

論文

항공부품 프레팅 손상 측정용 시험 장치 개발

권혁진*, 김경목**

Development of a Testing Machine for Fretting Damage of Aerospace Components

Hyuk-Jin Kwon* and Kyung-Mok Kim**

ABSTRACT

In this paper, a fretting testing machine is developed using ball-on-flat test apparatus. Precise micro-slip motion is produced by a linear stage. A relative displacement between a ball and a flat specimen is measured with a laser displacement sensor. Dry friction tests are conducted with AISI 52100 steel balls and cold-rolled high strength steel plates at room temperature and ambient humidity. The evolution of the kinetic friction coefficient is determined. Comparison between measured friction coefficients and those found in the literature is then carried out. Fretting tests with an electro-deposited coating are employed at an amplitude of 0.05 mm. Slip regime is identified with slip ratio. It is demonstrated that a developed testing machine allows determining the friction coefficient under fretting condition.

Key Words : Fretting(프레팅), Wear(마모), Friction(마찰), Aerospace(항공우주)

1. 서 론

프레팅(fretting) 손상은 접촉하는 두 물체 사이에서 미소 슬립(slip)에 의해 발생하는 균열, 마모, 부식 현상이다[1, 2]. 프레팅 손상은 다양한 항공우주부품에서 발생한다. 항공기체에서는 볼트 체결부의 볼트 머리와 체결된 부품사이의 접촉면, 리벳으로 고정된 두 금속판의 접촉면에서 프레팅 손상이 발생한다[1]. 항공용 제트엔진에서도 프레팅에 의한 손상이 관찰된다[2]. 제트 엔진의 공기 압축부는 여러 개의 블레이드와 디스크로 구성된다. 블레이드의 역할은 많은 양의 외부 공기를 엔진 연소실로 보내는 것이다. 각 블레이드는 유지 보수를 위해 착탈식으로 설계, 제작된다. 엔진

운전 중 블레이드 뿌리 부분과 블레이드를 고정하는 디스크 사이에서 마찰 접촉이 존재한다. 이 마찰 접촉면에서 프레팅 손상이 발생한다.

실제 항공기체나 제트 엔진에서 프레팅을 발생시켜 기계적 손상을 확인하는 것은 많은 시간과 비용이 소요된다. 그래서 부품 설계 단계에서는 프레팅 조건을 재현하는 시험 장치를 사용하여 부품의 프레팅 저항 특성을 파악한다. 프레팅 시험기는 크게 두 형태로 분류될 수 있다. 첫 번째는 인라인(in-line) 타입의 프레팅 시험기이다(Fig. 1a). 인라인 프레팅 시험기는 두 패드(pad)를 시편(specimen) 좌우에 배치시켜 두 마찰 접촉면을 생성시키는 것이 특징이다[2, 3].

인라인 프레팅 시험기의 장점은 시편을 중심으로 좌우 대칭이기 때문에, 시편 중앙(하중 센서 부착 부위)에서 마찰력에 의해 발생하는 모멘트를 서로 상쇄시킬 수 있다. 그러나 두 마찰 접촉면 조건(표면 거칠기, 접촉 형상 등)이 매우 유사해야만 하고 한 시험을 위해 두 개의 패드가 필요하다. 두 번째는 Fig. 1b와 같이 외팔보를 지닌

2015년 02월 05일 접수 ~ 2015년 03월 05일 심사완료
논문심사일 (2015.02.26, 1차)

* 한국항공대학교 대학원 항공우주 및 기계공학과

** 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

연락처, E-mail : kkim@kau.ac.kr

경기도 고양시 덕양구 항공대학로 76

프레팅 시험기 형태이다[4, 5]. 외팔보에 볼(ball) 또는 핀(pin)을 고정하고 시편(specimen)에 왕복 변위를 발생시키는 것이 특징이다. 또는 시편을 고정하고 외팔보에 수평 변위를 발생시킨다. 수직 하중은 외팔보에 부가시키는 것이 일반적이다. 이런 종류의 시험기는 하나의 접촉면이 존재하며 일반적인 마모 시험기를 변형시켜 사용할 수 있다. 그러나 외팔보는 시험 중 수평을 유지해야 한다. 또한 하중 측정용 센서에서 마찰력에 의해 모멘트가 발생될 수 있어 모멘트를 상쇄시켜야 하는 단점이 있다.

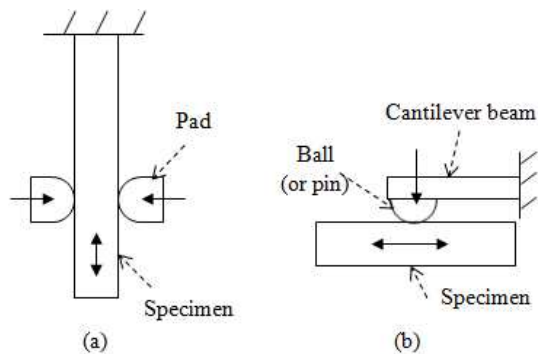


Fig. 2 Two conventional types of fretting test apparatus. (a) In-line type and (b) cantilever beam type

프레팅 시험에서 패드(또는 볼)와 시편 사이의 상대적인 변위는 매우 중요하다. 보통 프레팅 시험에서는 수 마이크로에서 수백 마이크로의 변위가 선택된다. 이 변위 크기에 따라 프레팅 손상 정도가 다르게 관찰된다[6, 7]. 상대적인 변위가 매우 작으면 두 접촉 물체는 서로 상대 운동을 하지 않고 붙어 있다. 상대적인 변위가 증가하면 접촉면의 일부에는 슬립이 발생하고 나머지는 여전히 붙어 있는 상태가 된다. 이런 슬립 조건을 부분적 슬립 영역(partial slip regime)이라 불린다. 상대적인 변위 크기가 모든 부분에서 슬립이 발생할 만큼 충분하다면 접촉면에서는 완전한 슬립이 발생한다. 이를 전면 슬립 영역(gross slip regime)이라 불린다. 부가한 상대변위 진폭 크기가 실제 접촉 반경(Hertzian contact theory에 의해 결정된)보다 크다면 이를 왕복 미끄럼 영역(reciprocal sliding regime)이라고 불린다. 부분적 슬립 영역에서의 상대 변위는 접촉면 양단 부근에서 균열을 야기한다. 그래서 이런 균열 현상을 프레팅 피로(fretting fatigue)라 한다. 반면 전면 슬립 영역에서는 상대 변위가 접촉면 전 영역에

서 마모를 발생시킨다. 이런 현상을 프레팅 마모(fretting wear)라 정의한다. 왕복 미끄럼 영역에서 부가한 상대 변위 또한 마모를 야기한다. 이 영역에서의 마모율은 전면 슬립 영역에서의 마모율과 다르게 관찰된다. 이처럼 상대 변위에 따라 손상 정도가 다르기 때문에 프레팅 시험에서는 실제 부품에서 발생하는 상대 변위와 동등한 변위 크기를 생성할 필요가 있다.

본 논문에서는 항공우주부품의 프레팅 특성을 측정하기 위한 시험기가 개발되었다. 시험을 통해 금속 볼과 시편사이의 동적 마찰 계수가 측정되었다. 또한 전착도장 코팅의 동적 마찰 계수 변화가 측정되었고 슬립 영역이 평가되었다.

2. 본 론

2.1 프레팅 시험기 구성

Fig. 2는 본 연구에서 개발된 프레팅 시험기 모습이다. 시험 장치는 강체팔(rigid arm), 로드셀(load cell), 무게추(dead weight), 볼 홀더(ball holder), 리니어 스테이지(linear stage), 레이저 변위 센서(laser displacement sensor)로 구성되었다. 볼 홀더는 실린더 타입으로 강체팔의 홀에서 수직 방향으로 자유롭게 이동 가능하다. 볼 홀더의 외경과 강체팔의 홀 내경 사이의 공차는 13 μ m 이내로 제작되었다. 볼과 시편 사이의 수직 하중은 무게추에 의해 부가되었으며 무게추는 볼 홀더 위에 위치하였다. 강체팔은 로드셀과 연결되어 있고 시험 중 움직이지 않게 고정되었다. 볼은 볼 홀더 내에서 볼트로 고정되었으며 평판 시편과 마찰 접촉하였다(Fig. 2b).

볼과 시편 사이의 상대 변위는 리니어 스테이지(PIImiCos GmbH, LS-110)를 통해 생성되었다. 레이저 변위 센서는 리니어 스테이지 왕복대(carriage) 위에 고정되어 시험 중 볼과 시편 사이의 상대 변위를 측정하였다. 이는 변위 측정에서 시험 장치의 강성 영향을 최소화하기 위함이었다. 선택된 레이저 변위 센서(Keyence, LK-081)는 3 μ m의 해상도와 ± 0.1 % 선형성을 보유하였다. 마찰력 측정을 위해 피로 측정용 로드셀(Interface Inc. 최대 1.25 kN)이 이용되었다. 로드셀이 설치된 지점에서 마찰력에 의해 모멘트가 발생하며 이는 측정 하중의 정확도에 영향을 미칠 수 있다. 그래서 본 시험 장치에는 편심력 민감도가 $\pm 0.1\%/25.4$ mm인 로드셀이 선택되었다.

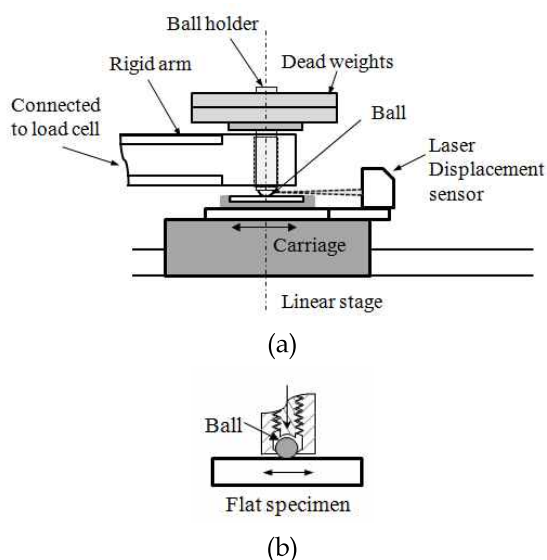


Fig. 2 Schematic illustration of the apparatus for a fretting test. (a) a test rig and (b) ball-on-flat contact

프레팅 시험을 위해서는 하나의 볼과 평판 시편이 필요하다. 본 시험에서 사용된 금속 볼은 상업용 AISI 52100 스틸이며 시편은 냉간 압연 고장력 강판(cold-rolled high strength steel, SPFC 780DP)이다. 볼의 직경은 4.75 mm이며 초기 표면 거칠기는 $0.025 \mu\text{m}$ 이었다. 평판 시편은 코팅된 강판과 코팅되지 않은 강판 두 종류가 사용되었다. 여기서 코팅된 강판은 에폭시 기반 전착 도장 처리된 것을 의미하며 초기 두께는 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 이었다. 50 N의 수직하중, 1 Hz의 초당 왕복수가 시험 조건으로 선택되었다. 이는 베어링 볼이 사용되는 좌석 슬라이딩 레일에서의 하중 조건과 유사하다. 코팅되지 않은 평판 시편은 0.5 mm의 변위 진폭이, 전착 도장된 시편은 0.05 mm의 변위 진폭이 선택되었다.

2.2 시험 결과

프레팅 시험 중 동적 마찰 계수가 측정되었다. 동적 마찰계수는 각 사이클 후 최대 마찰력에 수직 하중을 나눈 값으로 정의되었다. 수직 하중은 시험 중 일정하게 유지되었으며 세 번의 시험이 동일한 조건(변위진폭: 0.5 mm, 초당 왕복수: 1 Hz, 수직하중: 50 N)하에서 수행되었다. 시험들은 500 사이클 후에 중단되었다.

Fig. 3은 코팅되지 않은 평판 시편의 동적 마찰 계수 변화 그래프를 보여준다. 시험 1과 시험 2의 초기 마찰 계수 값은 매우 유사하였지만 시

험 3의 초기 마찰 계수 값은 다소 높았다. 이는 초기 표면 거칠기와 연관 있다. 50 사이클까지 동적 마찰 계수는 사이클에 따라 증가하였다. 이 사이클까지 슬립이 접촉 표면을 거칠게 하고 마찰적 시효(Frictional ageing)에 의해 접촉하는 표면 돌기들 사이의 화학적 결합이 강화되는 것도 마찰계수가 증가하는 원인 중의 하나일 것이다 [8]. 50 사이클이 지난 후 마찰 계수 값은 거의 일정하게 유지되었다 (0.55-0.6). 이는 문헌에서 발견된 스틸과 스틸의 마찰 계수 값들(0.55~0.8)과 유사하다[4, 9].

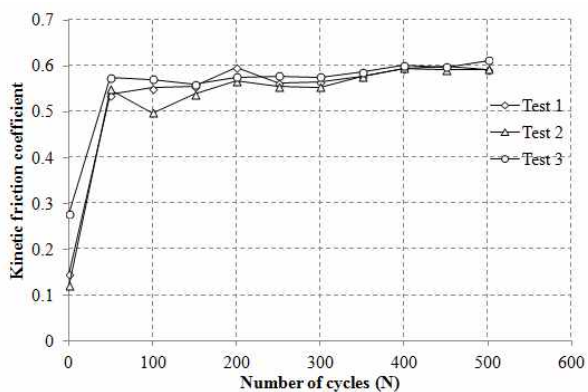


Fig. 3 Friction coefficient evolution of uncoated steel (cold-rolled high strength steel) against AISI 52100 steel ball at a displacement amplitude of 0.5 mm, a frequency of 1 Hz and a normal force of 50 N.

Fig. 4는 전착도장 코팅의 마찰 계수 변화를 보여준다. 부가된 변위진폭은 0.05 mm이며 전착도장이 거의 제거되었을 때(마찰 계수=0.45) 시험이 중단되었다. 마찰 계수는 사이클이 증가할수록 점진적으로 증가하는 경향을 보였으며 3000 사이클이 지난 후에 0.45에 도달하였다. 이는 전착도장의 두께가 사이클에 따라 감소하기 때문이다. 이런 마찰 계수 거동은 문헌에서도 확인된다[10].

Fig. 5는 프레팅 시험 중 슬립비(slip) 변화를 보여준다. 슬립비는 접촉면에 발생하는 실제 변위에 부가 변위를 나눈 값으로 정의된다. 슬립비는 프레팅 시험 중 접촉면에서의 슬립 영역을 확인하는 지수로 이용되고 있다[11, 12]. 시험에서 슬립비가 0.26 보다 작으면 접촉면에 균열이 우세적으로 발생하여 해당 시험은 프레팅 피로 시험으로 간주된다. 반면 슬립비가 0.26보다 크고 0.95 보다 작으면 해당 시험은 프레팅 마모 시험으로 간주된다. Fig. 5에서 모두 슬립비는 모두 0.26보다 크고 0.95보다는 작다. 이는 두 시험

이 모두 프레팅 마모 영역에서 수행되었다는 것을 증명한다.

Figs. 4-5는 본 시험기가 프레팅 시험기로 사용 가능하다는 것을 보여준다. 본 시험기는 조종석 좌석 레일을 포함한 다양한 항공우주 부품에서 발생하는 프레팅 손상 현상을 재현하기 위해 개발되었다. 본 연구에서 개발된 시험기는 최대 100 N의 수직하중에서 최대 26 mm, 3 Hz의 변위와 초당 왕복수를 발생시킬 수 있다.

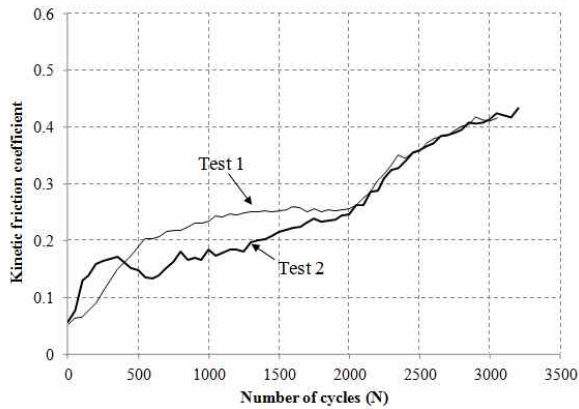


Fig. 4 Friction coefficient evolution of electro-deposited coating against AISI 52100 steel ball at a displacement amplitude of 0.05 mm, a frequency of 1 Hz and a normal force of 50 N.

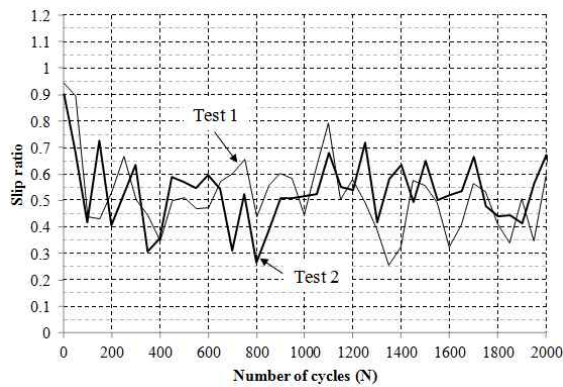


Fig. 5 The evolution of slip ratio for electro-deposited coating against AISI 52100 steel ball at a displacement amplitude of 0.05 mm, a frequency of 1 Hz and a normal force of 50 N.

3. 결 론

본 논문에서는 프레팅 시험기가 개발되었다. 개발된 시험기는 마이크로 단위의 정밀한 상대 변위를 생성시킬 수 있고 접촉면에서의 실제 슬립 크기를 측정할 수 있도록 설계되었다.

프레팅 시험을 통해 항공용 좌석 슬라이딩 레일의 재료인 AISI52100 스틸과 냉간압연 고장력 강판사이의 동적 마찰 계수가 측정되었다. 또한 측정된 동적 마찰 계수 값들은 문헌에서 발견된 값과 비교되었다. 측정된 마찰 계수 값(0.5-0.6)은 문헌에서의 발견된 값들과 매우 유사하였다.

또한 변위 진폭이 0.05 mm인 슬립 상태에서 전착도장의 마찰계수 변화가 측정되었다. 초기 마찰계수는 0.1보다 낮았고 점진적으로 증가하였다. 슬립비를 통해 시험이 프레팅 마모 영역에서 수행되었다는 것을 확인하였다.

향후 본 시험기를 통해 다양한 항공부품에서의 프레팅 손상이 평가될 것이다. 또한 다양한 항공우주용 고체 코팅의 내구성 측정에도 이용될 것이다.

후 기

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2014년도 창업과제-건강진단연계 사업 (S2125917)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

참고문헌

- 1) Hills, D. and Nowell, D., Mechanics of fretting fatigue, 1st ed. Kluwer Academic publishers, Dordrecht, 1994.
- 2) Korsunsky, A. M., Torosyan, A. R. and Kim, K., "Development and characterization of low friction coatings for protection against fretting wear in aerospace components", *Thin Solid Films*, Vol. 516, 2008, pp. 5690-5699.
- 3) Kim, K., "Friction behaviours of molybdenum-based coatings under fretting condition", *International Journal of Surface Science and Engineering*, Vol. 5, 2011, pp. 169-179.
- 4) Williams, J. A., Engineering Tribology, 1st ed. Oxford Science Publications, Oxford, 1994.
- 5) Kim, K. and Yoon, M. J., "Characterization of friction behaviour of flake, spheroidal, and

compacted vermicular graphite cast irons", *International Journal of Surface Science and Engineering* Vol. 9, 2015, pp. 1-12.

6) Kim, K. and Korsunsky A. M., "Exponential evolution law of fretting wear damage in low-friction coatings for aerospace components", *Surface and coatings Technology*, Vol. 202, 2008, pp. 5838-5846.

7) Kim, K. and Korsunsky, A. M., "Dissipated energy and fretting damage in CoCrAlY-MoS₂ coatings", *Tribology International*, Vol. 43, 2010, pp. 676-684.

8) Li, Q., Tullis, T. E., Goldsby, D. and Carpick, R. W., "Frictional ageing from interfacial bonding and the origins of rate and state friction", *Nature*, Vol. 480, 2011, pp. 233-237.

9) Bhushan, B., Introduction to tribology. 1st ed. John Wiley & Sons Inc, New York, 2002.

10) Kim, K., "Analysis of friction coefficient evolutions on coated systems under sliding conditions", *Wear*, Vol. 269, 2010, pp. 655-663.

11) Fouvry, S., Kapsa, P. and Vincent, L., "Analysis of sliding behaviour for fretting loadings: determination of transition criteria", *Wear*, Vol. 185, 1995, pp. 35-46.

12) Varenberg, M., Etsion, I. and Halperin, G., "Slip index: a new unified approach to fretting", *Tribology Letters*, Vol. 17, 2004, pp. 569-573.