고강도 알루미늄 합금의 Fretting Fatigue에 관한 연구

이학선† ·김상태*·최성종*·양현태*·김재경*·이동석**

A Study on Fretting Fatigue of High Strength Aluminum Alloys

Hak Sun Lee, Sang Tae Kim, Sung Jong Choi, Hyun Tae Yang,
Jae Kyoung Kim and Dong Suk Lee

Key Words: Fretting fatigue(프레팅 피로), Oblique crack(경사 균열), Plain fatigue(일반 피로), Tire track(타이어 트랙), Abrasive wear(어브레시브 마모)

Abstract

Fretting is a kind of surface degradation mechanism observed in mechanical components and structures. The fretting damage decrease in 50-70% of the plain fatigue strength. This may be observed in aircraft, automobile and nuclear power plant used in special environment and various loading conditions. In the present study, the characteristics of the fretting fatigue are investigated using the two aluminum alloy(Al2024-T3511 and Al7050-T7451). Through the experiment, it is found that the fretting fatigue strength of the Al7050-T7451 alloy decreased about 50% from the plain fatigue strength, while the fretting fatigue strength of the Al2024-T3511 alloy decreased about 45%. The tire track was widely observed in fracture surface area of oblique crack which was induced by contact pressure. These results can be the basic data to the structural integrity evaluation of aluminum alloy subjected to fretting damage.

1. 서 론

프레팅(fretting)이란 2개의 접촉면에서 발생하는 마모현상을 일컫는다. bolt, key, pin, rivet 고정부, 축결합부 등과 같이 강하게 체결된 기계 및 구조물의 접촉면이 반복적으로 미세한 진폭의 상대운동(slip)을 일으킬 때 발생한다. 프레팅 피로는 프레팅을 동반하는 부재의 피로현상으로 현저한 피로수명의 감소를 보이며 이는 일반 피로수명의 약 50% 정도의 감소를 보인다고 알려져 있다[1~3].

† 영남대학교 대학원
E-mail : stkim@yu.ac.kr
TEL : (053)810-2456 FAX : (053)813-3703
* 영남대학교 기계공학부
** 한국항공우주산업주식회사

프레팅 피로에 영향을 미치는 인자는 상대슬립 진폭, 접촉 면압, 시험편과 패드 재질, 마찰계수, 환경 및 응력, 접촉면 근방의 역학조건, 표면상태 등 지금까지 알려진 것만 약 50종류가 됨을 보이고 있다[4, 5]. 프레팅 피로손상에 관여하는 각종 인자에 관한 정성적, 정량적 연구들이 활발하게 수행되고 있으나 아직 설계 및 보수관리, 사고 분석 및 대책 시에 요구되는 정량적 프레팅 피로손상 평가방법에 관한 규격은 제정되지 않고있는 실정이다.

본 연구에서는 항공기 및 자동차 재료로 주로 사용되는 Al2024-T3511과 Al7050-T7451의 프레팅 피로수명을 평가하고 손상기구를 비교 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용한 시험편 재료는 Al2024-T3511

Table 1 Chemical composition of Al2024-T3511(wt%)

Cu	Mg	Fe	Si	Cr	Zn	Ti
3.8 ~4.9	1.2 ~1.8	0.5	0.5	0.1	0.25	0.15

Table 2 Chemical composition of Al7050-T7451(wt%)

Zn	Cu	Mg	Fe	Si	Mn	Zr	Ti
5.7 ~6.7	2.0 ~2.6	1.9 ~2.6	0.15	0.12	0.1	0.08 ~0.05	0.06

Table 3 Mechanical properties of alluminum alloy

Material	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
Al2024-T3511	512.6	453.6	6.67
Al7050-T7451	588.62	471	6.88

과 Al7050-T7451이며, 화학적 조성은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었으며, 각 재료의 기계적 성질은 Table 3에 나타내었다. 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 폭 10mm에 평행부 60mm로 가공 후 표면거칠기를 줄이기 위해 연마하였고, 특히 패드(pad)와 접촉하는 옆면은 #400~2,000까지 sand paper로 연마한 후 산화알루미늄 파우더를 이용, 마무리 연마를 함으로써 표면거칠기에 의한 영향을 줄임으로서 패드 접촉면과의 마찰저항을 극소화하였다.

AISI-4030으로 제작된 패드는 Fig. 1과 같이 양단에 2mm의 평행부가 있어 접촉면을 대칭형으로 배치하여 안정된 접촉상태에서 실험을 수행할 수 있는 브릿지(bridge)형[6]으로 하였으며, 접촉면을 #2000 sand paper로 연마하여 표면 거칠기 효과를 최소화하여 시편의 양쪽 측면에 부착하고 패드와 시험편 간의 접촉부에서 상대변위 및 접촉면 응력이 발생하도록 하였다.

2.2 실험장치 및 실험조건

본 실험에 사용된 시험기는 최대용량이 25ton인 Instron사의 유압서보 피로시험기(hydraulic-servo fatigue test machine : Model 1332)이다.

프레팅 피로시험은 Fig. 2(a)에서 나타낸것과 같이 시험편과 암(arm)을 로드셀(load cell)에 위치한

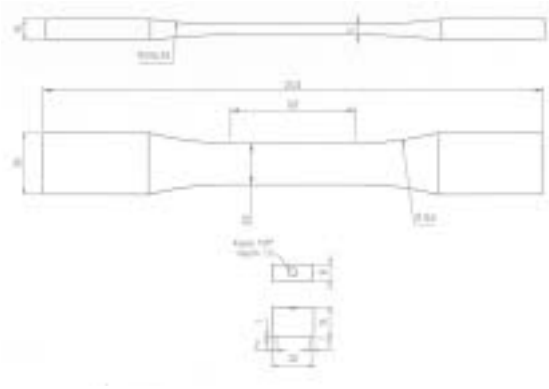
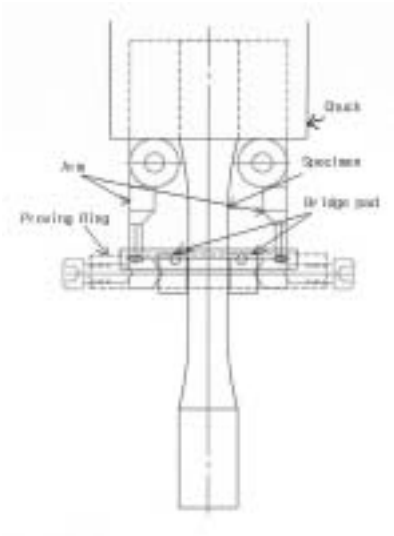
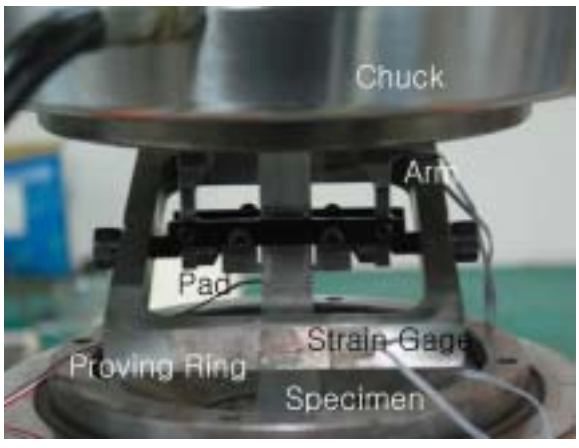


Fig. 1 Shape of the fretting specimen and contact pad (unit in mm)



(a) Schematic illustration



(b) Photograph of test apparatus

Fig. 2 Schematic illustration and photograph of fretting fatigue test apparatus

척(chuck)에서 동시에 잡는 방법을 채택하였다. 패드 고정대를 제작하여 부착함으로써 실험 중 패드의 이탈을 방지하고자 하였다. Fig. 2(b)는 실제 실험하는 모습을 나타내었다. 시험편과 패드에 접촉한 부위에 90MPa의 면압을 부여하기 위해 탄소강(SM45C) 재질의 프루빙 링(proving ring)을 제작하였고, 일정면압의 확인을 위해 프루빙 링 양단에 4장의 스트레인 게이지를 부착하여 보정값을 계산하였다. 프루빙 링에서 나오는 신호를 스트레인 인디케이터(strain indicator)로 출력하여 보정된 계산값에 일치하도록 프루빙 링의 볼트를 조임으로서 시험편과 패드의 접촉면에 90Mpa의 일정면압을 부가하는 방식을 채택하였다.

실험조건은 Al2024-T3511과 Al7050-T7451 모두 응력비 R=0.1, 주파수 5Hz로 정현파형(sine wave)의 인장-인장 하중형태를 채택하였고 상온(습도 50±± 5%)에서 행하였다. 또한, 시험편 모두 일정면압이 주어진 상태에서 반복 하중을 부여하는 방식을 채택하였다.

3. 실험 결과

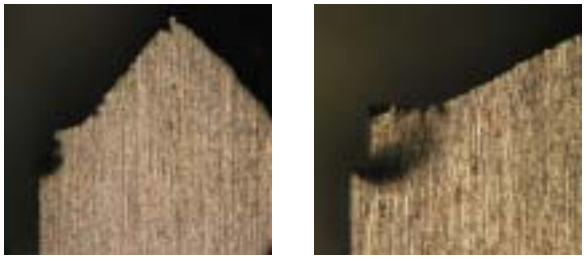
3.1 프레팅 피로거동의 일반적 특성

일반적으로 프레팅 피로의 초기균열은 접촉면압 및 마찰력의 영향때문에 균열발생 초기에는 경사균열로 진전하다가 내부로 진전함에 따라서 일반피로와 동일하게 하중 축에 대하여 수직하게 균열이 진전된다고 알려져있다[7].

본 실험에 있어서도 일반피로와는 다른, 이러한 경향이 나타났으며, 프레팅 손상에 의한 균열발생 및 성장기구와 하중, 면압 등과의 관계를 검토하기 위하여 시험편 파단 후 광학 현미경으로 균열 발생부, 균열성장 경로 및 패드 접촉부의 형상을 관찰하였다.

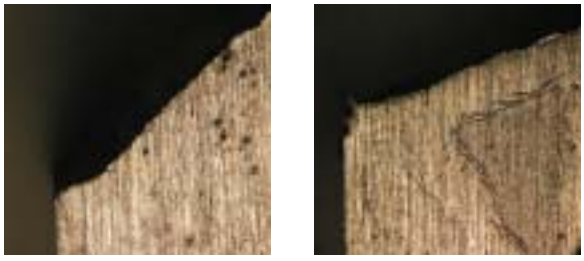
Fig. 3은 Al2024-T3511의 270MPa과 150MPa 하중(σ_{max})에서 파단한 시험편 파단부의 경사균열을 관찰한것이이며, Fig. 4는 Al7050-T7451의 270MPa과 140MPa 하중(σ_{max})에서 파단한 시험편 파단부의 경사균열을 나타낸 것이다.

두 재료의 각 하중별 경사 균열각을 측정하여 Fig. 7에 나타내었다. 경사 균열각은 Al2024-T3511 시험편은 6 ~12°의 범위를 나타내었고, Al7050-T7451 시험편은 3 ~12°의 경사를 보였다. 재료별 차이는 없었으나 두 재료 모두 반복하중이 커 질



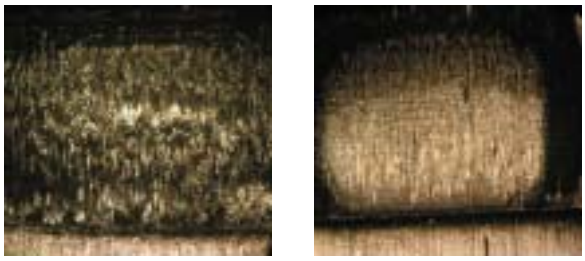
(a) σ_{max}=270MPa (b) σ_{max}=150MPa

Fig. 3 Photographs of oblique crack in contact region (Al2024-T3511)



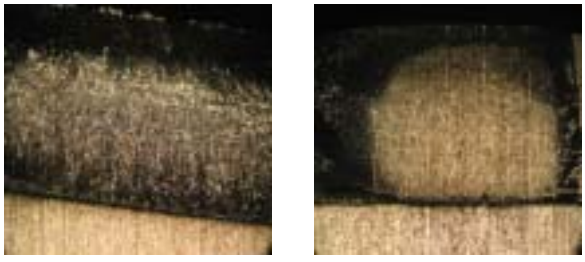
(a) σ_{max}=270MPa (b) σ_{max}=140MPa

Fig. 4 Photographs of oblique crack in contact region (Al7050-T7451)



(a) σ_{max}=270MPa (b) σ_{max}=150MPa

Fig. 5 Photographs of fretting damage in contact region(Al2024-T3511)



(a) σ_{max}=270MPa (b) σ_{max}=140MPa

Fig. 6 Photographs of fretting damage in contact region(Al7050-T7451)

수록 경사 균열 각도가 커지는 경향을 보였다.

프레팅 피로에서 시험편과 패드 사이에 접촉표면의 손상정도를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 두 시험재료 모두 접촉부에서 심한 마모현상으로 손상흔적(valley)이 생겼고, 이러한 손상흔적은 프레팅에 의한 어브레시브 마모(abrasive wear)에 기인한 것으로 사료된다.

3.2 S-N 곡선

Al2024-T3511과 Al7050-T7451의 프레팅 피로실험으로 얻어진 S-N 곡선과 일반피로(plain fatigue) 실험에 의한 S-N 곡선을 Fig. 8에 나타내었다. Al2024-T3511은 일반피로 강도에 비하여 프레팅피로 강도가 약 45% 감소하였으며, Al7050-T7451은 약 50% 감소하여, Al7050-T7451의 피로강도가 Al2024-T3511보다 전반적으로 낮았다.

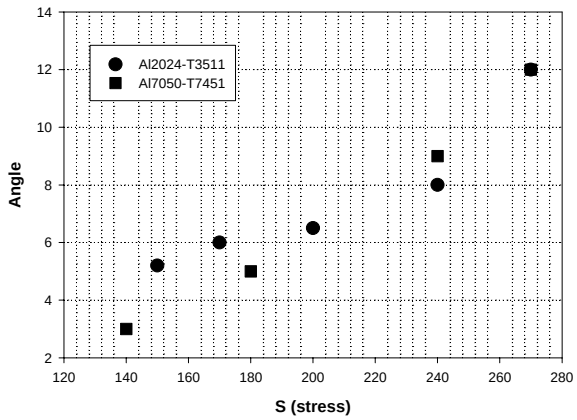


Fig. 7 Relationship between angle of the oblique crack and stress(σ_{max})

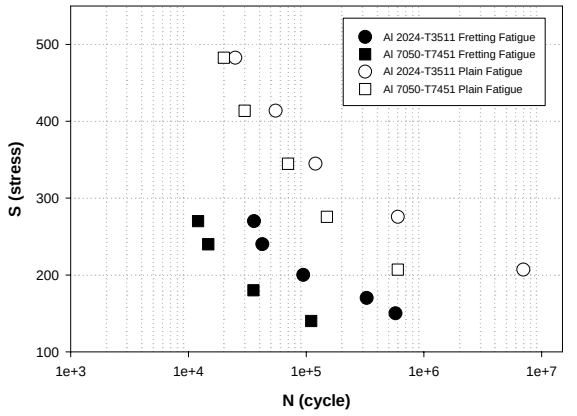
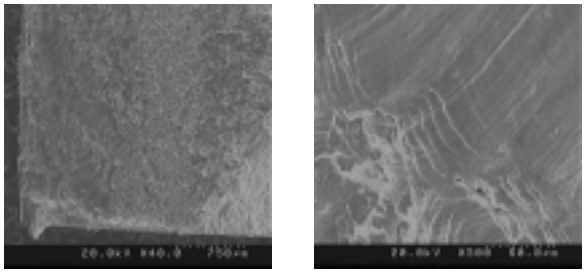


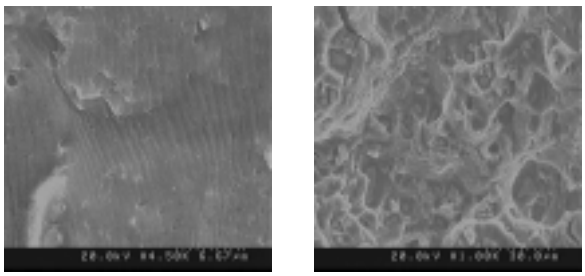
Fig. 8 Relationship between stress(σ_{max}) and cycle number of failure

3.3 파면관찰

Al2024-T3511과 Al7050-T7451의 파단 후, 파면의 미시적 관찰을 위하여 주사형 전자현미경(Scanning Electron Microscope: SEM)을 이용하여 관

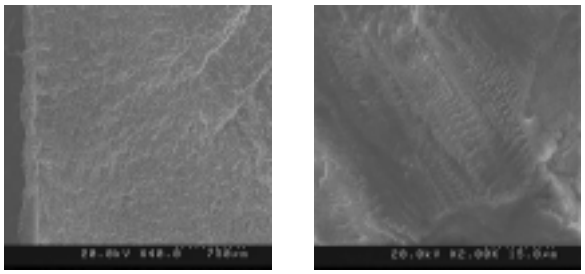


(a) Crack initiation (b) Tire track

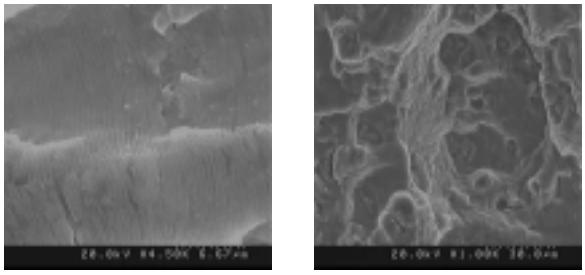


(c) Striation (d) Dimple

Fig. 9 SEM micrographs on the fracture surface (Al2024-T3511, σ_{max}=270MPa)

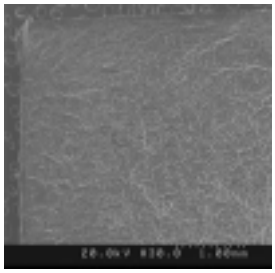


(a) Crack initiation (b) Tire track

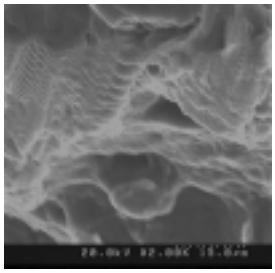


(c) Striation (d) Dimple

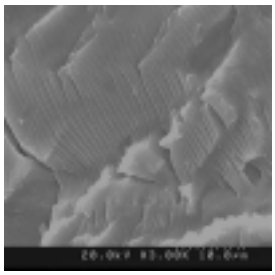
Fig. 10 SEM micrographs on the fracture surface (Al2024-T3511, σ_{max}=150MPa)



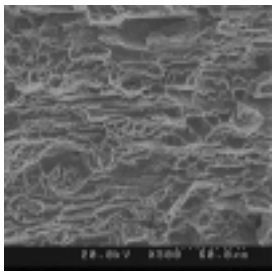
(a) Crack initiation



(b)Tire track

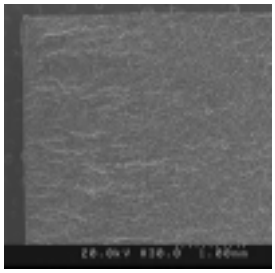


(c) Striation

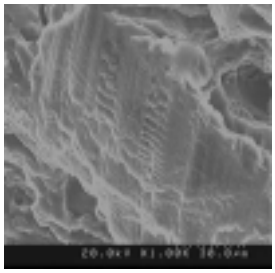


(d) Dimple

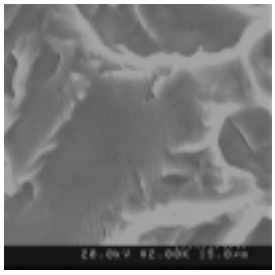
Fig. 11 SEM micrographs on the fracture surface (Al7050-T7451, σ_{max}=270MPa)



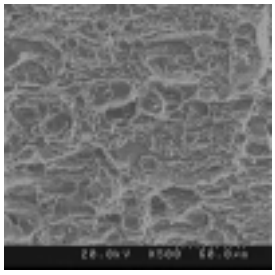
(a) Crack initiation



(b) Tire track



(c) Striation



(d) Dimple

Fig. 12 SEM micrographs on the fracture surface (Al7050-T7451, σ_{max}=140MPa)

찰하였다.

모든 시험편에 있어서 초기 경사균열부의 파면영역에서는 두 파면의 접촉에 의한 마모손상 영역이 관찰되었으며, 이러한 손상영역 내에 타이어 트랙(tire track)이 광범위하게 형성되어있었다.

프레팅 피로파면의 특징이라고 할 수 있는 이러한 손상형태는 면압 및 마찰력의 영향 때문인 것으로 생각되어진다[8]. 또한 반복하중 크기에 의존하여 형성되었다고 판단되는 피로파면 영역에서는 공통적으로 전형적인 연성 스트라이에이션(striation)이 광범위하게 형성되어 있었으며, 최종 파단부에는 딤플(dimple)이 형성되어 있었다.

Fig. 9 ~ Fig. 12의 각 (a)에서 보이는 것과 같이 하중 조건을 달리한 두 재료 모두 프레팅 피로의 특징인 경사크랙(oblique crack), 천이영역, 일반피로 파면영역을 뚜렷이 관찰할 수 있었다.

Fig. 9 ~ Fig. 12의 각 (b)에서 볼 수 있는 타이어 트랙(tire track)이 경사크랙 영역에서 광범위하게 발견할 수 있었다. 이는 프레팅 피로의 특징으로 면압에 따른 Mode II, 즉 전단형 피로에 의한 파면의 미끌림 현상에 의한 것이라 생각된다.

Fig. 9 ~ Fig. 12의 각 (c)는 스트라이에이션으로 면압에 의한 마모영향이 끝난 후 일반피로 영역에서 관찰되었다. 이 영역에서는 경사크랙에서 볼 수 있는 타이어 트랙은 발견되지 않았다.

Fig. 9 ~ Fig. 12의 각 (d)에서 보이는 것은 Al2024-T3511과 Al7050-T7451의 딤플영역을 관찰한 것으로 Al7050-T7451에는 압연방향의 효과(effect of rolling direction)에 의한 것으로 판단되는 일정한 방향성을 가지고 dimple이 형성되어 있었다.

4. 결 론

Al2024-T3511과 Al7050-T7451의 프레팅 피로시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 프레팅 피로는 일반 피로와 비교했을 때 피로강도의 현저한 감소를 보였으며, Al2024-T3511는 약 45%, Al7050-T7451는 약 50% 감소하였다.

(2) 전 시험편에 있어서 경사균열 영역의 파면에는 면압 및 마찰력에 기인하는 타이어 트랙이 광범위하게 형성되어 있었다.

(3) 프레팅 피로균열은 균열진전 초기에는 경사균열로 성장하는데, 하중값이 클수록 경사각도가 커지는 경향이 있었다.

(4) 일정면압을 준 프레팅 피로의 접촉면은 반복하중값이 클수록 마모면의 손상정도가 크다는 것

을 알 수 있었다.

(5) Al7050-T7451의 파면에는 dimple이 방향성을 가지고 형성되어 있었으며, 그 방향은 압연방향과 일치하고 있었다.

참고문헌

(1) Waterhouse, R. B., 1992, "Standardization of Fretting Fatigue Test Method and Equipment," *ASTM STP 1159*, pp.60~66.

(2) Kwon, J. D., Sang, S. S., Choi, S. J., 2001, "A Study on Material Degradation and Fretting Fatigue Behavior," *Transaction of the KSME*, A, Vol.25, No. 8, pp.1287~1293.

(3) Puglia, A. D., Pratesi, F. and Zonfrillo, G., 1994, "Experimental Procedure and Parameters Involved in Fretting Fatigue Tests," *Fretting Fatigue*, ESIS 18, pp. 219~238.

(4) Kondoh, K. and Mutoh, Y., 2000, "Crack Behavior in the Early Stage of Fretting Fatigue Fracture," *ASTM STP 1367*, pp. 282~292.

(5) Hattori, T., Nakamura, M. and Watanabe, T., 2003, "Improvement of Fretting Fatigue Strength by Using Stress-Release Slits," *ASTM STP 1425*, pp. 159~168.

(6) Nakazawa, K., Sumita, M. and Marayama, N., 1992, "Effect of Contact Pressure on Fretting Fatigue of High Strength Steel and Titanium Alloy," *ASTM STP 1159*, pp. 115~125.

(7) Matthew, P. S. and Thomas, N. F., 1996, "Mechanics of Fretting Fatigue Crack Formation," *Wear*, Vol.198, pp. 93~107.

(8) Vincent, L., Berthier, Y. and Godet, M., 1992, "Testing Methods in Fretting Fatigue: A Critical Appraisal," *ASTM STP 1159*, pp. 33~48.