2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

# 핵연료봉 프레팅에서 미끄럼변위와 마멸과의 관계에 대한 실험적 분석

# Experimental Analysis of the Relationship between Slip Displacement and Wear in Fuel Rod Fretting

송주선, 김형규, 이영호
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

김재훈
충남대학교 기계설계공학과
대전광역시 유성구 궁동 220

## 요 약

원자로 냉각수의 유동에 의한 핵연료봉의 유체유발진동으로부터 발생하는 프레팅 마멸손상을 연구하기 위해 지지격자 스프링/딤플과 핵연료봉의 접촉부에서의 미끄럼 변위를 실험적으로 분석하였다. 실험은 상온 공기 중에서 수행하였으며 핵연료집합체의 한 개 스팬을 모사하였고 접촉조건으로는 접촉하중 5 N 과 틈새 0.1 ㎜ 인 두 경우로 하였다. 또 접촉형상에 따른 마멸량의 차이를 알기 위해 두 종류의 지지격자 스프링/딤플을 사용하였다. 핵연료봉의 진동은 스팬 중앙에서는 가진변위를 0.7 ㎜ 로 하여 30 ㎐ 로 가진하였으며 이때 접촉부에서의 미끄럼 변위를 측정하기 위해 스프링/딤플 시편의 좌우에 총 4 개의 변위센서를 사용하였다. 측정된 변위 데이터를 이용하여 접촉부에서의 축방향 및 횡방향 미끄럼 변위를 계산하였다. 실험결과, 접촉력이 있을 때보다 틈새가 있을 때에는 수 배, 그리고 축방향보다 횡방향에서 미끄럼 변위가 수 백배 크게 나타났다. 그러나 미끄럼 변위가 증가한 정도로 마멸량(부피, 면적 및 최대깊이)이 증가하지는 않았으며 이것은 스프링/딤플과 핵연료봉과의 접촉부 형상에 따른 것으로 판단되었다.

## Abstract

Slip displacement on the contact between the fuel rod and spacer grid springs/dimples is analysed to study the fuel fretting wear caused by the flow-induced vibration in the reactor. The experiment was carried out under the conditions of room temperature and air. One span of a fuel assembly was simulated and the contact force of 5 N and the gap of 0.2 mm were applied. Two different spacer grid specimens were tested to investigate the influence of contact shape. The fuel rod was vibrated with 0.7 mm at the middle of the span and 30 Hz. Four displacement sensors were used to measure the vibration ranges. The axial and transverse slip displacements were calculated with the measured slip displacement. As results, the slip displacement increased several times from the contact to the gap condition; several hundred times from the axial slip to the transverse one. However, the wear result (volume, area and maximum depth) was not found to increase following the slip displacement. It was regarded that the contact shape between the fuel rod and spring/dimple influenced the present results.

## 1. 서 론

핵연료 프레팅 마멸이란 작은 진폭의 왕복 상대운동을 하는 재료들의 접촉 계면(핵연료의 경우 지지격자 스프링 또는 딤플과 핵연료봉의 접촉면)에서 발생하는 표면손상을 말한다. 이때 핵연료 연소기간 중 마멸이 계속 진행되어 약 0.6 ㎜ 의 얇은 두께를 갖는 핵연료봉 피복관에 관통결함이 발생하면 핵연료봉 내부의 핵분열 생성기체가 원자로 내부로 유출되는 사고가 발생하게 된다. 핵연료 파손에 의해 원자로내의 방사선 준위가 높아지면 발전소 운전을 정지하여야 하고 손상핵연료를 교체하여야 하는데, 이는 많은 시간과 비용을 요하게 된다. 따라서, 핵연료 파손을 방지하여야 하는 것은 원자력발전소의 안정성뿐만 아니라 경제적 운용을 위해서도 매우 중요하다.

그러나 핵연료봉의 프레팅마멸은 원자로내의 유체유발진동에 의해 발생하므로 그 기구(mechanism)가 매우 복잡하여 해결책을 찾기가 쉽지 않다. 특히 마멸 분석을 위해서는 접촉력과 미끄럼 변위에 대한 정보가 필수적이나 일반적으로 외부에 노출되지 않는 두 물체의 접촉부에서의 미끄럼 변위를 측정하는 것이 용이하지 않을 뿐 아니라 핵연료봉 프레팅마멸의 경우 발전소 운전 중 유체유발진동에 의한 접촉부에서의 미끄럼 변위를 원자로 내부에서 측정한다는 것은 원천적으로 불가능하다.

본 연구는 핵연료봉 프레팅마멸의 실험적 분석연구의 일부로서 지지격자 스프링 또는 딤플 위치에서 핵연료봉 피복관과의 상대 미끄럼 진폭을 구할 수 있는 방법을 제안하고 실제 핵연료봉 시편을 강제진동시키며 진동거동과 미끄럼 진폭, 그리고 마멸 결과를 분석한 것이다. 이때 접촉조건으로는 접촉하중 5 N 및 틈새 0.2 mm 의 두 경우로 하였으며 접촉형상에 따른 진동 거동 및 미끄럼 변위를 분석하기 위해 실험에서는 다른 접촉형상을 가지는 두 가지 지지격자 시편을 사용하였다.

## 2. 시 험

### 2.1 시험기

그림 1 에 본 연구에 사용된 미끄럼/충격 프레팅 마멸 시험기의 개략도를 나타내었다. 이 시험기는 회전속도를 가변 할 수 있는 서보모터와 편심원통, 링크기구 및 지렛대를 이용하고 있으며 시험 변수인 시편 사이의 상대진폭, 진동수, 수직 하중 및 핵연료봉 시편과 스프링/딤플 시편 사이의 간격 등을 변화시킬 수 있도록 되어 있다. 본 시험기에 대한 상세한 설명은 이미 발표되었으므로[1]에 나와 있으므로 본 논문에서는 생략하였다.

본 연구에서 튜브시편의 진동거동조사와 미끄럼 변위를 구하기 위해 그림 2(b)에 보여주는 것과 같이 접촉하고 있는 스프링 및 튜브시편 좌우에 배치한 2 쌍의 변위 센서로부터 변위 값을 실시간으로 측정하도록 하였다. 이때 각 쌍의 센서(Sensor Set #1 & Sensor Set #2)는 스프링과 튜브시편의 접촉부로부터 거리가 55 mm 로 동일하게 되어있고, Sensor Set #1 은 수직방향의 진동거동을 Sensor Set #2 는 수평방향의 진동 거동을 측정할 수 있도록 배열하였다.

### 2.2 시편

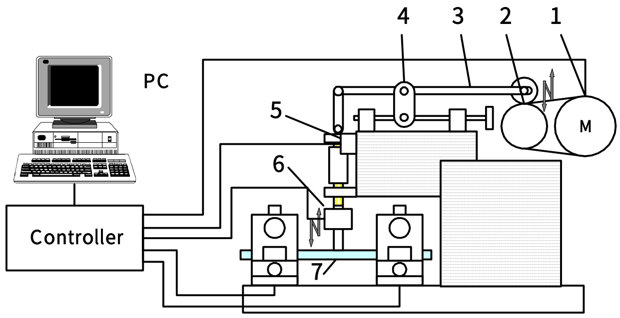
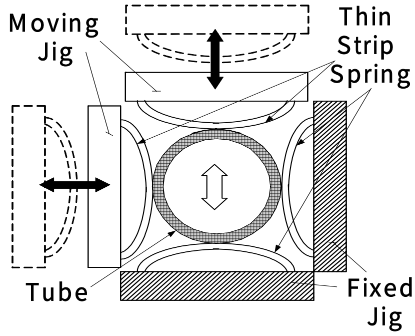
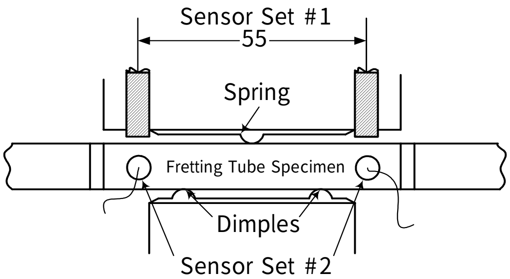



그림 1. 상온 미끄럼/충격 프레팅마멸 시험기;
1:Servo-Motor, 2: Eccentric Cylinder, 3: Lever, 4: Movable Hinge, 5: LVDT, 6: Load Cell, 7: Tube Specimen.

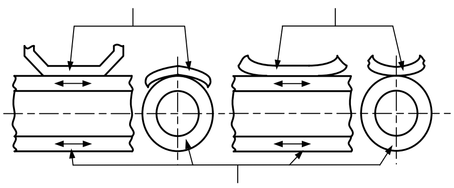



(a)




(b)

그림 2. (a) 핵연료봉과 시편의 배열 (b) 센서 설치 위치



(a)

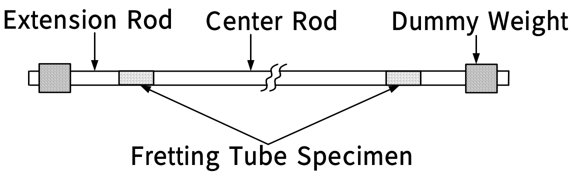
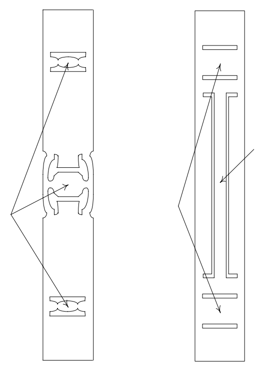



그림 3. 핵연료봉 시편



(b)

그림 4. (a) 접촉부의 형상 (b) 지지격자 스프링/딤플 시편

본 연구에 사용된 튜브와 지지격자 스프링/딤플 시편의 재질은 모두 상용 경수로 핵연료에 사용되는 지르코늄계 합금(Modulus of Elasticity: 99.3 Gpa, Poisson's Ratio: 0.37)이다. 피복관 튜브 시편의 외경은 9.5 mm, 두께는 0.6 mm 이며, 그림 3 과 같이 조립하여 제작하였다. 즉, 지지격자 스프링/딤플 시편과 핵연료봉은 핵연료집합체 하나의 스팬(span; 여기서는 522 mm)에 해당하는 거리만큼 떨어져 있는 두 곳에서 접촉하므로 접촉부에는 속이 빈 피복관을 길이 55 mm 로 절단하고(프레팅 튜브시편), 두 개의 프레팅 튜브시편 사이에는 납 펠렛으로 충진한 피복관(중앙봉)을 별도로

제작하여 연결하였다. 중앙봉에 납 펠렛을 충진한 이유는 실제 핵연료봉의 무게와 유사하게 하기 위함이다. 이와 같이 핵연료봉 시편을 제작한 이유는 스프링/딤플과 접촉하는 부위는 시험이 진행되며 마멸되므로 길이 522 mm 이상의 피복관 시편을 사용할 경우 비경제적이기 때문이었다. 즉, 중앙봉은 반영구적으로 사용하도록 하였으며 시험에 따라 프레팅 튜브시편만 교체하여 사용하도록 한 것이다. 한편 스프링 시편은 두 종류가 사용되었는데 스프링의 접촉 형상에 따라 크게 두 가지 (type A, type B)로 나누었다. Type A 와 type B 스프링의 두께는 각각 0.46 과 0.38 mm 이다. 그림 4(b)에는 본 시험에 사용된 지지격자 스프링시편의 형상을 보여 준다.

.

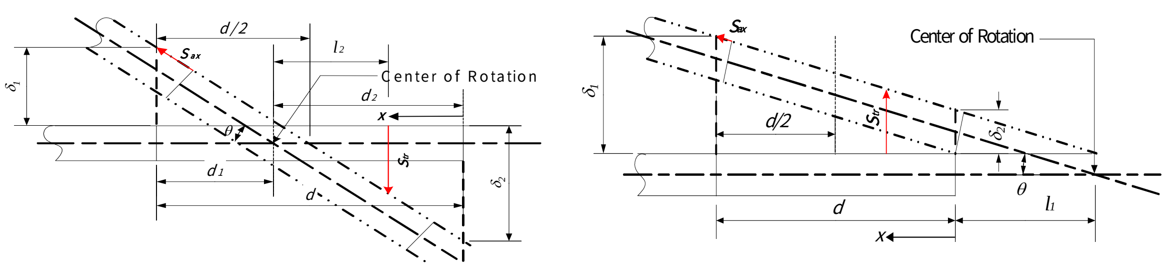
### 2.3 실험 방법

실험은 상온, 공기 중에서 수행하였으며 이때 튜브집합체 시편의 중앙(즉, 중앙봉의 중앙)을 시험기의 구동장치에 연결하여 상하방향의 변위를 0.7 mm 로 하여 30 Hz 로 가진하였다. 가진 변위는 핵연료집합체에서 핵연료봉 사이의 거리보다 작은 값을 임의로 선정한 것으로 향후 핵연료집합체에 대한 유체유발진동 시험에서 스팬 중앙의 변위를 측정하게 되면 그 값으로 본 연구에서와 동일한 실험을 수행하여 접촉부에서의 진동거동을 분석할 수 있을 것이다. 한편, 가진 주파수를 30 Hz 로 한 것은 해석에 의해 핵연료봉의 1 차 공진주파수가 30 Hz 에 가깝기 때문이다.

실험에서 스프링/딤플 시편과 프레팅 튜브시편 사이의 접촉조건으로는 5 N 의 접촉하중이 있는 경우와 0.1 mm 의 틈새가 있는 경우로서 각각 두 번씩 실험을 수행하였다. 실험을 시작하여 접촉부에서의 조건이 안정되는 약 30 분 후에 프레팅 튜브시편의 좌우에 배열한 2 쌍의 디지털 와전류식 변위센서(KEYENCE EX-V Series)를 이용하여 상하와 좌우방향의 진폭을 측정하였다(그림 2(b)). 추가적으로 미끄럼 변위와 마멸량과의 상관관계를 좀 더 자세히 이해하고자 축방향과 횡방향에서의 미끄럼 변위를 모두 구하였다.

## 3. 미끄럼 변위 계산 유도식

축방향과 횡방향의 미끄럼 변위를 구하기 위한 계산 유도식의 상세한 설명은 이미 발표[3]되었으므로 본 논문에는 결과식만 다시 나타내었다. (그림 6 참조)




(a) 모우드 I (b) 모우드 II

그림 6. 미끄럼 변위 계산을 위한 프레팅 튜브시편 거동의 기하학적 형상

**3. 1 축방향 미끄럼 변위 예측식**

모우드 I

$$s_{ax,\mathrm{I}} = \frac{(l_1 + x)(1 - \cos\theta)}{\cos\theta} \tag{1}$$

여기서, $l_1 = \dfrac{\delta_2}{\tan\theta} = \dfrac{\delta_1}{\tan\theta} - d$, $\theta = \tan^{-1}\left(\dfrac{|\delta_1 - \delta_2|}{d}\right)$.

($l_1$: 프레팅 튜브시편의 회전중심에서 가까운 센서의 중심과 회전중심과의 거리)

모우드 II

$$s_{ax,\mathrm{II}} = \frac{l_2(1 - \cos\theta)}{\cos\theta} \tag{2}$$

여기서, $l_2 = \dfrac{|(\delta_1 + \delta_2)x - d\delta_2|}{(\delta_1 + \delta_2)}$, $\theta = \tan^{-1}\left(\dfrac{\delta_1}{l_2 + d - x}\right)$.

($l_2$: 회전중심으로부터 스프링 또는 딤플 위치까지의 거리)

**3. 2 횡방향 미끄럼 변위 예측식**

모우드 I

$$s_{tr,\mathrm{I}} = \frac{x(|\delta_1 - \delta_2|)}{d} + \delta_2 \tag{3}$$

모우드 II

$$s_{tr,\mathrm{II}} = \frac{|(d_2 - x)\delta_2|}{d_2} \tag{4}$$

여기서, $d_2 = \dfrac{\delta_2}{\tan\theta} = d - \dfrac{\delta_1}{\tan\theta}$, $\theta = \tan^{-1}\left(\dfrac{|\delta_1 + \delta_2|}{d}\right)$.

## 4. 결과 및 토의

### 4.1 연료봉의 진폭과 진동거동

그림 7 은 접촉조건(접촉하중 5 N, 틈새 0.2 mm)의 변화에 따른 핵연료봉의 진동 변위를 보여준다. 이때의 진동변위는 8 초에 한 번씩 측정된 값들을 평균해서 나타낸 값이다. 우선, 핵연료봉이 상하방향으로 가진한 결과 상하방향의 변위가 전후방향의 변위보다 현저히 큰 것을 알 수 있다. 또한, 두 종류의 시편 모두 틈새가 있는 경우의 증가폭이 접촉하중이 있는 경우보다 현저히 큰 것을 알 수 있다. 그리고 두 종류의 시편을 비교했을 때는 type A 가 type B 보다 상하방향에서 변위의 증가폭이 크다.

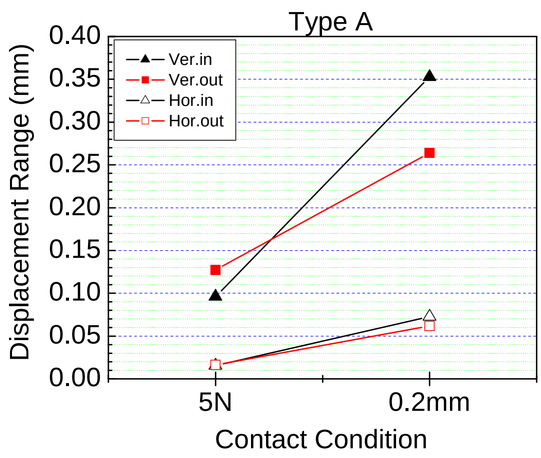
상하방향과 전후방향의 변위거동에서 알 수 있는 것은 변위의 증가폭은 차이가 있지만 접촉하중이 존재하는 경우에서 간격이 있는 경우로 되었을 때, 변위가 증가한다는 것이다. 특이한 점은 두 시편 모두 측정방향과는 상관없이 접촉조건에서는 바깥쪽 센서에서 측정한 변위 값이 크지만 틈새가 있게 되면 그것과 반대현상이 발생한다. 이것은 지지격자 시편과 핵연료봉 시편과의 지지조건에 따라 핵연료봉의 진동 형태가 달라지는 것을 의미한다.

한편, 그림 8 은 앞 절에서 설명한 미끄럼 변위를 분석하기 위해 프레팅 튜브 시편의 좌우측에 부착된 센서(Sensor Set #1)에서 동일시간 동안 실시간으로 기록된 진동신호를 취득한 것이다. 프레팅 튜브 시편과 지지격자 스프링/딤플 시편 사이에 접촉하중이 존재하는 경우에는 역위상(튜브시편의 회전중심이 좌우 양 센서 사이에 위치)인 모우드 II 가 나타났으며 틈새가 있는 경우에는 동위상(튜브시편의 회전중심이 좌우 양 센서 바깥에 위치)인 모우드 I 이 관찰된 것으로 지지조건에 따라 핵연료봉의 접촉부 근방에서 진동위상이 변한다는 것을 알 수 있다.

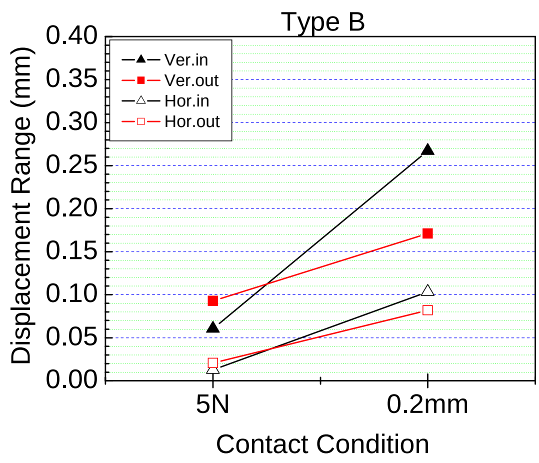
### 4.2 미끄럼 변위 분석

표 1 은 그림 8 에서 보여주는 진동 모우드와 변위를 윗 절의 미끄럼 계산식에 적용하여 접촉조건에 따른 미끄럼 변위를 계산한 결과 값을 나타내고 있다. 우선, 두 종류 시편 모두 공통적으로 접촉 하중이 있을 때보다 틈새가 존재할 때 미끄럼 변위 값이 훨씬 커지는 것을 알 수 있다. 하지만 어느 한 종류의 시편이 다른 것보다 항상 큰 미끄럼 변위 값을 보이진 않는다. 또 횡방향에서의 미끄럼 변위 값은 축방향 미끄럼 때의 그것보다 현저히 큰 값을 나타내는데, 이는 실험에서 중앙봉을 상하방향으로 가진한 결과이며 일반적으로 미끄럼 변위가 크면 마멸이 증가하는 것을 생각할 때 횡방향 부분에서 훨씬 큰 마멸이 발생할 것으로 예상할 수 있다.

그러나 핵연료봉 프레팅마멸의 경우에는 이러한 일반적인 경향이 성립할 것인가 하는 데에는 의문이 있을 수 있다. 그 이유는 축방향 및 횡방향 미끄럼 변위의 경우, 미끄럼 변위의 거동 형태가 축방향에서는 지지격자 스프링 또는 딤플이 핵연료봉의(본 실험에서는 프레팅튜브 시편) 표면을 축방향으로 밀고 당기는 듯한 형태인 데에 대해 횡방향에서는 핵연료봉의 원주표면을 아래위로 스치는 부채꼴 모양의 회전 형태로 나타날 것이기 때문이다. 따라서 미끄럼 방향으로의 미끄럼 거리는 축방향일 때가 횡방향일 때보다 클 것으로 예상된다. 또한 틈새가 있는 경우, 축방향의 미끄럼에 의해서는 핵연료봉의 진동 한 사이클 동안 항상 마멸을 발생시키는 미끄럼

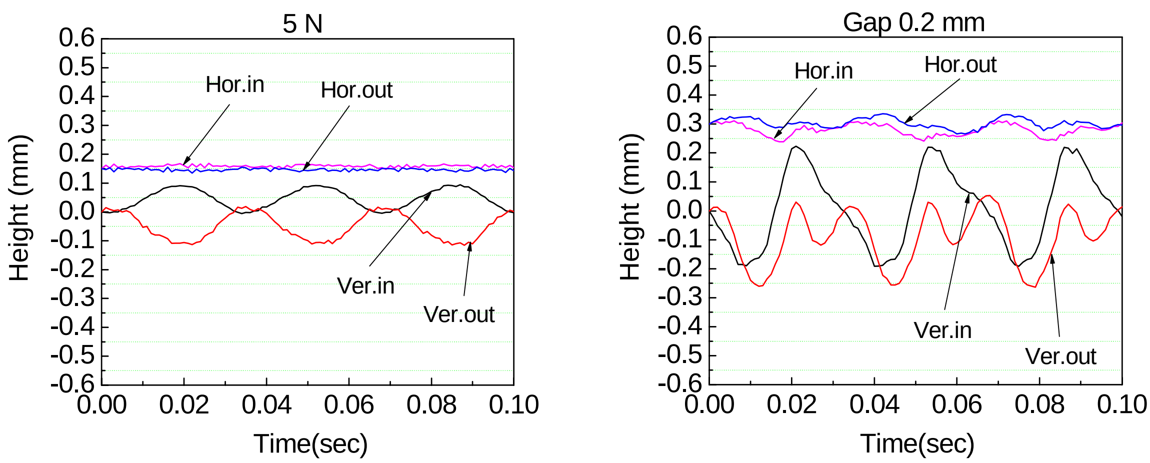



(a) type A

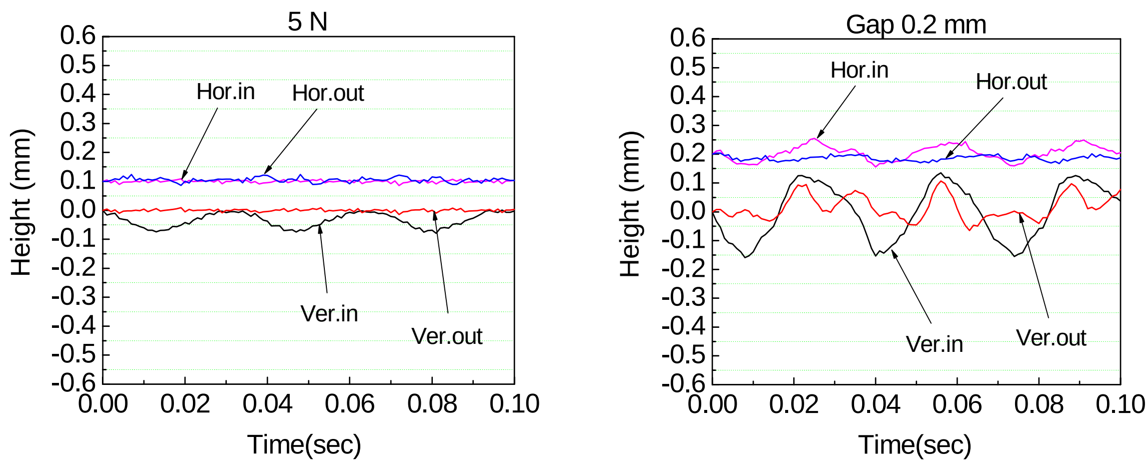



(b) type B

그림 7. 핵연료봉의 가진에 의한 상하, 좌우방향의 진동거동




(a) type A




(b) type B

그림 8. 접촉력의 유무에 따른 진동 거동 및 모우드의 변화

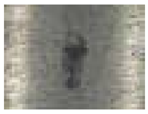
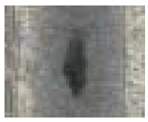
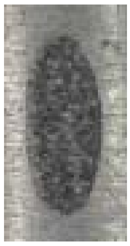
표 1. 축방향과 횡방향의 미끄럼 변위 (μm)

| Contact conditions | Loc.* | Type of specimen | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Axial | | | | Transverse | | | |
| | | type A | | type B | | type A | | type B | |
| | | 1st | 2nd | 1st | 2nd | 1st | 2nd | 1st | 2nd |
| 5N | S | 0.024 | 0.054 | 0.056 | 0.022 | 12.6 | 30.2 | 70 | 46.6 |
| | $D_L$ | 0.166 | 0.124 | 0.096 | 0.034 | 90 | 69.6 | 118 | 73.3 |
| | $D_R$ | 0.198 | 0.216 | 0.02 | 0.01 | 108 | 122 | 26 | 22 |
| G0.2mm | S | 0.444 | 0.302 | 0.22 | 0.404 | 253.6 | 262.2 | 157.6 | 297.4 |
| | $D_L$ | 0.618 | 0.378 | 0.34 | 0.514 | 352.2 | 328 | 240 | 378 |
| | $D_R$ | 0.284 | 0.232 | 0.114 | 0.302 | 162.4 | 202 | 82 | 222 |

*S: Spring, $D_L$: Left Dimple, $D_R$: Right Dimple, Center range: 0.7mm

접촉이 발생할 수 있으나 횡방향 미끄럼에 의해서는 그렇지 못하게 되고 또 충격마멸이 발생하게 되므로 마멸기구에 있어서도 접촉력이 있는 미끄럼 마멸과는 많이 달라진다. 이에 대해 다음 절에서 프레팅튜브 시편에 발생한 마멸량을 분석하여 계산된 미끄럼 변위와의 관계를 고찰하였다.

표 2. 프레팅튜브 시편에 나타난 마멸형상

| Spring | Condition | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Axial | | Transverse | |
| | 5N | G 0.2mm | 5N | G 0.2mm |
| Type A |  |  |  |  |
| | x:0.41, y:0.77 | x:0.8, y:1.67 | x:0.35, y:0.83 | x:0.94, y:1.81 |
| Type B |  |  |  |  |
| | x:0.46, y:1.73 | x:0.66, y:1.89 | x:0.32, y:0.8 | x:1.22, y:2.89 |

주) x: 가로치수; y: 세로치수

## 4. 3 마멸 형상과 마멸 부피

### 4. 3. 1 접촉부에서 발생한 마멸 형상

표 2 는 스프링 부분에서의 튜브와의 접촉에 의해 생성된 마멸 형상을 보여주고 있다. 표 2 에서 나타나듯이 접촉하중이 있을 때보다 틈새가 있을 때 마멸 형상이 커짐을 알 수 있다. 그러나 축방향에 비해 미끄럼 변위가 현저히 컸던 횡방향 부분에서의 마멸 형상은 예상과는 달리 그렇게 크게 나타나지는 않았다.

Type A 는 그림 4(a)에 나타나 있듯이 스프링이 핵연료봉을 감싸는(concave)듯한 모양을 갖고 있고 끝단이 모따기 형상이므로 축방향이나 횡방향 모두 삼각형 형태의 마멸이 주로 관찰되었으나

type B 는 튜브와의 접촉부가 축방향으로는 볼록하고(convex) 횡방향으로는 편평한(flat) 형상이므로 축방향 미끄럼에 의한 마멸형상은 직사각형이나 높이가 긴 삼각형 형태로 나타났으며 횡방향 미끄럼에 의해서는 타원 모양의 마멸 형상을 갖는 특징이 있었다.

**4. 3. 2 미끄럼 변위와 마멸량과의 관계**

본 절에서는 앞서 구한 미끄럼 변위에 대한 마멸량(부피, 면적 및 최대깊이)의 변화에 대해 분석하였다. 응착마멸의 경우에 주로 적용할 수 있는 다음과 같은 Archard 모델[5]에 의하면 마멸부피는 접촉력과 미끄럼 거리에 비례한다.

$$V = \frac{K}{3}\frac{PS}{p} \tag{5}$$

(여기서, V: wear volume, P: the load, S: sliding distance, p: penetration hardness of the softer material, K: the probability of transfer at a junction)

본 연구에서 수행한 실험에서는 수직 정하중 5 N 인 경우와, 지지격자 스프링/딤플과 연료봉 시편 사이에 0.2 mm 의 간격이 있는 경우 발생하는 충격하중이 접촉력이 된다. 이때 충격하중의 크기는 측정할 수 없으므로 접촉하는 경우와 간격이 존재하는 경우의 접촉하중의 크기에 따른 마멸량의 차이를 분석할 수는 없다. 이것은 충격하중의 크기를 알 수 있는 경우에 있어서도 충격하중에 의한 마멸은 정하중에 의한 마멸과 그 기구가 상이하게 되므로 하중의 크기로부터 마멸량을 단순 비교하는 데에는 무리가 있어 하중에 따른 마멸량을 분석하고자 하지는 않았던 것도 하나의 이유이다.

한편, Archard 모델에 의해 마멸부피에 영향은 미치는 독립적인 변수인 미끄럼 거리는 본 연구의 실험이 동일한 가진 주파수와 시험시간을 적용하였으므로 마멸량에 미치는 영향을 분석할 수 있는 명백한 변수가 된다. 이때 미끄럼 거리는 3 절에서 유도한 식에 의해 구할 수 있는 미끄럼 변위에 일차적으로 비례하므로 궁극적으로 마멸량에 미치는 미끄럼 변위의 영향을 분석할 수 있다. 이때 본 실험에서 사용한 스프링 또는 딤플과 연료봉 시편과의 접촉형상에 따른 분석도 아울러 수행하였다.

미끄럼 변위와 마멸량을 비교하기 위해 그림 1 의 시험기에서 스프링/딤플과 연료봉 시편이 접촉하는 좌우측 중 그림 2(b)의 변위센서가 부착되어 있는 우측의 프레팅튜브 시편에 발생한 마멸만을 분석하였다. 이는 3 절의 미끄럼 변위 계산식이 프레팅튜브 시편의 진동변위를 이용하고 있으므로 변위 센서가 부착되지 않았던 시험기 우측의 프레팅튜브 시편에서 발생한 마멸을 함께 분석할 경우의 오류를 방지하기 위한 것이다.

그림 9 는 미끄럼 변위와 Type A 및 Type B 스프링시편과의 접촉에 의해 프레팅튜브 시편에 발생한 마멸부피(그림 9(a)), 면적(그림 9(b)) 및 최대 깊이(그림 9(c))를 각각 보여 주고 있다. 그림 9 에서 삼각형 기호는 Type A 가 프레팅튜브 시편과 5 N 의 수직하중으로 접촉하는 경우에 발생한 마멸을 나타내고 역 삼각형 기호는 0.2 mm 의 간격이 있는 경우의 마멸을 나타낸다. 한편,

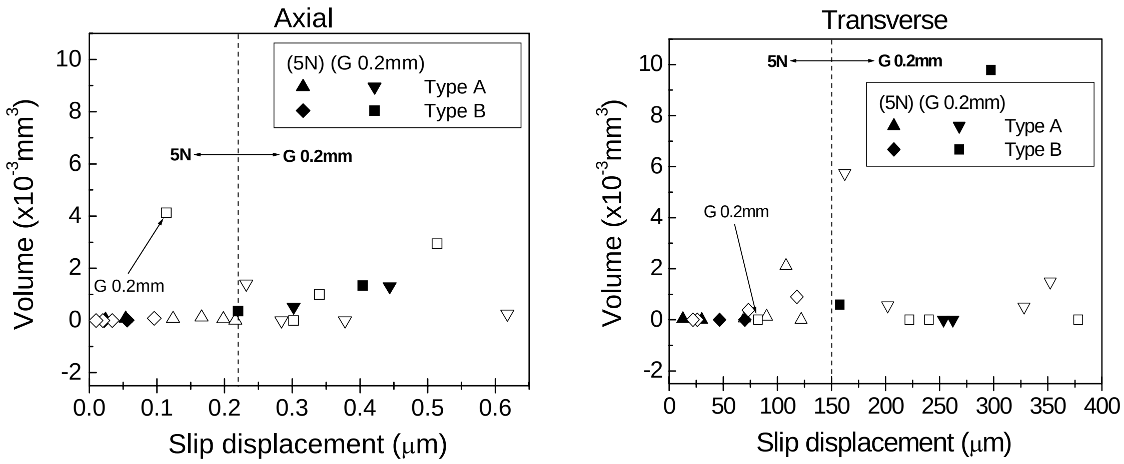
마름모 기호는 Type B 가 5 N 의 접촉력으로 프레팅튜브 시편에 접촉하는 경우 발생한 마멸을 나타내며 정 사각형 기호는 0.2 mm 의 간격이 있는 경우의 마멸을 나타낸다. 또한 그림 9 에서 속이 채워져 있는 기호는 지지격자 시편 중 튜브시편이 스프링 부분과 접촉한 위치에서의 마멸을 의미하며, 속이 빈 기호는 딤플 부분과 접촉한 위치에서의 마멸을 나타낸다.

우선 그림 9(a)-(c)에서 알 수 있는 것은 횡방향에서의 미끄럼 변위가 축방향에서의 그것보다 수백 배 크며, 동일한 방향의 미끄럼에서는 간격이 있는 경우의 미끄럼 변위가 접촉력이 있는 경우에 비해 수 배 크게 나타난 것을 알 수 있다. 횡방향에서의 미끄럼 변위가 축방향에서보다 큰 것은 본 실험에서 중앙봉을 상하방향으로 가진하였으므로 예상할 수 있는 결과이나 그 차가 수백 배로서 매우 크다는 것은 횡방향의 미끄럼에 의한 마멸량이 축방향에 의한 그것보다 매우 클 수 있다는 예상이 들게 한다. 그러나 그림 9 에 보여주는 마멸부피, 면적 및 최대깊이의 결과에 의하면 횡방향 미끄럼에 의한 마멸이 축방향 미끄럼에 의한 그것에 비해 큰 차이를 보이지 않고 거의 비슷한 것을 알 수 있다. 이것으로부터 시이소오(seesaw)와 같은 회전형태의 횡방향 미끄럼 운동에 의해서는 프레팅튜브 시편의 원주표면에 마멸을 발생시키기 힘들다는 것을 유추할 수 있다. 이에 비해 축방향 미끄럼 운동은 스프링/딤플과 튜브와의 전체 접촉길이에 대해 밀고 당기는 직선운동의 형태를 갖는다. 미끄럼 변위가 횡방향 미끄럼에 비해 현저히 작았음에도 불구하고 횡방향 미끄럼 운동에 의한 마멸과 유사한 마멸량을 보이는 것으로부터 이러한 직선 운동형태가 회전형태보다 마멸을 발생시키기 쉽다는 것을 알 수 있다.

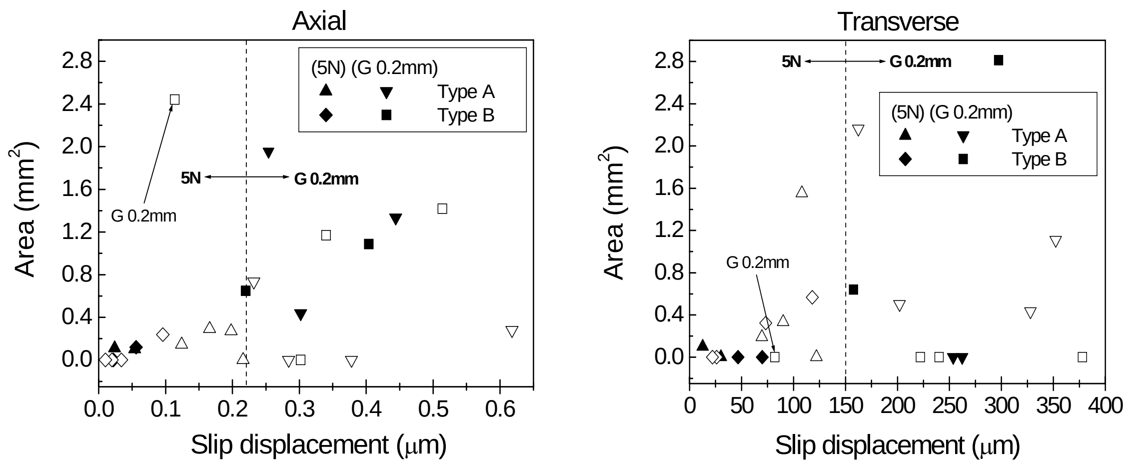
그림 9(b)에서 나타낸 미끄럼 변위와 마멸면적과의 관계에서 접촉력(5 N)이 있는 경우에는 미끄럼 변위의 증가에 따라 미끄럼 방향에 관계없이 마멸면적이 증가하고 있고 간격(0.2 mm)이 있는 경우의 축방향 미끄럼에서는 동일한 경향을 볼 수 있으나 횡방향 미끄럼의 간격이 있는 경우는 데이터의 분산이 매우 심하다는 것을 알 수 있다. 그 이유는, 횡방향 충격마멸의 경우, 실험에서 사용한 중앙봉의 가진방향이 상하방향이었으므로 프레팅튜브 시편과 스프링 또는 딤플의 충격접촉이 위치에 따라 상당히 달랐기 때문인 것으로 판단된다.

그림 9(c)의 마멸깊이 결과에서는 데이터의 분산 정도가 마멸면적에서보다 더욱 크게 나타난 것을 볼 수 있다. 축방향 미끄럼에서 접촉력이 존재하는 경우 마멸부피(그림 9(a)) 및 마멸면적(그림 9(b))에서는 각각 거의 일정하거나 완만한 단조증가의 경향이 관찰된 것에 반해 마멸깊이에서는 어떤 일정한 경향을 도출하는 것이 매우 어려우며 축방향 미끄럼의 간격이 존재하는 경우를 포함하여 횡방향 미끄럼에서도 미끄럼 변위에 대한 데이터의 분산 정도가 매우 크다.

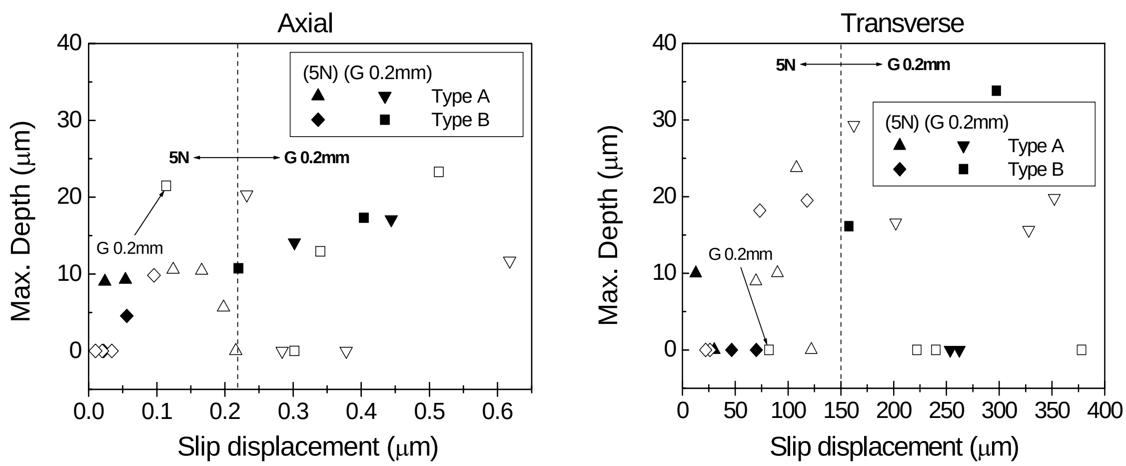
그러나 지지격자 스프링/딤플의 종류에 따른 마멸부피(그림 9(a))와 마멸깊이(그림 9(c))의 관계에 초점을 맞추면 흥미 있는 결과를 볼 수 있다. 즉, 축방향 미끄럼에서 접촉력이 있는 경우 유사한 마멸부피를 보이는 경우에도 type A 에 의한 마멸깊이가 type B 에 의한 마멸깊이보다 더 크게 나타나며 이것은 접촉력이 있는 경우의 횡방향 미끄럼에서도 유사하였다. 이것은 type A 의 경우 스프링 및 딤플의 접촉부 끝단이 코이닝되어 있어 스프링의 형상이 부드러운 곡선으로 되어 있는 type B 에 비해 프레팅튜브 시편과의 접촉 시에 국부적으로 깊은 마멸을 발생시킬 수 있기때문으로 생각된다.




(a)




(b)




(c)

그림 9. 각 방향에 의한 미끄럼 변위와 마멸 부피, 면적, 최대 깊이

이것은 type B 의 경우 간격이 있는 횡방향 미끄럼에서 스프링과의 접촉일 때에도 상대적으로 깊은 마멸이 관찰된 이유라고도 생각된다. 즉, 본 실험 결과는 마멸부피가 유사한 접촉형상(지지격자 스프링/딤플의 형상)에 있어서도 마멸깊이는 그 형상에 따라 달라질 수 있다는 것을 의미한다. 핵연료봉의 경우, 마멸부피에 비해 마멸깊이에 대한 고려가 더욱 중요하므로 이에 따른 스프링 형상설계가 필요함을 알 수 있다.

**5. 결 론**

본 연구는 원자로내의 지지격자 스프링/딤플과 핵연료봉의 접촉부에서 발생할 수 있는 마멸과 미끄럼 변위의 상관관계를 다른 접촉형상을 가지는 두 종류의 시편을 이이용하여 비교 분석한 것으로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 두 종류의 스프링/딤플 시편 모두 접촉하중이 존재하는 경우에 비해 틈새가 존재하는 경우 미끄럼 변위가 크게 나타났으며, 중앙봉을 상하방향으로 가진한 결과 축방향에 비해 횡방향에서의 미끄럼 변위가 현저히 크게 나타났음을 알 수 있다.
2. 프레팅 튜브 시편의 마멸에 크게 영향을 미치는 것은 미끄럼 변위가 아닌, 튜브와 스프링/딤플 시편의 접촉부의 형상과 더불어 미끄럼의 방향 즉, 횡방향의 시이소우(seesaw)와 같은 회전형태의 미끄럼 운동에 비해 축방향의 밀고 당기는 직선운동의 영향이 더욱 크다는 것을 알 수 있다.

**후 기**

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

**참 고 문 헌**

1. 김형규 외 4 인, 한국윤활학회 2001 추계학술대회 논문집, pp. 245-251.
2. 김형규 외 2 인, 한국원자력학회 2003 추계학술대회 논문집.
3. 김형규 외 2 인, 한국윤활학회 2003 추계학술대회 논문집, pp. 41-49.
4. 송주선 외 3 인, 한국기계학회 2004 춘계학술대회 논문집.
5. Ramond G. Bayer, ‘Wear Analysis for Engineers’, pp. 35-36.