2000 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

미끄럼 방향과 접촉부 형상에 따른 핵연료봉 프레팅마멸의 시험 분석

.

Test Analysis of Fuel Rod Fretting Wear incorporating Slip Direction and Contact Shape

김형규*, 윤경호, 강흥석, 송기남, 정연호

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

가압 경수로 핵연료봉의 프레팅마멸에 대한 시험을 수행하였다. 핵연료봉과 접촉하는 지지격자 스프링으로는 서로 다른 다섯 가지의 형상을 설계하여 제작하였다. 시험에 사용한 핵연료봉과 지지격자 스프링의 재질은 지르칼로이-4 였으며 본 연구의 시험을 위하여 시험 장비를 특별히 설계하였다. 시험은 상온 공기 중에서 수행하였으며 스프링과 핵연료봉의 접촉 수직 및 전단력과 상대운동의 진폭을 동일하게 하였다. 핵연료봉과 접촉하는 스프링의 접촉부는 오목하거나 볼록 또는 편평하게 설계하였다. 한편, 원자로 내의 유동에 의한 핵연료봉의 진동을 고려하여 스프링과 핵연료봉의 상대 운동 방향을 축 방향과 횡 방향의 두 가지로 하여 각각 시험하였다. 핵연료봉에 발생한 마멸은 표면 거칠기 측정장비를 이용하여 깊이와 형상을 측정하였으며 마멸부피를 계산하였다. 마멸 계산을 위해서는 신호처리를 이용한 알고리즘으로 프로그램을 개발하였다. 분석 결과, 상대운동의 방향이 축 방향이고 스프링이 볼록한 형상을 가질 때 마멸이 크게 발생하였다.

Abstract

Fretting wear test is conducted for a PWR fuel rod. Five different shapes of the spacer grid spring are designed and fabricated. The tubes and the springs are made of Zircaloy-4. A fretting wear tester is specially designed for the present research, which is introduced in detail in this paper. The tests are conducted in air and at room temperature. The test conditions, i.e. the normal and shear forces on the contact, the slip range and the number of cycles, are set to be the same. The contact contour of the spring is a concave, a flat or a convex. The influence of the axial and transverse slip directions is also investigated to incorporate the actual tube motion caused by a flow-induced vibration in a reactor. A surface roughness tester is used to measure the wear depth and the contour of the worn surface of the tube. Wear volume is also evaluated, for which an algorithm using the signal processing technique is developed. It is found that the wear is severer when the slip direction is axial, and if the support has a convex contour.

1. 서 론

핵연료봉이 파손되면 원자로 냉각재의 방사능 준위를 상승시키며 발전 정지를 하여야 하는 상황이 될 수 있을 뿐 아니라 핵연료의 교체 또는 수리가 필요하게 된다. 따라서 핵연료봉의 손상 방지에 대한 연구는 원자력 발전의 안정성 및 경제성 제고를 위해 일차적인 관심을 두고 있는 분야이다. 현재까지 원자력 발전소의 운전 중 원자로 내에서 핵연료봉이 손상되는 원인으로는 원자로 내에 있는 이물질이 냉각재의 유동에 의해 핵연료봉에 접촉하거나 충돌하여 피복관이 천공되는 이물질 유기 손상(debris induced failure)과 냉각재 유동 시 핵연료의 유체유발 진동(flow induced vibration)으로 인해 핵연료봉과 지지격자 스프링 또는 딤플과의 접촉면에 마멸 손상 및 이로 인한 피복관의 천공이 발생하는 프레팅마멸(fretting wear) 손상이 있다.

이물질 유기 손상의 근본 대책은 이물질이 핵연료집합체 내부로 유입되지 못하게 하거나 핵연료봉에 접촉하여 손상을 일으키더라도 내부의 핵분열 생성 기체가 외부로 유출되지 않도록 하는 것이다. 이를 위해 핵연료 공급자들은 핵연료집합체의 하단고정체의 유로 구멍을 작게 한다든가 하단고정체 바로 위에 이물질을 거르는 채(sieve)의 역할을 하는 보조 지지격자체를 설치하거나, 유로 구멍 내에 이물질을 거를 수 있는 장치를 구축하고 이와 함께 핵연료봉의 하단부에 있는 봉단 마개를 길게 하는 방법들이 제안되어 실제 적용되고 있다. 이와 같은 방법을 통하여 이물질에 의한 핵연료봉의 손상은 거의 해결하게 되었다.

이에 반하여 핵연료봉의 프레팅마멸 손상은 그 근본 원인인 원자로 냉각재에 의한 유체유발 진동이 복잡한 현상을 나타내고 있을 뿐 아니라 본질적으로 제거될 수 있는 것이 아니고 핵연료봉에 발생하는 마멸은 지지격자체의 설계 변수–예로서 스프링/딤플의 형상, 스프링 힘 및 변위, 혼합날개의 형상 등–에 의해 영향을 받으므로 이물질 유기 손상의 경우에서와 같이 핵연료집합체의 구성 부품에 대한 단순 개량으로부터 해결하기는 힘들다. 그러나 원자력 발전의 경제성, 안전성 제고를 위하여 고 연소도 장 주기의 핵연료 개발이 중요한 과제가 되고 있는 상황에서 프레팅 손상에 대한 대책 마련에 많은 관심을 기울일 수 밖에 없는 형편이다.

핵연료봉과 지지격자체 사이의 접촉에 의한 프레팅마멸 기구는 원자로 내의 냉각재 유동에 의해 핵연료봉이 진동할 때, 핵연료봉과 이를 지지하는 지지격자체의 스프링 또는 딤플과의 접촉부에서 반복적인 미끄럼 현상이 발생함에 따라 피복관의 접촉부에서 재료가 이탈하는 것으로 설명할 수 있다. 따라서 진동에 의해 발생하는 미끄럼 진폭을 감소시키거나 미끄럼이 발생하더라도 마멸 이탈물의 발생을 억제하는 것이 핵연료봉의 프레팅마멸 손상을 방지하는 대책이라 할 수 있다. 냉각재의 유동과 핵연료봉에 의해 주어진 조건으로부터, 기계설계 관점에서 마멸을 억제하기 위해서는 피복관과 지지격자체 사이의 접촉에 대한 분석이 필요하다. 즉, 지지격자체의 개선을 통해 핵연료봉의 프레팅마멸을 억제하는 방안을 도출하는 것이 가장 현실적인 대책이 된다.

재료적인 측면을 제외할 경우, 지지격자 스프링 또는 딤플의 설계 항목으로서는 치수, 형상 그리고 특성곡선(하중과 변위의 관계; characterization curve)이라 할 수 있다. 여기서 특성곡선은 스프링과 딤플의 치수와 형상에 의존한다. 따라서 지지격자 스프링 및 딤플의 개발 시에는 치수와 형상을 우선적으로 설계하게 된다. 이로부터 핵연료봉을 지지하는 스프링 힘과 핵연료봉의 지름에 의해 스프링과 딤플에 발생하는 변위가 설계 요구조건을 만족하도록 결정된다. 핵연료봉이 지지격

자체 내부로 장입될 때, 핵연료봉과의 접촉 상태(즉, 접촉부 길이, 형태 및 수 등) 역시 결정되어야 한다. 지지격자 스프링 또는 딤플의 형상은 접촉면에서의 응력장에 영향을 미치며 결과적으로 피복관에 발생하는 응력 분포를 결정하게 된다. 접촉면에서의 마멸 이탈물 생성은 접촉 응력이 존재하지 않으면 발생하지 않는다. 즉, 지지격자 스프링의 형상과 치수는 핵연료봉의 프레팅마멸 현상을 분석하고 나아가 마멸을 억제하기 위한 방안을 도출하는 데에 중요한 설계 변수이다.

핵연료봉 프레팅마멸의 억제를 위한 지지격자체의 개발을 궁극적인 목표로 하고 있는 본 연구에서는 지지격자 스프링의 형상과 미끄럼 방향이 핵연료봉의 마멸에 미치는 영향을 시험하고 그 결과를 분석한 것이다. 이를 위하여 형상이 서로 다른 다섯 가지 스프링 시편을 고안, 제작하여 스프링 힘과 변위를 동일하게 한 조건에서 시험하였다. 한편, 스프링 시편과는 별도로 핵연료봉 프레팅마멸 시험기를 개발하였으며, 본 논문에서는 시험기의 설명과 함께 마멸 결과의 분석을 위해 개발된 마멸부피를 구하는 알고리즘도 소개하고 하였다.

2. 시 험

2.1 시편

지지격자 스프링 시편과 핵연료봉 피복관 시편의 재질은 모두 상용 경수로 핵연료에 사용하고 있는 지르칼로이-4 이며 기계적 성질과 화학 성분을 표 1 에 정리하였다. 피복관 시편의 외경은 9.5 mm 이며 두께는 0.6 mm 이며, 핵연료봉의 제조에 사용되는 것을 절단하여 사용하였다. 스프링 시편은 두께 0.46 mm 의 판재를 프레스 가공하여 제작하였다. 시험에 사용한 다섯 가지 스프링 형상을 그림 1 에 보여 주며 각각의 스프링을 A, B, C, D 및 E 라고 나타낼 때 D 를 제외하고는 저자들에 의해 특허 출원이 된 것들이며 스프링 D 는 출원 준비 중이므로 나타내지 않았다. 그러나 각 스프링에 대해 피복관과의 접촉과 관련한 특징을 정리하면 표 2 와 같다. 한편 그림 1 에는 각 스프링 시편이 피복관 시편과 접촉하는 부분을 화살표로 표시하였다.

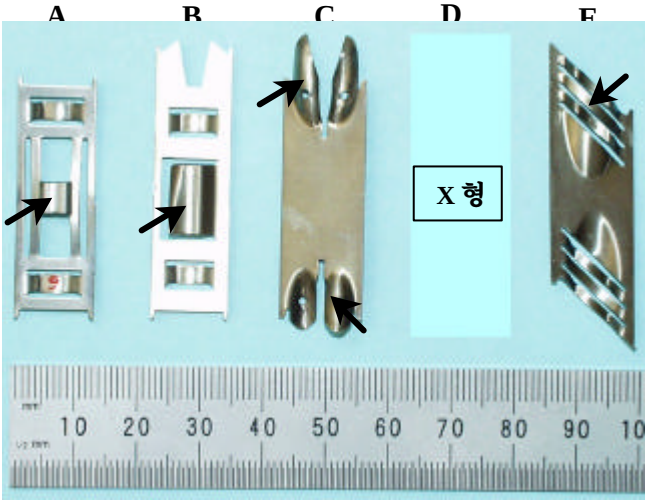

그림 1. 스프링 시편(피복관과의 접촉부위는 화살표로 표시; A, B: 오목한 형상, C: 볼록한 형상, D, E: 편평한 형상)

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

표 2. 지지격자 스프링 시편의 특징.

Spring shape	Contact contour	End condition	Contact length intended	No. contacts
A	Concave	Clamped at both ends	5.0 mm	1
B	Concave	Cantilever	11.1 mm	1
C	Convex	appr. Cantilever	appr. Hertzian	2
D	Flat	Clamped at both ends	2.0 mm	1
E	Flat	Clamped at both ends	2.3 mm	1

표 2 에서 의도한 접촉 길이(intended contact length)는 스프링과 피복관이 수직하중을 갖고 접촉할 때의 길이를 의미하는 것으로서 스프링 A, B 및 D, E에서는 제조된 스프링 길이 전체가 접촉하고 스프링 C 는 접촉 부위의 형상이 볼록하여 하중에 따라 접촉 길이가 변하게 된다. 이때, 스프링 C 와 피복관 시편의 접촉 상태를 헤르쯔 접촉 상태라고 대략적인 가정을 하였다. 시험을 시작하기 전 모든 시편은 깨끗이 세척하였으며 각 시편의 표면 거칠기를 측정하였다. 그 결과, 피복관 시편의 평균 거칠기(*Ra*)는 0.76 μm 이었으며 스프링 시편은 0.67 μm 로 측정되었다.

2.2 프레팅마멸 시험장비

핵연료봉 프레팅마멸 시험을 위해 개발된 장비의 개략도와 시험 중인 모습을 각각 그림 2 와 3 에 보여 준다. 시편 상호 간의 상대 운동은 지지격자 스프링 시편을 고정하고 피복관을 상하로 왕복 운동하게 하였다. 피복관의 왕복 운동은 회전 속도를 가변할 수 있는 서보 모터의 회전을 지렛대와 편심 원통을 이용하여 직선 운동으로 전환한 것이다. 왕복 직선 운동 거리는 스프링과 피복관 시편 사이의 상대 미끄럼 변위 폭에 해당하므로 변경이 가능하여야 한다. 개발된 장비에서 미끄럼 변위는 편심 원통의 편심량과 지렛대에 있는 베어링으로 제작한 힌지점의 위치에 의존한다.

모터의 회전에 의하여 편심 원통의 편심량 2 배에 해당하는 진폭의 직선 운동을 얻을 수 있고 이를 다시 힌지점을 편심 원통으로부터 멀리 위치하게 함으로써 진폭을 감소시킬 수 있다. 이때, 시편 상호 간의 상대 미끄럼 변위 폭은 왕복 운동을 하는 피복관 고정구 측에 설치된 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 이용하여 측정하게 된다. 따라서, 모터로부터 피복관 시편에 이르기까지 각 부품의 가공 오차와 틈새 등에 무관하게 상대 미끄럼 변위 폭을 정확히 알 수 있도록

하였다. 피복관과 스프링 시편의 상대 미끄럼 변위 방향을 축 방향으로부터 횡 방향으로 바꾸어

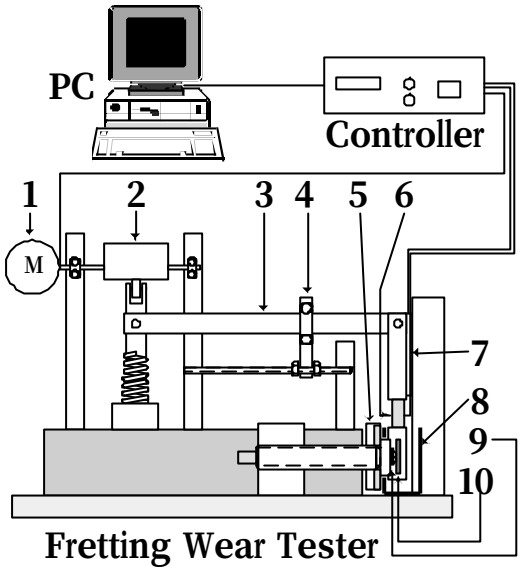

그림 2. 프레팅마멸 시험장비 개요도.

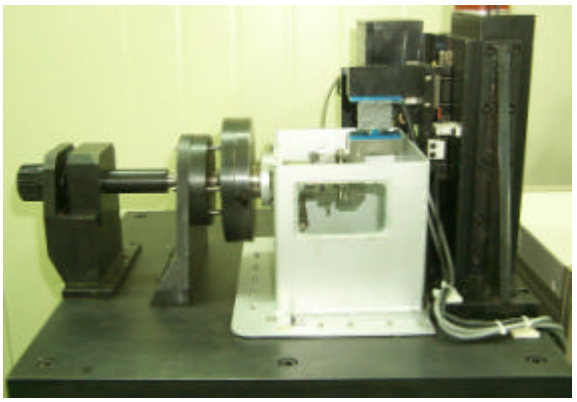

그림 3. 프레팅마멸 시험장비.

시험할 때에는, 시험 장비에서의 왕복 운동 방향을 바꾸지 않고, 스프링 및 피복관 시편을 90° 회전시킴으로써 가능하게 하였다.

고정된 스프링 시편을 피복관 시편쪽으로 이동하여 시편 사이의 접촉 수직력을 얻을 수 있다. 한편, 접촉한 두 시편 사이에 상대 운동이 있으면 마찰력에 해당하는 전단력이 발생할 것이다 개발된 장비에서는 2 축 로드 셀을 설치하여 접촉 수직력과 전단력을 시험 중에 실시간으로 측정할 수 있도록 하였다. 한편, 비등점 이하의 수중에서도 시험이 가능하도록 시편 주위에 물통을 설치하였으며 전열기와 열전대를 이용하여 온도를 제어할 수 있도록 하였다. 시험 중 측정되는 시편 사이의 접촉 수직 및 전단력과 상대 미끄럼 변위 폭은 미끄럼 반복 회수와 함께 퍼스널 컴퓨터에 표시되며 동시에 기록된다.

2.3 시험 및 마멸 측정 방법

본 연구에서의 프레팅마멸 시험은 상온, 공기 중에서 수행하였다. 피복관과 스프링의 상대 미끄럼 방향을 축 방향인 경우와 횡 방향인 경우로 하여 시험하였다. 한가지의 미끄럼 방향과 하나의 스프링 형상에 대해 3 번의 시험을 반복 수행하여 마멸 측정 결과를 평균하였다. 이로부터 총 30 회(스프링 5 종 x 미끄럼 방향 2 종 x 3 회)의 반복 시험이 수행되었다. 시험 조건으로서, 시편 사이의 접촉 수직력은 20 ± 1 N 으로 하고 상대 미끄럼 변위 폭(최대값과 최소값의 차)은 14 ± 1 μm 로 하였으며 주파수는 30 Hz 로 설정하였다. 시험에서 측정되는 전단력의 범위와 중간값은 컴퓨터에 자동 저장되도록 되어 있으며 전단력의 범위는 대개 15 N 부근이었다. 모든 시험은 미끄럼 반복 회수로 300,000 회가 될 때까지 수행하였으며, 이후 시편을 이탈시켜 피복관에 발생한 마멸 흔적을 돋보기를 이용하여 육안으로 관찰하고 표면 거칠기 측정장비를 이용하여 마멸면을 측정하였다.

시용된 표면 거칠기 측정장비는 MITUTOYO 사의 제품(SV-624)으로서 stylus 를 이용한 접촉식 장비이다. 측정 범위는 80 μm 로 하였고 측정 시 stylus 의 이동 속도는 0.5 mm/min 로 하였다. 표면

거칠기 측정장비를 이용한 측정 결과는 시편 길이 방향에 대한 마멸 깊이의 2 차원적 데이터로 나

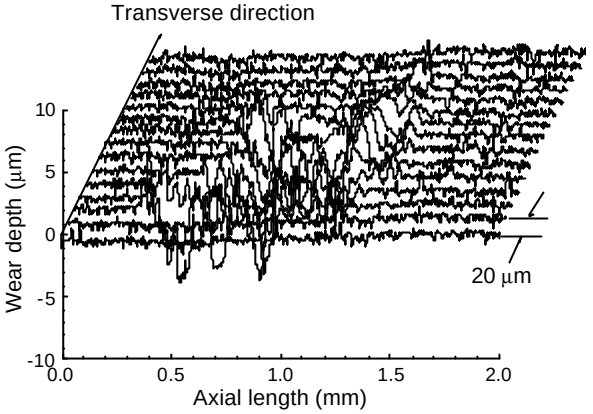

그림 4. 표면 거칠기 측정장비로 측정한 마멸면 형상.

타난다. 이와 같은 측정을 마멸의 폭 방향으로 반복하게 되면 그림 4 와 같이 마멸 부위를 파악할 수 있다. 마멸의 분석을 위해서는 우선적으로 마멸 부위의 최대 깊이를 측정하였다. 이것은 핵연료 공급자들이 많이 사용하는 핵연료봉 프레팅마멸의 설계 기준으로서 핵연료 수명 말까지 피복관 두께의 10%에 해당하는 깊이 이상의 마멸이 발생하지 않아야 한다[1]는 것을 고려한 것이다. 그러나 마멸 부위의 형상이 매우 불규칙하여 최대 깊이를 정확히 추출한다는 것은 매우 어렵다. 이러한 이유로 마멸 깊이와는 별도로 피복관 표면이 이탈된 부분의 부피, 즉 마멸량을 분석하는 것도 의미가 있다.

일반적으로 마멸 연구자들이 주제로 많이 다루고 있는 것이 마멸량을 구하는 모델링이므로 이미 마멸량을 구하는 방법은 여러 가지가 제안되고 있다[2-4]. 그러나 앞서 제안된 방법은 주로 마멸이 발생하는 물체의 형태가 원통, 구 또는 평판으로서 접촉 응력이 헤르쯔 응력 등으로 잘 정의되는 경우에 발생되는 마멸에 대한 경우가 대부분이다. 본 연구에서 사용하는 스프링 시편과 같은 형태의 접촉 물체에 의한 마멸은 이와는 매우 다른 형태의 마멸 형태가 발생되므로 마멸량을 구하는 방법을 개발할 필요가 있다. 이를 위해 신호처리 기술을 이용한 마멸량 계산 방법을 개발하였다[5]. 이 방법은 이미 소개가 되었으므로 본 논문에서는 상세한 내용을 생략하고 알고리즘을 그림 5 에 나타내었다.

3. 시험 결과 및 고찰

3.1 시험 중의 접촉력과 미끄럼 변위

시험을 시작하기 전에 접촉 수직력과 미끄럼 변위의 폭을 조정하지만 이 값이 시험을 종료할 때까지 유지되지는 못한다. 그 이유는 여러 기계적인 연결 부위에 존재하는 틈새 또는 정렬 상태가 시험 장비의 구동 중에 달라질 수 있으며 시편에 마멸이 발생하면 초기의 접촉 조건이 변하기

때문이기도 하다. 그러나 이와 같은 조건들이 많이 변하게 되면 스프링의 형상에 따른 마멸의 차

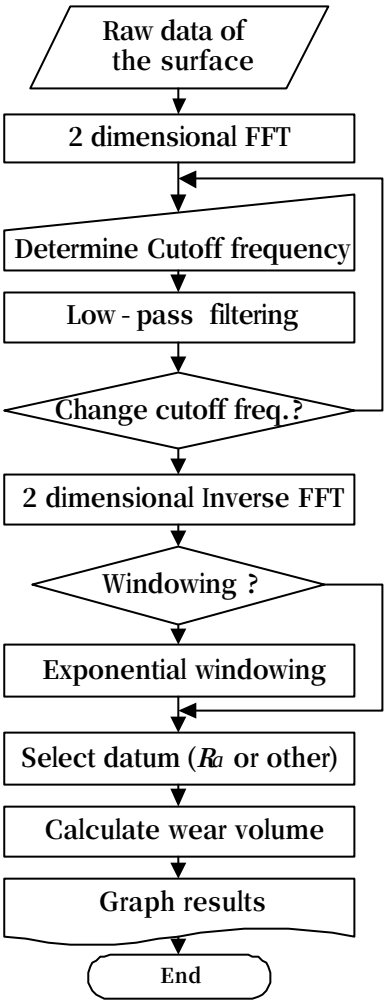

그림 5. 마멸량 계산 알고리즘.

이를 분석하고자 한 본 연구의 목적을 원활히 달성할 수 없게 되므로 이에 대한 평가가 필요하다.

그림 6 에는 시험 중에서 기록된 접촉 수직력(P)과 전단력의 범위($?Q$), 그리고 상대 미끄럼 변위의 폭을 나타내고 있다. 접촉 수직력은 시험을 시작하였을 때 약간 감소한 후, 곧 일정한 값에 도달하였다. 시험 초기에 나타난 접촉 수직력이 감소한 기간은 마멸 시험에서 일반적으로 나타나는 '시편 길들이기 과정'으로 볼 수 있다. 전체적으로 보아 시험 시간 동안 접촉 수직력과 상대 미끄럼 변위 폭은 거의 일정하였다. 이것은 본 연구에서 사용한 시험 조건에 의해 피복관 시편에는 매우 작은 마멸이 발생되었으므로 앞서 언급한 마멸에 의한 스프링 힘의 변화는 발생하지 않았기 때문이며 개발한 장비의 연결부에서의 작동이 신뢰할 수 있다는 것을 말해 준다.

그러나 접촉 전단력의 경우는 좀 더 변화가 컸음을 알 수 있었다. 이것은 시험 중 접촉면에서 발생하는 마멸 입자의 생성 및 이탈에 의해 접촉면에서의 마찰 계수가 변하게 되고 이에 따라 전단력이 변화한 것이라고 설명할 수 있다. 그러나 전단력 범위의 변화량도 불과 2 N 이내로서 결과에 영향을 미치는 값으로 생각되지 않아 전단력에 있어서도 일정한 시험 조건이 유지되었다고 생각하였다. 결과적으로 프레팅마멸에 미치는 지지격자 스프링 형상과 미끄럼 방향의 영향을 분석하

고자 한 본 연구의 목적에 부합하는 시험 조건을 취하였다고 판단하였다.

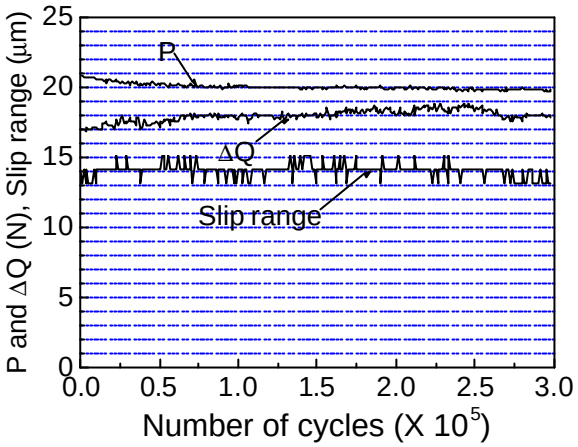

그림 6. 마멸시험 중 측정된 접촉 수직력(*P*), 전단력(*Q*) 및 미끄럼 변위 폭.

3.2 마멸 관찰

시험에서 사용한 조건에 의해 결과로 얻은 모든 피복관 시편에는 측정할 수 있는 마멸이 발생하였다. 구와 평판의 접촉에 대한 마멸 시험 결과로부터 제시된 '프레팅 지도(fretting map)'[2]에 의하면 본 연구에서 사용한 시험 조건인 접촉 수직력 20 ± 1 N과 미끄럼 변위 범위 14 ± 1 μm는 전미끄럼(gross slip)과 부분미끄럼(partial slip)의 경계에 매우 가깝다. 전미끄럼 상태에서는 접촉면 전체에서 마멸이 발생하고 부분미끄럼 상태에서는 접촉면의 경계에서는 마멸이 발생하지만 중앙 부위에서는 접촉 물체 상호 간에 상대 운동이 발생하지 않으므로 마멸이 발생하지 않는 특성이 있다. 그러나 본 연구에서 수행한 시험에서는 시편의 형상이 '프레팅 지도'를 위해 사용된 시편과 큰 차이가 있으므로 위와 같은 마멸의 형태를 보여 주지 않았다.

표면 거칠기 측정 장비로부터 측정된 그림 4와 같은 마멸 형상으로부터 마멸의 길이와 폭이 표 2에서 나타낸 예상된 접촉 길이에 대해 접촉이 이루어 지지 않았다는 것을 알 수 있다. 즉 스프링 A, B 및 D, E의 경우 스프링 길이가 접촉 길이가 될 것으로 예상하였으나 그림 4에서 볼 수 있듯이 마멸 부위의 길이는 대부분 1 mm 이하로서 스프링 길이에 비하여 매우 작았다. 즉 국부적인 마멸이 발생하였으므로 일반적으로 말할 수 있는 전미끄럼이나 부분미끄럼 현상을 보여 주고 있지 않다. 한편 국부적인 마멸 부위 내에서는 양 가장자리가 중앙부에 비해 깊이 패인 부분미끄럼 상태에서의 마멸 형태를 보여 주었다. 이와 같이 마멸 형상이 불규칙하였으므로 마멸 깊이와는 별도로 마멸량도 분석하였다.

3.3 미끄럼 방향에 따른 마멸의 분석

그림 7에는 시험에 사용한 스프링 종류 및 미끄럼 방향에 대해 특징적으로 나타난 마멸면의 형상을 보여 주고 있으며 원래의 측정 데이터를 수평축(피복관의 축 방향)에 대칭되게 나타내어 마멸 부위를 위로 산처럼 솟아 오르게 표현함으로써 쉽게 인식할 수 있도록 하였다. 한편 그림 7에서는 마멸의 폭방향으로 존재하는 피복관의 곡률 반경을 평면으로 표현하였다. 측정된 마멸 폭이

10 ~ 90 μm 으로서 피복관의 곡률 반경(4.75 mm)의 2% 이하이어서 평면으로 표현하더라도 원래의

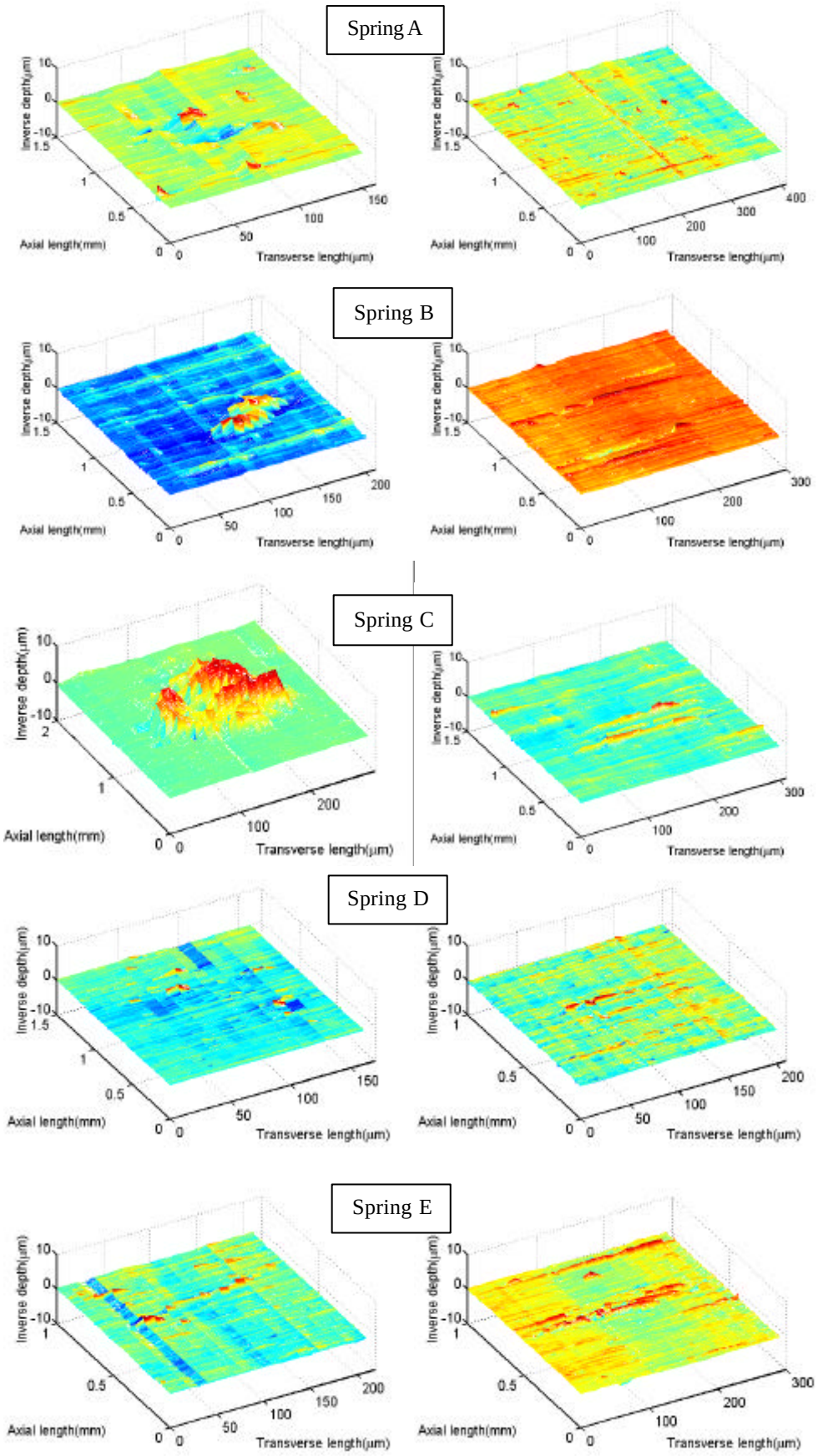

그림 7. 각 스프링 및 미끄럼 방향에 의한 마멸의 특징적인 형태.

측정 데이터를 부적절하게 왜곡시키지는 않았다. 그림 7에서 각 스프링의 왼쪽에 나타낸 축 방향의 미끄럼 변위에 대해 발생한 마멸이 오른쪽에 나타낸 횡 방향의 미끄럼에 대한 마멸보다 더 심하다는 것을 우선 알 수 있다. 한편 스프링 C를 제외한 각 스프링의 길이(표 2 참조)와 마멸 길이를 비교하여 볼 때, 스프링의 전 길이가 피복관에 접촉하지 않고 국부적인 접촉이 발생하였다는 것을 확인할 수 있다.

미끄럼이 횡 방향일 때 보다 축 방향일 때 마멸이 훨씬 더 많이 발생한다는 결과는 핵연료 공급자들이 일반적으로 고려하였던 횡 방향 미끄럼에 의한 분석[1]만으로는 핵연료봉의 프레팅마멸에 대한 대책 마련에 미흡하다는 것을 시사한다. 이에 대해 이미 앞선 연구에서, 핵연료봉이 원자로 내의 유동에 의해 진동할 때, 지지격자체 내의 접촉점에서의 미끄러지는 방향은 횡 방향 뿐 아니라 종방향으로도 고려하여야 한다는 것을 지적하고, 횡 및 종방향으로의 순차적인 미끄럼이 발생할 때 접촉면 상에서의 응력장을 구한 적이 있다[6]. 이것은 또한 핵연료의 지지격자체에 대한 기계설계적 관점에서 핵연료봉의 진동에 의해 지지격자 스프링 또는 딤플과 핵연료봉의 접촉부에서 축 방향으로의 미끄럼을 방지할 수 있으면 핵연료봉의 프레팅마멸 손상을 상당히 줄일 수 있다는 것을 의미한다. 이를 위한 하나의 방안으로는 지지격자 스프링 또는 딤플이 핵연료봉과 접촉한 상태에서 핵연료봉의 축 방향 운동을 함께 따르는 구조를 갖게 하는 것을 제안할 수 있다.

3.4 스프링 형상에 따른 마멸의 분석

그림 8에는 스프링 종류 및 미끄럼 방향에 대해 세번씩의 반복 시험을 수행한 결과로 나타난 마멸 깊이와 마멸량을 산술 평균하여 나타낸 것이다. 마멸 깊이에 의한 비교에서는 접촉부의 형상이 편평한 스프링 D와 E에서 상대적으로 작은 값을 보이고 있으며 스프링 C 이외에는 미끄럼 방향이 다르더라도 마멸 깊이는 거의 비슷함을 알 수 있다. 한편 스프링 C에 의한 축 방향의 미끄럼일 때 마멸 깊이가 가장 깊었으며 횡 방향의 미끄럼에 의한 마멸 깊이와의 차이가 가장 현저하였다. 그러나 현재의 결과에서는 마멸 깊이의 차이를 스프링 형상에 따른 마멸 정도를 비교하기 위한 변별력 있는 파라미터로 간주하기는 어렵다고 사료되었다. 이에 비해 그림 8에 같이 나타낸 마멸량에 의한 비교를 하면 각 스프링 상호 간뿐 아니라 미끄럼 방향의 차이에 의한 마멸 정도를 좀 더 분명히 볼 수 있다.

마멸량의 비교에서 우선 두드러지는 것은 스프링 C의 축 방향 미끄럼인 경우가 다른 경우에 비해 현저히 크다는 것이다. 또한 스프링 E에 의한 마멸을 제외하고는, 횡 방향의 미끄럼에 비해 축 방향인 경우 마멸량이 모두 크게 나타났다. 따라서 앞 절에서 논의한 것과 같이 핵연료봉의 진동에 의한 마멸 연구에서 축 방향 미끄럼에 의한 영향을 주의깊게 고려하여야 함을 다시 한번 알 수 있다. 스프링 E에서 축 방향과 횡 방향의 마멸량이 비슷하게 나타난 것은 그림 1에서 보여주고 있듯이 스프링 E의 방향이 축 방향에 대해 45°로 기울어져 있어 피복관의 접촉에 의해 스프링이 변형을 할 때 축 방향과 횡 방향의 미끄럼에서 유사한 마멸을 발생시키는 형식으로 될 것이기 때문으로 사료되었다.

스프링 A와 B에 의한 마멸이 스프링 C에 의한 것 보다 적게 나타난 것은 예상한 결과였다. 스프링 A와 B는 피복관과의 접촉부가 오목한 형태를 가지고 있는 데에 반해 스프링 C는 볼록한

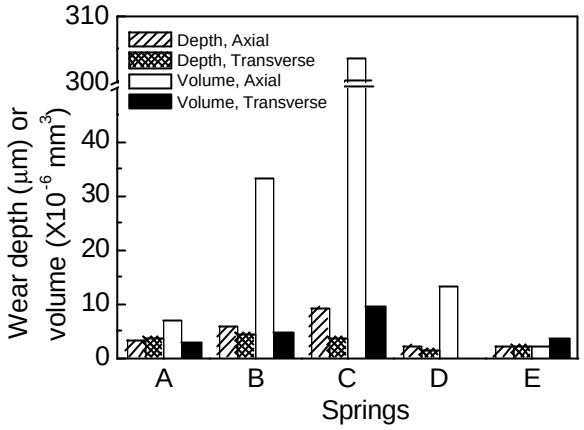

그림 8. 스프링의 형상 및 미끄럼 방향에 따른 마멸 측정 결과.

형태이어서 접촉면에서의 응력집중 현상이 더 클 것으로 생각되었기 때문이다. 이와 함께 가능한 설명으로는, 스프링 C는 피복관과 아래, 위 두 군데에서 접촉하므로 시험에서 스프링에 수직하중(20 ± 1 N)을 가할 때 다른 스프링에서와는 달리 접촉부 하나에서의 반력이 대략 반이 되고(각 접촉부에서의 반력의 크기는 각각의 하중-변위 특성에 따라 달라지므로 하나의 접촉부에서의 반력이 정확하게 전체 하중의 반이 되기는 어렵다), 따라서 미끄럼 변위 폭(14 ± 1 μm)이 작용할 때, 접촉부는 부분미끄럼 상태로부터 벗어나 완전한 전미끄럼 상태가 될 가능성이 매우 크고 따라서 마멸이 심하게 발생하게 되었다고 생각할 수 있다. 스프링 A와 B에서는 오목한 형상으로 인해 피복관과의 접촉에서 비록 완벽한 등각 접촉(conformal contact)을 이루지는 못하지만 접촉 폭의 증가를 통해 접촉면에서의 응력 크기와 구배가 줄어들 수 있기 때문이다.

한편 스프링 B가 스프링 A에 비해 마멸을 더 심하게 발생시킨 것은 원래의 예상과 반대로 나타난 것이었다. 즉 스프링 A 및 B는 접촉부가 동일하게 오목한 형상을 가지며 스프링 B의 길이가 스프링 A에 비해 두 배 이상 길므로(표 2에서의 intended contact length 참조) 접촉면에서의 최대 응력 값이 작을 것으로 예상하여 마멸 발생이 더 적을 것으로 생각하였다. 스프링 B에 의한 마멸이 더 큰 것은 스프링 B의 지지부가 스프링 A에 대해 다르기 때문으로 생각된다. 그림 1과 표 2에서 나타내었듯이 스프링 A의 경우에는 양단이 고정되어 있는 데에 반해 스프링 B는 외팔보의 형태로서 한쪽만이 고정되어 있다. 따라서 피복관에 스프링이 접촉하여 눌려질 때 축 방향으로 불 균일한 변위가 발생할 가능성이 있다. 다시 말해 스프링의 길이 방향을 따라 처짐량이 다르며 횡 축을 중심으로 비틀림이 발생하면 스프링의 접촉부가 오목하기 때문에 피복관과의 접촉은 스프링의 길이 내에서 매우 국부적으로 발생하게 된다. 이 경우, 접촉 응력의 균일화는 기대하기 어렵게 된다. 특히 사용한 스프링 B의 경우 열수력적 성능 제고를 위해 스프링 길이 방향으로 단면의 형상이 일정하지 않아 전술한 비틀림의 발생이 가능하였다. 단면 형상이 길이 방향으로 일정하게 설계하더라도 제조 시에 발생하는 공차의 문제로 인해 외팔보 형상의 스프링은 전 길이에

대해 피복관과 접촉하기는 어려울 것으로 판단되었다. 즉, 스프링의 형상이 외팔보이며 접촉부가 오목한 경우에는 스프링의 길이를 길게 하더라도 접촉 응력을 감소시키는 효과를 가져오기는 힘들 것이며 따라서 양단이 고정되어 있는 구조가 마멸의 발생을 저감하는 데에 효과적이라 할 수 있다.

스프링이 피복관과 접촉하는 부위의 형상을 오목하게 한 스프링 A 및 B 의 기본적인 동기는 접촉역학적으로 볼 때 피복관 원주를 스프링이 감싸는 등각 접촉을 형성시켜 접촉면을 증가시키고 이로부터 접촉 응력을 완화하며 결과적으로 마멸의 발생을 억제하고자 함이다. 그러나 피복관의 지름에 대한 공차와 스프링이 피복관을 누를 때의 하중 및 그 공차, 그리고 스프링의 제조 공차, 지지격자체로 조립될 때의 조립 공차 등을 고려할 때 피복관과 완벽한 등각 접촉을 형성시키기는 거의 불가능하다. 한편 스프링이 피복관에 의해 눌려질 때 스프링의 오목한 부분의 곡률 반경이 줄어 들게 되며 줄어든 최종 지름이 만일 피복관의 지름 보다 작게 될 경우는 오히려 두 군데의 볼록한 형상이 접촉하게 되는 결과를 가져올 수 있어, 스프링 C 에서와 같이, 오히려 마멸이 증가할 수 있다. 따라서 접촉부가 오목한 스프링을 설계할 경우는 오목한 부분의 곡률 반경에 상당한 주의를 하여야 한다. 대부분의 경우, 오목한 스프링에 의해 실제로는 피복관과 등각 접촉이 아닌 선 접촉의 형태가 될 가능성이 높으며, 이 경우 접촉부는 편평한 스프링에서의 경우와 거의 유사하게 된다. 이와 같은 이유로 그림 8 에서 스프링 A 및 B(스프링 B 의 경우는 스프링의 지지 조건이 다른 점을 고려한다)와 스프링 D 및 E 와의 시험 결과가 거의 유사하게 나타난 것이라 판단된다. 그러나 접촉 수직력에 의한 스프링과 피복관의 탄성 변형을 고려할 때, 수직력의 증가에 따라 오목한 스프링에서 접촉면이 더 증가되는 효과는 분명히 있을 것이다.

스프링 D 와 피복관과의 접촉은 기존의 지지격자 스프링에서 일반적으로 사용하고 있는 형태이며 스프링 E 는 초기에 접촉하고 있는 스프링이 원자로 내에서 스프링 힘을 소실할 경우 주위의 스프링이 피복관에 접촉하기 시작하여 스프링의 기능을 유지할 수 있도록 한 것이다. 스프링 E 에서 수명 초기에 피복관과 접촉하는 중앙의 스프링은 역시 편평한 형태의 접촉부를 갖고 있으며 주위의 스프링은 오목하게 되어 있다. 시험에서 사용한 접촉 수직력(20 ± 1 N)에 의해서는 중앙의 스프링만이 접촉하였다. 한편, 스프링 D 와 E 는 스프링 A 및 B 에 비해 스프링의 길이가 짧다(표 2 참조). 그림 8 에서 마멸량의 평가(축 방향과 횡 방향에 의한 마멸의 합)에 의하면 스프링 E 의 경우가 가장 작게 나타났다. 그리고 스프링 D 에 의한 경우에서도 스프링 A 와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 즉 접촉부의 형상이 볼록한 스프링 C 의 경우를 제외하고는, 스프링 길이와 마멸량과는 관계가 없는 것 같이 보인다. 이것은 마멸면의 관찰에서 볼 수 있었던 것과 같이, 본 연구에서 수행한 시험 결과로 나타난 마멸 길이는 스프링의 전체 길이에 대해 발생하지 않고 국부적으로 나타났기 때문이다. 따라서 스프링의 형상을 오목하거나 편평하게 할 경우 접촉 응력의 분산을 위해서 실제 접촉 길이가 길게 될 수 있는 방법을 고려해야 될 필요가 있으며 이것은 특히 피복관과의 접촉부를 오목하게 할 때 더욱 중요하다.

4. 향후의 연구

본 논문에서 수행한 시험은 핵연료봉의 프레팅마멸에 영향을 미치는 지지격자 스프링의 형상에 관한 것으로 마멸을 억제할 수 있는 스프링의 형상을 도출하는 데에 그 목적이 있다. 따라서 본 연구에서의 시험은 스프링과 피복관 시편이 수직력을 갖고 접촉하고 있는 상태에서 상대 변위를 주는 방법을 사용하고 있다. 그러나 실제의 경우, 원자로 내에서는 지지격자 스프링 또는 딤플과 핵연료봉과의 사이에는 틈새가 존재할 수 있고 이에 의한 탭핑(tapping) 형태의 운동이 발생하여 마멸이 발생하는 경우도 있다. 따라서 좀 더 실제와 유사한 조건의 시험을 위해서는 지지격자체 단위의 시편을 이용한 시험을 수행할 필요가 있다. 이러한 시험은 현재 계획 중으로서 본 연구에서의 시험 결과와 함께 활용할 것이다.

한편, 스프링의 접촉부 형상이 오목하거나 편평한 경우 스프링의 길이가 어떤 값을 가질 때 가장 마멸이 적게 발생할 것인가 하는 것도 스프링의 설계에서 중요하다. 이것은 본 연구를 통해서도 알 수 있었던 것처럼 실제 지지격자 스프링과 피복관과의 접촉 길이는 설계, 제조 및 조립 상의 공차로 스프링의 길이와 일치하지 않을 가능성이 많기 때문이다. 이와 같은 이유로 접촉 길이를 길게 하여 접촉 응력의 크기와 구배를 줄여 마멸을 억제하고자 하는 목적을 달성하기 위하여, 스프링 길이를 증가시킬 경우 실제 접촉 길이는 스프링 길이가 짧은 경우에 비해 오히려 짧아지는 역효과가 발생할 가능성도 있다. 즉, 제조 및 조립성도 고려한 접촉부의 형상 설계가 중요하므로 이에 대한 연구도 필요하다.

5. 결 론

원자로 내에서 핵연료봉의 유체유발 진동에 의해 지지격자 스프링 또는 딤플과의 접촉부에서 발생되는 프레팅마멸을 억제하기 위한 방법으로서 지지격자 스프링의 형상 개선을 목적으로 한 본 연구는 그 시작 단계로서 프레팅마멸 시험 장비를 제작하고 상용의 피복관과 자체적으로 고안한 지지격자 스프링 시편을 이용하여 시험을 수행하는 것이었다. 이를 위하여 피복관과 지지격자 스프링 상호 간의 축 방향 및 횡 방향의 미끄럼이 있을 때를 구분하고, 또 피복관에 접촉하는 부분의 스프링 형상이 오목, 볼록 또는 편평할 때 각각의 경우에 따른 마멸의 정도를 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다. 첫째, 지지격자 스프링과 피복관 사이에 축 방향 미끄럼이 있을 때가 횡 방향의 미끄럼이 있는 경우 보다 더욱 마멸이 심하게 나타났다. 따라서 핵연료봉의 프레팅마멸에 대한 분석이나 대책을 마련할 때에 축 방향의 미끄럼에 대해 많은 고려를 하여야 할 것이다. 둘째, 피복관과 접촉되는 스프링의 형상이 볼록한 경우가 다른 형상에 비해 마멸이 가장 심하였다. 오목하거나 편평한 경우에 접촉부의 길이가 스프링 길이 보다 짧았으며 이로 인해 예상과는 달리 오목한 형상의 스프링에 의한 마멸이 편평한 것에 비해 마멸량이 적게 나타나지 않았다. 이로부터 실제 접촉 길이를 길게 할 수 있는 적절한 스프링의 길이가 결정되어야 할 것으로 고려되었다. 한편 스프링의 지지 조건에 대해서는 양단이 고정된 형태가 외팔보 형태에 비해 마멸이 적게 발생하였다. 따라서 본 연구의 시험을 통해 핵연료봉의 프레팅마멸을 억제할 수 있는 지지격자 스프링의 형상으로서는 피복관에 접촉되는 형상이 볼록하지 않아야 하며 양단이 고정될 것이 필요하고 구조 설계 측면에서 핵연료봉의 축 방향 미끄럼을 억제하거나 핵연료봉과 접촉한 상태로 동시에

움직일 수 있는 스프링을 제안할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. Westinghouse Electric Corporation, Fuel Assembly Mechanical Design Manual, U.S.A., 1988.
2. S. Fouvry, P. Kapsa, L. Vincent, Wear, 200 (1996) 186-205.
3. P. De Baets, K. Strijckmans, A.P. van Peteghem, Wear, 208 (1997) 169-176.
4. M. Kalin, J. Vizintin, Wear, 237 (2000) 39-48.
5. 김형규, 김선재, 한국윤활학회지(2000) submitted.
6. H.-K. Kim, Nuclear Engineering and Design, 192 (1999) 81-93.