

피로한도이하에서 발생하는 압입축의 접촉손상 특성

Characteristics of Contact Surface Damage in Press-fitted Shaft below Fatigue Limit

*#이동형¹, 권석진¹, 함영삼¹, 유원희¹

^{*}D. H. Lee(dhleec@krii.re.kr)¹, S. J. Kwon¹, Y. S. Ham¹, W. H. You¹

¹ 한국철도기술연구원 철도시스템연구센터

Key words : Fretting Fatigue, Fretting Wear, Press-fitted Shaft, Fatigue Crack

1. 서론

철도차량 차축 또는 기계구조물의 커플링 등과 같이 축에 보스가 압입되어 있는 경우 압입축의 접촉끝단에는 프레팅(fretting)이 발생하며, 프레팅에 의해 피로강도가 크게 저하된다. 철도차량 차축은 안전에 중요한 역할을 하기 때문에 파손을 방지하기 위하여 압입축의 프레팅 손상에 대한 많은 연구가 진행되었다[1].

철도차량 차축은 부하 반복수 10^8 사이클 이상의 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. 차량 운행 중 차축에 작용하는 실동응력은 대부분 피로한도 이하이지만, 피로한도 이하에서도 피로균열이 발생하는 프레팅 피로의 특성 때문에 차축의 안전을 보장하기 위하여 피로한도 이하에서 프레팅 피로강도 특성을 명확히 할 필요가 있다.

Shirai 등[2]은 10^9 사이클 까지 프레팅 피로시험을 실시하고 초장수명 영역(ultra high cycle regime)에서 응력비의 영향과 프레팅 피로균열 발생 및 진전거동에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 10^7 사이클로 정의하고 있는 프레팅 피로강도가 10^9 사이클 까지도 유효하다고 보고하였다. Kubota 등[3]은 압입축을 대상으로 피로한도 이하에서의 프레팅 피로균열 발생거동을 명확히 하기 위하여 2단계 하중 하에서 회전 굽힘 피로시험을 실시하였다. 그 결과 프레팅 피로는 수정 Miner 손상법칙이 성립되지 않으며, 프레팅 피로균열은 균열발생과 프레팅 마모, 응력상태가 균형을 이루는 접촉영역에서 발생한다고 하였다. Kondo 등[4]은 프레팅 피로의 경우에도 피로한도가 있는지를 확인하기 위하여 10^9 사이클까지 피로시험을 수행한 후 피로한도가 존재하는 메커니즘에 대하여 연구를 수행하였다. 이와 같은 피로한도 이하에서의 균열발생거동에 관한 대부분의 연구는 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[5]. 그러므로 피로한도 이하에서의 균열발생 및 진전 메커니즘을 명확히 하기 위하여 접촉면의 프레팅 마모거동도 함께 검토 되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 압입축을 대상으로 프레팅 피로한도이하에서의 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 압입부 직경 $\phi 16\text{mm}$, 전체 길이 210mm의 축에 폭 30mm, 외경 $\phi 40\text{mm}$ 의 보스가 압입된 회전굽힘 피로시험용 시험편으로 제작하였다. 시험편의 압입공차는 Lamé의 공칭 접촉압력[6]이 보스 외경 $\phi 30\text{mm}$ 위치에서 약 80~100MPa이 되도록 하였고, 압입부위의 보스 내경 끝단은 큰 응력집중을 피하기 위하여 모따기(chamfering)를 하였다. 상세한 시험편의 형상 및

기계적 성질, 화학적 성분, 표면 경도 등은 기존 연구[7]와 동일하다.

2.2 실험 및 분석 방법

피로시험은 4점 하중식 회전굽힘 피로시험기를 사용하여 압입부에 일정한 반복 굽힘응력이 작용하도록 하였다. 시험은 실온, 대기 중에서 실시하였다. 피로한도 이하의 프레팅 피로에서는 1.5×10^7 사이클 이상에서 접촉면의 미세균열은 정지균열이 된다는 기존의 연구결과[4]를 참고하여 2×10^7 사이클까지 수행하였다. 시험하중은 1×10^7 사이클을 기준으로 한 압입축의 프레팅 피로한도 130 MPa의 90% 및 70% 조건에서 시험을 수행하였다. 하중을 공칭 굽힘응력(σ_0)에 대한 Lamé의 평균 공칭 접촉압력($p_0 \approx 90 \text{ MPa}$)의 비율인 파라미터 $\lambda (= \sigma_0/p_0)$ 로 표시하면 $\lambda = 1.3, 1.0$ 이 된다.

각 하중단계에서 최종 시험사이클을 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. 1은 압입축의 S-N 곡선과 피로한도 이하에서의 시험조건을 나타내고 있다. 시험편의 분석은 축방향으로 절단한 후 초음파 세척을 수행하고 표면을 아세톤으로 세척한 후 관찰하였다. 표면의 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.

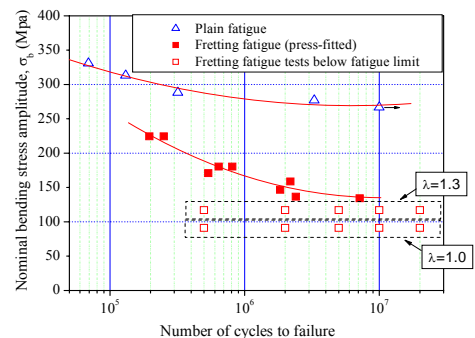


Fig. 1 S-N curve and experimental conditions below the fretting fatigue limit of press-fitted shaft.

3. 실험결과 및 분석

3.1 접촉표면의 피로균열 발생 및 진전특성

Fig. 2는 하중조건 $\lambda=1.3$, 피로사이클 3×10^7 까지 시험 후 시험편의 손상표면을 SEM으로 측정된 결과이다. 축의 프레팅 손상표면에는 접촉면 끝단 약 80~120 μm 안쪽 위치에서 균열이 발생되었고 균열길이는 약 500 μm 이었다. 다른 접촉면에서도 표면균열이 많이 발견되었으며, 균열은 대체로 접촉끝단에서 안쪽으로 약 50~150 μm 위치에서 50~500 μm 의 길이를 나타내었다. 표면균열은 반타원 형상을 나타내고 있으며 균열의 발생은 접촉끝단 근처에서 먼저 발생한 후 점차 안쪽으로 진전하는

경향을 나타내었다. 또한, 접촉면의 균열은 여러 접촉위치에서 동시에 발생한 다중 균열로 서로 합체가 발생하기 전이었다. 이것은 피로한도 이상의 압입축 프레팅 피로균열발생 메커니즘 [7]과 동일하다. 접촉표면에는 불규칙한 형상의 마모분이 많이 고착되어 있었다.

Fig. 3은 하중조건 $\lambda=1.3$, 피로사이클 1×10^7 까지 시험한 시험편의 손상표면을 SEM으로 측정된 결과이다. 균열은 거의 접촉끝단에서 발생하고 진전하는 모습을 나타내었다. 접촉끝단에는 소성변형이 발생하였고 소성변형에 의해 축의 접촉끝단이 초기형상보다 돌출(변형)되어 있었다. 접촉끝단 안쪽에는 프레팅 마모에 의해 거친 표면을 나타내고 있었다. 다른 접촉면에서도 다수의 균열이 발견되었으며, 균열은 접촉끝단에서 0~50 μm 안쪽위치에서 30~150 μm 의 길이를 나타내었다.

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

하중조건 $\lambda=1.0$, 피로사이클 2×10^7 까지 시험한 시험편에서는 50 μm 길이의 피로균열이 다수 발견되었으며, 1×10^7 사이클 이하의 영역에서는 균열이 발견되지 않았다.

기존 프레팅 피로수명에 관한 연구에 의하면 프레팅 피로균열은 피로수명의 초기단계에서 발생하며 피로수명의 대부분은 균열진전 수명이 차지한다[8]고 보고되었다. 피로한도 이하에서 압입축의 시험결과 시험하중에 따라 차이가 있지만 1×10^7 사이클 이상에서 균열이 발생됨을 알 수 있다.

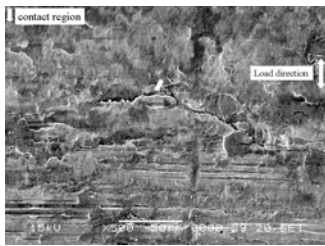


Fig. 2 Fretting fatigue crack on the contact surface (at $\lambda=1.3$, $N=3 \times 10^7$ cycles).

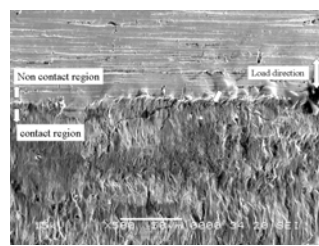


Fig. 3 Fretting fatigue crack on the contact surface (at $\lambda=1.3$, $N=1 \times 10^7$ cycles).

3.2 접촉표면의 프레팅 마모특성

Fig. 4는 하중조건 $\lambda=1.3$ 일 때 피로사이클별 마모에 따른 접촉표면의 형상 변화를 나타낸다. 마모에 의한 접촉표면의 형상 변화는 프레팅이 발생한 축의 접촉면 거칠기를 거칠기 측정기로 최소 3군데 이상 측정하여 평균한 결과이며, 접촉끝단을 기준으로 약 2mm 안쪽을 측정하였다. 초기에는 접촉끝단에서 마모가 발생하다가 피로사이클이 증가할수록 점차 안쪽으로 발생영역이 넓어지는 경향을 나타내었다.

Fig. 5는 접촉면의 마모 측정 결과를 이용하여 피로사이클별 마모량의 변화를 2차원 단면의 마모면적으로 분석한 결과이다. 피로한도 이하의 모든 하중조건에서는 피로사이클 초기단계 ($N=5 \times 10^6$)까지 급격히 마모가 발생한다. 이 현상은 접촉면간의 길들이기 현상(running-in period)이기 때문인 것으로 판단된다. 그 이상의 피로사이클 영역에서는 마모의 증가량이 크게 감소하여 마모량이 거의 일정하게 된다. 이는 피로한도 근처의 마모량의 변화와 거의 동일한 경향을 나타내었다.

피로한도 이하에서의 마모량의 변화가 일정 영역이상의 피로 사이클에서 일정해 지는 이유는 마모에 의해 접촉압력이 완화되기 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 진전해석을 통하여 이를 검증할 예정이다.

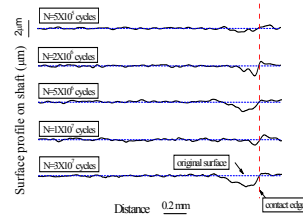


Fig. 4 Evolution of contact surface profile with the fretting damage at $\lambda=1.3$.

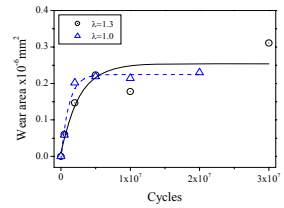


Fig. 5 Relationships between fretting wear and fatigue cycles below the fretting fatigue limit

4. 결론

압입축을 대상으로 프레팅 피로한도이하에서의 피로균열 발생 및 마모 특성을 명확히 하고자, 축소형 압입시험편을 이용하여 프레팅 피로시험을 실시하고 정해진 반복수에서 시험편을 분리하여 프레팅에 의한 접촉면의 손상특성을 분석하였으며 주요 연구결과는 다음과 같다.

- 1) 압입축은 피로한도이하에서도 프레팅 피로에 의한 피로균열이 발생한다.
- 2) 압입축의 피로균열은 접촉끝단에서 발생한 후 안쪽으로 진전하는 반타원 형상을 나타내며, 여러 위치에서 동시에 발생하는 다중균열로 진전하여 합체가 발생한다.
- 3) 피로한도이하에서 압입축의 접촉끝단에는 프레팅 마모가 발생한다.
- 4) 피로한도이하에서 압입축의 접촉끝단에 발생하는 프레팅 마모는 피로사이클 초기단계에서 급격히 증가하다가 일정 피로 사이클 이상에는 거의 변화가 없어진다.

참고문헌

1. R. A. Smith and S. Hillmansen, "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.
2. S. Shirai, K. Kumuthini, Y. Mutoh, and K. Nagata, "Fretting Fatigue Characteristics of Titanium Alloy Ti-6Al-4V in Ultra High Cycle Regime," ASTM special technical publication, Vol. 1425, pp. 353-368, 2003.
3. M. KUBOTA, S. NIHO, C. SAKAE, and Y. KONDO, "Effect of Understress on Fretting Fatigue Crack Initiation of Press-Fitted Axle," JSME International Journal Series A, Vol. 46, No. 3, pp.297-302, 2003.
4. Y. KONDO, C. SAKAE, M. KUBOTA, and K. YANAGIHARA, "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.
5. D. H. Lee, S. J. Kwon, J. B. Choi, and Y. J. Kim, "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.
6. A. C. Ugural and S. K. Fenster, Advanced strength and applied elasticity: Prentice-Hall, Inc., 1995.
7. D. H. Lee, S. J. Kwon, J. B. Choi, and Y. J. Kim, "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.
8. Y. Mutoh and J.-Q. Xu, "Fracture mechanics approach to fretting fatigue and problems to be solved," Tribology International, Vol. 36, pp. 99-107, 2003.