

기름방울 형상 및 그 체적 분석법

윤 문 철*

부경대학교 기계공학부

Droplet Geometry and Its Volume Analysis

Moon-chul Yoon[†]

Division of Mechanical Engineering, Pukyong National University

(Received September 25, 2008; Revised October 27, 2008; Accepted November 5, 2008)

Abstract – The recent industrial application requires technical methods to get the cutting fluid droplet surfaces in particular from the viewpoint of topography and micro texture. To characterize the surface topography of droplet, the combination of the confocal laser scanning microscope (CLSM) and wavelet filtering is well suited for obtaining the droplet geometry encountered in tribological research. This technique indicates a better agreement in obtaining an appropriate droplet surface obtained by the CLSM over a detail range of surface accuracy (resolution: 2 μm). And the results allow an excellent accuracy in a measurement of a droplet surface. The combination of extended focal depth measurement configured and multi-scale wavelet filtering has proven that it can construct a droplet surface in a successive and accurate way. A multi-scale approach of wavelet filtering was developed based on the decomposition and reconstruction of droplet surface by 2D wavelet transform using db9 (a mother wavelet of daubechies). Also this technique can be extended to characterize the quantification of droplet properties and other field in a wide range of scales. Finally this method is verified to be a better droplet surface modeling in a micro scale arising in a mist machining.

Key Words – confocal laser scanning microscopy (CLSM), cutting fluid droplet, image processing, wavelet filtering

1. 서 론

가공 시 분무된 미소 절삭유 의 크기는 매우 작아 환경적인 문제와 더불어 작업자의 건강에 치명적인 영향을 주게 된다. 따라서 이 미소 기름방울(droplet)의 크기를 정확하게 모델링을 하고 그 크기를 구하는 것은 매우 중요하다고 할 수 있다. 그 동안 기름방울 크기에 대한 연구는 주로 실험적인 데이터 분석에 제한되어 있었고 컴퓨터 분석을 통한 구체적이고 실감나는 결과 없었다고 할 수 있다. 그러나 최근 기름방울 크기에 대한 연구는 공구회사나 산업현장에서 안전상이나 환경적인 면에서 가장 현실적인 문제가 되고 있어 그 가장 기본적인 기름방울 크기 측정법이 필요하다고 할 수 있다.

그러나 기존의 연구는 아직 거리감 있는 연구가 대부분이다. 따라서 기름방울 크기가 어떠한고 그 형상이 어떻게 되어 있는가를 구체적으로 보여줄 수 있는 방법이 있다면 이는 아주 효율적으로 기름방울 의 거동 연구에 접근할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이것을 구현하기 위한 목적으로 웨이블릿을 이용한 기름방울 형상 구성 모델링법을 연구하게 되었다. 우선 연구를 위해서는 기름방울의 형상을 비접촉으로 측정하는 방법이 중요하고 기름방울 경사면의 형상을 정확히 측정하는 방법이 필요하다. 일반적으로 기름방울 형상을 측정하는 장치로는 원자현미경(Atomic Force Microscopy: AFM), Stylus Profilometry (SP), 전자주사현미경(Scanning Electron Microscopy: SEM), Reflected Light Interferometry Microscopy (RLIM)와 Confocal Laser Scanning Microscopy (CLSM) 등이 이용되고 있다[1-5].

*주저자 · 책임저자 : mcyoon@pknu.ac.kr

한 역웨이블렛 변환이 사용되고 있으며 이것을 식으로 표현 하면 다음과 같이 표현 할 수 있다[7]:

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

즉 필터 뱅크에 의한 역변환 필터링으로 보다 부드러운 표면을 얻을 수 있고 이 방법을 이용하여 각 레벨에서의 근사표면인 부드러운 표면을 얻을 수 있다. 그리고 세부 표면형상도 얻을 수 있고 이는 기름방울 형상의 부드러운 표면으로 부터의 미세 오차로 나타난다고 할 수 있다[7]. Fig. 1는 임의의 레벨에서 표면 생성에 있어서 웨이블렛 분해(decomposition) 및 재구성(reconstruction) 과정을 나타내고 있다.

2.3. 기름방울체적

CLSM 장비에서 얻어진 HEI 데이터를 이용하여 기름방울 표면으로 구성된 미소 체적은 아래 그림과 같고 이 경우 기름방울의 체적을 계산하는 식이 필요하다. 기름방울의 체적을 계산하기 위해서는 Fig. 2에서와 같이 기름방울 표면과 기준면 사이의 체적을 계산하여야 한다. 따라서 전체 기름방울 체적은 임의의 점 $P_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ 에서의 3차원 미소 바의 체적을 전체 x, y 영역에 걸쳐서 이 미소체적을 적분하면 되며 이것을 이산 형태로 표현하면 식 (5)와 같이 나타 낼 수 있다. 즉 요소의 수를 각각 M, N 이라 하면 전체 체적은 다음과 같다. 여기서 C_1 은 보정계수(compensation factor)이다.

$$Vol_{droplet} = \sum_{i,j=1}^{M \cdot N} \Delta V_{i,j} = C_1 \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \Delta x \cdot \Delta y \cdot (z_{i,j} - z_{zero}) \quad (5)$$

또한 위 형상에서 고려한 기름방울의 전체 체적과 같다고 볼 수 있는 상당 기름방울 구를 고려하여 이

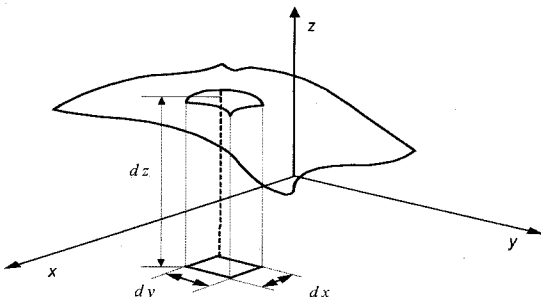


Fig. 2. Volume estimation.

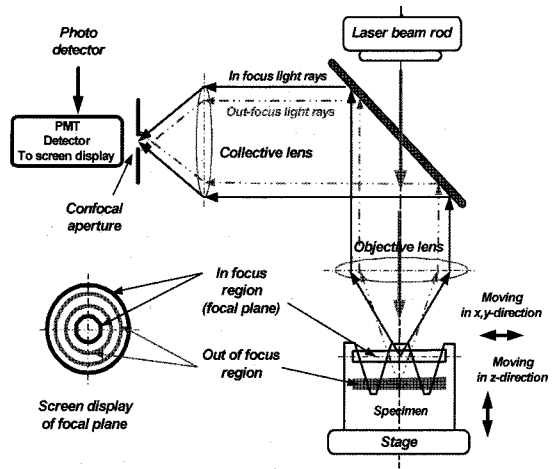


Fig. 3. The basic configuration of confocal laser scanning microscope (CLSM).

구의 직경을 상당 직경 d_{eq} 라고 정의 할 수 있고 이 경우 체적이 증가하면 식 (6)에 따라 상당 직경도 증가하게 된다.

$$d_{eq} = 2 \times \sqrt[3]{\frac{3 \cdot Vol_{droplet}}{4\pi}} \quad (6)$$

3. 기름방울 표면데이터 수집

3-1. CLSM을 이용한 기름방울 표면데이터 수집

본 연구에서는 실리콘 웨이퍼에 분사된 기름방울의 형상을 얻기 위해 시편을 준비하였고 웨이퍼에 분사한 기름방울 시편을 CLSM 스테이지에 올려 놓아 기름방울 이미지를 얻었다. 이때 웨이블렛 분석법을 적용하기 위하여 3차원 형상데이터를 얻기 위하여 비접촉 CLSM 측정 장치를 이용하였다. 그 기본 구성 원리는 Fig. 3 과 같다. CLSM 장치로 기름방울 형상의 HEI 데이터를 얻을 수 있고 이 HEI 를 이용하여 기름방울 표면 형상을 얻었다. 여기서 CLSM 장치의 렌즈와 스테이지는 비접촉 방법으로 초점이 기름방울 표면에 일치할 때 최대의 빛의 강도가 얻어지고 이 최대 빛의 강도가 나타나는 z축 높이의 위치 $z(x,y)$ 의 데이터로 8 비트의 범위의 수로 구성 저장되는 데이터가 고도 코딩 이미지(Height Encoded Image:HEI)가 된다. 보통 HEI 데이터는 높이 정보를 갖는 z 데이터의 매트릭스 형태로 저장된다[5,6].

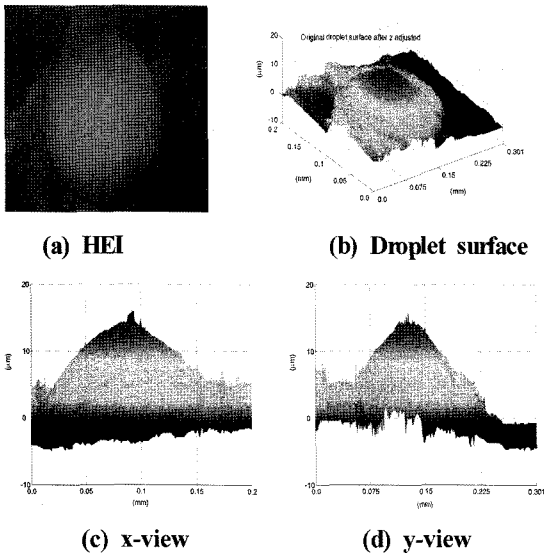


Fig. 4. Droplet on the Si wafer.

4. 연구결과 분석

4-1. CLSM를 이용한 기름방울 형상 구현

실리콘 웨이퍼에 분사된 여러 기름방울 중 계산하고자 하는 1개의 기름방울을 CLSM 을 이용하여 HEI 를 얻을 수 있었고 Fig. 4(a)와 같은 HEI 데이터 이미지를 얻었다. 이 HEI 를 이용하여 기름방울의 형상을 생성하였다. 우선 HEI 이미지는 z 데이터를 8 비트 크기의 수 0~255픽셀의 범위로 표현하고 있으므로 이를 보정하여 높이를 구할 수 있다. z 방향 픽셀 1개의 크기는 0.2 μm이고 따라서 이를 보정하여 3차원 기름방울 형상을 구현 할 수 있다. 이 형상은 사진 이미지의 잡음 특성 때문에 많은 스파이크(spike)를 갖게 되고 이를 3차원으로 표현하면 Fig. 4(b)-(d)와 같은 표면으로 나타나게 된다. 따라서 이 스파이크 같은 고주파의 성분을 제거하고 부드럽게 하는 필터링 효과를 부여하여야 하며 이를 위하여 웨이블릿 필터 뱅크를 이용한 보다 부드러운 형상을 여러 단계의 레벨에서 구할 수 있었다. 또한 CLSM 측정시에 스테이지에 놓이게 되는 웨이퍼의 틸팅 문제 때문에 이 기름이 보정되어야 하고 이를 해결하는 노력이 필요하다. 본 연구에서는 우선 기름방울 표면을 x, y 각 단계별로 프로파일을 구하여 그 프로파일의 기울기를 구하였고 전체 각각 기름방울 단면의 기울기평균을 구하여 이 기울기만큼 보정하여 기름방울 표면의 기움을 보정하였다.

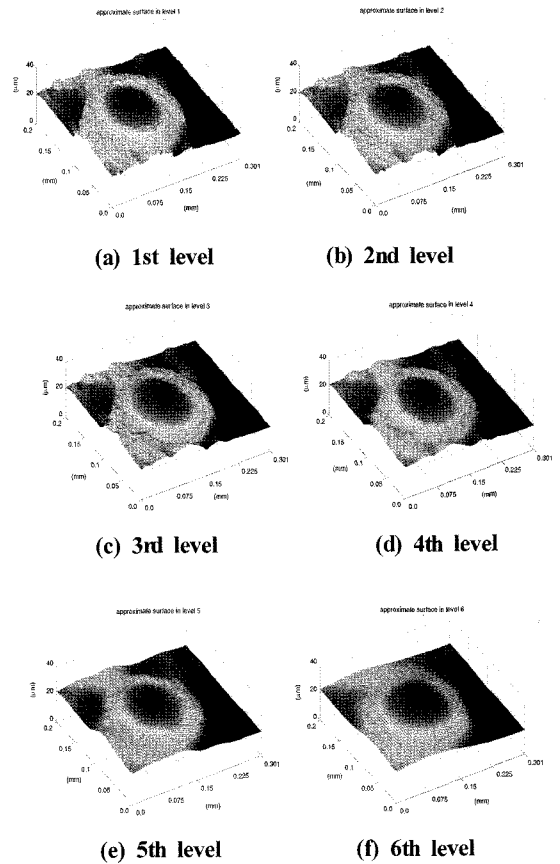
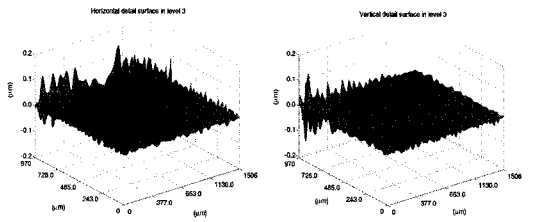


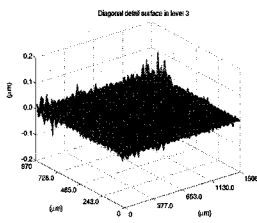
Fig. 5. Droplet images at several level after 2D wavelet transform with filter bank.

4-2. 웨이블릿 필터링

본 연구에서는 웨이블릿 필터링 및 기울기(tilting)이 보정 되도록 하였고 그 결과는 다음과 같다. Fig. 4(b)의 HEI 이미지를 이용한 기름방울 표현은 많은 스파이크가 있는 것을 알 수 있고 이 형상을 2D 웨이블릿 변환을 하여 필터링한 기름방울 형상은 Fig. 5와 같으며 기름방울의 직경과 깊이도 비교적 마이크로 단위로 정확하게 측정할 수 있었다. 또 각 레벨별로 약간 다른 특성의 기름방울 형상을 구현 할 수 있었고 그 형상을 정확하게 유추할 수 있다. 그리고 근사 계수를 이용한 기름방울표면은 스무싱을 통하여 그 방향성이 사라지고 부드럽게 나타남을 알 수 있다. Fig. 5(c)는 레벨 3에서의 근사계수의 거동을 나타내고 있다. Fig. 6은 HEI 데이터를 이용하여 레벨 3에서 세 가지 세부 계수의 거동을 보여 주고 있다. 그 중 Fig. 6(a)는 기름방울 패턴의 수평 세부계수를 나타내고 있으며 Fig. 6(b)는 기름방울 패턴의 수직 세부계수의 거동을 나타



(a) Horizontal detail surface (b) Vertical detail surface



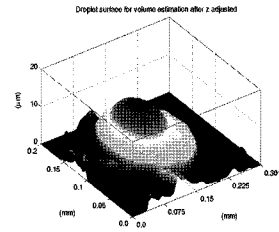
(c) Diagonal detail surface

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

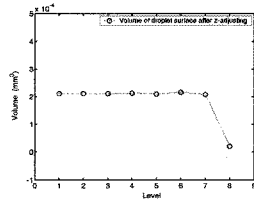
내고 있다. 또한 Fig. 6(c)는 대각선 세부계수를 나타내며 이는 x, y 방향의 근사 기름방울 표면의 오차를 표현하고 있다고 할 수 있다.

또한 이 세부계수는 각 방향의 고주파 성분 오차라 할 수 있다. 즉 Fig. 6은 기름방울 패턴 경계의 고유한 방향특성을 나타낸다고 할 수 있다. 다분해 분석(multi-resolution analysis)을 통하여 높은 레벨에서 근사계수 표면은 더욱더 필터링 효과가 증가하고 부드러운 기름방울 형상을 얻을 수 있다. CLSM으로 웨이퍼 위의 기름방울을 측정할 때 작은 기름방울 이라 할지라도 약간의 기울어짐이 측정 시에 나타나게 되며 이를 보정해주는 기술이 필요하다. 본 연구에서는 이 기울음을 보정하기 위하여 기름방울 형상을 x, y 방향으로 여러 섹션으로 나누어 각 섹션별로 기울어져 있는 2차원 형상을 고려하여 각각의 기울기를 구하여 그 평균치를 구하여 그 방향으로 기울 보정을 하였고 그 수직 방향도 같은 절차를 수행하여 전체적으로 기울이 보정된 형상을 구하였다.

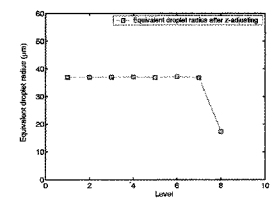
그 최종 기름방울 표면을 고려한 체적은 Fig. 7(a)의 영역이 되고 이 체적을 각 레벨에서 계산한 결과는 Fig. 7(b)과 같다. 기름방울 체적 계산을 위하여 Fig. 7(a)의 레벨 3의 표면을 이용하여 체적을 계산하였고 이를 위해 상자의 기름방울 표면 아래 부분의 체적을 계산하였다. 계산 결과 레벨 1~7까지는 거의 차이가



(a) Constructed droplet volume



(b) Estimated volume



(c) Equivalent radius

Fig. 7. Droplet surface.

없이 0.000218 mm³로 계산이 되었다. 이는 레벨 1~4에서는 거의 같게 계산되고 레벨 5~7에서는 약간의 차이가 있으나 그 오차는 미미하고 스무싱 되어도 원래의 체적을 오차 없이 잘 계산되고 있음을 보여주고 있다. 이 결과는 Fig. 7(b)에 잘 나타난다. 그리고 각 레벨에서의 이 형상의 체적에 상당하는 구의 반경을 상당 기름방울 반경이라 하여 이를 구하였고 이는 약 37 μm로 계산 되었다. Fig. 7(c)는 상당 기름방울 반경 계산 결과로 각 레벨의 상당 반경을 이용하여 기름방울의 크기를 알 수 있다.

5. 결 론

HEI 이미지 데이터를 이용하여 기름방울 형상 표면을 생성하였고 웨이블릿 필터링을 이용한 표면 스무싱 기법을 제시하여 기름방울 형상을 구현하였고 그 주요한 결론은 다음과 같다.

1) CLSM의 HEI 이미지 데이터를 이용하여 기름방울 형상을 구현 할 수 있었고 웨이블릿 필터링을 이용하여 기름방울을 마이크론 단위로 측정할 수 있었고 이 기름방울 형상 생성 기술은 윤활분야의 기름방울의 검출 및 분석 시스템에 이용할 수 있다.

2) 웨이블릿 필터링법은 기름방울 표면을 왜곡 없이 잘 표현 하였으며 특히 고주파의 성분을 제거하여 다단계로 부드럽게 다양한 기름방울의 형상을 표현 할 수 있었다. 또한 이 방법으로 구현한 기름방울 형상을

기준으로 기름방울 체적을 계산할 수 있고 1~6 단계의 레벨에서는 계산된 체적이 서로 잘 일치하는 결과를 얻었고 특히 이미지 처리 시에 나타나는 고주파의 잡음을 웨이블릿 필터링 기법으로 충분히 체적의 오차를 줄여 스무싱 하여 나타낼 수 있었다. 본 연구는 기름방울의 형상을 3차원적으로 쉽게 표현하여 형상을 수월하게 확인할 수가 있어 윤희유등 기름방울 크기 분석에 아주 유용하게 사용될 수 있다.

후 기

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

참고 문헌

1. Yuan, C., Peng, Z. and Yan, X., "Surface Characterization using wavelet theory and confocal laser scanning microscopy", *Trans. of the ASME*, Vol. 127, pp. 394-404, 2005.
2. Raja, J., Muralikrishnan, B. and Fu, S., "Recent Advances in Separation of Roughness, Waviness and Form", *Precision Eng.*, Vol. 26 pp. 222-235, 2002.
3. Maksumov, A., Vidu, R., Palazoglu, A. and Stroeve, P., "Enhanced Feature Analysis Using Wavelets for Scanning Probe Microscopy Images of Surfaces", *J. of Colloid and Interface Science*, Vol. 272, pp. 365-377, 2004.
4. Corle, T. and Kino, G., *Confocal scanning optical microscopy and related imaging systems*, San Diego: Academic Press, 1996.
5. Anamalay, R.V.; Kirk, T.B.; and Panzera, D., "Numerical Descriptors for the Analysis of Wear Surfaces Using Laser Scanning Confocal Microscopy", *Wear*, Vol. 81, pp. 771-776, 1995.
6. Olortegui-Yume, J. and Kwon, P., "Crater Wear Evolution in Multilayer Coated Carbides during Machining Using Confocal Microscopy", *J. of Manuf. Processes*, Vol. 9, No. 1, pp. 47-60, 2007.
7. Shengyu Fu, B. Muralikrishnan and J. Raja, "Engineering Surface Analysis with Different Wavelet Bases", *Trans. of the ASME*, Vol. 125, pp. 844-852, 2003.
8. Weihong Li, Weiquo Gong, T. Obikawa and T. Shirakashi, "A Method of Recognizing Tool-wear States Based on a Fast Algorithm of Wavelet Transform", *J. of MPT*, Vol. 170, pp. 374-380, 2005.
9. Yoon, M. C. and Chin D. H., "Cutting Force Monitoring in the Endmilling Operation for Chatter Detection", *Journal of Eng. Manuf.*, Vol. 12 pp. 455-466, 2005.