

< 논문 >

## 압입축에 발생하는 프레팅 피로균열 발생 및 진전 특성 실험

이동형<sup>†</sup> · 권석진<sup>\*</sup> · 최재봉<sup>\*\*</sup> · 김영진<sup>\*\*</sup>  
(2007년 4월 4일 접수, 2007년 5월 7일 심사완료)

### Experimental Study on Fatigue Crack Initiation and Propagation due to Fretting Damage in Press-fitted Shaft

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

**Key Words:** Press-fitted Shaft(압입축), Fretting(프레팅), Fretting Damage(프레팅 손상), Fatigue Crack Initiation(피로균열 발생), Fatigue Crack Propagation(피로균열 진전)

#### Abstract

To clarify the characteristics of surface damage due to fretting in press-fitted shaft, experimental methods were applied to small scale specimen with different bending load condition. Fatigue tests and interrupted fatigue tests of press-fitted specimen were carried out by rotate bending fatigue test. Macroscopic and microscopic characteristics were examined using scanning electron microscope (SEM), optical microscope or profilometer. It is found that small fatigue cracks are nucleated early in life regardless of bending stress, and thus the most portion of fatigue life on press fits can be considered to be crack propagation process. Most of surface cracks are initiated near the contact edge, and multiple cracks are nucleated and interconnected. Furthermore, the fretting wear rates at the contact edge are increased rapidly at the initial stage of total fatigue life. It is thus suggested that the fatigue crack nucleation and propagation process is strongly related to the evolution of surface profile by fretting wear in press fits.

#### 1. 서론

철도 차량의 차축 또는 스팀 터빈의 축과 같이 휠 또는 보스가 압입되는 압입부에는 축과 보스 사이의 미소한 미끄럼 접촉에 의해 프레팅 손상이 발생하며, 일반 피로와 비교하여 현저한 수명의 감소가 생긴다.<sup>(1)</sup>

철도차량 차축의 파손은 드물게 발생하지만, 차축의 파손은 차량 탈선, 인명손상 등의 큰 피해를 유발한다. 따라서, 차축의 파손을 방지하고

수명향상을 위해 많은 연구가 진행되었다.

압입축의 프레팅 손상에 관한 연구로는 Kühnel<sup>(2)</sup>이 프레팅에 의해 압입부의 수명이 약 50% 감소된다는 결과를 발표하였다. 그 후, Hoyer,<sup>(3)</sup> Maxwell 등,<sup>(4)</sup> Nishioka 등,<sup>(5)</sup> Tanaka 등<sup>(6)</sup>이 실물 차축 혹은 압입 시험편을 이용한 피로 시험을 통하여 수명에 영향을 미치는 여러 가지 인자와 수명 향상 방안을 제시하였다. 이와 같이 압입축의 피로에 관한 많은 연구가 수행되었지만, 차축의 파손이 계속 발생<sup>(9)</sup>되는 등 프레팅에 의한 균열 발생의 문제는 아직도 많은 연구가 필요한 부분<sup>(10)</sup>이다.

압입축의 프레팅 피로균열 특성에 관한 연구로는 Hoyer<sup>(3)</sup>가 실물시험을 통하여 재질에 따른 피로한도 및 일정 피로사이클에서의 균열깊이를 비교하였지만, 균열발생이 전체수명에 차지하는 비율 등 균열발생 수명에 관한 연구가 미흡하였다.

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국철도기술연구원

E-mail : dhlee@krri.re.kr

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

<sup>\*</sup> 한국철도기술연구원 철도시스템안전연구본부

<sup>\*\*</sup> 회원, 성균관대학교 기계공학부

Tanaka 등<sup>(6)</sup>은 축소형 압입시험편을 이용하여 균열발생과 파단강도와와의 관계를 실험적으로 도출하였으나, 균열의 발생위치와 프레팅 마모의 변화 등에 대한 연구가 부족하였다. 최근에는 인공 균열을 이용한 실물 피로시험<sup>(7)</sup> 및 확률론적 파괴역학을 이용한 건전성 평가<sup>(8)</sup> 등이 수행되었지만, 초기 균열의 발생위치 및 크기를 가정하였으므로 실제 손상 메커니즘과는 차이가 있다. 즉, 압입부에 발생하는 프레팅 손상에 의해 피로균열 발생 및 진전 특성, 프레팅 마모에 의한 압입축의 접촉부 형상 변화 및 피로 수명과의 관계에 대한 부분은 아직도 명확하지 않다.

따라서, 본 연구에서는 압입축의 피로수명 예측 및 수명 향상 방안을 연구하기 위한 전 단계로 압입부에 발생하는 프레팅 손상특성을 명확히 하고자 하였다. 회전굽힘 피로시험기를 이용하여 축소형 압입시험편(small scale press-fitted specimens)의 프레팅 피로시험을 실시하고 프레팅이 피로수명에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 정해진 반복수에서 시험편을 분리하고 프레팅 손상을 분석하여 파단수명에 대한 균열의 발생 및 진전특성, 균열의 발생위치 및 각도, 프레팅 마모 특성 등 압입부에 발생하는 프레팅 손상특성을 명확히 하였다.

## 2. 프레팅 피로실험

### 2.1 시험편 및 재질

압입 시험편은 Fig. 1과 같이 압입부 직경  $\phi$  16mm, 전체 길이 210mm의 축에 폭 30mm, 외경  $\phi$  40mm의 보스가 압입된 회전굽힘 피로시험용

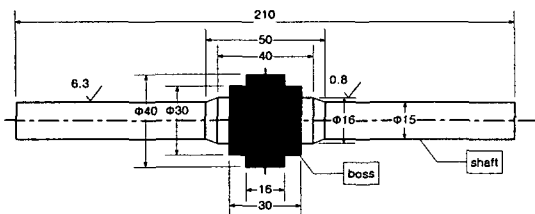


Fig. 1 Geometry of the press-fitted fatigue specimen

시험편으로 제작하였다. 시험편의 압입공차는 Lamé의 공칭 접촉압력<sup>(11)</sup>이 보스 외경  $\phi$ 30mm위치에서 약 80~100MPa이 되도록 하였고, 압입부위의 보스 내경 끝단은 큰 응력집중을 피하기 위하여 모따기(chamfering)를 하였다. 축과 보스의 압입부위는 연마하였고 제작 후 평균 표면거칠기(Ra)는 0.15 $\mu$ m이었다. 보스의 압입은 접촉부위의 손상을 최소화하기 위하여 보스를 400 $^{\circ}$ C에서 15분 정도 가열한 후 압입하였다.

본 연구에 사용한 모든 시험편은 실제 철도차량이 사용하고 있는 차축과 차륜의 압입부위에서 채취하였으며, 축 및 보스의 기계적 성질 및 화학적 성분은 각각 Table 1, Table 2와 같다. 시험편은 별도의 열처리를 수행하지 않은 상태로 제작하였고, 시험편의 표면경도는 축의 경우 187HB, 보스의 경우 210HB이었다.

### 2.2 실험 및 분석 방법

피로시험은 4점 하중식 회전굽힘 피로시험기를 사용하여 압입부에 일정한 반복 굽힘응력이 작용하도록 하였다. 시험은 실온, 대기 중에서  $1 \times 10^7$  사이클까지 수행하였다. 직경  $\phi$ 12mm의 압입되지 않은 일반 피로시험편의 피로시험도 실시하여 압입축의 프레팅에 의한 피로강도 감소량을 비교하였다. 압입시험편의 시험은 저사이클 및 고사이클 피로영역을 고려할 수 있도록 하중을 3단계로 구분하여 적용하였다. 하중은 공칭 굽힘응력( $\sigma_0$ )에 대한 Lamé의 평균 공칭 접촉압력( $p_0 \approx 90$ MPa)의 비율인 파라미터  $\lambda (= \sigma_0/p_0)$ 가 각각  $\lambda = 1.5, 2.0, 2.5$ 가 되도록 설정하였다.

각 하중단계에서 파단수명을 먼저 시험한 후,

Table 1 Chemical composition of specimen(mass %)

Material	C	Si	Mn	P	S
Shaft(SFA60)	0.43	0.24	0.74	0.009	0.016
Boss(SSW1)	0.60	0.32	0.71	0.011	0.014

Table 2 Mechanical properties of specimen

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Shaft(SFA60)	425	662	27.2
Boss(SSW1)	361	786	14.4

파단수명(100% cycles of total life)을 기준으로 일정 피로하중 부가 후(0.1, 2.5, 10, 25, 50, 75% cycles of total life) 시험을 중지하고 시험기에서 시험편을 분리한 다음 피로사이클 별 프레팅 손상특성을 분석하기 위하여 시험편을 절단하였다.

단면의 피로균열은 시험편 절단면을 연마(diamond polishing)하고 질산과 메칠알콜을 혼합한 Nital 5% 용액으로 부식시킨 후 관찰하였다. 접촉면은 초음파 세척을 수행하고 표면을 아세톤으로 세척한 후 관찰하였다. 균열 관찰은 SEM(Scanning Electron Microscope, JEOL JSM5600) 또는 광학 현미경(optical microscope, OLYMPUS GX71)을 이용하였고, 프레팅 마모는 거칠기 측정기(profilometer, Mitutoyo, SJ-400)를 이용하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 피로수명

일정반복 굽힘 피로하중 하에서 압입시험편의 피로시험 결과와 일반 피로시험편의 피로시험 결과를 응력-수명곡선(S-N curves)으로 나타내면 Fig.2와 같다.

하중 반복수  $1 \times 10^7$  사이클에 해당하는 응력진폭을 피로한도(fatigue limit)라 할 경우, 일반 시험편의 피로한도는 약 259MPa이었다. 이 응력진폭에서 압입시험편의 수명은 약  $1 \times 10^5$  사이클이며, 일반 시험편과 비교하여 큰 차이(two orders)로 피

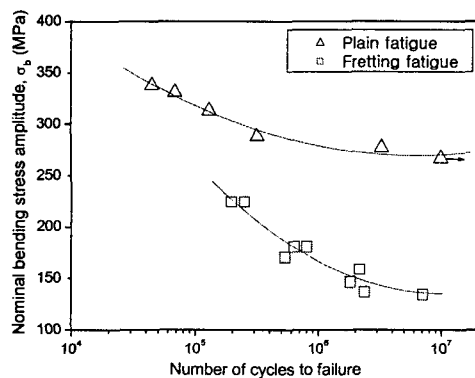


Fig. 2 Comparison between plain fatigue and fretting fatigue S-N curves of SFA60 steel

로수명이 감소하였다. 압입 시험편의 프레팅 피로한도(fretting fatigue limit)는 약 130MPa이며, 압입 시험편의 피로한도 감소비(strength reduction factor)는 약 2.0이었다.

#### 3.2 접촉표면의 피로균열 발생 및 진전특성

프레팅에 의해 발생하는 피로 사이클별 압입측의 표면손상 특성은 Fig. 3 ~ Fig. 7과 같다.

파단수명을  $N_f$ , 피로사이클을  $N_d$ 라 할 때, Fig. 3은 하중조건  $\lambda=2.5$ 이고, 전체파단수명의 0.5%사이클( $N_d/N_f=0.005$ )에서 중단한 시험편의 손상표면을 SEM으로 측정된 결과이다. 접촉끝단의 국부적인 영역에서 소성변형이 발생하였고, 소성변형에 의해 축의 접촉끝단이 초기형상보다 돌출(변형)되어 있었다. 접촉표면의 원주방향으로는 일부영역에서 프레팅 현상과 접촉끝단의 소성변형이 발생하였다. 이것은 가공시 발생한 축과 보스의 원주방향 형상오차에 의해 접촉압력이 큰 영역에서 프레팅 현상이 발생한 것으로 판단된다. 대부분의 프레팅 영역은 응착마멸(adhesive wear) 현상을 나타내었고, 굽힘하중이 클 경우( $\lambda=2.5$ ) 축과 보스의 슬립량이 크므로 하중방향으로 돌기(asperity)접촉에 의한 연삭마멸(abrasive wear) 현상이 피로사이클 초기에 관찰되었다. 하중의 크기에 관계없이 프레팅 손상의 초기단계에서는 국부적인 영역에서 프레팅이 발생하였고, 표면의 접촉손상 특성인 표면분리(delamination) 현상이 발생하였다.

Fig. 4는 하중조건  $\lambda=1.5$ 이고 전체 파단수명의 2.5% 사이클( $N_d/N_f=0.025$ )에서 중단한 시험편의 축 표면을 관찰한 SEM사진이다. 프레팅이 발생한 접촉면에는 마모에 의한 입자(Fig. 4의 B)와 하중방향에 직각인 방향으로 초기균열(Fig. 4의 A)이 발생하였다. 마모 입자의 경우 경계부 형상이 불규칙하고 반타원이지만, 초기 균열은 프레팅 방향에 수직으로 발생하며 거의 직선 모양을 나타내고 있다. 프레팅 영역은 프레팅 마모 입자로 확연히 구분이 되었고, 하중에 관계없이 프레팅 손상영역에서 약 30~50 $\mu$ m 길이의 초기 균열이 일부 관찰되었다.

Fig. 5는 전체 파단수명의 10% 손상( $N_d/N_f=0.1$ )을 받은 시험편 접촉면의 끝단에 발생한 균열과 표면거칠기 측정결과를 함께 나타낸 그림이다. 표면균열의 길이는 약 50~100 $\mu$ m이었고, 접촉

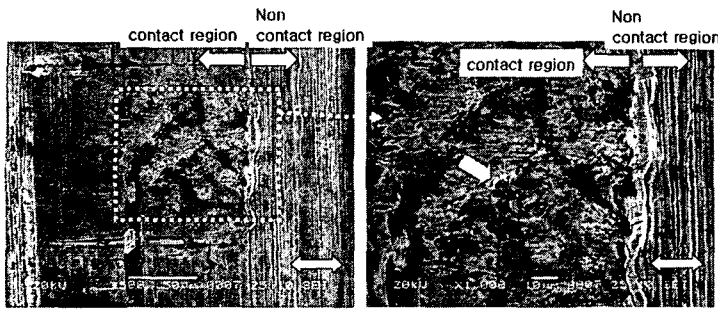


Fig. 3 Fretting surface at an extremely early period (at  $\lambda=2.5$ ,  $N_d/N_f=0.005$ )

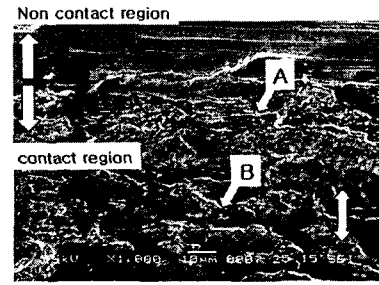


Fig. 4 Fatigue crack nucleation site(A) and wear particles(B) on the contact surface (at  $\lambda=1.5$ ,  $N_d/N_f=0.025$ )

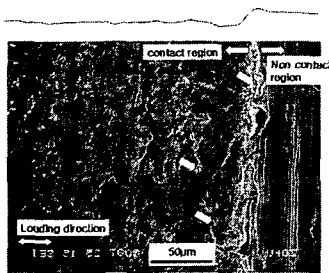


Fig. 5 Multiple crack nucleation sites on the contact surface and deformed surface profile (at  $\lambda=2.5$ ,  $N_d/N_f=0.1$ )

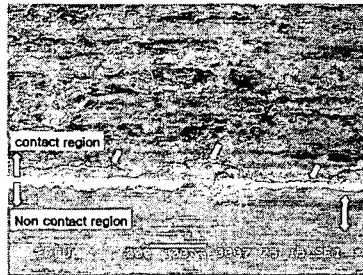


Fig. 6 Interconnected fatigue cracks on the contact surface (at  $\lambda=2.5$ ,  $N_d/N_f=0.25$ )

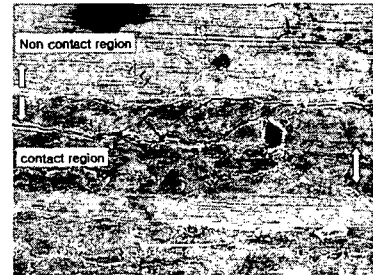


Fig. 7 Fatigue crack propagation on the contact surface (at  $\lambda=2.0$ ,  $N_d/N_f=0.5$ )

끝단과 접촉끝단 안쪽에서 다수 관찰되었다. 균열은 표면거칠기 측정결과와 비교해 볼 때 마모가 가장 많은 영역에서 발생하였고, 여러 위치에서 각각 발생하는 다중 균열로 서로 균열의 합체가 발생하기 전이었다.

전체 파단수명의 25% 사이클( $N_d/N_f=0.25$ )에서 중단한 시험편의 축 표면에는 Fig. 6과 같이 접촉끝단의 균열과 안쪽에서 발생한 균열이 합쳐지는 현상(coalescence)을 보이고 있다. 표면에서의 균열은 하중방향에 거의 수직으로 진전하고 있다. 일부 영역에서는 100 $\mu$ m 이상의 표면균열이 접촉끝단과 안쪽에서 평행하게 진전하고 있는 균열도 관찰되었고, 발생한 균열사이에 프레팅 마모입자가 들어가는 현상도 관찰되었다.

전체 파단수명의 50% 사이클( $N_d/N_f=0.5$ )에서 중단한 시험편에서는 Fig. 7과 같이 대부분의 균열이 합체가 발생하였으나, 하중이 작은 경우( $\lambda=1.5$ ) 합체가 발생하지 않은 균열도 존재하였다.

전체 파단수명의 50% 사이클 이상에서는 표면 균열의 틈이 더욱 커졌고, 일부 영역에서 합쳐진 균열사이에 또 다른 균열이 생성되었다.

### 3.3 단면의 피로균열 진전특성

압입축에 발생한 단면 균열은 보스와 축이 결합된 상태에서 절단하여 접촉면 끝단 영역을 관찰하였고, 접촉면에 수직으로 균열깊이를 측정하였다.

전체 파단수명의 0.5% 사이클( $N_d/N_f=0.005$ )의 피로손상을 받은 시험편 단면에서는 균열이 관찰되지 않았으나, 축의 접촉끝단에는 소성변형에 의해 축 끝단이 변형되어 있었다.

전체 파단수명의 2.5% 사이클( $N_d/N_f=0.025$ )일 때 축 단면에서 4~10 $\mu$ m 깊이의 초기균열이 각 하중조건 시험편에서 관찰되었다. Fig. 8은 하중조건  $\lambda=2.0$ 이고,  $N_d/N_f=0.025$ 일 때 시험편 단면에 발생한 초기균열과 접촉끝단의 높은 접촉응력

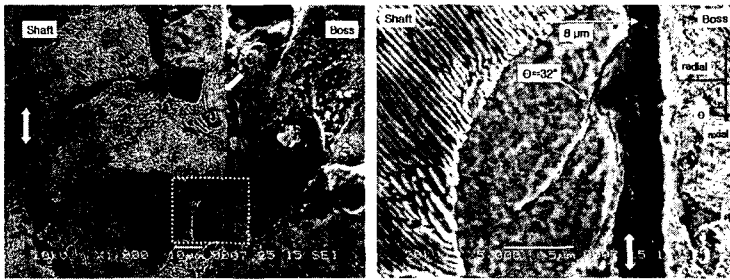


Fig. 8 Fatigue crack nucleation on the cross section of shaft (at  $\lambda=2.0$ ,  $N_d/N_f=0.025$ )

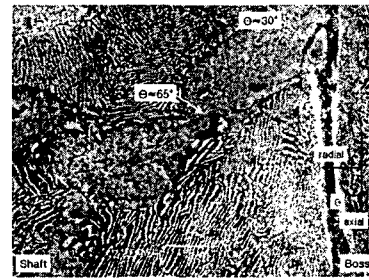


Fig. 9 Fatigue crack nucleation and propagation on the cross section of shaft (at  $\lambda=2.0$ ,  $N_d/N_f=0.1$ )

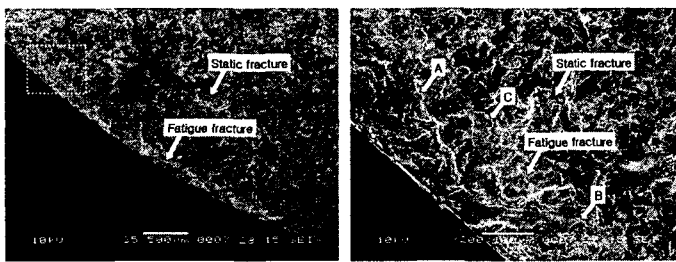


Fig. 10 Visual examination of crack propagation and forced fracture surface (at  $\lambda=1.5$ ,  $N_d/N_f=0.25$ )

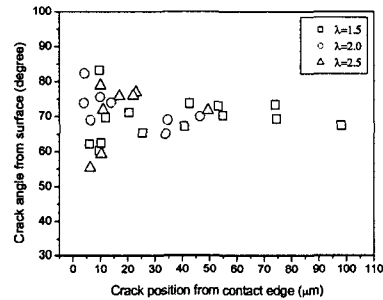


Fig. 11 The relation of crack propagation angle and crack nucleation position

으로 인해 발생한 펄라이트(pearlite)의 변형(Fig. 8의 화살표 위치)을 나타낸다. 초기균열은 깊이 방향으로 발생한 균열과 접촉면과 평행하게 발생한 균열로 구분된다. 깊이 방향 균열의 균열깊이는 약  $8\mu\text{m}$ 이고 균열 각도는 축 방향을 기준으로 시계방향으로 약  $32^\circ$ 이었다. 깊이 방향의 균열은 성장하여 거시적인 균열이 되며, 접촉면과 평행하게 발생한 균열은 진전하여 마모입자가 되는 것으로 판단된다. 접촉끝단의 다른 위치에서는 깊이방향으로의 균열이 관찰되지 않았으므로 Fig. 4의 표면균열 발생과 같이 매우 국부적인 위치에서만 균열이 발생됨을 알 수 있다.

Fig. 9는 하중조건  $\lambda=2.0$ 이고, 전체 파단수명의 10% 손상( $N_d/N_f=0.1$ )을 받은 시험편의 단면에 발생한 약  $40\mu\text{m}$  깊이의 균열이다. 초기균열은 펄라이트 영역에서 발생하였고, 펄라이트와의 경계면을 따라 진전하였다. 균열의 각도는 균열깊이 약  $7\mu\text{m}$ 까지  $30^\circ$ 이었고, 균열이 더 진전할수록 약  $65^\circ$ 를 나타내었다.

전체 파단수명의 25% 손상( $N_d/N_f=0.25$ )을 받

은 시험편의 단면에서는 내부에서 진전하는 균열도 관찰되었으며, 옆에서 발생한 균열의 진전에 의한 것으로 판단된다. Fig. 10은 하중조건  $\lambda=1.5$ , 전체 파단수명의 25% 손상( $N_d/N_f=0.25$ )을 받은 시험편을 가열 착화 후 강제로 파단하여 파단면의 형상을 관찰한 결과이며, 서로 다른 위치에서 발생한 반타원 균열(Fig. 10의 A, B)이 합쳐되어 원주방향 균열(Fig. 10의 C)이 됨을 알 수 있다.

Fig. 11은 균열깊이  $50\mu\text{m}$  이상의 균열을 대상으로 절단면에서 관찰한 균열 발생 위치와 균열발생 각도의 관계를 나타낸 그래프이다. 압입부에 발생하는 균열깊이  $50\mu\text{m}$  이상의 균열은 축의 접촉면을 기준으로  $60\sim 80^\circ$  사이의 균열각도를 나타내었다. 접촉면 근방인 균열깊이  $10\mu\text{m}$  이하의 경우 균열각도는 대부분 약  $30^\circ$ 이었다.

### 3.4 프레팅 마모특성

Fig. 12는 하중조건은  $\lambda=2.0$ 일 때 피로사이클에 따른 접촉표면 형상의 변화를 나타낸다. 접촉

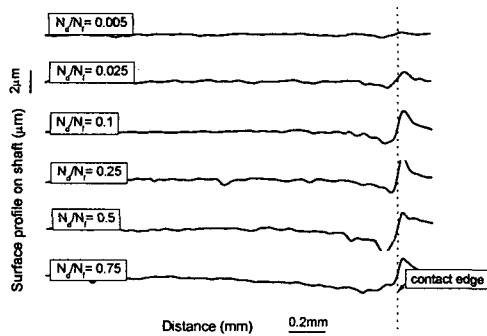


Fig. 12 Evolution of contact surface profile with the fretting damage at  $\lambda=2.0$

표면 형상의 변화는 프레팅이 발생한 축의 접촉면 거칠기를 최소 3군데 이상 측정하여 평균하였으며 접촉끝단을 기준으로 약 2mm 안쪽을 측정 한 결과이다.

파단 수명의 0.5% 피로사이클( $N_d/N_f=0.005$ )에서는 SEM 측정결과와 같이 접촉끝단이 소성변형에 의해 형상이 변화하였으며, 다른 접촉부분은 거의 변화가 없었다.

사이클이 증가함에 따라 프레팅에 의한 손상이 증가하여 접촉면의 끝단에서 프레팅 마모가 집중적으로 발생하다가 점차 안쪽으로 확대되었다. 축과 조립된 보스의 경우 피로사이클이 증가함에 따라 마모의 변화는 거의 없었으며, 이는 보스가 축보다 인장강도 및 경도가 높기 때문에 상대적으로 축에서 마모가 발생한 것으로 판단된다.

#### 4. 분석 및 고찰

##### 4.1 프레팅이 피로수명에 미치는 영향

Fig. 2의 시험결과에 따르면 압입부에 프레팅이 발생할 경우 피로수명은 크게 감소하며,  $1 \times 10^7$  사이클 이하의 영역에서 압입 시험편의 응력-수명 곡선 기울기는 일반 시험편에 비하여 더 가파른 결과를 나타낸다. 즉, 높은 응력상태에서 프레팅 피로 수명과 일반피로 수명과의 차이가 적은 반면, 낮은 응력 상태에서는 피로수명이 크게 감소한다.

이와 같은 현상은 노치가 있는 연성재료의 경

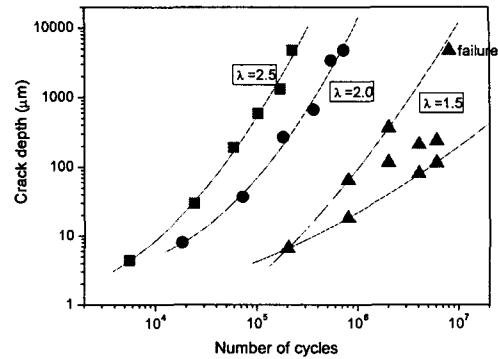


Fig. 13 Crack propagation curve of press-fitted shaft

우와 비슷하다. 노치가 있는 시험편에 큰 하중이 작용할 경우 항복에 이르는 영역이 커져 노치의 영향이 크게 없어진다. 그러나 낮은 하중이 작용할 경우 항복은 국부적으로 발생하고 노치의 영향이 커져 일반시험편과 수명차이가 많이 발생한다.<sup>(12)</sup> 압입 시험편의 경우 압입에 의해 접촉끝단에 응력집중이 발생한다. 이와 같은 압입상태에서 큰 하중을 받게 되면 접촉끝단에 항복이 발생하는 영역이 커지고, 낮은 하중이 작용할 경우 항복은 접촉끝단에 국부적으로 발생하게 되어 노치와 같이 낮은 응력상태에서 피로수명이 크게 감소하게 된다. 따라서, 본 실험 결과는 압입부의 프레팅은 응력집중에 의한 것이 주요 원인<sup>(13)</sup>이라는 결과와 일치한다.

그러나, 실제로 프레팅이 발생할 경우 더욱 복잡한 현상을 나타내므로 노치와 같은 응력집중뿐만 아니라 재질, 마찰계수, 마모 등의 고려도 필요하다. Fig. 12의 실험결과에 의하면 프레팅 손상이 진행될수록 마모에 의해 접촉끝단의 형상이 변화하므로 응력집중이 감소됨을 추정할 수 있다. 즉, 압입부에 프레팅이 발생할 경우 응력집중뿐만 아니라 마모가 피로수명에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

##### 4.2 균열발생 및 진전특성

Fig. 13은 단면에 발생한 피로균열 시험결과를 이용하여 피로사이클에 따른 최대 균열깊이의 변화를 나타낸 곡선이다. 하중이 낮을 경우( $\lambda=1.5$ )

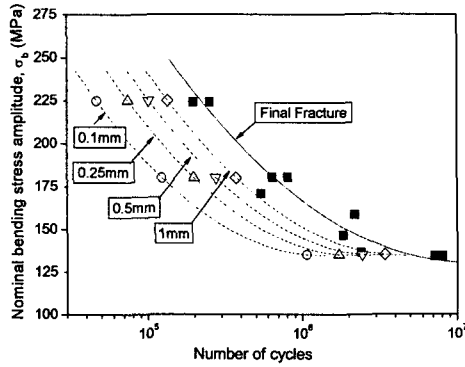


Fig. 14 Fretting fatigue S-N curves considering the crack size

피로한도 영역에 가까워 시험데이터의 산란이 발생하였기 때문에 균열깊이의 최대치와 최소치를 따로 구분하여 표시하였다.

압입부에 프레팅이 발생할 경우 약 10 $\mu$ m 이하의 균열이 하중에 관계없이 파단수명의 매우 이른 단계(2.5% 피로사이클)에서 발생하였다. 이것은 프레팅이 발생할 경우 프레팅이 균열을 빨리 발생시키기 때문<sup>(14)</sup>이고, 피로수명 감소의 원인이 된다.

최대 균열깊이와 피로사이클과의 관계를 이용하여 최대 균열깊이에 따른 수명곡선을 응력-수명곡선에 나타내면 Fig. 14와 같다. 압입부에 프레팅이 발생할 경우 전체수명의 약 15-20%의 영역에서 0.1mm 균열이, 전체수명의 약 50-60%에서 1mm 깊이의 균열이 발생한다. 일반 피로에서는 0.1mm의 균열 발생은 전체수명의 80~90%를 차지<sup>(15)</sup>하지만, 프레팅에 의해 균열은 매우 이른 단계에서 발생함을 알 수 있다. 따라서, 압입부 프레팅 피로수명을 해석할 경우, 0.1mm 균열은 피로손상의 초기에 발생하므로 0.1mm 초기균열을 고려한 파괴역학 해석이 가능하다. 그러나 초기 균열을 1mm로 고려하여 파괴역학 해석을 수행한다면 매우 보수적인 결과를 나타낼 것이고, 1mm 균열이 발생하기까지의 수명에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

압입부에서 발생하는 대부분의 균열은 Fig. 11에서 알 수 있듯이 접촉끝단을 기준으로 0-30 $\mu$ m 안쪽이다. 균열은 하중이 클 경우 접촉끝단 근처에서 많이 발생하였고, 하중이 낮을 경우 접촉끝

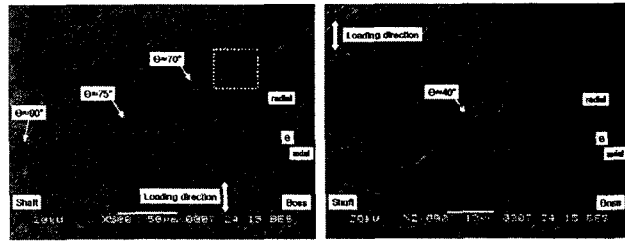


Fig. 15 SEM micrograph of fretting fatigue crack on the cross-section of the press-fitted specimen

단과 안쪽에서 발생하였다. 하중이 클 경우 접촉끝단에는 최대 반복 전단응력과 슬립량이 접촉면의 끝단에서 최대가 되어 응력집중과 프레팅 마모가 많이 발생하기 때문이다. 하중이 낮을 경우 접촉끝단의 응력집중이 상대적으로 작아 형상오차 등에 의해 응력집중이 발생하는 부위에서 균열이 발생하기 때문에 균열발생 위치가 넓어진 것으로 판단된다. 프레팅 시험편의 경우 대부분의 균열은 마모와 산화(oxidation)의 영향이 작은 혼합 고착-슬립(mixed stick-slip)영역근처에서 균열이 발생<sup>(16,17)</sup>하지만, 압입축에서는 슬립의 크기가 가장 큰 접촉끝단 위치에서 대부분의 균열이 발생하였다.

압입부에 발생하는 균열각도는 균열발생 위치에 따라 약간의 차이가 발생하지만, 대표적으로 Fig. 15와 같다. 균열이 진전됨에 따라 균열 각도는 크게 3가지 영역으로 구분할 수 있다. 초기 약 10 $\mu$ m까지 균열은 접촉표면과 30°~40°의 각도를 이루었다. 균열의 진전각도로부터 접촉면에 발생하는 전단응력의 작용 한계는 접촉면에서 깊이 약 10 $\mu$ m까지임을 추정할 수 있다. 균열이 진전할수록 전단응력보다는 인장응력의 영향이 더 커지므로 접촉면과의 균열각도는 점점 커지며, 균열 깊이 50~200 $\mu$ m까지는 약 60°~80°의 각도를 이루었다. 하중이 클 경우( $\lambda=2.5$ )에는 70°~80° 사이의 균열이 많았고, 하중이 작을 경우 ( $\lambda=1.5$ ) 60°~70° 사이의 균열이 많았다. 하중에 따른 균열 각도의 차이는 하중이 클 경우 균열이 진전됨에 따라 하중이 작을 경우보다 인장응력이 더 크게

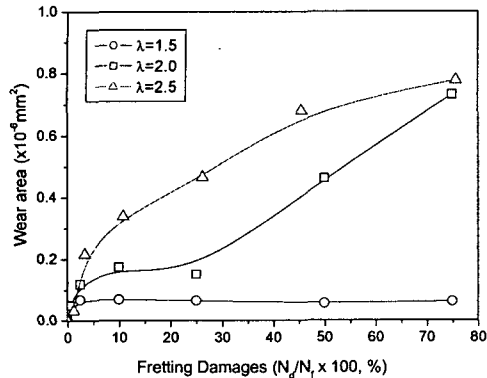


Fig. 16 Relationships between fretting wear and fatigue damage

영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 균열이 200 $\mu$ m 이상 진전할 경우 균열각도는 하중방향과 거의 수직이었다.

프레팅에 의해 압입부에 발생하는 균열 형상을 기준으로 분류하면 미세균열 진전(micro crack propagation)과 거시균열 진전(macro crack propagation) 단계로 구분할 수 있다. 미세균열 진전 단계에서는 Fig. 10과 같이 반타원 형상의 균열(semi-circular crack)이 원주방향으로 다수 발생하고 균열의 합체가 일어나는 단계이다. 균열의 합체가 발생하는 시점은 전체 파단수명의 약 25% 사이클이므로, 반타원 균열의 진전 한계는 균열깊이 약 100~300 $\mu$ m까지임을 알 수 있다. 거시균열 진전단계에서는 합체가 일어난 균열이 원주방향 균열(circumferential crack)로 되어 진전하며 파단되는 단계이다. 균열진전 각도를 고려해 볼 때 이 단계에서는 프레팅에 의한 전단응력의 영향이 거의 없다. 따라서 압입부에 프레팅이 발생할 경우 초기균열로서 반타원 다중균열로 해석이 되어야 하며, 균열의 합체가 발생한 후에는 원주방향 균열로 해석하여야 함을 알 수 있다.

#### 4.3 프레팅 마모특성

압입부 접촉 끝단에는 인장하중 작용시 발생한 미소슬립이 압축하중 작용 시 복원되려고 하지만 접촉면의 전단력에 의해 방해받고, 결국은 접촉 표면에 큰 압축응력과 전단응력이 작용하게

되어 프레팅 마모가 발생하게 된다. 피로사이클이 증가할수록 마모가 최대 발생하는 부위는 접촉끝단 안쪽이며, 이 영역에서 접촉압력과 슬립량이 가장 크기 때문이다.

Fig. 16은 피로사이클 별 마모량의 변화를 나타낸 그림이다. 마모량은 표면거칠기 측정결과를 이용하여 2차원 단면의 마모량을 분석한 결과이다. 모든 하중조건 초기단계( $N_d/N_f=0.025$  이하)에서 마모가 급격히 증가한다. 이는 접촉면간의 불규칙한 형상에 의해 돌기접촉이 발생하고 반복하중과 미소슬립으로 국부적인 소성변형이 발생하여 접촉면간의 길들이기 현상(running-in period)이기 때문인 것으로 판단된다.

하중이 작을 경우( $\lambda=1.5$ 의 경우) 마모량은 초기 급격한 증가 후에는 거의 변화가 없이 일정하다. 하중이 클 경우( $\lambda=2.0, 2.5$ 의 경우) 약 5%의 피로사이클을 기점으로 증가율이 감소된다. 이때의 마모량은 피로사이클 및 하중에 따라 거의 비례하여 증가한다. 초기 미세균열(micro crack)은 마모가 급격히 증가하다가 증가율이 감소되는 지점( $N_d/N_f=0.025$ )에서 대부분 발생하였다. 이것은 압입 상태에서 하중이 작용할 때 접촉면간의 불규칙한 형상 등에 의한 응력집중으로 접촉면의 국부 영역에서 소성변형이 발생하여 초기균열이 발생한 것으로 판단된다.

## 5. 결론

압입축의 프레팅 피로균열 발생 및 진전, 마모 특성 등을 명확히 하기 위하여 압입시험편의 피로시험 및 손상특성을 분석하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압입축에 프레팅 손상이 발생할 경우 일반 피로시험편과 비교하여 피로수명은 크게 감소하며, 접촉끝단에는 응력집중에 의한 소성변형과 마모가 발생한다.

(2) 압입축의 접촉끝단에는 프레팅에 의해 전체 수명의 약 15~20% 피로사이클에서 0.1mm 균열이 발생하며, 전체수명의 약 50~60% 피로사이클에서 1mm 균열이 발생한다.

(3) 접촉끝단에 발생하는 초기균열은 마찰과 전단응력에 의해 접촉면과 이루는 균열의 각도가 작고 균열이 진전할수록 인장응력의 영향에 의해 균열각도가 커진다.



(4) 압입부에 발생하는 초기균열은 접촉끝단에서 반타원형상의 다중 균열로 발생하고 피로손상이 증가됨에 따라 균열합체가 발생하여 원주방향 균열로 진전한다.

(5) 프레팅에 의해 압입부의 접촉끝단에는 마모가 피로손상 초기에 급속히 진행되며, 마모 증가율이 감소하는 피로사이클에서 초기균열이 발생한다.

### 후 기

본 연구는 철도종합안전기술개발사업(철도차량 탈선 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발)의 일환으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

### 참고문헌

(1) Waterhouse, R. B., 1992, "Fretting fatigue," *International materials reviews*, Vol 37, No. 2, pp. 77~97

(2) Kühnel, R., 1932, *Glaser's Annln, Gewerbe Bauw*, Vol. 110 PT, pp. 41~52

(3) Horger, O. J., 1952, "Influence of Fretting Corrosion on the Fatigue Strength of Fitted Members," *ASTM STP144*, pp. 40~51, .

(4) Maxwell, W., Dudley, B. R., Cleary, A. B., Richards, J. and Shaw, J., 1967-68, "Measures to Counter Fatigue Failure in Railway Axles," *Proc. Inst. Mech. Engrs*, Vol. 182, Pt. 1, No. 4, pp. 89~99

(5) Nishioka, K. and Komatshu, K., 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 (In Japanese)

(6) Tanaka, S. I., Hatsuno, K., Mori, B. and Yaguchi, S., 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 (In

Japanese)

(7) 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),

(8) 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

(9) Lonsdale, C. and Stone, D., 2004, "North American Axle Failure Experience," *Proc. Instn Mech. Engrs Part F, J. Rail and Rapid Transit*, Vol. 218, No.4, pp. 293~298

(10) 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

(11) Ugural, A.C. and Fenster, S.K., 1995, *Advanced Strength and Applied Elasticity*, 3rd Ed., Prentice-Hall, pp. 328~338

(12) Dowling, N. E., 1999, *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, 2nd Edition, Prentice Hall, pp. 420~434

(13) Waterhouse, R. B. and Taylor, D. E., 1971, "The Initiation of Fatigue Cracks in a 0.7% Carbon Steel by Fretting," *Wear*, Vol. 17, pp. 139~147

(14) Waterhouse, R. B., 1981, *Fretting fatigue*, London, Applied Science Publishers

(15) Sato, K., 1988, "Damage Formation During Fretting Fatigue," *Wear*, Vol. 125, pp. 163~174

(16) Vingsbo, O. and Soderberg, S., 1988, "On Fretting Maps," *Wear*, Vol. 126, pp. 131~147

(17) B.H. Lee and S.B. Lee, 1997, "An Experimental Study on the Fretting Fatigue Crack Behaviour of Al2024-T4," *Transactions of the KSME (A)*, Vol. 21, No.3, pp. 511~519 (In Korean)