

핵연료 봉의 마찰변태구조 관찰과 프레팅 마멸 특성

김경호[†] · 이민구^{*} · 이창규^{*} · 위명용^{**} · 김흥희^{*}

(2002년 3월 14일 접수, 2002년 10월 24일 심사완료)

Observation of Tribologically Transformed Structures and Fretting Wear Characteristics of Nuclear Fuel Cladding

Kyeong Ho Kim, Min Ku Lee, Chang Kyu Rhee, Myeong Yong Wey and Whung Whoe Kim

Key Words: Fretting Wear(프레팅 마멸), Nuclear Fuel Cladding(핵연료 봉), Tribologically Transformed Structure(마찰 변태 구조), Wear Volume(마멸체적)

Abstract

In this research, fretting tests were conducted in air to investigate the wear characteristics of fuel cladding materials with the fretting parameters such as normal load, slip amplitude, frequency and the number of cycles. A high frequency fretting wear tester was designed for this experiment by KAERI. After the experiments, the wear volume and the shape of wear contour were measured by the surface roughness tester. Tribologically transformed structures(TTS) were analysed by means of optical and scanning electron microscopes to identify the main wear mechanisms. The results of this study showed that the wear volume were increased with increasing slip amplitude, and the shape of wear contour was transformed V-type to W-type. Also, it was found that the critical slip amplitude was 168 μ m. These phenomena mean that wear mechanism transformed partial slip to gross slip to accelerate wear volume. The wear depth increased with an increase of friction coefficient due to increase of normal load and frequency. The fretting wear mechanisms were believed that, after adhesion and surface plastic deformation occurred by relative sliding motion on the contact between two specimens, TTS creation was induced by surface strain hardening and wear debris were detached from the contact surface which were produced by the micro crack propagation and creation.

기호설명

UTS : 최대인장강도(MPa)
0.2%YS : 0.2% offset 항복강도(MPa)
HV : 비이커스 경도 번호
V : 마멸체적(mm³)
a : 마멸면의 반경(μ m or mm)

R : 구의 반경(mm)
h : 마멸깊이(μ m or mm)

1. 서론

원자력발전소 운전 중 핵연료 봉과 증기발생기 전열관이 기계적인 건전성을 유지하여야 함은 원전 운전의 안전성 및 경제성 제고를 위해 필수적인 조건이다. 최근 들어 국내외 원전의 발전설비 구성품 중 핵연료집합체내의 연료봉과 증기발생기 전열관의 마멸현상이 원자력발전소의 건전성을 위협하는 매우 중요한 현상으로 인식되고 있

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력연구소
원전재료동적손상평가
E-mail : khkim@kaeri.re.kr
TEL : (042)868-2422 FAX : (042)862-5496
^{*} 한국원자력연구소 원전재료동적손상평가
^{**} 충북대학교 공과대학 재료공학과

다. 손상사례를 보면 십 여전에 고리 2호기에서 발생하였던 국산 핵연료 봉의 파손원인이 프레팅 마멸에 의한 것으로 밝혀졌다.⁽¹⁾ 최근에는 국내 원전 영광 3/4호기와 울진3/4의 전열관의 마멸손상이 가속화되어 현안문제로 대두되고 있다.⁽²⁾ 이들 프레팅 마멸은 원자로내의 1차 측의 냉각재가 2,250psi로 가압된 상태에서 6~8 m/s의 속도로 핵연료 봉 하부에서 상부 쪽으로 유동하여 증기 발생기 전열관에 들어와 전열관 내를 흐르는 2차 측의 물을 가열하게 되는데, 이 때의 냉각수 흐름으로 인한 진동 즉 유체유발진동 (Flow-Induced Vibration)에 의한 것으로 보고되고 있다. 프레팅 마멸현상은 두 접촉면에서의 미세한 상대적인 움직임에 의해 발생하는 물체의 표면 손실 및 손상을 말한다.⁽³⁾ 이러한 마멸현상은 기존의 부식열화와는 달리 열화속도가 매우 빠르며 손상부위가 특정 영역에 집중되는 경향을 보이고 있다. 특히 원자력 산업에서의 경제성 제고의 측면으로 “무 손상 핵연료(fuel of defect free)의 개발”이 목적으로 등장함에 따라 최근에 와서야 크게 관심을 갖게 된 분야이다. 핵연료집합체의 연료 봉에 있어서 마멸입자가 연료 봉의 표면으로부터 이탈함으로써 심할 경우 핵연료 봉에 구멍을 발생시켜 연료 봉 내부의 방사성 물질이 원자로 내부로 유출되게 하는 심각한 사고를 일으킨다. 이와 같은 연료 봉의 손상을 방지하기 위해서는 결국 연료 봉과 지지격자 스프링(또는 덤플)사이의 접촉현상을 잘 이해하고 연료 봉의 파손현상기구를 파악하여 이를 억제할 수 있는 접촉하중, 미끄럼 변위 및 접촉부의 형상 등을 개선하여야 할 필요가 있다. 이때 파손현상으로는 접촉면에서의 마찰에너지 방출현상 또는 접촉면으로부터의 균열성장예 의한 마멸입자의 생성을 고려할 수 있다. 즉, 프레팅 마멸을 해석하고 이의 방지를 위한 방법을 도출하기 위해서는 유체유발진동의 해석과 고체 역학적 접근, 아울러 각 구성 품의 가동조건에서 실증적 모사시험이 필요하다. 그러나 프레팅 마멸에 대한 손상 기구(damage mechanism)는 아직 완전히 밝혀져 있지 않아 현재까지 많은 연구대상이 되고 있다.^(4~10) 따라서 본 연구에서는 두 시편 사이에 접촉하중을 가한 상태에서 상대반복 운동을 발생시켜 프레팅 마멸시험을 할 수 있는 고주파수 프레팅 마멸시험기를 자체 설계/제작하여 핵연료 봉에 대

한 마멸량에 미치는 주요인자들인 접촉하중, 미끄럼 변위, 주파수, 그리고 왕복수의 영향과 마멸면의 미세조직을 관찰하여 프레팅 마멸기구를 해석하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시편준비

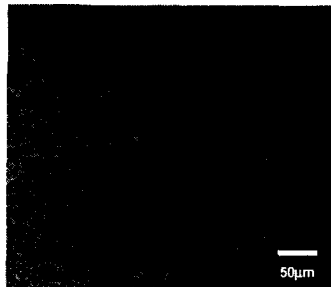
상용원전에서 사용되고 있는 핵연료집합체 지지 격자의 스프링과 덤플의 재질은 지르코늄 합금이다. 따라서 본 연구에 사용된 재료는 현재 경수로 가압 경수로(PWR)에서 사용되고 있는 WH(westinghouse)에서 공급된 핵연료 봉으로서 화학적 조성 및 기계적 성질은 Table 1과 같다. 핵연료 봉의 외경과 내경은 각각 9.5mm, 8.357mm이고, 최소 벽두께(wall thickness)는 0.526mm이다. 진원도(ovality)는 최대 0.076mm이며, 편심도(eccentricity)와 진직도(straightness)는 각각 최대 0.1mm와 0.2mm/25mm이다. 또한 실험 전에 길이가 25mm로 절단된 시험편의 이물질을 제거하기 위하여 아세톤과 메틸알콜 용액에서 초음파 세척을 실시하여 건조시킨 후 표면 거칠기와 비이커스 경도를 측정하였다. 시험편의 거칠기의 최대높이 R_{max} 는 $0.7\mu m$ 이고, 표면경도는 249 HV 이었다. 최종 열처리 조건은 온력이완 열처리조건(454~471℃, 7시간)이며, 이에 대한 미세조직은 가공조직을 나타내며 Fig. 1과 같다.

2.2 고주파수 프레팅 마멸시험기

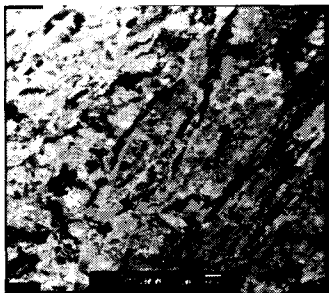
고주파수 프레팅 마멸시험기는 컴퓨터가 부착된 데이터 획득부(data aquisition unit)와 실시간 감시부(realtime monitoring unit), 제어부(control unit), 전단 축과 수직축의 구동부, 시험편 고정부, 압력용기(autoclave)로 구성되어 있으며 Fig. 2에 나타내었다. 시험기는 원자로 내에서 핵연료봉이 받는 기계적인 조건을 최대한 모사할 수 있도록 진폭, 주파수, 온도 및 접촉하중의 조정이 가능하도록 설계, 제작하여 프레팅 마멸현상을 모사하는데 중점을 두었다. 정확한 진폭의 설정과 유지가 시험결과에 큰 영향을 미치므로 캠의 원리를 적용하여 캠축에 설치된 노브(nobe)의 미세누금을 조정함으로써 미끄럼 진폭이 마이크로 미터 단위로 소수점 한자리 숫자까지의 조정이 가능하도록 설계하였다. 또한 시험편에 가해지는 접촉하중과

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of Zirlo cladding

Chemical element	Sn	Fe	Nb	O	Zr
Composition(wt.%)	1.0	0.1	1.0	0.12	bal.
Mechanical properties(at room teperature)	UTS, MPa		808		
	0.2% offset, YS, MPa		606		
	Elongation(%) 25.0mm		18.0		



(a)



(b)

Fig. 1 Microstructures of cross sections of as-received Zirlo cladding used in this test : (a) microstructure in optical microscopy, (b) microstructure in transmission electron microscopy

전단력은 각 축에 설치된 로드-셀을 통하여 측정하였으며 주파수와 접촉하중의 변화는 컴퓨터와 제어부를 통해서 조절이 가능하게 하였으며, 실시간으로 하중의 변화를 관찰할 수 있도록 하였다.

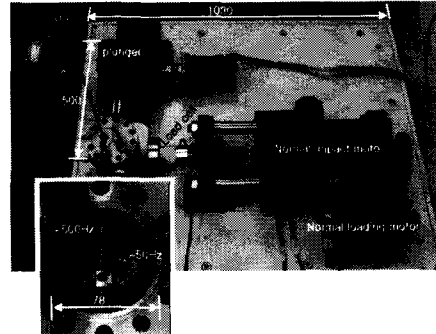


Fig. 2 Photograph of high frequency fretting wear tester with Zirlo cladding and autoclave for test of high temperature and pressure

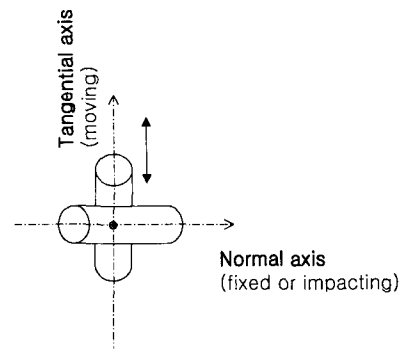


Fig. 3 Schematic drawing of crossed cylinders specimen

2.3 프레팅 마멸시험

핵연료봉은 지지격자내부에 삽입되고 딥플 (dimple)이라는 돌출부와 곡면을 가진 판 스프링에 의해 점 접촉 형태로 지지되어있다. 따라서 본 실험에서는 Fig. 3과 같이 두 시험편을 수직으로 교차하도록 설치하여 점 접촉이 되도록 하였다. 프레팅 마멸 실험조건 중 주파수는 상용원자로내에 0~50Hz 대의 광대역 진동원이 존재하나, 핵연료봉은 이러한 진동원 중 지지격자의 회전 및 굽힘 스프링 강성의 변화에 따라 30~120Hz 자신의 고유진동수를 갖으며, 일반적으로 1차 고유진동수는 30Hz 정도로 밝혀짐⁽¹¹⁾에 따라 이 주파수를 기준으로 10, 30, 50, 70Hz을 설정하였고, 미끄럼 진폭은 전술한 연구자의 보고에 의

하면 FIV에 의한 예상 진폭이 1mm 정도로 간주되거나 접촉 수직력 이외의 미끄럼 변위, 주파수, 미끄럼 반복횟수 등은 본질적으로 원자로 내에서 유체유발 진동을 하는 핵연료봉의 거동을 직접 모니터링 할 때에만 알 수 있는 값으로 적절한 참고치가 존재하지 않기 때문에 본 연구에서는 다수의 예비시험을 통하여 핵연료봉 시험편에 관별 가능한 마멸흔적이 발생하는 조건으로서 도출한 미끄럼 진폭 값을 14, 31.5, 55.8, 86.8, 124.4, 168.2, 218.1 μ m로 7단계로 적용하였다. 접촉하중은 현재 상용 핵연료 공급자들이 핵연료집합체에서 연료봉 장입에 의한 지지격자의 스프링 힘은 다양하나, 본 연구에서는 국산 핵연료에서 사용하였던 스프링 힘이 18~33N이기 때문에 이 값을 기준으로 접촉하중 범위를 10, 30, 50, 100N의 4단계로, 그리고 왕복 수는(cycle) 0.5 $\times 10^5$, 1 $\times 10^5$, 2 $\times 10^5$, 3 $\times 10^5$ 사이클로 설정하여 실험을 실시하였다.

2.4 프레팅 마멸체적 측정

마멸체적과 마멸 면의 거칠기는 최대 분해능 0.001 μ m까지 측정이 가능한 HOMMEL-WERKE T8000 표면조도기를 이용하여 측정하였다. 그 결과의 일부를 Fig. 4에 나타내었다. 정확한 마멸체적을 구하기 위해서는 마멸 면의 계적을 등 간격으로 세분화시켜 측정하는 것이 중요하므로 측정간격(step width)을 10 μ m으로 하였다. 또한 마멸체적의 계산은 측정현미경으로 마멸 면의 반지름과 마멸깊이를 식 (1)⁽¹²⁾에 적용시켰다.

$$V = \int_{R-h}^R \pi y^2 dx = \int_{R-h}^R \pi(R^2 - x^2) dx = \frac{\pi h}{6} (h^2 + 3a^2) \quad (1)$$

여기서 a는 마멸 면의 반경, R은 구의 반경, h는 마멸깊이를 나타낸다.

2.5 프레팅 마멸면 관찰

프레팅 마멸된 시험편을 가지고 광학 편광 현미경과 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 마멸면과 마찰변태구조(tribologically transformed structure)를 관찰하였다. 마찰변태구조관찰은 마멸된 시험편의 길이방향에 수직인 면을 채취하여

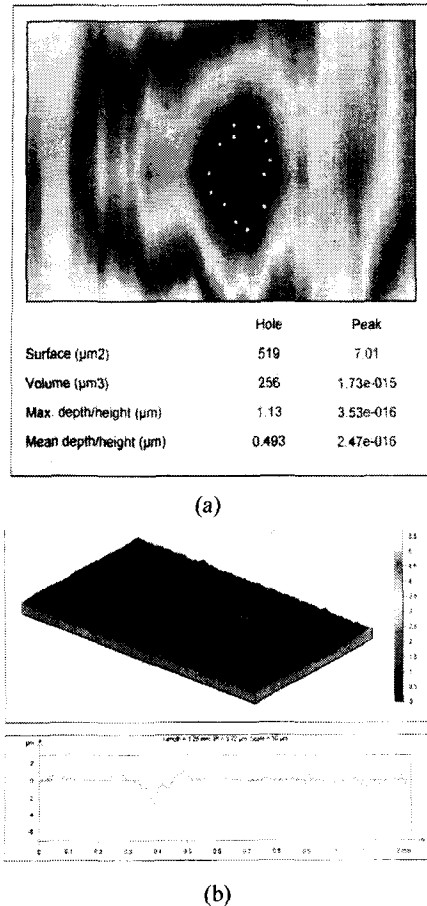


Fig. 4 Topography of a worn surface by surface roughness tester : (a) wear volume, (b) 3-D profile worn surface and wear surface profile

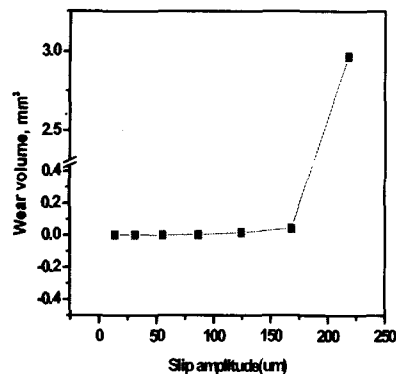


Fig. 5 Wear volume as a function of slip amplitude of Zirloy cladding in fretting

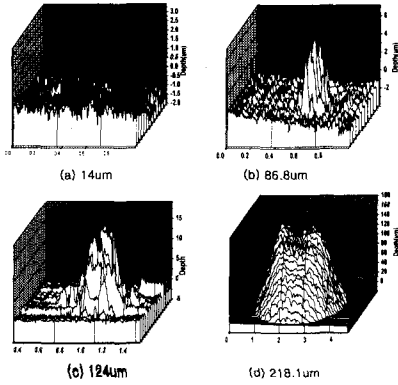


Fig. 6 Wear shape as a function of slip amplitude of Zirlo cladding in fretting

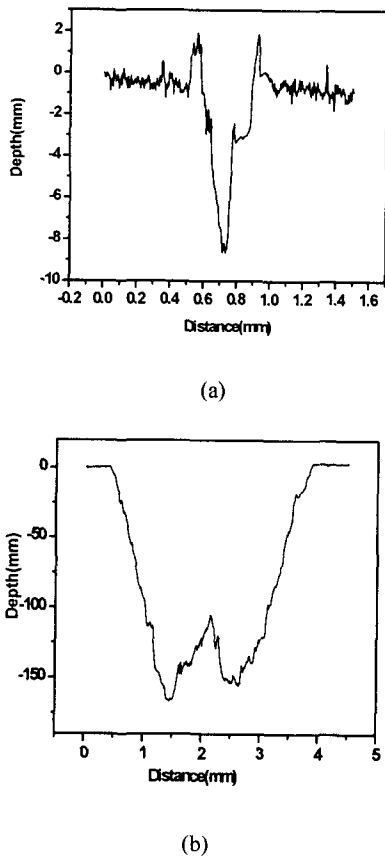


Fig. 7 Typical wear surface profiles with various slip amplitude at normal load of 30N : (a) 86.8µm, (b) 218.1µm

SiC 연마지 220번으로 1차 연마를 한 후 2000번의 연마지로 최종 폴리싱(polishing)을 하였고, 에칭(etching)은 HF 10%, HNO₃ 45%, 증류수 45%의 비율로 혼합한 용액을 사용하였다.

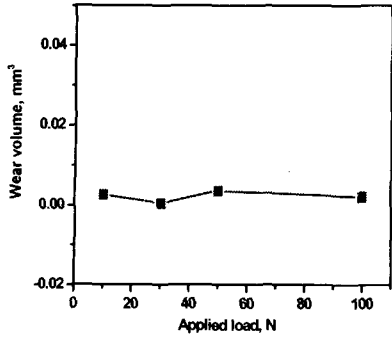
3. 실험결과 및 고찰

3.1 미끄럼진폭(slip amplitude)과 마멸량(wear volume) 및 마멸형상과의 관계

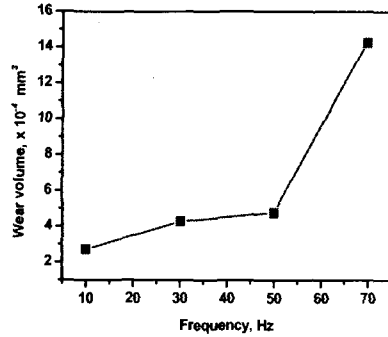
Fig. 5는 미끄럼 진폭을 14, 31.5, 55.8, 86.8, 124.4, 168.2, 218.1µm로 변화시키고 접촉하중은 30N이며 주파수는 30Hz이고 왕복 수는 1x10⁵ cycles로 시험한 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 미끄럼 진폭이 증가할수록 마멸량은 168.2µm까지는 서서히 증가하였으며 168.2µm를 시작점으로 급격히 증가하였다. 이러한 현상은 14µm와 같은 미소진폭에서는 고착상태, 86.8µm에서는 부분미끄럼(partial slip)현상이 발생하고 임계진폭으로 나타나는 168.2µm을 천이 점으로 하여 218.1µm에서는 전면미끄럼(gross slip)현상이 발생하는 것으로 사료된다. Fig. 6은 미끄럼 진폭에 따른 3차원적 마멸 형상을 나타낸다. 미끄럼 진폭 14µm에서는 접촉면 가장자리에 예각(acute angle)의 마멸 홈이 생성되었고 중심부에는 마멸되지 않은 고착부분이 유지되고 있다. 미끄럼 진폭이 86.8µm와 124.4µm로 증가함에 따라 마멸 면적이 증가함과 동시에 마멸깊이 역시 증가하며 고착부분에서 부분미끄럼상태를 보이며, Fig. 7(a)에서 보이는 것처럼 V 모양의 마멸형상으로 바뀌고 218.1µm의 전면미끄럼(gross slip)영역이 시작되면서 Fig. 7(b)와 같이 전형적인 W 모양의 마멸 형상을 나타내었다. 하지만 왕복수가 더욱 증가하면 U 모양의 마멸형상으로 바뀔 것으로 보인다. 다른 연구자들의 연구 결과에 의하면 임계진폭 이하에서는 마멸이 일어나지 않는다고 판단하였거나 또는 미미하므로 무시하고 임계진폭 이상에서 미끄럼 진폭 또는 접촉하중이 증가하면 마멸량이 증가하는 것으로 보고되고 있는데, 본 연구결과에서도 대체로 유사한 거동을 보였다.

3.2 접촉하중과 마멸체적과의 관계

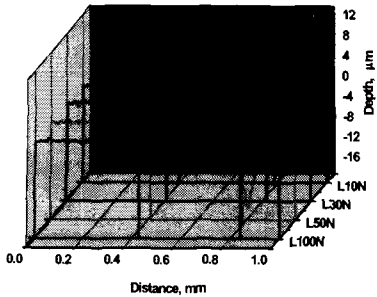
Fig. 8(a)는 주파수 30Hz, 미끄럼진폭 31.5µm로 100,000 사이클까지 시험을 수행한 접촉하중의 변화에 따른 마멸량을 나타낸다. 그림에서 알



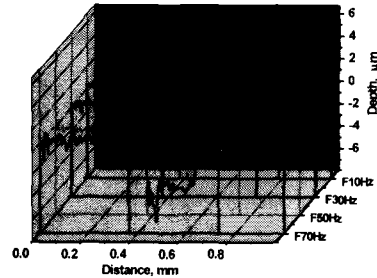
(a)



(a)



(b)



(b)

Fig. 8 Wear volume as a function of normal load in fretting(frequency 30Hz, slip amplitude 31.5 μ m, 10⁵ cycles) : (a) wear volume vs. normal load, (b) wear profiles vs. normal load

Fig. 9 Wear volume as a function of frequency in fretting(normal load 30N, slip amplitude 31.5 μ m, 10⁵ cycles) : (a) wear volume vs. frequency, (b) wear profiles vs. frequency

수 있듯이 접촉하중이 증가하여도 마멸체적에는 큰 변화가 없음을 보여주는데 이러한 현상은 미소진폭에서 하중의 증가는 마찰력을 증가시키기 때문에 오히려 마멸 량이 감소한다는 다른 연구자의 연구결과와 일치함을 나타내었다.⁽¹³⁾

3.3 주파수 및 왕복 수(cycle)와 마멸체적과의 관계

Fig. 9(a)는 접촉하중 30N, 미끄럼진폭 31.5 μ m로 100,000 사이클까지 시험을 수행한 주파수에 따른 마멸체적을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 주파수가 50Hz까지는 점진적으로 마멸 량이 증가하다가 이 점을 기점으로 하여 갑자기 증가함을 보인다. 이러한 현상은 부분미끄럼에서 주파

수가 증가하면 두 접촉물체 사이에서 새로 발생된 마멸입자가 보다 쉽게 접촉면을 이탈할 수 있어 마멸입자의 접촉면 보호기능이 감소되기 때문에 주파수가 커질수록 표면손상이 가속된다는 Berthier⁽¹⁴⁾의 결과로 설명되어진다. Fig. 9(b)는 주파수에 따른 임의의 한 단면에서의 마멸깊이를 나타낸다. Fig. 9(a)의 결과와 마찬가지로 주파수가 증가함에 따라 마멸깊이가 증가함을 알 수 있다. 왕복수의 변화를 10,000, 50,000, 100,000 그리고 300,000 사이클로 하여 시험을 수행한 결과 거의 직선적으로 증가함을 보였다. 이러한 현상은 전체 미끄럼 거리의 증가에 의한 것으로 생각된다. 하지만 핵연료봉의 프레팅 마멸에 의한 정확한 수명을 예측하기 위해서는 손상속도를 구함

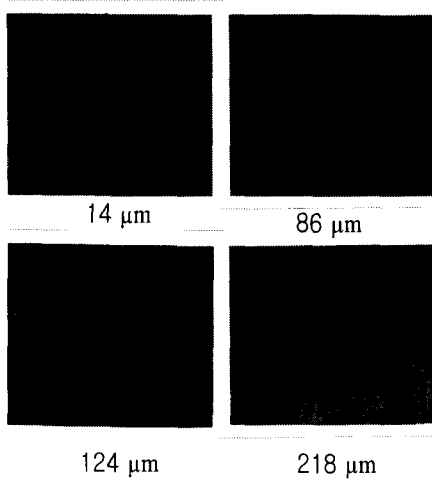


Fig. 10 Scanning electron micrographs of wear scars as a function of slip amplitude in fretting

으로써 정량화 될 것이다.

3.4 프레팅 마멸면 관찰

Fig. 10은 미끄럼 진폭에 따른 마멸된 면(wear scar)을 SEM으로 관찰한 사진이다. 14 μ m에서는 프레팅 시험초기에 아주 작은 미끄럼 진폭에서 나타나는 고착영역으로서 접촉면에서의 마멸이 거의 진행되지 않은 상태를 나타내고, 86.8 μ m에서는 전형적인 부분 미끄럼(partial slip)의 형상을 나타내며, 미끄럼 진폭이 더욱 증가함에 따라 마멸면적이 급격히 증가하는 전면미끄럼 현상을 보였다. Fig. 11은 마멸시험동안에 나타난 마멸면내의 슬립밴드(slip band)를 나타낸다. 슬립밴드 층의 배열은 미끄럼 방향에 평행하게 발달하였음을 보여준다. 슬립밴드 층의 형성은 일반적으로 마멸면의 상부경계에 변형경화입자(strain hardened grains)로 이루어져 있으며, 소성변형이 일어났음을 의미한다. Fig. 12는 두 접촉면에서의 마멸에 의해 이탈된 마멸입자(wear debris)의 SEM사진이다. 입자의 크기는 1 μ m 정도로서 아주 미세하였다. 프레팅 시험 중에 접촉면에서 빠져나가지 못한 마멸입자는 산화작용과 상대적인 연마작용에 의해 따라 더욱 미세화 될 것이며, 또한 여러 연구자들이 주장한 바와 같이 왕복수가 증가됨에 따라 그리고 미끄럼 진폭이 증가됨에 따라 미세

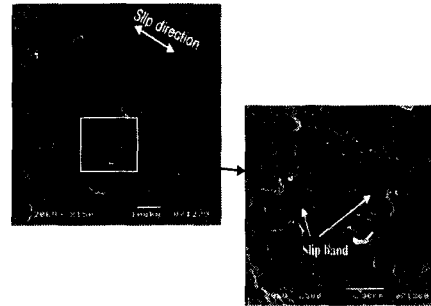


Fig. 11 Slip band in worn area surface by SEM under the slip amplitude of 124 μ m

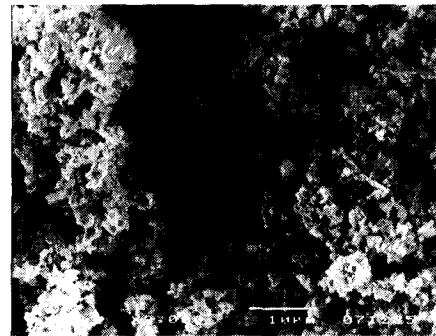


Fig. 12 Scanning electron micrographs of wear debris under slip amplitude of 31.5 μ m and normal load of 30N

화되어 연속적으로 마멸에 기여할 것이다.⁽¹⁵⁾ Fig. 13은 프레팅 마멸된 시험편을 미끄럼 방향에서의 단면을 관찰한 SEM사진이다. 그림에 표기한 것처럼 뚜렷한 데브리 층과 마찰변태구조층(TTS layer), 바로 밑에 균열이 생성되었음을 보인다. 일명 백색 층(white layer)이라 불리는 TTS 층은 시험초기에 두 시험편 간의 접촉면에서 상대미끄럼운동에 의해 응착(adhesion)작용과 표면소성변형이 일어난 후 표면변형경화에 의해 생성되는 층으로서 모재(bulk material)보다 경도가 약 2~3 배가 높고, grain size가 아주 미세한 것이 특징이다. 따라서 TTS 층의 형성기구에 대한 이해는 프레팅 유기 마멸(WIF : Wear Induced by Fretting)모델을 세우는데 아주 중요하다. 프레팅 마멸기구는 앞서 서술한 TTS 층의 생성과 전단응력과 접촉하중에 의해 그 내부에 미소균열이

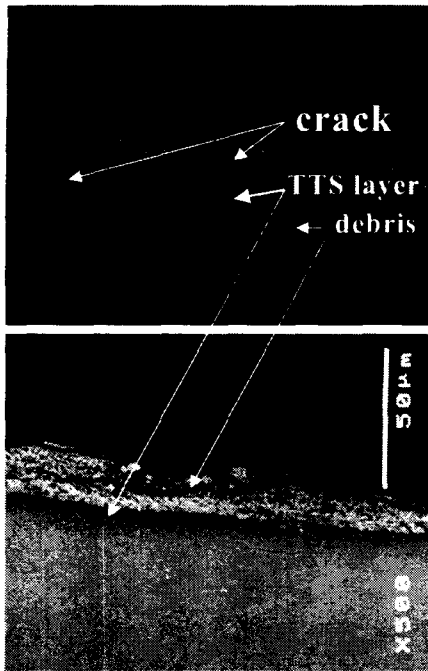


Fig. 13 Scanning electron micrographs of tribologically transformed structure(TTS) from the cross-section

이 발생되고, 그 균열들의 성장과 합체에 의하여 마멸입자(wear debris)가 생성됨으로써 결국은 모재로부터의 질량손실을 초래하는 현상이라 사료된다.

4. 결론

국내 경수로에서 사용되어 지고 있는 Zirlo 핵연료 피복관의 프레팅 마멸에 대한 시험을 수행한 후 다음과 결론을 얻었다.

- (1) 미끄럼 진폭이 $14\mu\text{m}$ 일 경우 접촉면 가장자리에 예각의 마멸 흠이 생성되었고, 중심부에는 마멸이 없었으며 고착부분이 유지되었다.
- (2) 미끄럼 진폭과 진동수가 증가할수록 마멸체적이 증가하며 고착부분이 소멸되면서 $124.4\mu\text{m}$ 까지는 V-type(partial slip) 마멸형상을, $218.1\mu\text{m}$ 에서는 W-Type(gross slip) 마멸형상을 나타내었다.
- (3) 부분미끄럼에서 전 미끄럼으로 천이 되는 임계진폭(critical slip amplitude)은 $168.2\mu\text{m}$ 이었다.
- (4) 수직접촉하중의 증가는 미끄럼 변위의 증가

를 초래하여 다소 마멸체적을 증가시켰는데, 이러한 실험결과는 핵연료집합체의 지지격자의 형상설계로 인한 강성과 스프링 힘을 조절함으로써 핵연료 봉의 프레팅 마멸을 억제할 수 있을 것으로 사료된다.

(5) 미세조직 관찰결과 프레팅 마멸기구는 시험 초기에 두 시험편 간의 접촉면에서의 상대미끄럼 운동에 의해 응착작용과 표면소성변형이 일어난 후 표면변형경화에 의한 마찰변태구조의 생성과 마찰변태구조내의 미소균열발생과 성장으로 인해 마멸입자(wear debris)가 생성되며, 접촉면으로부터 이탈됨으로써 손상되는 것으로 관찰되었다. 따라서 이러한 실험결과는 핵연료 봉과 지지격자 스프링과의 접촉과 미끄럼에 의해서 발생하는 프레팅 마멸에 의한 수명 예측과 손상을 억제할 수 있는 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업 중 원전구동 부품의 동적손상평가 및 완화기술개발과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lee, S. K. and Kim, K. T., 1993, "Confirmation of Failure Causes of the KORI-2 Cycles 7&8 KOFA Fuel and Remedies against the Fuel Failure," KAERI/TR-387.
- (2) Han, J. H., Choi, M. S., Lee, D. H., Hur, D. H. and Song, M. H., 2001, "Accurate Diagnosis on Structural Relation between Wear-Damaged Steam Generator Tube and Anti-Vibration Structures (AVS)," The Eighth Workshop on Integrity of Mechanical Component in Nuclear Power Plant, KINS/AR-560, Vol. 4, pp. 603~619.
- (3) Waterhouse, R.B., 1972, Fretting Corrosion, Pergamon Press, Oxford.
- (4) Kim, Hyung-Kyu 1998, Proceeding of Annual Fall Conferences of the KSME(Chung Cheong), pp. 169~174.
- (5) Olof Vingsbo, 1996, "Evaluation of

- Fretting Damage of Zircaloy Cladding Tubes," *Journal of Tribology*, Vol. 118, pp. 705~710.
- (6) Guerout, F. M. and Fisher, N. J., 1999, "Steam Generator Fretting Wear Damage : A Summary of Recent Findings," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 121, pp. 304~310.
- (7) Attia, M. H. and Magel, E., 1999, "Experimental Investigation of Long-Term Fretting Wear of Multi-Span Steam Generator Tubes with U-bend Sections," *Wear*, Vol. 225~299, pp. 563~574.
- (8) Kim, Hyung-Kyu, 1999, "Mechanical Analysis of Fuel Fretting Problem," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 192, pp. 81~93.
- (9) Siegfried Fouvry, Philippe Kapsa and Leo Vincent, 1996, "Quantification of Fretting Damage," *Wear*, Vol. 200, pp. 186~205.
- (10) Kim, Hyung-Kyu, Kang, Heung-Seok, Yoon, Kyung-Ho and Song, Kee-Nam, 2001, "Contact Condition of Zircaloy-4 Tube and Support and Transition of Slip Regime," *Proc. The Thirty-Third Annual Spring Conferences of The Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers*, pp. 81~88.
- (11) Kim, Hyung-Kyu, Song, Kee-Nam, Kang, Heung-Seok and Yoon, Kyung-Ho, "2000, "Test and Evaluation of Fuel Rod Fretting Wear,"" KAERI/TR-1702.
- (12) Cho, K.H., Kim, T.H. and Kim, S.S., 1998, "Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube," *Wear*, Vol. 219, pp. 3~7.
- (13) Uhlig H. H., 1953, ASTM, Spec. Tech. Pub., No. 144, p. 77.
- (14) Berthier, Y., 1988, "Fretting Wear Mechanisms and Their Effects on Fretting Fatigue," *ASME Journal of Tribology*, Vol. 110, pp. 517~524.
- (15) Fouvry S. 1977, Etude Quantitative des Degradations en Fretting, Ph. D. Thesis, 97-04, Ecole Centre de Lyon, France.