2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

핵연료봉 프레팅마멸의 임계진폭에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Critical Slip Amplitude of Fuel Rod Fretting Wear

김형규*, 윤경호, 강흥석, 송기남, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

핵연료봉 프레팅마멸을 급격히 증가시키는 임계 진폭에 대해 실험적으로 분석하였다. 시편으로는 지르칼로이-4 로 된 핵연료봉 피복관과 접촉부가 편평한 지지격자 스프링을 사용하였으며 핵연료봉의 프레팅마멸 시험을 위해 자체 개발된 시험장비를 이용하였다. 측정 현미경을 이용하여 피복관 시편에 발생한 마멸 형상을 부분 미끄럼 및 전 미끄럼으로 구분하였다. 또한 표면 거칠기 측정장비를 이용하여 마멸부위의 깊이 방향 궤적을 측정하였으며 마멸 부피를 계산하였다. 마멸 부피가 급격히 증가되는 임계 진폭은 부분 미끄럼에서 전 미끄럼 상태가 되는 미끄럼 변위의 진폭과 일치하였으며 수직 하중이 증가함에 따라 임계 진폭이 증가하였다. 이로부터 새로운 프레팅 지도를 제안하였다. 국산핵연료 17X17 형을 예로 하여 핵연료봉의 진동을 고려하였을 때 핵연료봉과 스프링 사이에 임계 진폭 이상의 미끄럼은 발생하기 어려울 것으로 사료되어 핵연료봉에서의 프레팅마멸은 부분 미끄럼 상태의 마멸이 진전되는 것으로 판단되었다.

Abstract

Critical slip amplitude of fuel rod fretting wear is investigated experimentally. A cladding tube and a spacer grid spring of flat contour are used for contacting specimens. The specimens are made of Zircaloy-4. Fretting wear tester specially developed for fuel rod fretting is used for the experiment. Wear on the tube is examined by measuring microscope. Partial and gross slip conditions are classified from the obtained wear shape. Surface roughness tester is also used to measure the wear depth and contour, from which wear volume is evaluated. The critical slip amplitude from which a considerable increase of the wear volume is found to be coincident with the slip amplitude from which partial slip condition changes to gross slip one. The critical slip amplitude increases as normal force increases. So a new fretting map is suggested. It is regarded that the critical slip amplitude is hard to occur during the flow-induced vibration of a fuel rod when the dimensions of KOFA 17X17 is considered. Wear of partial slip condition is thought to evolve in fuel fretting problem.

1. 서 론

핵연료봉과 지지격자체 사이의 접촉에 의한 프레팅마멸 기구는 원자로 내의 냉각수 유동에 의해 핵연료봉이 진동할 때, 핵연료봉과 이를 지지하는 지지격자체의 스프링 또는 딤플과의 접촉부에서 반복적인 미끄럼 현상이 발생함에 따라 피복관의 접촉부에서 재료가 이탈하는 것이다. 따라서 진동에 의해 발생하는 미끄럼 진폭을 감소시키거나 미끄럼이 발생하더라도 마멸 이탈물의 발생을 억제하는 것이 핵연료봉의 프레팅마멸 손상을 방지하는 대책이라 할 수 있다.

일반적으로 마멸 연구에서는 마멸량이 접촉 물체 상호 간의 수직 하중과 미끄럼 진폭에 영향을 받는다고 알려져 있다. 한편 접촉역학에서는 접촉 물체에 작용하는 전단 하중과 마찰력과의 비교로부터 접촉면의 전체에서 미끄럼이 발생하는 전 미끄럼(gross slip) 상태와 일부분에서만 미끄럼이 발생하는 부분 미끄럼(partial slip) 상태로 구분하고 있다. 이때 마멸은 접촉면의 미끄럼 영역에서 발생하므로 미끄럼 상태에 따라 마멸 형태가 달라지게 된다.

마멸에 대한 접촉역학적 접근에서는 전 미끄럼 및 부분 미끄럼 상태와 접촉 물체 상호 간의 수직 하중과 미끄럼 진폭의 관계를 설명하기도 하며, 이 관계를 도식적으로 나타낸 것이 '프레팅 지도(fretting map)' 이다. 마멸의 억제를 위해서는 마멸 기구를 파악하여야 할 필요가 있고, 부분 및 전 미끄럼 상태의 마멸 기구에 대한 연구를 위해 프레팅 지도를 작성하게 된다. 이때 접촉부에서의 미끄럼 조건은 접촉면에서의 응력장에 의해 영향을 받으며, 또한 접촉 응력장은 물체의 접촉부 형상에 의존하므로 접촉 물체의 형상이 달라질 경우 또 다른 프레팅 지도를 생산할 수 있을 것이다.

이와 더불어 마멸 연구에서 중요한 주제 중 하나는 '임계 미끄럼 진폭(critical slip amplitude; 이하 "임계 진폭"이라 한다)' 이다. 임계 진폭의 정의로서는 마멸이 발생하기 위한 접촉부에서의 상대적 미끄럼 진폭으로서, 임계 진폭 이후의 마멸량은 미끄럼 진폭에 비례하여 직선적으로 증가하는 경우라고 하는 것[1] 또는 마멸량이 급격히 증가하는 최소 미끄럼 진폭이라고 하는 것[2] 등이 있다. 그러나 공통적인 사항은 임계 진폭 이후에서는 미끄럼 진폭의 증가에 따라 마멸량이 급격히 증가한다는 것이다. 핵연료봉의 프레팅 마멸 연구에서 임계 진폭을 구하고, 그 이하의 진동이 발생할 수 있는 방안을 찾는 것은 핵연료봉의 프레팅마멸을 억제하기 위해 중요한 주제라 생각된다.

핵연료봉 프레팅마멸의 억제를 위한 지지격자체의 개발을 궁극적인 목표로 하고 있는 본 연구에서는 앞서 수행한 지지격자 스프링의 형상과 미끄럼 방향이 핵연료봉의 마멸에 미치는 영향에 대한 연구[3]에 이어 임계 진폭에 대한 실험을 수행한 결과를 정리한 것이다. 이를 위해 앞선 연구에서와 같이 핵연료봉 피복관 시편과 지지격자 스프링 시편을 접촉시켜 프레팅 실험을 수행한 후 피복관 시편의 마멸면을 관찰하고, 표면 거칠기 측정장비로 측정하였으며 마멸 부피(마멸량)을 계산하였다. 결과로서 마멸의 형태와 마멸량의 관계를 분석하였으며 임계 진폭을 구하였다. 한편 임계 진폭이 발생할 때의 핵연료봉 진동 현상에 대해 국산핵연료 17X17 형을 예로 하여 분석하여 보았다.

2. 시 험

2.1 시편

지지격자 스프링 시편과 핵연료봉 피복관 시편의 재질은 모두 상용 경수로 핵연료에 사용하고 있는 지르칼로이-4 이며, 그 기계적 성질과 화학 성분을 표 1 에 정리하였다. 피복관 시편의 외경은 9.5 mm, 두께는 0.6 mm 이며, 상용 핵연료봉의 제조에 사용되는 것을 절단하여 채취하였다. 스프링 시편은 두께 0.46 mm 의 판재를 프레스 가공하여 제작하였으며 피복관 시편과의 접촉부는 편평하도록 하였다. 이와 같은 접촉에 의해 핵연료봉 시편의 횡 방향으로는 Hertz 접촉 상태가 되고 축 방향으로는 펀치 접촉 상태가 된다. 이때 스프링 시편이 두께 방향으로 모따기 가공이 되어 있으므로 양단 모서리가 직각인 펀치의 형태는 아니며 truncated punch 로 볼 수 있든가 또는 제조시의 blending 을 고려할 때 양단이 라운딩된 펀치로 볼 수 있다. 실험을 시작하기 전 모든 시편은 아세톤으로 세척한 후 건조시켜 사용하였다. 한편 실험 전에 시편의 표면 거칠기를 측정하였으며 그 결과, 피복관 시편의 평균 거칠기(*Ra*)는 0.76 ì m, 스프링 시편은 0.67 ì m 이었다.

표 1. 시편에 사용한 지르칼로이-4 의 기계적 성질 및 화학 성분.

Mechanical properties (at room temperature)				
Tensile strength	Yield strength (0.2% offset)	Elongation in 2″	Elastic Modulus	Poisson' s Ratio
470 MPa	315 MPa	31%	136.6 GPa	0.294

Chemical composition (wt. %)						
Sn	Fe	Cr	O	C	Si	Zr
1.28	0.22	0.12	0.114	0.013	0.010	remained

2.2 실험 장치

본 연구의 실험에 사용한 장비는 핵연료봉 프레팅마멸 시험을 위해 개발된 장비로서 그림 1 에 개략도를 보여 주고 있다. 원자로 내의 냉각수 유동에 의한 핵연료봉의 진동을 고려하기 위해, 지지격자 스프링 시편을 고정하고 피복관을 상하로 왕복 운동하게 하였다. 한편 개발된 장비는 회전 속도를 가변할 수 있는 서보 모터와 편심 원통, 링크 기구 및 지렛대를 이용하고 있으며 실험 변수인 시편 사이의 상대 진폭, 진동수, 수직 하중 등을 조절할 수 있도록 설계되었다. 또한 수중 시험을 위해 시편 부위가 물 속에 잠기게 할 수 있는 물통을 갖고 있으며 피복관과 스프링 시편의 상대 미끄럼 변위 방향을 축 방향으로부터 횡 방향으로 바꾸어 시험할 때에는, 시험 장비에서의 왕복 운동 방향을 바꾸지 않고, 스프링 및 피복관 시편을 90^{o} 회전시킴으로써 가능하게 하였다. 실험장치에 대한 상세한 설명은 참고 문헌[3]을 참조할 수 있다.

2.3 실험 및 마멸 측정 방법

본 연구에서의 프레팅마멸 실험은 상온, 공기 중에서 수행하였다. 임계 진폭을 알기 위해 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 수직력이 작용하는 경우에 대해 실험하였다. 수직력을 이와 같이 한 것은 대부분의 지지격자 스프링에 대한 설계 하중이 이 값의 범위에 있기 때문이다. 한편 미끄럼의 방향으로는 수직력 30 N 을 이용한 실험을 제외하고는 모두 축 방향의 미끄럼에 대한 실험을

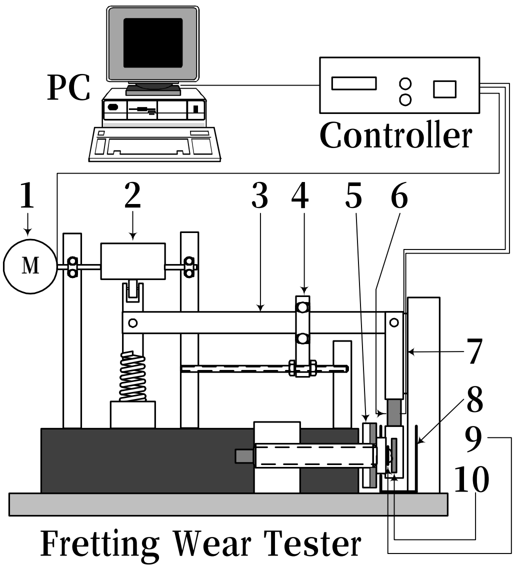


그림 1. 프레팅마멸 시험장비 개요도.

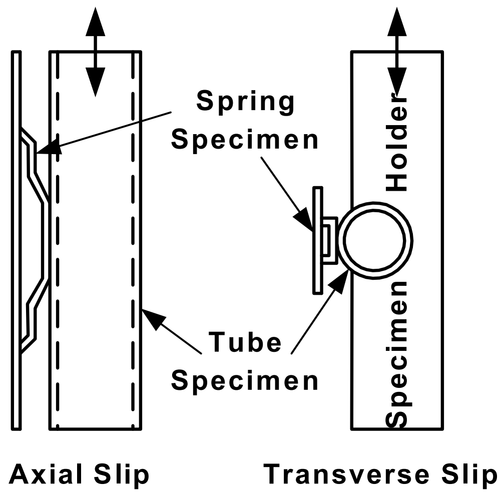


그림 2. 축 방향 및 횡 방향 미끄럼 실험 에서의 시편 접촉 상태.

수행하였다. 수직력 30 N 의 실험에서는 축 방향 및 횡 방향 실험을 모두 수행하였다. 이때 피복관 및 스프링 시편의 접촉 상태는 그림 2 와 같으며, 횡 방향의 시험에서는 피복관 시편을 90^{o} 회전시켜 장착할 수 있는 시편 고정구를 사용하였다. 모든 실험에서 상대 운동의 반복 주파수는 30 Hz 로 하였으며 횟수는 100,000 회로 하였다.

각각의 실험이 끝난 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 마멸 부피를 계산하였으며 이때, 개발된 마멸부피 계산 프로그램[4]을 이용하였다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 마멸면 관찰

프레팅마멸을 발생시키는 반복적인 접촉 전단 하중의 크기가 마찰력보다 작을 경우에는 접촉면 전체에서는 미끄럼이 발생하지 않으나 부분적인 미끄럼이 발생하는 부분 미끄럼 상태가 되고 전단 하중의 크기가 마찰력보다 같거나 큰 경우에는 접촉면 전체에서 미끄럼이 발생하는 전 미끄럼 상태가 된다. 접촉면에서의 마멸은 접촉 물체 사이에 전단 방향으로 상대적인 변위가 존재하는 미끄럼 영역(slip zone)에서 발생한다. 따라서 접촉부 전체 또는 일부분에서 마멸이 관찰될 때 각각 전 미끄럼 또는 부분 미끄럼 상태가 발생하였다는 것을 알 수 있다.

접촉역학적 해석으로부터 부분 미끄럼 상태에서의 미끄럼 영역은 접촉부의 가장자리에서 발생한다. 즉, 접촉 물체에 작용하는 전단 하중을 Q 라 할 때 접촉부에서 미끄럼이 발생하지 않는다는 가정으로부터 접촉면 전단 트랙션 $q(x)$는 평면 문제의 경우 다음과 같이 구해 진다[5].

$$q(x) = \frac{Q}{p\sqrt{a^2 - x^2}} \tag{1}$$

여기서, a 는 접촉부 길이의 반이다.

식 (1)로부터 전단 트랙션 $q(x)$는 접촉부 경계에서 특이점을 갖게 됨을 알 수 있고 이것은 두 접촉 물체가 상대 변위를 갖지(미끄러지지) 않기 위해서는 마찰계수가 무한대가 되어야 하는 물리적 모순점을 갖게 된다. 이것은 전단 하중이 작용할 때에는 접촉부 가장자리에 필연적으로 미끄럼이 발생한다는 것을 의미한다. 이때 접촉부를 미끄럼 영역과 고착 영역으로 구분한다. 미끄럼 영역(또는 고착 영역)의 크기는 전단 하중의 크기에 영향을 받으며 구(또는 원통)과 구(또는 원통 또는 평판)의 접촉 상태인 Hertz 접촉인 경우에 다음과 같은 수식으로 구해진다.

$$\frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{Q}{mP}} \tag{2}$$

여기서 c 는 고착 영역 크기의 반이며 μ는 정지 마찰계수, 그리고 P 는 접촉 수직 하중이다. 즉 전단 하중이 증가함에 따라 미끄럼 영역은 식 (2)에 따라 커진다. 이에 대한 상세한 설명은 참고 문헌[5]을 참고할 수 있다.

한편 프레팅마멸 연구에서는 부분 미끄럼과 전 미끄럼 상태를 접촉 수직 하중과 상대 미끄럼 변위의 진폭에 따라 구분하여 '프레팅 지도(fretting map)'를 생산하기도 한다. 그림 3 에서는 구와 평판의 접촉에 대한 마멸 시험 결과로부터 제시된 '프레팅 지도(fretting map)' [6]를 나타내고 있다. 그림 3 으로부터 진폭이 크고 수직 하중이 작을수록 전 미끄럼 상태가 되고, 진폭이 작고 수직 하중이 클수록 부분 미끄럼 상태가 되는 것을 알 수 있다. 한편 그림 3 에는 실험하였던 각각의 수직 하중 및 상대 미끄럼 변위의 진폭을 함께 표시하였다. 이로부터 그림 3 의 프레팅 지도에 의해서는 본 연구에서 수행한 실험 조건 중 수직 하중 30 N, 상대 미끄럼 변위의 진폭 5 μm(변위 범위 10 μm)인 경우만 부분 미끄럼 발생 조건으로 볼 수 있으며 그 이외에는 모두 전 미끄럼 상태가

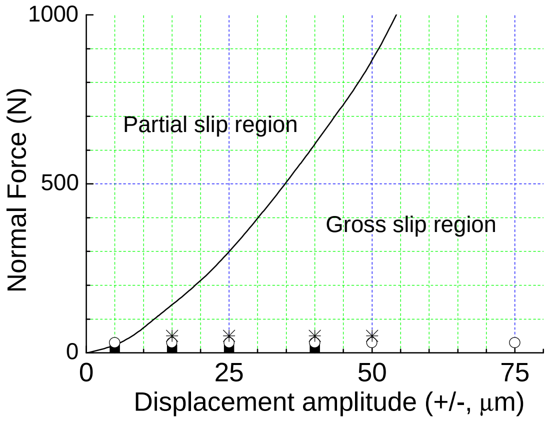
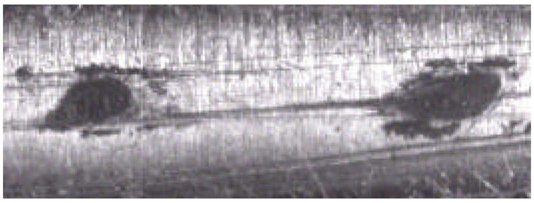
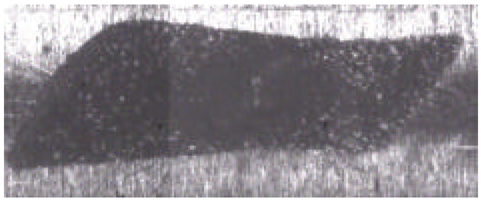


그림 3. 프레팅 지도[6]와 비교한 본 연구에서의 실험 조건.



(a)



(b)

그림 4. 피복관 시편에서 관찰된 마멸 형상(검게 나타난 부분); (a) 부분 미끄럼 상태(Type 1) (b) 전 미끄럼 상태(Type 2).

되었음을 알 수 있다. 그러나 본 연구에서 사용한 시편의 형상은 프레팅 지도를 위해 사용된 시편과 다르므로 부분 미끄럼과 전 미끄럼의 분류가 그림 3 에서의 프레팅 지도에서 분류된 것과 비교하여 달라질 수 있을 것으로 예상하였다.

실험 결과, 피복관 시편에서 관찰된 마멸의 흔적은 그림 4(a) 및 (b)에 나타낸 것과 같이 스프링의 가장자리 두 군데에서 나타난 것('Type 1'이라 한다)과 스프링의 전체 길이에서 나타난 것('Type 2'라 한다)의 두 가지로 뚜렷이 구분할 수 있었다. Type 1 은 부분 미끄럼 상태에 의한 마멸이라 볼 수 있고 Type 2 는 전 미끄럼 상태에 기인 한 것으로 생각할 수 있다. 각각의 실험 조건에 따른 피복관 시편의 마멸 형상을 Type 1 과 Type 2 로 분류하여 표 2 에 나타내었다. 한편 본 연구에서의 실험 조건을 좀 더 분명히 나타내기 위해 그림 3 을 확대하여 그림 5 에 보여 주고 있으며 표 2 에 나타낸 Type 1 과 Type 2 를 고려하여 부분 미끄럼과 전 미끄럼 상태의 경계를 추정하여 점선으로 나타내었다. 그림 5 및 표 2 로부터 본 연구에서의 실험 결과로부터는 부분 미끄럼 영역이 기존의 프레팅 지도[6]보다 더 넓게 평가될 수 있음을 알 수 있다.

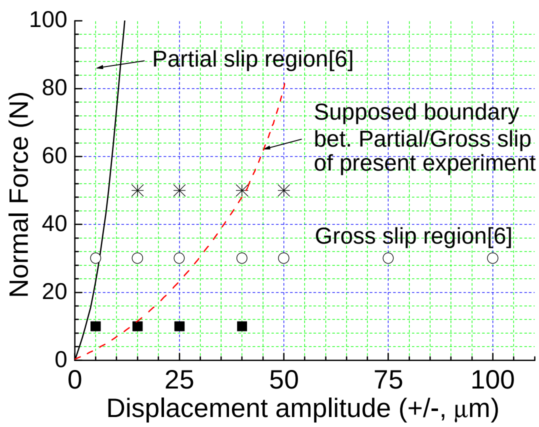


그림 5. 본 연구의 실험 결과로부터 새로이 추정한 부분 미끄럼과 전 미끄럼 상태의 경계(그림 3 의 프레팅 지도 중 실험 조건 부분을 확대하여 나타낸 그림).

3.2 마멸 깊이 및 부피 분석

측정 현미경에 의해 피복관 시편의 마멸면을 관찰한 후 표면 거칠기 측정장비를 이용하여 마멸부의 궤적을 측정하였다. 표면 거칠기 측정장비에 의한 측정은 장비의 탐침(stylus)이 피복관 시편에 접촉하여 마멸부를 통과할 때 마멸의 깊이만큼 탐침이 상하 이동하며 이때의 좌표값이 기록되는 것으로 마멸의 깊이를 직접 측정할 수 있다. 이와 같은 측정을 탐침의 진행 방향에 직각인

방향으로 일정 거리만큼씩 이동시키며 반복하게 되면 마멸 부위 전체에 대한 3 차원적 데이터를 얻게 된다. 이 3 차원 데이터로부터 마멸 부피를 계산할 수 있다. 마멸 부피의 계산에는 특별히 개발된 프로그램을 이용하였다[4]. 한편 표면 거칠기 측정장비를 이용하여 마멸부를 측정하고 마멸 부피를 구하는 방법은 참고 문헌[3,4]에 상세히 나타내었으므로 참조할 수 있다.

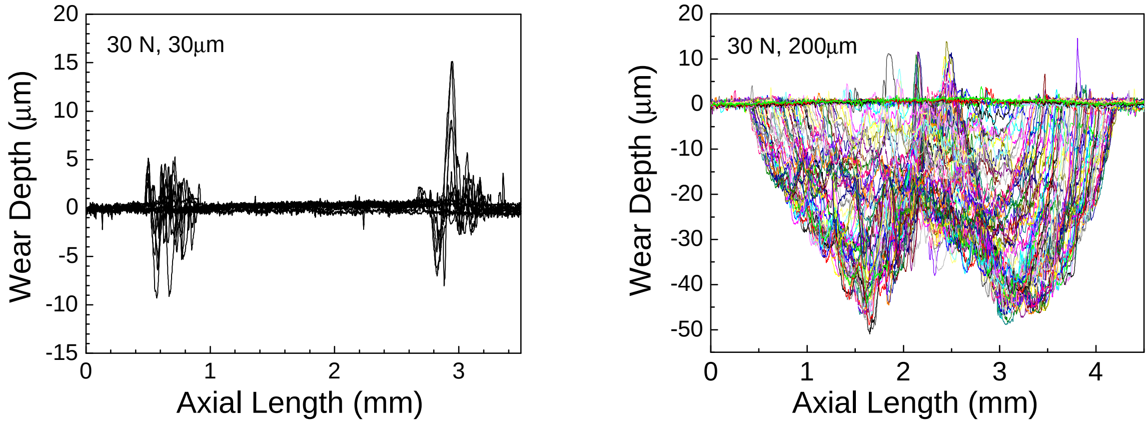
표 2 에는 각각의 수직 하중 *P* 와 미끄럼 변위 범위 *d* 에서 나타난 마멸의 측정 결과를 요약하여 보여 주고 있다. 예상한 대로 마멸의 형태가 Type 1 에서 Type 2 가 될 때 마멸 부피가 급격히 증가함을 알 수 있다. 이것은 마멸 부위의 면적과 깊이가 증가함에 따라 나타난 것이다. 마멸의 형태가 Type 2 일 때에는 각 수직 하중에서 미끄럼 변위 범위가 증가하게 되면 마멸 깊이와 부피가 동시에 증가하였다. 그러나 마멸 형상이 Type 1 일 경우에는 조금 다른 경향을 보이고 있는데 특히 10 N 의 수직 하중에서 10 ìm 일 때의 마멸 깊이와 부피가 30 ìm 일 때의 그것보다 두 배 정도 큰 것과, 50 N 에서 50 ìm 의 미끄럼 변위 범위로 실험한 경우의 마멸 깊이 및 부피가 다른 경우에 비해 현저히 작게 나타난 것으로부터 부분 미끄럼 상태 내에서 마멸이 현저히 줄어드는 어떤 특정한 하중 및 미끄럼 변위 범위 값이 존재하지 않을까 하는 생각을 갖게 한다. 만일 이러한 값이(또는 범위가) 존재한다면 프레팅 손상을 억제하기 위한 핵연료봉의 진동 특성을 제안할 수 있을 것이다. 물론 이를 위해서는 좀 더 많은 실험이 필요하며 특히 지지격자 스프링의 형상에 대한 의존성을 밝혀야 할 것이다.

일반적으로 마멸의 깊이 방향으로의 궤적은 부분 미끄럼일 경우 접촉부의 양쪽 가장자리에서 마멸이 발생하는 이유로 “W” 형상이 되며 전 미끄럼인 경우는 접촉부 전체에서 마멸이 발생하므로 “V” 형상과 유사하다고 알려져 있다. 그러나 그림 6(a) 및 (b)에서 나타낸 마멸부 궤적으로부터 피복관과 스프링의 접촉에서는 전 미끄럼 상태에서도 부분 미끄럼 상태일 때와 같이 깊이 방향으로의 마멸 형상이 “W” 형태로 된다는 것을 알 수 있었다. 따라서 기존에 많이 사용하였던 방법으로서 마멸부를 구 또는 타원체의 일부[7-9]로 단순화 하여 마멸 부피를 구하게 되면 결과를 상당히 왜곡시킬 수 있다고 사료된다. 그에 비해 본 연구에서 사용한 방법은 마멸부의 형상 자체를 이용하므로 비교적 정확히 마멸 부피를 구할 수 있다.

표 2. 각 실험 조건에서의 마멸 측정 결과.

d \ *P*	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	7.02/6.56*	20.24/17.91*	1/1*	-	-	-
30 μm	5.30	31.02	1	9.29/3.60	32.30/6.56	1/1	9.74	42.89	1
50 μm	8.08	500.57	2	16.98/23.93	83.82/ 229.75	1/1	2.47	3.10	1
80 μm	19.11	1258.40	2	20.84/17.59	3057.93/ 2534.75	2/2	23.36	198.91	1
100 μm	-	-	-	29.81/22.51	5417.76/ 4129.68	2/2	26.03	5063.47	2
150 μm	-	-	-	39.84/50.26	11203.71/ 17587.77	2/2	-	-	-
200 μm	-	-	-	50.98/57.55	22016.01/ 24036.66	2/2	-	-	-

*: Axial/Transverse Slip.



(a) (b)

그림 6. 표면 거칠기 측정장비에 의해 측정된 마멸부 궤적; (a) 부분 미끄럼 상태 (b) 전 미끄럼 상태(전 미끄럼 상태일 때의 마멸도 접촉부의 양 가장자리가 중앙보다 더 깊은 "W" 형상을 보이고 있다)..

수직 하중 20 N, 미끄럼 변위 범위 14 ì m 의 조건으로 마멸 실험을 수행한 앞선 연구 결과[3]에서는 스프링이 피복관과 접촉하는 부위의 형상이 편평하지 않고 오목하거나(concave contour) 볼록할(convex contour) 경우에는 미끄럼 방향이 횡 방향일 때 보다 축 방향일 때 마멸이 현저히 많이 발생하였다. 그러나 표 2 에서 수직 하중 30 N 의 실험 결과를 보면 축 방향 및 횡 방향의 미끄럼에 의한 마멸 깊이와 부피가 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 오히려 50, 150 및 200 ì m 의 미끄럼 변위 범위일 때는 횡 방향일 때의 마멸이 축 방향의 마멸보다 크게 나타났다. 따라서 축 방향 및 횡 방향의 미끄럼과 마멸 정도와의 관계는 스프링의 접촉부 형상에 따라 달라진다고 생각된다.

그러나 앞선 연구에서 접촉부 형상이 오목한 스프링이 좋은 마멸 저항성을 갖는 것으로 나타났고, 이때 축 방향 미끄럼일 때 발생된 마멸이 횡 방향 미끄럼일 때에 비해 크게 나타났으므로 마멸 억제를 위한 스프링의 개발을 위해서는 축 방향의 미끄럼을 주의 깊게 고려해야 한다는 것은 분명하다고 판단된다. 본 연구에서는 스프링의 형상을 접촉부가 편평한 한 가지로 고정하였으므로 스프링의 형상 변화에 대한 수직 하중 및 미끄럼 변위 범위의 차이가 마멸에 미치는 영향을 분석하지는 않았다. 그러나 앞선 연구의 결과로부터 스프링의 형상에 대한 영향은 분명히 있을 것으로 사료되며 향후의 연구로 수행할 예정이다.

본 연구에서의 실험 결과로부터 핵연료봉의 프레팅 마멸을 억제하기 위한 축 방향의 미끄럼 변위 범위는 수직 하중의 크기에 따라 달라지며 사용한 스프링 시편과 같이 핵연료봉과의 접촉부가 편평한 형상을 가질 때에는 축 방향 및 횡 방향 미끄럼 변위 범위를 10 N 에서 50 ì m 미만, 30 N 에서 80 ì m 미만, 그리고 50 N 일 때 100 ì m 미만으로 제어하여야 한다고 판단된다. 그리고 서론에서 나타낸 임계 진폭의 정의를 따를 때, 마멸량이 현저히 증가할 때의 진폭으로서, 위의 미끄럼 변위 범위 값들의 반(1/2)을 각각의 수직 하중에서의 임계 진폭이라 할 수 있다. 실험에서 사용한 변위 범위로부터 임계 진폭을 좀 더 보수적으로 설정한다면 10, 30, 50 N 의 수직 하중에서 각각 15, 25, 40 ì m(즉, 미끄럼 변위 범위 30, 50, 80 ì m)을 제시할 수 있다. 이 값은 본 연구의 실험에서와 동일한 성질의 지르칼로이-4 튜브 두 개를 서로 직각이 되게 접촉시켜 프레팅마멸 실험을 수행한 결

과, 임계 진폭은 50 ì m 으로서 수직 하중에 무관하였다[7]고 발표한 앞선 연구와는 차이가 있다. 이것은 본 연구의 실험에서는 스프링과 튜브의 접촉으로서 앞선 연구[7]에서와 접촉 형상이 달라 마멸부의 형상 역시 다르게 되고 또한 마멸 부피의 계산 방법이 다른 데에 그 원인이 있다고 사료된다.

3.3 핵연료봉의 진동에 대한 고찰

원자로 내에서 핵연료봉이 냉각수 유동에 의해 진동하게 되면 횡 방향으로 처짐이 발생하게 되고 이때 핵연료봉은 지지격자 스프링 위로 미끄러지게 된다. 이때 미끄러지는 양을 본 논문에서의 미끄럼 변위 범위로 볼 수 있을 것이다. 따라서 프레팅마멸을 억제하기 위한 핵연료봉의 진폭(즉 처짐)은 본 논문에서 관찰된 임계 진폭의 두 배(즉 미끄럼 변위 범위) 보다 작은 미끄럼 거리가 지지격자 스프링과 핵연료봉 사이에 발생될 수 있도록 하는 것이 요구된다.

핵연료집합체에서 인접한 지지격자체 사이인 하나의 스팬(span)에서 핵연료봉이 휘게 되면 중앙에 발생하는 최대 진폭 h 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h = R - \frac{l}{\tan q} \tag{3}$$

여기서 R 은 하나의 스팬에서 횡 방향으로 처진 핵연료봉의 변형을 원호로 가정하였을 때, 그 원의 반지름이며 l 은 스팬 길이의 1/2 이다. q는 상기 원호의 1/2 과 R 로 구성되는 부채꼴의 내부 각으로서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{q}{\sin q} = \frac{l'}{l} \tag{4}$$

여기서 l' 은 부채꼴 원호 길이의 1/2 이며 (l + 미끄럼 변위 범위)가 된다.

핵연료집합체의 스팬 길이는 설계 변수로서 핵연료의 종류에 따라 다르다. 여기서는 최대 진폭 h 를 계산하기 위해 국산핵연료 17X17 형의 지르칼로이-4 지지격자체 사이의 거리인 522 mm 와 미끄럼 변위 범위 30, 50, 80 ì m 를 고려하였으며 각각의 미끄럼 변위에서 h 는 3.55, 4.47, 5.61 mm 가 된다. 즉 수직 하중(스프링 힘)이 클수록 지지격자 스프링/핵연료봉 접촉부의 임계 진폭을 위한 핵연료봉 진동 시의 진폭(즉 횡 방향으로의 처짐)이 크다. 그러나 상기의 미끄럼 변위는 핵연료봉 사이의 간격(국산핵연료 17X17 형의 경우 3.1 mm)보다 커서 모든 핵연료봉이 동일한 상(즉, in-phase)으로 진동하지 않는 한 핵연료봉 상호 간의 충돌이 발생할 수 있는 값이다. 원자로 내에서 핵연료집합체 내의 핵연료봉 상호 간에 충돌이 발생하는 것은 매우 위험한 상황이며 실제 발생되기는 매우 어려울 것으로 사료된다. 물론 본 절에서 계산한 방법은 핵연료봉의 1 차 진동 모드에 대해 가장 단순한 기하학적 형상을 가정하고 있으므로 실제로 지지격자 스프링 힘을 고려한 진동 모드의 형상과는 차이가 있을 것이다.

그럼에도 불구하고 핵연료봉 상호 간의 충돌이 발생하지 않는 최대 진동 진폭으로 핵연료봉

간 간격의 1/2 을 취할 때(국산핵연료 17X17 형의 경우 1.55 mm) 지지격자 스프링과 핵연료봉 사이의 접촉부에서 발생하는 미끄럼 거리는 위의 임계 미끄럼 변위 범위보다 작게 된다. 따라서 지지격자 스프링과 핵연료봉 사이의 접촉부에서 임계 진폭 이상의 진동이 발생하지는 않을 것으로 생각된다. 본 연구의 실험에서 관찰된 마멸 형태를 고려할 때, 임계 진폭 미만의 미끄럼 변위가 발생하면 부분 미끄럼 상태의 마멸이 발생하므로 핵연료봉에서 나타나는 프레팅마멸은 부분 미끄럼 상태에서 발생하는 마멸이 미끄럼 반복 횟수의 증가에 따라 진전되는 것이라 판단된다. 본 연구에서는 미끄럼 반복 횟수를 100,000 회로 하였으므로 핵연료 수명 기간 동안 마멸이 진행되는 점을 고려하고 있지는 못하다. 따라서 핵연료봉의 마멸 기구를 파악하고 마멸 억제 방안을 개발하기 위해, 향후의 연구로서 임계 진폭 이하의 미끄럼 진폭에 대해 미끄럼 반복 횟수의 증가에 따른 마멸 진전 거동을 조사할 필요가 있다.

5. 결 론

핵연료집합체의 지지격자 스프링과 핵연료봉의 접촉부에서 유체유발 진동에 의해 발생하는 프레팅마멸에 대한 연구의 일부로서 접촉면이 편평한 스프링과 피복관 시편을 이용하여 임계 진폭에 대한 실험적 분석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 임계 진폭 값은 수직 하중의 크기에 따라 달라지며 10 N 일 때 15 ìm, 30 N 일 때 25 ìm, 50 N 일 때 40 ìm 으로 나타났다.
2. 임계 진폭은 접촉역학에서의 부분 미끄럼에서 전 미끄럼으로 바뀌는 곳과 일치한다.
3. 핵연료봉과 접촉부가 편평한 지지격자 스프링 사이의 접촉에 의한 부분 미끄럼과 전 미끄럼 상태의 경계를 새로이 제안하였다.
4. 지지격자 스프링과 핵연료봉 사이의 프레팅마멸에서는 전 미끄럼이 발생하더라도 마멸부는 접촉부 양 가장자리 부분에서 깊이 패이는 “W” 형태가 된다.
5. 임계 진폭은 수직력뿐 아니라 물체의 접촉부 형상에 따라 변하는 것으로 사료되므로 특정 스프링이 설계될 때, 설계한 스프링 힘과 접촉부에 대해 임계 진폭을 구하기 위한 실험을 수행할 필요가 있다.
6. 핵연료봉 사이의 충돌이 발생하지 않는다고 할 때 핵연료봉의 진동에 의한 가능한 최대 진폭으로부터는 지지격자 스프링과의 접촉부에서 임계 진폭 이상의 미끄럼이 발생하지는 않는 것으로 판단된다. 따라서 핵연료봉의 프레팅마멸은 부분 미끄럼에 의한 작은 마멸이 진동 횟수의 증가에 의해 진전되는 기구를 갖는다고 사료되어, 이에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. A. Iwabuchi, J. Japan Society of Mechanical Engineers, 44 (1978) 692-699.
2. S. halliday, W. Hirst, Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A, 236 (1956) 411-425.
3. 김형규 외 4 인, 한국원자력학회 2000 추계학술발표회 논문집, 논문번호 59.
4. 김형규, 김선재, 한국윤활학회지(2001) in press.
5. K.L. Johnson, Contact Mechanics, (1989) Cambridge Univ. Press.
6. S. Fouvry, P. Kapsa and L. Vincent, Wear, 200 (1996) 186-205.
7. K.H. Cho, T.H. Kim and S.S. Kim, Wear, 219 (1998) 3-7.
8. S. Fouvry, et al., Wear, 203-204 (1997) 393-403.
9. M. Kalin and J. Vizintin, Wear, 237 (2000) 39-48.