

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.10.1091

프레팅 마모를 고려한 압입축의 피로균열 발생수명 예측

이동형[†] · 권석진* · 유원희* · 최재봉** · 김영진**

(2009년 7월 27일 접수, 2009년 8월 20일 수정, 2009년 8월 21일 심사완료)

Evaluation of Fatigue Crack Initiation Life in a Press-Fitted Shaft Considering the Fretting Wear

Dong-Hyong Lee, Seok-Jin Kwon, Won-Hee You, Jae-Boong Choi and Young-Jin Kim

Key Words: Fretting(프레팅), Fretting Wear(프레팅 마모), Fretting Fatigue(프레팅 피로), Press-Fitted Shaft(압입축), Fatigue Crack Initiation Life(피로균열 발생수명)

Abstract

In this paper, the procedure to estimate fatigue crack initiation life has been established by considering fretting wear and multiaxial stress states on the contact surface of press-fitted shafts. And a method to calculate the local friction coefficient during the running-in period of fretting wear process has been proposed. The predicted result of worn surface profile in the press-fitted shaft with non-linear local friction coefficient can avoid excessive wear depth estimation compared with that for the case of constant local friction coefficient. Furthermore, the predicted fatigue crack initiation lives based on Smith-Watson-Topper model considering the fretting wear are in good agreement with the experimental data. Consequently, the present method is valid not only for predicting worn surface profile, but also for assessing fatigue crack initiation lives considering the fretting wear during the running-in period in press fits.

1. 서 론

하중을 받고 있는 두 접촉면 사이에 미세한 진폭의 상대운동(relative oscillatory tangential movement)이 발생하는 현상을 프레팅(fretting)이라 하며, 프레팅이 발생할 경우 일반 피로현상과 비교하여 2~5배 혹은 그 이상으로 피로강도가 저하된다.⁽¹⁾ 철도차량 차축은 차륜이 차축에 압입되어 있는 구조이며, 차량 운행시 발생하는 반복하중에 의해 차축 압입부 끝단에는 프레팅 현상이 발생한다.

다. 프레팅에 의한 차축의 파손을 방지하기 위하여 많은 연구가 진행되었으나, 균열발생의 문제,⁽²⁾ 현실적으로 적용할 수 있는 피로수명 예측 모델 개발⁽³⁾ 등은 현재까지도 해결되어야 할 연구 과제이다.

압입축의 피로수명예측에 관한 연구로는, Ishizuka 등⁽⁴⁾이 인공 균열을 이용하여 실물 피로시험을 실시하고 파괴역학적인 방법으로 균열진전에 대한 정량적인 평가 및 정류균열 깊이의 관계를 평가한 바 있다. Makino 등⁽⁵⁾은 파괴역학을 적용하여 균열진전 피로강도를 평가하였고, 굽힘응력과 정류균열 길이의 관계를 검토하였다. Akama⁽⁶⁾는 인공균열을 이용한 실물 피로시험 결과와 확률론적 파괴역학을 이용하여 균열진전속도를 평가하였다. Lee 등⁽⁷⁾과 Ekberg⁽⁸⁾은 압입축의 유한요소해석과 다축피로이론을 적용하여 프

† 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원

E-mail : dhlee@krri.re.kr

TEL : (031)460-5246 FAX : (031)460-5279

* 한국철도기술연구원 철도시스템연구본부

** 성균관대학교 기계공학부

레팅 피로균열 발생수명을 평가하였다. 그러나 이와 같은 압입측 피로수명 평가를 위한 일련의 연구는 파괴역학 적용시 초기균열 크기를 가정해야 하는 불확실성이 존재한다. 또한, 프레팅에 의해 함께 발생하는 프레팅 마모^(9,10)를 반영하지 못하였기 때문에 마모에 의해 발생하는 접촉끝단의 응력변화를 피로수명예측에 고려하지 못하였다.

프레팅 마모를 고려한 피로수명예측에 관한 연구는 최근에 주목을 받기 시작했다. Ding 등⁽¹⁰⁾은 프레팅 시험으로 많이 사용하고 있는 원통 패드와 평판(cylindrical pad on flat) 접촉시 프레팅 마모해석을 통하여 프레팅 마모 발생시 접촉응력이 크게 변화하고 균열발생에 크게 영향을 미칠 것이라고 하였다. 이를 기초로 Madge 등은 원통 패드와 평판접촉시,⁽¹¹⁾ 라운드 펀치와 평판(rounded-edge punch-on flat) 접촉시⁽¹²⁾의 프레팅 마모에 따른 피로균열 발생수명의 변화를 예측하였다. 그러나 최근 Lee 등⁽⁹⁾은 피로 사이클 초기 단계에 프레팅 마모는 급속히 진행되며, 하중 및 피로사이클에 따라 마모량 및 마모계수가 일정하지 않은 비선형적인 특성을 나타낸다고 하였다. 따라서, 프레팅 마모를 고려한 피로수명예측에 관한 기존의 연구들은 일정한 마모상수를 적용하였기 때문에 피로 사이클 초기에 급속히 진행되는 프레팅 마모의 변화, 접촉응력의 변화를 고려하지 못하였다.

본 논문에서는 피로 사이클 초기단계에서 프레팅 마모를 정확하게 예측할 수 있는 국부적인 접촉영역의 마모상수 계산 방법을 제시하고, 마모를 고려한 압입측의 피로균열 발생수명 평가방법을 정립하고자 한다. 이를 위하여 유한요소해석과 수치해석을 통하여 길들이기 영역(running-in period)에서 접촉면의 프레팅 마모량을 예측하고, 마모에 따른 접촉응력의 변화와 다축 피로이론의 하나인 임계평면 접근법(critical plane approach)을 이용하여 균열발생 피로수명을 평가하였다. 압입측의 피로균열 발생수명에 관한 실험결과와 해석결과를 비교하여 프레팅 마모를 고려한 피로균열 발생수명 평가방법의 타당성을 검증하였다.

2. 해석방법

2.1 길들이기 영역의 마모해석

프레팅 마모를 예측하기 위한 대부분의 수치해석⁽¹⁰⁻¹²⁾에는 미끄럼 마모량을 예측하기 위하여

Archard's 식⁽¹³⁾을 응용한 수식을 적용하고 있다. 즉, 한 사이클의 반복 하중을 받을 때 접촉하는 한 점에서 발생하는 마모 깊이의 변화량 Δh 는 접촉면의 미끄럼 거리 Δs , 수직접촉압력 p 에 비례하며 다음 식과 같다.

$$\Delta h = kp\Delta s \quad (1)$$

여기에서 $k(MPa^{-1})$ 는 국부영역의 마모상수(local dimensional wear coefficient)이다. 이 수식은 마모율이 안정화 된 상태일 때 적용 가능하다.

일반적으로 마모가 발생할 경우, 마모영역은 시간에 따라 Fig. 1과 같이 길들이기 영역(running-in period)과 정상상태 영역(steady-state stage), 급격한 마모영역(catastrophic wear)으로 구분된다.⁽¹⁴⁾ 첫 번째 단계인 길들이기 영역은 마모율이 급속히 변화하는 단계이고, 두 번째 단계인 정상상태 영역은 마모율이 변하지 않고 마모가 시간 혹은 거리에 따라 비례하는 단계이다. 마모상수를 핀-디스크(pin-on-disc) 실험으로 구할 경우 길들이기 영역(running-in period)이 포함되게 되면 실험적으로 구한 마모상수는 정상상태만을 고려했을 때보다 높은 값을 나타내게 된다. 최근에는 이와 같은 영역을 구분하여 마모상수를 구하는 연구⁽¹⁵⁾가 수행되고 있다.

본 연구에서는 압입측에 프레팅 마모 발생시 길들이기 단계의 국부영역 마모상수를 계산하기 위하여 실험 데이터와 유한요소해석을 이용하였다. 프레팅 마모가 ΔN 사이클 진행 후에 마모된 형상을 이용하여 유한요소해석을 수행하고 각 접촉위치(i)별 접촉압력 p_i 를 계산한다. 실험으로 측정한 접촉위치별 마모깊이의 변화량 Δh_i 은 식

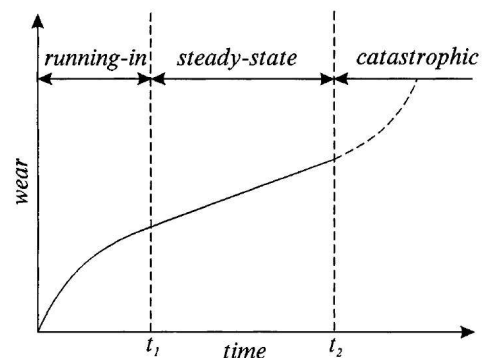


Fig. 1 A typical dependence of wear on testing time⁽¹⁴⁾

(1)로부터 각 접촉위치의 미끄럼거리 Δs_i 를 고려하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta h_i = k_i p_i \Delta s_i \quad (2)$$

여기에서 k_i 는 각 접촉위치별 마모상수이며, 한 사이클당 접촉위치별 마모상수는 그 때까지의 피로 사이클의 변화량 ΔN 을 고려하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$k_i = \Delta h_i / (p_i \Delta s_i \Delta N) \quad (3)$$

위식으로 계산한 각 접촉위치별 마모상수를 평균하여 피로 사이클별 평균 국부영역 마모상수 k 를 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 압입축의 프레팅 마모 발생 시 하중별 국부영역 마모상수를 계산한 결과는 Fig. 2와 같다. 여기에서 하중은 압입 시험편의 프레팅 피로시험 조건⁽⁹⁾과 동일하게 공칭 굽힘응력(σ_0)에 대한 Lamé의 평균 공칭 접촉압력($p_0 \approx 90\text{MPa}$)의 비율 $\lambda (= \sigma_0/p_0)$ 로 표시하였다. 프레팅 마모의 수치해석에는 국부영역 마모상수를 지수함수로 곡선 근사화하여 적용하였고, 유한요소해석과 영향함수법을 이용한 마모해석 방법⁽¹⁶⁾으로 압입축의 피로사이클 초기단계의 프레팅 마모를 해석하였다.

2.2 피로균열 발생수명 해석

프레팅 피로수명 예측에 관한 연구는 Nishioka

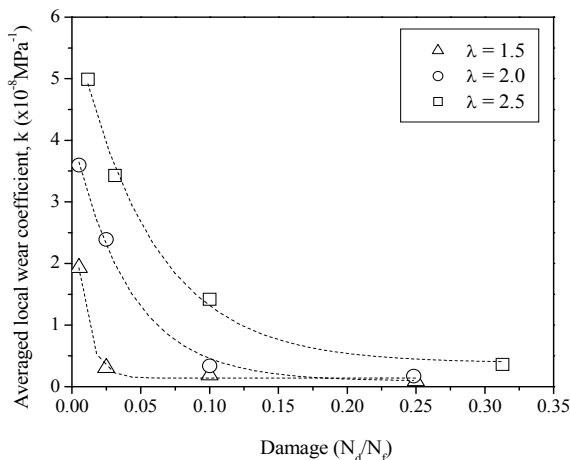


Fig. 2 Averaged local dimensional wear coefficient for fretting wear in press-fitted shaft

등⁽¹⁷⁾이 많은 실험결과를 바탕으로 일반피로 수명에 대한 마찰계수, 접촉압력 등을 고려하여 피로강도 저하량을 나타내는 모델을 발표하였다. Ruiz 등⁽¹⁸⁾은 접촉면에 국부적으로 작용하는 전단응력 (τ)과 슬립량 (δ), 접선응력(σ_T)을 고려한 프레팅 피로손상 파라미터 ($FFDP = \sigma_T \tau \delta$)를 제시하였다. 피로강도 저하 모델의 경우 피로한도 저하량을 간단하게 예측할 수 있고, 프레팅 피로손상 파라미터의 경우 비교적 간단하게 피로손상 위치를 예측할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 기존 모델의 경우 복잡한 형상 등에 발생하는 수명예측에 적용하기에 어렵고 접촉면에 작용하는 다축상태의 응력을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 최근에는 프레팅 피로시험을 대상으로 균열발생 수명해석에 다축피로 이론의 적용 가능성에 대한 연구가 진행되고 있다.^(19,20)

여기에서는 다축피로이론 중 피로균열 발생수명 뿐만 아니라 균열발생 각도와 위치를 예측할 수 있다는 장점이 있어 비교적 많이 사용되고 있는 임계평면 접근법을 사용하여 압입축의 프레팅 피로균열 발생수명을 예측하였다.

임계평면 접근법은 위험위치에서 응력 혹은 변형률, 에너지 등에 의해 결정된 어떤 특정 면과 방향이 피로균열 수명 및 거동에 영향을 준다는 이론이며, 최대 손상을 나타내는 면을 임계평면이라 한다. 기존 연구결과^(19,20)에 의하면 프레팅 피로수명 예측에 적용 가능성이 있는 모델은 균열이 전단모드에 의해 발생된다는 Fatemi-Socie 모델(F-S 파라미터)과 균열이 인장모드에 의해 발생된다는 Smith-Watson-Topper 파라미터(SWT 파라미터)이다.

Fatemi-Socie 모델⁽²¹⁾은 최대전단 변형률 진폭 ($\Delta \gamma_{max}/2$)과 최대인장 응력($\sigma_{n,max}$)이 지배하는 손상이 최대가 되는 평면을 임계평면으로 정의하며, 다음 식과 같다.

$$\frac{\Delta \gamma_{max}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_{n,max}}{S_y}\right) = \frac{\tau_f'}{G} (2N_f)^{b_0} + \gamma_f' (2N_f)^{c_0} \quad (4)$$

여기에서, S_y 는 항복강도(monotonic yield strength), G 는 전단탄성계수(shear modulus), τ_f' 는 전단피로강도계수(the shear fatigue strength coefficient), γ_f' 는

전단피로연성계수(the shear fatigue ductility coefficient), b_0 는 전단피로강도지수(shear fatigue strength exponent), c_0 는 전단피로연성지수(shear fatigue ductility exponent), k 는 재료상수(material constant)이다.

Fatemi-Socie 모델은 전단하중이 작용하는 동안 균열 면에 수직으로 작용하는 응력이 균열 면을 분리시켜 마찰력을 감소시키고 균열전단 응력을 상대적으로 증가시켜 수명이 감소하게 된다는 개념이며, 반복 전단 변형률이 있어야 피로손상이 발생한다. 그러므로 이 모델은 균열발생 수명이 대부분의 피로수명을 차지하는 경우와 최대 전단 평면을 따라 작은 균열의 진전이 일어나는 재료에 적합하다.

Smith-Watson-Topper 파라미터⁽²²⁾는 다축 하중 작용 시 주변형률 평면에 작용하는 최대 인장응력($\sigma_{n,max}$)과 주변형률 진폭($\Delta\epsilon_1/2$)을 이용하여 균열성장률 예측하는데 사용되며 다음 식과 같다.

$$\sigma_{n,max} \frac{\Delta\epsilon_1}{2} = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \epsilon'_f (2N_f)^{b+c} \quad (5)$$

여기에서, $\Delta\epsilon_1/2$ 는 최대 주변형률 진폭(maximum principal strain amplitude), $\sigma_{n,max}$ 는 최대 주변형률 진폭 평면에서 최대 수직응력(maximum normal stress on the maximum principal strain amplitude plane)이다.

식 (5)로 계산한 임계평면은 $\sigma_{n,max} \Delta\epsilon_1/2$ 이 최대가 되는 평면이지만, Szolwinski 와 Farris⁽¹⁹⁾는 프레팅 피로균열발생은 임계평면의 수직방향 변형률 변화량($\Delta\epsilon/2$)과 수직방향 최대응력($\sigma_{n,max}$)의 조합이 최대가 되는 지점에서 균열이 발생하며, 프레팅 피로균열 발생의 위치를 잘 예측한다고 하였다. 따라서 압입축의 피로균열 발생수명 예측에도 $\sigma_{n,max} \Delta\epsilon/2$ 가 최대가 되는 평면을 임계평면으로 하였다.

압입축의 피로균열 발생수명 예측은 마모예측 결과를 이용하여 Fig. 3과 같은 절차로 수행하였고, 많은 수치계산이 필요하므로 포트란(FORTRAN)으로 프로그래밍 하였다. 계산 절차는 유한요소해석 결과로부터 각 접촉위치의 응력과 변형률의 변화량 및 재료 물성치를 입력받는 부분과 손상 파라미터를 이용한 임계평면 계산 부

분, 임계평면에서의 피로수명 계산 부분으로 나눌 수 있다.

임계평면 계산부분에서는 임의 평면에서의 방향여현을 이용하여 시간에 따른 임의평면에서의 수직응력(σ)과 전단응력(τ), 수직 변형률(ϵ), 전단 변형률(γ)를 계산하였다. 임의평면의 응력과 변형률을 이용하여 전체 하중시간에 대한 변형률 진폭과 최대응력을 계산하고, 이 임의평면에서 (4), (5)식의 왼쪽 항인 손상 파라미터를 계산하였다. 손상 파라미터가 가장 큰 임계평면은 평면 각도를 1° 간격으로 변화시켜 계산하였다.

임계평면에서의 손상 파라미터를 구한 후 변형률-수명관계식 (4), (5)를 이용하여 피로수명을 계산하였으며, 해를 구하는 방법으로 Newton-Raphson 방법을 사용하였다.

각 손상 파라미터의 수명계산에 필요한 축 및 보스의 피로 물성치는 변형률-제어 시험결과로부터 얻은 Table 1의 값을 사용하였다. Fatemi-Socie 모델의 수명계산에 필요한 반복 전단 피로상수는 $\tau'_f \approx \sigma'_f / \sqrt{3}$, $b_0 = b$, $\gamma'_f \approx \sqrt{3} \epsilon'_f$, $c_0 = c$ 와 같

Table 1 The low-cycle fatigue properties of shaft and boss materials

Material	σ'_f (MPa)	ϵ'_f	b	c	n'	K' (MPa)
shaft (SFA60)	1047.6	0.5858	-0.1084	-0.5527	0.1924	1138.4
boss (SWS1)	1288	0.252	-0.103	-0.461	0.216	1694

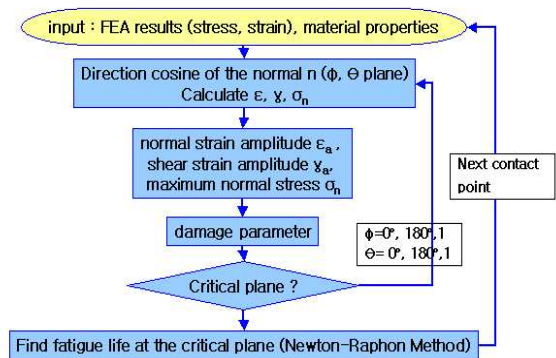


Fig. 3 A schematic of the numerical analysis for the fatigue crack initiation life estimates

이 단축 피로상수로 환산⁽²³⁾하여 계산하였으며, 다축하중 실험에서 결정되는 재료상수 k 는 0.4로 하였다.⁽²⁰⁾

한 접촉점에서의 임계평면 및 피로수명 계산이 완료되면 다음 접촉지점에서 위와 같은 계산을 반복 수행하였다. 피로수명 계산시 유한요소해석은 탄소성 해석을 수행하였고 경화조건은 실험으로 구한 주기적 응력-변형률 선도를 적용하였다. 균열발생수명은 변형률-제어 시험의 파단시점이 시험편 단면에 0.5mm의 균열 발생 시점에 해당되므로 이를 기준으로 하였다.

3. 해석결과 및 토의

3.1 프레팅마모 해석 결과

Fig. 4는 비선형 국부영역 마모계수(exponential wear coefficient)를 이용하여 하중조건 $\lambda=2.0$ 일 때 사이클별 압입축의 접촉면 마모형상을 예측한 결과이다. 비교를 위하여 일정 마모상수(constant wear coefficient)로 계산한 결과도 함께 표시하였다. 초기 마모단계에서는 사이클 수가 작기 때문에 국부영역 마모상수를 이용한 결과와 일정 마모상수로 예측한 결과가 큰 차이를 나타내지 않는다. 그러나 마모 사이클이 수만 사이클 이상으로 증가함에 따라(Fig. 4에서 72,500cycles) 일정 마모상수로 예측한 결과는 국부영역 마모상수로 예측된 마모형상과 차이가 크게 발생하였다.

Fig. 5는 하중조건 $\lambda=1.5$ 일 때 전체수명의 2.5%(201,000cycles)에서 압입축의 접촉면 마모형상 예측 결과를 실험결과와 비교한 그림이다. 그림에서 실험결과는 압입시험편을 이용하여 일정 굽힘 피로시험을 실시하고, 프레팅이 발생한 축의 접촉면 거칠기를 최소 3군데 이상 측정하여 평균한 결과⁽⁹⁾이다. 일정 마모상수를 이용한 해석 결과는 실제 실험결과보다 과도한 마모량을 나타내었으나, 비선형 마모계수를 이용하여 예측한 마모형상은 실험결과와 잘 일치하였다.

Fig. 6은 하중조건 $\lambda=2.0$ 일 때 예측된 마모형상을 이용하여 압입축 끝단에 발생하는 마모에 따른 최대 응력집중계수(K_t)의 변화를 계산한 결과이다. 그림에는 마모된 접촉형상의 실험결과를 이용하여 유한요소해석을 수행하고 마모에 따른 응력집중계수의 변화를 계산한 결과도 함께 표시하였다. 실제 마모형상으로 계산한 응력집중계수

는 피로사이클 초기에 급격히 감소하며, 전체수명의 2.5~5% ($N_d/N_f=0.025\sim0.05$)에서 감소율이 완만해진다. 프레팅 마모해석 결과를 이용하여 응력집중계수의 변화를 계산한 결과도 이와 같은 경향을 잘 나타내고 있으며, 압입축의 프레팅 마모에 따른 마모형상을 예측하는 본 해석방법이 타당함을 알 수 있다.

3.2 피로균열 발생수명 예측결과

마모해석 결과를 이용하여 압입축의 프레팅 마모를 고려한 피로균열 발생수명을 예측하였다.

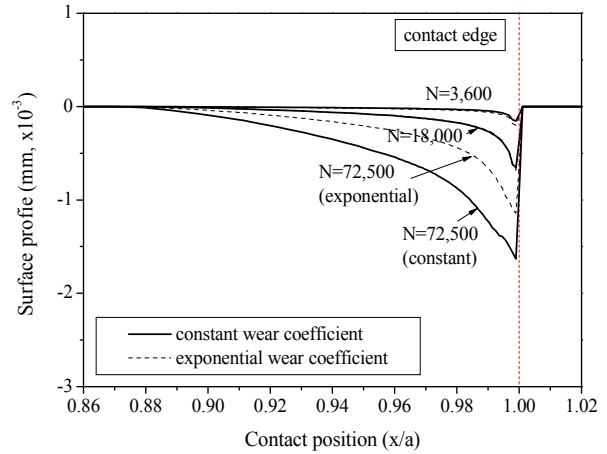


Fig. 4 Predicted surface profiles versus number of fatigue cycles at $\lambda=2.0$

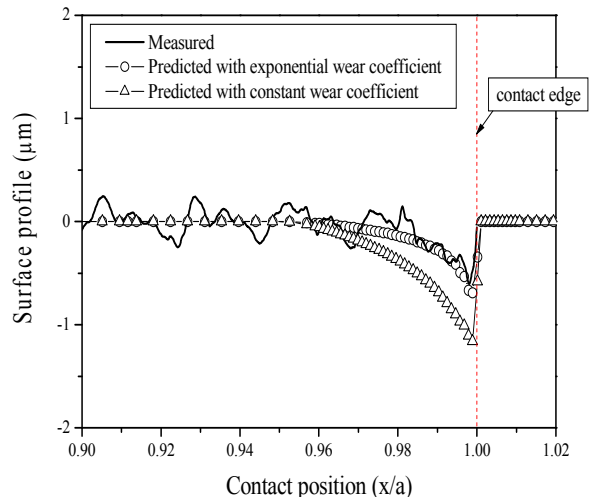


Fig. 5 Comparison of predicted wear profiles and experimental results for worn surface profiles of the press-fitted shaft after 201,000 wear cycles ($N_d/N_f = 0.025$) at $\lambda=1.5$

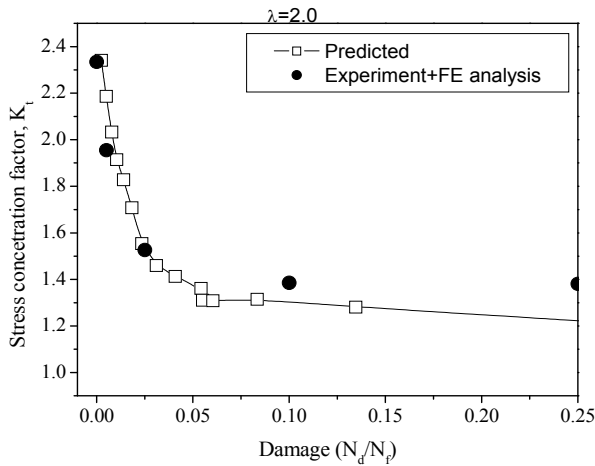


Fig. 6 Variation of stress concentration factor K_t according to the fretting wear.

마모에 의해 응력집중계수가 급격하게 감소하다가 완화된 시점의 마모형상을 해석적으로 예측하고, 유한요소해석과 수치해석을 통하여 SWT 파라미터와 F-S 파라미터의 피로균열 발생수명을 예측하였다. 프레팅 손상 발생 초기에 프레팅 마모가 급격하게 발생하여 손상된 접촉면이 마모입자로 떨어져 나가므로 이때까지 접촉면의 피로손상은 누적되지 않는다고 가정하였다.

Fig. 7은 하중조건 $\lambda=2.0$ 일 경우 마모가 발생하지 않은 상태와 마모가 발생하였을 경우(약 30,000cycles)의 SWT 파라미터와 F-S 파라미터의 계산결과이다. 마모가 발생하지 않을 경우 손상 파라미터는 접촉끝단에서 약 0.015mm 안쪽에서 큰 값을 나타내었다. 마모가 발생하였을 경우 파라미터의 최대값은 크게 감소하였고, 최대의 위치는 변화 없이 약 0.015mm 안쪽이었다. 실험결과 균열발생 위치는 하중에 따라 차이가 있지만, 대부분의 균열은 다중 균열로 접촉끝단에서 0.005mm~0.030mm 안쪽에서 발생하였다.⁽⁹⁾ 따라서 SWT 파라미터와 F-S 파라미터로 예측한 균열 발생 위치는 실험결과와 어느 정도 일치한다고 할 수 있다.

Fig. 8은 마모를 고려하여 SWT 파라미터로 예측한 균열발생 수명을 실험결과와 비교한 그림이다. 균열발생 수명에 대한 실험결과는 압입시험편을 이용하여 일정 굽힘 피로시험을 실시한 후 측정된 결과이며, 압입측 단면에 0.5mm 깊이의 균열이 발생한 시점을 나타낸다.⁽⁹⁾ 마모를 고려한 균열발생 예측수명은 모든 하중조건에서 F-S 파

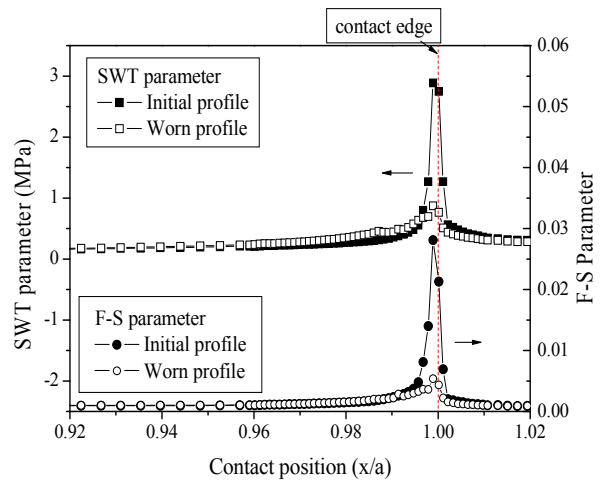


Fig. 7 SWT and F-S parameter along shaft contact interface at $\lambda=2.0$ load condition.

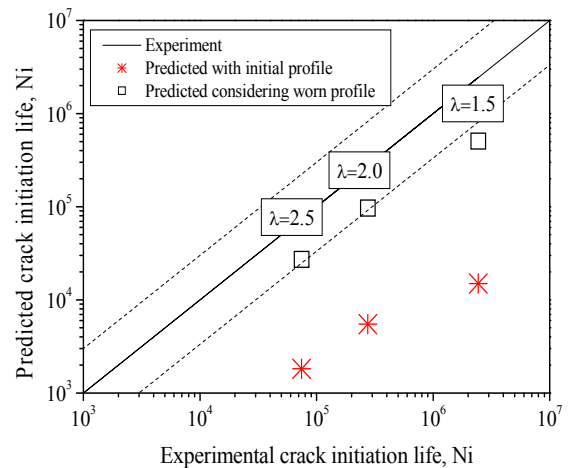


Fig. 8 Fatigue crack initiation life prediction and experimental results.

라미터를 이용한 결과가 SWT 파라미터를 이용한 결과보다 짧게 예측되었다. 그림에는 비교를 위하여 마모가 발생하지 않았을 때 예측된 결과를 같이 표시하였고, 마모가 발생하지 않았을 때의 예측결과는 실험결과보다 매우 보수적으로 평가하고 있다. 이것은 마모가 발생하지 않았을 때 접촉끝단에는 큰 응력집중이 발생하고 이와 같은 응력집중이 수명예측에 그대로 반영된 결과이기 때문이다. 그러나 마모를 고려하였을 경우 마모에 따른 응력집중의 변화를 반영할 수 있으며, 해석결과 SWT 파라미터로 균열발생 피로수명을 예측한 결과가 실험결과에 근접함을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서 제안한 마모해석 및 SWT 파라미터로 균열발생 피로수명을 예측하는 방법은 압입축의 피로균열 발생수명을 잘 예측할 수 있음을 알 수 있다.

프레팅 피로손상은 마찰계수, 슬립량, 접촉압력 등 매우 많은 인자에 영향을 받고 있다.⁽²⁴⁾ 본 연구에서는 프레팅에 영향을 미치는 인자 중 프레팅 마모만을 고려하여 피로균열 발생수명을 예측하였다. 그러나 접촉표면에 마모가 발생할 경우 접촉표면에는 압축 잔류응력이 발생⁽²⁵⁾하는 등 국부영역의 재료물성치가 변화하므로 향후 이를 고려한다면 더욱 근접한 수명예측을 할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 압입축에 프레팅이 발생할 경우 프레팅 마모를 정확하게 예측하고 접촉면의 다축 응력상태를 고려한 피로균열 발생수명을 평가하였으며 주요한 결과는 다음과 같다.

(1) 길들이기 영역에서 비선형 국부영역 마모계수를 이용하여 예측한 압입축의 프레팅 마모형상 및 마모량의 변화는 실험결과와 잘 일치하였다.

(2) 압입축의 끝단에 발생하는 큰 응력집중은 프레팅 마모에 의해 피로사이클 초기에 급격히 감소하며, 프레팅 마모해석 결과도 이와 같은 경향을 잘 나타내었다.

(3) Smith-Watson-Topper 파라미터와 Fatemi-Socie 파라미터는 압입축의 균열발생 위치를 잘 예측할 수 있다.

(4) 프레팅 마모를 고려한 압입축의 피로균열 발생수명은 임계평면접근법인 Smith-Watson-Topper 파라미터로 예측한 결과가 실험결과와 잘 일치하였다.

참고문헌

(1) Waterhouse, R. B., 1992, "Fretting Fatigue," *International Materials Reviews*, Vol. 37, No. 2, pp. 77~97.

(2) Hirakawa, K., Toyama, K. and Kubota, M., 1998, "The Analysis and Prevention of Failure in Railway Axles," *Int. J. Fatigue*, Vol. 20, No. 2, pp. 135~144.

(3) Smith, R.A. and Hillmansen, S., 2004, "A Brief Historical Overview of the Fatigue of Railway Axles," *Proc. Instn Mech. Engrs. Part F: J. Rail and Rapid Transit*, Vol. 218, No. 4, pp. 267~278.

(4) Ishizuka, H., Akama, M., Hanaoka, T., Satoh, Y., Motomatsu, H., and Tezuka, K., 1995, "Fracture Mechanics Evaluation of Fatigue Tests Using Shinkansen Vehicle Axles with Artificial Flaws on Their Wheelseats," *RTRI Report*, Vol. 9, No. 6, pp. 25~30. (In Japanese)

(5) Makino, T., Yamamoto, M. and Hirakawa, K., 2000, "Fracture Mechanics Approach to the Fretting Fatigue Strength of Axle Assemblies," in *Fretting Fatigue: Current Technology and Practices*, ASTM STP 1367, D. W. Hoepfner, V. Chandrasekaran, and C. B. Elliott, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA., pp. 509~522.

(6) Akama, M., 2002, "Bayesian Analysis for the Results of Fatigue Test Using Full-Scale Models to Obtain the Accurate Failure Probabilities of the Shinkansen Vehicle Axle," *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 75, pp. 321~332.

(7) Lee, D.H., Goo, B.C., Lee, C.W., Choi, J.B., and Kim, Y.J., 2005, "Fatigue Life Evaluation of Press-Fitted Specimens by Using Multiaxial Fatigue Theory at Contact Edge," *Key engineering materials*, Vol. 297-300, pp. 108~114.

(8) Ekberg, A., 2004, "Fretting Fatigue of Railway Axles - A Review of Predictive Methods and an Outline of a Finite Element Method " *Proc. Instn Mech. Engrs., Part F : J. Rail and Rapid Transit*, Vol. 218, pp. 299~316.

(9) Lee, D. H., Kwon, S. J., Choi, J. B., and Kim, Y. J., 2007, "Experimental Study on Fatigue Crack Initiation and Propagation due to Fretting Damage in Press-fitted Shaft," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 31, No. 6, pp. 701~709. (In Korean)

(10) Ding, J., Leen, S. B. and McColl, I. R., 2004, "The Effect of Slip Regime on Fretting Wear-Induced Stress Evolution," *International journal of fatigue*, Vol. 26, pp. 521~531.

(11) Madge, J.J., Leen, S.B., McColl, I.R. and Shipway, P.H., 2007, "Contact-Evolution Based Prediction of Fretting Fatigue Life: Effect of Slip

- Amplitude," *Wear*, Vol. 262, pp. 1159~1170.
- (12) Madge, J.J., Leen, S.B. and Shipway, P.H., 2007, "The Critical Role of Fretting Wear in the Analysis of Fretting Fatigue," *Wear*, Vol. 263, pp. 542~551.
- (13) Archard, J. F., 1953, "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," *J. Appl. Phys.*, Vol. 24, pp. 981~988.
- (14) Goryacheva, I.G., 1998, *Contact Mechanics in Tribology, Series: Solid Mechanics and Its Applications, Vol. 61*, Kluwer Academic, Boston, MA.
- (15) Yang, L.J., 2005, "A Test Methodology for the Determination of Wear Coefficient," *Wear*, Vol. 259, pp. 1453~1461.
- (16) Lee, D. H., Kwon, S. J., Choi, J. B., and Kim, Y. J., 2008, "Fretting Wear Simulation of Press-Fitted Shaft with Finite Element Analysis and Influence Function Method," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 32, No. 1, pp. 54~62. (In Korean)
- (17) Nishioka, K. and Hirakawa, K., 1969, "Fundamental Investigations of Fretting Fatigue (Part 5. The Effect of Relative Slip Amplitude)," *Bull. of JSME*, Vol. 12, No. 52, pp. 692~697.
- (18) Ruiz, C., Boddington, P.H.B. and Chen, K.C., 1984, "An Investigation of Fatigue and Fretting in a Dovetail Joint," *Experimental Mechanics*, Vol. 24, No. 3, pp. 208~217.
- (19) Szolwinski, M.P. and Farris, T.N., 1998, "Observation, Analysis and Prediction of Fretting Fatigue in 2024-T351 Aluminum Alloy," *Wear*, Vol. 221, pp. 24~36.
- (20) Lykins, C.D., Mall, S. and Jain, V., 2000, "An Evaluation of Parameters for Predicting Fretting Fatigue Crack Initiation," *International Journal of Fatigue*, Vol. 22, pp. 703~716.
- (21) Fatemi, A. and Socie, D.F., 1988, "Critical Plane Approach to Multiaxial Fatigue Damage Including Out-of-Phase Loading," *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 11, No. 3, pp. 149~165.
- (22) Smith, K.N., Watson, P. and Topper, T.H., 1970, "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals," *J. Mater.*, Vol. 5, No. 4, pp. 767~778.
- (23) Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R. and Fuchs, H. O., 2001, *Metal Fatigue in Engineering*, John Wiley & Sons, New York, pp. 329~332.
- (24) Dobromirski J.M., 1992, "Variables of Fretting Process: Are There 50 of Them?," in M. H. Attia & R. B. Waterhouse, eds, 'Standardization of Fretting Fatigue: Test Methods and Equipment', *ASTM STP 1159*, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, PA, pp. 69~84.
- (25) Kim, J-W., Lee, Y-Z., 2000, "The Changes of Residual Stresses on Sliding Surfaces During Break-in and Scuffing," *J. of the KSTLE*, Vol. 16, No. 3, pp. 182~187.