSM의 HEI 이미지 데이터를 이용하여 크레이터 마모 형상을 구현 할 수 있었고 웨이블릿 필터링과의 조합을 통하여 크레이터 마모를 마이크론 단위로 측정할 수 있었고 이 비접촉식 마모 표면형상 생성 기술은 마모의 거동

을 수월하게 나타낼 수 있다.

- (2) 웨이블릿 필터링법은 크레이터 마모표면을 왜곡 없이 잘 표현 하였으며 특히 고주파의 성분을 제거하여 다단계로 부드럽게 다양한 크레이터 마모의 형상을 표현 할 수 있었다. 또한 이 방법으로 구현한 마모형상을 기준으로 마모체적을 계산할 수 있고 1~4단계의 레벨에서는 계산된 체적이 서로 잘 일치하는 결과를 얻었다. 특히 이미지 처리 시에 나타나는 고주파의 잡음을 웨이블릿 필터링 기법으로 충분히 체적의 오차를 줄여 스무싱 하여 나타낼 수 있었다.
- (3) 본 연구는 시간에 따라 진전되어 가는 크레이터 마모의 거동 상태를 3차원적으로 쉽게 표현하여 마모가 진전되어 가는 형상을 수월하게 확인할 수가 있어 공구의 마모 거동의 분석에 아주 유용하게 사용될 수 있다.

## 후 기

이 논문은 2007학년도 부경대학교 연구년 교수 지원사업에 의하여 연구되었음(PS-2007-015).

## 참 고 문 헌

- (1) Yuan, C., Peng, Z., and Yan, X., 2005, "Surface Characterization using Wavelet Theory and Confocal Laser Scanning Microscopy," *Trans. of the ASME*, Vol. 127, pp. 394~404.
- (2) Raja, J., Muralikrishnan, B., and Fu, S., 2002, "Recent Advances in Separation of Roughness, Waviness and Form," *Precision Eng.*, Vol. 26 pp. 222~235.
- (3) Maksumov, A., Vidu, R., Palazoglu, A., and Stroeve, P., 2004, "Enhanced Feature Analysis using Wavelets for Scanning Probe Microscopy Images of Surfaces," *J. of Colloid and Interface Science*, Vol. 272, pp. 365~377.
- (4) Corle, T. and Kino, G., 1996, *Confocal Scanning Optical Microscopy and Related Imaging Systems*, San Diego: Academic Press.
- (5) Anamalay, R. V., Kirk, T. B., and Panzera, D., 1995, "Numerical Descriptors for the Analysis of Wear Surfaces using Laser Scanning Confocal Microscopy," *Wear*, Vol. 81, pp. 771~776.
- (6) Olortegui-Yume, J. and Kwon, P., 2007, "Crater Wear Evolution in Multilayer Coated Carbides during Machining using Confocal Microscopy," *J. of Manuf. Processes*, Vol. 9, No. 1, pp. 47~60.
- (7) Jiang, X. Q., Blunt, L., and Stout, K. J., 2001, "Lifting Wavelet for Three-Dimensional Surface Analysis," *Int. J. of MTM*, Vol. 41, pp. 2163~2169.
- (8) Jiang, X. Q. and Blunt, L., 2004, "Third Generation Wavelet for the Extraction of Morphological Features from Micro and Nano Scalar Surfaces," *Wear*, Vol. 257, pp. 1235~1240.
- (9) Podsiadlo, P. and Stachowiak, G. W., 2003, "Fractal-Wavelet Based Classification of Tribological Surfaces," *Wear*, Vol. 254, pp. 1189~1198.
- (10) Fu, S., Muralikrishnan, B., and Raja, J., 2003, "Engineering Surface Analysis with Different Wavelet Bases," *Trans. of the ASME*, Vol. 125, pp. 844~852.
- (11) Li, W., Gong, W., Obikawa, T., and Shirakashi, T., 2005, "A Method of Recognizing Tool-Wear States Based on a Fast Algorithm of Wavelet Transform," *J. of MPT*, Vol. 170, pp. 374~380.
- (12) Xiao, S. J., Jiang, X. Q., Blunt, L., and Scott, P. J., 2001, "Comparison Study of the Biorthogonal Spline Wavelet Filtering for Areal Rough Surfaces," 2001, *Int. J. of MTM*, Vol. 41, pp. 2103~2111.
- (13) Yoon, M. C. and Chin, D. H., 2005, "Cutting Force Monitoring in the Endmilling Operation for Chatter Detection," *Journal of Eng. Manuf.*, Vol. 12 pp. 455~466.
- (14) Seol, H. W. and Kim, J. H., 2006, "Cutting Characteristics of the ZrN Coated Tool," *KSMTE*, Vol. 15, No. 1, pp. 17~22.