압입 표면형상의 구현과 체적계산법

양재용*, 윤문철⁺

(Manuscript received: Jul, 13, 2012 / Revised: Sep, 6, 2012 / Accepted: Sep, 6, 2012)

Indented Surface Configuration and its Volume Calculation

Jae-Yong Yang*, Moon-chul, Yoon⁺

Abstract

The indented geometry for rockwell hardness indenter has been configured by using Confocal Laser Scanning Microscopy (CLSM). For this purpose, the CLSM can be well suited to construct the three-dimensional indented volume from the indented surface by rockwell hardness tester. Furthermore, the height data of HEI(height encoded image) by CLSM must be acquired at first and converted to indented surface later. And the indented surface patterns enable us to predict the indenter shape and volume. This volume can be used to study the rockwell hardness model as a volume parameter. As a result, the technique performed in this study by combining the CLSM with compensation technique is an excellent one to obtain the geometries of indented surfaces over a wide range of surface resolution in a micro scale. And it can be used for micro volume calculation.

Key Words : Confocal laser scanning microscopy(공초점현미경), Height encoded image(암호화높이 이미지), Indented volume(압입체적), Rockwell hardness(로크웰경도), Tilting compensation(기움보정)

1. 서 론

경도측정기의 압입자의 압입면에 의한 압입면 형상 등의 미소 형상에 대한 그 동안의 연구는 주로 현미경 사진과 2 차원 데이터를 통한 실험적인 데이터 분석에 제한되어 있었고 컴퓨터 분석을 통한 구체적인 결과는 없는 실정이다. 따라서 이 체적을 이용한 응용 연구는 할 수가 없었다. 최근 컴퓨터를 장착한 비접촉 측정기의 개발에 따라 이것이 가능하게 되었다. 압입면 등의 미소형상의 측정에는 마운팅시 기움 보정에 대한 구체적인 기술이 적용되어야 하고 기울어진 표면을 보정할 필요가 있다. 미소 압입면 형상의 기움 보정을 하여 보다 실제 형상에 가까운 표면

을 구하는 형상 구현법이 필요하게 되었다. 보통 형상구현을 위해서는 압입 경사면이 3 차원적으로 측정 할 수 있어야 하고 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^(1~5). 이 중 CLSM 는 z 축방향의 분해능이 RLIM 보다는 약간 떨어지나 타 방법과 비교하여 미크론 이하로 잘 표현 할 수 있고 샘플 준비에 수월하다는 장점이 있다. 더구나 CLSM 은 측정의 접축이 필요하지 않는 비접촉 측정법으로 미세 마모면과 같은 아

* 부경대학교 기계공학부

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

주소: 608-739 부산시 남구 용당동 산100

주 작은 표면을 비교적 정확하게 측정할 수 있다는 특징을 갖고 있다. 최근 크레이터 마모부 형상에 대하여 비접촉식으로 3차원적으로 연구한 결과가 있다⁽⁵⁾. 그러나 실험적인 데이터 분석에 국한되고 있으며 또한 필터링을 이용한 표면 연구도 되었으나 그 주된 내용은 2차원 프로파일에 관한 연구였다⁽⁶⁾.

본 논문에서는 비접촉식의 CLSM 하드웨어 장치를 이용하여 로크웰 압입자의 형상데이터를 HEI 파일로 만들어 3차원 미소 압입 표면 형상을 구현하고 이때 문제되는 기움 문제를 본 연구에서 사용한 기움 보정기법을 이용하여 보다 원래의 형상에 가까운 형태로 구현하고자 하였다. 또한 그 3차원 형상의 압입부 체적을 구하여 미소 부분의 체적값을 계산할 수가 있고 이는 체적을 이용한 경도 표현 모델의 개발에 다양하게 응용할 수 있다.

2. 압입부 형상과 체적

경도 측정 후 압입된 압입면을 얻기 위하여 SM45C 시편을 사전에 준비하여 로크웰 경도 측정기로 측정하였고 동시에 압

Fig. 1 Volume estimation

Fig. 2 The basic configuration of confocal laser scanning microscope (CLSM)

입이 발생한 면의 압입부를 공초점 현미경(CLSM)으로 측정하여 압입부의 흔적 표면 이미지를 얻었다. CLSM 장치로 얻어진 이미지는 HEI(height encoded image)로서 높이 데이터를 얻을 수 있고 이 HEI 데이터를 이용하여 압입부 형상을 구현하였다. 이 CLSM 장치의 원리는 초점이 표면에 일치할 때 최대의 빛의 강도가 얻어지고 이 최대 빛의 강도가 나타나는 z 축 위치 $z(x,y)$ 로 8비트의 범위의 수로 구성되게 된다. 이 높이가 저장되는 데이터가 고도 코딩 이미지(HEI)이고 보통 8비트 범위의 수($0 \sim 2^8-1$)로 저장되고 표면의 z 데이터의 정보를 갖는 매트릭스 형태로 저장되게 된다^(5,6).

공초점 현미경 장치로부터 얻어진 HEI 데이터를 이용하여 압입부의 형상과 체적을 계산할 수 있고⁽⁵⁻¹⁰⁾ 압입부의 체적을 계산하기 위해서는 Fig. 1과 같이 0 기준면 이하의 체적을 계산하여야 한다. 전체 압입부 체적은 임의의 픽셀점 (x_i, y_i, z_{ij}) 에서의 미소 부분 체적으로서 그림의 미소 면적을 고려하여 전체에 걸쳐 적분하면 되고 이산 형태로 표현하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 즉 요소의 수를 각각 x, y 방향으로 M, N 이라 하면 경도 측정기를 이용하여 얻어진 압입부 전체 체적은 다음과 같다.

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

3. 연구결과의 분석

3.1 공초점현미경을 이용한 압입면 형상 구현

Fig. 3은 압입부 형상의 HEI 데이터 이미지를 나타내고 있다. HEI 이미지의 픽셀의 범위는 z 데이터를 8비트 크기의 수 0-255의 크기로 표현되어 있으며 z 방향 픽셀 1개의 크기는 $0.2\mu m$ 이고 따라서 이를 보정하여 3차원 압입부 형상의 z 높이를 구할 수 있다. 그러나 CLSM 측정기의 스테이지에 놓이게 되는 시편은 마운팅 시 기움이 발생하게 되고 이 기움을 보정하는 기술이 필요하다. 본 연구에서는 우선 압입 표면을 X, Y 각 단계별로 프로파일을 구하였고 그 프로파일의 선형 직선기울기를 일차적으로 구하였고 각각의 단면에서의 기울기를

Fig. 3 Indented surface HEI images

구하였다. 최종 단면의 기울기는 각 단면 기울기들의 평균으로 하였고 이 평균기울기 만큼 압입표면의 기울을 보정하여 최종 압입부 표면을 구현하여 실제와 근접한 형상을 얻을 수 있었다.

Fig. 4 Original indented surface

3.2 기울 보정법

본 연구에서는 Matlab 언어를 사용하여 기울(tilting) 보정 소프트웨어를 개발하였으며 그 연구결과는 다음과 같다. Fig. 3은 HEI 이미지를 이용한 원래의 압입부의 표면을 나타내고 있다. 그림에서 많은 사진 노이즈가 포함되게 되어 있고 이 압입부 형상은 폭과 깊이도 비교적 미크론 단위로 정확하게 측정할 수 있었다.

Fig. 4의 압입부의 형상은 Fig. 3의 사진 이미지를 이용하여 압입부 형상을 구현한 것이다. 사진 이미지로 구현 하였기에 많은 잡음 특성을 나타내게 되며 이 잡음 때문에 표면 형상에서 많은 돌출부를 포함하고 있다. 그림에서 낮은 부분과 높은 부분의 위치가 원래의 형상과 다르게 보일 수 있고 기울임 보정이 되지 않은 상태로 나타날 수 있다. 즉 미소 압입면 형상에 경사가 있어 정확한 압입부 형상이 표현되지 않을 수 있다. 이처럼

(a) X-section(Y=70μm)

(b) X-section(Y=140μm)

(c) X-section(Y=210μm)

(d) X-section(Y=280μm)

(e) X-section(Y=350μm)

(f) X-section(Y=420μm)

Fig. 5 X-section tilting at Y=70μm

미크론 단위로 측정된 미소부 형상의 경사는 마운팅 오차로서 특히 확대되어 나타나게 되며 따라서 평탄치 못한 부분을 보정하여 정확한 압입표면과 형상을 구현할 필요가 있다. CLSM으로 측정 시에 스테이지에 놓이게 되는 미소표면은 항상 기울 문제가 발생하게 되는데 이를 보정하여 왜곡되지 않은 원래의

Fig. 6 X adjusted original surface after tilting

압입부 표면을 구현하는 기술이 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해 우선 가공면을 X, Y 각 단면에서 여러 단면으로 나누어 프로파일을 각각 구한다. 각 단면에서 프로파일의 선형직선 기울기를 각각 구한 후 이 기울기들의 전체 평균을 구해 이 평균 기울기만큼 가공면을 기울여 보정된 최종 가공면을 얻었다. 본 연구에서 Matlab 언어를 사용하여 미소표면 형상의 기울을 보정하는 프로그램을 개발 하였으며 각 단면에서의 표면 형상과 보정형상을 Fig. 5에서 볼 수 있다.

Fig. 5(a)-(f)는 원래의 압입부 형상의 HEI 데이터를 이용하여 구현된 CLSM 의 3 차원 형상에서 y 방향으로 80μm 씩 이동한 부근에서의 X-단면(Y=70, 140, 210, 280, 350, 420μm)을 순차적으로 구하여 표현하였다. 각 단면에서의 프로파일에서 압입형상의 위치에 따른 단면이 입체형상에서 보는 것처럼 높낮이의 차이가 있는 것을 알 수 있다. 이 그림에서 •지점이 원신호의 데이터를 나타낸 것이고, 이를 실선으로 연결하였다. 이

(a) Y-section(X=55μm)

(b) Y-section(X=110μm)

(c) Y-section(X=165μm)

(d) Y-section(X=220μm)

(e) Y-section(X=275μm)

(f) Y-section(X=330μm)

Fig. 7 Y-section tilting at X=55μm

Fig. 8 X, Y adjusted original surface after tilting

신호의 기울기를 나타내는 직선을 점선으로 표현하여 기울각을 구할 수 있고 이를 이용하여 원 신호를 기울각 만큼 기울여 보정할 수 있다. 이 보정된 프로파일이 평편한 형태의 실선으로 기울 보정된 프로파일 형상을 구할 수 있었다. 같은 방법으로 여섯 단면의 각 프로파일의 기울을 보정하였고, 이 전체의 기울임의 평균값을 구하여 이 기울만큼 전체 프로파일을 3 차원 형상에서 기울여 보정하였다. 이 보정된 형상은 x 방향으로만 기울 보정된 가공면 형상으로써 Fig. 6과 같이 표현된다. Fig. 6에서 y 방향으로로는 아직 기울 보정이 되어있지 않음을 확인할 수 있다. Fig. 7(a)-(f)의 Y-단면 형상을 단면별로 표현하고 있다. 각 그림에서 알 수 있듯이 본 연구에서 기울기 평균화를 하여 기울 보정을 한 형상은 원래형상보다 평편하게 나타나고 있으며 따라서 일반 형상의 평탄화에 이용될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 국부적인 변화가 심한 형상에서는 평탄화 보정에 오차가 많아지게 된다. 압입면의 경우 주변의 높이가 같고 일정한 경우 또한 가능한 데이터의 분포는 대칭형 일 때 오차가 없게 되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6은 x 단면에서는 기울이 보정되었지만 아직 y 방향으로 기울이 보정되어있지 않다. 따라서 Y-단면의 기울 보정이 되어야 하고 같은 방식으로 x 방향으로 $55\mu\text{m}$ 씩 이동한 부근에서의 Y-단면($X=55, 110, 165, 220, 275, 330\mu\text{m}$)을 순차적으로 구한 단면과 그 보정 프로파일을 Fig. 7에 표현 하였고 마찬가지로 각 단면 프로파일에서 위치에 따른 단면에서의 입체형상에서 반대편과 높낮이 차가 있는 것을 알 수 있다. Fig. 7에서 ●지점이 원신호의 데이터를 나타낸 것이고 이를 실선으로 연결하였다. 이 실선은 X-단면으로 보정시 y 방향으로 프로파일이 약간 기울어져 나타날 수가 있으며 이 기울어진 프로파일은 점선으로 표현하였다. 이 프로파일은 Y-단면에서 기울 보정이 되어야 하고 이 프로파일의 기울기를 나타내는 직선을 점선의 직선으로 표현하여 기울각을 구할 수 있고 이를 이용하여 마찬가지로 원 신호를 Y-단면에서 기울각 만큼 기울여 보정할 수 있다. 이 보정된 프로파일이 평편한 형태의 실선으로 기울 보정된 프로파일 형상이다. 같은 방법으로 여섯 단면의 각 프로파일의 기울을 보정하여 전체 프로파일을 3 차원 형상에서 기울여 보

Fig. 9 Original surface after adjusting in X,Y,Z

Fig. 10 Constructed wear volume

정한 형상은 Fig. 8과 같다. Fig. 8은 Fig. 6을 y 방향으로 기울 보정하여 구한 표면이고 이 형상은 Fig. 6 표면보다는 더욱 평편하게 x, y 방향으로 보정이 되어 있다. 그러나 이 형상도 x, y 방향으로로는 보정이 되어 있으나 z 방향으로의 높이 보정이 되어 있지 않다고 볼 수 있다.

Fig. 8은 y 방향으로 기울보정을 한 후의 표면형상으로서 x, y 방향 보정시에 발생하는 변형을 최종적으로 z 축 방향으로 다시 보정하여 줄 필요가 있다. z 축을 보정하기 위하여 압입면 외곽 경계의 평균치를 구하고 그 양 만큼 z 축 방향으로 보정을 하였으며 이렇게 x, y, z 방향으로 모두 보정된 압입면을 구하였다.

Fig. 9는 x, y, z 방향으로 모두 보정된 표면으로 원래의 압입면 형상을 근접하여 나타내고 있다. 따라서 이 압입 형상은 마운팅 오차를 보다 줄여 보정했다고 할 수 있고 원 압입부 형상과 잘 일치한다고 할 수 있다. 이 보정 표면을 이용하여 Fig. 10과 같이 구성된 형상으로부터 압입부의 체적을 구할 수 있었으며 체적의 계산을 위한 절차는 앞의 결과들을 순차적으로 수행하여야 한다. 순차적으로 수행하여 구한 체적값은 0.0014 mm^3 로 계산되었다.

4. 결론

HEI 이미지 데이터를 이용하여 압입부 형상 표면을 생성하여 압입부 형상을 구현하였고 그 주된 결론은 다음과 같다.

- (1) CLSM 의 HEI 이미지 데이터를 이용하여 압입부 형상을 구현 할 수 있고 이 압입부를 마이크론 단위로 측정할 수 있다. 또한 비접촉식 방식에 의한 압입부 체적 측정 기술은 체적을 이용한 경도 모델의 응용에 이용할 수 있다.
- (2) 본 연구로 개발된 기움을 고려한 형상 측정기법은 압입부 표면을 왜곡 없이 잘 표현할 수 있으며 특히 고주파의 성분을 포함하여 압입부의 형상을 표현 할 수 있었다. 구현한 압입부 형상을 기준으로 압입부 체적도 계산할 수 있었다.
- (3) 본 측정법은 3 차원적으로 압입부의 상태를 쉽게 표현하여 압입부 체적을 계산할 수 있고 계산한 체적을 이용하여 경도도 나타낼 수 있다. 이 측정법으로 계산된 체적은 로크웰이나 브린넬 등의 모델을 체적 변수로 수월하게 경도 모델로 표현하여 경도 분석에 아주 유용하게 사용할 수 있다.

References

- (1) Yang, J. Y., and Yoon, M. C., 2011, "Machined Surface Generation using Wavelet Filtering," *J. of MST*, Vol. 25, No. 3, pp. 639~645.
- (2) Yuan, C., Peng, Z., and Yan, X., 2005, "Surface Characterization using Wavelet Theory and Confocal Laser Scanning Microscopy," *Journal of Tribology*, Vol. 127, No. 2, pp. 394~404.
- (3) Corle, T., and Kino, G., 1996, *Confocal Scanning Optical Microscopy and Related Imaging Systems*, Academic Press, San Diego.
- (4) Yoon, M. C., 2008, "Droplet Geometry and Its Volume Analysis," *J. of KSTLE*, Vol. 24, No. 6, pp. 320~325.
- (5) Jeong, J. S., Cho, H. G., and Yoon, M. C., 2009, "Crater Wear Volume Calculation and Analysis," *J. of KSMTE*, Vol. 18, No. 3, pp. 248~254.
- (6) Cho, H. G., Chin, D. H., and Yoon, M. C., 2009, "Dynamic Filtering of End-milling Force using Wavelet Filter Bank," *J. of KSMTE*, Vol. 18, No. 4, pp. 381~387.
- (7) 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, No. 2, pp. 365~377.
- (8) 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. 181~183, No. 2, pp. 771~776.