

표면 Profile 해석을 이용한 마멸량 계산 알고리즘 개발

김형규[†] · 김선재*

한국원자력연구소, *한국원자력안전기술원

Development of Algorithm for Wear Volume Evaluation using Surface Profile Analysis

Hyung-Kyu Kim and Seon-Jae Kim*

Korea Atomic Energy Research Institute, *Korea Institute of Nuclear Safety

Abstract – A method of calculating wear volume is developed using the signal processing technique. The low-pass filter with Fourier transform and the “windowing” are implemented in the method. User-defining feature is also included in determining the cutoff frequency of the low-pass filter and the baseline for the volume integration. Commercial software, MatLab[®], is used for the programming. Since the method uses the original wear data without simplifying the wear shape, it can give a further accurate result than the previously utilized methods, which often adopted the simplification. It becomes further powerful if the contacting body has a general shape rather than that gives well-formed surface traction (e.g., the Hertzian). The validation of applying the average surface roughness, R_a , to the “windowing” and the baseline for volume integration is discussed.

Key words – Wear volume, cutoff frequency, windowing, surface roughness.

1. 서 론

두 물체가 접촉하여 상대운동을 하는 기계 구조물에서는 접촉부에 마멸 형태의 손상이 자주 발생한다. 이때 마멸은 접촉부에서의 구조적 성능을 저하시킴으로써 물체의 수명을 감소시킨다. 따라서 마멸에 대한 연구는 기계 구조물의 수명 평가와 밀접한 연관이 있으며, 아울러 수명 연장을 위한 연구를 위해서도 필요하다. 마멸 연구에서는 실제의 마멸조건(즉, 재질, 환경, 하중 또는 응력 등)과 동일한 실험적 연구를 수행하는 경우가 많다. 이때 시편에 발생하는 마멸에 대한 정량적 분석이 요구되기도 한다. 이러한 마멸 분석을 위해, 간편한 방법으로 보다 정확한 정량화가 가능하다면 마멸 연구에 큰 도움을 줄 수 있다. 한편, 마멸의 정량화에 있어서는 일반적으로 마멸 깊이, 마멸 길이 및 폭, 마멸 영역, 마멸에 의해 원 재료로부터

터 이탈된 부분의 무게 또는 그 부피 등을 대상으로 하게 된다.

마멸부의 무게를 측정하기 위해서는 정밀한 전자저울을 많이 사용하고 있으며, 이때에는 마멸부의 무게가 전체 시편의 무게에 대해 판별할 수 있을 정도가 될 필요가 있다. 즉 마멸부가 전체 시편에 비해 아주 작다면 정밀저울 이라 하더라도 마멸부의 무게가 저울의 측정 정밀도 이하로 될 가능성이 높다. 따라서 시편의 설계 및 초기 계량에 상당한 노력과 주의가 필요하게 된다. 이에 비하여 마멸부의 치수(깊이, 길이, 폭 등)를 측정하는 것은 상대적으로 쉬운 마멸의 정량화 방법이 된다.

마멸부의 치수를 측정하는 도구로서는 접촉식으로서 표면 거칠기 측정장비 또는 비접촉식으로서 레이저 등의 광학을 이용한 표면 측정장비를 많이 사용하고 있다. 이들은 마멸부의 형상을 좌표 값으로 나타내는 방법을 사용한다. 그런데 측정된 좌표 값으로부터 마멸부의 형상을 직접 파악할 수는 있으나, 마멸 정도의 비교 분석을 위해 마멸 부피를 구하여야 할 경우가 많다. 마

[†]주저자 · 책임저자 : 김형규

E-mail : hkkim@nanum.kaeri.re.kr

멸 부피를 구하고자 할 때에는 측정 결과로 얻게 되는 좌표 값으로부터 계산을 수행하여야 한다. 이때 계산의 편의성을 위해 마멸부위를 부분적인 구[1] 또는 타원체[2,3]등의 단순한 기하학적 형상으로 가정하기도 하였다.

접촉물체의 형상이 구 또는 원통으로서, 접촉 응력장이 헤르쯔 응력[4]으로 되는 경우에는, 마멸부를 구 또는 타원체의 일부분 같이 단순 형상으로 가정할 수 있는 경우가 있을 수 있으나 일반적인 접촉물체의 경우에는 적용하기 어렵다. 또한 마멸 시험의 조건에서 부분미끄럼(Partial Slip)이 되는 경우, 고착 영역과 미끄럼 영역의 경계는 이론적 해(Mindlin-Cattaneo Problem)[5]로부터 구할 수 있으나, 미끄럼 영역에서 대부분 발생하는 마멸의 부피를 위와 같이 단순한 형상으로 가정하여 계산하면 많은 오차를 포함하게 된다. 따라서 마멸 부피를 계산할 때 오차를 줄일 수 있는 방안을 개발할 필요가 있다.

이에 대해 최근 국내에서는 푸리에 급수(Fourier Series) 등을 이용하여 마멸부의 profile로부터 마멸 전의 형상을 예측하고 디지털 필터링을 이용함으로써 마멸 부피 계산 시의 오차를 줄일 수 있는 방안이 제시된 적 있다[6,7]. 이 연구에서는 마멸 부피 계산을 위한 적분의 기준선 설정을 위해 마멸 전 profile을 이용하고자 한 것으로서, 3차원 형상의 마멸부피를 계산하기 위해, 표면 거칠기 측정장비로부터의 2차원 데이터(측정 방향에 대한 마멸 깊이) 각각에 대해 마멸 전 profile을 추정하고 이로부터 마멸영역에 대한 면적을 구하는 것을 제시하고 있다. 따라서 3차원적 형상인 마멸부의 부피를 구하기 위해서는 측정 방향에 수직인 방향으로의 계산이 추가로 수행되어야 하며 그 방향으로 역시 거칠기 데이터를 가질 것이므로 제안된 방법을 적용하기 위해서는 측정 방향에 수직인 방향으로의 마멸 전 profile도 함께 구하여야 하므로 다소 복잡한 방법이라 사료된다.

본 연구에서는 이에 비해 일반적인 신호처리에서 사용하는 방법을 이용하여 상대적으로 간편한 마멸 부피 계산 방법을 제안하고자 한다. 제안하고자 하는 방법은 측정된 마멸 형상 데이터 전체에 대해 2차원 푸리에 변환(Fourier Transformation)과 “Windowing”[8] 기법을 사용하고, 이와 함께 부피 계산을 위한 적분의 기준선을 조정할 수 있는 기능이 포함된 것이며 이를 수행할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 이를 통하여 표면 거칠기 측정장비를 이용하여 마멸부 형상을 측정

한 경우, 오차를 감소시키면서도 적용이 용이한 마멸 부피의 계산 방법을 제안하고자 하였으며, 현재 수행하고 있는 마멸 시험의 결과에 적용하여 그 효용성에 대한 검토를 하였다.

2. 마멸의 측정

표면 거칠기 측정장비를 이용한 마멸부위의 측정은 탐침(Stylus)을 마멸이 있는 물체에 접촉시킨 상태에서 측정자가 원하는 거리 만큼 이동시킬 때에 탐침의 끝 점이 측정하는 스캔 라인상에서 마멸면의 높이를 2차원 좌표 값으로 나타내는 것이다. 대부분의 상용 표면 거칠기 측정장비는 측정 결과인 좌표 값을 이용하여 표면 거칠기에 대한 국제 규격 파라미터를 계산하여 출력할 수 있는 기능을 갖고 있다. 마멸의 측정을 위해 표면 거칠기 측정장비를 이용하는 것은 일반적으로 장비의 측정 정밀도 및 분해능이 마멸부의 profile을 나타내는 데에 충분하여 측정 데이터의 신뢰성이 양호하기 때문이다.

표면 거칠기 측정장비를 이용할 경우, 탐침의 1회 이동 시에 얻게 되는 2차원적인 데이터는 일정한 거리 간격으로 기록된다. 그러므로 전체적인(즉 3차원적인) 마멸의 형상을 파악하기 위해서는 탐침의 진행방향에 직각(마멸부의 폭 방향)으로 측정 대상물을 이동하며 반복적인 측정을 수행하게 된다. 이와 같은 방법으로 측정된 마멸부위의 형상은 Fig. 1에서 보여 주는 것과 같이 Waterfall Chart 형식으로 재 구성할 수 있다. 즉, 표면 거칠기 측정장비에 의한 마멸 측정 결과는 마멸부의 길이 및 폭 방향을 따라 이산 데이터가 된다. 따라서 마멸 부피를 보다 정확히 구하기 위해서

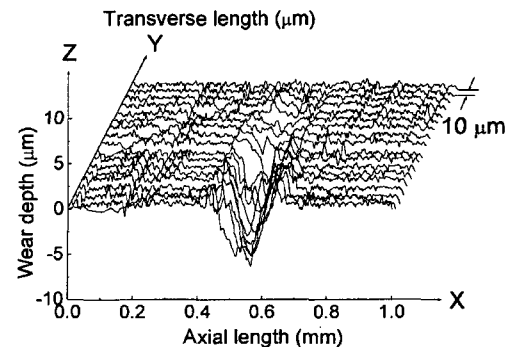


Fig. 1. Measured profile of the worn surface from surface roughness tester.

는 데이터 사이의 간격이 좁을수록 유리하다. 한편 표면 거칠기 측정장비에서 제공하는 탐침의 진행 방향으로의 데이터 사이 간격은 전체 측정 길이에 따라 달라지나 대개 0.5 μm 또는 1 μm으로서 상당히 조밀하다.

3. 마멸 부피 계산 알고리즘

표면 거칠기 측정장비로부터 얻게 되는 Fig. 1과 같은 데이터로부터 알 수 있는 것은 마멸부의 데이터가 마멸이 되지 않은 부분의 그것보다 주파수 성분이 현저히 낮다는 것이다. 마멸부 데이터의 주파수가 상대적으로 낮은 것은 마멸 전 시편 표면의 거칠기에 해당하는 높은 주파수의 요철이 접촉 물체의 상대 운동에 의해 소멸되기 때문으로 추정된다. 따라서, 마멸 부피를 구하기 위해서는 주파수가 낮은 마멸부를 마멸이 되지 않은 부분과 구분이 되도록 하는 방법을 사용하는 것이 효과적일 것이다. 이를 위해서 진동해석 시에 많이 사용하는 신호처리 방법을 활용할 수 있다.

3-1. 마멸부 데이터의 분리

마멸되지 않은 부분으로부터 마멸부를 분리하기 위해 마멸부를 포함하는 표면 profile 데이터를 주파수 영역으로 바꾸는 푸리에 변환을 한다. 이때 탐침의 이동 방향인 x축과 3차원적 형상 생성을 위해 측정 대상물을 x축에 수직하게 이동시키는 방향인 y축을 동시에 변환하는 2차원 푸리에 변환을 수행한다. 푸리에 변환이 완료된 데이터에서 마멸되지 않은 부분의 거칠기 주파수인 고주파 영역을 제거한다. 이 방법은 신호처리 방법에서 일반적으로 사용하는 저 대역 통과 필터(Low-pass Filter)를 적용하는 것으로 앞선 연구[6]에서도 언급이 되어 있다. 본 연구에서 제안하고 있는 방법은, 표면 거칠기 측정장비에 있는 필터 대신, 원래의 데이터에 대해 주파수 영역에서 사용자가 임의로 필터링하는 차단 주파수(Cutoff Frequency)를 설정하는 것이다. 이것은 Fig. 2와 같은 형태의 필터로써 표면 거칠기의 상태에 따라 x축 및 y축, 각각에 대해 적절한 통과 대역을 자유로이 설정할 수 있는 이점이 있다. 필터링을 거친 데이터는 푸리에 역변환(Inverse Fourier Transformation)을 하여 측정면을 재 구성한다. 이와 같은 방법을 통하여 원래의 측정 결과를 마멸이 없는 부위의 고주파 성분이 제거되고 낮은 주파수 성분의 부드러운 곡선으로 재 구성할 수 있다.

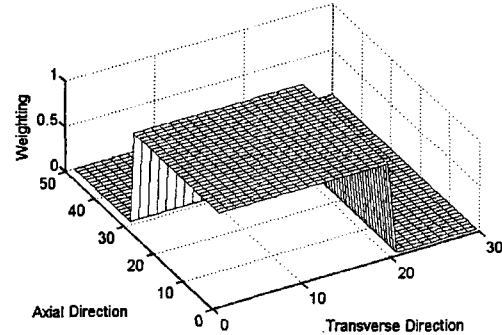


Fig. 2. Low pass filter shape in frequency domain (cutoff frequency: 20th and 30th components in transverse and axial direction, respectively).

마멸 부피를 계산하는 방법은 궁극적으로 표면 profile에서 마멸되어 아래로 들어 간 부분의 체적을 적분으로 구하는 것이므로 적분을 위한 기준 선의 설정이 필요하다. 푸리에 역변환을 거친 데이터는 비록 고주파 성분이 제거되었지만 마멸이 없는 부분의 진폭은 남아 있으므로, 이 진폭을 최대한 줄이게 되면 마멸 부피를 계산하기 위한 기준선의 설정이 용이할 것이다. 즉, 마멸부의 진폭은 거의 변화시키지 않으면서 마멸되지 않은 부위의 진폭을 현저히 줄여 주는 방법을 적용하는 것이다. 이것은 다음과 같은 창함수(Window Function)를 이용하는 “Windowing” 기법을 적용함으로써 가능하다.

$$Z(x,y) = w(x,y) \cdot (1 - e^{-|w(x,y)|/K}) \quad (1)$$

여기서, $w(x,y)$ 는 푸리에 역변환이 완료된 데이터이며 $Z(x,y)$ 는 마멸 부피 계산에 사용될 데이터이다.

식 (1)에서 K 값은 $w(x,y)$ 의 크기를 변화시키는 파라미터로서 $K = w(x,y)$ 일 때 $Z(x,y)$ 는 $w(x,y)$ 의 약 63.2% 정도가 된다. 대부분 실제의 계산에서는 K 값으로서 마멸이 되지 않은 부분의 평균 거칠기(Ra)를 대입하여 이보다 작은 진폭을 현저히 줄였으며 Ra 를 적분을 위한 기준선으로 사용하였다. 그러나 만일 마멸되지 않은 부분의 거칠기 데이터가 큰 편차를 가질 경우를 고려하여 K 값을 사용자가 조정할 수 있도록 하였다. 이러한 경우는 Fig. 1과 같은 표면 profile로부터 알 수 있으며, 이때 K 값으로서 표면 거칠기 데이터 중 마멸 깊이 방향으로의 최대값을 사용하거나 또는 Ra 에 거칠기 데이터의 표준편차를 더한 값을 사용하는 것을 제안할 수 있다. 각각에 대한 선택은 사용자가 측정된 표면 profile을 세밀하게 관찰함으로써 결

정할 수 있을 것이며, 이를 동일 종류의 시편 및 시험에 공통적으로 적용함으로써 마멸 부피의 비교분석 결과에 대한 신뢰성을 보장할 수 있을 것이다.

3-2. 마멸 부피 계산

식 (1)과 같은 “Windowing”을 거친 후, 마멸부를 포함하는 표면의 형상 데이터 $Z(x,y)$ 를 이용하여 마멸 부피를 계산하게 된다. 이때 $Z(x,y)$ 는 마멸 깊이가 표시되는 등고선 그래프로도 나타낼 수 있으며 마멸 부피 적분을 위한 기준선으로서 식 (1)의 K 값이 다시 적용되게 된다. 한편 $w(x,y)$ 를 구성하기 위해서는 표면 거칠기 측정장비의 탐침이 진행되는 방향에 수직한 방향으로의 측정 데이터를 연결하여야 한다. 측정 시에는 표면 거칠기 측정장비의 탐침이 진행되는 동일 거리에 대해 탐침의 진행 방향과 수직한 방향(Fig. 1에서의 y 축)으로 측정 대상물을 이동하며 측정을 반복하게 되므로 y 축 방향으로의 데이터 수(즉 이동 회수)는 탐침의 진행 방향(x 축)에서 얻게 되는 데이터 수에 비해 일반적으로 매우 적다. 이러한 이유로 부피 계산을 위하여 x 축 상의 동일한 위치에서 y 축 방향으로 인접한 두 개의 데이터를 연결할 때에는 y 축 방향으로의 이동 회수에 따라 적절한 연결 방법을 사용하여야 할 필요가 있다.

y 축 방향으로 인접한 두 개의 데이터 사이의 간격이 x 축에서와 같이 충분히 작을 때에는 선형적으로 연결하여도 오차가 작을 수 있으나 그렇지 않을 경우는 2차 이상의 곡선으로 연결하는 것이 바람직할 것이다. 시험 측정에서 x 축 방향으로 $0.5 \mu\text{m}$ 씩 증분되는 데이터가 입력될 때, 측정 대상물을 y 축 방향으로 $10 \mu\text{m}$ 의 증분으로 이동시키는 경우, y 축 방향으로의 인접 데이터 사이를 3차 곡선(Cubic Spline)을 사용하여 연결하였다. 한편 마멸 부피의 계산에 필요한 푸리에 변환 및 역변환, 필터링, 그리고 적분 등은 상용 프로그램인 MatLab®(version 5.3)[9]을 이용하여 패키지 형태의 프로그램을 작성하였다. 이때 사용된 알고리즘을 나타내면 Fig. 3과 같다.

4. 마멸량 분석 결과 및 고찰

본 절에서는 Fig. 3의 알고리즘 중 사용자가 설정할 수 있는 저 대역 통과 필터링 시의 주파수와 식 (1)에서 K 값의 변화에 따른 마멸 부피의 차이에 대해 고찰해 본다. 마멸 시험에는 Fig. 4에 보여주는 자체 개발한 장비를 사용하여 상온, 공기 중에서 수행하였으

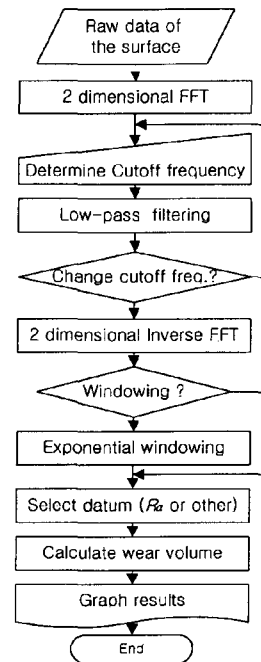


Fig. 3. Flowchart of the present method for wear volume evaluation.

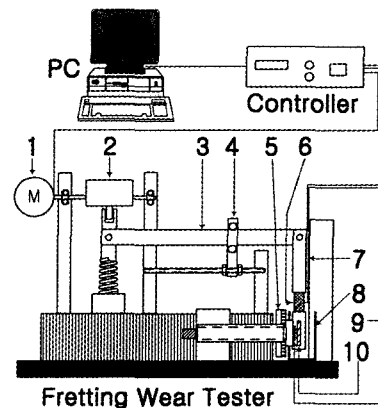


Fig. 4. Schematic diagram of fretting wear tester; 1: Servo-Motor, 2: Eccentric Cylinder, 3: Lever, 4: Movable Hinge, 5: Rotating Device, 6: Biaxial Loadcell, 7: LVDT, 8: Water Tank, 9: Stationary Specimen (Spring), 10: Oscillatory Specimen (Tube).

며, 시편으로는 지름 9.5 mm, 두께 0.64 mm 그리고 길이 50 mm의 지르칼로이 튜브 2개를 직교시켜 접촉하게 하였다. 두 시편의 상대 운동 변위는 $15 \mu\text{m}$, 접촉 수직하중은 20 N으로 하였으며 30 Hz로 300,000회의 반복 사이클을 가한 후 마멸면을 측정하였다. 마멸

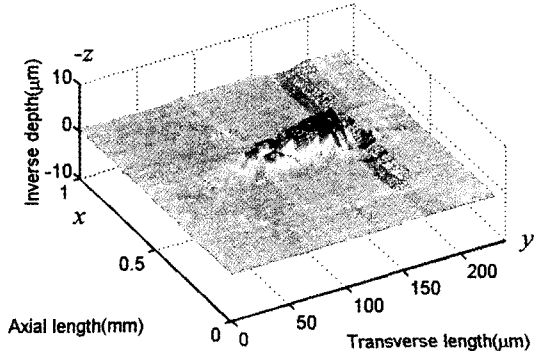


Fig. 5. Reconstituted worn surface of Fig. 1.

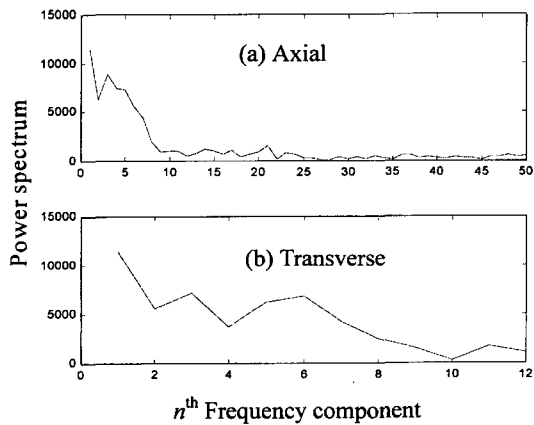
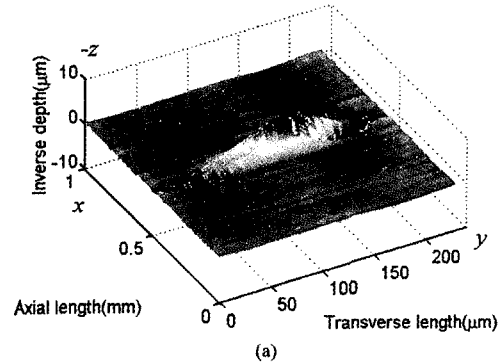


Fig. 6. Frequency distribution of the surface data of Fig. 5: (a) axial (x) direction (b) transverse (y) direction.

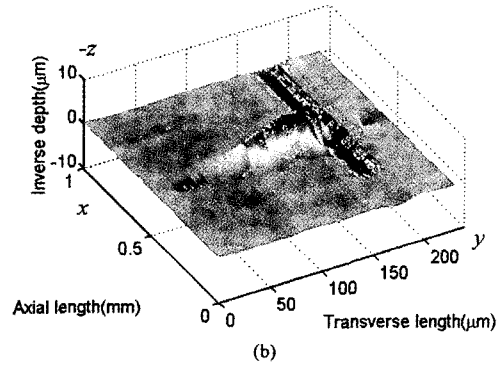
시험 전 시편 표면의 거칠기는 $Ra = 0.76 \mu\text{m}$ 이었다.

4-1. 저 대역 통과 필터링을 위한 차단 주파수의 변경에 따른 결과

표면 거칠기 측정장비를 이용하여 마멸 부위를 측정하였을 때 얻게 되는 Fig. 1과 같은 데이터로부터 Fig. 5와 같이 측정면을 재 구성할 수 있다. 이것을 2 차원 푸리에 변환하면 탐침의 진행 방향(x축)과 그에 수직인 방향(y축) 각각에 대해 Fig. 6(a) 및 6(b)와 같은 주파수 영역의 분포를 구할 수 있다. Fig. 6(a) 및 6(b)에서 횡축은 각각 x 및 y 방향의 데이터를 푸리에 변환하였을 때 나타나는 n 번째 주파수를 나타내며 종축은 해당 주파수에서의 Power Spectrum을 표시한다. 이제 저 대역 통과 필터링을 위해 고주파 영역을 삭제하는 과정에서 x축과 y축에서의 차단 주파수의 차이에 따른 역변환 후의 데이터를 Fig. 7(a) 및 7(b)에 보여



(a)



(b)

Fig. 7. Low-pass filtered surface with the cutoff frequency of (a) 35 for axial, 4 for transverse; (b) 12 for axial, 10 for transverse (referring to Fig. 6).

준다. 한편, Fig. 5 및 Fig. 7에서는 마멸이 된 부분을 쉽게 인식하게 하기 위해 표면에서 위로 돌출되도록 표현하였다.

Fig. 7(a)에서는 x축에서의 차단 주파수를 높게 한 대신 y축에서는 낮게 한 경우이고 Fig. 7(b)에서는 이와 반대로 x축에서 낮게 하고 y축에서는 높게 한 결과이다. Fig. 5에 나타낸 원래의 측정 데이터와 비교할 때, Fig. 7(b)의 경우가 더 유사함을 알 수 있다. 이러한 결과는 y축 방향으로의 데이터는 x축 방향으로 기록되는 데이터의 증분에 비해 상대적으로 긴 거리만큼씩 이동하며 얻은 것이어서 데이터의 개수(여기서는 24개)에 있어 x축에 대한 것(여기서는 2000개) 보다 현저히 작으므로 가능한 통과시키는 주파수 영역이 넓어야 데이터의 왜곡을 줄일 수 있다는 것을 의미한다.

4-2. 마멸 부피 계산 시 K 값의 영향

Fig. 7(b)의 경우에 식 (1)에서의 K 값으로 마멸 전 시편의 Ra인 $0.76 \mu\text{m}$ 을 대입하여 “Windowing”

을 적용하였을 때와 “Windowing”을 적용하지 않았을 때 계산된 마멸 부피는 각각 $45.1237 \times 10^6 \text{ mm}^3$ 과 $46.4026 \times 10^6 \text{ mm}^3$ 으로서, “Windowing”의 적용 여부에 따른 마멸 부피의 차이는 2.8% 정도로 그리 크지 않았다. 이러한 이유는 사용한 튜브 시편의 거칠기가 Ra 를 기준으로 편차가 크지 않아 저 대역 통과 필터링을 이용하여 고주파 성분을 제거할 때 표면 거칠기의 진폭이 Ra 에 근접하였기 때문으로 생각된다. 즉, 이 경우에 있어 Ra 값을 부피 적분을 위한 기준선으로 사용하였을 때 “Windowing”에 의해 마멸이 되지 않은 부분의 진폭을 감소시켜 마멸 부위를 분리하는 효과는 그리 크지 않았음을 알 수 있다.

본 연구에서의 마멸 시험에서 사용한 지르칼로이 튜브는 원자력발전에 이용되는 핵연료봉을 제조하는 것으로 치수뿐 아니라 표면 거칠기도 규제되어 있는 것이어서 반복되는 시험 결과에서도 “Windowing”에 의한 효과는 뚜렷하게 나타나지 않았다. 그럼에도 불구하고 표면 거칠기의 편차가 항상 작다고는 볼 수 없으므로 “Windowing” 처리는 필요하다고 생각되어 작성된 프로그램에는 “Windowing”의 적용을 선택적으로 할 수 있도록 하였다.

한편 마멸 부피 계산을 위한 기준선(K 값)으로서 Ra 를 사용한 데에 대한 논의가 있을 수 있다. Fig. 8에는 K 값의 변화에 따른 마멸 부피의 계산 결과를 보여 주고 있으며 사용한 시편의 Ra 값인 $0.76 \mu\text{m}$ 을 사용한 계산 결과를 기준으로 정규화 하였다. 예상할 수 있는 것과 같이 K 값을 작게 하면 계산되는 마멸 부피가 증가하고 크게 하면 마멸 부피가 감소하였다. 한편 Fig. 8로부터 K 값을 변화시킴에 따라 마멸 부

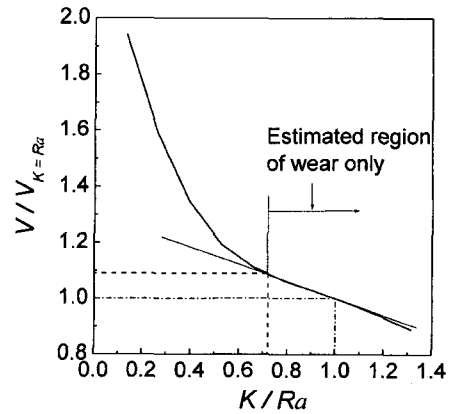


Fig. 8. Effect of K in Eq. (1) on the wear volume (V).

피가 거의 선형적으로 변화하는 구간이 있음을 알 수 있다. K 값을 감소시킬 때, 마멸 부피의 선형적 증가가 끝나고 급속히 증가하는 점은 마멸이 되지 않은 부분의 부피가 포함되기 시작하는 점이라 볼 수 있다. 대부분의 마멸 형상이 표면에서는 넓고 깊이 방향으로 들어 갈수록 좁아지는 특성이 있음을 고려할 때 마멸 부피의 계산을 위한 기준선을 마멸 부피의 선형적 증가가 끝나는 지점(Fig. 8에서 약 $K=0.72 Ra$)으로 하는 것이 바람직할 것이다.

그러나 이러한 선형적인 구간은 시험 때마다 달라질 것이므로 매번 모든 경우에 대하여 Fig. 8과 같은 계산을 수행하여 마멸 부피가 급격히 증가하는 K 값을 구하는 것은 데이터 처리 방법의 관점에서 매우 번거로울 것이다. 이에 대해 시편이 본질적으로 갖고 있는 Ra 값을 사용하게 되면 서로 다른 시편의 경우에 있

Table 1. Comparison of wear volume evaluated by present method and shape simplification (as a semi-ellipsoid)

Specimen No.	Overall Dimension (Length/Width, mm)	Max. Depth (μm)	Wear Volume (10^6 mm^3)		Difference (Factor, B/A)
			Present Method (A)	Simplified Shape (B)	
#1	1.687/0.373	8	169	2636	15.6
#2	1.029/0.308	10	36	1659	46.1
#3	3.118/0.730	13	476	15493	32.5
#4	3.109/0.744	12	324	14534	44.9
#5	2.019/0.700	11	306	8140	26.6
#6	0.283/0.331	2	7	98	14.0
#7	0.966/0.169	3	4	256	64.0
#8	2.707/0.454	10	41	6434	156.9
#9	2.719/0.371	9	22	4754	216.1
#10	2.702/0.483	11	58	7517	129.6

어서도 적용하기가 용이할 것이다. 이로부터 마멸 부피 적분을 위한 기준선으로 Ra 값을 이용하는 것에 대한 타당성을 확인하였다.

4.3. 마멸부를 단순화한 경우와의 비교

본 연구에서 제안하고 있는 방법과 기존의 마멸 형상을 단순화하여 계산한 마멸 부피에 대한 차이를 비교하였으며 그 결과를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 "Overall Dimension"은 마멸 시험 후, 시편인 지르칼로이 튜브 표면에 발생한 타원형상의 마멸부를 측정 현미경으로 장측과 단측을 측정한 결과이며 "Max. Depth"는 표면 거칠기 측정장비를 통해 측정된 마멸부의 최대 깊이이다. 수행한 시험에서는 마멸부의 크기가 시편에 비해 매우 작아 무게 측정에 의한 마멸량 계산은 불가능하였다. 마멸 형상을 단순화할 때에는 마멸부의 측정치를 고려하여 반 타원체로 가정하였다.

Table 1에서 알 수 있듯이 마멸부의 형상을 반 타원체로 가정한 경우의 부피는 본 연구에서의 방법을 계산한 것에 비해 약 10배에서 200배 이상 큰 값을 나타내었으며 그 비율도 일정하지 않았다. 이러한 차이를 보이는 가장 큰 이유는 시편의 표면에서 보이는 마멸부의 형상이 타원형이더라도 깊이 방향으로의 형상이 매우 불규칙하기 때문으로 사료되었다. 특히 최대 마멸깊이의 위치가 시편 표면의 타원형 중심과 일치하지 않은 것이 부피 차이를 크도록 한 원인 중 하나가 되었다. 물론 본 연구에서 제안한 방법에 의해 계산된 마멸 부피가 실제의 마멸량을 완벽히 나타내고 있지는 않으나 마멸부의 형상을 단순화하여 마멸량을 계산하는 것에 비해서는 많이 개선된 것임에 틀림이 없다.

5. 결 론

본 논문에서는 표면 거칠기 측정장비와 같이 마멸면의 형상을 3차원 좌표의 데이터로 취득할 수 있는 경우 마멸 부피를 구하는 방법을 제안하고 있다. 개발된 방법은 푸리에 변환과 저 대역 통과 필터링을 이용하여 측정장비로부터 취득한 마멸면의 데이터를 가공하고, 창함수와 적분을 통해 계산하는 것이다. 이때 저 대역 통과 필터링 시의 차단 주파수와 창함수 및 적분의 기준선은 원래의 측정 데이터 상황에 따라 사용자

가 조정할 수 있도록 하여 계산 방법에 유연성이 있도록 하였다. 제안한 방법에 따른 알고리즘을 개발하고 직교한 2개의 지르칼로이 튜브를 이용한 마멸시험의 결과 분석에 이용하여 보았다. 이로부터, 데이터의 개수가 적은 경우는 차단 주파수를 높이는 것이 측정 데이터의 왜곡을 줄일 수 있으며, 적분을 위한 기준선으로서 마멸되지 않은 면의 평균 거칠기(Ra)를 사용하는 것이 일관된 분석 결과를 위해 적절하다고 평가되었다. 한편, 제안된 방법은 마멸 시험에 사용하는 접촉 물체의 형상이 복잡하여 마멸부의 형태 또는 개수가 임의적으로 관찰될 때 더욱 효과적으로 사용할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. Cho, K.H., Kim, T.H., Kim, S.S., "Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube," *Wear*, Vol.219, pp.3-7, 1998.
2. Fouvry, S. *et al.*, "Wear Analysis in Fretting of Hard Coatings through a Dissipated Energy Concept," *Wear*, Vol.203-204, pp.393-403, 1997.
3. Kalin, M., Vizintin, J., "Use of Equations for Wear Volume Determination in Fretting Experiments," *Wear*, Vol.237, pp.39-48, 2000.
4. Johnson, K.L., *Contact Mechanics*, Chap. 4, Cambridge University Press, Great Britain, 1985.
5. Hills, D.A., Nowell, D., *Mechanics of Fretting Fatigue*, Chap. 3, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1994.
6. 전중하, 구영필, 조용주, "푸리에 급수와 최소 사승법을 이용한 마멸량 측정," 한국윤활학회 제28회 추계 학술대회, pp.300-305, 1998.
7. 전중하, 구영필, 조용주, "디지털 필터링을 이용한 마멸량 계산," 한국윤활학회 논문집, 제16권 제2호, pp.133-137, 2000.
8. Ewins, D.J., *Modal Testing: Theory and Practice*, pp.121, Research Studies Press, Great Britain, 1984.
9. MathWorks Inc., *User's Manual for MatLab®V5.3 R11*, U.S.A., 1999.