프레팅 마멸계수 및 마찰계수 측정에 관한 연구

조용주 · 김태완^{*†}

부산대학교 기계공학과

* 부경대학교 기계공학과

Measurement of Wear and Friction Coefficients for the Prediction of Fretting Wear

Yong Joo Cho and Tae Wan Kim^{*†}

Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University

**Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University*

(Received April 10, 2012; Revised May 2, 2012; Accepted May 4, 2012)

Abstract – The prediction of fretting wear is a significant issue for the design of contacting mechanical components such as flexible couplings and splines, jointed structures and so on. In our earlier study, we developed a numerical model to predict the fretting wear using boundary element method. The developed algorithm needs experimental fretting wear coefficients and friction coefficients between two moving materials to get more reliable results. In this study, therefore, we demonstrated the measurement method of the fretting wear coefficients and friction coefficients using disk on plate tribometer with piezo actuator and gap sensor. For four different material combinations, the fretting wear coefficients and friction coefficients are acquired through the fretting wear experiment and the analysis of the measured values. These results are useful to predict the quantitative fretting wear rate in the developed algorithm.

Keywords – fretting wear(프레팅 마멸), fretting wear coefficient(프레팅 마멸 계수), friction coefficient(마찰 계수)

1. 서 론

프레팅 마멸은 접촉하는 두 표면에서 미세 상대 운동하는 접선 슬립에 의해 발생하는 것으로 알려져 있으며, 프레팅 마멸과 미끄럼 접촉 피로 마멸과의 차이는 접촉면과 슬립의 상대적인 크기에 관련되어 있다. 프레팅 현상은 기계요소와 구조물의 수명을 상당히 제한하는 표면 손상의 형태로 인식되어져 왔으며 프레팅 마멸은 클리어런스의 손실을 유발하고 프레팅 피로는 기계시스템의 파손을 유발할 수 있다[1]. 이러한 프레팅 마멸은 기계의 정밀도가 높아질수록 그 중요성이 부각되고 있고 엔진이나 변속기 등의 접촉기계부품에서는

프레팅 마멸로 인한 부품의 강도 저하와 부품이탈 현상으로 인한 수명과 안전성에 문제가 크게 발생하고 있다. 따라서 이러한 프레팅 현상을 분석하고 해결하기 위한 실험적 해석적 기술의 중요성이 점점 강조되고 있다.

1927년 프레팅 현상을 나타내는 본질적인 특징인 상대적 운동, 즉 슬립이 Tomlinson[2]에 의해 표현된 후, 가스 터빈 엔진과 원자력 발전 기술의 발전에 따라 프레팅 손상에 대한 연구가 다양하게 보고되어 왔다[3]. Waterhouse[1]는 프레팅 거동의 실험적이고 이론적인 주요 변수로 진폭변위, 수직하중, 주파수, 표면 거칠기, 잔류응력 등을 제시하였고, Ratsimba *et al.*[4], Hiroki *et al.*[5]은 일반 접촉 피로 마멸손상의 경우와 같이 실험적 계수 기반의 수명 예측 방법을 제시하였다. 그러나 지금까지의 많은 연구에도 불구하고 프레팅 마멸의

[†]주저자 · 책임저자 : tw0826@pknu.ac.kr

정량적 모델링은 프레팅 마멸과 슬립 체계와의 복잡한 관계로 인한 포괄적 마멸 법칙의 부재로 어려움을 겪고 있다. McColl *et al.*[6]은 실린더 접촉 형상에 대해 사이클 수에 따른 프레팅 마멸 형상을 시뮬레이션할 수 있는 유한요소모델을 개발하였고 해석 격자 및 해석 스텝의 최적화를 통해 해석시간을 줄일 수 있는 방법을 제시하기도 하였다. 최근에는 경계요소법을 통한 프레팅 마멸 형상 예측 알고리즘을 제시하여 구접촉 및 스플라인 접촉시에 프레팅 마멸을 예측한 바 있으며 기존의 유한요소법과 비교를 통해 해석의 경제성을 보고한 바 있다[7-9].

기존 연구에서 구축된 프레팅 마멸 형상을 예측을 위한 수치적 알고리즘을 활용하기 위해서는 실험적인 프레팅 마멸계수 및 마찰계수를 정확히 측정되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 프레팅 마멸 형상 예측 알고리즘에 필요한 프레팅 마멸계수 및 마찰계수를 실험적으로 구하는 방법을 제시하고자 하였다. 이를 위해 압전구동기 및 비접촉변위센서를 이용한 disc-on-plate 타입의 프레팅 마멸 실험 장치를 구성하여 4가지 재질 조합시 프레팅 마멸계수 및 마찰 계수를 실험적 방법으로 측정해 보았다.

2. 실험방법

2-1 프레팅 실험장치

프레팅 마멸 실험을 위해서는 접촉한 두 물체의 상대변위, 진폭, 진동수를 정밀하게 제어함과 동시에 큰 힘을 낼 수 있는 가진기(shaker)가 필요하다. 기존 국내외의 실험적 프레팅 연구들은 모터의 구동으로 발생한 회전 운동을 캠과 같은 기계적 방법으로 직선운동으로 변환하여 진폭을 발생시키거나 가진기 등을 이용하여 실험을 수행하였다. 그러나 이러한 방법들은 캠 제작상의 오차나 반복적인 사용으로 인한 캠의 변형으로 실험적 오차를 발생 시킬 수 있고 진폭 및 진동수를 자유롭게 조정하는데 어려움이 있다.

따라서 본 연구에서는 압전구동기(piezo actuator)와 프레팅 지그를 이용하여 프레팅 마멸 시험기를 구축하였다. Fig. 1은 본 실험에서 사용된 프레팅 마멸 시험기의 개략도이다. Disc-on-plate 타입의 공압식 마찰시험기(TE67)에 시편의 진폭을 부여하는 장치로 압전구동기를 적용하였다. 압전구동기는 스토르크를 발생시킬 때 인장력에 비해 압축력이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 압전구동기가 되돌아 올

Fig. 1. Schematic diagram of fretting wear experiment.

Fig. 2. Fretting jig and configuration of specimens.

때는 판스프링 원리를 이용하여 밀어주는 장치를 설계 제작하였다. Fig. 2(a)는 제작된 프레팅 지그를 도시한 것이다. 지그의 상판에 하부 실험 시편이 설치되게 된다. 상판의 가운데 부분이 ‘ㄷ’자 모양의 판스프링에 의해 주위와 분리되어 있고 가운데 부분에 막대모양의 압전구동기가 삽입되어 가운데 부분을 좌우로 움직여 주게 되는 원리로 일정한 인장력과 압축력을 낼 수 있도록 설계하였다. 프레팅 지그에 대한 설계 및 실험적 검증에 대해서는 이전 논문[7]에서 다룬 바 있다.

압전구동기는 전압의 크기와 압전구동기 길이 방향으로의 인장 변위가 비례하기 때문에 전압의 제어로 통해 실험시편의 진폭을 정밀하게 제어할 수 있다는 것이 다른 가진기와의 차이점이라 할 수 있다. 본 연구에

Table 1. Test combination of specimens

Test No.	Upper disc	Lower plate
1	C (SMF, 740 Hv)	A (SCr, 785 Hv)
2	D (SMF, 740 Hv)	
3	C (SMF, 740 Hv)	B (SCM, 790 Hv)
4	D (SMF, 740 Hv)	

Table 2. Chemical compositions of upper specimens

Specimen	Chemical composition(wt%)
C	Fe //C: 0.7~1.0 //Cu: 2.5~3.5
D	Fe //C: 0.5~0.9 //Cu: 1.0~2.0 //Mo: 0.2~0.8 //Ni: 3.0~5.0

Table 3. Fretting test conditions

Normal load	270(N)
Stroke	40(μ m)
Frequency	20 (Hz)
Max contact stress	2.7(GPa)
Room temperature	20($^{\circ}$ C)

서 압전구동기는 PI사의 P245.70 모델을 사용하였다.

본 연구에서는 disc-on-plate 타입의 프레팅 마멸 실험을 통해 마멸계수 및 마찰계수를 측정하고자 하였다. 이를 위해 SMF(철계 소결합금) 계열의 재료 C, D를 상부 disc 시편으로, SCr(크롬강) 및 SCM(크롬몰리브덴강) 계열의 재료 A, B를 하부 plate 시편으로 사용하였으며 시편의 조합 및 각 시편의 표면경도를 Table 1에 나타내었다. 여기서 상부 시편의 차이는 화학적 조성에 있으며 Table 2에 나타내었다. Fig. 2(c)와 Fig. 3(d)는 제작된 상부 및 하부시편을 도시한 것이다. 상부시편은 반경 15 mm인 롤러표면에 곡률반경이 2.5 mm로 되도록 제작되었고 하부시편은 반경 40 mm, 두께 5 mm인 디스크 타입의 플레이트이며 두 접촉부의 표면 거칠기는 $Ra=0.1\sim0.2\mu$ m를 유지하도록 하였다. 이와 같은 형상으로 시편을 설계한 이유는 2~3 GPa의 최대접촉응력을 가질 수 있게 접촉면의 형상을 구현함과 동시에 하나의 시편으로 여러 번의 마멸실험을 수행하기 위해서이다. 상부시편은 접촉면인 라운드 가공된 곡면에 고주파 열처리 가공을 하였으며, 하부시편은 전체적인 침탄열처리를 하였다.

Fig. 2(b)는 프레팅 지그 위에 두 시편이 disc-on-plate 형태로 장착된 사진을 도시한 것이다. 진폭방향은

Fig. 3. Extraction of roughness component from fretting worn surface.

하부시편의 연마결의 방향과 일치하는 방향으로 수행하였다. 정확한 마멸 계수 측정을 위해 프레팅 마멸실험은 Table 3에 나타난 실험조건으로 시편별로 1200, 6000, 12000, 180000 cycle로 각각 3~4회 반복하였다.

2.2. 프레팅 마멸량 측정

예비실험 결과, 프레팅 마멸실험을 통해 발생한 마멸깊이는 수 μ m의 매우 미소한 수준이며 접촉영역의 넓이 역시 최대 700 μ m를 초과하지 않았다. 대부분의 마멸은 하부시편에서 발생하지 않고 라운드 가공된 상부시편에서 발생하였기 때문에 일반적인 측정방법으로는 미소마멸깊이를 측정할 수 없었다. 본 연구에서는 3차원 표면조도 측정기를 이용하여 표면의 마멸형상을 측정된 후 라운드 형상을 제거하는 과정을 거쳐 최종 마멸 형상을 획득하였다.

Fig. 3은 표면의 마멸형상을 추출하는 과정을 도식적으로 설명하였다. 그림에서와 같이 프레팅 마멸실험 후 마멸이 발생한 상부시편의 라운드 가공된 면을 측정하면 마멸된 형상을 확인하기 어렵다. 이는 마멸된 양이 수 μ m수준으로 라운드 가공된 면의 수 mm 수준인 높이에 비해 매우 작기 때문이다. 따라서 미소 마멸면의 형상을 확인하기 위해서는 라운드 가공된 형상성분을 제거해 주는 과정이 필요하다. 이와 같이 추출된 마멸형상을 통해 마멸전후의 표면 프로파일을 Fig. 4에 도시하였다. 최대 마멸깊이는 실험 전후 시편의 표면 형상을 측정하여 비교해 가면서 실험 후 시편의 마멸되지 않은 부분의 프로파일이 실험전 시편의 프로파일과 일치하는 부분을 찾아 동일한 위치라는 것을 확인한 후 두 프로파일을 비교하여 최대 높이차를 가지는 부분을 찾아 계산하였다.

Fig. 4. Surface roughness profiles before and after fretting wear.

Fig. 5. Measurement of friction coefficient.

2-3. 마찰계수 측정

본 연구에서 프레팅 시 발생하는 마찰계수를 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 하부시편 측면에 비접촉식변위 측정센서(Gap Sensor)를 장착하였다. 프레팅 마찰계수의 측정원리를 Fig. 5에 나타내었다. 측정원리는 두 시편사이의 마찰에 의해 슬라이딩 진폭의 변화가 발생하는 것을 이용하여 비접촉 변위 측정 센서를 이용하여 진폭 감소량을 측정함으로써 마찰계수를 계산할 수 있다. 무하중 상태에서의 슬라이딩 진폭과 하중을 가하였을 때와 두 시편이 접촉하여 수직하중이 추가되었을 때의 슬라이딩 진폭의 차이값과 압전구동기, 프레팅 지그의 스프링 상수값을 통해 프레팅 마찰계수 값을 다음 식을 통해 계산하였다.

$$\mu = \frac{(k_p + k_s) \{ (\delta_{s1} - \delta_{s2}) - (\delta_{2f} - \delta_{2b}) \}}{2p} \quad (1)$$

여기서, k_p 는 압전구동기의 스프링 상수이고 k_s 는 프레팅 지그의 스프링 상수, $\delta_{s1} - \delta_{s2}$ 는 무하중 상태에서의 슬라이딩 진폭, $\delta_{2f} - \delta_{2b}$ 는 하중 상태에서의 슬라이딩 진폭, 그리고 p 는 수직하중이다.

3. 실험결과 및 토의

Fig. 6은 4쌍의 재료에 대해 프레팅 실험을 수행하여 얻어진 최대마멸깊이를 도시한 것이다. 최대마멸깊이는 그림에서 보는 바와 같이 항상 일정하지 않고 분산을 가지게 된다. 본 연구에서는 이러한 분산된 값들을 선형 피팅(linear fitting)을 통하여 마멸계수를 구하는 데 사용하였다.

프레팅 마멸계수는 위에서 설명한 측정된 시편의 최대마멸깊이를 이용하여 계산할 수 있다. 이전의 연구 [7-9]에서 구축된 바 있는 마멸계수와 접촉응력, 슬라이딩 거리에 대한 함수로 이루어진 수정된 Archard's 식을 이용한 프레팅 마멸량 계산 알고리즘을 활용하였다. 즉, 임의의 마멸계수를 입력하여 프레팅 마멸 형상 예측 프로그램을 통하여 마멸 깊이를 계산한 후 실제 실험의 18000 cycle에서의 마멸 깊이를 비교하는 시행착오적으로 마멸계수를 획득하였다. Table 4는 프레팅 마멸실험 및 해석을 통해 계산된 마멸계수를 나타내었다. 프레팅 실험시 마멸은 대부분 상부 시편에서 발생하였는데, 재료 C의 마멸 계수가 재료 D보다 다소 낮게 나타났다. 이는 일반적으로 탄소함유량이 높을수록 내마멸성이 좋아지는 것으로 알려져 있으며 Table 2에 보인 바와 같이 재료 C의 탄소 함유량이 D에 비해 다소 높기 때문에 나타난 결과로 사료된다.

Table 5는 프레팅 실험을 통해 측정된 슬라이딩 진폭의 차이와 프레팅 지그와 압전구동기의 스프링 상수값을 이용해서 계산한 마찰계수 값을 나타내었다. 계산된 마찰계수는 마멸계수와는 달리 재료 C와의 조합에 비해 재료 D와의 조합 시 낮게 나타났음을 알 수 있는데, 이는 재료 D의 경우 윤활성과 내식성이 높은 Mo와 Ni성분이 포함되어 있는 효과인 것으로 생각된다.

이상의 방법으로 도출한 프레팅 마멸계수 및 마찰계수는 이전 연구에 제안한 프레팅 마멸 예측을 위한 수치적 알고리즘에 사용됨으로서 보다 정량적이고 정확한 프레팅 마멸량을 계산할 수 있다.

Fig. 6. Measured fretting wear depth and linear fit curves.

Table 4. Fretting wear coefficients

Lower plate	Upper disk	Wear Coefficient ($\times 10^{-15}/\text{Pa}$)
A	C	0.07~0.1
	D	0.09~1.1
B	C	0.1~0.12
	D	0.18~0.22

Table 5. Fretting friction coefficients

Materials	Amplitude under no load (μm)	Amplitude under load (μm)	Friction coefficient
A + C	65.3032	58.3568	0.5788
A + D		60.0128	0.4408
B + C		58.7944	0.5424
B + D		61.4104	0.3244

4. 결 론

본 논문에서는 미세상대운동에 의해 발생하는 프레팅 현상으로 인한 마멸 형상을 예측하기 위해 필요한 프레팅 마멸계수 및 마찰계수를 획득하는 방법을 제시하였다. 이를 위해 압전구동기의 인장력과 압축력이 일정하게 부가될 수 있도록 지그를 설계 적용하였고 수 μm 의 미세 마멸량을 측정하기 위해 실험전후의 표면 형상성분을 필터링한 거칠기 성분만을 비교하여 프레팅 마멸계수를 도출하였다. 아울러 마찰계수를 측정을 위해 비접촉 변위측정 센서를 이용하여 두 시편사이의 마찰에 의한 슬라이딩 진폭의 변화가 발생하는 원리를 이용하여 마찰계수를 계산하는 방법을 제시하였다. 이를 통해 총 4가지 재질조합의 프레팅 마멸실험을 수행하였으며 각 재질 조합에 따른 프레팅 마멸계수 및 마찰계수를 도출하였다. 이러한 실험적인 계수 측정을 통해 기존의 프레팅 마멸량 예측 알고리즘에 적용함으로

서 보다 정량적인 프레팅 마멸형상을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 2010학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2010-065).

참고문헌

1. R. B. Waterhouse, Fretting Corrosion, Pergamon, Oxford, 1972.
2. Tomlinson, G. A., "The Rusting of Steel Surfaces in Contact," *Proceedings of the Royal Society (London)*, Vol. 115A, pp. 472-483, 1927.
3. R. B. Waterhouse, Fretting wear, in ASM Handbook, Vol. 18, Friction, Lubrication, and Wear Technology, ASM International, pp. 242-256, 1992.
4. C.H.H. Ratsimba, I.R. McColl, E. J. Williams, S.B. Leen, and H. P. Soh, "Measurement, Analysis and prediction of Fretting Wear Damage in a Representative Aeroengine Spline Coupling," *Wear*, Vol. 257, pp. 1193-1206, 2004.
5. H. Endo and E. Maru, "Studies on Fretting Wear: Influence of Rubbing Surface Materials and Some Considerations," *Wear*, Vol. 253, pp. 795-802, 2002.
6. I. R. McColl, J. Ding, and S. B. Leen, "Finite Element. Simulation and Experimental Validation of Fretting Wear," *Wear*, Vol. 256, pp. 1114-1127, 2004.
7. 김종성, 이상돈, 조용주, "프레팅 마멸에 의한 접촉 응력 및 표면형상 변화 예측에 관한 연구," 한국윤활학회지, 제25권, pp. 114-119, 2009.
8. 김웅진, 이상돈, 조용주, "스플라인 커플링의 프레팅 마멸 예측에 관한 연구," 한국윤활학회지, 제25권, pp. 256-260, 2009.
9. T. W. Kim, S. M. Moon, and Y. J. Cho, "Prediction of Fretting Wear Using Boundary Element Method," *Tribology International*, Vol. 44, pp. 1571-1576, 2011.