'2004 춘계학술발표회 논문집

한국원자력학회

고온 물속에서의 스프링 특성에 따른 핵연료피복관의 마멸거동

Effect of Spring Properties on the Wear Behaviors of Nuclear Fuel Rod in High Temperature Distilled Water

이 영 호, 김 형 규, 정 연 호

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150번지

요 약

물속에서 핵연료 피복관의 프레팅 마멸시험을 수행하였으며 온도에 따른 마멸거동을 관찰하였다. 고온물속에서의 마멸거동은 매우 큰 특징을 보였는데, 온도가 증가함에 따라 마멸량이 급격히 감소하는 것을 관찰하였다. 이러한 원인을 규명하기 위하여 마멸시험 후 손상면에 대한 광학현미경 관찰을 수행하였으며, 그 결과 상온 물속조건에서는 마멸입자가 방출되는 과정에서 마멸입자에 의한 third body abrasion 경향이 나타났다. 또한 고온 물속에서도 마멸 손상면 주위에 산화물이 넓게 분포된 것을 확인하였다. 그러나 이러한 마멸입자의 영향만으로는 급격한 마멸량의 감소를 설명하기에는 불충분한 것으로 판단하였다. 이에 따라 고온 물속에서의 스프링의 기계적 특성변화를 온도변화에 따른 하중-변위 곡선으로 관찰하였으며 그 결과 본 실험에 사용된 스프링의 강성이 실제 가동온도에서 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 결국 마멸량의 급격한 감소는 마멸면 혹은 마멸입자의 산화에 의한 Load-bearing layer형성보다는 스프링 강성 감소에 의한 실제 접촉면에서의 상대미끄럼 변위의 감소가 주된 원인으로 생각된다.

Abstract

Sliding wear tests have been carried out in room and high temperature distilled water in order to evaluate the effect of test temperature on the wear behavior of nuclear fuel rods. In high temperature water, wear volume was dramatically decreased compared with room temperature water condition. However, test temperature did not have a significant effect on the the maximum wear depth of fuel rod. This means third body abrasion due to wear particles accelerates the increase of wear volume in room temperature water. But it is not enough to explain the difference of wear volume only with wear particle behavior between contact areas. To evaluate the cause of wear volume difference, a load-displacement test in high temperature water was conducted and we concluded that relatively low wear volume was affected by smaller slip displacement due to the decrease of spring stiffness.

1. 서론

경수로 원전에 사용되는 핵연료집합체의 건전성은 운전조건이 경제성 및 안전성 향상을 위하여 매우 필수적이다. 이에 따라 핵연료 개발자는 가동조건하에서 고연소도, 장주기 특성을 가지는 집합체의 개발을 위하여 다양한 종류의 설계를 수행하고 있다. 특히 핵연료 집합체의 지지격자체는 가동조건하에서 유체유발진동에 의해 발생가능한 연료봉의 프레팅 손상을 방지하기 위하여 다양한 형상의 지지격자체 스프링/딤플이 개발되었다. 개발된 핵연료집합체의 부품을 실제 적용하기 위해서는 여러 종류의 실험이 수행되는데 이중에서 프레팅 마멸은 가동중 핵연료 피복관의 건전성을 평가하는 중요한 시험중의 하나이다.

고온고압환경에서 사용되는 핵연료집합체는 빠른 유속을 가진 냉각수에 의해 불규칙적인 진동이 발생하며 이때 핵연료봉과 지지격자 스프링/딤플 사이에서 상대적인 미끄럼 변위로 인해 프레팅 손상이 발생한다. 프레팅 손상을 억제하기 위해서는 가급적 이러한 미끄럼 변위의 발생을 억제하는 부품 설계가 수행되지만 정확한 진동특성을 획득하는 것은 거의 불가능하므로 이를 모사한 다양한 실험조건으로 수행되고 있다. 특히 캐나다 AECL의 경우, 수직방향의 연료봉에 대하여 90° 간격으로 스프링 및 딤플을 설치하여 고온고압 조건에서 프레팅 마멸시험을 수행하고 있으나 이때의 실험은 일정한 틈새를 유지한 조건하에서만 적용되고 있다. 따라서 일정한 접촉하중이 존재하고 있는 상태에서의 프레팅 마멸시험결과는 현재까지 없는 실정이다. 이것은 핵연료봉과 스프링/딤플 사이의 접촉이 가동시간이 증가함에 따라 스프링/딤플의 강성에 의한 접촉에서 고온에서의 재질 열화, 조사에 의한 틈새조건으로 천이하는 것을 고려해 볼 때 초기 프레팅 마멸특성에 대한 중요한 데이터 획득과 밀접한 관련이 있다. 이에 따라 본 연구에서는 핵연료봉과 스프링사이에 접촉력이 존재할 때 미끄럼 변위에 따른 프레팅 마멸시험을 고온고압 물속에서 수행하였으며 그 결과를 상온 시험과 비교하여 온도증가에 따른 핵연료봉의 프레팅 마멸경향을 조사하였다.

2. 실험관련

(1) 시편

고온 물속에서의 프레팅 마멸시험에 사용된 핵연료봉 및 스프링은 국내외에서 널리 사용되고 있는 Zircaloy-4를 개량한 Zirlo를 사용하였다. 연료봉 시편은 50 mm로 절단하여 사용하였고 이에 대한 상대 마멸시편으로 지지격자 스프링을 사용하였는데 여기서 사용된 스프링 형상의 개략도를 그림 1에 나타내었다. 그림에서와 같이 시험에 사용된 스프링은 연료봉의 축방향으로 긴 접촉이 이루어 지게 되며 접촉하중이 증가함에 따라 접촉점의 개수가 증가하는 것이 특징이다.

(2) 실험 조건 및 마멸시험기

본 연구의 목표는 상온 및 고온 물속에서의 마멸경향을 분석하는 것이며 이에 따라 다양한 조건에서의 마멸시험을 수행할 수 있는 자체 개발한 마멸시험기를 사용하였고 그 개략적인 모습을 그림 2에 나타내었다. 온도 증가에 따른 마멸특성을 비교하기 위하여 동일한 실험 변수를 적용하였으며 실험조건으로서 10 N의 수직하중하에서 30 ~ 100 ㎛의 상대진폭, 30 Hz의 주파수, 그리고 10만 사이클의 왕복미끄럼 마멸시험을 상온 및 고온 물속(300℃)에서 수행하였다. 또한 같은 시편에 대하여 2회 이상 반복 실험을 수행하여 온도 및 미끄럼 변위 증가에 따른 마멸 경향을 을

비교하였다. 두 마멸시험기의 공통점은 회전속도를 조절할 수 있는 모터에 편심원통과 지렛대를 이용하여 상대진폭 및 주파수를 조절할 수 있는점이며 차이점으로는 고온 마멸시험기의 경우 일정한 접촉하중 뿐만 아니라 충격하중까지 적용히 가능한 점이다. 두 시험기 모두 실시간으로 실험과정동안 하중 및 진폭 등과 관련된 외부변수 데이터는 모두 실시간으로 관찰 및 저장할 수 있도록 설계되었다.

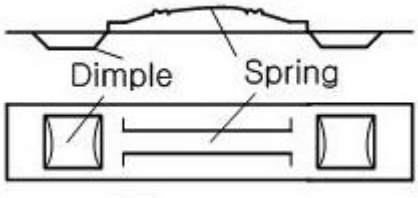
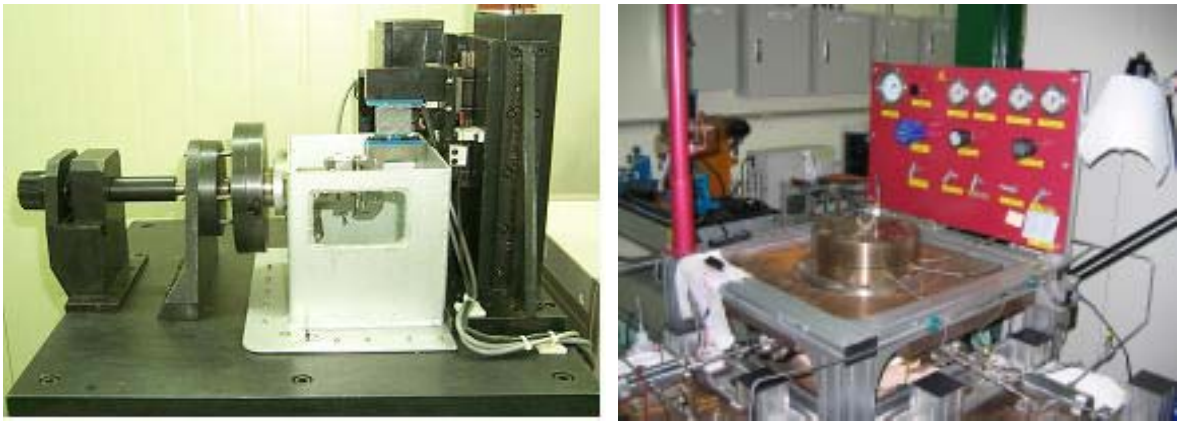


그림 1. 실험에 사용된 스프링의 개략적인 형상.



(a) 상온 마멸 시험기 (b) 고온 마멸 시험기

그림 2. 상온 및 고온 마멸시험기 개략도.

(3) 결과 분석

상온 및 고온 물속에서이 마멸시험을 수행한 뒤 연료봉의 손상면을 광학현미경을 사용하여 관찰하였으며 마멸면에서의 입자거동 및 마멸면적의 크기를 측정하였다. 마멸부피를 측정하기 위하여 표면조도계를 이용하여 마멸면에 대한 2차원 형상을 획득한 후 이를 이용하여 최대 마멸깊이 및 마멸부피를 계산하였다. 표면조도계를 이용하여 마멸부피를 계산하는 방법은 기존의 문헌을 참고할 수 있다[1, 2].

(4) 하중-변위 곡선

본 실험에 사용된 스프링의 하중-변위 곡선을 마멸시험결과 분석에 적용하기 위하여 고온 마멸시험기를 사용하여 획득하였다. 시험은 상온에서 300℃까지 50℃ 간격으로 최대 0.5㎜를 누른 후 그때의 하중값을 측정하여 산출하였으며 가급적 탄성영역에서 수행하여 스프링의 변형을 방지하였다. 본 실험에서 사용된 스프링의 하중-변위곡선을 다른 스프링과 비교하기 위하여 (주)한전원

전연료에서 한국표준원전용 개량핵연료(PLUS-7)의 중간 지지격자체로 개발한 KAFD 스프링에 대한 하중-변위 시험을 같은 조건으로 수행하였다.

3. 실험 결과

(1) 마멸부피의 변화

고온 물속에서 마멸시험을 수행한 후 마멸부피 측정을 위해 표면조도계를 이용하여 손상면에 대한 2차원 프로파일을 측정한 뒤 부피로 환산하였다. 미끄럼 진폭이 증가함에 따른 마멸부피의 변화를 그림 3에 나타내었으며 그 결과 진폭이 증가함에 따라 마멸부피는 서서히 증가하는 경향을 보였다. 그러나 이러한 결과는 사각형으로 표시한 상온 물속의 결과와 비교해 볼 때 마멸부피가 매우 적게 나타난 것을 알 수 있다. 특히 상온 물속에서의 마멸부피는 80 μm의 미끄럼 진폭에서 급격히 증가하는 경향과는 달리 고온 물속에서는 마멸부피의 급격한 증가는 보이지 않았다. 일반적으로 마멸부피는 온도가 증가함에 따라 서서히 증가하다가 약 200℃에서 최대값을 보인후 다소 감소하는 보고가 있다[3]. 그러나 본 시험에서 나타난 고온 물속에서의 급격한 마멸부피의 감소는 상기 문헌과는 매우 다른 결과이며 이러한 원인을 규명하기 위해서는 자세한 손상면 관찰이 필요한 것으로 판단하였다.

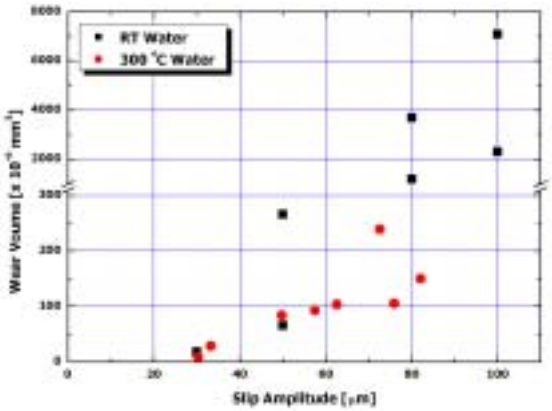


그림 3. 진폭에 따른 마멸부피의 변화.

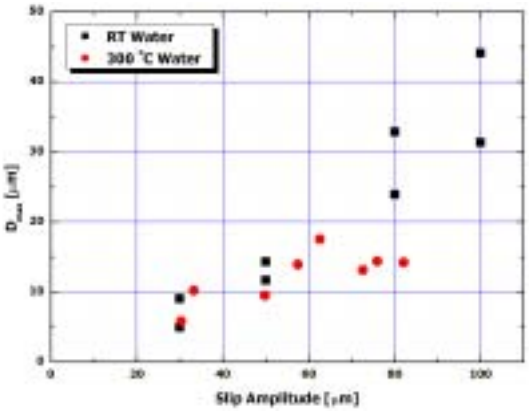


그림 4. 최대마멸깊이의 변화.

(2) 최대마멸깊이

마멸부피를 측정하는 과정에서 산출된 최대마멸깊이를 그림 4에 나타내었다. 마멸부피의 경향과는 달리 최대마멸깊이는 상온 물속과는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이것은 마멸의 진행이 상온 물속에서는 깊이방향보다는 폭이나 길이방향으로 진행되고 있음을 의미하며 이러한 마멸기구가 발생하기 위해서는 생성된 마멸입자가 외부로 방출되는 과정에서 third body abrasion이 우세하기 발생되어야 한다. 따라서 마멸부피와 최대 마멸깊이를 비교한 결과 고온 물속에서 나타난 적은 마멸부피는 생성된 마멸입자 혹은 마멸면이 산화에 의한 피막형성의 가능성을 고려할 수 있다. 그러나 이러한 피막형성 혹은 산화물에 의한 층형성은 물속에서 쉽게 파손되기 쉽기 때문에 실험결과에서 나타난 마멸량의 차이를 설명하기에는 다소 불충분한 것으로 판단하였다.

(3) 손상면 관찰

물속에서 온도에 따른 마멸량 변화 경향을 확인하기 위하여 광학현미경을 이용하여 손상면을 관찰하였으며 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 우선 상온 물속의 경우, 손상면 내부는 마멸과정 중에 외부로 방출되지 못한 마멸입자가 잔류하고 있음을 확인 할 수 있으며 마멸면 주위에도 일부 마멸입자가 잔류하고 있음을 알 수 있다. 이것은 예상과 같이 접촉면에 형성된 마멸입자의 방출과정에서 third body abrasion이 발생하였음을 의미한다. 그러나 고온 물속의 경우 거의 대부분 시편에서 마멸입자는 외부로 방출된 것으로 나타났으며 마멸면 주위에 백색의 잔류마멸입자가 존재하였다. 여기서 특징적인 것은 마멸면 외부에 상온 물속과는 달리 마멸입자가 접촉에 의한 층형성이 상대적으로 잘 나타난 점이다. 그러나 마멸면의 색 변화는 생성되는 산화물의 구조변화가 주된 원인이나, 구조가 변화하였어도 부분적으로 third body abrasion이 발생할 뿐 특별한 마멸거동의 변화는 없을 것으로 생각된다.

(a) 상온 물속 (b) 고온 물속

그림 5. 상온 및 고온 물속에서 나타난 전형적인 손상면 관찰 결과.

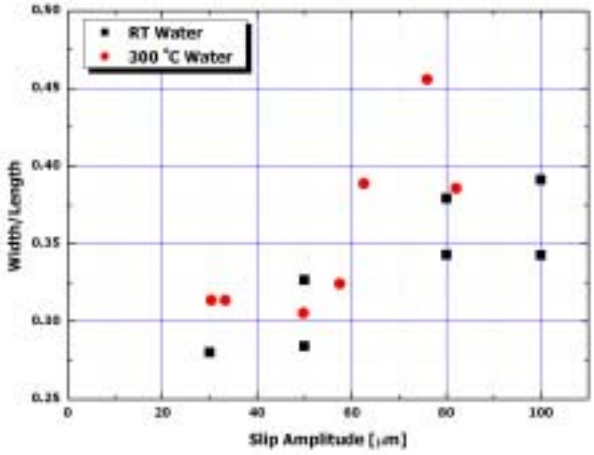


그림 6. 마멸면 형상에서 길이에 따른 폭의 비; 상온 및 고온시험의 시편 배열에 따라 큰 차이를 보이지 않고 있다.

또한 실험장치의 특성에 따라 마멸면에서의 입자방출거동이 변화할 수 있다. 그림 2에서 상온 및 고온 물속 마멸시험장치는 시편의 배열이 다르다. 상온 물속의 경우 수직방향으로 연료봉이 미끄럼 변위를 가지는 반면 고온 물속에서는 수평방향으로 연료봉이 진동하므로 생성된 마멸입자의 이동경로는 자중에 의해 다소 영향을 받을 것으로 예상된다. 이 차이로 인해 그림 6에 나타낸 것과 같이 손상면의 길이 및 폭방향의 비가 상온 및 고온물속의 결과에서 다소 변화할 수 있으나 고온물속에서의 마멸량의 감소는 마멸기구 특히 마멸입자의 거동 차이가 영향을 미친 것으로는 생각되지 않는다.

4. 고찰

(1) 스프링 특성에 미치는 온도의 영향

이상의 결과로부터 고온 물속에서 나타난 급격한 마멸량의 감소는 온도증가에 따른 마멸기구의 변화로는 충분한 설명이 되지 못하는 것을 알 수 있다. 이에 따라 마멸량 감소원인을 마멸기구보다는 실험온도증가에 따른 스프링의 기계적 특성변화에 초점을 두어 관찰하였다. 그림 7에 온도증가에 따른 스프링의 하중-변위 곡선을 나타내었으며 이 실험은 고온고압 마멸시험기를 이용하여 각 온도별로 수행하였다. 그 결과 온도증가에 따른 스프링 하중-변위곡선은 급격히 감소함을 알 수 있다. 이것은 스프링 설계시 상온결과를 이용하여 스프링 재질의 탄성계수 및 프와송 비를 고려한 값을 이용하여 고온에서의 스프링 강성을 계산하여 사용하는 것이 다소 문제점을 가지는 것을 의미한다. 왜냐하면 스프링 강성은 온도는 물론 형상에 따라 급격히 변화할 수 있기 때문이다. 이를 확인하기 위하여 (주)한전원전연료에서 한국표준원전용 개량핵연료(PLUS-7)의 중간 지지격자체로 개발한 KAFD 스프링과 본 실험에 사용된 스프링의 하중-변위곡선을 비교하였으며(그림 7) 온도증가에 따른 스프링 강성의 감소가 같은 재질임에도 불구하고 감소량에 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 고온 물속에서 수행된 마멸시험결과에서 마멸량의 감소는 스프링 형상에 따른 고온 스프링 강성의 감소가 주된 원인이며, 결국 실제 접촉면에서의 상대 미끄럼 변위의 감소가 마멸량의 감소로 이어진 것으로 판단된다.

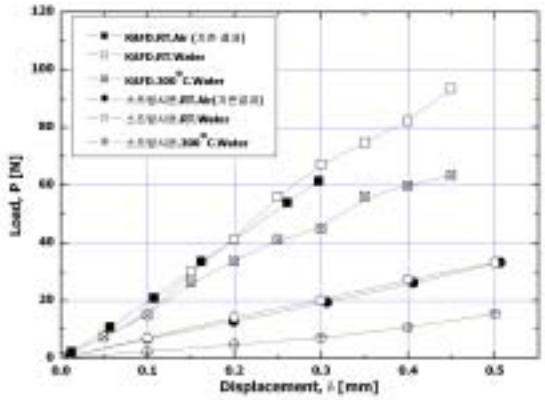


그림 7. 상온 및 300°C에서 수행한 하중 변위 시험 결과 비교.

(2) 접촉하중의 영향

핵연료 피복관의 프레팅 마멸시험은 마멸시험기에 따라 그 결과가 다소 변화할 수 있다. 특히 같은 시험조건에서도 마멸시험은 다소 큰 편차를 가진는 것이 일반적이다. 이러한 원인은 일정하중의 접촉하중이 가해질 때 마멸면은 항상 숨겨져 있기 때문에 실험과정동안 마멸거동을 관찰하는 것은 거의 불가능하기 때문이다. 우선 본 실험에서 수행된 마멸시험기의 경우, 일정 수직하중을 인가한 뒤 마멸시험을 수행하며 마멸이 진행됨에 따라 인가된 수직하중이 변화하게 되며 초기 인가하중에서 크게 벗어날 경우 하중을 조절하면서 시험을 수행하게 된다. 따라서 접촉하중이 존재하는 경우 스프링 강성 감소(특히 축방향)에 따라 접촉면에서의 실제 미끄럼 변위는 연료봉에 인가된 미끄럼 변위에 비해 급격히 감소할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 높은 주파수를 가진 비교적 작은 충격하중이 가해질 경우, 온도증가에 따른 스프링 강성의 영향은 상대적으로 작아지게 되며 결국 마멸량은 다소 증가할 것으로 예상된다. 이러한 결과는 캐나다 AECL에서 수행된 결과[4]와의 비교에서도 확인 할 수 있는데 유사한 실험환경에서 상대적으로 낮은 하중 및 변위(각 접촉면에서의 0.1 mW의 work-rate)를 적용한 결과 본 시험결과보다 높은 마멸량이 나타남을 알 수 있다. 결과적으로 본 시험에 사용된 스프링의 경우, 초기 핵연료 집합체 장입시 스프링 강성에 따라 연료봉을 지지하게 되나 온도증가에 따른 스프링 강성의 감소도 설계시 보다 상대적으로 작은 지지능력을 보일 수 있으며 유체유발진동에 의한 프레팅 손상이 충격하중이 가해질 때 큰 값을 보이므로 연료봉과 스프링사이의 접촉이 스프링 강성에 의한 하중에서 틈새의 형성으로의 천이가 빠를수록 내마멸성이 떨어지는 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구 계획

고온 물속에서 핵연료봉의 프레팅 마멸을 연료봉 축방향으로 접촉길이가 긴 스프링을 이용하여 수행하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 상온 물속에 비해 300°C 물속에서의 마멸부피는 급격히 감소하는 결과를 보였다. 이러한 마멸부피의 감소원인은 마멸기구의 차이로는 설명하기에는 불충분하였다.
(2) 마멸부피에 비해 최대마멸깊이의 차이는 거의 나타나지 않았다. 이에 따라 마멸은 깊이방향보다는 마멸입자에 의한 third body abrasion이 우세하게 작용한 것으로 보인다.
(3) 고온 물속에서 스프링에 대한 하중-변위곡선을 구하였으며 본 실험에 사용된 스프링에서 온도증가에 따라 스프링 강성이 급격히 감소하는 결과를 보였다. 이에 따라 고온 물속에서의 급격한 마멸부피의 감소는 축방향의 스프링 강성 감소에 따른 접촉면에서의 실제 미끄럼 변위감소가 주된 원인으로 판단된다.
(4) 스프링 강성 감소에 따른 실제 미끄럼 변위감소에 대한 보다 자세한 연구가 필요하며, 이것은 핵연료 집합체의 지지격자 스프링의 설계시 탄성계수 및 프와송 비만을 고려하여 고온에서의 스프링 강성을 추정하는 것은 스프링 형상 형상을 고려하지 않기 때문이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

[1] 김형규 외 1인, “표면 프로파일 해석을 이용한 마멸량 계산 알고리즘 개발”, 한국윤활학회지, 제 17권 제 1호 (2001) 33-39.
[2] 이영호 외 1인, “마멸손상 평가의 신뢰도 제고를 위한 측정 자동화 및 분석방법 개선”, KAERI/TR-2479/2003.
[3] F.M. Guerout 외 3인, “Effect of temperature on steam generator fretting wear", ASME PVP, Vol. 32 Flow-Induced Vibration (1996) 233-246.
[4] F.M. Guerout 외 1인, “Steam generator fretting-wear damage: A summary of recent findings”, Jour. of Pressure vessel technology 121 (1999) 304-310.