

스플라인 커플링의 프레팅 마멸 예측에 관한 연구

김응진[†] · 이상돈 · 조용주[‡]

부산대학교 기계공학부

A Study on Estimating of Fretting Wear of a Spline Coupling

EungJin Kim[†], SangDon Lee and YongJoo Cho[‡]

Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National University

(Received April 15, 2009; Revised June 4, 2009; Accepted June 21, 2009)

Abstract – Fretting is a kind of wear which effects on reliability and durability. When machine parts are joined joint in parts such as a bolt or a rivet or a pin, fretting phenomenon is occurred by micro relative movement. When fretting occurs in joint parts, there is wear which is the cause of fatigue crack. Recently, although the ways of assessment of fatigue and damage tolerance are established, there is no way to evaluate fatigue crack initiation life by fretting phenomenon. Consequently, the prediction of life and prevention plan caused by fretting are needed to improve reliability. The objective of this paper is to predict fretting wear by using a experimental method and contact analysis considering wear process. For prediction of fretting wear volume, systematic and controlled experiments with a disc-plate contact under gross slip fretting conditions were carried out. A modified Archard equation is used to calculate wear depths from the contact pressure and stroke using wear coefficients obtained from the disc-plate fretting tests.

Key words – fretting wear(프레팅 마멸), spline coupling(스플라인 커플링), fretting(프레팅), contact(접촉), reliability(신뢰성)

1. 서 론

프레팅은 신뢰성과 내구성에 영향을 미치는 마멸의 한 종류이며, 리벳, 볼트, 핀 등과 같은 체결체와 부품의 체결 시 미세 상대운동에 의하여 프레팅 현상이 발생한다. 프레팅이 발생하면 체결부는 마멸 현상이 나타나고 이것은 피로균열 발생의 원인이 된다. 기계에 대한 일반적인 피로 및 손상허용에 대한 정량적인 평가 방법은 확립되어 있으나 프레팅 현상과 이에 의한 피로균열 발생 수명의 정량적 평가 방법은 확립되어 있지 않다. 따라서 신뢰성 향상을 위한 프레팅 방지 방안과 프레팅에 의한 수명 예측이 필요하다.

지금까지 이영제[1], 김동구[2]등은 원자력 발전소의 원자로 냉각재 내부에 위치한 핵연료 피복관과 관련된 프레팅 마멸 관련 특성을 실험을 통해 확인하였으며 O. Vingsbo[3]는 수직하중과 접선하중, 진폭과 주파수의 관계에서 프레팅 메커니즘을 분류하였다.

스플라인 커플링은 조립할 때는 두 축의 상대 운동을 허용하지 않는다. 그러나 두 축이 축방향이 서로 어긋나기 쉽기 때문에 이러한 곳에서 프레팅 마멸이 발생할 가능성이 크다. 본 연구에서는 높은 토크를 전달할 수 있는 트랜스미션 출력축을 구동축에 연결하는데 사용되는 스플라인 커플링에 적용하여 프레팅 마멸량을 예측하고자 한다.

본 연구에서는 프레팅 마멸량 예측을 위해 실험적 방법과 이론적 방법을 사용하였다. 실험적 방법으로 기어용 강 재질의 시편을 제작, 프레팅 마멸 실험을 통해

[†]주저자 : hemlove@pusan.ac.kr

[‡]책임저자 : yjcho@pusan.ac.kr

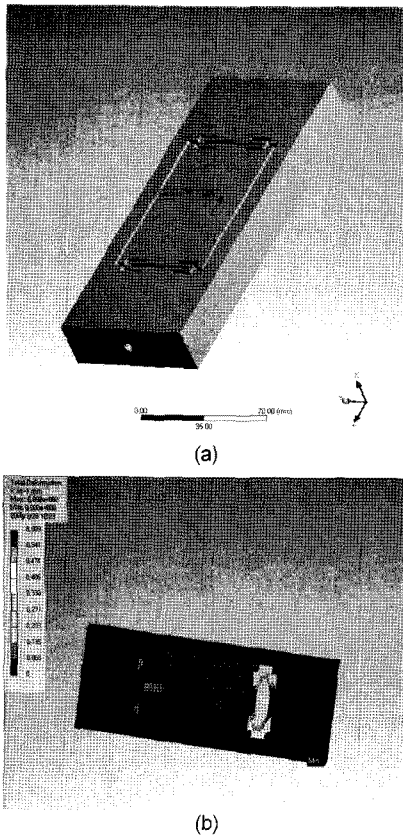


Fig. 1. (a) the design of Jig by using ANSYS, (b) the result of ANSYS analysis.

마멸 계수를 측정한다. 실험을 통해 측정된 마멸 계수를 이론적 방법에 이용하여 프레팅 마멸량 예측을 통한 형상 예측을 하고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험장치 및 시편

기존 프레팅 실험에서의 프레팅 미세진폭은 모터의 구동으로 발생한 회전운동을 캠과 같은 기계적 방법으로 직선운동으로 변환하여 구현하였다[1-2]. 그러나 이러한 방법은 캠 제작상의 오차나 구동으로 인한 캠의 변형으로 실험적 오차를 발생 시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서는 piezoactuator와 같은 전자제어 장치를 사용함으로써 진폭을 정확하게 조절 할 수 있었다.

Piezo소자는 전기를 가할 경우 진폭을 발생시킬 수 있는 인장력이 뛰어난 반면에 압축력이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 piezo소자의 단점을 보완하기 위해 Fig. 1

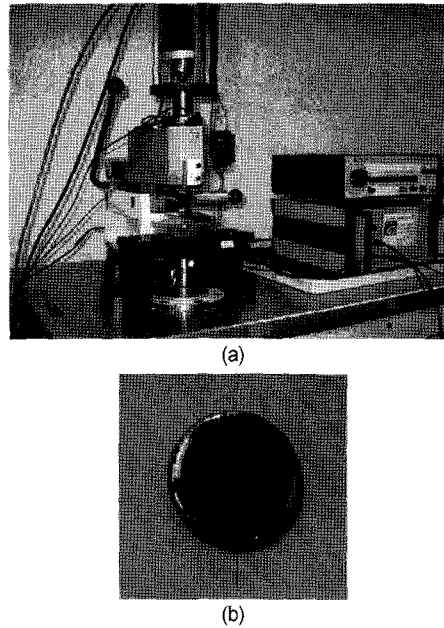


Fig. 2. (a) Experiment equipment, (b) specimen.

과 같은 판스프링 역할을 할 수 있는 jig를 ANSYS로 설계, 제작하였다.

Fig. 2는 프레팅 마멸 실험 장치를 나타내었다. Jig 중앙에 piezoactuator를 삽입하여 piezoactuator amp, function generator를 연결, 진폭을 발생시키며 공압 실린더를 사용하여 수직하중을 가하였다.

본 연구에서는 프레팅 현상을 시뮬레이션하기 위해 Disc-on-plate 형태의 프레팅 마멸 실험을 통해 마멸 계수를 측정하고자 하였다. 이를 위해 시편은 기어용강 재질의 원주방향 15 mm, 축방향 1.5 mm의 디스크 형태로 제작, 공압 실린더 끝부분에 고정하여 축방향으로 진폭을 가한다.

1200, 6000, 12000, 18000 cycle에 따른 프레팅 마멸 실험 후 시편은 3차원 표면 조도 측정기로 측정하여 최대 마멸 깊이를 확인하여 마멸 계수를 구하였다. 프레

Table 1. Conditions of fretting test

Normal load(N)	270
Stroke(μ m)	40
Frequency(Hz)	20
Total number of wear cycle	1200, 6000, 12000, 18000
Room temperature($^{\circ}$ C)	20
Max contact stress(GPa)	2.7 GPa

팅 마멸 실험 조건은 Table 1과 같다

3. 이 론

3-1. 접촉 해석

본 연구에서는 스플라인 커플링의 수치적 과정을 설명하기 위해 일반적인 두 탄성체의 접촉 해석을 상당 표면과 강체면의 접촉으로 가정하였다. 본 연구에서는 영향 함수를 이용한 접촉 해석을 하였다.

강체구의 등가 곡률 반경 및 상당탄성 계수는 다음과 같다[4].

$$R_{eq} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$E_{eq} = \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (2)$$

접촉 문제를 풀기 위해 다음의 구속조건에 의한 반복 연산이 필요하다. 즉,

$$p(x) > 0, e(x) = 0 \quad (3)$$

접촉영역 밖에서;

$$p(x) = 0, e(x) > 0 \quad (4)$$

여기서, $p(x)$ 는 접촉압력이며 $e(x)$ 는 변형후의 강체면과 거친 표면간의 거리를 나타낸다. 접촉영역 내에서는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$e(x) = h_1(x) + h_2(x) + u_1(x) + u_2(x) - \delta \quad (5)$$

접촉 해석에서 탄성 변형량은 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

접촉영역에서는;

$$u_i = -\frac{(1-\nu^2)}{\pi E} p \left\{ (a+x) \ln \left(\frac{a+x}{a} \right)^2 + (a-x) \ln \left(\frac{a-x}{a} \right)^2 \right\} + C \quad (6)$$

접촉영역 밖에서는;

$$u_i = -\frac{(1-\nu^2)}{\pi E} p \left\{ (a+x) \ln \left(\frac{a+x}{a} \right)^2 - (a-x) \ln \left(\frac{a-x}{a} \right)^2 \right\} + C \quad (7)$$

3-2. 프레팅 마멸량 예측

기존 프레팅 마멸 예측 모델은 ABAQUS 등의 상용 소프트웨어를 사용함으로써 마멸 진행상황에 따른 접촉형상변화와 압력해석에 관한 해석시간 측면에서의

단점이 발생한다[6]. 본 연구에서는 수치해석을 통해 시간적 측면의 문제점을 해결하고자 한다.

Stowers and Rabinowicz의 가정과 Johansson의 방법에 따르면 프레팅 마멸은 Archard's equation에 대입하여 값을 구할 수 있다. Archard's equation은 다음과 같이 표현할 수 있다[7].

$$\frac{V}{S} = K \frac{N}{H} \quad (8)$$

정량적인 예측을 위해 수직압력이 작용하는 이산화된 표면의 마멸 프로파일을 나타내기 위해서는 위의 식을 다음과 같이 수정할 필요가 있다.

$$\frac{dV}{dS} = K \frac{dN}{H} \quad (9)$$

양변을 dA 로 나누면 다음과 같은 식이 된다.

$$\frac{dV}{dAdS} = K \frac{dN}{HdA} \quad (10)$$

dV/dA 항은 마멸 높이 dh_w 가 되며, dN/dA 항은 접촉 압력 $p(x)$ 항으로 대체할 수 있다. K 및 H 항은 일정한 값이므로 k 로 대체한다면 다음과 같은 식이 된다.

$$dh_w = kp(x)dS \quad (11)$$

이를 각 사이클 당 일반적인 식으로 바꾸면 다음과 같은 식을 도출할 수 있다.

$$h_w = k \int_0^n p(x)s(n)dn \quad (12)$$

여기에서,

k : coefficient of wear

$P(x)$: local contact pressure

n : number of cycle

$s(n)$: n cycle에서의 slip

마멸량 예측을 통한 최종 프레팅 마멸 형상 flow chart는 Fig. 3과 같다.

4. 실험 및 예측 결과

4-1. 실험 결과

실험으로부터 도출한 마멸 계수를 이용하여 목표 cycle에 따른 최종 프레팅 마멸 형상을 예측할 수 있다.

Fig. 4는 1200~18000 cycle 구간의 최대 마멸 깊이 실험 data를 linear fit하여 마멸 계수를 구한 그래프이다.

4-2. 예측 결과

본 연구에서는 접촉 해석 시간을 최적화하기 위해

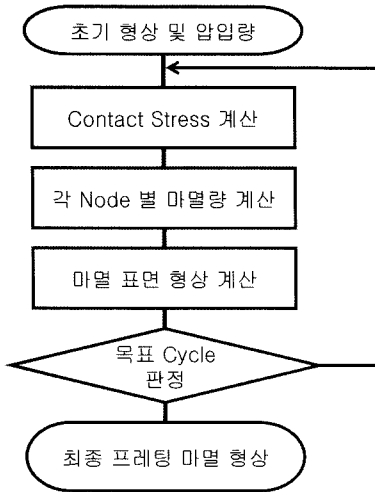


Fig. 3. Flow chart for the prediction of fretting wear.

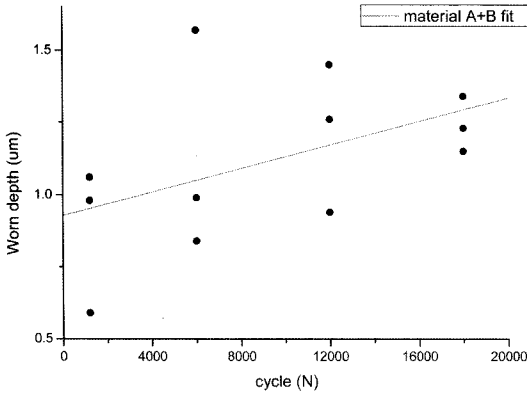


Fig. 4. variation of the wear depth with cycle and linear fit of data.

100 cycle이 지날 때마다 마멸량을 계산한다.

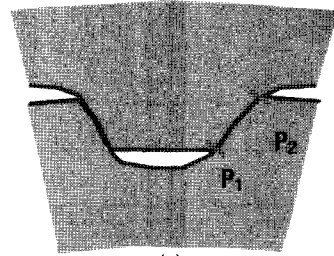
Table 2는 실험으로 획득한 마멸 계수를 바탕으로 스플라인 커플링의 형상을 예측하기 위한 조건이다. 실험과 동일한 stroke로 초기 압입량을 가정하고, 목표 cycle에 도달하였을 때의 스플라인 커플링의 최종 형상을 예측한다.

스플라인 커플링 형상 예측을 위해 최적 cycle에 따른 upper, lower 시편의 형상 변화를 접촉 해석을 통해 확인한 후 일정 cycle마다의 접촉 응력의 변화를 예측하였다. 초기 압입된 스플라인 커플링 접촉면의 양 끝단인 P₁와 P₂에서 edge effect의 영향으로 인해 최대 접촉 응력이 나타나고 cycle이 증가함에 따라 마멸로 인한 접촉 영역이 증가하고, 그에 따라 접촉 응력이 감소함을 Fig. 5를 통해 확인 할 수 있다.

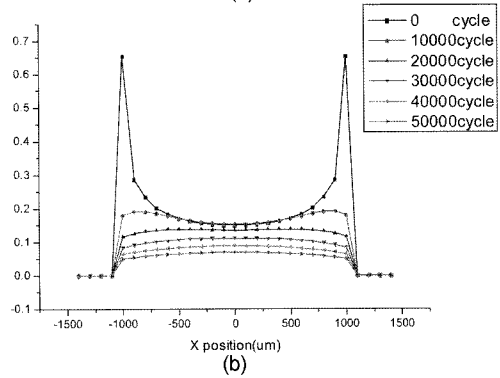
Fig. 6는 각 cycle에 따른 upper 시편과 lower 시

Table 2. Conditions of the prediction of fretting wear

Poisson's ratio 1,2	0.3
Modulus of elasticity 1,2	210GPa
Coefficient of wear(Pa ⁻¹)	0.47×10 ⁻¹⁴
Stroke(μm)	40
초기 압입량(μm)	5
Total number of wear cycles	50000



(a)



(b)

Fig. 5. (a) the shape of spline (b) Predicted profile of Contact stress.

편의 형상을 나타낸 것으로 Fig. 5에 나타난 것처럼 최대 접촉 응력으로 인해 upper 시편과 lower 시편의 마멸량이 초기에는 최대 마멸량을 나타내지만 cycle의 증가에 따른 접촉 응력의 점차적인 감소로 인해 마멸량 역시 감소함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 스플라인 커플링에서 발생하는 프레팅 마멸량을 실험적 방법으로 마멸 계수를 도출, 해석적 방법으로 cycle의 증가에 따른 프레팅 마멸 형상 변화를 예측하였다.

본 연구 결과는 다음과 같다.

(1) 초기 압입된 스플라인 커플링 형상에서 edge effect의 영향으로 인해 마멸량이 증가하였으며, cycle

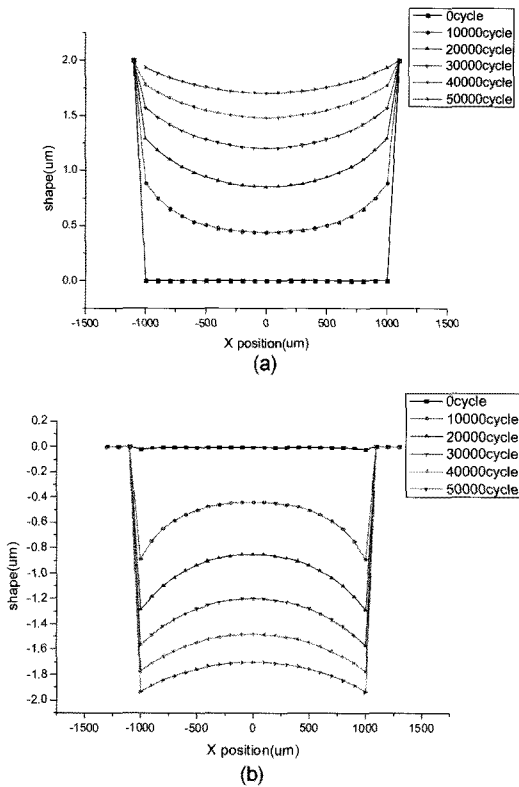


Fig. 6. Predicted wear profiles of (a) upper specimen and (b) lower specimen.

증가에 따라 접촉면적이 증가하고, 그 결과 접촉 응력의 감소로 인해 마멸량 역시 감소함을 알 수 있었다.

(2) 접촉 응력의 변화를 이용하여 cycle에 따른 upper, lower시편의 형상을 예측하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국 산업기술재단의 지역 혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

기호설명

- e(x) 강체면과 표면간의 거리
- E 탄성계수

- E_{cy} 상당 탄성계수
- a 접촉반폭
- $h(x)$ 기준면과 탄성체간의 거리
- h_w 마멸 깊이
- H 경도
- k Archard 마멸 계수(유차원)
- K Archard 마멸 계수(무차원)
- n 총 사이클 수
- N 수직 하중
- $p(x)$ 접촉 압력
- P_j 접촉 압력
- R_{cy} 상당 반경
- $s(n)$ 사이클에 따른 진폭거리
- S 총 슬립량
- $u(x)$ 탄성체의 변형 후 이동거리
- V 마멸량
- δ 탄성 변형량
- v 프라이송비

참고 문헌

1. 이영제, 김진선, 박세민, 박동신, “핵연료 피복관과 지지격자 사이에 발생하는 프레팅 마멸에 미치는 유동의 영향”, 한국윤활학회지, Vol. 24, No. 4, pp. 186-189, 2008.
2. 김동구, 조정우, 이영제, “증기발생기 튜브 재료의 미끄럼 마멸 및 프레팅 마멸 특성”, 한국윤활학회지, Vol. 17, No. 5, pp. 380-385, 2001.
3. O. Vingsbo and D. Soderberg, “On Fretting Maps”, *Wear*, Vol. 126, pp. 131-147, 1988.
4. Love, A. E. H., “The Stress Produced in a Semi-Infinite Solid by Pressure on Part of the Boundary”, *Proc. Roy. Soc. London*, Vol. A228, pp. 377, 1927.
5. K.L. Johnson, “Contact Mechanics”, Chap. 2, pp. 21-25, Cambridge University Press, 1985.
6. 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.
7. I.R. Mc Coll, J. Ding and S.B. Leen, “Finite Element Simulation and Experimental Validation of Fretting Wear”, *Wear*, Vol. 256, pp. 1114-1127, 2004.