

압입축에 발생하는 프레팅 마모가 피로균열 발생 위치에 미치는 영향

The Effect of Fretting Wear on Fatigue Crack Initiation Site of Press-fitted Shaft

이동형[†] · 권석진^{*} · 최재봉^{**} · 김영진^{**}

Dong-Hyong Lee · Seok-Jin Kwon · Jae-Boong Choi · Young-Jin Kim

Abstract The objective of the present paper is to evaluate the effect of the evolution of contact surface profile by fretting wear on the contact stress distribution and fatigue crack initiation site of press-fitted shaft by means of an analytical method based on experimental data. A finite element analysis was performed to analyze the stress states of press-fitted shaft, considering the worn contact surface profiles of shaft. The evolutions of contact stress as wearing of contact surface were analyzed by finite element analysis and fatigue crack nucleation sites were evaluated by fretting fatigue damage parameter (FFDP) and multiaxial fatigue criteria. It is found that the stress concentration of a contact edge in press-fitted shaft decreases rapidly at the initial stage of total fatigue life, and its location shifts from the contact edge to the inside due to fretting wear as increasing of fatigue cycles. Thus the transition of crack nucleation position in press-fitted shaft is mainly caused by stress change of a contact edge due to the evolution of contact surface profile by fretting wear. Therefore, it is suggested that the nucleation of multiple cracks on fretted surface of press fits is strongly related to the evolution of surface profile at the initial stage of total fatigue life.

Keywords : Press-fitted shaft, Fatigue crack, Fretting wear

요 지 본 연구는 압입축에 프레팅이 발생할 경우 프레팅 마모에 의한 접촉형상의 변화가 접촉응력의 분포, 균열발생 위치에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 압입축의 프레팅 피로실험시 측정된 접촉면의 프로파일을 이용하여 유한요소 해석을 수행하고 피로 사이클별 마모형상 변화에 따른 접촉면의 응력 변화를 분석하였다. 접촉면의 응력 해석결과를 이용하여 프레팅 피로손상 파라미터와 다축 피로이론을 적용하여 마모에 따른 균열발생위치의 변화를 해석하고 실험과 비교, 분석하였다. 프레팅 마모에 의해 접촉 끝단의 응력집중은 초기에 급격하게 감소하며, 마모가 진행될수록 응력집중의 위치는 접촉끝단에서 안쪽으로 이동한다. 따라서 프레팅 마모에 의한 접촉응력의 변화가 균열발생 위치의 변화와 다중균열발생의 주요원인임을 명확히 하였다.

주 요 어 : 압입축, 프레팅 피로균열, 프레팅 마모

1. 서 론

철도차량 차축에는 차륜 및 베어링 등이 결합되어 있으며, 이와 같은 압입부위에는 차량 운행시 굽힘, 비틀림, 충격 하중이 복합적으로 작용하고 있다. 압입부위에 반복하중이 작용할 경우 접촉면간의 미세한 상대운동이 발생하며 이를 프

레팅(fretting)이라 한다[1]. 철도차량 차축과 같은 압입축에 프레팅이 발생할 경우 접촉면의 손상에 의해 피로균열이 발생하고 피로 파괴의 기점이 되며, 이를 프레팅 피로(fretting fatigue)라고 한다. 보통 프레팅이 발생할 경우 발생하지 않는 경우보다 1/2~1/3 정도 피로강도가 감소한다[1].

차축에 발생하는 피로손상 중 베어링, 차륜, 기어 등의 압입부에서 발생하는 프레팅 피로가 차축 손상의 82%를 차지[2]하므로, 차축의 피로손상을 방지하기 위하여는 압입부의 프레팅 피로에 관한 연구가 필수적이다.

현재까지 철도차량 차축의 파손을 방지하고 신뢰성 향상

† 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원, 철도시스템연구본부
E-mail : dhlee@krti.re.kr

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

* 한국철도기술연구원, 철도시스템연구본부

** 성균관대학교, 기계공학부

을 위해 많은 연구가 진행되었다. 대표적으로 Kühnel[3]이 철도차량의 사고조사 및 회전굽힘 피로시험을 통하여 압입부 피로특성을 분석하였고, 프레팅에 의해 압입부의 수명이 약 50% 감소된다는 결과를 발표하였다. 그 후, Hoger[4], Maxwell 등[5], Nishioka 등[6], Tanaka 등[7]은 실물 차축 혹은 압입 시험편 시험을 통하여 압입부의 피로수명에 영향을 미치는 여러 인자를 조사하고, 축 압입부의 피로강도 향상을 위하여 많은 연구를 수행하였다. 그러나, 이와 같은 많은 연구에도 불구하고 철도차량의 고속화 및 축하중의 증가 등으로 인하여 차축의 파손은 계속 발생[8]하고 있다. 또한, 철도차량 차축에 발생하는 프레팅에 의한 균열발생문제는 아직도 많은 연구가 필요한 부분[9]이다.

압입축의 프레팅 마모와 피로균열발생에 대한 연구로 Makino 등[10]이 해석에 의한 최대응력 발생위치와 피로실험에서 관찰된 균열발생위치가 차이가 있다는 문제점을 제시하고 접촉 끝단 프로파일을 고려한 유한요소해석을 통하여 균열발생위치에 미치는 접촉끝단 프로파일의 영향을 평가하였다. 그러나 피로사이클별 마모에 의해 변화된 접촉 프로파일을 해석에 반영하지 못하였으며, 균열발생위치의 변화 원인은 가공에 의한 보스형상변화 때문이라고 설명하고 있으므로 프레팅 마모에 대한 영향을 규명하지 못하였다. 또한, 최근 연구[11]에 의하면 압입축에 프레팅이 발생할 경우 접촉끝단에는 프레팅 마모가 함께 발생하므로 접촉끝단의 응력은 변화할 것으로 예측되기 때문에 정확한 피로수명해석 등을 위하여 프레팅 마모의 영향을 명확히 할 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 압입축에 프레팅이 발생할 경우 프레팅 마모에 의한 접촉끝단의 응력변화를 해석하고 접촉응력 변화에 의한 균열발생위치의 변화 특성을 명확히 하고자 하였다. 압입축의 프레팅 피로실험시 측정된 접촉면의 프로파일을 이용하여 유한요소해석을 수행하고 피로 사이클별 마모형상 변화에 따른 접촉면의 응력 변화를 분석하였다. 접촉면의 응력 해석결과를 이용하여 프레팅 피로손상 파라미터와 다축 피로이론을 적용하여 마모에 따른 균열발생위치의 변화를 해석하고 실험과 비교, 분석하였다.

2. 해석방법

2.1 유한요소해석 모델

축이 보스에 압입될 경우와 굽힘하중이 작용할 경우 접촉면의 응력 분포를 계산하기 위하여 비선형 수치해석에 많이 사용되는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS[12]를 사용하였다. 본 유한요소해석 모델은 이전 연구[13]와 같은 방법을 사용하였으며 주요 내용은 다음과 같다.

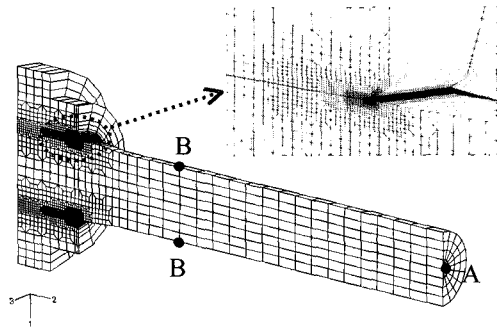


Fig. 1. Finite element model for press-fitted specimen

압입축은 굽힘하중 작용시 비대칭 변형을 나타내므로 해석 모델은 비대칭-축대칭요소(Bilinear asymmetric-axisymmetric element)[12]를 사용하였고, 압입부의 접촉영역 끝단에 미세 슬립(micro-slip)이 발생하기 때문에 접촉 끝단의 최소 요소 크기를 약 0.015mm로 분할하였다. 접촉면에서의 간섭량(shrinkage allowance)은 회전굽힘피로시험을 수행한 압입시험편과 동일하게 Lamé의 평균 공칭접촉압력(p_n)[14]이 90MPa이 되도록 하였다.

축의 압입부 접촉영역에는 미끄럼 접촉 요소(axisymmetric slide line element)와 slide line으로 접촉을 모델링하였고, 마찰계수 $\mu=0.6$ [13]을 적용하였다. 탄성 해석을 수행하였고 탄성계수(Young's modulus)는 203,000MPa, 푸아송비(Poisson's ratio)는 0.3을 적용하였으며, 최종 완성된 해석모델은 Fig. 1과 같다. 해석모델의 검증을 위하여 대칭면에서 발생하는 반경방향의 응력(σ_{11})과 접선방향의 응력(σ_{22})을 유한요소해석 결과와 Lamé 이론으로 계산한 결과를 비교한 결과, 최대 접선방향 응력이 보스의 내부에서 최대가 되는 등 해석모델의 결과가 이론계산과 잘 일치하였다.

2.2 마모에 따른 응력해석

프레팅 마모에 의한 압입축 끝단의 응력변화를 해석하기 위하여 압입축의 프레팅 실험시 측정된 시험편의 피로사이클별 접촉면의 마모형상[11]을 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. 하중조건은 공칭 굽힘응력(σ_0)이 Lamé의 평균 공칭 접촉압력(p_n)의 1.5, 2.0, 2.5 배($\lambda = \sigma_0/p_n$, $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$)가 되도록 시험조건과 동일하게 설정하였다. Fig. 2는 하중조건 $\lambda = 2.0$ 에서 피로손상 사이클별 축 접촉끝단의 형상변화를 측정한 결과이며, 파단수명을 N_f , 피로사이클을 N_a 로 표시하였다.

초기 프레팅 손상상태에서 축의 접촉면 형상은 접촉끝단에서 약 1mm 이내에서 급격히 변화하였으므로 축의 접촉끝단 1mm 안쪽까지의 마모된 접촉형상을 해석에 적용하였다. 실

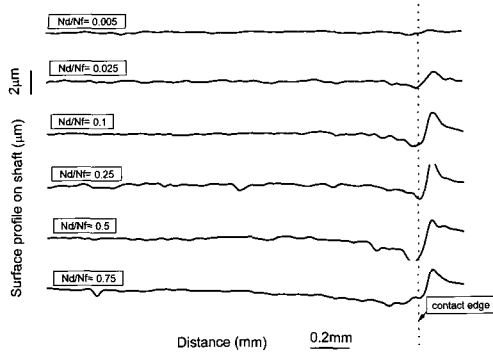


Fig. 2. Variation of contact surface profile with the fretting damage at $\lambda=2.0$

형결과 Fig. 3과 같이 접촉끝단의 보스(boss) 마모는 축의 마모에 비해 거의 발생하지 않았으므로 축의 마모형상만을 고려하였다.

축 접촉면의 거칠기를 측정할 프로파일은 불규칙(irregularity)한 형상을 나타내며, 불규칙한 형상의 프로파일을 데이터로 입력하여 해석을 수행할 경우 수렴이 어렵고 해석결과와 정량화도 어려우므로 곡선 근사화(curve fitting)하였다.

압입축의 프레팅 마모량은 피로사이클 초기에 급격히 증가하고 미세균열은 전체수명의 약 15~20%의 영역에서 발생 [11]하므로, 프레팅 손상 초기에 발생하는 응력의 변화를 분석하기 위하여 전체수명의 25%까지 해석을 수행하였다. 해석절차는 첫 번째 단계에서 마모된 축과 보스의 압입시 응력 해석을 수행하고, 다음 단계에서 1사이클의 피로하중 작용시 응력해석을 수행하였다.

2.3 균열발생위치 해석

마모에 의한 접촉응력의 변화가 균열발생위치에 미치는 영향을 검토하기 위하여 마모에 따른 프레팅 피로손상 파라미터(FFDP, Fretting Fatigue Damage Parameter)와 프레팅 접촉면의 다축응력 상태를 고려한 다축피로이론의 임계평면 접근법(critical plane approach)을 이용하여 최대손상 위치를 평가하였다.

프레팅 피로손상 파라미터는 접촉면에 마찰력에 의해 행해진 일(work)을 기초로 하여 Ruiz 등[15]이 제안하였다. 이 파라미터는 프레팅 피로손상 위치를 잘 예측할 수 있다[16]고 알려져 있으며, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$FFDP(N^2/mm^3) = \sigma_T \times \tau \times \delta \quad (1)$$

여기에서, σ_T 는 접선응력(MPa), τ 는 접촉면에 국부적으로

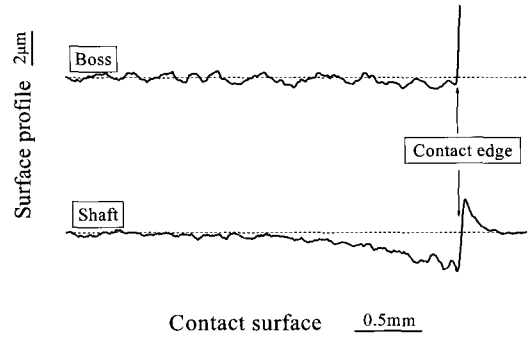


Fig. 3. Contact surface profile of shaft and boss at $\lambda=2.5$

작용하는 전단응력(MPa), δ 는 상대 슬립량(mm)을 나타낸다.

다축피로이론의 임계평면 접근법[17]은 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. 본 해석에서는 임계평면 접근법 중에서도 프레팅 피로균열 거동에 적용하여 균열발생 위치를 잘 예측할 수 있다[18]고 하는 Smith-Watson-Topper 파라미터와 최대전단응력 범위 파라미터(maximum shear stress range critical plane parameter)를 적용하였다.

SWT 파라미터는 다축 하중 작용시 주변형률 평면에 작용하는 최대 인장응력($\sigma_{n,max}$)과 주변형률 진폭($\frac{\Delta\epsilon_1}{2}$)을 이용하여 균열발생위치 및 수명을 예측하는데 사용되며 다음 (2)식과 같다.

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

여기에서, $\frac{\Delta\epsilon_1}{2}$ 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), σ'_f 는 피로강도계수(fatigue strength coefficient), ϵ'_f 는 피로연성계수(fatigue ductility coefficient), b는 피로강도지수(fatigue strength exponent), c는 피로연성지수(fatigue ductility exponent)이다.

최대전단응력 범위 파라미터는 임의 평면에서 전단응력의 최대값(τ_{max})과 최소값(τ_{min})을 계산하고 각 임의평면에서 구한 전단응력범위($\Delta\tau$) 중 가장 큰 값을 나타내는 평면을 임계평면으로 계산하며 다음 (3)식과 같다.

$$\Delta\tau_{crit} = \tau_{max} - \tau_{min} \quad (3)$$

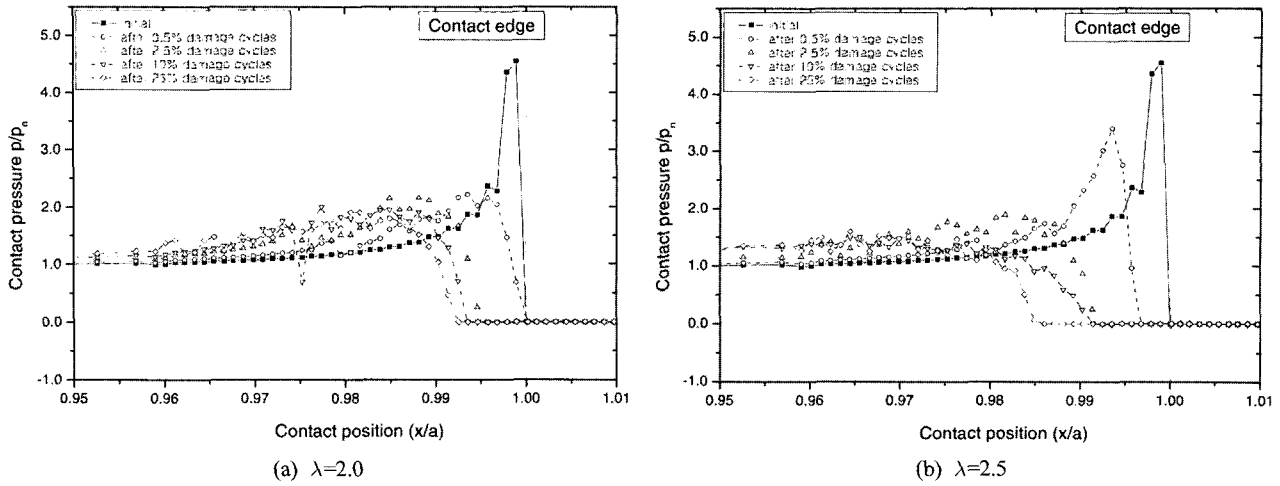


Fig. 4. Contact pressure distributions at press-fitted condition

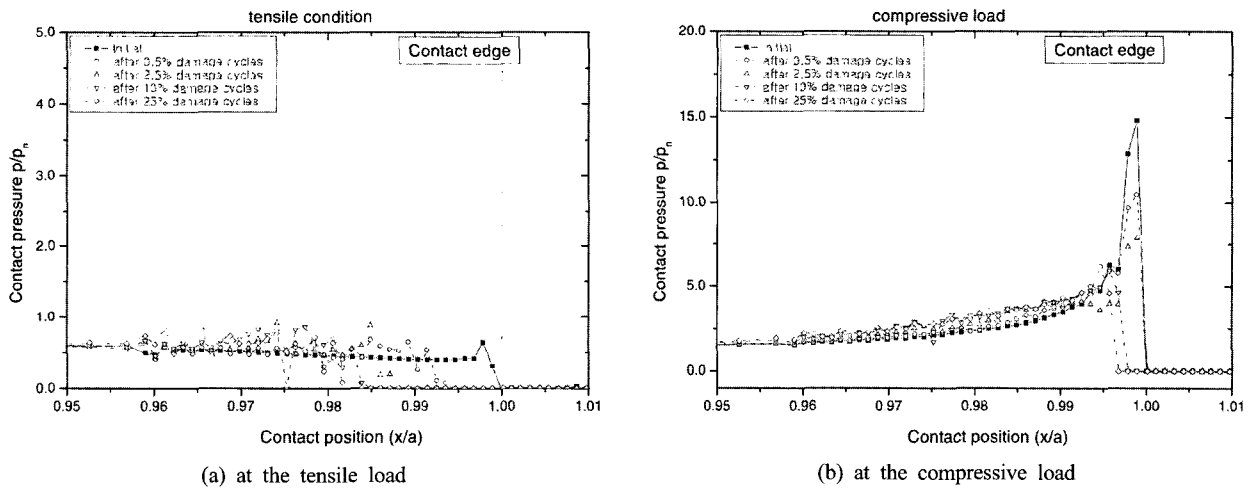


Fig. 5. Distributions of contact pressure in shaft contact surface ($\lambda=2.0$)

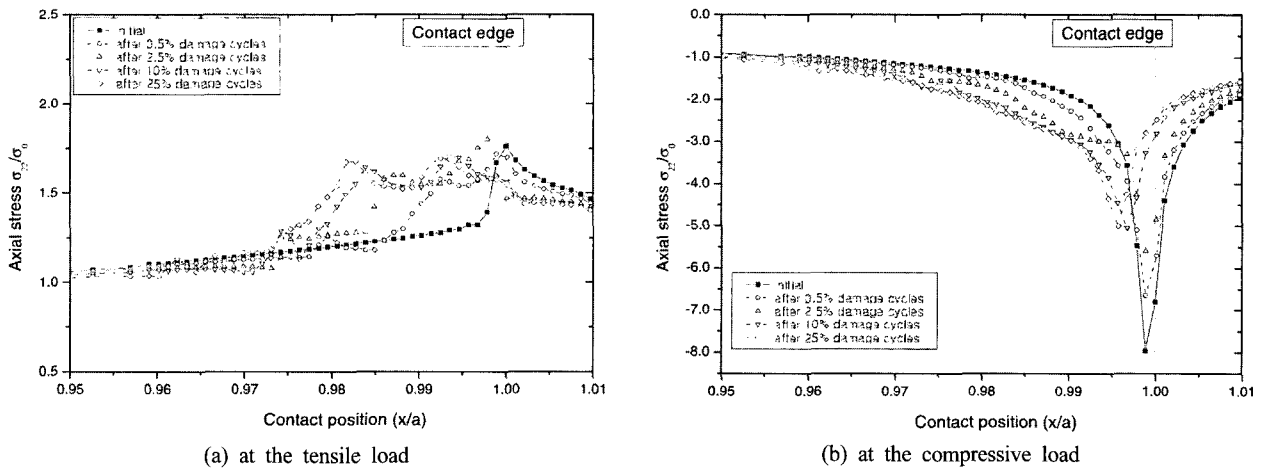


Fig. 6. Distributions of axial stress in shaft contact surface ($\lambda=2.0$)

3. 결과 및 검토

3.1 마모에 따른 응력변화

Fig. 4는 압입상태(press-fitted and unloaded)에서 마모에 따른 접촉압력 변화를 나타낸 그림이다. 여기에서 x축은 접촉면의 길이(a=14.5mm)로 나누어 표시하였고, x/a=1의 위치는 접촉면의 끝단을 나타낸다. Fig. 4 (a)는 하중조건 $\lambda=2.0$ 일 때 마모에 따른 접촉압력의 변화이며, 마모가 발생하지 않은 상태에서 접촉압력은 접촉끝단 바로 안쪽에서 최고가 된다. 그러나, 초기 피로사이클($N_d/N_f=0.005$)에서 프레팅 마모에 의해 접촉압력은 크게 감소한다. 또한, 피로사이클이 증가할수록 최대 접촉압력의 위치는 접촉끝단에서 안쪽으로 이동한다. 마모가 진행 될수록 접촉끝단은 마모에 의해 접촉의 분리가 발생하여 접촉압력이 0이 되는 영역이 증가한다. Fig. 4 (b)와 같이 하중에 따라 접촉압력의 감소와 최대접촉압력의 이동은 비슷한 경향을 나타내었으며, 하중이 증가함에 따라 접촉끝단 안쪽에서의 마모가 증가하여 접촉면의 분리가 발생하는 영역이 증가한다.

Fig. 5는 굽힘하중($\lambda=2.0$)이 작용할 때 인장하중 및 압축하중 상태의 접촉면 압력 변화를 나타낸 그림이다. Fig. 5 (a)의 인장하중 상태일 때 접촉압력은 $1.0 \cdot p_n$ 이하이고 접촉압력의 최대치는 크게 변화하지 않았지만, 압입상태와 비교하여 접촉면의 분리가 발생하는 영역이 증가한다. 그러나 Fig. 5 (b)의 접촉면이 압축하중 상태일 때 접촉압력은 초기에 마모가 진행됨에 따라 크게 변화한다. 전체수명의 10%($N_d/N_f=0.01$)이상일 경우 접촉끝단에서 접촉면의 분리가 발생하고 최대접촉압력의 위치는 안쪽으로 이동한다. 이것은 프레팅 초기에는 접촉끝단에서 마모가 집중적으로 발생하는 것을 의미한다. 즉, 접촉면에 발생하는 마모는 슬립량이 일정할 때 접촉압력에 비례[13]하므로 접촉압력이 크게 발생하는 압축하중 상태일 때 접촉끝단에서 마모가 급속히 진행된다. 일정 피로사이클 이후에는 최대 접촉압력의 위치가 접촉끝단에서 안쪽으로 이동하므로 접촉끝단 안쪽에서 마모가 발생하게 된다.

Fig. 6은 굽힘하중($\lambda=2.0$)이 작용 할 때 인장하중 및 압축하중 상태의 마모에 따른 축방향 응력 변화를 나타낸 그림이다. 인장하중 상태에서 축방향 응력은 약 $1.7\sigma_0$ 정도이며 마모에 따라 최대값은 거의 변화하지 않으나, 일정 피로사이클 이후에는 최대값의 위치가 안쪽으로 이동한다. 압축하중 상태에서 축방향 응력은 초기에 약 $-8.0\sigma_0$ 에서 마모가 진행됨에 따라 거의 $-5.0\sigma_0$ ($N_d/N_f=0.01$ 일 때)로 감소하며 최대값의 위치도 변화하게 된다. 이 결과로 볼 때 피로수명은 작용하는 응력범위와 연관이 있으므로 초기에 마모가 진행될 때 압축응력이 인장응력보다도 더 크게 발생하기 때문에 피로손상은 압축

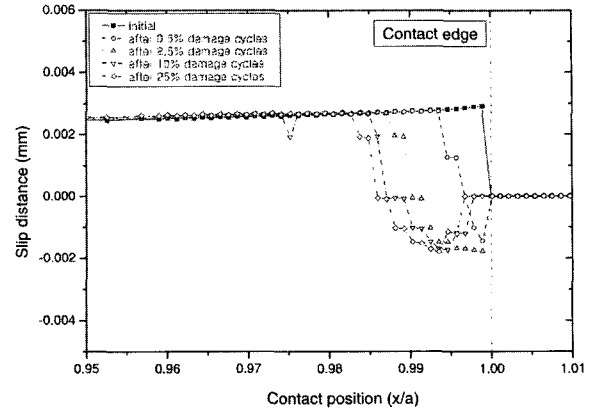


Fig. 7. Slip distance under compressive load condition ($\lambda=2.0$)

하중 상태의 접촉면 응력 분포가 더 크게 영향을 미침을 알 수 있다. 이것은 마모에 따른 전단응력의 변화에서도 같은 경향을 나타내었다. 또한, 하중이 증가할수록 마모에 따른 축방향 응력과 전단응력의 최대 위치는 접촉끝단에서 더 많이 안쪽으로 이동하였으며, 이것은 하중증가에 따라 압입축의 접촉끝단의 접촉면 분리가 발생하는 영역이 증가하기 때문이다.

Fig. 7은 압축하중 작용시 축과 보스와의 슬립량을 계산한 결과이다. 마모가 진행될수록 접촉면간의 슬립량 최대크기는 거의 변화가 없으나, 슬립이 최대로 발생하는 위치는 마모에 의한 접촉면간의 분리에 의해 안쪽으로 이동한다. 또한, 압축하중에 의해 접촉끝단에서 발생하는 축의 상대슬립은 접촉면 안쪽에서 발생하는 슬립의 방향과 반대로 발생함을 알 수 있다.

이상과 같이 압입축의 접촉응력 분포는 프레팅 마모에 의해 최대값의 크기 및 위치가 피로사이클에 따라 변화하므로 응력과 변형률을 이용한 피로수명해석 시 프레팅 마모를 고려해야 할 것으로 판단된다.

3.2 균열발생 위치의 변화

Fig. 8은 하중조건 $\lambda=2.0$ 이고 접촉면이 압축상태일 때 마모에 따른 프레팅 피로손상 파라미터의 계산결과이다. 마모가 발생하지 않은 압입상태에서 프레팅 피로손상 파라미터는 접촉끝단에서 가장 큰 값을 나타낸다. 그러나, 초기 피로사이클인 파단수명의 약 0.5% 피로사이클($N_d/N_f=0.005$)후 프레팅 피로손상 파라미터는 접촉끝단에서 0.015mm안쪽 위치에서 가장 큰 값을 나타낸다. 프레팅 마모가 진행되어 파단수명의 10% 피로사이클($N_d/N_f=0.1$)에서는 접촉끝단에서 약 0.05mm 위치에서 가장 큰 값을 나타내며, 접촉응력의 변화경향과 거의 유사하다.

Fig. 9는 하중조건 $\lambda=2.0$ 일 때 프레팅 피로손상 파라미터와 임계평면접근법으로 계산한 피로손상 사이클에 따른 균열

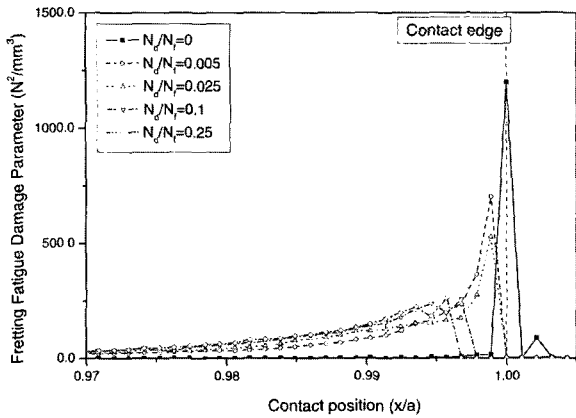


Fig. 8. Fretting fatigue damage parameter at stress amplitude of $\lambda=2.0$

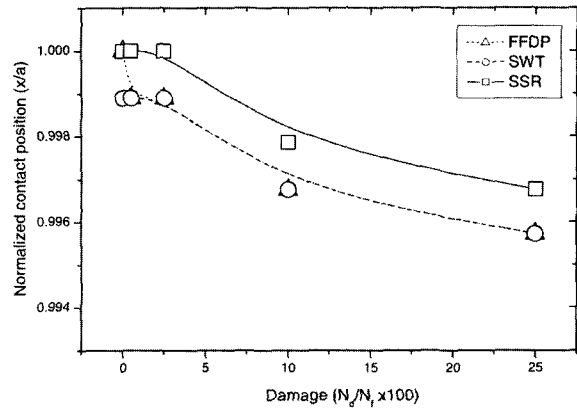
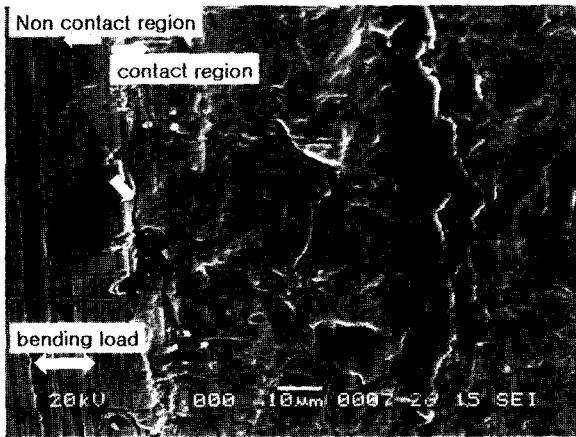
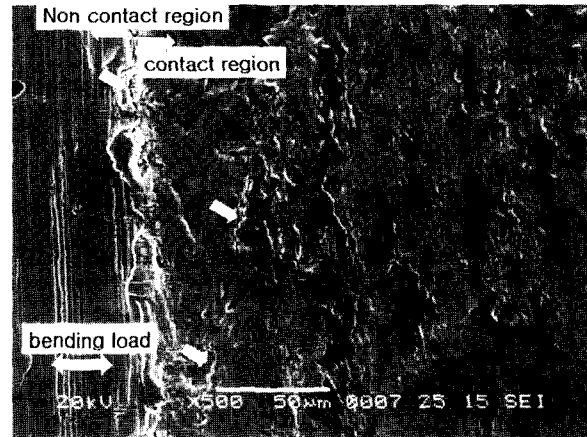


Fig. 9. The variation of predicted crack initiation site ($\lambda=2.0$)



(a) $N_d/N_f=0.025$



(b) $N_d/N_f=0.1$

Fig. 10. Crack nucleation sites on the contact surface at $\lambda=2.5$

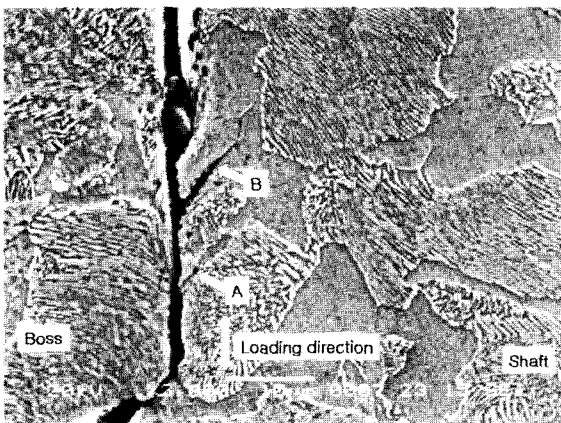


Fig. 11. Crack nucleation sites on the cross section of press-fitted specimen at $\lambda=2.5$, $N_d/N_f=0.1$

로손상 사이클에 따라 마모가 진행되어 균열발생 위치가 점차 접촉끝단에서 안쪽으로 이동하는 것을 잘 나타내고 있다.

이와 같이 마모를 고려한 압입측의 균열발생 위치를 해석한 결과는 Fig. 10 과 같이 압입측의 균열발생위치(\rightarrow 표시)를 관찰한 실험결과와 경향이 일치하였다. Fig. 10 (a)는 초기 피로사이클($N_d/N_f=0.025$)일 때 접촉끝단에서 발생한 균열을 나타내고 있으며, Fig. 10(b)는 파단수명의 약 10% 피로사이클($N_d/N_f=0.01$)에서 접촉끝단에 발생한 균열을 나타내고 있다. Fig. 10(b)의 접촉끝단 표면에서는 접촉끝단에서 발생한 초기 균열과 안쪽에서 발생한 균열이 동시에 나타나고 있으며, 균열발생 위치 해석결과는 프레팅 마모가 압입측의 접촉끝단에 다중균열이 발생하는 원인임을 잘 설명하고 있다. 즉, 압입측에 프레팅이 발생할 경우 초기에는 큰 응력집중에 의해 접촉끝단에서 미세균열이 발생하고 프레팅 마모가 진행될수록 접촉끝단 안쪽에서 미세균열이 발생한다. 따라서, 압입측에 발생하는 미세균열 위치의 변화는 프레팅 마모에 의한 접촉면

발생위치 예측 결과이다. 최대전단응력 범위 파라미터가 다른 결과와 비교하여 약간 접촉끝단쪽으로 예측되었지만, 피

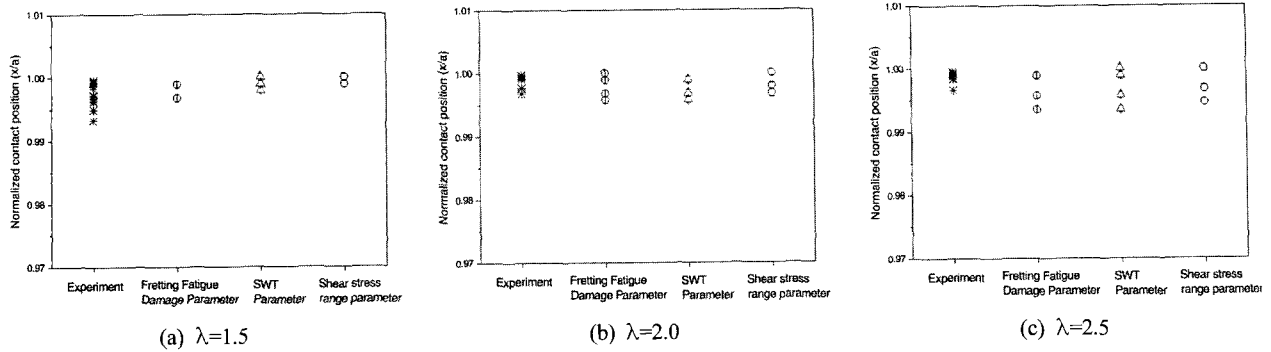


Fig. 12. Comparison of predicted crack initiation sites and experimental results

의 응력변화가 주요한 원인임을 알 수 있다.

Fig. 11은 시험편의 접촉끝단 단면을 SEM으로 관찰한 결과이며, 접촉끝단 근처와 안쪽에서 발생한 균열을 나타낸다. 균열깊이는 접촉끝단 근처에서 발생한 균열(A)보다 안쪽에서 발생한 균열(B)이 더 크다. 이것은 초기 프레팅에 의해 발생한 접촉끝단 균열이 나중에 발생한 균열보다 더 진전속도가 느리며, 초기균열과 마모가 응력집중을 완화하기 때문[19]이다. 즉, 피로사이클 초기에 발생된 미세균열은 마모에 의해 응력집중이 감소되기 때문에 균열진전속도는 감소하게 된다. 그러나 마모가 어느 정도 진행된 후 접촉끝단 안쪽에서 발생한 균열은 마모진행이 느리기 때문에 균열진전속도의 변화가 거의 없게 되어 초기 미세균열보다 진전속도가 더 커지게 되는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 실험결과와 각 파라미터로 예측한 균열발생 위치의 비교 결과이다. 하중조건 $\lambda=2.0$ 일 때 실험결과와 예측결과는 비슷한 경향을 나타내었고 3가지 파라미터 중 최대전단 응력 범위 파라미터가 가장 실험결과와 일치하였다. 그러나 하중조건 $\lambda=1.5, 2.5$ 일 경우 실험결과와 예측결과가 차이가 발생하였다. 이것은 하중조건이 낮을 경우($\lambda=1.5$)에는 프레팅 마모가 해석에 적용한 파단수명의 25% 피로사이클보다 더 길게 영향을 미치고, 하중조건이 높을 경우($\lambda=2.5$)에는 파단수명의 25% 피로사이클보다 더 짧게 영향을 미치기 때문이라고 판단된다.

4. 결론

압입측에 발생하는 프레팅 마모가 균열발생위치에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압입측에 프레팅 마모가 진행될 때 초기 피로사이클에서 압입상태의 접촉압력은 크게 감소하며, 피로사이클이 증

가할수록 압입상태의 최대 접촉압력의 위치는 접촉끝단에서 안쪽으로 이동한다.

- (2) 마모가 진행 될수록 접촉끝단은 마모에 의해 접촉의 분리가 발생하는 영역이 증가하고, 하중이 증가함에 따라 접촉면의 분리가 발생하는 영역이 증가한다.
- (3) 압입측에 프레팅 마모가 진행될 때 초기 피로사이클에서 하중 작용시 접촉끝단에 발생하는 최대 접촉응력은 급격히 감소하며 그 후에는 최대 접촉응력의 발생위치가 접촉끝단에서 안쪽으로 이동한다.
- (4) 압입측에 프레팅이 발생할 경우 초기에는 큰 응력집중에 의해 접촉끝단에서 미세균열이 발생하고 프레팅 마모가 진행될수록 접촉끝단 안쪽에서 미세균열이 발생하며, 이와 같은 미세균열 발생 위치의 변화는 프레팅 마모에 의한 접촉면의 응력변화가 주요한 원인이다.

참고 문헌

1. R. B. Waterhouse (1992), "Fretting fatigue," International materials reviews, Vol.37, No.2, pp.77-97.
2. "機械・構造物の破損事例と解析技術"(1984), 日本機械學會.
3. R. Kühnel (1932), "Achsbrüche von Eisenbahnfahrzeugen und ihre Ursachen," Glasers Annln, Gewerbe Bauw., Vol.110, p.39.
4. O. J. Horger (1956), "Fatigue of Large Shafts by Fretting Corrosion," Proc. Int. Conf. Fatigue Metals, pp.352-360.
5. W. W. Maxwell, B. R. Dudley, A. B. Cleary, J. Richards, and J. Shaw (1967-68), "Measures to Counter Fatigue Failure in Railway Axles," Proc. Inst. Mech. Engrs., Vol.182, Pt.1, No.4, pp.89-99.
6. K. Nishioka and K. Komatshu (1967), "Study on the means for Improvement in Fatigue Strength of press-fitted axles," Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Vol.33, No.248, pp.503-511.
7. S. Tanaka, K. Hatsuno, B. Mori, and S. Yaguchi (1975), "Fretting Corrosion and Fatigue Strength for Wheel-seat of Car-Axle - Test Results of Full Size Wheel Axle Testing Machine - (Report 1),"

- Railway Technical Research Report, No.955.
8. R. A. Smith and S. Hillmansen (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.
 9. K. Hirakawa, K. Toyama and M. Kubota (1998), "The analysis and prevention of failure in railway axles," Int. J. Fatigue, Vol.20, No.2, p.135.
 10. T. Makino and M. Yamamoto and K. Hirakawa (1997), "Effect of Contact Edge Profile on Fretting Fatigue Crack Initiation Site in Press-Fitted Axle," Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng. (A), Vol.63, No.615, pp.2312-2317.
 11. 이동형, 권석진, 최재봉, 김영진 (2007), "압입측에 발생하는 프레팅 피로균열 발생 및 진전특성 실험", 대한기계학회논문집 A 권, Vol.31, No.6, pp.701-709.
 12. ABAQUS (2003), "ABAQUS user's and theory manual", Version 6.4, Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc.
 13. D. H. Lee, S. J. Kwon, J. B. Choi, and Y. J. Kim (2006), "Fatigue Life Evaluation of Press-fitted Shaft considering the Evolution of Contact Stress and Surface profile under Bending Load," 9th International Fatigue Congress, CD-rom ver.
 14. A. C. Ugural and S. K. Fenster (1995), Advanced strength and applied elasticity: Prentice-Hall, Inc.
 15. C. Ruiz and P. H. B. B. a. K.C.Chen (1984), "An investigation of fatigue and fretting in a dovetail joint," Experimental Mechanics, Vol.24, No.3, pp.208-217
 16. C. D. Lykins, S. Mall, and V. Jain (2000), "An evaluation of parameters for predicting fretting fatigue crack initiation," Int. J. Fatigue, Vol.22, pp.703-716
 17. R. I. Stephens, A. Fatemi, R.R. Stephens and H.O. Fuchs, Metal Fatigue in Engineering-2nd ed.: John Wiley & Sons, 2001.
 18. C. D. Lykins, S. Mall, and V. K. Jain (2001), "Combined experimental-numerical investigation of fretting fatigue crack initiation," Int. J. Fatigue, Vol.23, pp.703-711.
 19. R. B. Waterhouse and D. E. Taylor (1971), "The initiation of fatigue cracks in a 0.7% carbon steel by fretting," Wear 17, pp.139-147.

(2007년 7월 24일 논문접수, 2007년 9월 6일 심사완료)