

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-A.2009.33.4.329

인코넬 690 튜브의 상온 프레팅 마멸 특성에 대한 연구

정일섭[†] · 이명호* · 채영석**

(2009년 1월 8일 접수, 2009년 2월 14일 수정, 2009년 3월 5일 심사완료)

Fretting Wear Characteristics of Inconel 690 Tubes in Room Temperature

Ilsup Chung, Myungho Lee and Youngsuck Chai

Key Words : Inconel 690(인코넬 690), Fretting Wear(프레팅 마멸), Piezoelectric Actuator(압전 구동기), Room Temperature(상온)

Abstract

A fretting wear test rig for cross contacting tube specimens, which employs a piezoelectric actuator, has been developed. Along with the simple loading scheme using dead weights, the rig is very simple to be used also. The accuracy was found acceptable. Inconel 690 tubes were tested in room temperature and ambient condition. Normal load and sliding amplitude range up to 35N and 100 μ m, respectively. The sizes of wear scar and the wear volumes were measured, and wear coefficients have been calculated based on those. A study on the fretting wear mechanism of the tubes has been attempted via microscopic observation. Rugged wear surfaces are induced by the separation and adhesion of particles and formation and subsequent fracture of surface layers. Lapped specimens were also tested and abrasive wear seems to be playing a dominant role.

1. 서론

원자력 발전소의 증기 발생기에는 다수의 튜브 다발이 설치되어 있다. 원자로에서의 가열된 냉각수는 증기 발생기로 보내져 튜브의 내부를 통과한 뒤 다시 원자로로 공급된다. 한편, 튜브 다발의 외부에는 1차 측의 냉각수와는 철저히 격리된 또 다른 루프의 냉각수가 순환하며 관의 벽을 사이에 두고 열을 전달받는다. 이렇게 가열된 2차 측 냉각수는 증기화하여 터빈으로 보내진다. 이 과정에서 유동으로 인한 진동은 튜브 다발을 지지하는 구조체(egg crate)와 튜브 사이에 미세한 상대 운동을 일으키며, 냉각수의 높은 압력과 함께 발생하는 상대 운동은 튜브 재료의 마멸을 초래할 수 있다. 비슷한 구조로 원자로에 설치되는 연료봉 피복관 또한 유사한 문제점에 노출

될 수 있어 관련 연구자들의 관심을 모으고 있다.⁽¹⁻³⁾

두 개의 고체 표면 사이의 미세한 상대 운동으로 인한 접촉 재료의 마멸 현상을 프레팅 마멸이라 하며, 주로 진동에 노출되는 기계적 체결 부위나 전기 접점 등에서 많이 발생된다. 재료의 손실량이 크지 않음에도 불구하고 피로 파괴를 가속시키거나 성능을 저하시키는 요인이 되기도 한다.⁽⁴⁾ 일반 마멸과 달리, 프레팅 마멸에서는 접촉면의 일부에서 상대 운동이 일어나지 않거나 혹은 일어나더라도 작은 운동 진폭으로 인하여 마멸 입자의 배출이 지연된다. 따라서 접촉 상태와 그에 따른 마멸흔(wear scar)도 복잡한 양상을 띤다. 프레팅 마멸이 발생하기 위한 운동 진폭은 접촉면에 가해지는 수직 하중의 크기에 의존하는데, 하중이 클수록 압착(stick) 부위가 증가하므로 상대적으로 큰 진폭에서도 프레팅 마멸이 발생할 수 있다.

재료의 프레팅 마멸 특성을 정량화하기 위한 시험 방법은 기존의 마멸 시험과 크게 다르지 않으나, 미세한 운동 진폭의 정확한 구현이 매우 중요하다. 가장 일반적으로 사용되는 프레팅 마멸 시험기의 구동 방식은 전기 모터의 회전 운동을 캠과 같은 편심 운동 기구에 의하여 직선으로 변환

[이 논문은 2008년도 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2008. 5. 29.-30., 충북대) 발표논문임]

† 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : ilchung@yu.ac.kr

TEL : (053)810-3525 FAX : (053)810-4627

* 영남대학교 대학원

** 회원, 영남대학교 기계공학부

하는 것이다. 전통적인 왕복동형 마멸 시험기에서 채택되어온 방법으로서 최근의 Gnanamoorthy등⁽⁵⁾과 Park등⁽⁶⁾의 연구에도 이용된 바 있다. 그 외의 구동 방식으로는 Zhou등⁽⁷⁾과 같이 유압 시스템을 적용하거나, Miyoshi 등⁽⁸⁾이나 Rybiak등⁽⁹⁾과 같이 가진기(electro-dynamic shaker)를 적용한 예를 볼 수 있다.

본 연구에서는 원자력 발전소 증기 발생기의 열교환용 튜브로 많이 사용되고 있는 인코넬 690에 대한 프레팅 마멸 특성을 시험하였다. 이 재료는 니켈, 크롬, 철 이 약 6:3:1의 비율로 혼합된 초합금(superalloy)의 한 종류로서, 산성 분위기나 고온 수중에서의 내부식성이 매우 우수한 것으로 알려져 있다. 인장 강도, 항복 강도, 탄성 계수 및 연신률은 각각 700 (MPa), 380(MPa), 211(GPa), 46% 정도로서 금속학적 안정성과 더불어 기계적 강도 및 가공성도 우수하다. 프레팅 조건의 구현을 위하여는 미세 변위의 정확한 제어가 가능하고 사용이 간편한 압전 구동기를 적용한 프레팅 마멸 시험기를 제작하여 사용하였다.

2. 인코넬 690 튜브의 프레팅 마멸 시험

2.1 프레팅 마멸 시험기

미소한 상대 운동의 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 있기 때문이다. 따라서 구동 메커니즘을 최대한 단순화할 필요가 있는데, 압전 구동기는 그 대안의 하나로 고려할 수 있다. 함수 발생기의 신호를 증폭하여 구동기에 입력하면 이에 따른 변위가 발생되며, 이를 직접 시편에 인가해 줌으로써 마멸 시험을 수행할 수 있다.

압전 구동기의 변위는 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 Newton의 힘을 발생시킬 수 있다. 압전 구동기의 단점 중 한 가지는 변위가 크지 않다는 점이나, 현재 상용화된 구동기 중에는 최대 400 μ m의 변위를 생성할 수 있는 종류도 있어 프레팅 마멸 시험 용도로 사용될 수 있다.

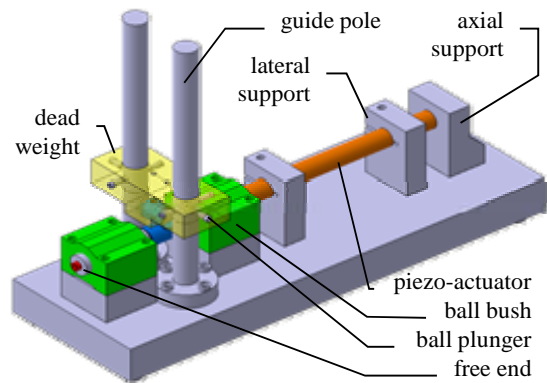


Fig. 1 Schematics of fretting wear test rig with piezoelectric actuator

그러나 현재까지 압전 구동기의 프레팅 마멸 시험에의 적용 사례는 그리 많지 않다. Iwabuchi등⁽¹⁰⁾은 한쪽 끝이 고정된 “C” 자형 프레임의 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. Marui등⁽¹¹⁾은 수직 방향으로 배치된 구동기 끝에 운동 시편을 장착하고 그 양측에 각각 한 개씩의 고정 시편을 접촉시키되 줄로 늘어뜨린 무게추가 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.

본 연구에서 개발한 압전 구동 프레팅 마멸 시험기의 구조는 Fig. 1과 같다. 사용된 구동기는 PiezoMechanik사의 PSt VS18로서 최대 입력 전압, 강성, 최대 변위는 각각 1000V, 10N/ μ m, 200 μ m이다. 고전압 압전 세라믹이 하우징으로 보호되어 있으며, 예압력이 인가되어 인장과 압축의 양 방향 하중을 생성할 수 있다. 장시간 연속 사용으로 발생하는 열을 쉽게 발산시키도록 구리 합금 하우징을 적용한 모델을 채택하였다.

구동기의 축 방향 및 측면 방향 움직임은 끝단의 축 방향 지지대(axial support)와 중간에 위치한 2개의 측면 방향 지지대(lateral support)로 고정된다. 구동기의 선단(tip)은 그림의 우측 볼 부쉬(ball bush)를 통과하는 단축(short axle) 요소의 끝단에 나사로 체결되며, 이어서 운동 축 튜브 시편, 또 다른 단축 요소가 차례로 결합된다. 단축 요소의 중심부는 길이 방향으로 태핑하여 자유단(free end)에서 삽입된 볼트가 튜브 시편을 통과하여 체결됨

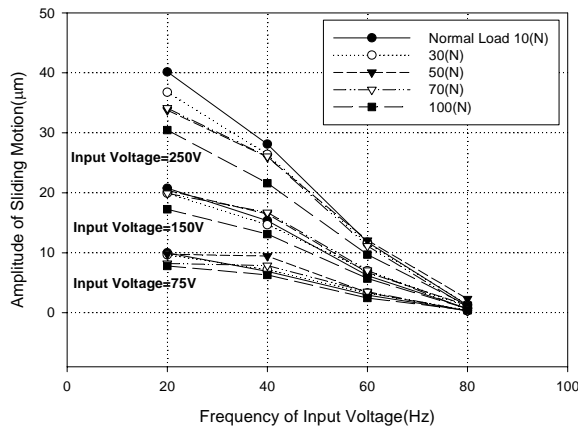


Fig. 2 Sliding motion amplitude subject to the variation of input voltage, frequency and normal load

으로써 구동기와 함께 하나의 조합 축을 구성한다. 이 조립 축은 시편의 양쪽에서 볼 부쉬로 지지되어 축 방향을 제외한 나머지 운동 자유도는 모두 구속된다. 볼 부쉬는 미끄럼 시편에 가해지는 수직 하중에 따른 전단력과 굽힘 모멘트로부터 구동기를 보호한다. 시편과 맞닿는 단축의 측면은 경사 가공(chamfering)하여, 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. 운동 시편과 고정 시편은 서로 직교 방향으로 접촉하도록 하였으며, 보다 큰 수직 하중은 그림의 무게 추 위에 추가로 추를 얹고 볼트로 체결함으로써 인가할 수 있다.

2.2 프레팅 마멸 시험기의 평가

미끄럼 변위의 크기를 Keyence 사의 LK-G30 레이저 변위계를 사용하여 측정하였다. 이 때 레이저 광선이 조사되는 위치는 Fig.1의 자유단 즉, 볼 부쉬를 통과하여 노출된 단축 좌단의 수직면으로 하였다. 압전 구동기를 사용함으로써 고주파 가진도 가능하지만, 운동부의 관성력과 마찰력으로 인해 구현 가능한 변위의 크기는 제한된다. 인가 전압과 주파수 및 추의 질량에 따라 발생된 왕복 운동의 진폭은 Fig. 2와 같다. 주파수의 증가에

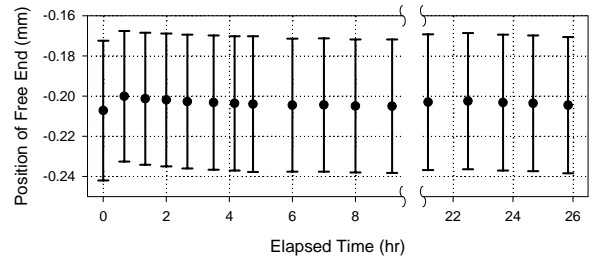


Fig. 3 Variation of the position of free end under 10N/10Hz test during 10^6 cycles

따라 운동 진폭이 감소하므로 $100\mu\text{m}$ 진폭 범위의 시험을 대상으로 한 본 연구에서는 모든 시험의 주파수를 10Hz로 정하였다.

운동 시편과 고정 시편 사이의 접촉 위치는 장시간 시험을 지속하더라도 왕복 운동 진폭 범위 내에서 일정해야 한다. 이를 확인하기 위하여 수직 하중 10N, 주파수 10Hz, 초기 진폭 $34.8\mu\text{m}$ 의 조건에서 10^6 사이클 동안 시험을 진행하며 측정된 운동 시편의 위치 변화는 Fig. 3과 같다. 이는 최소 40분, 최대 720분 간격으로 각 1초 동안 측정하여 얻어진 10개의 사인 곡선을 분석한 결과인데, 시험 시작 초기 대비 이들 사인 곡선의 평균값의 변화는 최대 $3.3\mu\text{m}$, 진폭의 변화는 최대 $2.3\mu\text{m}$ 이었다. 표면의 마멸 손상에 따른 왕복 운동의 저항력 변화로 진폭 또한 변화할 수 있으며, Fig. 3의 결과는 이를 반영하고 있다. 압전 세라믹의 변형율을 측정하여 인가 전압에 따라 일정한 변위 진폭을 생성하도록 하는 피드백 제어 구동기를 사용하면 정확성을 개선할 수 있으나 본 연구에서는 이를 사용하지 못하였다. 그러나 시험 후 시편에서 측정된 마멸흔의 평균 지름이 최소 $300\mu\text{m}$ 이상임을 감안하면 이 정도의 위치 오차는 결과에 그리 큰 영향을 미치지 않을 것이라 사료된다.

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 10^6 사이클 시험을 진행한 후 상하, 전후, 좌우 방향의 추의 움직임을 3분간 측정된 결과 각각의 최대 위치 변화는 0.6, 0.7, $0.1\mu\text{m}$ 에 불과하였다. 여기서 마멸에 따른 요철 생성에도 불구하고 추의 상하 방향 운동이 이처럼 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 불가능하다. 그러나 상온 건마찰 프레팅 마멸 시험은 비교적 정확한 변위 진폭으로 수행할 수 있는 것으로 판단된다.

2.3 인코넬 690 튜브의 프레팅 마멸 시험

원자력 발전소 증기 발생기에 사용되는 인코넬 690 튜브를 25mm 길이로 절단하여 두 개의 튜브 시편을 직교 접촉시킨 상태에서 프레팅 마멸 시험을 수행하였다. 튜브의 외경은 19.05mm이며 벽의 두께는 1mm이다. Taylor Hobson PGI 120 표면 거칠기 측정기를 사용하여 측정한 5 개 시험 전 시편의 표면 거칠기의 평균값은 Ra 0.3856 μ m, Rz 3.4730 μ m, Rmax 4.8500 μ m 이었다. 미끄럼 운동의 주파수를 10Hz로 고정하고 운동 진폭을 변화시키

며 10⁶사이클 동안 프레팅 마멸 시험을 수행하였으며, 수직 하중은 10, 15, 25, 35N으로 하였다.

한편 마멸 전 시편의 초기 표면에 따른 영향을 알아보기 위하여, 일부 시편을 래핑한 뒤 동일한 조건에서 35N의 하중으로 비교 시험을 수행하였다. 연마한 5 개 시편의 평균 표면 거칠기는 Ra 0.0713 μ m, Rz 0.6078 μ m, Rmax 0.8418 μ m 이었다.

시험이 완료된 시편의 접촉부에는 마멸분(debri)이 마멸흔 내외부에 상당히 넓게 분포되어 있으므로, 이를 나일론 솔과 압축 공기로 털어낸 후 초음파 세척하여 제거하였다. 먼저 광학 현미경으로 마멸 부위를 촬영하고, 이미지 분석 S/W를 사용하여 마멸흔의 크기를 측정하였다. 마멸량이 미미한 경우를 제외한 대부분의 마멸흔은 원형에 가까우며, 따라서 운동 방향과 그 수직 방향의 지름으로 크기를 정량화 하였다. 또한 프레팅 마멸의 메커니즘을 알아보기 위하여 주사 전자 현미경을 통한 관찰도 함께 진행하였다.

마멸량은 정밀 저울을 이용하여 시험 전후의 시편 질량의 변화로 측정하기도 하지만 본 연구에서는 마멸 부피를 그 파라미터로 삼았다. 이를 위하여 먼저 Wyko NT8000 3D profiler로 마멸흔을 포함한 표면의 3 차원 형상을 측정하였다. 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 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 마멸 부피 계산의 정확도 향상을 꾀하였다.

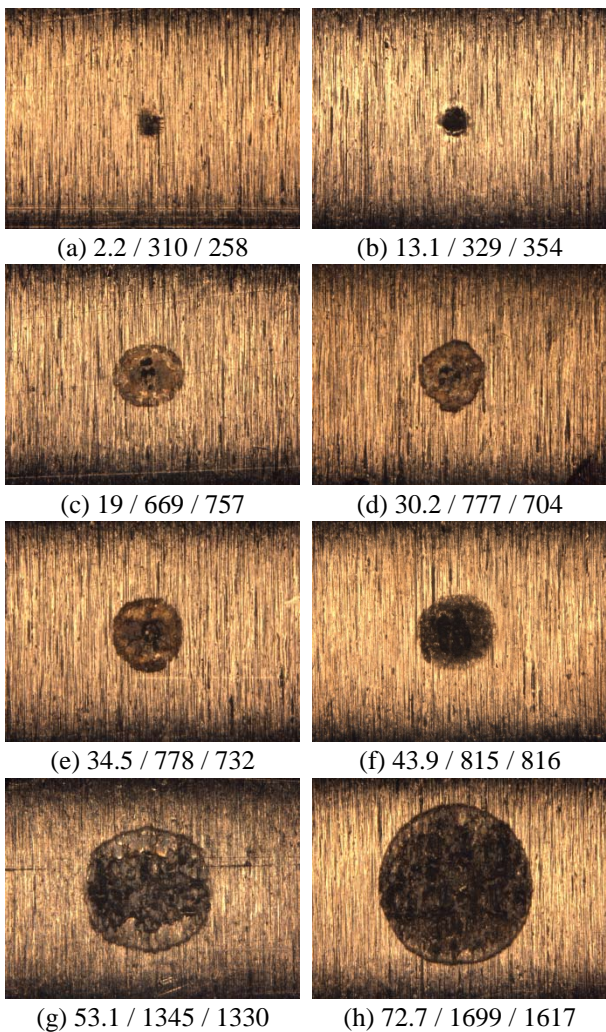


Fig. 4 Optical microscopy for 15N specimens. (Caption: Amplitude of sliding motion/ Diameter of wear scar in vertical dir./ Diameter of wear scar in horizontal dir. in μ m)

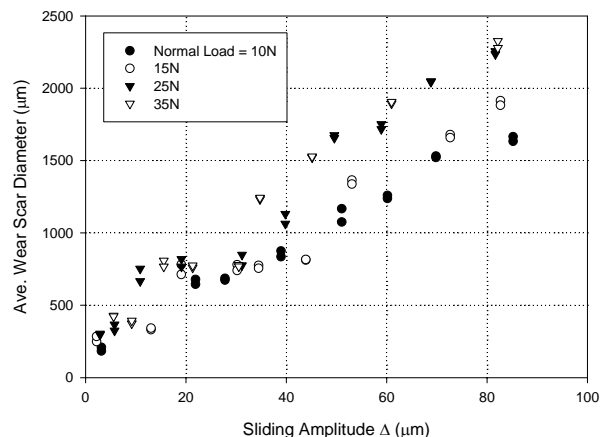


Fig. 5. Influence of sliding amplitude and normal load on the size of wear scar

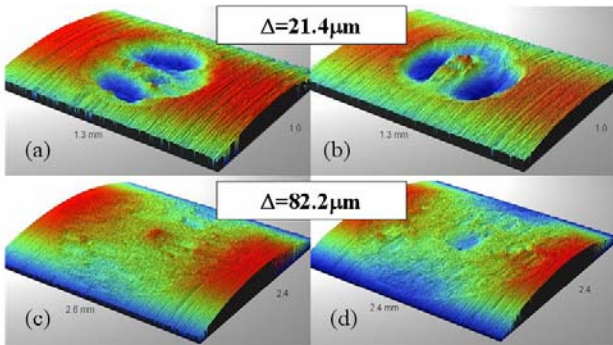


Fig. 6 3D profilometry for 35N tests: (a) & (c) are moving and (b) & (d) are fixed specimens

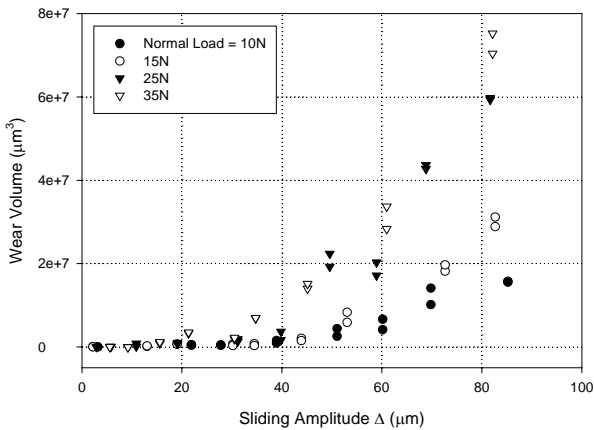


Fig. 7 Influence of sliding amplitude and normal load on the wear volume

3. 시험 결과 및 토의

3.1 마멸흔 및 마멸량

광학현미경으로 동일한 배율에서 관찰 및 측정 한 15N 운동 시편의 마멸흔과 그 크기는 Fig. 4와 같다. 고정 시편의 마멸흔도 모두 이와 유사한 형상과 크기로 나타났다. 미끄럼 운동 진폭의 증가에 따라 마멸흔의 크기가 크게 증가하며, 모양 또한 원형에 가까워 지는데, 이러한 경향은 다른 하중의 경우에서도 유사하였다.

하중별 마멸흔의 평균 크기 변화는 Fig. 5와 같다. 진폭 20 μm 을 전후하여 마멸흔의 성장이 지연되는 듯한 영역이 관찰되며, 진폭 10 μm 이하에서는 모든 하중의 경우 마멸흔이 매우 작음을 알 수 있다.

수직 하중 35N 하에서 미끄럼 진폭 21.4 및 82.2 μm 시편에 대한 마멸흔의 3 차원 형상 측정 결과를 Fig. 6에 보였는데, 이와 같은 데이터로부터 전술한 프로그램을 이용하여 계산한 마모 부피의 변화는 Fig. 7과 같다. 하중의 크기에 무관하게 약 40μm 이하의 진폭에서는 마멸 부피는 매우 미미

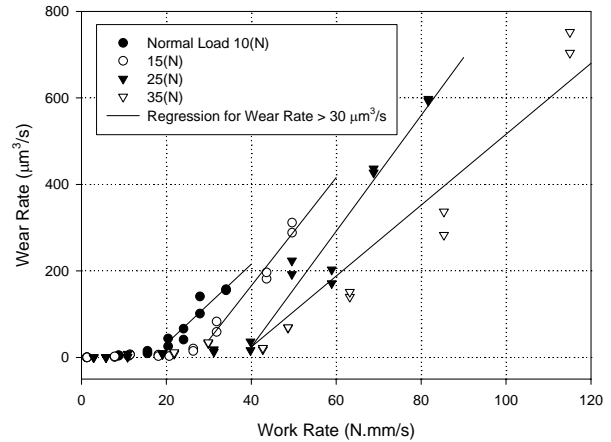


Fig. 8 Relation between work rate and wear rate under different load levels

하며, 그 이후로는 빠른 속도로 증가하는데, 하중이 클수록 마멸 부피 또한 크다.

마멸흔의 크기와 마멸 부피의 변화로부터 3가지의 상이한 마멸 거동을 구분할 수 있다. 먼저 마멸 자국의 크기가 작으며 마멸 부피 또한 미미한 경우인데, Fig. 5와 7에서 10μm이내의 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 10~40μm범위에 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)과 밀접한 관계가 있을 것으로 본다. 한편, 고리형 마멸흔의 생성이 없이 마멸흔 크기나 마멸 부피의 증가만으로 영역간 경계를 찾아낸 예는 Hager Jr.⁽¹²⁾와 Jeong⁽¹³⁾ 등의 연구에서 찾아볼 수 있다.

측정된 마멸 부피를 시험 소요 시간으로 나누어 구한 마멸률(wear rate)을 수직 하중과 평균 미끄럼 속도의 곱으로 구한 일률(work rate)에 대하여 도시한 결과는 Fig. 8과 같다. 흔히 사용되는 work rate 모델에 따르면 이들의 관계가 선형적이어서 그 기울기를 마멸 상수(wear coefficient)로 정의하게 된다. 그러나 본 시험의 결과에 의하면 일률이 작은 경우 마멸 증가율은 상대적으로 매우 낮으며, 일정 수준 이상의 일률이 되어야 크게 증가하기 시작함을 알 수 있다. 이는 Kim등⁽¹⁴⁾이 동일한 재

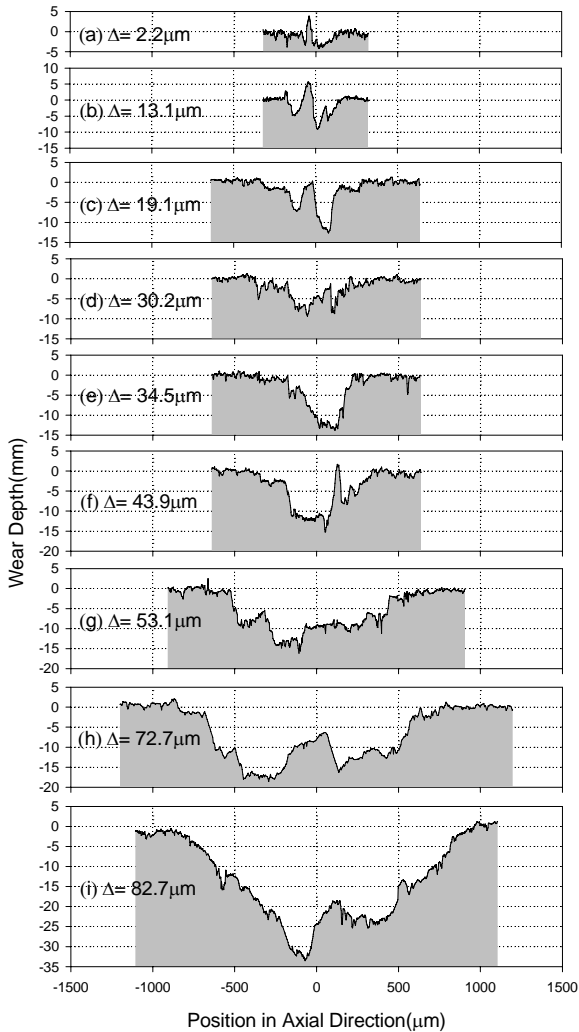


Fig. 9 Wear profile of 15N sliding specimens at the center of scar

료에 대하여 프레팅 마멸 영역별로 각기 상이한 마멸 상수를 보고한 것과 유사한 결과가 보여진다. 마멸률이 증가하기 시작하는 기준을 $30\mu\text{m}^3/\text{s}$ 로 정하고 그보다 높은 마멸률을 보이는 데이터를 1 차함수로 가정하여 구한 기울기, 즉 마멸 상수는 수직 하중 10, 15, 25, 35N에 대하여 각각 9.193, 12.511, 13.380, $8.197 \times 10^{-15} (\text{Pa}^{-1})$ 이다.

3.2 마멸흔 관찰

시험기의 좌우 대칭면에서의 15N 운동 시편의 표면 윤곽을 Fig. 9 에 도시하였다. 여기서 그래프의 수평 방향은 미끄럼 운동 방향과 일치한다. 마멸 자국의 크기에 비해 미세한 크기의 상대 운동 진폭이 인가되므로 프레팅 마멸의 특징이라 할 수 있는 불균일한 마멸면이 형성되어 있음을 볼 수 있다. 고리형 마멸흔에 해당하는 단면이 명확히 보이지는 않지만, 많은 경우에서 주변에 비해 마

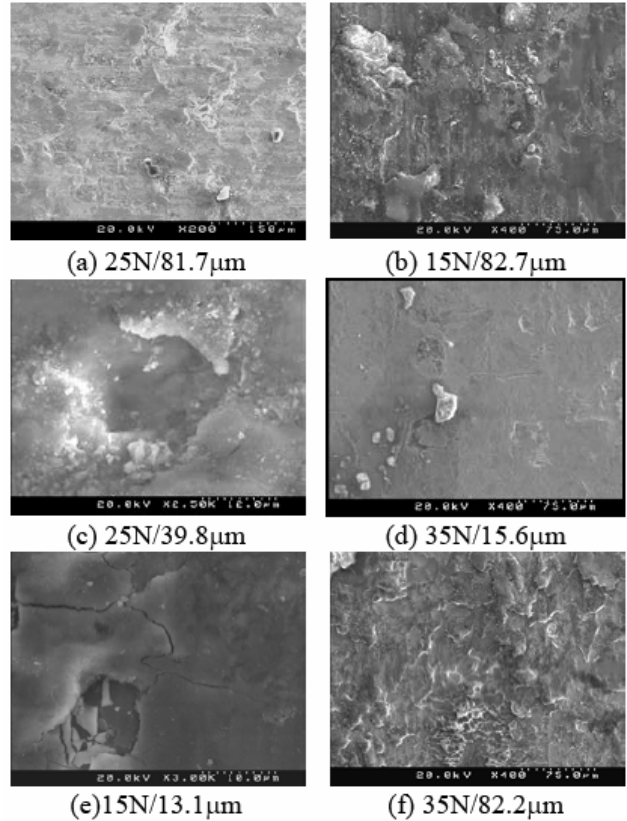


Fig. 10 SEM micrographs of wear scars

멸 깊이가 얇은 영역이 존재함을 알 수 있다. Case (a), (b), (f)에서는 마멸 이전의 표면보다도 높은 윤곽의 영역이 존재하며, 이는 마멸 입자의 용착(adhesion)으로 인한 돌기일 것으로 추측된다. 상당한 양의 마멸이 진행된 Case (h)와 (i)에서도 마멸 정도의 국부적 차이가 심하게 드러난다.

SEM으로 관찰된 마멸흔 역시 복잡한 구조를 보인다. Fig. 10(a)와 (b)는 수직 하중과 진폭이 각각 25N/81.7 μm 와 15N/82.7 μm 으로서 마멸흔의 크기와 마멸 부피가 상당히 큰 경우의 마멸흔의 일부를 보인다. 전체적인 무늬로부터 연삭 마멸이 진행되었음을 알 수 있다. 이와 더불어 크기 10~20 μm 의 입자가 다수 관찰되는데, 이는 미세한 분말 형태의 마멸분의 생성뿐만 아니라 비교적 큰 재료 덩어리의 분리도 발생하고 있음을 보여 준다. Fig. 10(c)에서 이러한 입자가 분리된 자국을 볼 수 있다. 또한 얇은 판상 층(layer)들이 산재하고 있음을 볼 수 있다. 이 판상 층들이 반복적인 하중 작용과 온도 상승에 의하여 생성된 TTS (Tribologically Transformed Structure)⁽¹⁵⁾인지 혹은 분리된 입자가 모재에 용착된 뒤 심한 소성 변형을 겪어 변형된 것인지는 알 수 없다.

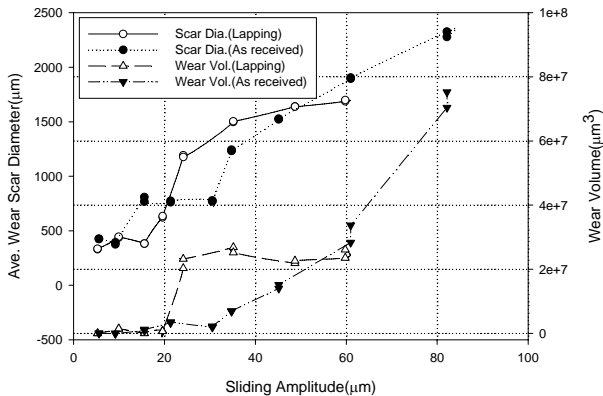


Fig. 11 Comparison of wear scar size and wear volume for 35N specimens with lapped and as-received surfaces

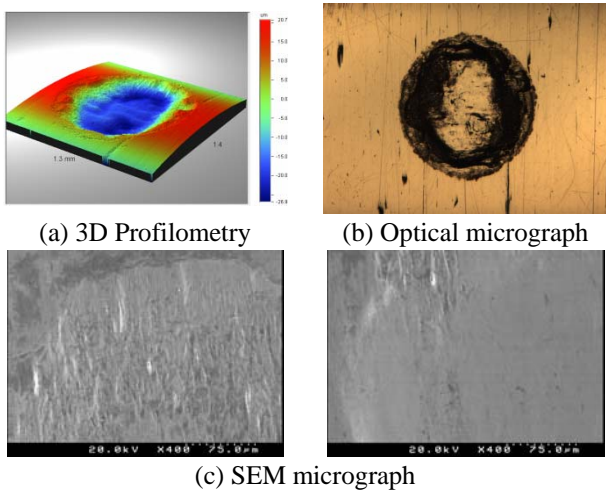


Fig. 12 Observation of lapped specimen tested at 35N/24.2μm

이러한 입자의 분리와 판상 층의 생성은 마멸 정도가 적은 경우에서도 관찰된다. Fig. 10(d)는 수직 하중 35N, 진폭 15.6μm 경우의 마멸흔의 일부이다. 이 경우의 광학 현미경 사진은 원형의 검은색 마멸흔을 보이지만 전체 마멸흔 영역의 SEM 사진으로는 마멸의 진행을 알아보기 힘들 정도로 모재의 표면과 큰 차이를 보이지 않으며 약간의 접촉 흔적만을 찾을 수 있다. 그럼에도 모재에서 분리된 입자와 함께 입자의 분리로 인한 것으로 보이는 홈(groove)을 볼 수 있다. Fig. 10(e)는 수직 하중 15N, 진폭 13.1μm 경우의 마멸흔의 일부이다. 역시 마멸흔과 마멸 부피가 매우 적은 경우인데, 판상 층과 여기에 생성되어 있는 균열 등을 관찰할 수 있다.

이상의 마멸흔 관찰로부터 연삭 마멸과 아울러 입자의 분리와 판상 층의 형성 및 파괴 과정이 반

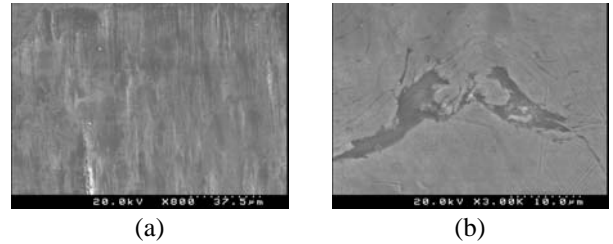


Fig. 13 SEM observation of lapped specimen tested at 35N/19.6μm

복됨으로써 마멸면이 매우 거칠어 짐을 볼 수 있었으며, 따라서 마멸 과정 동안 접촉 응력의 분포 또한 지극히 불균일할 것으로 생각된다.

3.3 초기 표면의 영향

표면을 래핑 처리한 시편을 35N의 수직 하중에서 시험한 결과 측정된 마멸흔의 크기와 마멸 부피를 래핑하지 않는 시편의 데이터와 함께 Fig. 11에 도시하였다. 진폭 20μm 이상에서 래핑 시편의 마멸 진행이 빠르지만 진폭 40~60μm 구간에서는 둔화된다. 반면 래핑하지 않는 시편의 경우 이 구간에서도 빠른 마멸 진행을 보이며 진폭 60μm 이상에서는 래핑 시편에 비해 큰 마멸흔과 마멸 부피를 보인다.

래핑 여부는 마멸면의 형성에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. Fig. 12는 진폭 24.2μm의 경우로서 (a)의 3D profile 측정에서 상당한 마멸이 발생했음을 알 수 있지만 (b)의 광학 현미경 사진에는 마멸흔 중앙부에서 밝은 면이 관찰된다. 그림 (c)의 SEM 사진에서는 마멸 방향의 무늬와 함께 매끄러운 마멸면을 볼 수 있다.

래핑 시편에서도 입자의 분리와 판상 층은 관찰되지만 그 빈도는 매우 적은 대신 래핑하지 않는 시편에 비해 연삭 마멸의 흔적이 선명하게 드러난다. Fig. 13은 진폭 19.6μm 시편에서 관찰된 것으로, 그림 (a)는 연삭 마멸 방향 무늬를, 그림 (b)는 입자의 분리 과정을 보인다. 그림 (b)를 보면, 마찰력에 의한 전단 변형으로 표면 층의 재료가 밀려나고 있으며, 이 과정에서 반복 응력에 따라 균열이 촘촘히 생성된 뒤, 미세한 입자들이 차례로 분리되고 있는 것으로 추측된다.

이러한 마멸 메커니즘의 차이가 Fig. 11의 마멸 진행 지연의 원인이라 생각되나 후속 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

튜브의 프레팅 마멸 시험용 장치를 개발하였다.

미세한 진폭의 왕복 운동을 생성하기 위한 구동 장치로 압전 구동기를 적용하여 그 성능과 사용 범위를 확인하였다. 하중 장치로 무게 추를 사용함으로써 구조를 단순화하고 사용을 용이하게 하였다.

인코넬 690 튜브의 프레팅 마멸 시험을 수행하였다. 상온, 대기 중, 하중 35N이하, 진폭 100 μ m 범위에서 10⁶사이클 동안 시험한 시편에 대하여 마멸흔의 크기와 마멸 체적을 측정/계산하였다.

마멸의 정도는 하중과 진폭의 영향을 받는데, 마멸흔의 크기와 마멸 부피가 모두 미미한 영역, 두 가지 모두 빠른 증가를 보이는 영역, 마멸흔은 성장했으나 마멸 부피는 미미한 영역을 구분할 수 있었다. 일률에 따른 마멸 부피의 증가율의 관계로부터 마멸 상수를 계산하였다. 하중에 따라 다소 차이가 있으나, 마멸흔과 마멸 부피의 증가가 비교적 빠른 영역에서 약 1.0 $\times 10^{-14}$ Pa⁻¹에 근사한 값을 얻었다.

현미경 관찰을 통해 인코넬 690 튜브의 프레팅 마멸 메커니즘을 알아 보았다. 연삭 마멸과 함께 입자의 분리와 용착, 판상 층의 생성과 파괴 등이 마멸 과정을 통해 반복되며, 그 결과 마멸 면이 매우 복잡한 지형으로 형성되었다.

시편의 초기 표면 거칠기가 프레팅 마멸에 미치는 영향을 알아보기 위하여 래핑 처리된 시편을 35N 에서 시험하였다. 이 경우 연삭 마멸이 주 메커니즘이 되는 것으로 보이며 단순하고 매끄러운 마멸 면이 관찰되어 초기 표면이 거친 경우와는 상당한 차이를 보였다.

후 기

이 논문은 2006 학년도 영남대학교 학술연구조성비 지원에 의한 것임.

참고문헌

- (1) Hassana, M. and Hayderb, M., 2008, "Modelling of Fluidelastic Vibrations of Heat Exchanger Tubes with Loose supports," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 238, pp. 2507~2520.
- (2) Kim, J.M., Huh, N.S., Chang, Y.S., Kim, Y.J., Hwang, S.S. and Kim, J.S., 2006, "Structural Integrity Evaluation of SG Tube with Surface Wear-Type Defects," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30, No. 12, pp. 1618~1625.
- (3) Park, Y.C., Jeong, S.H., Kim, J.S., Kim, Y.H. and Lee, Y.Z., 2006, "Influence of Temperature on the Fretting Wear of Advanced Nuclear Fuel Cladding Tube against Supporting Grid," *J. of the KSTLE*, Vol. 22, No. 3, pp. 144~148.
- (4) Kwak, D.H., Roh, H.R., Kim, J.K. and Cho, S.B., 2007, "A Study on Fretting Fatigue Life Prediction for Cr-Mo Steel(SCM420)," *J. of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 123~130.
- (5) Ramesh, R. and Gnanamoorthy, R., 2007, "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.
- (6) Park, Y.W., Ramesh Babu, G.N.K. and Lee, K.Y., 2007, "Studies of Tin Coated Brass Contacts in Fretting Conditions under Different Normal Loads and Frequencies," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, No. 18, pp. 7939~7951.
- (7) Xu, J., Zhou, Z.R., Zhang, C.H., Zhu, M.H. and Luo, J.B., 2007, "An Investigation of Fretting Wear Behaviors of Bonded Solid Lubricant Coatings," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 182, pp. 146~151.
- (8) 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., 2008, "Wear Behavior of Low-cost, Lightweight TiC/Ti-6Al-4V Composite under Fretting: Effectiveness of Solid-Film Lubricant Counterparts," *Tribology International*, Vol. 41, pp. 24~33.
- (9) Rybiak, R., Fouvry, S., Liskiewicz, T. and Wendler, B., 2008, "Fretting Wear of a TiN PVD Coating under Variable Relative Humidity Conditions - Development of a 'Composite' Wear Law," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 202, pp. 1753~1763.
- (10) Iwabuchi, A., Lee, J.W. and Uchidate, M., 2007, "Syner-gistic Effect of Fretting Wear and Sliding Wear of Co-Alloy and Ti-Alloy in Hanks' Solution," *Wear*, Vol. 263, pp. 492~500.
- (11) Marui, E., Endo H., Hasegawa, N. and Mizuno, H., 1998, "Prototype Fretting Wear Testing Machine and Some Experimental Results," *Wear*, Vol. 214, pp.221~230.
- (12) Hager Jr., C.H., Sanders, J.H. and Sharma, S., 2004, "Characterization of Mixed and Gross Slip Fretting Wear Regimes in Ti6Al4V Interfaces at Room Temperature," *Wear*, Vol. 257, pp. 167~180.
- (13) Jeong, S.H., Park, C.Y. and Lee, Y.Z., 2005, "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, pp. 33~38.
- (14) Kim, D.G. and Lee, Y.Z., 2001, "Experimental Investigation on Sliding and Fretting Wear of Steam Generator Tube Materials," *Wear*, Vol. 250, pp. 673~680, 2001.
- (15) Sauger, E., Fourvry, S., Ponsonnet, L., Kapsa, Ph., Martin, J.M. and Vincent, L., 2000, "Tribologically Transformed Structure in Fretting," *Wear*, Vol. 245, pp. 39~52.