

항공, 바이오, 원자력 부품의 프레팅 마모 현상 비교 연구

전태성¹ · 김경목^{2,†}¹인천대학교 기계공학과²한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

Comparative study on fretting wear of aerospace, biomedical, and nuclear components

Tea-Sung Jun¹ and Kyungmok Kim^{2,†}¹Department of Mechanical Engineering, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon, Republic of Korea²School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University, 76 Hanggongdaechang-ro, Deogyang-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 412-791, Republic of Korea

Abstract

This paper investigates fretting wear damage in aerospace, biomedical, and nuclear components. Experimental parameters are identified that affect fretting wear damage. The parameters observed in industries are directly compared. The magnitudes of frequency, relative displacement, and normal force are found to differ depending on the contacting components where fretting wear occurs. In addition, recent solutions to minimize fretting wear damage are reviewed. The solutions include depositing of a low-friction coating, surface treatment, selection of substrate material, and optimal design of contact geometries. This comparative study suggests useful methods and solutions for analyzing fretting wear damage and for designing tribo-components.

초 록

본 논문에서는 항공, 바이오 및 원자력 부품들에서 발생하는 프레팅 마모 현상이 비교 연구되었다. 프레팅 마모 손상에 영향을 미치는 실험적 인자들을 확인하였으며 각 부품에서 관찰된 실험 인자들의 크기들을 직접 비교하였다. 초당 진동수, 상대적 변위, 그리고 수직하중의 크기는 프레팅 마모가 발생하는 부품에 따라 다양했다. 프레팅 마모 손상을 최소화시키는 최근 해결책들이 조사되었으며 저마찰 코팅 적층, 표면 처리, 기저 재료 및 접촉 형상 최적 설계 등이 해결책으로 소개되었다. 본 연구는 프레팅 마모 손상을 분석하고 마찰 부품을 설계하는데 유용한 방법과 해결책을 제공한다.

Key Words : Fretting (프레팅), Wear (마모), Corrosion (부식), Friction coefficient (마찰계수), Aerospace (항공우주)

1. 서 론

프레팅(fretting)은 접촉하는 두 물체 사이에서 발생하는 상대적인 미소 변위이다. 상대적인 미소 변위의

크기에 따라 접촉면에서 마모 또는 균열이 발생한다. 미소 변위의 크기가 커서 두 물체의 모든 부분들이 완전히 미끄러진다면, 접촉면에서 마모가 발생한다 (프레팅 마모). 반면 미소 변위 크기가 작아서 접촉부의 일 부분에서만 슬립(slip)이 발생되고 나머지는 서로 붙어 있다면, 접촉면 끝단 부근에서 균열이 발생한다. 이런 현상을 프레팅 피로(fretting fatigue)라 한다[1, 2]. 만약 프레팅 마모가 부식 환경에서 가속화된다면 이를

Received: Feb 20, 2017 Revised: Mar 28, 2017 Accepted: Mar 30, 2017

† Corresponding Author

Tel: +82-2-300-0288, E-mail: kkim@kau.ac.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

프레팅 부식(fretting corrosion)이라고 한다[3]. 이런 프레팅 손상 현상은 여러 분야에서 관찰된다. 특히, 프레팅 마모 및 피로 손상은 항공 부품에서 극복해야 할 중요한 이슈 중의 하나이다[2, 4]. 프레팅 손상은 항공용 터보팬 엔진의 압축 블레이드와 디스크 사이의 접촉면에서 발생한다. 티타늄 합금으로 만들어진 압축 블레이드는 유지 보수를 위해 착탈식으로 제작된다. 항공기 운항 중 압축 블레이드는 원심력을 받으며 좌우방향으로 미소 진동한다. 이런 원심력과 미소 진동의 크기는 엔진의 추력에 따라 다르다. 특히 블레이드의 미소 진동은 압축 블레이드와 디스크 사이의 상대적인 미끄럼을 야기한다. Fig. 1은 프레팅에 의한 티타늄 합금의 마모 손상을 보여준다. 프레팅 실험 조건은 실제 항공용 블레이드와 디스크 사이에서 발생하는 조건과 유사했다.



Fig. 1 Worn Ti-6Al-4V surfaces due to fretting: a flat Specimen (left) and a counterpart (right) [4]

원자력 분야에서는 연료봉과 지지대 사이에서 프레팅 마모 손상이 발생한다[5]. 냉각수 흐름에 의해 연료봉(fuel rod)이 진동하며 지지대(support)와의 접촉면에서 마모가 발생한다. 바이오 분야에서는 인공 고관절에서 프레팅 마모가 발생한다[6]. 인공 고관절은 크게 헤드(head), 컵(cup), 그리고 스템(stem)으로 구성된다. 헤드와 컵은 다리의 움직임을 위해 마찰 접촉면을 가진다. 다리의 움직임이 발생하면 헤드와 컵 사이에는 상대적인 변위가 발생한다. 이런 상대적인 변위가 장기간에 걸쳐 헤드와 컵 사이 접촉 표면에 마모를 발생시킨다. 또한 인공 고관절의 스템(stem)은 허벅지 뼈에 시멘트(cement)로 부착되어 있다. 스템과 시멘트 사이에도 마이크로 단위의 미소 변위가 발생하며 시간에 따라 그 미소변위의 크기는 증가한다.

프레팅 손상은 이처럼 다양한 부품 사이에서 발생하고 부품 수명을 결정하는 중요한 현상으로 간주된다.

그럼에도 불구하고 프레팅 마모 현상에 대한 규명이 명확히 이루어지지 않고 있다. 각 사례마다 시험과 해석에 의해 적절한 프레팅 손상 억제 방법이 제시되고 있다. 각 사례마다 제시된 프레팅 손상 평가와 억제 방법을 서로 비교할 필요가 있다. 이는 향후 다른 분야에서의 프레팅 손상을 이해하고 극복하는데 도움이 되기 때문이다.

본 논문에서는 항공, 원자력, 바이오 부품들에서의 프레팅 조건을 조사하고 프레팅 손상 억제 방법이 서로 비교 분석되었다.

2. 본 론

2.1 프레팅 조건 비교

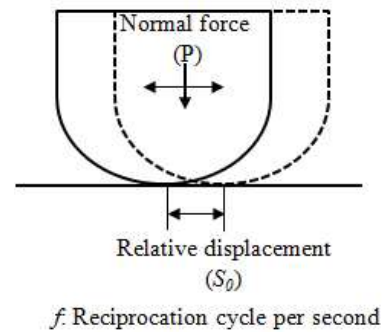


Fig. 2 Experimental parameters at frictional contacts

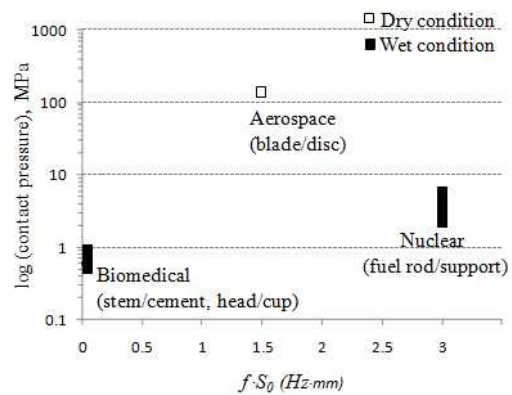


Fig. 3 Direct comparison of experimental conditions found in various industries.

마찰 부품에서 프레팅 손상을 야기하는 인자들은 다양하다. 그 중 가장 중요한 인자는 접촉면에서의 수직 하중(normal force), 상대적인 변위 크기(relative

displacement) 그리고 초당 왕복 수(frequency)이다 (Fig. 2). 이 세 가지 인자에 의해 프레팅 손상 정도가 결정된다. 프레팅에서의 상대적인 변위는 실제 접촉 크기의 절반 이하라고 규정된다[7, 8]. 그러나 실제로 프레팅 손상을 발생시키는 상대적인 변위는 접촉형상, 접촉 재료의 기계적 물성치 등 다양한 요소에 의해 결정된다. Fig. 3은 다양한 부품에서의 프레팅 조건을 보여준다. Fig. 3의 세로축은 접촉면에서의 압력을, 가로축은 상대적인 변위와 진동수의 곱을 보여준다. 즉, 가로축은 초당 왕복 이동 거리에 해당한다.

Figure 3에서 알 수 있듯이, 항공 부품(엔진의 압축 블레이드)에서의 수직 압력은 바이오나 원자력 부품들에서 고려되는 수직 압력보다 월등히 크다. 수직 압력은 프레팅 손상을 입는 부품의 수명에 직접적으로 영향을 미친다. 또한 항공 압축블레이드와 디스크는 건조 마찰 조건이다. 이를 위한 프레팅 마모 시험은 실제와 유사한 조건(접촉 평균 압력은 128 MPa, 진동수는 2.5 Hz, 상대변위는 0.6 mm)에서 수행된다. 반면, 원자력 부품인 연료봉과 지지대 사이에서는 진동수가 상대적으로 크다 (30 Hz). 또한 냉각수 속에서 프레팅이 발생한다. 인공고관절에서 발생하는 프레팅 조건은 항공 부품이나 원자력 부품에서 발생하는 조건보다 그 크기가 매우 작다. 인공관절에서 고려되는 수직압력은 0.6-1.0 MPa, 진동수는 1 Hz, 상대변위는 0.02-0.06 mm이다.

2.2 프레팅 손상 평가 방법

마찰 계수는 접촉하는 두 물체사이의 마찰 특성을 정량적으로 보여주는 지수이다[9, 10]. 특히, 동적 마찰 계수(또는 쿨롱 마찰 계수)는 가장 일반적으로 사용하는 프레팅 마모 손상 평가 척도이다[11]. 동적 마찰 계수는 Fig. 4와 같은 프레팅 루프(fretting loop)에서 최대 접선력(tangential force) 값에 수직 하중을 나눈 값으로 정의된다; 접선력은 접촉면의 수직 하중 크기에 따라 다르기 때문에, 수직 하중에 따른 최대 접선력 비를 사용한다. 프레팅 루프는 각 프레팅 사이클 마다 접선력과 변위에 의해 결정된다. 금속과 금속사이의 프레팅 중 Fig. 4a처럼 끝단에서 하중 피크(peak)가 발생하기도 한다 (ploughing effect). 반면, 코팅과 코팅(또는 금속) 마찰 시험에서는 Fig. 4b처럼

슬라이딩 중에는 접선력이 거의 일정하게 유지된다.

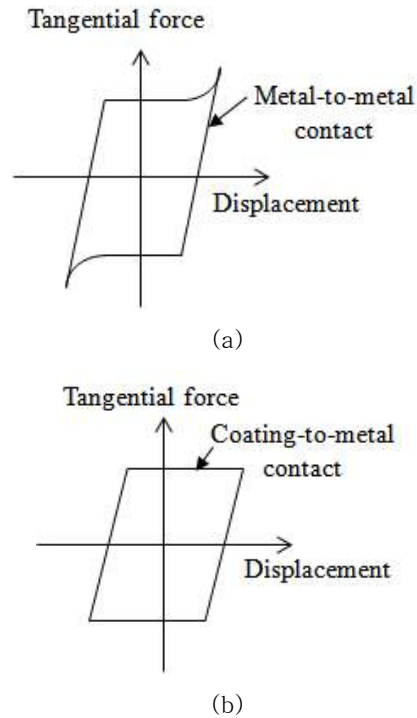


Fig. 4 Typical fretting loops at (a) metal-to-metal contact and (b) coating-to-metal contact

저마찰 고체 코팅이나 표면 처리된 시편의 경우, Fig. 5와 같이 초기 마찰 계수는 낮은 값을 보인다. 프레팅 사이클이 진행될수록, 표면 거칠기가 증가하고 저마찰 고체 코팅의 성능이 악화된다. 코팅 일부가 제거되어 하층 시편 표면(surface of substrate)이 접촉면에 출현하여 그 크기가 증가할수록 마찰 계수 또한 증가한다. 마찰 계수의 급격한 증가 후 마찰 계수는 다시 일정하게 유지된다[12]. 동적 마찰 계수는 프레팅 시험 중 얻을 수 있는 척도이기 때문에 많이 이용된다. 그러나 두 접촉하는 물체사이에 완전한 미끄럼이 발생하는 경우만 사용할 수 있다. 즉 프레팅 피로의 경우 이 동적 마찰 계수 값을 사용하지 않는다.

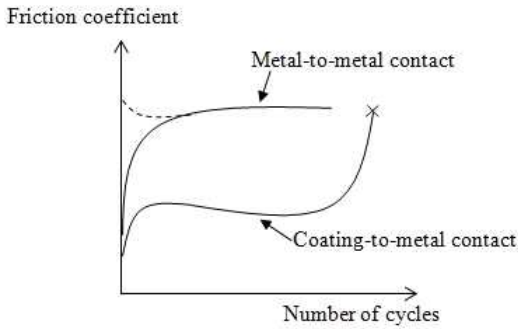


Fig. 5 Typical friction coefficient evolutions at metal-to-metal contact and coating-to-metal contact

프레팅 손상 정도는 미끄럼 거리에 따라 접촉면 부근에 균열이 발생하거나 접촉면 전체에서 마모가 발생한다. 전체 프레팅 사이클 중 일부 사이클은 균열이, 다른 일부는 마모가 발생하기도 한다(mixed slip regime). 이 경우는 프레팅 손상을 명확히 확인하기 어렵다. 그래서 프레팅 마모 손상을 측정하기 위해서는 반드시 접촉면에서 완전한 미끄럼(gross slip)이 발생해야만 한다. 프레팅이 마이크로 단위의 미소 변위이기 때문에, 육안으로 완전한 미끄럼 발생을 확인하기 어렵다. 완전한 미끄럼 발생 여부는 슬립 비(slip ratio), 에너지 비(energy ratio), 또는 슬립 인덱스(slip index)를 통해 확인할 수 있다[13, 14]. 슬립 비, 에너지 비, 슬립 인덱스는 모두 프레팅 루프에서 계산될 수 있다.

마찰과 관련된 이론적 접촉 해석은 Hertz 모델, Johnson-Kendall-Roberts (JKR) 모델, Derjaguin-Muller-Toporov (DMT) 모델 등을 통해 수행될 수 있다 [15, 16]. Hertz 접촉 이론을 통해 접촉하는 등방성 재료 사이에 접촉 면적, 응력 및 변형을 계산할 수 있다. 그러나 Hertz 접촉 모델의 가정은 선형 탄성, 비접착(non-adhesion)이어서 접착 접촉의 경우 Hertz 모델이 적용될 수 없다. 접착성 선형(adhesive elastic) 접촉의 경우 JKR 모델이나 DMT 모델이 이용된다.

마모율(wear rate)은 동적 마찰 계수와 더불어 프레팅 손상 척도로 널리 이용된다. 마모율은 마모량 측정을 통해 결정되는데 마모량은 일정 프레팅 사이클 후 제거된 재료의 부피를 직접적으로 측정하여 계산된다. 프레팅 마모량(V_w)은 Eq. (1)과 같은 Archard 마모

방정식으로 표현된다.

$$V_w = k \frac{P}{H} N \quad (1)$$

여기서, k 는 마모 계수, P 는 수직하중, N 은 프레팅 사이클 또는 미끄럼 거리, H 는 경도를 의미한다.

Archard 마모 방정식에서의 마모 계수(k)를 통해 재료의 프레팅 마모 저항성을 표현할 수 있다. 마모율 또는 마모량은 시험 중 실시간으로 확인하는데 어려움이 존재한다. 그래서 각기 다른 프레팅 사이클을 겪은 시편들에서 마모량을 측정하여 마모율을 계산한다. 시편이 코팅된 경우, 코팅의 초기 두께에 의한 편차가 존재하기도 한다.

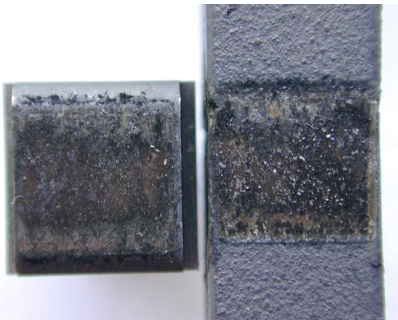
2.3 프레팅 손상 최소화 방법

프레팅 손상을 최소화시키는 방법은 여러 가지이다. 접촉 형상을 변경하여 접촉면에서 응력을 최소화시키거나, 마찰력을 최소화시키기 위해 표면처리 또는 저마찰 고체 코팅을 재료 표면에 적층하기도 한다. 또는 마모 저항성이 높은 재료를 선정하기도 한다. 프레팅 운전 조건이나 환경에 따라 다양한 방법이 이용되고 있다. 접촉 형상은 접촉면의 양 끝단에서의 응력이 집중되지 않도록 설계된다. 항공용 엔진 블레이드와 디스크는 Flat-and-rounded 접촉 또는 Hertz 접촉이 이용된다. 인공관절의 스템과 시멘트 사이는 많은 접촉 면적을 유지하기 위해 plane-to-plane 접촉이 이용된다. 반면, 원자력 분야에서는 point 접촉이나 Hertz 접촉이 이용된다.

표면 처리는 재료의 표면 거칠기를 낮게 하여 마찰 계수를 줄이는 방법이다. 동적 마찰 계수는 표면 거칠기에 의해 크게 좌우되기 때문에, 표면 거칠기를 인위적으로 조절한다면 동적 마찰 계수를 최소화시킬 수 있다. 프레팅 손상을 억제하기 위해 이용되는 표면 처리는 Table 1과 같이 polishing, grit blasting, laser shot peening 등 다양하다. Polishing은 주로 인공 관절의 세라믹 재료 표면에 이용된다. 반면 grit blasting, shot peening은 항공용 엔진 블레이드, 원자력의 연료봉, 지지대에 이용되고 있다.

Table 1 Recent methods to minimize fretting wear damage

Field	Aerospace	Biomedical	Nuclear
Part	blade root	stem/cement, head/cup	rod/grid
Substrate	Ti6-Al-4V	Stainless steel, Ti Alloy	Zircaloy
Coating candidate	thermal spray coating	hydroxyapatite (HA)	TiN
Surface treatment	shot peen, grit blast	polishing	grit blast

**Fig. 6** Fretted surfaces of a thermal spray coating containing Cu, Ni, In, and MoS₂ for aerospace blades: specimen (right) and counterpart (left) [4]

저마찰 고체 코팅 적층은 항공 부품과 원자력 부품에서 발생하는 프레팅 손상을 억제하는 효과적인 방법이다. 블레이드 루트(root)와 원자력 연료봉에서는 유체 윤활제가 사용되기 어렵다. 이런 유체 윤활제 사용이 어려운 경우 고체 윤활제를 주로 사용한다. Fig. 6은 항공용 압축 블레이드에 사용되는 열 용사(thermal spray) 고체 코팅의 프레팅 손상 모습이다[4]. 그림에서 열 용사 고체 코팅은 CuNiIn 층(하부층)과 MoS₂ 층(상층)으로 구성되었다. CuNiIn 기반의 열 용사 코팅의 경우 동적 마찰 계수는 대략 0.3으로 티타늄 합금의 마찰 계수 0.6~0.8보다 낮다[17]. 표면처리의 경우, 프레팅 손상 억제 성능이 일시적인 반면, 저마찰 고체 코팅의 경우 고체 코팅의 저마찰 성능이 완전히 약화될 때까지 지속된다. 저마찰 고체 코팅의 두께는 수십 마이크로에서 수백 마이크로미터로 다양하다. 원자력 연료봉(zircaloy-4)에 프레팅 마모 저항성을 향

상시키기 위해 TiN 코팅을 0.004 mm의 두께로 적층시켜 평가되기도 하였다 [18]. 반면, 금속요소가 포함된 코팅 사용이 어려운 경우, 독성이 적은 코팅이 사용된다. 예로, 인공고관절의 대퇴 삽입물 표면에 Hydroxyapatite(HA) 코팅을 0.02~0.05 mm의 두께로 적층하여 사용하고 있다 [19].

저마찰 고체 코팅의 수명은 마찰 계수 변화 그래프(Fig. 5와 같은)에서 주로 결정된다. 저마찰 고체 코팅의 프레팅 마모 시험은 금속 대 금속(metal-to-metal) 접촉 시 관찰되는 안정화된 동적 마찰 계수 값(Steady friction coefficient)에 도달할 때 중단된다. 시험이 중단된 후 그 시점까지의 프레팅 사이클을 저마찰 코팅의 수명으로 간주하기도 한다[17, 20]. 현재까지 저마찰 고체 코팅의 수명을 이론적으로 예측하지 못하고 있다. 그래서 수십, 수백 가지의 저마찰 코팅을 가지고 프레팅 마모 시험을 수행하여 가장 내구성이 뛰어난 코팅을 선택하는 것이 일반적이다. 저마찰 고체 코팅의 프레팅 손상 억제 성능은 하중, 미끄럼 거리에 따라 다르다. 그래서 단방향 슬라이딩 마찰 시험에서 우수한 트라이볼러지 성능을 지닌 코팅이 프레팅 시험에서도 우수한 성능을 보인다는 보장은 없다.

일반적으로 프레팅을 겪는 부품은 손상을 억제하기 위해 위에 제시된 방법 중 일부 또는 다수가 사용된다. 그럼에도 불구하고 프레팅을 겪는 항공 부품의 경우, 프레팅 손상이 시간에 따라 점점 심해지기 때문에 항공용 엔진 정비 시 그 손상 정도를 시각적으로 확인하고 주기적으로 블레이드를 교체한다. 또한 바이오, 원자력 부품도 주기적인 교체를 통해 프레팅에 의한 부품의 손상 및 파손을 억제하고 있다.

3. 결론

본 논문에서는 항공, 원자력, 바이오 분야에서의 프레팅 마모 손상 현상을 비교 연구하였다. 각 분야에서 대표적인 프레팅 손상을 소개하고 프레팅 조건을 비교하였다. 항공용 압축 블레이드 루트의 경우 프레팅 조건 중 접촉 압력이 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있었다. 반면 바이오 부품(인공 고관절)의 경우 프레팅 조건이 항공이나 원자력 분야에 비해 가혹하지 않았다.

본 논문에서는 프레팅 손상을 억제하는 기존 방법들이 소개되고 그 한계가 기술되었다. 크게 접촉 형상 설계, 표면 처리, 저마찰 고체 코팅의 사용 등이 프레팅 손상 억제 방법으로 제시되었다. 또한 각 분야마다 손상 억제 방법이 다른 점을 확인하였다. 이는 추후 다른 분야에서 프레팅 손상이 발생할 경우 이를 억제하는 유용한 해결책으로 고려될 수 있다.

본 논문에서는 항공 부품, 바이오 부품, 원자력 부품에서 발생하는 프레팅 손상을 조사하였다. 향후 자동차 부품이나 일반 기계 부품에서 발생하는 프레팅 마모 손상이 연구될 것이다.

후 기

이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1C1B1008483).

References

- [1] D. Hills and D. Nowell, *Mechanics of fretting fatigue*, 1st ed., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994.
- [2] K. Kim and A. M. Korsunsky, "Exponential evolution law of fretting wear damage in low friction coatings for aerospace components," *Surface and Coatings Technology*, vol. 202, pp. 5838-5846, 2008.
- [3] K. Kim, J. Geringer, J. Pellier and D. D. Macdonald, "Fretting corrosion damage of total hip prosthesis: Friction coefficient and damage rate constant approach," *Tribology International*, vol. 60, pp. 10-18, 2013.
- [4] K. Kim, *The investigation of fretting wear and fretting fatigue of coated systems*, D.Phil. thesis, Oxford University, 2005.
- [5] K. T. Kim, "A study on the grid-to-rod fretting wear-induced fuel failure observed in the 16×16KOF fuel," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, pp. 756-762, 2010.
- [6] J. Pellier, J. Geringer and B. Forest, "Fretting-corrosion between 316L SS and PMMA: influence of ionic strength, protein and electrochemical conditions on material wear. Application to orthopedic implants," *Wear*, vol. 271, no. 9-10, pp. 1563-1571, 2011.
- [7] U. Bryggman and S. Soderberg, "Contact conditions and surface degradation mechanisms in low amplitude fretting," *Wear*, vol. 125, pp. 39-52, 1988.
- [8] S. Fouvry, P. Kapsa and L. Vincent, "Analysis of sliding behaviour for fretting loadings: determination of transition criteria," *Wear*, vol. 185, pp. 35-46, 1995.
- [9] H. J. Kim, S. N. Kim, S. H. Kim and D. M. Kim, "Characteristics of rubber friction and wear," *Journal of Aerospace System Engineering*, vol. 4, no. 4, pp.1-10, 2010.
- [10] J. Kim, J. Yoon, J. Lee and H. Oh, "Performance Analysis of Reaction Wheel according to Bearing Preload and Oil Quantity," *Journal of Aerospace system engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 35-42, 2016.
- [11] H.J. Kwon and K. Kim, "Development of a testing machine for fretting damage of aerospace components," *Journal of The Korean Society for Aviation and Aeronautics*, vol. 23, no. 1, pp. 62-66, 2015.
- [12] K. Kim and A. M. Korsunsky, "Dissipated energy and fretting damage in CoCrAlY-MoS₂ coatings," *Tribology International*, vol. 43, pp. 676-684, 2010.
- [13] S. Fouvry, P. Kapsa and L. Vincent, "Quantification of fretting damage," *Wear*, vol. 200, pp. 186-205, 1996.
- [14] M. Varenberg, I. Etsion and G. Halperin, "Slip index: a new unified approach to fretting," *Tribology Letters*, vol. 17, pp. 569-573, 2004.
- [15] K. L. Johnson, K. Kendall, A. D. Roberts, "Surface energy and the contact of elastic solids," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, vol. 324, pp. 301-313, 1971.
- [16] B. V. Derjaguin, V. M. Muller, YU. P. Toporov,

"Effect of contact deformations on the adhesion of particles," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 53, pp. 314-326, 1975.

- [17] A. M. Korsunsky, A.R. Torosyan and K. Kim, "Development and characterization of low friction coatings for protection against fretting wear in aerospace components," *Thin Solid Films*, vol. 516, pp. 5690-5699, 2008.
- [18] J. H. Sung, T. H. Kim, S. S. Kim, "Fretting damage of TiN coated zircaloy-4 tube," *Wear* 250, pp. 658-664, 2001.
- [19] W. L. Jaffe, D. F. Scott, "Current concepts review- Total hip arthroplasty with hydroxyapatite-coated prostheses," *The Journal of Bone and Joint Surgery*, vol. 78, pp. 1918-1934, 1996.
- [20] K. Kim and A. M. Korsunsky, "Fretting damage of Ni-MoS₂ coatings: friction coefficient and accumulated dissipated energy evolutions," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, vol. 224, pp. 1173-1180, 2010.