

# 압전 구동기를 이용한 인코넬 690 튜브의 프레팅 마멸시험

## Fretting Wear Test of Inconel 690 Tubes Employing Piezoelectric Actuator

✉정일섭<sup>1</sup>, 이명호<sup>1</sup>, 박기홍<sup>1</sup>, 이정훈<sup>1</sup>, 권재도<sup>1</sup>  
✉Ilsep Chung<sup>1</sup>, Myungho Lee<sup>1</sup>, Kihong Park<sup>1</sup>, Junghoon Lee<sup>1</sup> and Jaedo Kwon<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 영남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.)

✉ Corresponding author: ilchung@yu.ac.kr, Tel: 053-810-3525

Manuscript received: 2008.2.27 / Revised: 2008.10.26 / Accepted: 2008.11.20

*A fretting wear test rig for dry ambient condition, which employs a piezoelectric actuator, has been developed. It is driven and loaded in a very simple manner with acceptable experimental accuracy. By using the rig, Inconel 690 tube has been tested under the normal load of 10 and 15N with sliding amplitude of less than 100 $\mu$ m during 10<sup>6</sup> cycles. The wear resistance of the material has been characterized in terms of the wear coefficient based on the work rate model. SEM micrographs show the complex structures of the scars, which consist of risen peaks, plate-type thin layers and locally exposed bare surfaces. The cracks spread over the layers give clue to the fretting wear mechanism of the material.*

Key Words: Fretting Wear (프레팅마멸), Piezoelectric Actuator (압전구동기), Inconel 690 (인코넬 690)

### 1. 서론

프레팅 마멸이란 접촉된 두 개의 고체 표면 사이의 미세한 상대 왕복 운동에 따른 재료의 마멸을 의미하며, 주로 진동에 노출되는 기계적 체결 부위나 전기 접점 등에서 많이 발생하는 마멸의 한 형태로서, 재료의 손실량이 크지 않음에도 불구하고 피로 파괴를 가속시키거나 성능을 저하시키는 요인이 된다.<sup>1</sup>

일반적인 왕복동 마멸과 달리, 프레팅 마멸에서는 접촉면의 일부에서 상대 운동이 일어나지 않거나 혹은 일어나더라도 작은 운동 진폭으로 인하여 마멸 입자의 배출이 지연된다. 따라서 일반 마멸에 비하여 복잡한 접촉 상태를 유지하며 마멸흔(wear scar)도 복잡한 구조를 가진다. 프레팅 마멸이 발생하기 위한 운동 진폭은 접촉면에 가해지는 수직 하중의 크기에 의존하는데, 하중이 클수록 압착(stick) 부위가 증가하므로 큰 진폭에서도 프레팅

마멸이 발생할 수 있다.

프레팅 마멸 시험 방법은 기존의 마멸 시험과 크게 다르지 않으며, 다만 주어진 환경 조건에서 미세한 운동 진폭의 정확한 구현 여부가 그 관건이라 할 수 있다. ASTM 에는 일반적인 프레팅 마멸 시험법은 규정되어 있지 않으며, ASTM D4170 (Standard Test Method for Fretting Wear Protection by Lubricating Greases)과 같이 특정 목적에 따른 몇 가지의 시험 규격이 있다. 따라서 연구자들은 관련 요소 기술을 응용하여 다양한 방식의 시험 장치를 개발, 사용하고 있다.

가장 일반적으로 사용되는 프레팅 마멸 시험기의 구동 방식은 전기 모터의 회전 운동을 캠과 같은 편심 운동 기구에 의하여 직선으로 변환하는 것이다. 전통적인 왕복동형 마멸 시험기에서 채택되어온 방법으로서 최근의 Gnanamoorthy<sup>2,3</sup> 등과 Park<sup>4</sup> 등의 연구에도 이용된 바 있다. 일부 시험기에는 유압 시스템을 적용하기도 하는데, 그 예로

Zhou<sup>5,6</sup> 등의 시험 장치를 들 수 있다. 이들은 40 $\mu$ m 이하의 진폭과 10Hz 의 가진 주파수에서 시험을 수행하였다. 가진기(electro-dynamic shaker)를 적용한 예도 있어 Miyoshi<sup>7</sup> 등은 이를 이용하여 80Hz 50 $\mu$ m 이하, Rybiak<sup>8</sup> 등은 5Hz 100 $\mu$ m 의 조건에서 시험을 수행하였다. 본 연구에서는 미세 변위의 정확한 제어가 가능하고 사용이 간편하다는 장점을 가진 압전 구동기를 적용한 프레팅 마멸 시험기의 제작을 시도하였다.

한편 원자력 관련 학계에서는 원자력 발전소의 원자로와 증기 발생기에 설치된 핵연료 봉 혹은 전열용 관 다발과 그들의 지지 구조체 사이의 프레팅 마멸 현상에 주목하여 이에 대한 활발한 연구를 진행하고 있다. 이들 튜브의 과도한 마멸은 곧 방사능의 유출로 이어질 수 있어 매우 중요한 문제라 할 수 있다.

본 논문에서는 먼저 압전 구동기를 적용하여 제작된 프레팅 마멸 시험기를 소개한 뒤, 이를 이용하여 증기 발생기용 인코넬 튜브에 대하여 수행한 프레팅 마멸 시험 과정과 그 결과를 보이고자 한다.

## 2. 프레팅 마멸 시험기

### 2.1 시험기의 구조

일반적으로 미소한 왕복 운동 변위의 구현을 요하는 프레팅 마멸 시험기의 부품은 매우 정밀하게 제작되어야 한다. 구동기로부터 시편까지의 하중 경로를 구성하는 부품의 개수가 많아질수록 가공 오차의 누적과 장기간 시험에 따른 부품 접촉면에서의 마멸로 인하여 시험의 정확성이 저하될 수 있다. 따라서 구동 메커니즘을 최대한 단순화할 필요가 있는데, 이를 용이하게 극복할 수 있는 대안의 하나로 압전 구동기를 생각할 수 있다. 함수 발생기의 전기 신호를 증폭하여 구동기에 입력하면 이에 따른 변위가 발생되며, 이를 직접 시편에 인가해 줌으로써 마멸 시험을 수행할 수 있다. 압전 구동기에서 생성되는 변위의 크기는 입력 전압에 대한 선형성이 우수하며 재현성 또한 탁월한 것으로 알려져, 광학 기기와 같이 정밀 위치 제어를 필요로 하는 응용 분야에 널리 사용되고 있다. 또한 압전 세라믹은 강성이 비교적 커서 미세한 변위에도 불구하고 수천 Newton 의 힘을 발생시킬 수 있다. 압전 구동기의 단점 중 한 가지는 변위의 크기가 제한적이라는 점이나, 현재 상용화된

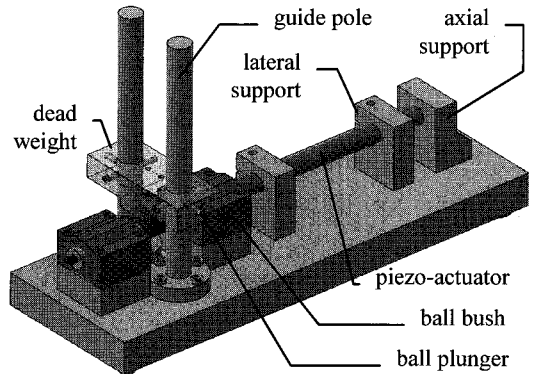


Fig. 1 Schematics of Piezo-actuated fretting wear tester

구동기 중 최대 400 $\mu$ m 의 변위를 생성할 수 있는 종류도 있어 프레팅 마멸 시험 용도로 사용될 수 있다.

적합한 특성에도 불구하고 압전 구동기의 프레팅 마멸 시험에의 적용 사례는 그리 많지 않다. Iwabuchi<sup>9</sup> 등은 한쪽 끝이 고정된 “C” 자형 프레팅 임의 한 점을 압전 구동기로 밀고 그 탄성에 의해 원래 위치로 복귀하는 방식으로 미세한 왕복 운동을 생성시켰다. 그 구조상 시편 운동의 직선성과 일정한 수직 하중을 유지하는데 어려움이 있을 것으로 보인다. Marui<sup>10</sup> 등은 수직 방향으로 배치된 구동기 끝에 운동 시편을 장착하고 그 양측에 각각 한 개씩의 고정 시편을 접촉시키되 줄로 늘어뜨린 무게 추가 고정 시편을 잡아 당겨 시편 사이의 수직 하중을 인가하도록 하였다. 양측 고정 시편이 가하는 하중이 정확히 일치하지 않는 경우 구동기에 굽힘 모멘트와 전단력이 인가되어 압전 세라믹의 파손 우려가 있을 것으로 보인다.

Fig. 1 은 본 연구를 통해 개발한 압전 구동 프레팅 마멸 시험기의 개략도이다. 여기에 사용된 구동기는 PiezoMechanik 사의 PSt VS18 로 입력 전압의 범위, 강성, 최대 변위는 각각 1000V, 10N/ $\mu$ m, 200 $\mu$ m 로서 발생 최대 하중은 5000N 이다. 고전압 PZT 세라믹이 하우징으로 보호되어 있으며, 예압력이 인가되어 인장과 압축의 양 방향 하중을 생성할 수 있다. 장시간 연속 사용으로 발생하는 열을 쉽게 발산시키도록 하우징으로 구리 합금을 적용한 모델을 채택하였다.

그림에 보인 바와 같이 구동기의 축 방향 및 측면 방향 움직임은 끝단의 축 방향 지지대(axial support)와 중간에 위치한 2 개의 측면 방향 지지대(lateral support)로 고정된다. 구동기의 선단(tip)은

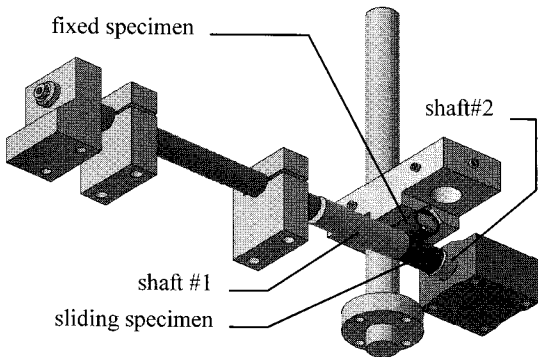


Fig. 2 Specimen installation for tube-to-tube test

Fig. 2 에 보인 축 #1 에 나사로 체결된다. 직교 접촉하는 튜브의 시험을 수행하도록 제작한 본 시험기에서 축#1-미끄럼 시편-축#2 는 직렬로 연결되어 하나의 조합 축을 이루며, 구동기의 생성 변위에 따라 왕복 운동한다. 이 조합 축은 시편의 양쪽에서 볼 부쉬(ball bush)로 지지되어 축 방향을 제외한 나머지 운동 자유도는 모두 구속된다. 볼 부쉬는 미끄럼 시편에 가해지는 수직 하중에 따른 전단력과 굽힘 모멘트로부터 구동기의 압전 세라믹을 보호한다. 축#2 의 중앙에는 축 방향으로 태핑 구멍을 관통시켜 여기에 체결되는 볼트의 끝단이 튜브 시편의 내경을 통과하여 축#1 에 체결되도록 하였다. 축#1 과 #2 의 시편과의 접촉부는 경사면으로 가공(chamfering)하고, 튜브 시편의 내경 측 모서리가 이 경사면에 얹힘으로써 자동 조심(self aligning)되도록 하였다.

시편 사이의 수직 하중은 안내 막대(guide pole)를 통해 삽입된 무게 추의 자중으로 인가하였다. 정밀 가공과 표면 열처리에도 불구하고 막대와 추의 구멍 사이에서 발생할 수 있는 상대 운동과 이에 따른 마멸을 막기 위해 추의 측면에 6 개의 볼 플런저(ball plunger)를 설치하였다. 추의 하단에는 고정 시편이 장착되는데, 튜브 시편 내면에 반달형 단면 형상의 삽입물을 넣고 이를 추의 윗면으로부터 시편에 가공된 구멍을 통과하는 볼트로 조임으로써 고정된다. Fig. 1 에 보인 무게 추 위에 추가로 추를 얹고 클램핑하여 보다 큰 수직 하중을 인가할 수 있다.

**2.2 시험기의 평가**

운동 시험편의 변위는 Keyence 사의 LK-G30 레이저 변위계를 사용하여 측정하였다. 이 때 레

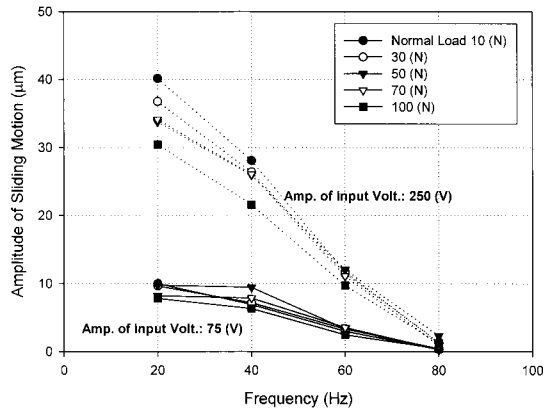


Fig. 3 Sliding motion amplitude subject to the variation of input voltage, frequency and dead weight

이저 광선이 조사되는 위치는 축#2 의 자유단 측, Fig. 1 에서 볼 부쉬를 통과하여 노출된 조합 축 좌단의 수직면으로 하였다.

이론적으로는 압전 구동기를 사용하여 수 kHz의 고주파 시험도 가능하지만, 운동부의 관성력 및 마찰력, 인가 전압의 주파수에 따라 구현 가능한 변위의 크기는 제한된다. Fig. 3 은 인가 전압의 크기와 주파수 및 추의 질량을 변화시키며 발생된 왕복 운동의 진폭을 보인다. 사용 구동기의 최대 인가 전압이 1000V 이므로 수직 하중을 100N 이내로, 주파수를 20Hz 이하로 한다면 프레팅 마멸 시험을 수행하는데 무리가 없음을 알 수 있다.

운동 시편과 고정 시편 사이의 접촉 위치는 장시간 시험을 지속하더라도 왕복 운동 진폭 범위내에서 일정해야 한다. 이를 확인하기 위하여 수직 하중 10N, 주파수 10Hz, 초기 진폭 34.8μm 의 조

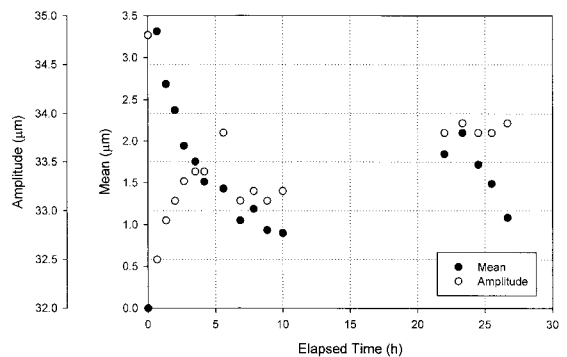


Fig. 4 Variation of sliding motion under 10N/10Hz during 10<sup>6</sup>cycles

건에서 10<sup>6</sup> 사이클 동안 시험을 진행하며 측정된 운동 시편의 위치는 Fig. 4 와 같다. 이는 최소 40 분, 최대 720 분 간격으로 각 1 초 동안 측정하여 얻어진 10 개의 사인 곡선을 분석한 결과인데, 시험 시작 초기 대비 이들 사인 곡선의 평균값의 변화는 최대 3.3 $\mu$ m, 진폭의 변화는 최대 2.3 $\mu$ m 이었다. 표면의 마멸 손상이 심해짐에 따라 왕복 운동에 대한 저항력이 커지고 따라서 진폭에 변화가 발생할 수 있으며, Fig. 4 의 결과는 이를 반영하고 있다. 압전 세라믹의 변형율을 측정하여 인가 전압에 따라 일정한 변위 진폭을 생성하도록 하는 피드백 제어 구동기를 사용하면 정확성을 유지할 수 있으나 비용 문제로 인하여 본 연구에서는 이를 사용하지 못하였다.

무게 추의 사용은 별도의 하중 장치를 필요로 하지 않으므로 매우 간편하지만 마멸이 진행됨에 따라 무게 추의 운동이 발생될 우려가 있다. 상하 방향으로의 운동은 그 가속도에 의한 수직 하중의 변동을 가져올 수 있으며, 전후/좌우 방향의 운동은 접촉 위치의 변화를 가져올 수 있으므로 모두 바람직하지 않다. 그러나 위의 10<sup>6</sup> 사이클 시험을 진행한 후 상하, 전후, 좌우 방향의 추의 움직임을 3 분간 측정된 결과 각각의 최대 위치 변화는 0.6, 0.7, 0.1 $\mu$ m 에 불과하여 그 영향은 크지 않을 것으로 판단된다. 이 가운데 마멸에 따른 요철 생성에도 불구하고 추의 상하 방향 운동이 미미한 이유는 마멸 자국의 크기에 비하여 프레팅 마멸 시험의 미끄럼 진폭이 매우 작기 때문일 것이다.

개발된 마멸 시험기는 현재로서는 마찰력을 측정하지 못하며, 고온 혹은 수중 환경 시험이 불가능하다는 단점이 있다. 그러나, 상온 건마찰 프레팅 마멸 시험은 비교적 정확한 변위 진폭으로 수행할 수 있으며, 또한 이들 단점을 보완하기 위한 연구가 진행 중이다.

**3. 시험 결과의 분석**

시험이 완료된 시편에는 Fig. 5(a)와 같이 마멸 분(debri)이 마멸흔과 그 주변에 분포되어 있다. 이를 나일론 솔과 압축 공기로 털어낸 후 초음파 세척하여 제거하였다. 먼저 광학 현미경으로 마멸 부위를 촬영하고, 이미지 분석 S/W 를 사용하여 마멸흔의 크기를 측정하였다. 마멸량이 미미한 경우를 제외한 대부분의 마멸흔은 Fig. 5(b)와 같이 원형에 가까우며, 따라서 운동 방향과 그 수직 방향

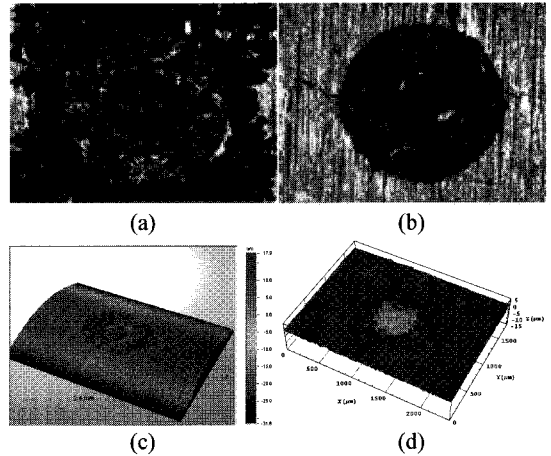


Fig. 5 Post-test analysis procedure: (a) optical micrograph with debris spread, (b) micrograph after debris removed, (c) 3D profile measurement, (d) flattened 3D profile

의 지름으로 크기를 정량화 하였다.

마멸량은 정밀 저울을 이용하여 시험 전후의 시편 질량의 변화로 측정하기도 하지만 본 연구에서는 마멸 부피를 그 파라미터로 삼았다. 이를 위하여 먼저 Wyko NT8000 3D profiler 로 마멸흔을 포함한 표면의 3 차원 형상을 측정하였으며, Fig. 5(c) 는 한 예를 보인다. 본 연구에서 시험한 튜브 시편과 같이 초기 표면이 곡면인 경우의 마멸 부피를 구하기 위하여는 3 차원 형상 데이터로부터 초기 곡면 성분을 제거하여야 한다. 이를 위해 작성된 매스매티카 프로그램을 이용하여 Fig. 5(d)와 같이 튜브의 원통형 표면 성분을 제외한 평면화 데이터를 구한 뒤, 마멸 부위의 상하 방향 좌표값을 면적 적분하여 마멸량을 계산하였다. 이 프로그램에서는 마멸흔이 아닌 초기 흠집을 인지하여 그 위치를 입력하면 평면화 및 마멸량 계산 과정에서 이를 제외시키도록 하여 마멸량 측정의 정확도 향상을 꾀하였다.

**4. 인코넬 690 튜브의 프레팅 마멸 시험**

**4.1 시편 및 시험 조건**

인코넬 690 은 니켈, 크롬, 철 이 약 6:3:1 의 비율로 혼합된 초합금(superalloy)의 한 종류로서, 산성 분위기나 고온 수중에서의 내부식성이 매우 우수한 것으로 알려져 있어, 원자력 발전소 증기 발생기의 열교환용 튜브 등으로 사용되고 있다. 인

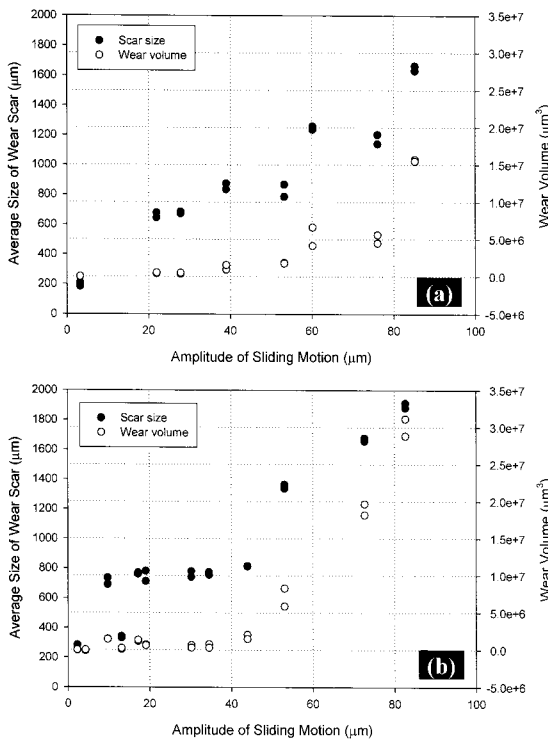


Fig. 6 Size of wear scar and wear volume for 10Hz/10<sup>6</sup> cycle tests with normal load of (a) 10N, (b) 15N

장 강도, 항복 강도, 탄성 계수 및 연신률은 각각 700 (MPa), 380(MPa), 211(GPa), 46% 정도로서 금속학적 안정성과 더불어 기계적 강도 및 가공성도 우수한 재료이다.

본 연구에서는 원자력 발전소에 사용되는 인코넬 690 튜브를 25mm 길이로 절단하여 Fig. 2 에 보인 것과 같이 두 개의 튜브 시편을 직교 접촉시킨 상태에서 마멸 시험을 수행하였다. 사용된 튜브의 외경은 19.05mm 이며 튜브 벽의 두께는 1mm 이다. 튜브 표면의 거칠기는 Ra 0.28μm, Rz 2.74μm, Rmax 4.33μm 이며, 여기에 추가적인 표면 처리는 하지 않았다. 미끄럼 운동의 주파수를 10Hz 로 고정하고 운동 진폭을 변화시키며 10<sup>6</sup> 사이클 동안 프레팅 마멸 시험을 수행하였으며, 수직 하중은 10N 과 15N 으로 하였다.

### 4.2 마멸흔 및 마멸량

시편의 마멸흔을 광학 현미경으로 촬영한 뒤 미끄럼 방향과 그 수직방향으로 측정된 지름의 평균값을 Fig. 6 에 보였다. 동일 진폭 값에 표시된

두 개의 기호는 각각 운동 시편과 고정 시편의 값을 나타낸다. 10N 의 3.1μm 진폭 시편이나 15N 의 2.2μm 진폭 시편의 경우와 같이 진폭이 미세한 경우에는 자국의 모양이 원형이라 할 수 없으나, 그림에 표시된 600μm 이상의 마멸 자국은 Fig. 5(b) 와 유사하게 원형에 매우 가깝게 나타났다. 앞 3 절에서 설명한 방법으로 측정 및 계산된 마멸 부피를 Fig. 6 에 함께 표시하였다.

마멸흔의 크기와 마멸 부피의 변화를 볼 때, 미끄럼 진폭을 3 개의 영역으로 구분할 수 있다. 먼저 마멸 자국의 크기가 작으며 마멸 부피 또한 미미한 경우이다. 그림에서 10μm 이내의 진폭이 여기에 해당한다. 이 영역에서는 마멸 자국이 원형이 아니며 마멸 깊이도 극히 얇다. 이어서 이에 비해 마멸 자국의 크기는 증가하고 모양이 원형에 가깝지만 마멸 부피는 여전히 미미한 영역을 볼 수 있다. 그림의 10~40μm 범위에 해당하는 영역으로서, 여기서는 진폭이 증가하여도 자국의 크기나 마멸 부피는 그리 증가하지 않는다. 마지막으로 진폭이 40μm 이상이 되면 마멸 자국의 크기와 마멸 부피가 모두 빠르게 증가함을 볼 수 있다. 프레팅의 전형적인 특징이라 할 수 있는 고리형 (annulus) 마멸흔은 관찰되지 않았지만, 저자들은 이것이 프레팅 마멸의 영역(regime)에 밀접한 관계가 있을 것으로 본다. 한편, 고리형 마멸흔의 생성이 없이 마멸흔 크기나 마멸 부피의 증가만으로 영역간 경계를 찾아낸 예는 Hager Jr.<sup>11</sup> 와 Jeong<sup>12</sup>

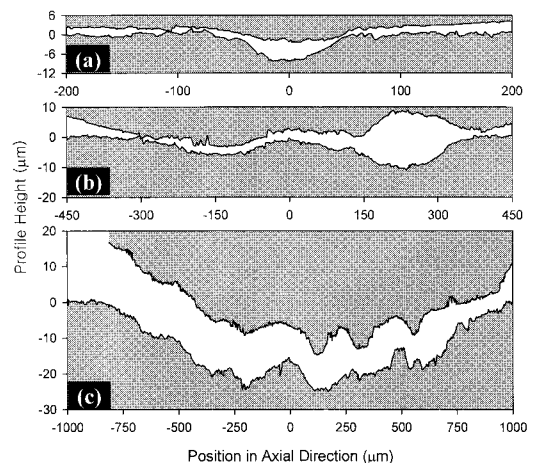


Fig. 7 Profile of mating specimens at wear scars for 15N tests with sliding amplitude of (a) 2.2, (b) 17.2 and (c) 82.7μm

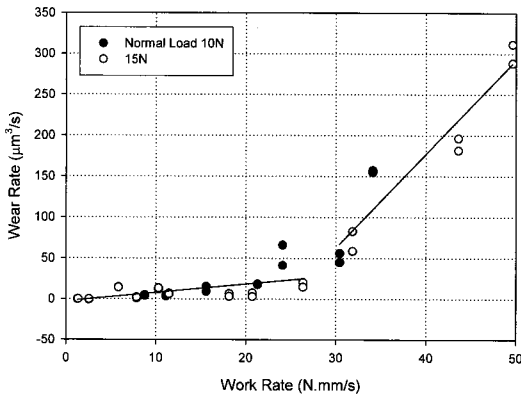


Fig. 8 Evaluation of wear coefficient according to the work rate model

등의 연구에서 찾아볼 수 있다.

시험기의 좌우 대칭면에서의 시편들의 표면 윤곽을 Fig. 7 에 도시하였다. 여기서 그래프의 수평 방향은 미끄럼 운동 방향과 일치한다. 그림의 아래 쪽 영역이 운동 시편에 해당되며, 위쪽의 고정 시편면의 경우 튜브 시편의 외부 곡면을 제거하지 않았으므로 그 윤곽은 원통형 표면에 발생된 마멸 자국 그대로를 보이고 있다. 마멸 자국의 크기에 비해 미세한 크기의 상대 운동 진폭이 인가되므로 프레팅 마멸의 특징이라 할 수 있는 불균일한 마멸면이 형성되어 있음을 볼 수 있다. 그러나 고리형 마멸흔에 해당하는 단면이 명확히 보이지는 않는다. 다만 진폭 17.2µm 의 운동 시편의 경우 축방향 -150 및 200µm 부근에 비해 그 중간 부분의 높이가 상대적으로 높아 그와 유사한 경향을 보인다. 한편 이 경우의 고정 시편은 200µm 부근에 많은 양의 재료 손실이 관찰되는데, 운동 시편의 윤곽과 비교해 볼 때 이는 점진적인 마멸의 진행에 의한 것으로 보이지 않는다. 진폭 82.7µm 의 경우 상당히 넓고 깊은 마멸이 진행되었으나, 여전히 접촉면 내에 다수의 돌출부가 양측에 모두 존재하며 이들이 서로 맞물려 매우 복잡한 형태의 접촉 상태였음을 짐작하게 한다.

측정된 마멸 부피를 시험 소요 시간으로 나누어 구한 마멸율(wear rate)을 수직 하중과 평균 미끄럼 속도의 곱으로 구한 일률(work rate)에 대하여 도시한 결과는 Fig. 8 과 같다. 흔히 사용되는 work rate 모델에 따르면 이들의 관계가 선형적이어서 그 기울기를 마멸 상수(wear coefficient)로 정의하게 된다. 그러나 본 시험의 결과에 의하면 일률의 크

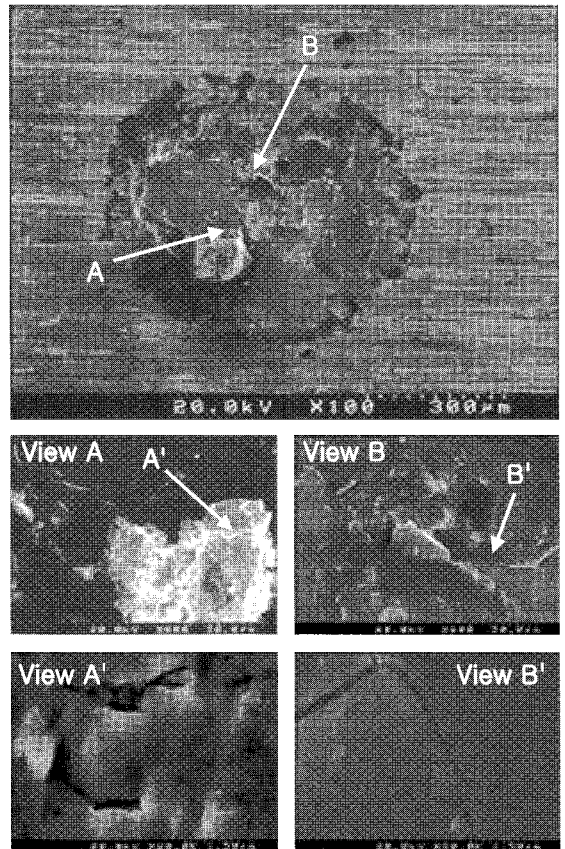


Fig. 9 SEM micrograph for the wear scar of 15N specimen with 9.7µm of sliding amplitude

기가 적은 경우 마멸 증가율은 상대적으로 매우 낮으며, 일정 수준 이상의 일률에서 크게 증가하기 시작함을 알 수 있다. 이는 Kim<sup>13</sup> 등이 동일한 재료에 대하여 프레팅 마멸 영역별로 각기 상이한 마멸 상수를 보고한 것과 유사한 결과라 보여진다. 여기서는 마멸율이 급격히 증가하기 시작하는 일률 30mW 를 기준으로 두 개의 영역을 구분하여 마멸 상수를 구하였는데, 그 값은 각각  $1.04 \times 10^{-15}$  과  $1.15 \times 10^{-14} (\text{Pa}^{-1})$ 이다.

### 4.3 마멸흔 및 마멸량

전자 현미경을 사용하여 마멸흔을 관찰하였으며, Fig. 9 는 수직 하중 15N, 미끄럼 진폭 9.7µm 시편을 보인다. 전체적으로 원 모양의 마멸흔을 형성하고 있으나 그 내부 구조는 상당히 복잡하다. 표면이 매끄럽게 나타난 넓은 마멸면 주위에는 얇은 두께의 판상 층(layer)들이 형성되어 있으며, 특

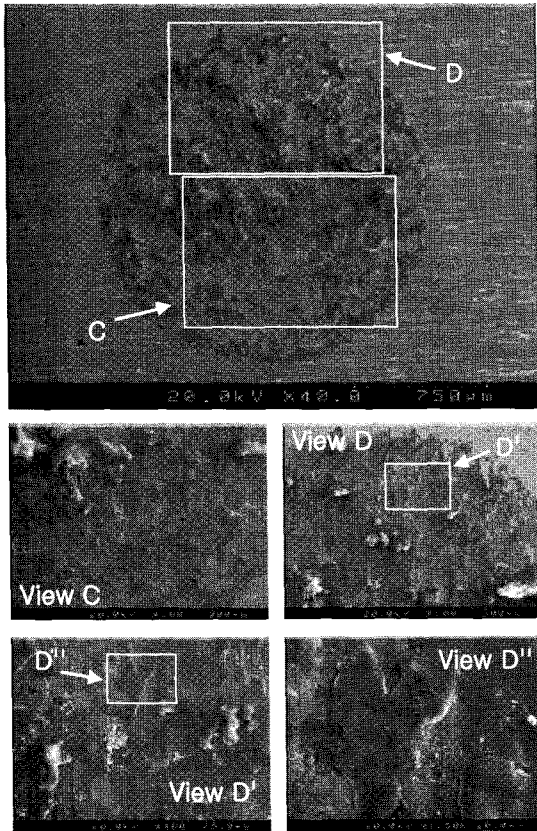


Fig. 10 SEM micrograph for wear scar of 15N specimen with 82.7µm of sliding amplitude

히 사진의 좌측 중앙부에는 이러한 층이 여러 겹으로 적층되어 있음을 볼 수 있다. 이 층들이 돌출부나 마멸분이 심한 소성 변형을 겪은 것인지 혹은 TTS(tribologically transformed structure)<sup>14</sup>의 일부인지는 본 연구로서는 알 수 없다. 사진에 표시된 A 영역과 같이 주변에 비해 용기된 돌출부도 관찰된다. 이 부분의 600 배 확대 사진에는 몇 개의 판상 층 위에 솟아 있는 돌출부의 거친 표면과 균열이 나타나 있다. 영역 A'의 20000 배 확대 사진에는 불규칙한 모양의 재료 경계면과 틈새가 보여, 이것이 불균일 마멸 과정에서 잔류된 모재의 일부가 아니라 압착(compact)된 마모분일 것이라는 추측을 낳는다. 영역 B의 확대 사진에서는 박리가 임박한 것처럼 보이는 여러 개의 판상 층(layer)이 보인다. 이를 20000 배 확대한 사진 B'에는 하나의 판상 층 내에 성장된 표면 균열이 선명하게 나타나 있다.

앞의 경우에 비해 마멸 자국이 훨씬 크고 깊은

진폭 82.7µm 인 시편의 사진을 Fig. 10 에 보였다. 전체적으로는 마멸면이 비교적 균일해 보이지만, 영역 C와 D의 100 배 사진을 보면 여전히 다수의 불규칙한 모양의 돌출부가 산재해 있다. 특히 영역 D에서 비교적 편평해 보이는 영역 D'을 다시 확대해 보면 여기에도 돌출부가 여러 개의 얇고 매끄러운 판상 층들과 함께 형성되어 있음을 알 수 있다. 여기서 영역 D''을 1500 배로 확대한 사진에서는 판상 층 내의 많은 균열을 볼 수 있다.

이상의 결과에 따르면 인코넬 690 튜브의 마멸면은 돌출부, 판상 층, 노출된 모재 표면 등으로 구분할 수 있다. 각각에서 발생하는 마멸 메커니즘은 판상 층의 형성과 균열 발생에 이은 박리 및 그에 따른 모재면의 노출 과정이 반복되며, 그 과정에서 잔류 마멸분의 압착과 소성 변형 등이 중요한 역할을 하고 있을 것이라 사료된다.

### 5. 요약

압전 구동기를 사용하여 상온 대기 중에서 프레팅 마멸 시험을 수행하기 위한 장치를 개발하였다. 구동기의 특성상 사용이 간편하며, 중력에 의한 가하중 방식을 채택하여 구조를 매우 단순화하였다. 개발된 시험기는 구동 시스템 자체의 마멸로 인한 미끄럼 운동 범위의 오차를 우려할 필요가 없다는 상대적 장점을 가진다. 본 연구에서 사용한 시험편의 경우 약 600µm 이상 직경의 마멸흔이 생성되는 조건에서의 미끄럼 운동 범위의 평균값 및 진폭의 변동은 각각 3.3µm 과 2.3µm 이내인 것으로 측정되었으며, 마멸흔의 크기에 비추어 볼 때 이는 만족할 만한 운동 정밀도라 판단된다.

제작된 시험기를 사용하여 인코넬 690 튜브의 프레팅 마멸 시험을 수행하였다. 수직 하중 10N 및 15N 에서 10<sup>6</sup> 사이클 동안 미끄럼 진폭을 최대 82.7µm 까지 변화시킨 시험 결과를 정량화하였으며, 이로부터 마멸 상수를 구하였다. 또한 마멸 자국의 크기와 마멸 부피로부터 마멸 진행 거동이 상이한 세 영역을 구별할 수 있었다.

전자현미경 관찰을 통해 마멸흔을 살펴보았으며, 돌출부, 판상 층, 거친 모재 표면 등과 여기에 생성된 균열 등이 관찰되었다. 이를 통해 인코넬 690 튜브의 프레팅 마멸은 연삭 마멸과 더불어 입자의 분리 및 압착, 소성 변형과 판상 층의 형성, 균열의 생성 및 박리 등의 복합적 과정으로 진행됨을 알 수 있었다.

## 후 기

이 논문은 2006 학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원에 의한 것임.

## 참고문헌

1. Kwak, D. H., Roh, H. R., Kim, J. K. and Cho, S. B., "A Study on Fretting Fatigue Life Prediction for Cr-Mo Steel(SCM420)," J. of KSPE, Vol. 24, No. 4, pp. 123-130, 2007.
2. Ramesh, R. and Gnanamoorthy, R., "Effect of Hardness on Fretting Wear Behaviour of Structural Steel, En 24, against Bearing Steel, En 31," Materials & Design, Vol. 28, No. 5, pp. 1447-1452, 2007.
3. Vadiraj, A., Kamaraj, M. and Gnanamoorthy, R., "Fretting Wear Studies on Uncoated, Plasma Nitrided and Laser Nitrided Biomedical Titanium Alloys," Materials Science & Engineering: A, Vol. 445-446, pp. 446-453, 2007.
4. Park, Y. W., Ramesh Babu, G. N. K. and Lee, K. Y., "Studies of Tin Coated Brass Contacts in Fretting Conditions under Different Normal Loads and Frequencies," Surface & Coatings Technology, Vol. 201, Issue 18, pp. 7939-7951, 2007.
5. Xu, J., Zhou, Z. R., Zhang, C. H., Zhu, M. H. and Luo, J. B., "An Investigation of Fretting Wear Behaviors of Bonded Solid Lubricant Coatings," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 182, Issues 1-3, pp. 146-151, 2007.
6. Zhu, M. H., Cai, Z. B., Lin, X. Z., Ren, P. D., Tan, J. and Zhou, Z. R., "Fretting Wear Behaviour of Ceramic Coating Prepared by Micro-Arc Oxidation on Al-Si Alloy," Wear, Vol. 263, Issues 1-6, pp. 472-480, 2007.
7. Miyoshi, K., Sanders, J. H., Hager Jr., C. H., Zabinski, J. S., Vander Wal, R. L., Andrews, R., Street Jr., K. W., Lerch, B. A. and Abel, P. B., "Wear Behavior of Low-cost, Lightweight TiC/Ti-6Al-4V Composite under Fretting: Effectiveness of Solid-Film Lubricant Counterparts," Tribology International, Vol. 41, Issue 1, pp. 24-33, 2008.
8. Rybiak, R., Fouvry, S., Liskiewicz, T. and Wendler, B., "Fretting Wear of a TiN PVD Coating under Variable Relative Humidity Conditions - Development of a 'Composite' Wear Law," Surface & Coatings Technology, Vol. 202, Issue 9, pp. 1753-1763, 2008.
9. Iwabuchi, A., Lee, J. W. and Uchida, M., "Synergistic Effect of Fretting Wear and Sliding Wear of Co-Alloy and Ti-Alloy in Hank's Solution," Wear, Vol. 263, Issues 1-6, pp. 492-500, 2007.
10. Marui, E., Endo, H., Hasegawa, N. and Mizuno, H., "Prototype Fretting Wear Testing Machine and Some Experimental Results," Wear, Vol. 214, Issue 2, pp. 221-230, 1998.
11. Hager Jr., C. H., Sanders, J. H. and Sharma, S., "Characterization of Mixed and Gross Slip Fretting Wear Regimes in Ti6Al4V Interfaces at Room Temperature," Wear, Vol. 257, Issues 1-2, pp. 167-180, 2004.
12. Jeong, S. H., Park, C. Y. and Lee, Y. Z., "Investigation of Wear Mechanisms of Tube Materials for Nuclear Steam Generators due to Stick-Slip Behavior under Fretting Conditions," J. of the KSTLE, Vol. 21, No. 1, pp. 33-38, 2005.
13. Kim, D. G. and Lee, Y. Z., "Experimental Investigation on Sliding and Fretting Wear of Steam Generator Tube Materials," Wear, Vol. 250, Issue 1, pp. 673-680, 2001.
14. Sauger, E., Fourvry, S., Ponsonnet, L., Kapsa, Ph., Martin, J. M. and Vincent, L., "Tribologically Transformed Structure in Fretting," Wear, Vol. 245, Issues 1-2, pp. 39-52, 2000.