

디지털 필터링을 이용한 마멸량 계산

전종하 · 구영필* · 조용주**

부산대학교 대학원 정밀기계공학과

*부산대학교 기계기술연구소

**부산대학교 공과대학 기계공학부

The Calculation of the Amount of Wear using Digital Filtering

Jong-Ha Jun, Young-Pil Koo* and Yong-Joo Cho**

Graduate School, Pusan National University

*Research Institute of Mechanical Technology, Pusan National University

**School of Mechanical Engineering, Pusan National University

Abstract – A new method to calculate the wear amount using surface profile signal was suggested. It takes advantage of filtering technic to estimate the original surface profile of wear track precisely. The original profile of wear track was estimated by comparing with outside of wear track. The estimated surface profile was well fitted to the original profile assumed unknown.

Key words – The amount of wear, digital filtering, low-pass-filter, waviness, roughness.

1. 서 론

상대 운동을 하는 두 물체의 가공 면에는 마찰과 그에 의한 마멸이 발생하므로, 두 표면의 마멸 상태는 기계 부품의 수명을 예측하거나, 판단하는데 중요한 기준의 하나이다. 마멸 상태는 마멸된 표면 형상의 상태를 광학 현미경이나, 전자 주사 현미경(SEM) 등으로 관찰하여 정성적으로 판단하거나, 마멸률을 측정하여 정량적으로 판단하게 된다.

마멸량의 측정은 측정 대상의 크기, 무게등에 따라 여러 가지 방법으로 이루어진다[1]. 전자 저울을 이용하여 무게의 감소를 측정하는 방법, LVDT 센서나 다이얼 게이지를 이용하여 측정된 길이 변화를 체적으로 변환시켜 구하는 방법, 표면 조도기를 이용하여 측정된 표면 형상을 이용하는 방법등이 있다. 전자 저울을 이용하는 경우는 측정하고자 하는 물체의 마멸량에 비해 물체의 무게가 무겁고 마멸량이 적을 경우, 전자 저울의 분해능에 따라서 부정확한 측정이 이루어질 수 있으며, 길이 변화를 측정하는 방법은 두 재료 중 한 재료의 경도가 큰 경우에만 사용할 수

있다는 단점이 있다. 표면 조도기를 통해 출력된 표면 형상의 파상도(waviness)를 이용하는 경우는 표면 거칠기 성분을 고려하기가 어렵기 때문에 길들이기 과정(run-in)과 같은 초기 마멸량을 계산하기가 어렵다. 또한, 표면 조도기에 의해 측정된 표면 형상을 이용하여 마멸량을 계산하는 다른 방법으로서, 푸리에 급수와 최소 자승법을 이용하여 마멸된 표면 형상의 마멸 전 형상을 추정하는 방법이 제시되었는데[2], 이 방법에서 식의 차수가 고차에 될수록 마멸된 부분에서 발산을 함으로서 정밀한 형상을 추정하지 못하는 단점이 있었다. 또 다른 방법으로서, 비커스 경도계를 이용하여 고압, 고 마찰이 발생하는 실린더의 마멸량을 측정하는 방법이 제시되었는데[3], 이 방법은 마멸이 심하게 발생하여 경도계의 압흔이 없어질 경우 마멸량을 측정하기 어려운 점이 있다. 본 연구에서는 측정된 표면 형상을 이용하여 마멸량을 계산하는 새로운 방법으로서 표면 조도기를 통하여 마멸 시험 전 측정된 표면 형상을 이용하여, 마멸 실험 후 측정된 표면 형상의 마멸 이전 표면 형상을 정밀하게 추정하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 마멸량 계산을 위한 표면 형상 추정 절차

2-1. 마멸량 계산 방법

표면 조도기를 이용하여 마멸량을 계산할 경우, 보통 마멸 실험후 측정된 표면 형상에서 마멸이 된 부분의 단면적을 이용하여, 마멸량을 계산한다. 이러한 마멸이 된 부분의 단면적을 계산하기 위해서 기준선이 설정되어야 하는데, 기준선의 형상이 마멸이 된 부분의 마멸 전 형상과 유사하거나 같다면 더욱 정밀한 마멸량 계산이 가능할 것이다. 이러한 표면 형상은 기계 공구의 진행 방향으로의 공구의 회전이나 열 변형에 의한 긴 파장의 성분, 기계 공구의 진동에 의해 발생하는 파장이 긴 파상도, 연마 과정 등에 의해 발생하는 거칠기 성분으로 이루어지며, 이 성분들이 조합되어 하나의 표면 형상을 나타내게 된다[4]. 가공된 표면에서의 표면 형상들은 유사한 형상을 이룬다. Fig. 1은 연삭 가공을 통해 얻어진 재질의 표면 형상을 측정한 것이다. Fig. 1에 나타나듯이 측정된 표면 형상들은 각각 비슷한 형상을 이루고 있음을 알 수 있다. 이 유사성을 이용하여 마멸량 계산을 위한 기준 형상에 해당하는 표면 형상을 유추하기 위하여 마멸 실험 전에 표면 조도기를 사용하여 표면 형상을 여러 개 획득하고, 마멸 실험이 끝난 후 획득된 표면 형상에서 마멸이 발생하지 않은 부분의 파상도와 거칠기 성분을 비교하여 각각 가장 유사하다고 판단되는 표면 형상의 파상도와 거칠기를 합성하여 마멸 전 형상으로 추정하고, 추정

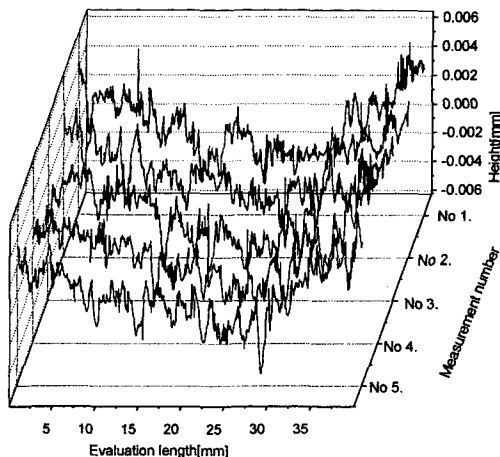


Fig. 1. Measured surface profiles.

된 형상을 이용하여 마멸 단면적을 계산한다.

2-2. 표면 형상 추정 과정

2-2-1 표면 형상 측정 및 움직이는 창

마멸 전 표면 형상의 측정은 마멸 실험 후 측정할 표면 형상 측정 길이보다 2배정도 길게, 그리고 일정 간격으로 여러 개의 표면 형상을 측정한다. 이는 마멸 전 형상을 측정된 위치에서 마멸 후 형상을 정확히 측정하기 어려우므로 마멸 후 형상 측정시 측정 위치의 변화를 고려한 것이다. 마멸 후 형상은 마멸 전 형상들이 측정된 부위에서 측정을 하여 구한다.

마멸 후 측정된 표면 형상의 마멸 전 형상 추정은 마멸 후 측정된 표면 형상의 마멸 트랙 주위 형상을 이용하여 마멸 전 측정된 표면 형상들과 동일한 부분에서 파상도와 거칠기를 비교한다. 이때 마멸 전 형상은 마멸 후 형상보다 측정 길이가 2배정도 길며, 측정 위치에 차이가 있으므로, 마멸 후 측정된 표면 형상의 측정 길이의 크기를 움직이는 창의 크기로 설정하고 마멸 전 형상의 구간을 움직이면서 가장 유사한 파상도와 거칠기를 구하게 된다. 움직이는 창(moving window) 내에서의 마멸 전 표면 형상과 마멸 후 표면 형상은 마멸 트랙 주위의 높이 값들에 대해 최소 자승법을 이용하여, 곡선 적합(curve fitting)된 직선을 기준으로 높이 값들을 재조정한다. 이것은 비교되는 마멸 전 표면 형상의 값들을 움직이는 창의 크기에 맞게 높이 값을 재조정한다는 것을 의미한다.

2-2-2. 필터(filter)의 선정

필터는 표면 형상을 파상도와 거칠기 성분으로 분리시킬 수 있으므로, 본 논문에서 필터는 마멸 전 형상을 추정하기 위한 파상도와 거칠기 성분을 얻기 위해 사용되었다.

일반적으로 필터는 정해진 조건에 따른 위상이나 크기 응답(magnitude response)을 동시에 만족시키지 못하므로, 사용 조건에 적합하도록 필터를 설계하여야 한다. 본 논문에서 사용된 필터는 위상보다는 크기 응답에 중점을 두고 통과 대역(pass band)에서 맥동(ripple)이 발생하지 않는 필터를 설계하였다. 이는 통과 대역에서의 맥동 발생은 필터링 시 표면 형상의 높이 값의 왜곡을 발생시킬 수 있기 때문이다. 또한, 마멸량 계산에는 동일 조건의 필터를 사용하여 필터링 된 파상도와 거칠기를 비교하기 때문에 천이 영역(transient region)과 위상 응답(phase response)은

고려하지 않았다. 본 연구에서는 Butterworth 필터를 이용하여 표면 형상 신호로부터 파상도 성분을 분리하였다.

Butterworth 저역 통과 필터의 차수는 식(1)에 의하여 결정된다.

$$n = \frac{a}{20 \log_{10} \frac{w_f}{w_c}} \quad (1)$$

여기서, a 는 감쇠(dB), w_c 는 차단 주파수, w_f 는 최소 감쇠에서의 주파수.

저역 통과 필터의 특성은 표면 형상의 일반적인 규격에서 규정되고 있는 값들을 사용하였다[5][6][7]. 즉, 감쇠비는 -12 dB/oct이며, 차단 값에서 이득은 75%로 설정하였다. 이 특성을 갖는 Butterworth 필터의 차수는 2차이며, 일반화된 필터(normalized filter)는 아래와 같다.

$$H_n(s_n) = \frac{1}{s_n^2 + \sqrt{2}s_n + 1} \quad (2)$$

식(2)를 식(3)의 관계를 이용하여 w_c 의 차단 주파수(cut-off frequency)를 가지는 연속 저역 통과 필터(continuous lowpass filter)로 변환하면 식(4)와 같다.

$$s_n = \frac{s}{w_c} \quad (3)$$

$$H(s) = \frac{w_c^2}{s^2 + \sqrt{2}w_c s + w_c^2} \quad (4)$$

식(4)를 식(5)의 관계를 이용하여 디지털 필터(digital filter)로 변환시킨다.

$$s = c \frac{z-1}{z+1} \quad (5)$$

여기서 $c = \frac{2}{T}$ T 는 sampling interval. 식(4)와 식(5)의 관계에 의하여 구하고자 하는 디지털 필터는 식(6)의 전달 함수로 나타난다.

$$H(z) = \frac{w_c^2(z^2 + 2z + 1)}{a_1 z^2 + a_2 z + a_3} \quad (6)$$

여기서, $a_1 = (c^2 + \sqrt{2}w_c c + w_c^2)$
 $a_2 = (2w_c^2 - 2c^2)$
 $a_3 = (c^2 - \sqrt{2}w_c c + w_c^2)$
 $w_c = 2\pi f, f = \frac{v}{\lambda_c}$

v 는 스타일러스(stylus)의 이송 속도 λ_c 는 차단 값(차단 파장).

Fig. 2는 설계된 filter의 특성을 보드 선도(Bode diagram)로 나타낸 것이며, 차단 값이 0.8 mm일 때의 특성을 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 설계된 filter는 설정된 조건을 만족함을 알 수 있다.

2-2-3. 차단 값 설정 및 오차

설계된 필터를 사용하여 저역 통과 필터를 하고자 할 때 차단 값이 설정되어야 한다. 차단 값은 파장으로 설정이 되며, 설정된 차단 값을 기준으로 차단 값 이상의 파장을 가지는 성분만 통과시키고, 그 이하의 파장을 가지는 성분은 차단시킴으로서 저역 통과 필터링을 하는 것이다. 일반적으로 표면 조도 기에서는 차단 값을 측정 길이의 1/3배로 설정하여 파상도를 구하고 있다[5][6][7]. Fig. 3은 측정된 표면 형상의 파장의 1/3배 되는 파장을 차단 값으로 설정하고 필터링 하여 파상도를 구한 것이다. 차단 값의 선정 문제에서 차단 값을 달리 하더라도 마멸 전 형상 추정의 결과는 변화가 없는 것으로 나타나는데, 이는 차단 값에 따라 나타나는 파상도 그 자체가 측정된 표면 형상의 고유 특성의 하나이기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 차단 값을 측정 길이 또는 필터링하고자 하는 파장의 1/3배로서 설정하였다. 측정된 표면 형상들의 파상도와 거칠기를 비교하기 위해 식(7)과 같이 오차 값이 가장 작은 파상도와 거칠기를 각각 선택하여 이들을 합성한 형상을 마멸 전 형상으로 가정한다.

$$error = \sum_{i=1}^N \frac{|z(i) - \hat{z}(i)|}{N} \quad (7)$$

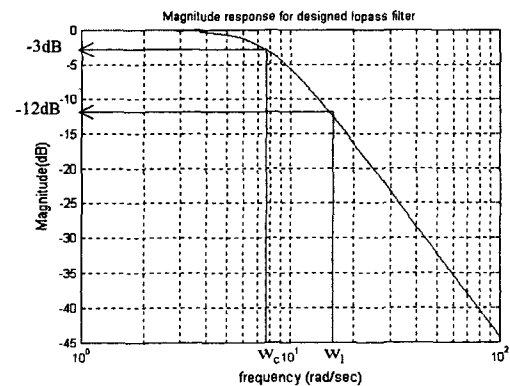


Fig. 2. Magnitude response for designed filter : the 2nd Butterworth lowpass filter (cut-off value = 0.8 mm).

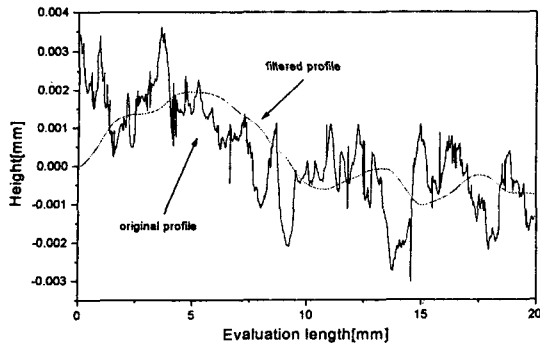


Fig. 3. A result of filtering using designed filter : the 2nd Butterworth lowpass filter (cut-off value = 6.67 mm).

단, N = the number of data points

$z(i)$ 는 마멸 트랙 주위의 마멸 전 측정된 표면 형상의 높이 값.

$z'(i)$ 는 마멸 트랙 주위의 마멸 후 측정된 표면 형상의 높이 값.

위의 과정을 거쳐 마멸 트랙 주위에서 파상도가 가장 유사한 마멸 전 형상의 파상도를 선택하고 같은 방식으로 거칠기를 선택하여, 두 개의 형상을 합성하고 합성된 형상을 마멸 전 형상으로 추정한다.

3. 검증 및 결과

위의 절차에 의한 마멸 전 형상 추정 방법에 대한 검증으로서 측정된 표면 형상의 일부분을 마멸 후 측정된 형상이라 가정하고, 위의 이론적 절차에 따른 결과가 정확한 위치를 찾아내는지 검증하였다. Fig. 4와 같이 마멸 실험 후 측정된 표면 형상이라 가정된 형상은 3가지 경우이며, 이는 실제 마멸 실험 후 표면 형상 측정시 측정 위치의 변화를 모두 고려한 것이다. case 1의 경우는 마멸 전 표면 형상을 측정된 위치에서 마멸 후 표면 형상을 측정하는 경우이고, case 2는 마멸 후 측정된 표면 형상이 마멸 전 측정된 표면 형상들 사이에서 평행한 방향으로 측정된 경우이며, case 3은 마멸 후 측정된 표면 형상이 마멸 전 형상에 대해 비스듬하게 기울어져 측정되는 경우이다. 마멸 전 표면 형상의 추정을 위해 사용된 시편의 R_a 값은 $1.2 \mu\text{m}$ 와 $0.64 \mu\text{m}$ 의 2가지로서 상대적으로 표면이 거친 경우와 매끈한 경우에 대해서 검증을 하였다. 마멸 전 표면 형상으로 가정된 것은 $1/100 \text{ mm}$ 간격으로 20 개를 측정하였고,

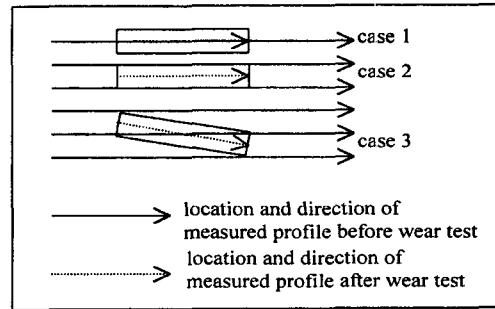


Fig. 4. Location and direction of measured profile before and after wear test.

마멸 후 측정된 형상으로 가정된 것은 Fig. 4에서처럼 case 1, 2, 3에 해당하는 위치에서 측정을 하였다.

Fig. 5는 위의 검증에 대한 결과이다. 그림에서 A 구간은 마멸이 일어난 부분으로 가정된 부분으로서, 이 구간에 해당하는 길이만큼의 표면 형상을 제외하고 마멸 전 표면 형상을 추정하도록 하였다. Fig. 5의 (a)는 R_a 가 $0.64 \mu\text{m}$ 이고 case 2에 해당하는 것으로서 추정된 표면 형상이 마멸 후 측정된 형상이라 가정된 형상과 거의 일치함을 알 수 있다. 이것은 시편의 표면이 균일하여 비슷한 표면 형상들이 분포하고 있기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 5의 (b), (c), (d)의 경우는 R_a 가 $1.2 \mu\text{m}$ 인 표면 형상들의 case 1, 2, 3의 경우에 해당하는 추정 결과이다. case 1의 경우는 원래 형상을 정확히 추정하고 있다.

case 2의 경우도 거의 유사하게 추정 해 념을 알 수 있다. case 3의 경우는 파상도에서 차이가 발생함을 볼 수 있다. 이것은 표면이 거칠기 때문에 측정된 형상은 기울어진 각도에 영향을 많이 받으므로, 마멸 후 측정된 표면 형상과 유사한 파상도 성분과 거칠기 성분을 구하기 힘든 것으로 판단된다. 따라서, 마멸 후 측정되는 표면 형상의 측정 위치가 기울어질 경우에 대비하여 마멸 전 측정되는 표면 형상의 측정 범위와 개수를 증가시키는 것이 좀더 정밀한 형상을 추정할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

정밀한 마멸량 계산을 위하여 마멸 시험 전 표면 형상을 이용하여 마멸 부위 표면 형상의 마멸되기 전 형상을 추정하는 방법을 제시하였다. 마멸된 부위 및 그 부근의 표면 형상 중 마멸로 손상되지 않

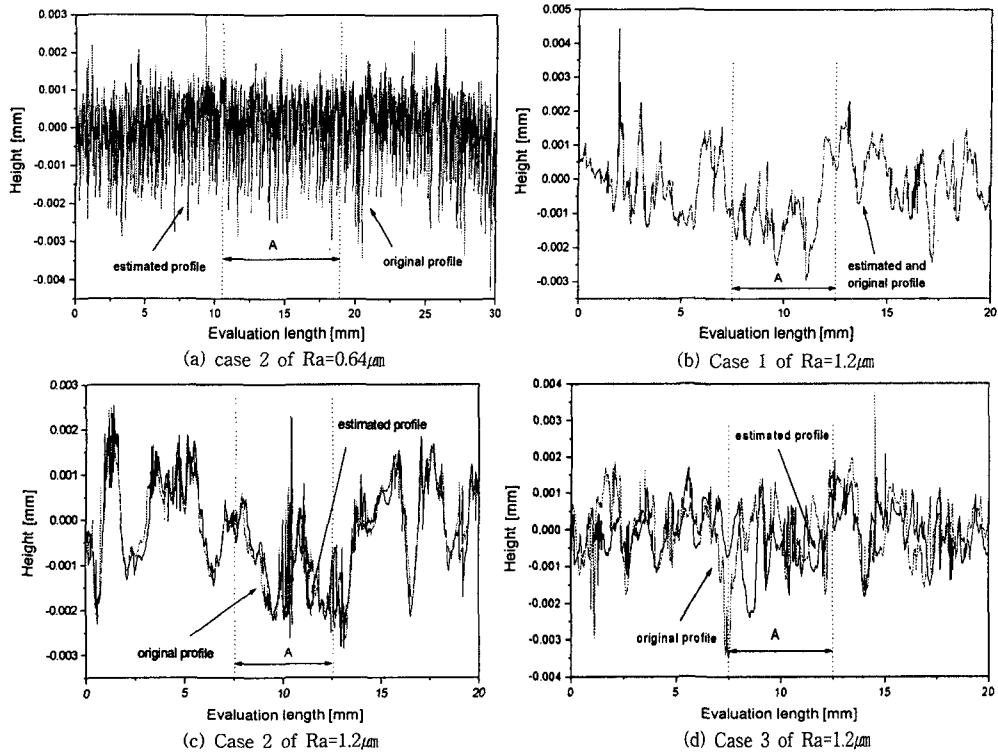


Fig. 5. Results of estimated surface profile.

은 부분의 파상도 및 거칠기 성분과 마멸 시험 전 측정된 형상들의 파상도와 거칠기를 비교하여 가장 유사한 형태를 띠는 성분들을 선택하여 합성시킴으로서, 마멸 전 형상을 추정하는 기법을 개발하였다.

이 기법을 이용하여 추정된 형상의 원래 형상과 비교로 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 마멸 후 표면 형상과 마멸 전 표면 형상의 파상도와 거칠기 성분을 분리하여, 마멸이 되지 않은 부분에서 각각의 오차가 가장 작은 성분을 구한 후, 합성했을 때 마멸이 된 부분의 마멸 전 형상을 정밀하게 추정할 수 있었다.

2. 표면 거칠기 성분까지 추정이 가능하므로, 일반적으로 측정하기 힘든 길들이기 과정에서 발생하는 미소 마멸량의 계산이 가능할 것이다.

참고 문헌

1. 공호성, “재료의 마찰과 마멸,” TRIBOLOGY 技術

제16차 KIST-KITA 협동 전문 기술 교육 과정, pp. 216-221, 1994.

2. 진종하, 구영필, 조용주, “푸리에 급수와 최소 자승법을 이용한 마멸량 측정,” 제 28회 춘계학술대회, 한국윤활학회, pp. 300~305, 1998.

3. 엄재천, 정동윤, 공호성, “Vickers Indentor를 이용한 고마찰, 고압 실린더의 정밀마모추정에 관한 연구,” 제 27회 춘계학술대회, 한국윤활학회, pp. 69-76, 1998.

4. David J Whitehouse. “Handbook of Surface Metrology,” Institute of Physics Publishing for Rank Taylor Hobson Ltd. pp. 7-40.

5. 日本工業標準調査會, 表面粗さ(JIS B 0601). 日本規格協會. 1976.

6. 日工業標準調査會, 表面うねりの定義と表示(JIS B 0610). 日本規格協會. 1976.

7. The Form Talysurf Series2 Operator’s Handbook. Rank Taylor Hobson Limited.

8. Edward P.Cunningham, “Digital Filtering : An Introduction,” JOHN WILEY & SONS, INC.