

◆ 특집 ◆ 철도의 고속화를 위한 차륜-궤도 인터페이스

## 피로한도 이하에서 발생하는 압입축의 접촉손상 특성

### Characterization of Contact Surface Damage in a Press-fitted Shaft below the Fretting Fatigue Limit

이동형<sup>1,✉</sup>, 권석진<sup>1</sup>, 함영삼<sup>1</sup>, 유원희<sup>1</sup>  
Dong-Hyong Lee<sup>1,✉</sup>, Seok-Jin Kwon<sup>1</sup>, Young-Sam Ham<sup>1</sup> and Won-Hee You<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 한국철도기술연구원 철도시스템연구센터 (Railroad System Research Center, Korea Railroad Research Institute)  
✉ Corresponding author: dhlee@krii.re.kr, Tel: 031-460-5246

Manuscript received: 2010.5.28 / Revised: 2010.6.21 / Accepted: 2010.6.29

*In this paper, the characteristics of contact surface damage due to fretting in a press-fitted shaft below the fretting fatigue limit are proposed by experimental methods. A series of fatigue tests and interrupted fatigue tests of small scale press-fitted specimen were carried out by using rotating bending fatigue test machine. Macroscopic and microscopic characteristics were examined using scanning electron microscope (SEM), optical microscope or profilometer. It is found that fretting fatigue cracks were initiated even under the fretting fatigue limit on the press-fitted shafts by fretting damage. The fatigue cracks of press-fitted shafts were initiated from the edge of contact surface and propagated inward in a semi-elliptical shape. Furthermore, the fretting wear rates at the contact edge are increased rapidly at the initial stage of total fatigue life. After steep increasing, the increase of wear rate is nearly constant under the load condition below the fretting fatigue limit. It is thus suggested that the fretting wear must be considered on the fatigue life evaluation because the fatigue crack nucleation and propagation process is strongly related to the evolution of surface profile by fretting wear in the press-fitted structures.*

Key Words: Fretting (프레팅), Fretting Fatigue (프레팅 피로), Fretting Wear (프레팅 마모), Contact (접촉), Press-fitted Shaft (압입축)

#### 1. 서론

철도차량 차축 또는 기계구조물의 커플링 등과 같이 축에 허브(hub)가 압입 되어 있는 경우 압입 축의 접촉끝단에는 프레팅(fretting)이 발생하며, 프레팅에 의해 피로강도가 크게 저하된다. 철도차량 차축은 안전에 중요한 역할을 하기 때문에 파손을 방지하기 위하여 프레팅 손상에 대한 연구가 많이 진행되었다.<sup>1</sup>

철도차량 차축은 부하 반복수  $10^8$  사이클 이상

의 매우 오랜 기간 동안 파손이 발생하지 않도록 설계하고 있다. 또한, 차축의 파손을 방지하기 위하여 일정 기간에 비파괴 검사를 수행하여 압입부에 발생할 수 있는 균열을 검출하고 있다. 철도차량 운행 중 차축에 작용하는 실동응력은 대부분 피로한도 이하이지만, 피로한도 이하에서도 피로 균열이 발생하는 프레팅 피로의 특성 때문에 차축의 안전을 보장하기 위하여 피로한도 이하에서 프레팅 피로강도 특성을 명확히 할 필요가 있다.

Shirai 등<sup>2</sup>은  $10^9$  사이클 까지 프레팅 피로시험

을 실시하여 초장수명 영역(*ultra high cycle regime*)에서 응력비의 영향과 프레팅 피로균열 발생 및 진전거동에 대한 연구를 수행하였고,  $10^7$  사이클로 정의하고 있는 프레팅 피로강도가  $10^9$  사이클까지도 유효하다고 보고하였다. Kubota 등<sup>3</sup>은 압입축을 대상으로 피로한도 이하에서의 프레팅 피로균열 발생거동을 명확히 하기 위하여 2 단계 하중 하에서 회전굽힘 피로시험을 실시하였고, 프레팅 피로는 수정 Miner 손상법칙이 성립되지 않으며, 프레팅 피로균열은 균열발생과 프레팅 마모, 응력상태가 균형을 이루는 접촉영역에서 발생한다고 하였다. Kondo 등<sup>4</sup>은 프레팅 피로의 경우에도 피로한도가 있는지를 확인하기 위하여  $10^9$  사이클까지 피로시험을 수행한 후 피로한도가 존재하는 메커니즘에 대하여 연구를 수행하였다. 이와 같은 프레팅 피로한도 이하에서의 균열발생거동에 관한 대부분의 연구에서는 균열발생과 진전에 초점을 맞추고 있다. 그러나 프레팅이 발생할 경우 프레팅 피로균열은 대부분 프레팅 마모와 함께 발생하며 프레팅 마모는 피로균열의 발생 및 진전수명에 많은 영향을 미친다.<sup>5,6</sup> 그러므로 피로한도 이하에서의 균열발생 및 진전 메커니즘을 명확히 하기 위하여 프레팅 피로균열 발생 및 진전 메커니즘뿐만 아니라 접촉면의 프레팅 마모거동도 함께 검토되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 압입축을 대상으로 프레팅 피로한도 이하에서의 피로균열 발생 및 마모 특성을 명확히 하고자 하였다. 회전굽힘 피로시험기를 이용하여 축소형 압입시험편(*small scale press-fitted specimens*)의 프레팅 피로시험을 실시하고 정해진 반복수에서 시험편을 분리하여 프레팅에 의한 접촉면의 손상특성을 분석하였다.

**2. 프레팅 피로실험**

**2.1 시험편 및 재질**

압입 시험편은 Fig. 1 과 같이 압입부 직경  $\phi$  16 mm, 전체 길이 210 mm의 축에 폭 30 mm, 외경  $\phi$  40 mm의 허브가 압입된 회전굽힘 피로시험용 시험편으로 제작하였다. 시험편의 압입공차는 Lamé의 공칭 접촉압력<sup>7</sup>이 허브 외경  $\phi$  30 mm 위치에서 약 80~100 MPa 이 되도록 하였고, 압입부위의 허브 내경 끝단은 큰 응력집중을 피하기 위하여 모따기(*chamfering*)를 하였다. 축과 허브의 압입부위는 연마하였고 제작 후 평균 표면거칠기(Ra)는 0.15  $\mu$ m

이었다. 허브의 압입은 접촉부위의 손상을 최소화하기 위하여 허브를 400℃에서 15 분 정도 가열한 후 압입하였다.

모든 시험편은 실제 철도차량이 사용하고 있는 차축과 차륜의 압입부위에서 채취하였으며, 축 및 허브의 기계적 성질 및 화학적 성분은 각각 Table 1, Table 2 와 같다. 시험편은 별도의 열처리를 수행하지 않은 상태로 제작하였고, 시험편의 표면경도는 축의 경우 187 HB, 보스의 경우 210 HB 이었다. Fig. 2 는 축 및 보스의 미세조직을 나타내고 있으며, 축에는 일반 구조용 탄소강의 대표조직인 펄라이트(*pearlite*) 조직과 페라이트(*ferrite*) 조직의 분포가 비슷하고, 허브는 결정립이 크고 페라이트 조직이 더 많이 분포하고 있다.

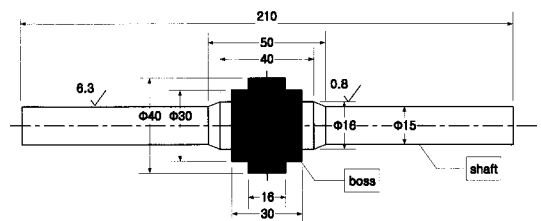


Fig. 1 Geometry of press-fitted fatigue test specimen

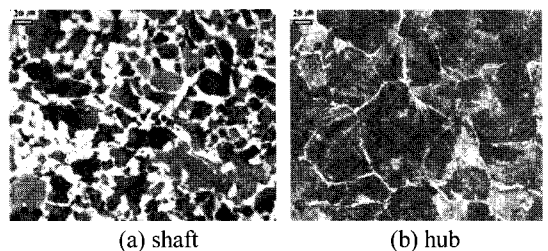


Fig. 2 Optical micrographs of test specimen

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
Hub(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
Hub(SSW1)	361	786	14.4

## 2.2 실험 및 분석방법

피로시험은 4 점 하중식 회전굽힘 피로시험기를 사용하여 압입부에 일정한 반복 굽힘응력이 작용하도록 하였다. 시험은 실온, 대기 중에서 실시하였으며, 피로한도 이하의 프레팅 피로에서는  $1.5 \times 10^7$  사이클 이상에서 접촉면의 미세균열은 정지 균열이 된다는 기존의 연구결과<sup>4</sup>를 반영하여  $2 \times 10^7$  사이클까지 수행하였다. 시험하중은  $1 \times 10^7$  사이클을 기준으로 한 압입축의 프레팅 피로한도 130 MPa<sup>8</sup>의 90% 및 70% 조건에서 시험을 수행하였다. 하중을 공칭 굽힘응력( $\sigma_0$ )에 대한 Lamé의 평균 공칭 접촉압력( $p_0 = 90$  MPa)의 비율인 파라미터  $\lambda (= \sigma_0/p_0)$ 로 표시하면  $\lambda = 1.3, 1.0$ 이 된다.

각 하중단계에서 최종 시험사이클인  $2 \times 10^7$  사이클을 기준으로 일정 피로하중 부가 후(2.5, 10, 25, 50% cycles of total life) 시험을 중지하고 시험기에서 시험편을 분리한 다음 피로사이클 별 프레팅 손상특성을 분석하였다. Fig. 3은 압입축의 S-N 곡선과 피로한도 이하에서의 시험하중 및 사이클을 나타내고 있다. 일정 사이클까지 시험을 완료한 후, 시험편은 축의 길이 방향으로 절단한 후 초음파 세척을 수행하고 표면을 아세톤으로 세척한 후 단면 및 표면의 손상을 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.

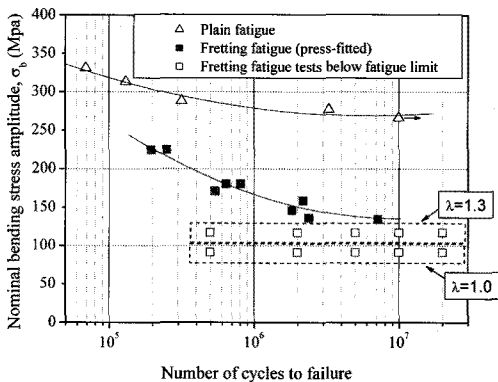


Fig. 3 S-N curve and experimental conditions below the fretting fatigue limit of press-fitted shaft

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 접촉표면의 피로균열 발생 및 진전특성

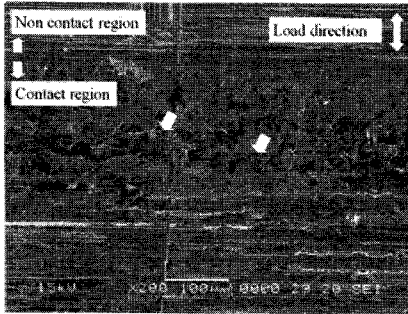
Fig. 4는 하중조건  $\lambda = 1.3$ 에서  $3 \times 10^7$  사이클까지 시험 후 시험편의 손상표면을 SEM으로 분석한 결과이다. 그림과 같이 압입축의 표면 균열은 접촉면 끝단 약 80~120  $\mu\text{m}$  안쪽 위치에서 발생하였고, 균열길이는 약 500  $\mu\text{m}$ 이었다. 대부분 접촉끝단에서 안쪽 약 50~150  $\mu\text{m}$  위치에서 50~500  $\mu\text{m}$  길이의 균열이 관찰되었다. 표면균열의 형상은 반타원 형상이었으며, 균열의 발생은 접촉끝단 근처에서 먼저 발생한 후 점차 안쪽으로 진전하는 경향을 나타내었다. 또한, 접촉면의 균열은 여러 접촉위치에서 동시에 발생한 다중 균열로 서로 합체가 발생하기 전이었으며, 이것은 피로한도 이상의 압입축 프레팅 피로균열발생 메커니즘<sup>8</sup>과 동일한 현상을 나타내었다. 접촉표면에는 프레팅 현상에 의해 불규칙한 형상의 마모분이 많이 고착되어 있었다.

Fig. 5는 하중조건  $\lambda = 1.3$ 이고,  $1 \times 10^7$  사이클까지 시험 후 시험편의 손상표면을 SEM으로 측정 한 결과이다. 균열은 거의 접촉끝단에서 발생하고 안쪽으로 진전하는 모습을 나타내었다. 접촉끝단에는 소성변형에 의해 축의 접촉끝단이 초기형상보다 돌출(변형)되어 있었다. 접촉끝단 안쪽으로는 프레팅 마모에 의해 거친 표면을 나타내고 있었다. 다른 접촉면에서도 다수의 균열이 발견되었으며, 균열은 접촉끝단에서 0~50  $\mu\text{m}$  안쪽위치에서 발생되었으며, 균열길이는 30~150  $\mu\text{m}$ 이었다.

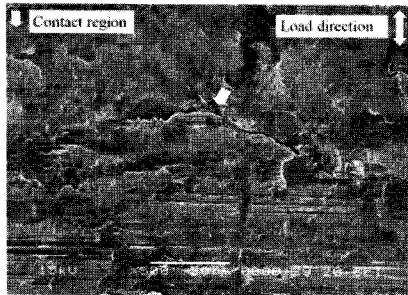
하중조건  $\lambda = 1.3$ 에서  $5 \times 10^6$  사이클 이하의 영역에서는 균열이 발생되지 않았으며, 피로 사이클이 증가할수록 프레팅 발생 영역이 증가하였다.

Fig. 6은 하중조건  $\lambda = 1.0$ 이고,  $2 \times 10^7$  사이클까지 시험한 후 시험편의 손상표면을 SEM으로 측정 한 결과이다. 프레팅 마모입자가 고착되어 있는 모습을 나타내고 있으며, 50  $\mu\text{m}$  길이의 피로균열이 다수 발견되었다.  $1 \times 10^7$  사이클 이하의 영역에서는 균열이 발생되지 않았다.

기존 프레팅 피로수명에 관한 연구에 의하면 프레팅 피로균열은 피로수명의 초기단계에서 발생하며 피로수명의 대부분은 균열진전 수명이 차지한다<sup>9</sup>고 보고되었지만, 피로한도 이하에서 압입축의 시험결과와 시험하중에 따라 차이가 있지만  $1 \times 10^7$  사이클 이상에서 균열이 발생되므로 균열발생수명도 큰 영역을 차지함을 알 수 있다.

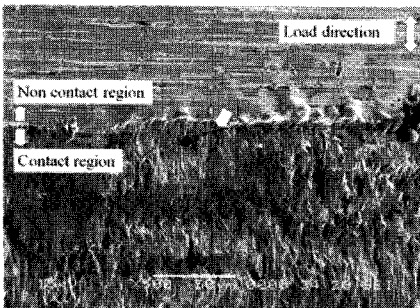


(a) Fretting fatigue crack (x200)

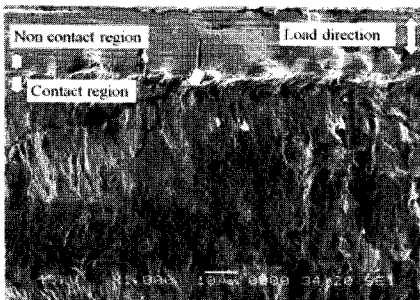


(b) Fretting fatigue crack (x500)

Fig. 4 Fretting fatigue crack nucleation site on the contact surface ( $\lambda = 1.3, N = 3 \times 10^7$  cycles)



(a) Fretting fatigue crack (x500)



(b) Fretting fatigue crack (x1000)

Fig. 5 Fretting fatigue crack nucleation site on the contact surface ( $\lambda = 1.3, N = 1 \times 10^7$  cycles)

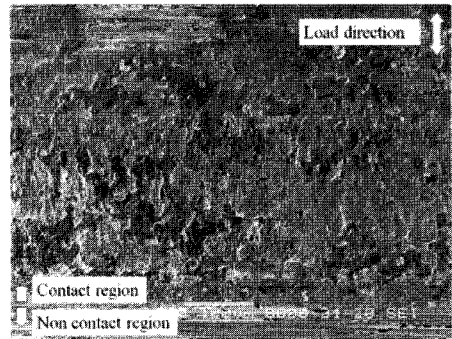


Fig. 6 Fretting damage on the contact surface ( $\lambda = 1.0, N = 2 \times 10^7$  cycles)

### 3.2 접촉표면의 프레팅 마모특성

Fig. 7 은 하중조건  $\lambda = 1.3$  일 때 피로사이클 별 마모에 따른 접촉표면의 형상 변화를 나타낸다. 마모에 의한 접촉표면의 형상변화는 프레팅이 발생한 축의 접촉면을 거칠기 측정기를 사용하여 최소 3 군데 이상 측정하여 평균한 결과이며, 접촉끝단을 기준으로 약 2 mm 안쪽을 측정하였다. 압입 축의 프레팅 마모는 초기에 접촉끝단에서 마모가 발생하다가 피로사이클이 증가할수록 점차 안쪽으로 발생영역이 넓어지는 경향을 나타내었다.

Fig. 8 은 접촉면의 표면거칠기 측정 결과를 이용하여 피로사이클 별 마모량의 변화를 2 차원 단면의 마모 면적으로 나타낸 결과이다. 피로한도 이하의 모든 하중조건에서는 피로사이클 초기단계 (약  $N = 5 \times 10^6$  사이클)까지 급격히 마모가 발생한다. 그 이상의 피로사이클 영역에서는 마모의 증가량이 크게 감소하여 마모량이 거의 일정하게 된다.

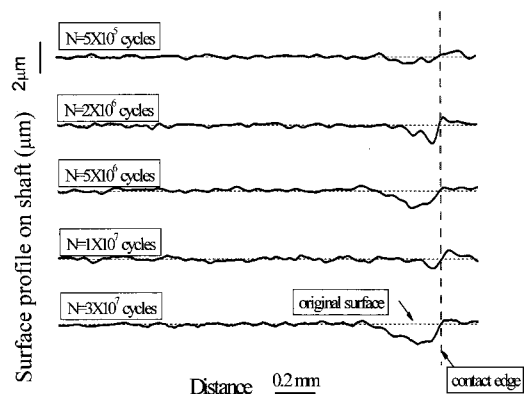


Fig. 7 Evolution of contact surface profile with the fretting damage at  $\lambda = 1.3$

피로사이클 초기단계에서 마모량이 급격히 증가하는 현상은 접촉면간의 길들이기 현상(running-in period)이기 때문인 것으로 판단된다.

압입측 접촉끝단에 발생하는 프레팅 마모는 굽힘하중이 피로한도 이상일 경우 피로사이클에 따라 계속 증가하는 경향을 나타내지만, 피로한도 이하일 경우 일정 손상사이클 후에는 마모량이 일정해 지는 경향을 나타내었다.

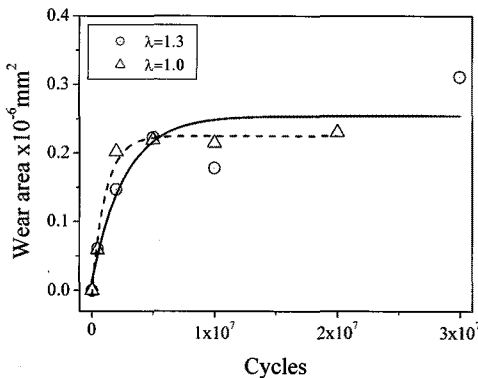


Fig. 8 Relationships between fretting wear and fatigue cycles below fretting fatigue limit

### 3.3 프레팅 피로균열과 마모와의 관계

Fig. 9는 압입측 접촉끝단에 발생하는 인장 및 압축상태의 접촉압력 변화를 유한요소법으로 해석한 결과이다. 접촉면 끝단의 약간 안쪽에서 압축시 최대압력이 발생하며, 인장시에는 접촉압력이 크게 감소한다. 접촉표면의 손상결과와 유한요소해석 결과를 종합하면, 압입측 표면에 압축하중이 작용할 경우 최대 접촉압력이 발생하며, 이 때 접촉끝단에는 응력집중에 의해 소성변형이 발생함을 알 수 있다. 또한, 프레팅 피로한도 이하일지라도 압입측의 접촉끝단에는 큰 응력집중이 발생하며, 프레팅 현상으로 인하여 응력집중이 생기는 접촉끝단에 균열이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 10은 접촉끝단의 미소 슬립(micro-slip)을 유한요소법으로 해석한 결과이다. 미소슬립의 경우 압축과 인장 하중 작용시 거의 비슷한 양을 나타내며, 접촉압력과 같이 접촉끝단의 약간 안쪽에서 최대가 된다. Archard 마모식<sup>10</sup>에 의하면 마모는 접촉압력과 슬립량의 곱에 비례한다. 슬립량은 인장 및 압축시 거의 비슷하므로 압입측에 발생하

는 프레팅 마모는 Fig. 9에서 알 수 있듯이 압축하중 작용시 최대로 발생함을 알 수 있다.

피로한도 이하에서 프레팅 시험결과, 압입측의 접촉끝단에는 프레팅 마모가 발생하고 마모에 의해 접촉끝단의 응력분포가 변화된다. 따라서 피로한도 이하에서 압입측의 피로균열 발생수명 해석을 수행할 경우 마모에 의한 접촉끝단의 응력변화를 고려할 필요가 있다.

피로한도 이하에서의 마모량의 변화가 일정 영역 이상의 피로사이클에서 일정해 지는 이유는 마모에 의해 접촉압력이 완화되고, 하중에 따라 축의 변형량이 일정해 지기 때문인 것으로 판단된다. 또한 피로한도 이하의 프레팅 피로균열이 정지균열(non-propagating crack)이 되는 이유는 발생한 균열 주위의 응력분포가 마모에 의해 감소되기 때문인 것으로 추측할 수 있으며, 향후 마모를 고려한 피로균열 진단해석을 통하여 이를 검증할 예정이다.

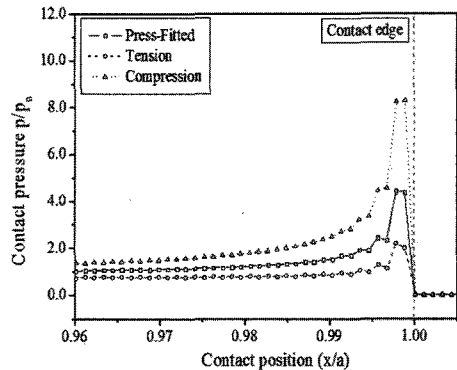


Fig. 9 Contact pressure distributions at contact edge of press-fitted shaft ( $\lambda=1.0$ )

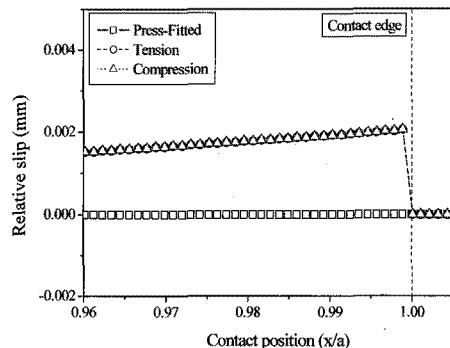


Fig. 10 Relative slip at the contact edge (at  $\lambda=1.3$ )

#### 4. 결론

압입축을 대상으로 프레팅 피로한도 이하에서의 피로균열 발생 및 마모 특성을 명확히 하고자, 축소형 압입시험편을 이용하여 프레팅 피로시험을 실시하고 프레팅에 의한 접촉면의 손상특성을 분석하였으며 주요 연구결과는 다음과 같다.

1) 압입축은 피로한도 이하에서도 프레팅 피로에 의한 피로균열이 발생하며, 압입축의 피로균열은 접촉끝단에서 발생한 후 안쪽으로 진전하는 반타원 형상을 나타낸다. 또한, 균열은 여러 위치에서 동시에 발생하는 다중균열이며 균열이 진전하여 합체가 일어난다.

2) 피로한도 이하에서 압입축의 접촉끝단에는 프레팅 마모가 발생하며, 프레팅 마모는 피로사이클 초기단계에서 급격히 증가하다가 일정 피로사이클 이상에는 거의 변화가 없어진다.

3) 피로한도 이하에서 압입축의 접촉끝단에는 프레팅 마모에 의한 접촉응력이 변화하므로 압입축의 피로수명을 해석할 경우 마모에 의한 접촉끝단의 응력변화를 고려할 필요가 있다.

#### 참고문헌

- Smith, R. A. and Hillmansen, S., "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, 2004.
- Shirai, S., Kumuthini, K., Mutoh, Y. and Nagata, K., "Fretting Fatigue Characteristics of Titanium Alloy Ti-6Al-4V in Ultra High Cycle Regime," ASTM International STP, Vol. 1425, pp. 353-368, 2003.
- Kubota, M., Niho, S., Sakae, C. and Kondo, Y., "Effect of Understress on Fretting Fatigue Crack Initiation of Press-Fitted Axle," JSME International Journal Series A: Solid Mech. Mater. Eng., Vol. 46, No. 3, pp. 297-302, 2003.
- Kondo, Y., Sakae, C., Kubota, M. and Yanagihara, K., "Non-propagating Crack at Giga-cycle Fretting Fatigue Limit," Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers A, Vol. 70, No. 696, pp. 1066-1071, 2004.
- Lee, D. H., Kwon, S. J., Choi, J. B. and Kim, Y. J., "The Effect of Fretting Wear on Fatigue Life of Press-fitted Shaft," Transactions of the KSME (A), Vol. 31, No. 11, pp. 1083-1092, 2007.
- Chung, I., Lee, M., Park, K., Lee, J. and Kwon, J., "Fretting Wear Test of Inconel 690 Tubes Employing Piezoelectric Actuator," J. of KSPE, Vol. 26, No. 2, pp. 101-108, 2009.
- Ugural, A. C. and Fenster, S. K., "Advanced strength and applied elasticity," Prentice-Hall, Inc., 1995.
- Lee, D. H., Kwon, S. J., Choi, J. B. and Kim, Y. J., "Experimental Study on Fatigue Crack Initiation and Propagation due to Fretting Damage in Press-fitted Shaft," Transactions of the KSME (A), Vol. 31, No. 6, pp. 701-709, 2007.
- Mutoh, Y. and Xu, J.-Q., "Fracture mechanics approach to fretting fatigue and problems to be solved," Tribology International, Vol. 36, No. 2, pp. 99-107, 2003.
- Archard, J. F., "Contact and Rubbing of Flat Surfaces," J. Appl. Phys., Vol. 24, No. 8, pp. 981-988, 1953.