2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핵연료봉 프레팅마멸에서의 수중분위기 영향과 마멸모델에 관한 연구

A Study on the Influence of Water Environment and the Model of Fuel Fretting Wear

김형규, 정용환, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료봉 프레팅마멸에 대한 실험적 연구로서 서로 다른 세 가지의 지지격자 스프링을 이용하여 상온의 공기 중과 수중 분위기의 차이가 마멸에 미치는 영향을 관찰하였다. 시험 결과, 수중 시험에서 마멸이 더욱 심하게 발생하였으며 이에 대한 이유를 파악하기 위해 전자현미경을 이용하여 재료학적 분석을 수행하였다. 이때 각각의 분위기에서 발견된 마멸입자의 크기, 이탈 형태 등에 대해 관찰하는 한편 마멸면의 원소분석을 수행하였다. 수중 시험의 경우, 마멸입자의 크기가 공기 중 시험에서 나타난 것보다 더 크게 관찰되었다. 본 논문에서는 수중에서의 윤활 효과에 의해 원활한 상대 미끄럼 운동이 발생한 것이 그 이유라고 고찰하였으나 좀 더 명백한 분석을 위해 향후의 연구 방향을 제시하였다. 한편 전단하중을 고려한 workrate 모델을 사용하여 공기 중 시험 결과에 대해 분석한 결과, 접촉면에서의 미끄럼 상태에 따라 마멸계수가 분명한 차이를 보이는 것을 알 수 있었으며 이로부터 핵연료봉의 마멸손상 예측을 위해서는 접촉면에서의 미끄럼 상태를 파악하여야 할 필요가 있음을 제시하였다.

Abstract

Influence of water environment on fuel fretting wear is investigated by experiment with three different shapes of grid spring. It is shown that the wear in the case of water environment is severer than that in air. Metallurgical analysis is carried out by using a scanning electron microscope (SEM) to see the reason in the point of the size and the detaching mechanism of wear debris. Chemical composition of the worn area is also analyzed with the SEM. As a result, the size of wear debris in the case of water environment is larger than that in air, from which it is regarded that lubricating effect of water enables to decrease adhesion that results in the increase of relative slip motion of the contact surfaces. Nevertheless, further study is thought necessary to clarify the reason more persuasively. On the other hand, the workrate model is applied to the present wear data with shear force instead of conventional normal force. It is distinct to distinguish the difference in the wear coefficient K depending on the slip regime. In gross slip, K is much higher than that in partial slip. Therefore, it is suggested that the prevailing slip regime is to be identified to predict the fuel fretting failure.

1. 서 론

핵연료봉과 지지격자체 사이의 접촉에 의한 프레팅마멸은 심할 경우 핵연료봉 피복관의 천공을 가져올 수 있으며 이와 같은 상황은 원자로 내 일차 냉각수의 방사능 오염을 급격히 증가시킴으로써 원전의 안전성 및 경제성을 크게 저하하는 핵연료 손상이다. 핵연료봉은 원자로 내에서 냉각수의 유동에 의해 진동현상이 발생할 수 밖에 없으므로 핵연료의 프레팅 손상을 방지하기 위해서는 주어진 진동, 분위기 등의 조건 하에서 핵연료봉과 지지격자체의 접촉부에 발생하는 마멸을 줄일 수 있는 방안을 도출하여야 한다. 이를 위해 기계적 관점에서 핵연료봉과 접촉하는 지지격자체 부품, 즉 스프링 또는 딤플의 형상 개선을 통해 마멸을 억제하는 방안의 도출과 이를 위해 수반되는 접촉역학적 분석 연구는 매우 중요하다.

핵연료봉 프레팅 손상에 대한 연구 방법으로서 프레팅마멸 시험을 수행하는 실험적 접근과 접촉 형상, 하중 및 상대 미끄럼 변위 등 접촉 조건을 접촉역학에 기초하여 분석하는 이론적 방법이 있으며, 대부분의 경우 이 두 가지가 상호 보완되어 연구를 수행하고 있다. 이때 실험적 접근으로서 어려운 점은, 비록 핵연료집합체 또는 부분집합체를 원자로 냉각수 조건의 유동장에 두고 실험하더라도 실제 원자로 내의 상황을 완벽히 모사할 수는 없다는 것이며, 비록 실제 조건에 근접한 시험을 수행하더라도 마멸에 대한 결과론적 분석이 되어 마멸을 억제할 수 있는 방안을 찾는 목적으로는 부족하다는 것이다. 따라서 특징적인 인자를 분리하여(예를 들면 분위기, 온도/압력, 유동 등) 각각의 영향을 분석하는 시험을 수행하고 영향이 큰 인자에 대한 상세 분석을 통해 프레팅마멸을 억제할 수 있는 방안을 도출하는 방법을 제안할 수 있다.

한편 프레팅마멸 연구의 목적 중 중요한 것으로 마멸의 진행에 대한 모델을 개발하는 것이다. 대부분의 경우, 실제 조건의 모사에 대한 어려움과 더불어 마멸이 발생하기까지의 기간을 고려한 시험 역시 쉽지 않다. 따라서 많은 다른 공학문제에서와 같이 마멸 연구에서도 마멸 모델을 개발하는 시도가 계속되어 오고 있다. 이때 기구적으로 복잡한 마멸 현상을 일률적으로 나타낼 수 있는 모델을 개발하기는 어려우므로 각 특징적인 경우에 적용 가능한 모델을 개발하는 것이 효과적이다. 이러한 마멸모델을 개발하기 위해서도 전술한 실험적, 이론적 연구는 필수적이다.

본 연구에서는 현재 수행 중인 핵연료봉 프레팅마멸 연구의 일환으로 수중 분위기에서 지르칼로이-4 피복관과 지지격자 스프링의 접촉에 의해 발생하는 마멸을 공기 중의 경우와 비교해 보고자 하였다. 이때 발생한 마멸량 차이를 재료학적으로 분석하기 위해 전자현미경을 이용한 분석을 시도를 하였고 마멸면의 성분분석도 함께 수행한 결과를 보여 준다. 한편 기존에 개발되어 있는 마멸 모델을 검토한 후, 최근 핵연료봉 마멸에 대해 적용된 적이 있는 workrate 모델에, 물리적으로 적합한 전단하중을 고려하여 본 연구에서의 시험 결과를 분석하여 보았다. 특히 마멸 시험 결과로부터 분류한 미끄럼 상태의 차이에 대해 고찰하였으며, 이에 따라 핵연료봉의 마멸 손상의 예측을 위해서는 접촉면의 미끄럼 상태에 대한 분석이 선행되어야 함을 제안하였다.

2. 시 험

2.1 시편 및 시험 장치

본 연구의 시험에 사용한 지지격자 스프링 시편과 핵연료봉 피복관 시편의 재질은 모두 상용 경수로 핵연료를 위해 개발된 것으로서 재질은 지르칼로이-4 로 되어 있다. 피복관 시편의 외경은 9.5 mm, 두께는 0.6 mm 이며, 상용 핵연료봉의 제조에 사용되는 것을 절단하여 채취하였다. 스프링 시편으로는 두 가지의 다른 형상을 사용하였으며 두께 0.46 mm 의 지르칼로이-4 판재로부터 가공하여 제작하였다. 핵연료봉과 접촉하게 되는 스프링 접촉부는 편평하거나 오목한 형상을 가지고 있으며 각각의 특징을 표 1 에 정리하였다. 또 표 1 에는 본 연구에서와 동일한 시험을 수행하였던 앞선 연구[1]의 시편(스프링 1)의 특징을 함께 수록하여 결과의 비교에 참고가 되도록 하였다.

한편 시험에 사용한 장비는 그림 1 에 보여 주는 것과 같이 스프링 시편과 피복관 시편의 접촉에 의한 프레팅마멸 시험을 위해 개발된 것으로 앞서 발표된 연구[2]에 상세히 서술되어 있다. 시험을 시작하기 전 모든 시편은 아세톤으로 세척한 후 건조시켜 사용하였다. 피복관 시편의 표면에 발생한 마멸의 깊이 및 부피를 정확히 구하기 위해 시험 전에 시편의 표면 거칠기를 미리 측정하였으며 그 결과, 피복관 시편의 평균 거칠기(*Ra*)는 0.76 μm, 스프링 시편은 0.67 μm 이었다.

표 1. 지지격자 스프링 시편 형상의 특징.

Spring no.	Contact contour	End condition	Contact length intended	No. contacts
1	Flat	Clamped at both ends	2.6 mm	1
2	Flat	Cantilever	1.8 mm	1
3	Concave	Clamped at both ends	5.1 mm	1

2.2 시험 방법

시험은 상온에서 수행하였으며, 공기 중과 수중에서 시험하였다. 수중시험에서는 피복관 시편과 스프링 시편이 완전히 물 속에 잠기도록 하였다. 공기 중 시험에서는 앞선 연구[1]와 같이 시편 사이의 미끄럼 변위 범위(진폭의 두 배)를 10, 30, 50, 80, 100, 150 및 200 μm 로 하였으며 각각의 범위에 대해 10, 30 및 50 N 의 수직하중이 작용하는 경우에 대해 시험하였다. 이로부터 총 세 가지의 다른 형상을 갖는 스프링에 대한 프레팅마멸 시험 결과를 분석하도록 하였다. 한편 수중 시험은 공기 중 시험 결과 중 가장 마멸이 크게 발생한 수직하중 30 N 과 미끄럼 변위 범위 200 μm 에 대해 수행하였다. 모든 시험에서 미끄럼 방향은 축방향으로 고정하였으며 이는 앞선 시험에서 축방향의 시험 결과가 항상 횡방향의 경우에 비해 마멸량이 크게 나타났으므로 마멸량 비교를 용이하게 하기 위함이었다. 또 상대 운동의 반복 주파수는 30 Hz 로 하였으며 횟수는 100,000 회로 하였다.

시험 후 피복관 시편의 표면에 발생한 마멸 흔적은 측정 현미경을 이용하여 전체적인 외부 형상 및 치수를 측정한 다음, 표면 거칠기 측정장비에서 마멸부의 깊이를 측정하였다. 표면 거칠기 측정장비에서 생성되는 마멸부의 3 차원 데이터로부터 기 개발된 마멸부피 계산 프로그램[3]을 이용하여 마멸 부피를 계산하였다.

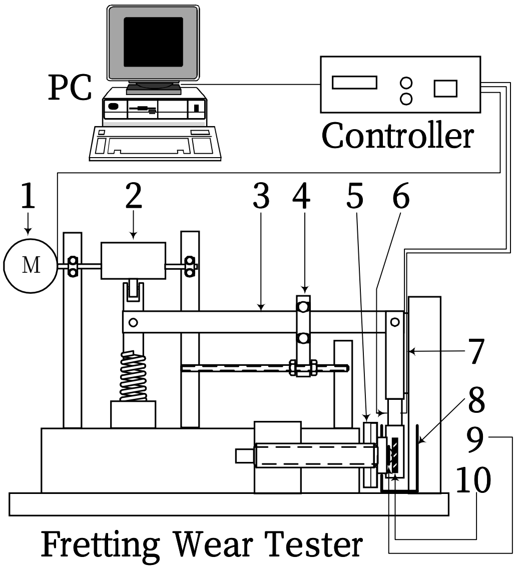


그림 1. 프레팅마멸 시험장비 개요도.

3. 마멸모델의 검토

원자로 내에서의 핵연료봉과 지지격자 스프링(또는 딤플) 접촉에서 나타나는 프레팅마멸을 예측할 수 있다면 핵연료의 안전성 제고를 위해 매우 가치 있을 것이다. 이를 위한 가장 직접적인 시험 방법은 원자로 운전 중 핵연료봉에 나타나는 마멸을 계속 측정하는 것이 겠으나 이것이 불가능하므로 실험실 규모의 시험을 하고 이로부터 원자로 내에서의 핵연료봉 마멸을 예측할 수 있는 모델을 개발하려는 노력이 있어 왔다. 그러나 마멸 현상 자체가 매우 복잡하며 이에 따라 시험조건에 따른 결과의 분산 정도도 매우 크므로 일반적인 모델을 개발하기는 매우 어렵다고 사료된다. 이것은 근래에 발표된 연구[4]에 의하면 1957 년부터 1992 년까지 마멸 학술지에 발표된 마멸 모델 관련 연구의 수가 5400 건이 넘고 연구자의 수도 5300 명 이상이라고 보고하고 있으며 모델에 이용된 파라미터의 수도 100 개를 초과하였다는 것으로부터 쉽게 짐작할 수 있다.

그러나 이것은 일반적인 경우를 모두 설명할 수 있는 모델을 개발하는 것이 힘들다는 것으로 이해할 수 있으며 어떤 특정한 경우에 대한 모델을 개발하는 것은 충분한 가치가 있다고 사료된다. 본 절에서는 기존에 발표된 마멸 모델의 형태에 대해 분석하고 핵연료봉에 나타나는 마멸을 분석하는 데에 적용할 가능성이 있는 모델에 대해 고찰하고자 하였다.

일반적으로 모델 개발을 위해 고려하는 것처럼 핵연료봉 마멸 모델에 있어서도 우선 고려하여야 하는 것이 서로 연관 지을 수 있는 파라미터를 제안하는 것이다. 이것은 발생한 마멸을 정량화하는 것과 마멸을 일으키는 데에 영향을 미친 변수의 두 가지로 생각할 수 있다. 마멸량에 대한 정량화로는 마멸부의 무게, 깊이 또는 체적으로 비교적 간단히 정리할 수 있으나, 마멸을 발생시키는 데에 영향을 미친 파라미터로는 수직하중, 전단하중, 상대미끄럼 변위 등을 포함하여 마멸 시험에 사용되는 수많은 시험 변수들을 포함시킬 수 있을 것이다. 이에 따라 많은 마멸 모델이 제안되었음을 생각할 수 있다. 본 연구에서는 응착마멸(adhesive wear)의 경우에 제안되었던 Archard 모델[5]과 이로부터 유도된 Workrate 모델[6]에 대해 고찰해 보기로 한다.

Archard 모델은 미끄럼마멸(sliding wear)인 경우의 모델로서 마멸부피가 두 접촉물체 간의 접촉 수직하중과 미끄럼 거리에 비례하고 두 접촉물체의 경도 중 낮은 값에 반비례한다는 것으로 다음과 같이 나타낸 것이다.

$$V = K\frac{Ps}{3H} \quad \text{또는} \quad V = K\frac{Ps}{p_m}, \tag{1}$$

여기서 V는 마멸 부피이며, K는 접촉물체의 성질과 접촉 주변의 분위기에 영향을 받는 무차원의 마멸계수이고 P와 s는 각각 접촉 수직하중과 미끄럼 거리이다. 그리고 H는 두 물체 중 낮은 경도 값이며 그 앞의 3이란 숫자는 응착마멸에서 접촉면의 돌기부가 반구형이라고 가정하였던 때문에 나타난 것이다. 한편, 식 (1)의 우측 식에서 p_m은 낮은 경도를 갖는 물체의 Flow pressure로서 경도와 유사한 의미를 갖는 값이다. 이 모델은 핵연료공급자인 Westinghouse사에 의해 사용된 적이 있다[7]. 이 Archard 모델은 많은 미끄럼마멸의 경우에 마멸량을 잘 예측할 수 있었다. 그러나, 경우에 따라, 순수한 구리(낮은 경도)의 마멸이 AISI 1045강(높은 경도)의 마멸보다 오히려 마멸저항성이 더 큰 경우도 발견됨에 따라 낮은 경도를 분모에로 한 것에 대한 문제점이 제시되기도 하였다[8].

이에 따라 Archard 모델에서 분모의 경도에 의한 영향을 마멸계수에 포함시켜 단순화한 다음의 모델을 생각할 수 있게 되었다.

$$V = KPs. \tag{2}$$

이때 새로운 마멸계수 K는 m^2/N 또는 Pa^{-1}의 차원을 갖게 된다.

원자력발전소 증기발생기 전열관의 프레팅마멸에 대한 상세한 실험적 연구에서는 프레팅마멸에 영향을 미치는 주된 인자가 접촉 수직하중이 아니라 접촉 전단하중이라는 것이 밝혀졌고 따라서 충격(impacting 또는 tapping)이 존재할 때에도 두 물체 사이의 법선으로부터 비스듬한 방향으로의 충격이 작용할 때(즉 이로부터 전단하중을 고려할 수 있을 때) 마멸의 발생이 심하다는 것이 발표되었으며 이로부터 마멸 거동을 나타낼 수 있는 “Forcing Function”이라는 파라미터가 개발되기도 하였다[9]. 이 파라미터를 구하기 위해 접촉물체 사이에서 수직 및 전단하중으로의 분해가 필요하였으며 이때 접촉 순간의 상대 변위를 이용하였다.

이와 같이 접촉 순간의 상대 변위 또는 하중을 고려하게 된 것으로부터 일률(workrate)라는 개념을 사용하기 시작하였다[6]. 이 개념은 다음 식과 같이 마멸 부피의 증가율이 일률과 비례한다고 생각한 것이다.

$$\dot{V} = K\dot{W}, \quad \text{여기서} \quad \dot{W} = \frac{1}{t}\int P\,ds. \tag{3}$$

식 (3)에서 $\dot{V}$는 마멸 부피의 증가율이고 $\dot{W}$은 일률이다. 한편 이때의 마멸계수 K는 식 (2)에서

와 같이 m^2/N 또는 Pa^{-1}의 차원을 갖게 된다.

Workrate 모델의 장점은 관심을 갖는 변수의 시간에 대한 미분의 개념을 사용한 것이다. 즉 마멸이 발생되는 실제 구조물은, 대부분의 경우, 장시간 마멸이 발생되는 조건 하에 놓이고 따라서 그 전체 기간 동안 시험을 수행하는 것이 불가능할 경우가 많아 실제 마멸 조건의 일률을 시험조건으로 하면 가속 시험 및 전체 마멸량의 예측 등이 가능하게 된다. 예를 들면 핵연료봉과 지지격자의 접촉에 의한 마멸의 경우 핵연료집합체의 노내 수명이 3 년 정도임을 감안할 때 그 기간 동안 시험을 하기는 힘들다. 이때 지지격자체에 의한 핵연료봉의 접촉 조건과 핵연료봉의 유체유발 진동을 파악 또는 예측하고 이로부터 일률을 추정하여 마멸 시험을 한다면 실제의 경우를 최대한 모사하는 시험이 될 수 있으며 또한 결과의 신뢰성도 높아질 것이다. 실제 이와 같은 개념으로 핵연료봉의 마멸시험을 수행하여 본 논문의 주저자에 의해 주장되었던, 축방향의 미끄럼에 의한 마멸을 중요히 고려하여야 한다는 것[10]을 시험으로부터 보여주는 연구 결과도 최근에 발표되었다[11]. 본 연구에서는 표 1 에 나타낸 지지격자 스프링과의 접촉에 의한 피복관 마멸 결과를 workrate 모델을 이용하여 분석하여 보았으며 이를 다음 절에 서술하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 부분미끄럼과 전미끄럼 상태의 마멸

표 1 에 나타낸 세 가지의 스프링 시편을 피복관 시편에 접촉시켜 마멸 시험을 한 후 마멸의 깊이를 측정하고 부피를 계산한 결과를 요약하여 표 2 에서 표 4 까지에 나타내었다. 한편 마멸 부위를 관찰하여 접촉부 경계에서만 마멸이 발생한 부분미끄럼의 경우를 “Type 1”이라 하고 접촉부 전체에서 마멸이 발생한 전미끄럼의 경우를 “Type 2”라 하여 구분하였다(표 2 에서 표 4 에는 어두운 부분이 Type 2 에 해당하도록 음영으로도 구분됨). 이로부터 본 연구의 시험에서도 역시 진폭이 크고 수직하중이 작을수록 전미끄럼 상태가 되고, 진폭이 작고 수직하중이 클수록 부분미끄럼 상태가 되는 것을 알 수 있다. 한편 기록이 되지 않은 부분은 부분 또는 전미끄럼 상태를 명백히 유추할 수 있는 경우이어서 시험을 수행하지 않은 것이다.

4.2 수중시험에서의 마멸결과 분석

원자로 내에서 핵연료는 냉각수에 잠겨 있는 상태이므로 수중 분위기가 지지격자체와 핵연료봉의 접촉에 의한 마멸에 영향을 미치는 것에 대한 시험을 수행하였다. 본 연구에서는 이에 대한 기초단계로서 원자로 내의 냉각수 온도, 압력 및 화학적 성질에 대해서는 모사하지 않았으며 이에 대해서는 향후에 연구를 지속하고자 한다. 따라서 각 시편을 상온의 물 속에 잠기도록 하여 4.1 절에서와 같은 프레팅마멸 시험을 수행하였다. 마멸에 영향을 미치는 조건으로서 우선 수중 분위기를 선택한 이유는 핵연료봉과 지지격자체 사이의 접촉부에 물이 존재할 경우 생각할 수 있는 두 가지의 상반된 영향, 즉 윤활과 냉각이라는 영향을 살펴 볼 수 있을 것으로 생각하였기 때문이다. 접촉부에 윤활막이 형성되면 일반적으로 마멸이 적게 발생하는 것으로 생각할 수 있으나 핵연료봉 마멸의 경우 지지격자체와의 접촉부에서의 나타나게 될 응착현상이 공기 중의 경우에 비해 적

표 2. 스프링 형상 1 에 의한 마멸시험 결과[1].

P / δ	10 N			30 N			50 N		
	Depth (μm)	Volume (10^{-6} mm^3)	Wear Type	Depth (μm)	Volume (10^{-6} mm^3)	Wear Type	Depth (μm)	Volume (10^{-6} mm^3)	Wear Type
10 μm	10.51	62.36	1	7.02	20.24	1	-	-	-
30 μm	5.30	31.02	1	9.29	32.30	1	9.74	42.89	1
50 μm	8.08	500.57	2	16.98	83.82	1	2.47	3.10	1
80 μm	19.11	1258.40	2	20.84	3057.93	2	23.36	198.91	1
100 μm	-	-	-	29.81	5417.76	2	26.03	5063.47	2
150 μm	-	-	-	39.84	11203.71	2	-	-	-
200 μm	-	-	-	50.98	22016.01	2	-	-	-

표 3. 스프링 형상 2 에 의한 마멸시험 결과.

P / δ	10 N			30 N			50 N		
	Depth (μm)	Volume (10^{-6} mm^3)	Wear Type	Depth (μm)	Volume (10^{-6} mm^3)	Wear Type	Depth (μm)	Volume (10^{-6} mm^3)	Wear Type
10 μm	34.81	627.01	1	7.98	36.39	1	-	-	-
30 μm	15.53	197.21	1	4.71	5.16	1	-	-	-
50 μm	29.76	1733.54	2	10.24	153.90	1	3.34	3.85	1
80 μm	-	-	-	32.25	3942.98	2	13.31	109.08	1
100 μm	-	-	-	33.83	9023.89	2	25.85	3563.80	2
150 μm	-	-	-	57.65	15367.59	2	-	-	-
200 μm	-	-	-	72.48	28758.87	2	-	-	-

표 4. 스프링 형상 3 에 의한 마멸시험 결과.

P / δ	10 N			30 N			50 N		
	Depth (μm)	Volume (10^{-6} mm^3)	Wear Type	Depth (μm)	Volume (10^{-6} mm^3)	Wear Type	Depth (μm)	Volume (10^{-6} mm^3)	Wear Type
10 μm	None detected			None detected			-	-	-
30 μm	10.51	131.60	1	5.29	7.67	1	-	-	-
50 μm	9.11	166.00	1	21.48	306.27	1	5.06	7.81	1
80 μm	-	-	-	25.56	1507.69	2	31.19	427.51	1
100 μm	-	-	-	29.35	8061.99	2	38.99	7785.63	2
150 μm	-	-	-	46.53	13359.10	2	-	-	-
200 μm	-	-	-	52.14	25632.82	2	-	-	-

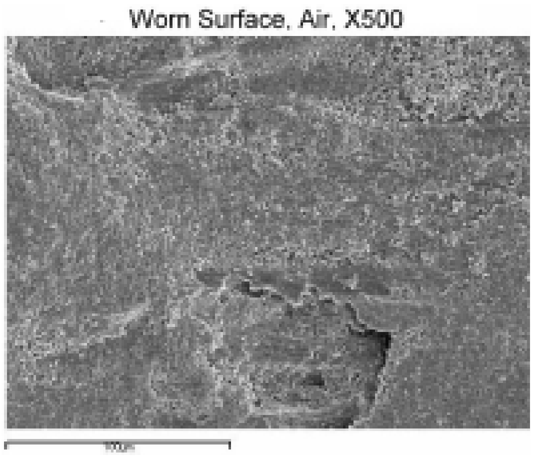
을 것이므로 상대 미끄럼 운동이 더욱 원활해져서 마멸이 심해질 수도 있을 것이다. 또 다른 한편으로 접촉부에서 상대 미끄럼 운동에 의해 발생하는 열이 물에 의해 쉽게 방출되는 냉각의 효과를 고려한다면 열의 발생과 밀접한 연관이 있는 접촉부의 산화가 적게 발생할 것으로 추정할 수 있고 산화 지르코늄(ZrO_2)의 경도가 순수 지르코늄에 비해 현저히 큰 것을 고려할 때 물 속에서의

마멸 발생이 더욱 클 것으로도 추정할 수 있다.

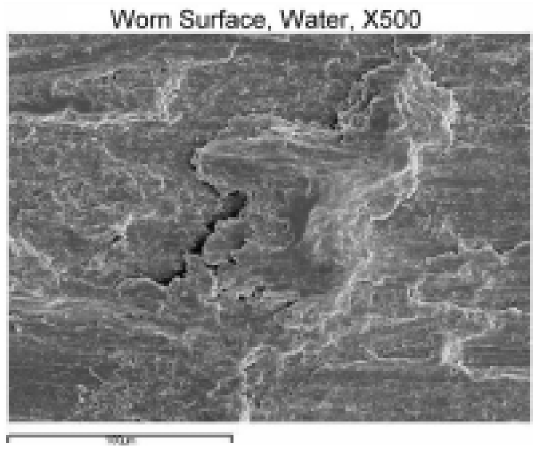
이를 위한 시험 조건으로서 최대로 마멸이 발생한 경우의 시험 조건인 접촉 수직하중 30 N, 상대 미끄럼 변위범위 200 μm 를 선택하였다. 표 5 에 정리된 이 시험 결과로부터 수중 시험에서의 마멸부피가 공기 중 시험에서의 마멸부피보다 항상 크며 특히 접촉부가 편평한 스프링(스프링 형상 1 및 2)에 의한 접촉에서 그 차이가 현저히 발생함을 알 수 있었다. 특이한 것은 접촉부가 오목한 경우(스프링 형상 3)에는 편평한 스프링에 의한 접촉에서와는 달리 수중 시험에서 나타난 마

표 5. 공기 중 및 수중 시험에서의 마멸 시험 결과(30 N, 200 μm 인 경우).

Spring no.	1		2		3	
Wear	Depth[1] (μm)	Volume[2] (10^{-6} mm^3)	Depth	Volume	Depth	Volume
Air[a)]	50.98	22016.01	72.48	28758.87	52.14	25632.82
Water[b)]	103.61	70453.19	101.66	92775.42	36.34	31553.63
b) / a)	2.03	3.20	1.40	3.23	0.70	1.23

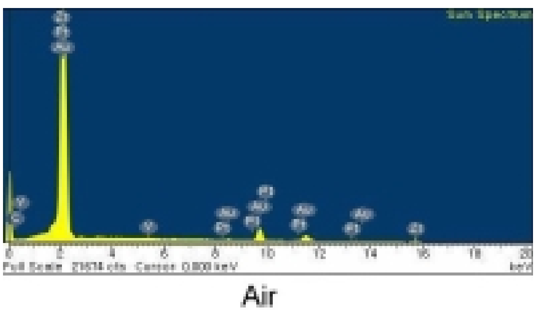


(a)

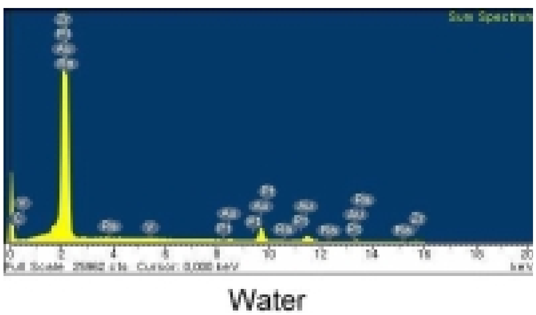


(b)

그림 2. 전자현미경에 의한 접촉면 형상; (a) 공기 중 및 (b) 수중 마멸시험 결과.



(a)



(b)

그림 3. 전자현미경에 의한 접촉면 성분 분석; (a) 공기 중 및 (b) 수중 마멸시험 결과 (두 경우 모두 산소 성분의 검출이 없었음).

멸 깊이가 공기 중의 경우에 비해 오히려 작아졌음을 알 수 있고 부피의 차이도 그리 크지 않게

나타났다.

이와 같은 결과로부터 접촉면의 변화 및 산화에 대한 분석을 위해 전자현미경을 이용하여 재료학적 분석을 시도하였다. 그림 2 에는 공기 중 및 수중에서 마멸 시험한 후 피복관 접촉면을 500 배로 확대하여 각각의 경우에 대한 특징적인 경우를 보여 주고 있다. 공기 중에서 시험한 경우, 마멸면에는 매우 작은 입자들이 분산되어 있는 것을 볼 수 있으나 수중 시험에서는 그러한 입자보다 상당히 큰 덩어리가 표면으로부터 박리되는 모습을 관찰할 수 있다. 이것으로부터 공기 중과 물속에서 접촉면으로부터의 마멸입자 형태와 이탈 형식에 차이가 있는 것으로 생각할 수 있다. 즉 공기 중에 비해 물속에서 큰 마멸입자가 형성되어 접촉면으로부터 이탈되는 것으로 사료되며 따라서 물속에서의 마멸부피가 더 크게 나타난 이유로 생각된다. 공기 중에서의 마멸입자의 크기가 작은 이유에 대해서는 더 깊이 분석하여야 할 것이나 산화에 의한 경도 증가를 우선적으로 고려하였다.

본 연구에서 사용한 전자현미경은 금속 성분을 분석하는 기능을 동시에 갖고 있는 것이어서 마멸면의 성분을 분석하였으며 그 결과를 그림 3 에 보여 준다. 예상한 것과는 달리 공기 중에서와 물속에서의 마멸면 모두에 산소 성분이 검출되지 않았으며 따라서 공기 중 시험에서 산화막 형성에 의해 마멸량이 감소하였을 것이라고 한 가정은 검증되지 않았다. 즉, 현재의 분석 결과로부터는 본 연구에서 수행한 공기 중과 수중 시험에서 산화막에 의한 영향을 고려할 수는 없었다. 따라서 전자 현미경으로부터 관찰된 공기 중과 수중 시험에서의 마멸입자 크기의 차이와 이로부터 유추할 수 있는 마멸입자 이탈 형식의 차이를 설명하기 위해서는 각각의 경우에서 생각할 수 있는 다른 효과, 예를 들어 접촉면에서 발생한 온도의 차이를 고려하여야 하지 않을까 사료된다. 그러나 본 연구에서는 온도의 영향에 대한 분석은 수행하지 못하였으며, 향후 관련 재료학적 연구를 좀 더 수행하여 본 연구에서 관찰된 결과를 설명할 수 있도록 할 계획이다.

4.3 마멸모델 분석

식 (3)에서의 workrate 모델을 핵연료봉에서의 마멸 결과에 이용할 때 접촉 수직하중 P 는 핵연료봉에 의해 지지격자 스프링이 압축되는 변위에 해당하는 하중이 된다. 그러나 이미 알려진 대로 마멸에 영향을 미치는 하중의 방향은 접촉면에 접선 방향으로서[9] 접촉 수직하중 대신 전단하중을 고려하여야 할 필요가 있다고 사료된다. 이것은 앞서 예를 든 Archard 모델이나 workrate 모델이 마멸 부피와 접촉면에서의 에너지(일)를 관련지은 것임을 생각할 때 미끄럼 변위의 방향과 하중의 방향이 일치하여야 물리적으로 일이 존재할 수 있기 때문이기도 하다. 즉 수직하중과 미끄럼 변위의 방향은 서로 직각이므로 이들의 벡터 곱(cross product)은 0 이 되어 일을 정의할 수 없기 때문이다.

전단하중을 고려할 경우 접촉면 전체에서 미끄럼이 발생하는 전미끄럼 상태일 때에는 수직하중에 단순히 마찰계수를 곱하여 구할 수 있겠으나(즉 전단하중과 마찰력이 같으나) 접촉면 일부분에서 미끄럼이 발생하는 부분미끄럼인 경우에는 전단하중이 마찰력보다 작으므로 마찰계수만으로는 전단하중을 구할 수 없다. 본 연구에서의 시험 결과에서는 부분미끄럼의 경우도 분명히 존재하므로(표 2 에서 표 4 참조) 전단하중을 고려하기 위해 프레팅마멸 시험 중 시험장비에 자동으로 저

장되는 전단하중을 이용하였다. 따라서 본 연구에서 사용한 workrate 모델은 다음과 같이 정의하였다.

$$\dot{V} = K\dot{W}\ ,\ \text{여기서}\ \ \dot{W} = \frac{1}{t}\int Qds\ . \qquad (4)$$

이때 식 (4) 우측의 적분은 전단하중이 sine 파 형태를 가지므로 그 내부의 면적이 된다.

그림 4 에는 표 2 부터 표 4 까지에 나타나 있는 마멸 부피의 결과를 이용하고, 또 식 (4)를 사용하여 전단하중이 고려된 workrate 와 마멸 부피의 증가율과의 관계를 나타낸 것이다. 이때 각 스프링 형태에 대해 세 가지의 수직하중을 구분하고 또 부분미끄럼과 전미끄럼의 경우를 구분하였다. 그림 4 의 결과로부터 한가지 흥미로운 결과는 미끄럼 상태에 따른 마멸계수 K(여기서는 명백히 정량화 되지 않은 기울기를 말함)의 변화가 분명하게 관찰된 것이다. 즉 부분미끄럼 상태에서는 workrate 의 증가에 무관하게 마멸 부피의 증가율이 거의 없는 것처럼 보일 정도로 K 값이 작았으나 전미끄럼 상태가 시작되면서부터는 마멸 부피의 증가율이 선형적으로 증가하여 K 값이 부분미끄럼의 경우에 비해 현저히 증가하였으며, 이러한 현상은 스프링의 형태에 관계 없이 나타나는 것을 알 수 있다.

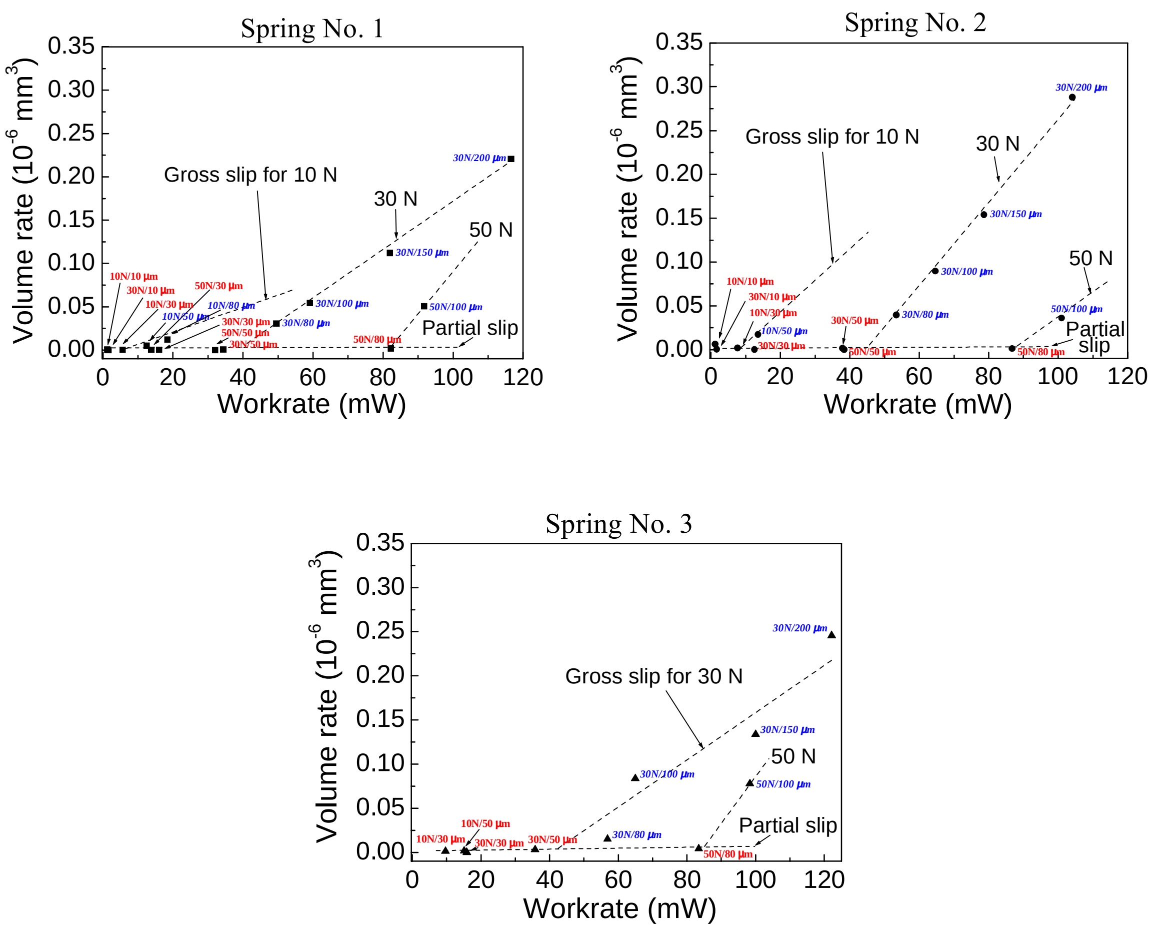


그림 4. 전단하중을 고려한 workrate 모델을 이용하여 분석한 마멸시험 결과(굵은 글씨: 부분미끄

럼, 기운 글씨: 전미끄럼).

마멸계수 K의 크기가 매우 작은 부분미끄럼의 경우에는 workrate의 변화에 따른 마멸 부피의 변화가 거의 없으므로 핵연료봉의 프레팅마멸 손상을 억제하기 위해서는 지지격자체와의 접촉부에 부분미끄럼 상태가 유지될 수 있도록 하는 것이 필요하다. 본 시험에서 사용한 하중 및 미끄럼 변위 조건과, 앞선 연구 결과에서 전미끄럼이 발생하기 위한 조건에서 예상할 수 있는 핵연료봉간의 충돌[1]을 고려할 때 지지격자 스프링이 건전할 경우에는 부분미끄럼 상태가 유지될 것으로 생각할 수 있다. 그러나 원자로 내에서의 열 및 조사적 조건에 의해 스프링의 특성이 변하여 접촉력이 줄어들고 이로부터 미끄럼 변위 범위가 증가하면 전미끄럼의 상태로 되게 되므로 마멸의 발생이 현저히 증가하게 될 것을 예상할 수 있다. 따라서 지지격자 스프링의 설계 시에 핵연료봉과의 접촉면에서 가능한 오랫동안 부분미끄럼 상태를 유지할 수 있도록 하는 것이 요구되며, 이와 함께 마멸 거동의 평가와 손상 예측을 위해서는 미끄럼 상태를 먼저 분석하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 핵연료집합체의 지지격자 스프링의 형상을 달리하며 핵연료봉 피복관과의 접촉에 의한 프레팅마멸을 공기 중 및 수중 분위기에서 시험하여 그 영향을 분석하는 한편, 접촉면에서의 전단하중을 고려한 workrate 모델을 적용하여 부분미끄럼과 전미끄럼 상태에서의 차이를 고찰한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 스프링의 형상에 무관하게 피복관과 스프링 사이의 상대운동 변위범위가 크고 수직하중이 작을수록 전미끄럼 상태가 되고, 진폭이 작고 수직하중이 클수록 부분미끄럼 상태가 된다.
2. 수중에서의 마멸 발생은 공기 중에서보다 현저히 심하게 발생한다. 전자 현미경을 이용한 재료학적 분석으로부터 이것은 마멸입자의 크기 및 이탈 형태가 상이한 때문으로 판단되었으며 접촉면의 산화는 발생하지 않은 것으로 관찰되었다. 따라서 수중에서 마멸이 심한 이유는 냉각보다는 윤활효과에 의해 접촉면에서의 응착현상이 완화됨으로써 상대 미끄럼 운동이 더욱 원활해지기 때문으로 사료되었다. 그러나 이에 대한 좀 더 명백한 이유를 찾기 위해 심도 있는 재료학적 분석이 필요할 것으로 생각된다.
3. 전단하중을 고려한 workrate 마멸모델에서 부분미끄럼과 전미끄럼 상태의 마멸계수 K 값에 분명한 차이를 보였다. 즉 부분미끄럼 상태에서보다 전미끄럼일 경우에 K 값이 현저히 크다. 따라서 핵연료봉의 프레팅마멸을 억제하기 위해서는 지지격자체와의 접촉면에 부분미끄럼 상태를 가능한 오래 유지되도록 함이 필요하며, 핵연료봉의 프레팅 마멸손상 예측을 위해 우선 접촉면 상의 미끄럼 상태를 파악하는 것이 중요하다고 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었으며 마멸부의 전자현미경 관

찰 및 마멸모델을 위한 데이터 처리에 많은 도움을 주신 김현길 군과 박순종 군에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김형규 외 3 인, 한국원자력학회 2001 춘계학술발표회 논문집, 논문번호 121.
2. 김형규 외 4 인, 한국원자력학회 2000 추계학술발표회 논문집, 논문번호 59.
3. 김형규, 김선재, 한국윤활학회지, 17(1) (2001) 33-39.
4. H.C. Meng and K.C. Ludema, Wear, 181-183 (1995) 443-457.
5. J.F. Archard, J. Appl. Phys. 24 (1953) 981-988.
6. T.M. Frick, T.E. Sobek and J.R. Reavis, ASME Special Publications (1984) 149-161.
7. Fuel Assembly Design Manual (1988) Westinghouse Electric Corporation.
8. N.P. Suh, Tribophysics (1986) Prentice-Hall.
9. P.L. Ko, Wear, 106 (1985) 261-281.
10. Hyugn-Kyu Kim, Nucl. Engng. Des., 192(1) (1999) 81-93.
11. T.P. Joulin et al., Trans. SmiRT-16 (2001) paper no. 1239.