2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핵연료봉 프레팅마멸에서 접촉조건의 영향에 대한 실험적 분석

Experimental Analysis on the Influence of Contact Condition in Fuel Fretting Wear

김형규, 하재욱, 윤경호, 강흥석, 송기남

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자로 운전 중 열 및 조사에 의한 영향으로 핵연료 지지격자 스프링 및 딤플의 특성이 변하고 이에 따라 핵연료봉 지지력이 약해지게 된다. 핵연료봉의 프레팅마멸 손상은 지지격자체의 지지력에 영향을 받으므로 이에 대한 실험적 연구가 필요하다. 본 논문에서는 지지격자 스프링 및 딤플과 핵연료봉 사이의 접촉 조건으로서 접촉력이 5 N, 0 N 일 때와 접촉부에 간격이 0.1 mm 일 때를 실험변수로 하여 접촉면에서 발생하는 마멸을 형상, 깊이 및 마멸량으로 구분하여 분석한 것이다. 한편, 마멸량을 스프링 또는 딤플의 접촉부 형상, 강성 그리고 미끄럼 방향에 따라 분류하여 각각의 영향을 고찰하였다. 결과로서 핵연료봉에 동일한 진동이 가해지더라도 접촉부 형상에 따라 미끄럼 상태가 달라짐을 알 수 있었고, 접촉력이 존재할 때 보다 접촉부에 간격이 존재할 때 마멸량이 현저히 증가하는 것을 확인하였다. 또 강성이 약한 스프링과의 접촉에 의해 마멸이 심하게 발생하였으며, 축방향의 미끄럼에서 발생하는 마멸량이 더 큰 것을 알 수 있었다.

Abstract

During reactor operation, the change in the characteristic of spacer grid springs and dimples results in the decrease of fuel rod supporting force. Since the supporting force affects fuel fretting wear, it is necessary to investigate the influence of the force. This paper is concerned with the experimental investigation of that, to this end, the supporting force (i.e., contacting force) was varied as 5 N and 0 N, and the gap of 0.1 mm was also simulated in the experiment. Shape, depth and volume of wear found on the fuel rod specimen were examined for the analysis. Total wear volume evaluated was separated with respect to the shape of the contact contour of spring/dimple, the stiffness and the slip direction to examine those effect in detail. As results, the slip regime depends on the contour shape even though the property of fuel rod vibration is the same, and the wear volume increases considerably when the gap exists. It is also found that wear becomes much severe in the case of the contact with spring and the axial slip rather than with dimple and transverse slip, respectively.

1. 서 론

핵연료봉과 지지격자체 사이의 접촉에 의한 프레팅마멸은 원자로 내 일차 냉각수의 유동에 의해 발생한다. 즉, 핵연료봉을 핵연료집합체 내에 고정하기 위하여 지지격자체에는 스프링과 딤플을 가공하여 핵연료봉과 접촉하게 하고 있으며 핵연료봉이 원자로 내에서 냉각수의 유동에 의해 진동이 발생하게 되면(유체유발 진동) 접촉면에서 미끄럼이 발생하게 되고 이로부터 마멸이 발생한다. 만일 이때 발생하는 마멸이 심하여 핵연료봉 피복관이 천공되게 되면 핵연료봉 내의 핵분열 생성 기체가 원자로 내부로 유출되어 노내 방사능 준위를 급격히 증가시키게 된다. 따라서 원전의 안전성 및 경제성을 제고하기 위해 핵연료봉의 프레팅마멸 손상 연구가 필요하다.

핵연료봉의 프레팅마멸 손상을 방지하기 위한 기계설계적 관점에서의 연구는 주어진 진동, 분위기 등의 조건 하에서 핵연료봉과 지지격자체의 접촉을 이론적, 실험적으로 분석하는 것이다. 이때 이론적 분석을 위해서는 주로 접촉역학이 도입되며 실험적 분석에서는 트라이볼로지 이론이 도입된다. 핵연료봉의 마멸에 대한 이론적 연구방법은 국내에서 소개된 적이 있으며[1-3] 시험기를 설계하여 실험적 연구도 병행하고 있다[4-6]. 국외의 경우엔 대부분 실험적 연구만이 수행되고 있으며 핵연료공급자에 의해 핵연료집합체 전체를 유동장 내에 놓아 전반적인 Endurance Test 를 수행하거나, 핵연료봉과 지지격자 스프링/딤플 시편에 대해 상세한 시험을 수행하기도 한다[7]. 전자의 Endurance Test 의 경우에는 개발된 지지격자체에 대한 사후 검증시험의 성격을 가지며 후자의 시험은 지지격자 개발단계에서 개선점 도출을 위해 수행하는 경우가 많다. 현재까지 국내에서 수행된 시험은 후자와 유사한 경우로서 이론적 분석과 함께 마멸 저항성이 제고된 지지격자체를 개발하는 과정에 이용하고 있다.

현재까지 국내에서 수행된 시험은 상온 하의 공기 중 또는 수중에서 지지격자 스프링/딤플 시편과 핵연료봉 시편 사이에 양(+)의 하중이 존재하도록 접촉시킨 후 상대운동을 발생시킨 Sliding 마멸 시험이다. 이 시험은 지지격자 스프링/딤플과 핵연료봉 사이의 접촉형상을 확인하고 마멸이 급격히 증가하는 조건(예를 들어 임계진폭 등)을 도출하여 기계설계 관점에서 스프링/딤플을 개선하는 데에 효과적으로 사용하고 있다. 그러나 이 시험기에 의해서는 원자로 내에서 온도 및 조사의 영향에 의해 지지격자 스프링/딤플의 강성이 이완되고 이로 인해 스프링/딤플 사이에 간격이 존재하기도 하는 실제의 접촉 상황을 모사하지 못하는 한계가 있다. 따라서 기존의 시험기와는 별도로 핵연료봉 시편과 스프링/딤플 시편 사이에 간격이 존재하는 경우인 Impacting/Sliding 상태에서의 상온 프레팅 마멸시험을 수행할 수 있는 시험기를 제작하였다[8].

본 연구는 개발된 Impacting/Sliding 프레팅 마멸시험기를 이용하여 지지격자 스프링/딤플과 핵연료봉 사이에 접촉하중이 존재하는 경우와 틈새가 존재하는 경우에 대해 시험한 결과를 분석한 것이다. 시험 결과분석에는 스프링 및 딤플과 접촉한 위치에서의 마멸을 현미경을 통해 형상을 관찰하고 표면 거칠기 측정기로 마멸 궤적을 측정하였으며 이로부터 기 개발된 프로그램[9]을 이용하여 마멸부피를 계산하였다. 시험에 사용한 지지격자 스프링(또는 딤플)은 서로 다른 두 가지의 형상을 갖는 것으로 선정하여 접촉부 형상이 마멸량에 미치는 영향에 대해서도 고찰하였다. 본 연구는 앞선 Sliding 마멸시험 결과와 함께 핵연료봉의 프레팅마멸 저항성 제고를 위한 지지격자 개

발에 활용할 예정이다.

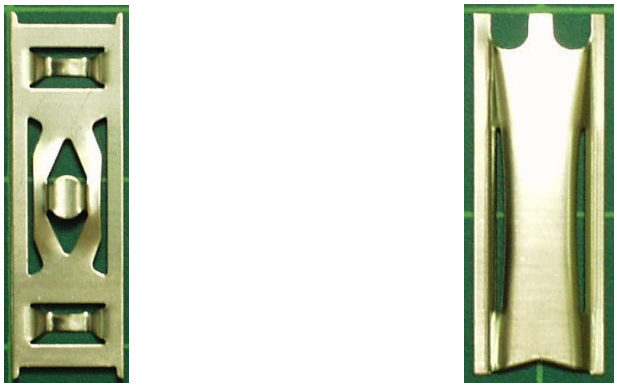
2. 시 험

2.1 시편

본 연구의 시험에 사용한 지지격자 스프링 시편과 핵연료봉 피복관 시편의 재질은 모두 상용 경수로 핵연료에 사용되는 지르코늄계 합금으로 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 판재로부터 가공하여 제작하였다. 핵연료봉과 접촉하게 되는 스프링 접촉부는 그림 1 에 나타낸 것과 같이 오목한 것과 볼록한 것으로 구분되며 각각의 특징을 표 1 에 정리하였다.

표 1. 지지격자 스프링 시편의 특징.

Spec. #	Contact Contour	Spring/Dimple Shape	End Condition	Contact Length intended	Thickness
1	Concave	different	Clamped at both ends	4.5 mm	0.45 mm
2	Convex	same	Clamped at both ends	Depends on the contact force	0.35 mm



시편 1 시편 2

그림 1. 시험에 사용한 지지격자 시편 형상.

한편 핵연료봉 시편은 스프링과의 접촉부에서만 마멸이 발생하므로 그림 2 와 같이 설계하여 가운데 부분은 반영구적으로 쓸 수 있게 하였고(Center Rod), 지지격자체와 접촉하는, 마멸이 일어나는, 부분만 교체할 수 있도록 하였다(Fretting Tube Specimen). 또 여기에 연결된 양 끝 단의 확장봉(Extension Rod)에는 인접 span 의 핵연료봉 무게를 모멘트로 고려하기 위하여 추를 부착하였고 그 위치를 이동할 수 있도록 하였다. 한편 중앙의 긴 봉(Center Rod)은 실제 핵연료봉과 같은 무게를 갖도록 하기 위해 튜브 내에 납을 삽입하여 제작하였다.

2.2 Impacting/Sliding 프레팅마멸 시험장치

개발된 Impacting/Sliding 프레팅 마멸시험기는 원자로 내의 핵연료가 받는 기계적 조건을 모사

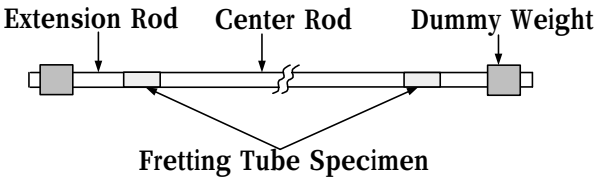


그림 2. 시험에 사용한 핵연료봉 시편.

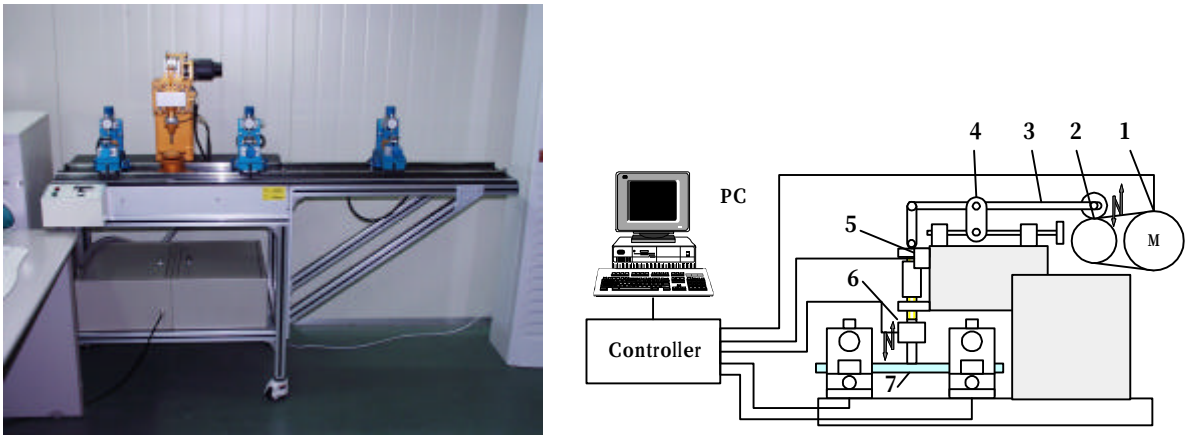


그림 3. 시험에 사용한 셀 단위 프레팅마멸 시험기; 1: Servo-Motor, 2: Eccentric Cylinder, 3: Lever, 4: Movable Hinge, 5: LVDT, 6: Load Cell , 7: Tube Specimen.

할 수 있도록 하중, 진폭, 주파수 등을 고려하여 설계하였으며 하나의 셀이 구성된 지지격자체 단위에서 발생하는 프레팅마멸 현상을 모사하는데 중점을 두었다. 시험기는 구동부, 시편고정부, 그리고 베드와 제어부(Control Unit)의 세 단위로 구분할 수 있으며 그림 3 에 시험기의 사진과 개략적인 구성을 보여 주고 있다. 시험기 각부의 개략적인 설명은 다음과 같다.

- 구동부

구동부는 무단변속이 가능한 서보모터와 이것에 타이밍벨트로 연결된 편심원통, 편심원통에 접촉하는 베어링과 여기에 연결된 지렛대 및 지렛대 힌지부로 구성하였다. 편심원통에서 발생하는 일정한 변위는 지렛대 힌지부의 이송에 의하여 시편에 가하는 변위 범위를 조정할 수 있도록 설계하였고, 어느 특정한 변위 범위로 고정할 경우를 위해 힌지부에는 관통볼트를 설치하였다.

지렛대를 통한 변위는 연직 방향으로 전달되어 핵연료봉 시편에 상하 방향의 진동을 발생시키게 된다. 이때, 가하는 변위에 의해 시편에 전달되는 하중을 측정하기 위하여 Load Cell 을 설치하였으며, 이와 함께 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 설치하여 시험 중 시편에 작용하는 변위범위를 실시간으로 측정할 수 있게 하였다.

LVDT 를 하중전달 경로의 끝단에 설치한 이유는, 하중 경로 상의 기계적 체결부위에 존재하는 틈새로 인해 발생할 수 있는 모든 오차가 표시되는 변위에 나타나도록 하여 실제 시편이 진동하는 진폭(변위)을 측정할 수 있게 하기 위함이었다.

시험 중에 발생할 수 있는 구동부의 미세한 진동이 시편에 영향을 미치는 것을 방지하기 위해 구동부를 강건한 기둥에 설치 하였으며, 기둥과 시험장비의 베드사이에는 방진용 패드를 설치하였다.

- 시편 고정부

하나의 지지격자 셀을 구성하기 위해 지지격자판 4 개를 조합하여 실제 원자로 내에서 핵연료봉과 스프링(또는 딤플)이 접촉하는 여러 가지 경우를 모사할 수 있도록 하였다. 즉, 핵연료봉과 지지격자 스프링(또는 딤플) 사이의 간격이 존재하는 경우를 포함하여, 하나의 셀을 구성하는 각각의 스프링이 핵연료봉에 가하는 힘이 다를 경우에 대한 프레팅마멸 시험이 가능토록 한 것이다.

이를 위해 스프링 시편 고정부는 하나의 셀을 구성하는 지지격자판 시편 4 개를 각각의 블록형 치구에 고정하고 그 중 2 개가 서로 독립적으로 움직일 수 있도록 하였다. 지지격자 스프링과 핵연료봉 사이의 힘과 간격을 조절하기 위하여, 직교하는 2 개의 Load Cell 과 2 개의 Dial Indicator 를 각각의 스프링 시편 고정부에 장착하였으며, 이로부터 지지격자 스프링과 핵연료봉 사이에 작용하는 힘을 실시간으로 측정하고 틈새 거리를 정량화 할 수 있도록 하였다.

- 베드와 제어부

베드는 구동부와 스프링 시편 고정부를 지지하는 시험장비의 몸체이다. 핵연료는 축방향으로 여러 개의 지지격자체가 있으며 원자로 냉각수의 유동에 의한 핵연료봉의 진동은 지지격자체 사이의 거리(Span)에 영향을 받는다. 이를 고려하기 위해, 개발된 시험장비에는 3 개의 스프링 시편 고정부를 설치하여 최대 두 개의 span 을 구성할 수 있도록 하였고, 이때 스프링 시편 고정부 사이의 거리를 조절할 수 있도록 설계하였다. 즉, 각 스프링 시편 고정부 사이의 거리는 지지격자체 사이의 거리가 되며, 핵연료의 종류에 따라 달라질 수 있는 지지격자체 간의 거리 변화에 따른 시험이 가능하도록 하였다. 스프링 시편 고정부의 정확한 이동을 가능하게 하기 위해 시편 고정부를 안내하는 레일을 베드 위에 설치 하였고, 레일을 따라 자를 부착하여 위치를 정확히 설정할 수 있도록 하였다.

베드의 하부에는 시험 중 측정되는 데이터들의 수집과 제어를 위해 제어부를 설치하였다. 시험 데이터로서 1 개의 LVDT 와 7 개의 Load Cell 에서 얻은 변위 값과 하중 값이 실시간으로 PC 로 보내지며, 모니터에서 확인할 수 있도록 하였다.

2.3 시험 방법

시험 전 각 스프링/딤플 및 핵연료봉 시편은 초음파세척기로 아세톤 용액에서 세척한 후 건조시켰다. 스프링 시편은 시편 블록에 접착제로 고정시키고 완전히 굳힌 다음에 각 블록을 로드셀이 장착되어 있는 시편 고정부에 장입하여 지지격자체를 구성하였다. 구성된 지지격자체에서 두 개의 고정 치구에는 스프링 시편의 딤플이 위치하게 하였고 나머지 두 개의 가변 치구에는 스프링이 위치하게 하였다(그림 4 참조). 그림 2 의 핵연료봉 시편을 구성된 두 개의 지지격자체 사이에 끼워 넣어서 실제 핵연료봉 하나의 span 을 모사하였다. Span 길이는 실제 핵연료봉과 같은 522 mm 로 하였다.

시험은 상온에서 수행하였으며 실제 원자로 내에서 핵연료봉과 스프링(또는 딤플)이 접촉하는 여러 가지 경우 중에서 접촉 수직 하중을 받고있는 경우, 접촉은 하고 있으나 수직 하중이 작용하지 않는 경우(just-contact)와 간격이 존재하는 경우에 대해 시험을 수행하였다. 접촉 수직 하중을 받는 경우에는 수직 하중을 5 N 으로 설정 하였고, 핵연료봉과 스프링(또는 딤플) 사이의 간격이

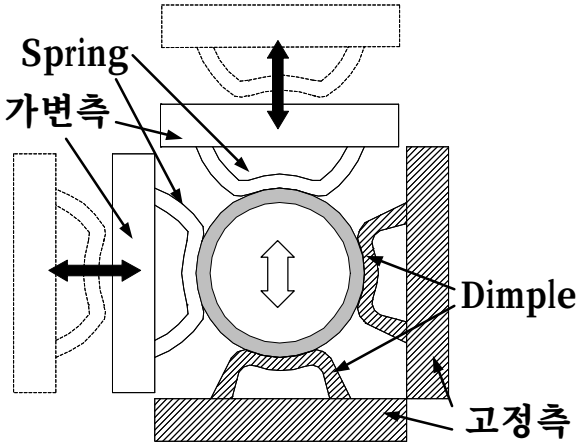


그림 4. 셀 내에서의 시편 접촉 상태.

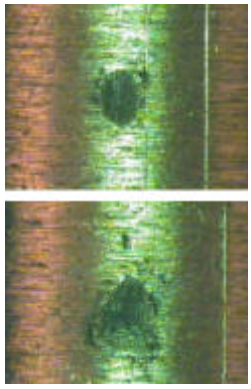
존재하는 경우에는 간격을 0.1mm 로 정하였다. 5 N 의 수직하중이 가해지는 경우에는 구성된 지지격자체에서 핵연료봉 시편과 스프링(또는 딤플)이 받는 접촉 수직 하중의 로드셀 값이 5 N 이 될 때까지 가변 치구를 이송하여 하중을 부여하였고, just-contact 인 경우에는 임의의 작은 수직하중(약 2~3 N)을 가하여 로드셀에서 읽혀지는 값이 양의 값이 되게 한 다음에 가변 치구 이송 놉(knob)을 하중을 가하는 방향의 반대방향으로 돌려서 로드셀 신호가 0 이 될 때를 just-contact 으로 하였다. 스프링(또는 딤플)과 핵연료봉 시편의 간격이 존재하는 경우에는 먼저 just-contact 상태로 조정한 후 이 상태로부터 다이얼 인디게이터를 이용하여 0.1mm 가 후퇴하도록 가변 치구 이송 놉을 돌려서 간격을 맞추었다. 두 개의 지지격자체 사이의 중심부를 0.7mm 변위로 움직이게 하였고 핵연료봉 시편에 가하는 진동 주파수는 30 Hz 로 하였으며 횟수는 1,000,000 회로 하였다.

각 시험이 완료된 후, 두 개의 핵연료봉 시편에 난 마멸흔적을 현미경을 통해 전체적인 외부형상 및 치수를 측정한 다음, 표면 거칠기 측정장비로 마멸궤적과 마멸깊이를 측정하였으며 여기에서 얻은 마멸부의 3 차원 데이터로부터 마멸 부피를 계산하였다. 모든 시험은 3 회 반복하여 수행하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 마멸부 관찰

각각의 시험이 완료되면 마멸량을 계산하기 위해 마멸부 궤적을 표면 거칠기 측정장비로 측정하기 전 마멸면을 측정 현미경을 이용하여 관찰하고 마멸부위의 크기를 기록하였다. 마멸면을 관찰하는 이유는 시험 때 접촉면에서의 미끄럼 상태가 부분미끄럼인지 또는 전미끄럼이었는지를 파악하기 위함이다. 부분미끄럼 상태가 되면 접촉부 가장자리에서만 마멸이 발생하나 전미끄럼 상태에서는 접촉면 전체에 마멸이 발생한다. 또한 앞선 연구[6]에 의하면 마멸 모델로서 Workrate Model ($\dot{V} = K\dot{W}$, where $\dot{W} = \left(\int Qds\right)/t$) [10]을 고려할 때, 핵연료봉과 지지격자 스프링 사이의 접촉에 의한 경우, 마멸 계수 K 는 부분미끄럼일 경우에 비해 전미끄럼인 경우 현저히 증가하고 부분미끄럼 상태로부터 전미끄럼으로 바뀔 때 마멸량 증가율에 불연속이 발생한다. 따라서 마멸 거동을 파



(a) 시편 1 에 의한 마멸

(b) 시편 2 에 의한 마멸

그림 5. 시편 1 및 시편 2 에 의한 핵연료봉에서의 마멸면.

악하기 위해 미끄럼 상태를 아는 것이 중요하다. 한편, 본 연구에 사용한 시험기는 접촉면에서의 미끄럼 변위를 측정할 수 없었으므로 마멸면에서의 미끄럼 변위를 추정하기 위해서도 마멸면에 대한 현미경 관찰을 수행하였다.

시편 1 의 스프링 또는 딤플에 의해 핵연료봉의 표면에는 그림 5a 에서 특징적으로 보여 주듯이 접촉부의 경계 한곳 또는 양쪽에서 마멸이 관찰되었다. 이러한 현상은 접촉력이 존재할 때나 접촉부에 간격이 존재할 때 모두 공통적으로 발생하였다. 한편 시편 2 에 의해서는 그림 5b 와 같이 접촉부 전체에서 마멸 흔적이 관찰되었다. 따라서 마멸 흔적으로부터 판단할 때 시편 1 과의 접촉에서는 부분미끄럼 상태가 되었고 시편 2 와의 접촉에서는 전미끄럼 상태가 되었다고 생각할 수 있다. 지지격자 스프링과 핵연료봉 사이의 접촉 마멸 시험 결과를 이용하여 미끄럼 변위와 접촉력 사이의 관계를 표현하는 프레팅 지도(그림 6 참조)[5]에 의하면 본 연구에서 접촉 하중의 조건인 최대 5 N 일 때 부분미끄럼이 발생할 수 있는 최대 미끄럼 진폭은 약 10 μm 이내 일 것으로 추정할 수 있다. 또한 접촉력이 감소하면 부분미끄럼 상태가 되기 위한 미끄럼 진폭도 감소한다.

본 연구의 시험에서 시편 1 및 시편 2 에 적용한 시험 조건은 동일하므로 시편 1 과 시편 2 에서 서로 다른 미끄럼 상태가 관찰된 이유는 각 시편이 핵연료봉과 접촉할 때의 접촉부 형상이 다르기 때문인 것으로 설명할 수 있다. 즉 시편 1 에 의해서는 부분미끄럼 현상이 발생할 수 있는 접촉력 및 미끄럼 변위에서도 시편 2 에 의해서는 전미끄럼이 발생하였다는 것이다. 이것은 앞선 연구[5]에서의 프레팅 지도(그림 6)에서 타 연구자들의 결과[11]에 비해 부분미끄럼 영역이 크게 평가된 이유로서 상이한 접촉부 형상을 논의한 것에 대한 검증이 되었다.

3.2 접촉 하중 및 형상에 따른 마멸 분석

그림 7 에는 두 가지의 지지격자 스프링(딤플) 종류(표 1 및 그림 1 참조)에 대해 핵연료봉과 지지격자 스프링/딤플과의 사이에 접촉력이 5 N, 0 N(just-contact) 및 간격 0.1 mm 인 경우로 시험하여 각각의 경우에 핵연료봉 시편의 표면에서 관찰된 마멸을 측정하고 분석한 결과를 보여 주고 있다. 시편 1 의 경우에는 지지격자 스프링 두 개와 딤플 4 개가 하나의 셀을 구성하므로 접촉부는 총 12 군데가 되며(하나의 span 에 두 개의 셀이 구성되므로) 시편 2 의 경우에는 총 8 군데가

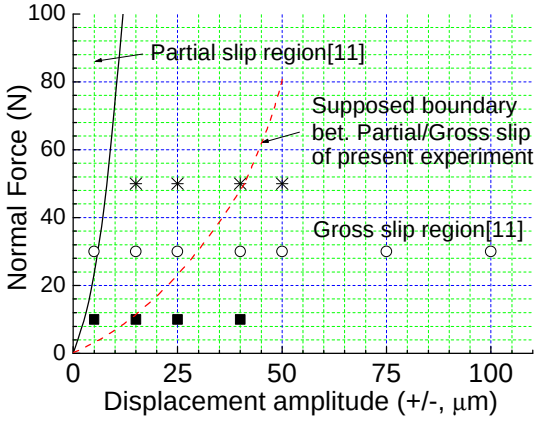
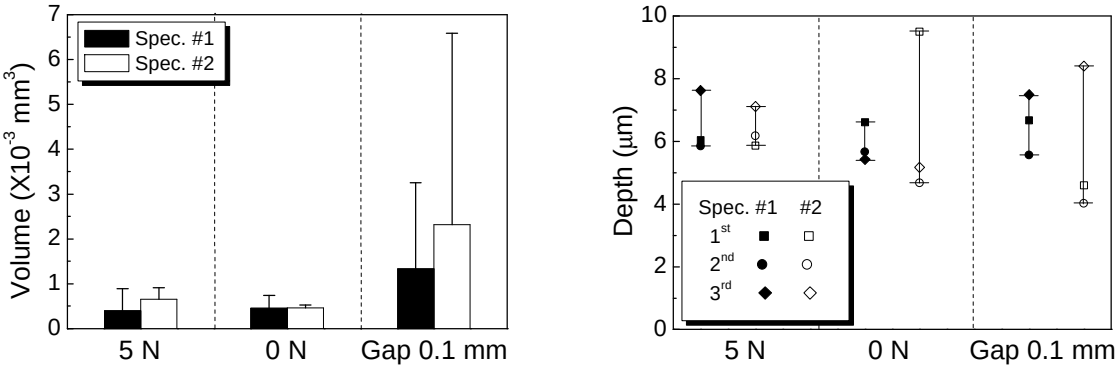


그림 6. 지지격자 스프링과 핵연료봉 사이의 접촉마멸 시험으로부터 작성한 프레팅 지도[5].



(a) 마멸 부피의 비교 (b) 마멸 깊이의 비교

그림 7. 접촉 조건 및 지지격자 시편에 따른 마멸의 비교.

된다. 그림 7a 는 시편 및 시험조건 각각의 경우에 모든 마멸부에서 계산된 마멸 부피(마멸량)의 합을 도시한 것이며, 동일한 조건의 시험을 3 회 반복하였으므로 각각의 평균과 3 회 중 최대값과의 차를 분산으로 도시하였다. 한편 그림 5b 는 매회 반복 시험 때 각 접촉부의 마멸에서 측정된 마멸 깊이를 표시하였다.

그림 7a 로부터 시편 1 및 시편 2 모두 just-contact 을 포함하여 접촉력이 존재할 때, 접촉부에 틈새가 존재할 경우에 비해 마멸량이 적은 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 핵연료봉의 마멸에 있어 지지격자 스프링/딤플이 핵연료봉을 지지할 수 없을 때 마멸이 심하게 발생한다는 것을 의미한다. Just-contact 조건을 포함하여 접촉력이 존재하는 경우의 마멸량 비교에서 스프링 또는 딤플의 형상에 따른 차이는 핵연료봉과 등각 접촉(conformal contact)을 하는 시편 1 의 경우 접촉력이 존재할 때(5 N)가 just-contact 인 경우보다 마멸이 적게 발생하였으나 시편 2 에 의해서는 just-contact 조건에서 접촉력 5 N 일 때보다 마멸이 더 적었다. 이것은 시편 2 의 경우 비 등각 접촉(non-conformal contact)을 하는 스프링/딤플로서 접촉력이 증가하면 접촉 폭과 길이가 증가하므로 마멸부가 증가하고 따라서 마멸량이 커진 것이다. 이에 비해 시편 1 의 경우에는 접촉력이 증가하더라

도 접촉 길이는 증가하지 않으며 접촉 폭의 증가만 있게 된다. 따라서 접촉력이 클 경우 시편 1 에서 마멸량이 적게 나타난 것으로 볼 수 있다.

한편 그림 7a 로부터 접촉부에 간격이 존재할 경우 마멸량의 분산 정도가 현저히 커진 것을 알 수 있는데, 이로부터 간격이 존재할 때에는 스프링/딤플과 핵연료봉 사이의 충격력이 시험마다 상당한 차이가 있었던 것으로 판단된다. 이러한 현상은 실제의 원자로 내 핵연료에서도 동일할 것이다. 이러한 시험 결과로부터 원자로 운전 중 핵연료봉과 지지격자 스프링/딤플 사이에 틈새가 존재하지 않도록 하는 것이 프레팅마멸 손상을 억제하는 데에 매우 중요하다는 것을 확인할 수 있었다.

측정된 마멸 깊이를 도시한 그림 7b 로부터 우선 알 수 있는 것은 접촉부에 간격이 존재할 때와 접촉력이 존재할 때의 마멸 깊이 차이는 마멸량의 차이에 비해 현저하지 않다는 것이다. 이것은 접촉력이 줄어 들며 증가하는 마멸량의 증가가 깊이 방향으로 마멸이 진행되기 보다는 접촉면에서의 마멸 영역이 확장되는 데에 따른 것이라 생각할 수 있다. 마멸 깊이가 증가하는 요인으로서는 접촉면에서 생성된 마멸 입자가 접촉면으로부터 방출되지 못하고 접촉부에 잔류할 때 접촉면의 계속되는 상대 운동으로부터 연마 마멸(abrasive wear)이 진행되기 때문이라고 생각할 수 있다. 이때 접촉부에 간격이 존재하면 접촉부에는 연속적인 충격이 발생할 것이고 이때 마멸 입자가 접촉면으로부터 떨어져 나가기 쉬운 상태가 될 것을 예상할 수 있다. 따라서 본 시험의 결과와 같이 접촉부에 간격이 존재하더라도 마멸량은 증가하되 마멸 깊이는 크게 증가하지 않았던 것으로 사료되며 마멸량 증가를 가져온 것은 접촉부에서의 상대 미끄럼 변위가 증가한 때문으로 판단된다.

3.3 스프링 및 딤플에 따른 마멸 분석

시편 2 는 핵연료봉을 지지하는 스프링과 딤플의 형상이 동일하나(표 1 참조) 시편 1 은 대부분의 경수로형 원전에서 사용하는 핵연료의 지지격자체에서와 같이 스프링과 딤플의 형상이 다르게 설계되었다. 이때 딤플의 강성(stiffness; 하중-변위 선도에서 선형 구간의 기울기)이 스프링에 비해 크도록 하여 핵연료집합체 내에서 핵연료봉 사이의 피치를 유지할 수 있도록 하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 강성의 차이가 마멸량에 미치는 영향을 고찰하고자 그림 7a 의 마멸량 데이터를 스프링과 딤플의 위치에 따라 분류하였다. 그림 8 은 시편 1 에 의한 3 회의 마멸 시험에서 스프링 및 딤플의 위치에서 핵연료봉 시편의 표면에 발생한 마멸량의 합을 접촉 조건(접촉력 및 간격)에 따라 분류한 것이다.

시편 1 에 의한 총 마멸량 중 스프링과의 접촉에 의한 것이 3/4 이상을 차지하고 딤플과의 접촉에 의해서는 1/4 미만이라는 것을 알 수 있다. 특히 핵연료봉과 지지격자 스프링/딤플 사이에 간격이 있는 경우에 스프링에 의한 마멸량이 총 마멸량의 반 이상을 차지한다는 것은 스프링과 핵연료봉 사이에 충격력이 존재할 때가 가장 심각한 마멸을 발생시킨다는 것을 의미하며 이때 딤플과의 접촉에 있어서는 간격이 있는 경우가 가장 마멸이 작게 발생한 점으로부터 스프링의 강성이 마멸량에 영향을 미친다는 것을 추정할 수 있다. 즉 스프링 설계 시 강성에 대한 마멸 저항성을 주의 깊게 고려하여야 한다고 사료된다.

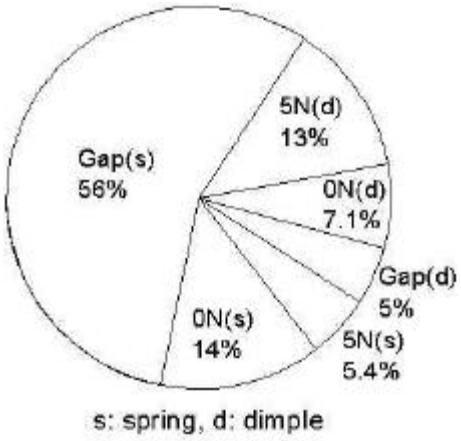


그림 8. 총 마멸량에서 스프링과 딤플에 의한 마멸을 분류한 경우.

3.4 미끄럼 방향에 따른 마멸 분석

본 연구에 사용한 프레팅마멸 시험기는 핵연료봉과 지지격자 스프링/딤플과의 접촉부에 상대운동을 발생하기 위하여 핵연료봉 시편(center rod)의 중앙부를 상하 방향으로 진동 시키는 구조로 되어 있다. 따라서 접촉력이 존재할 경우에는(본 연구의 시험에서 5 N 또는 just-contact) 그림 4 에서 보여 주는 셀의 상하부에 있는 접촉부에서 핵연료봉 축방향(axial direction)의 미끄럼이 주로 발생하며 좌우에 있는 접촉부에서는 횡방향(transverse direction)의 미끄럼이 주로 나타날 것을 예상할 수 있다. 그러나 접촉부에 간격이 존재하게 되면 접촉력이 존재하는 경우에 비해 접촉부에서의 미끄럼 방향이 임의적으로 될 것을 예상하였다.

원자로 내에서 유체유발 진동에 의해 핵연료봉은 미세한 진폭으로 반복 굽힘을 받게 되므로 스프링 및 딤플과의 접촉부에서는 축방향과 횡방향의 미끄럼이 동시에 발생한다. 이것은 핵연료봉의 프레팅마멸 문제에서 기존에 주로 고려하였던 횡방향의 미끄럼에 대해서만 접근하는 것은 적절하지 못하다는 것을 의미한다. 이와 같은 축방향 미끄럼에 의한 마멸은 해석적으로도 분석된 적이 있으며[3] 최근에 핵연료봉의 프레팅마멸에서 미끄럼 방향의 영향을 고려한 실험적 연구도 발표되었다[7]. 이때의 연구 결과[7]에서는 축방향 미끄럼에 의한 마멸이 횡방향 마멸에 의한 것보다 오히려 더 심하다는 것이 관찰되기도 하였다. 본 연구에서는 이러한 문제에 대해 독립적인 분석을 하고자 하였으며, 이에 따라 결과로 얻은 그림 7 의 마멸량을 축방향과 횡방향에 의한 것으로 분류하였다. 이때 축방향 및 횡방향의 미끄럼에 의한 마멸은 각각 그림 4 의 상하부 및 좌우에 있는 시편과 핵연료봉과의 접촉부에서 발생된 것으로 하였다.

표 2 는 시험에 사용한 스프링/딤플 시편 두 종류와 접촉 조건에 따라 발생한 마멸량을 미끄럼 방향에 따라 분류하여 각각을 전체 마멸량에 대한 백분율로 나타낸 것이다. 시편 2 에 의한 마멸에서는 축방향의 미끄럼에 의한 마멸이 주로 발생한 것을 알 수 있으나 시편 1 에 의해서는 축방향 및 횡방향의 마멸이 비슷한 정도로 발생하였다. 이것은 시편 2 의 경우, 구조적으로 축방향의 미끄럼에 의한 마멸부 길이의 증가가 횡방향의 미끄럼에 의한 마멸부 폭의 증가보다 더 쉬운데 대해, 시편 1 의 경우에는 횡방향 미끄럼일 때 마멸부 폭의 증가가 용이하나 축방향 미끄럼에 의해서는 마멸부 길이의 증가가 없기 때문인 것으로 설명할 수 있다. 그럼에도 불구하고 각 회 시험

표 2. 축방향(Ax) 및 횡방향(Tr) 미끄럼에 따른 마멸량 비교 (Unit : %)

		5 N		0 N		Gap 0.1 mm	
		시편 1	시편 2	시편 1	시편 2	시편 1	시편 2
1st	Ax	98.25	97.27	25.08	95.02	91.07	75.61
	Tr	1.75	2.73	74.92	4.98	8.93	24.39
2nd	Ax	39.45	45.09	30.51	82.72	61.69	79.05
	Tr	60.55	54.91	69.49	17.28	38.31	20.95
3rd	Ax	13.14	84.29	14.20	60.66	7.64	1.86
	Tr	86.86	15.71	85.80	39.34	92.36	98.14
Avg.	Ax	68.85	71.18	27.80	88.87	76.38	77.33
	Tr	31.15	28.82	72.21	11.13	23.62	22.67

결과를 평균한 값을 볼 때 시편 1 에 의한 just-contact 인 경우만 제외하고 모두 축방향 미끄럼에 의한 마멸량이 더 크게 나타난 것으로부터 앞선 연구[3,7]에서처럼 핵연료봉 프레팅마멸 문제에 있어 축방향의 미끄럼에 의한 영향을 주의 깊게 고려하여야 함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 원자로 내에서 발생할 수 있는 핵연료봉과 지지격자체 사이의 접촉 조건으로서 접촉력 5 N 및 0 N 일 때와 접촉부의 간격이 0.1 mm 일 때를 모사하고 두 가지의 지지격자 스프링/딤플의 형상에 대해 셀 단위의 프레팅 마멸시험을 수행한 것으로 다음의 결론을 얻었다.

1. 스프링/딤플과 핵연료봉의 접촉부 형상이 다르면 동일한 조건의 접촉력과 핵연료봉의 진동에 의해서도 접촉면의 미끄럼 상태가 달라질 수 있다. 이것은 앞선 연구[5]에서 고찰한 부분 또는 전미끄럼 상태의 경계가 접촉부 형상에 영향을 미친다는 논의가 실험적으로 검증되었음을 의미한다.
2. 지지격자 스프링/딤플과 핵연료봉 사이에 간격이 존재하면 마멸량은 매우 증가한다. 비록 접촉력이 0 인 just-contact 의 경우에서도 마멸량은 간격이 존재하는 경우에 비해 현저히 줄어 든다. 따라서 원자로 내에서 핵연료봉이 지지격자체에 의해 건전하게 지지되어야 마멸 손상을 줄일 수 있음이 실험적으로 확인되었다.
3. 딤플과의 접촉에 의한 마멸과 비교할 때 스프링에 의한 마멸량이 현저히 크게 나타났으므로 접촉하는 물체의 강성이 마멸에 영향을 주는 것으로 예상하였다. 이는 지지격자 스프링의 강성 설계 시 마멸 저항성을 고려할 필요가 있다는 것을 의미하며, 이를 위해 향후 다른 강성의 시편에 대한 마멸 시험을 통해 검증할 가치가 있다.
4. 미끄럼 방향에 따른 마멸량 비교 분석을 통해, 예상하였던 것과 같이, 축방향 미끄럼에 의한 마멸량이 횡방향에 비해 크게 나타난 경우가 많았다. 따라서 축방향의 미끄럼을 제어할 수 있는 지지격자 스프링/딤플의 설계가 핵연료봉의 프레팅마멸 손상을 억제하는 데에 효과적일 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 김형규 외 4 인, 한국원자력학회 1999 추계학술발표회 논문집, 논문번호 270.
2. Hyung-Kyu Kim, Trans. SmiRT-15 (1999) Vol. X, 173-180.
3. Hyung-Kyu Kim, Nucl. Engng. Des., 192(1) (1999) 81-93.
4. 김형규 외 4 인, 한국원자력학회 2000 추계학술발표회 논문집, 논문번호 59.
5. 김형규 외 3 인, 한국원자력학회 2001 춘계학술발표회 논문집, 논문번호 121.
6. 김형규 외 2 인, 한국원자력학회 2001 추계학술발표회 논문집, 논문번호 190.
7. T.P. Joulin et al., Trans. SmiRT-16 (2001) paper no. 1239.
8. 김형규 외 4 인, 한국윤활학회 2001 추계학술대회 논문집 245-251.
9. 김형규 외 4 인, Program “WEARVOL”, 2001-01-12-7083.
10. T.M. Frick, T.E. Sobek and J.R. Reavis, ASME Special Publications (1984) 149-161.
11. S. Fouvry, P. Kapsa and L. Vincent, Wear, 200 (1996) 186-205.