

튜브진동 시 판스프링 지지부의 미끄럼변위와 마멸 분석

김형규[†], 이영호, 송주선

한국원자력연구소

Analysis of Slip Displacement and Wear in Oscillating Tube supported by Plate Springs

Hyung-Kyu Kim[†], Young-Ho Lee, Ju-Sun Song

Korea Atomic Energy Research Institute

ABSTRACT: Tube oscillation behaviour is experimentally investigated for the study on the fuel rod fretting that is caused by the flow-induced vibration in nuclear reactor. The experiment was conducted in air at room temperature. The specimen of tube assembly was supported by plate springs which simulated the spacer grids and fuel rods of a fuel assembly. To investigate the influence of contact condition between the grids and rods, normal load of 10 and 5 N, gaps of 0.1 and 0.3 mm were applied. The range of the oscillation at the center of the fuel rod specimen was varied as 0.2, 0.3 and 0.4 mm to simulate the fuel rod vibration due to flow. Displacements near the contact were measured with four displacement sensors during the tube oscillation. As results, the shape of oscillation (phase) varied depending on the contact condition. The oscillation displacement increased considerably from the contact to gap condition. The displacement increased further as the gap size increased. It is regarded that the spring shape influences the tube oscillation behaviour. Simple calculation showed that the slip displacement was very small. Therefore, cumulative damage concept is necessary for the fuel rod wear. The mechanism of plowing is thought required to explain the severe wear in the case of gap existence.

Key Words: Tube fretting wear, Oscillation behaviour, Contact condition, Slip displacement

1. 서론

원전 구조부품 중 핵연료나 증기발생기 세관 등에서 발생하는 프레팅마멸은 내부 또는 외부에 흐르는 유동장에 의해 발생하는 유체유발진동에 기인한다. 이때 프레팅마멸은 핵연료봉 또는 증기발생기 세관에 진동이 발생할 때 이들 부품을 지지하는 구조물과의 접촉부에서 상대운동에 의하여 발생하게 된다. 이때의 마멸손상은 각 부품의 수명을 단축시키게 되고 원전의 안전성 및 경제성을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 전세계 원자력계에서 이들 부품의 마멸억제에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 마멸 손상은 매우 복잡한 기구(mechanism)를 갖고 있으므로 해결책을 찾

기가 쉽지 않다.

이론적이든 실험적이든 이들 부품에 대한 프레팅마멸 연구를 위해서는 접촉부에서의 하중(또는 응력)과 상대미끄럼 변위에 대한 정보가 필요하다. 그러나 유체유발진동 현상에서 발생하는 높은 주파수(대개 30 Hz 이상)와 고온고압, 그리고 방사능 분위기 하의 운전 조건에서 접촉부의 하중과 상대미끄럼 변위를 측정한다는 것은 매우 어렵다. 특히 상대미끄럼 변위는 프레팅상태라 할 수 있는 매우 작은 값(대개 100 μm 이내)을 가질 뿐 아니라 접촉부 내에서 발생하는 것이므로 상온 공기중에서의 실험에서도 직접적인 측정은 거의 불가능하다고 할 수 있다.

프레팅마멸의 실험적 연구를 위해 유한요소방법 등을 이용한 진동해석으로부터 지지격자 스프링의 접촉하중 상실을 예상한 접촉하중과 예상되는 진폭을 구하여 이들을

[†]주저자 · 책임저자 : hkkim1@kaeri.re.kr

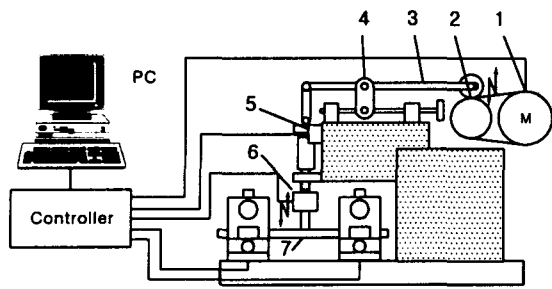


Fig. 1 Sliding/Impact Fretting Wear Tester; 1: Servo-Motor, 2: Eccentric Cylinder, 3: Lever, 4: Movable Hinge, 5: LVDT, 6: Load Cell, 7: Tube Specimen.

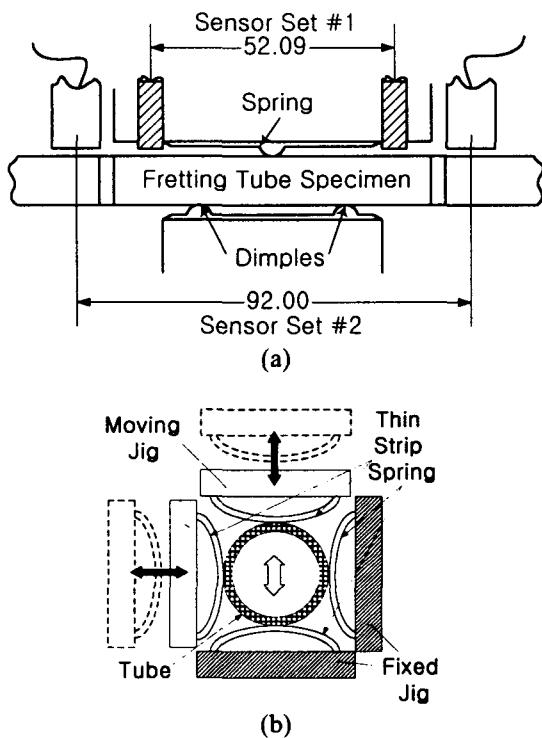


Fig. 2 (a) Sensor configuration, (b) Specimen arrangement.

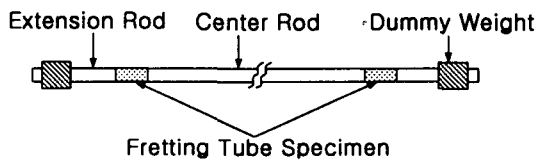


Fig. 3 Tube assembly specimen.

실험변수 값으로 많이 이용하고 있다. 그러나 마멸에 영향을 미치는 중요한 인자인 접촉하중과 미끄럼 진폭을 해석 결과만으로 추정하는 데에는 많은 오차를 포함할 가능성이 있다. 따라서 이들 부품의 프레팅마멸에 대한 실험적 연구를 위해서는 접촉하중 및 미끄럼 변위에 대한 측정방법을 특별히 고안하여야 할 필요가 있다.

이를 위하여 본 연구는 핵연료봉의 프레팅마멸 문제에 초점을 맞추고 이의 실험적 연구를 위하여 지지격자 스프링 위치에서 핵연료봉 피복관과의 상대미끄럼 진폭을 실험적으로 측정할 수 있는 방법을 제안하고 그 결과를 분석한 것이다. 이때 미끄럼 진폭은 지지격자 스프링 또는 덤플과 피복관 사이의 접촉하중에 따라 달라지므로 접촉하중의 변화에 따른 영향을 분석하였으며, 핵연료가 연소됨에 따라 지지격자체가 핵연료봉을 지지하는 능력을 상실하였을 때를 고려하기 위하여 지지격자 스프링/덤플과 피복관 사이에 틈새가 존재하는 경우를 포함하였다.

결과분석을 위해, 각각의 접촉조건(접촉하중 및 틈새 크기의 변화)에 따라 연료봉으로 모사된 튜브시편의 진동거동을 조사하였으며, 얻은 진동 데이터로부터 접촉부에서의 미끄럼 변위를 알 수 있는 간단한 수식을 개발하여 접촉조건에 따른 변위의 크기를 비교하였다. 한편, 접촉부에 틈새가 있는 경우 일반적으로 마멸이 심하게 발생하는 이유에 대해 충격마멸인 경우에 고려되는 프레팅마멸 기구에 대해서 토의하였다. 본 연구는 일차적으로 핵연료봉의 프레팅마멸 연구를 위해 수행되었으나 스프링/덤플의 형상인 판스프링에 의해 지지되는 튜브의 진동 시 발생하는 접촉부에서의 마멸문제에도 일반적으로 적용할 수 있을 것이다.

2. 실험

2.1 시험기

Fig. 1 에 본 연구에 사용된 미끄럼/충격 프레팅마멸시험기의 개략도를 나타내었다. 이 시험기는 회전속도를 가변할 수 있는 서보모터와 편심원통, 링크 및 지렛대기구를

이용하여 진동수, 진동변위를 조절하고 시편 사이의 접촉력 및 간격 등을 변화시킬 수 있도록 되어 있다. 본 시험기에 대한 상세한 설명은 이미 발표되었으므로[1]에 본 논문에서는 생략하였다.

본 연구의 목적인 튜브시편의 진동거동 조사는 Fig. 2에 보여주는 것과 같이 접촉하고 있는 스프링 및 튜브시편 좌우에 배치한 2 쌍의 변위 센서로부터 변위 값을 실시간으로 측정함으로써 수행하였다. 이때 각 쌍의 센서는 스프링과 튜브시편의 접촉부로부터 거리가 다르도록 하였으며 센서 중심사이의 거리가 52.09 mm인 쌍(Sensor Set #1)과 92.0 mm인 쌍(Sensor Set #2)으로 되어 있다. 모든 센서는 튜브시편을 가진하는 방향과 동일한 위, 아래방향의 진동을 측정할 수 있도록 배열하였다.

2.2 시편

본 실험에 사용된 튜브시편과 이를 지지하는 판스프링 시편은 모두 상용 경수로 핵연료에 사용되는 지지격자판 및 핵연료봉 피복관으로부터 절취한 것으로 지르코늄계 합금이다. 튜브시편의 외경은 9.5 mm, 두께는 0.6 mm이며, Fig. 3과 같이 조립하여 제작하였다. 즉, 지지격자 스프링/딴플 시편과 핵연료봉은 핵연료집합체 하나의 스펠(span; 여기서는 522mm)에 해당하는 거리만큼 떨어져 있는 두 곳에서 접촉하므로 접촉부에는 속이 빈 피복관을 길이 55 mm로 절단하고(프레팅 튜브시편), 두 개의 프레팅 튜브시편 사이에는 납 펠렛으로 충전한 피복관(중앙 봉)을 별도로 제작하여 연결한 튜브집합체 시편을 사용하였다. 중앙 봉에 납 펠렛을 충전한 이유는 실제 핵연료봉의 무게와 유사하게 하기 위함이다.

이와 같이 튜브집합체 시편을 제작한 것은 실험 후 스프링/딴플과 접촉하는 부위가 마멸되므로 길이 522 mm 이상의 피복관 시편을 한 가지 조건의 실험에 사용할 경우 비경제적이기 때문이다. 즉, 중앙 봉은 반영구적으로 사용하도록 하였으며 실험에 따라 프레팅 튜브시편만 교체하여 사용하도록 하였다. 한편 프레팅 튜브시편과 접촉하게 되는 스프링/딴플 시편은 최근 개발된 것으로 핵연료의 중간 지지격자에 사용되는 것이다.

이 스프링의 특징은 핵연료봉과 접촉하는 부위가 3 개의 마루를 갖는 형상으로서 접촉 개수를 증가시켜 하중을 분산시킴으로써 프레팅마멸 저항성을 높이는 효과를 의도한 것이다.

2.3 실험 방법

실험은 상온, 공기 중에서 수행하였으며 이때 튜브집합체 시편의 중앙(즉, 중앙 봉의 중앙)을 시험기의 구동장치에 연결하여 상하방향의 변위범위를 0.2, 0.3, 0.4 mm 세 가지로 하여 30 Hz로 가진하였다. 가진 변위는 핵연료집합체에서 핵연료봉 사이의 거리보다 작은 값을 임의로 선정한 것으로 향후 핵연료집합체에 대한 유체유발진동 시험에서 스펠 중앙의 변위를 측정하게 되면 그 값으로 본 연구에서와 동일한 실험을 수행하여 접촉부에서의 진동거동을 분석할 수 있을 것이다. 한편 가진 주파수를 30 Hz로 한 것은 해석에 의해 핵연료봉의 1 차 공진 주파수가 30 Hz에 가깝기 때문이다.

실험에서 스프링/딴플 시편과 프레팅 튜브시편 사이의 접촉조건으로는 10 N, 5 N의 접촉하중이 있는 경우와 0.1 mm, 0.3 mm의 틈새가 있는 경우로서 총 네 가지로 하였다. 따라서 실험의 조건은 총 12 가지(중앙 변위 3 가지 × 접촉조건 4 가지)가 되며, 실험을 시작하여 접촉부에서의 조건이 안정되는 약 30 분 후에 프레팅 튜브시편의 좌우에 배열한 2 쌍의 디지털 와전류식 변위센서(KEYENCE EX-V Series)를 이용하여 상하방향 진폭을 측정하였다(Fig. 2).

3. 미끄럼변위 계산식

중앙 봉이 상하방향으로 강제로 가진될 때 튜브집합체 시편은 전체 길이에 대해 휘어지는 상태가 될 것이므로, 진동 모우드에 따라 달라질 수는 있으나, 지지격자 스프링/딴플 시편과 접촉하는 프레팅 튜브시편의 위치에서는 하나의 회전 중심에 의해 회전하는 형태가 된다고 생각할 수 있다. 이때 프레팅 튜브시편의 진동 형태는 Fig. 4와 같이 프레팅 튜브시편의 회전 중심의 위치에 따라 두 가지의 거동을 하게 될 것이다.

본 논문에서는 각각의 거동을 모우드 I

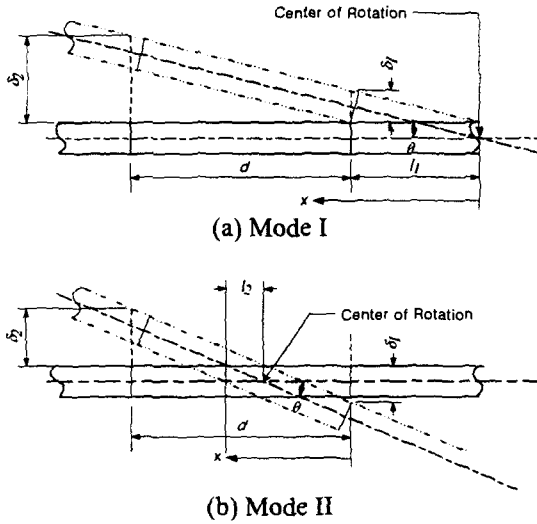


Fig. 4 Two possible modes during tube oscillation.

및 모드 II 라 하고, 전자는 회전 중심이 스프링/덤플 시편의 좌우측에 설치된 센서의 바깥에 위치하는 경우이며 후자는 내부에 위치하는 경우를 의미한다. 한편, 스패의 길이 522 mm 보다 긴 전체 튜브집합체 시편의 길이를 고려할 때, 가진 중 프레팅 튜브 시편(길이 50 mm)은 휘어지지 않고 회전 강체운동을 한다고 가정하였다.

Fig. 4 에서 d 는 센서 사이의 거리(52.09 mm)이고, δ_1 , δ_2 는 각각 핵연료봉 시편이 가진될 때 우측(중앙에서 먼쪽)과 좌측 센서로부터 기록된 값이다. 또 l_1 은 모드 I 일 때 프레팅 튜브시편의 회전중심에서 가까운 센서의 중심과 회전 중심과의 거리를 나타내고, l_2 는 모드 II 일 때 회전 중심으로부터 스프링 또는 덤플 위치까지의 거리를 나타내고 있다. 한편, x 는 센서의 중심으로부터 스프링 또는 덤플 위치까지의 거리를 나타내며, 각 위치에서의 진동 반주기 동안 축방향의 미끄럼 변위를 s 라 표기하였다. 결과적으로 튜브집합체 시편의 진동 1 주기 동안 각 접촉부에서의 축방향 미끄럼 변위는 $2s$ 가 된다.

모드 I 은 프레팅 튜브시편의 회전 중심이 측정 센서의 외부에 있는 경우로서 프레팅 튜브시편 좌측 및 우측(각각 안쪽 및 바깥쪽) 센서로부터 구하게 될 데이터가 동일 위상인 경우에 적용할 수 있다. 이때의

미끄럼 변위 s 는 Fig. 4(a)에서 정의된 기하학적 조건으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$s = \frac{(l_1 + x)(1 - \cos \theta)}{\cos \theta} \quad (1)$$

여기서,

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

한편, 모드 II 는 좌우측의 센서로부터 측정된 δ_1 과 δ_2 가 반대의 위상(즉, 위상차가 180°)일 때에는 프레팅 튜브시편의 회전 중심이 두 개의 측정 센서 사이에 있는 경우로서 Fig. 4(b)에서 정의된 기하학적 조건으로부터 미끄럼 변위 s 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$s = \frac{l_2(1 - \cos \theta)}{\cos \theta} \quad (2)$$

여기서,

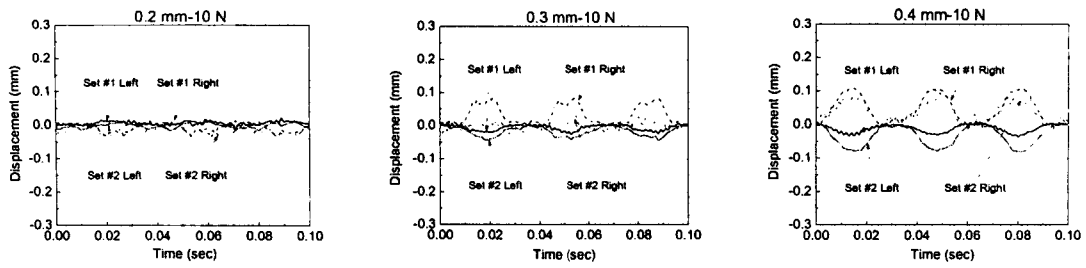
$$l_2 = \frac{|\delta_1 + \delta_2|x - d\delta_1|}{(\delta_1 + \delta_2)}, \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{\delta_2}{l_2 + d - x} \right).$$

4. 결과 및 고찰

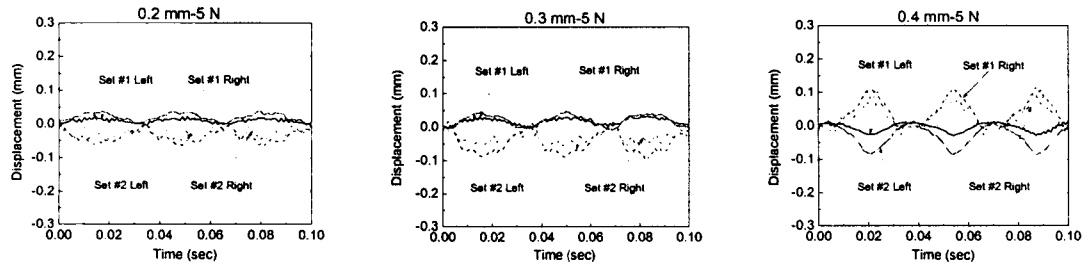
4.1 튜브의 진동거동.

앞 절에서 논의한 미끄럼 변위를 분석하기 위해 프레팅튜브 시편의 진동 위상을 우선 파악하여야 하며 이를 위해 프레팅튜브 시편의 좌우측에 부착된 센서(Sensor Set #1 및 #2) 각각에서 동일시간 동안 진동신호를 취득하였다. 튜브집합체 시편의 중앙변위 0.2, 0.3 및 0.4 mm 로 가진한 경우 본 연구에서 사용한 네 가지 접촉조건에 대해 취득된 진동신호를 Fig. 5 에 나타낸다.

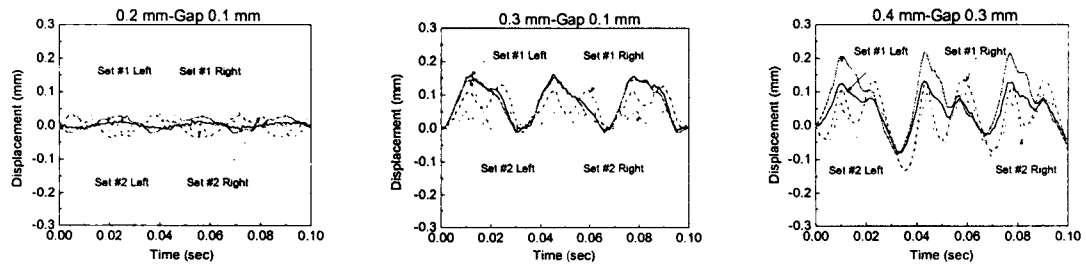
Fig. 5 에서 볼 수 있는 흥미로운 결과로서, 중앙변위 0.2 mm 일 때의 0.1 mm 틱새조건을 제외하고는, 프레팅튜브 시편과 지지격자 스프링/덤플 시편 사이에 접촉력이 존재하는 경우에는 역위상인 모드 II 가 나타났으며 틱새가 있는 경우에는 동위상인 모드 I 이 관찰된 것으로 지지조건에 따라



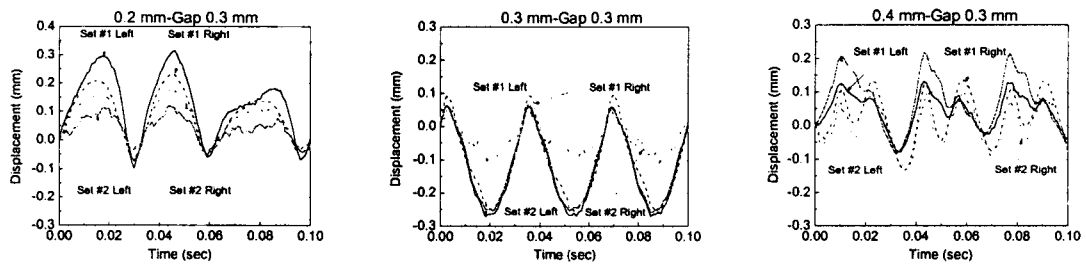
(a) Contact force of 10 N



(b) Contact force of 5 N



(c) Gap of 0.1 mm



(d) Gap of 0.3 mm

Fig. 5 Tube oscillation behaviour near contact region relevant to various contact conditions.

위상이 변한다는 것이다. 또한 예상할 수 있는 것과 같이 중앙변위가 증가할수록 또 접촉력이 감소하면서 틈새가 증가할수록 진

동진폭이 증가하는 현상을 볼 수 있다. 한편 모든 신호는 튜브집합체의 가진주파수인 30 Hz 를 따라가고 있으나 각각의 신

호는 더 높은 주파수를 포함하고 있는 것을 알 수 있어 튜브집합체가 진동할 때 다양한 진동수 성분이 함께 포함되는 것을 확인하였다. 특히 Sensor Set #2 의 바깥쪽(본 실험에서 구성된 스펠의 외부) 센서에서 취득된 신호가 가장 fluctuation 이 심하였다. 이것은 튜브의 지지부 바깥쪽이 자유단인 때문인 것으로 판단되며 스펠의 수를 증가시킬 경우 저감될 것으로 보인다.

그럼에도 불구하고 중앙변위 0.3 mm 에서 0.1 mm 틈새조건의 Sensor Set #2 의 바깥쪽 센서 및 중앙변위 0.4 mm 에서 0.3 mm 틈새조건의 모든 센서에서 취득된 신호에서 뚜렷이 관찰된 30 Hz 1 주기당 2 회의 fluctuation 은 매우 특이한 현상이다. 아직 이에 대한 원인을 명백히 밝히지 못하였으나 3 군데의 마루를 갖는 스프링의 형상과 스프링으로부터 덤플까지의 거리에 따른 영향일 것으로 추정하고 있다. 즉, 틈새조건에서 튜브집합체 시편의 진동할 때 스프링 및 덤플의 위치는 힌지점이 되고 이때 힌지 사이의 거리 및 힌지의 형태(스프링의 형상에 대해 좀 더 국한시켜 생각할 때)에 따른 특성이 진동거동에 분명한 영향을 미칠 것이기 때문이다. Fig. 5 의 분석결과는 튜브를 지지하는 형상 및 구조가 접촉부에서 발생하는 마멸에 영향을 미치는 것이 분명하다는 것을 확인시켜 준다.

Fig. 6 에는 Fig. 5 와 같은 신호를 30 분 동안 취득하여 각 신호의 진동변위(peak-to-valley) 값을 평균하여 접촉 조건에 따라 나타낸 것으로 각각의 중앙변위 및 접촉 조건에 따른 분석결과를 다음과 같이 정리할 수 있다.

중앙변위 0.2 mm 에서는 접촉력이 존재하는 경우로부터 틈새 0.1 mm 조건까지 진동변위는 매우 느리게 증가하다 틈새 0.3 mm 조건에서 현저히 증가하였다. 이러한 경향은 Sensor Set 의 위치에 무관하게 동일하나 Sensor Set #1 에서는 프레팅튜브 시편 바깥쪽의 변위가 안쪽보다 항상 큰데 반해 Sensor Set #2 에서는 틈새 0.3 mm 조건에서 오히려 안쪽 센서의 변위가 바깥쪽 보다 더 큰 결과를 보였다. 이를 위상의 변화와 관련지어 생각할 때 틈새가 0.3 mm 로 증가하면 모드 II 에서 모드 I 으로 바뀌는 데

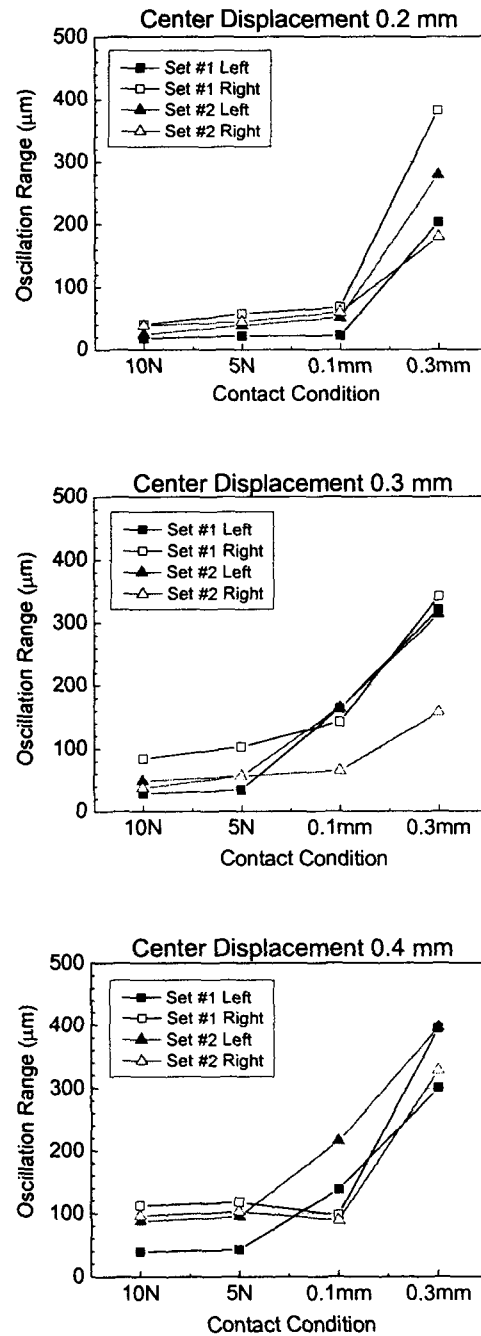


Fig. 6 Measured oscillation ranges (peak-to-valley) near contact region at various center oscillation ranges and contact conditions.

에 따라 진동거동의 형태가 현저히 달라지기 때문으로 생각되며 진폭의 증가에 따라

Table 1. Axial slip range evaluated for each test conditions ($\times 10^{-3} \mu\text{m}$)

| Center range | Loc.* | Contact conditions | | | |
|--------------|----------------|--------------------|-------|------------|------------|
| | | 10 N | 5 N | 0.1 mm Gap | 0.3 mm Gap |
| 0.2 mm | S | 3.04 | 6.66 | 9.92 | 250.72 |
| | D _L | 0.96 | 1.44 | 1.20 | 206.00 |
| | D _R | 7.64 | 15.36 | 21.30 | 295.44 |
| 0.3 mm | S | 15.00 | 22.56 | 15.70 | 32.08 |
| | D _L | 1.98 | 2.90 | 15.06 | 31.52 |
| | D _R | 32.46 | 48.68 | 16.34 | 32.66 |
| 0.4 mm | S | 26.60 | 29.04 | 23.26 | 157.30 |
| | D _L | 4.46 | 5.34 | 20.90 | 144.82 |
| | D _R | 59.04 | 65.24 | 25.62 | 169.76 |

* S: Spring, D_L: Left Dimple, D_R: Right Dimple

마멸발생이 가속화 될 것으로 생각할 수 있다. 한편 각각의 Sensor Set 에서 좌우측의 진동변위 차를 보면 Sensor Set #1 의 경우가 Set #2 에 비해 항상 큰 것을 알 수 있다.

중앙변위 0.3 mm 에서는 Sensor Set 의 위치에 무관하게 프레팅튜브 시편 안쪽과 바깥쪽의 신호가 뚜렷이 구분되는 것을 알 수 있다. 즉 안쪽의 신호는 접촉력이 감소함에 따라 진동변위가 느리게 증가하다 틈새가 발생하면 틈새의 증가에 따라 진동변위가 계속 증가한다. 그러나 바깥쪽 센서에 의한 신호는 중앙변위 0.2 mm 에서 볼 수 있었던 것처럼 틈새 0.3 mm 조건이 되어야 진동변위의 상당한 증가가 관찰되었다. 중앙변위 0.2 mm 인 경우와 다른 또하나의 현상은 튜브와 스프링/덤플 사이에 틈새가 존재하면 Sensor Set #1 의 좌우측 진동변위 차는 감소하고 Set #2 의 그것은 증가한다는 것이다.

중앙변위 0.4 mm 일 때의 진동신호는 중앙변위 0.3 mm 에서 관찰된 것과 유사하게 프레팅튜브 시편 안쪽의 신호가 접촉력이 감소함에 따라 진동변위가 느리게 증가하다 틈새가 발생하면 틈새의 증가에 따라 진동변위가 계속 증가하는 데에 비해 바깥쪽 센서에 의한 신호는 틈새 0.3 mm 조건이 되어야 진동변위가 상당한 증가하였다. 그러나 0.1 mm 틈새조건에서는 각 sensor Set 의 바깥쪽 진동변위가 접촉력이 있는 경우에 비해 감소하는 특이한 현상이 나타났다. 이것은 Fig. 5 중 중앙변위 0.4 mm 의 0.1 mm 틈새조건에 해당하는 신호의 위상을 살펴볼 때 프레팅튜브 시편의 안쪽에서 취득된 신

호의 위상에 대해 바깥쪽 신호의 위상이, 그 이외의 다른 동위상(중앙변위 0.2 mm 에서 0.3 mm 틈새조건, 중앙변위 0.3 mm 에서 0.1 및 0.3 mm 틈새조건, 중앙변위 0.4 mm 에서 0.3 mm 틈새조건)일 때와 달리, 완전히 일치하지 않는 특성을 보인 이유로 생각된다. 이것은 튜브집합체 시편이 가진될 때 프레팅튜브 시편 내에서도 변형이 발생한 특별한 경우임을 의미한다.

이상의 관찰로부터 튜브집합체 시편에 단순히 상하방향으로 일정한 진동수의 강제 진동을 시키더라도 접촉조건 및 진동변위에 따라 접촉부 부근에서의 진동 거동이 매우 복잡하게 나타나게 됨을 알 수 있다. 따라서 실제 튜브시편 집합체에 유체유발진동이 발생하면 이보다 훨씬 다양하고 복잡한 진동거동이 발생할 것이다. 그러나 마멸분석의 관점에서는, 접촉력을 알 경우, 접촉부에서의 미끄럼 변위만이 중요한 변수가 되므로 복잡한 진동현상 자체를 알아야 할 필요는 없을 것이다. 이에 따라 Figs. 5 및 6 과 식 (1) 및 (2)를 이용하여 미끄럼 변위를 구하였다. 이때, 식 (1) 및 (2)의 적용에 있어 가정으로 사용한 프레팅튜브 시편의 강제운동은 중앙변위 0.4 mm 에 0.1 mm 틈새조건에서는 완전히 성립하지 않게 된다. 그러나 이 경우를 제외하고는 식 (1) 및 (2)의 적용에 문제가 없다는 것을 진동변위 및 위상으로부터 확인할 수 있었으므로 일단 중앙변위 0.4 mm 에 0.1 mm 틈새조건에서도 이들 수식을 사용하여 미끄럼 변위를 평가하여 보았다.

4.2 지지력에 따른 미끄럼 변위

Fig. 5 및 Fig. 6 에서 보여주는 프레팅튜브 시편의 진동 모드와 변위를 식 (1) 및 (2)에 사용하여 각 접촉조건에 따른 스프링 및 덩플 위치에서의 미끄럼 변위를 계산한 결과를 Table 1 에 나타내고 있다. 실험에서 프레팅튜브와 접촉하는 스프링 시편의 배열 상태는 Fig. 2 에 보여주는 것과 같으며 프레팅튜브 시편의 오른쪽 센서의 중심으로부터의 거리는 오른쪽 덩플, 스프링, 왼쪽 덩플의 순으로 각각 10.83 mm, 26.045 mm, 41.26 mm 이므로 이 값들을 식 (1) 및 (2)의 x 에 대입하여 구하였다.

스프링 위치에서의 미끄럼 변위는, 모우드의 형상으로부터 예상할 수 있듯이, 스프링 좌우측 덩플에서 계산된 미끄럼 변위들 사이 값을 가지게 된다. 그러나 튜브와 스프링 또는 덩플과의 접촉조건에서 접촉력이 존재하는 경우에 비해 틈새가 존재하는 경우의 축방향 미끄럼 변위가 항상 크게 되는 것은 아니라는 것을 알 수 있으며(예로서 0.1 mm 틈새조건과 접촉력이 존재하는 경우의 비교에서), 중앙변위가 증가함에 따라 접촉부의 진동진폭이 증가하더라도 축방향의 미끄럼 변위도 이에 따라 증가한다고는 할 수 없다(예로서 중앙변위 0.2 mm 일 때 0.3 mm 의 틈새조건에서 최대의 미끄럼 변위가 계산된 것으로부터).

모우드에 따른 미끄럼 변위의 특징 중 하나는 스프링과 두 덩플 위치 각각에서의 미끄럼 변위 차가 동위상(모우드 I)일 때 보다 역위상(모우드 II)일 때가 현저히 크다는 것이다. 실험 결과에 의해 역위상이 나타난 것은 일반적으로 접촉력이 존재하는 경우이므로 접촉력이 존재할 때에는 스프링보다 덩플 위치에서 더 심한 마멸이 튜브에 발생할 것으로 생각된다.

4.3 지지력에 따른 마멸 분석

Table 1 에 나타낸 미끄럼 변위 중 틈새조건에서의 값은 튜브에 발생하는 실제의 미끄럼 변위라 할 수는 없다. 그 이유는 Table 1 에 나타낸 값은 튜브집합체 시편이 진동할 때 스프링과 덩플 각각의 위치에서 발생하는 튜브의 축방향 이동과 튜브 회전각(θ)

과 관련이 있으므로($1/\cos\theta$), 틈새가 존재할 경우 튜브집합체 진동 1 주기 동안 스프링(또는 덩플)과 프레팅튜브 시편이 접촉하는 시간이 존재하며 그 시간 동안에 한하여 Table 1 에 나타낸 값의 일부가 미끄럼 변위로 작용할 것이기 때문이다.

본 연구에서는 틈새 조건에서 튜브집합체 진동 1 주기 동안 튜브와 스프링 또는 덩플이 접촉하는 시간을 측정하진 않았다. 따라서 틈새 조건일 때 접촉부에서의 미끄럼 변위는 Table 1 에 나타낸 값들에 비해 더 작은 값이 될 것이다. 이와 함께 Table 1 에서 계산된 미끄럼 변위의 절대적인 크기를 살펴보면 10^{-3} μm 크기로서 매우 작은 것을 알 수 있다. 접촉력이 존재할 경우의 프레팅 상태에서 튜브와 스프링 또는 덩플과의 접촉부에서의 마멸기구는 응착마멸과 연마(연삭)마멸이며, 이와 같이 작은 미끄럼 변위에 의해서는 응착 또는 연마마멸 기구에 의한 마멸의 발생은 거의 없을 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서와 같이 판스프링의 형상으로 지지된 튜브진동에서 나타나는 마멸은 접촉부에서 틈새가 발생하여 접촉부에서 plowing 과 같은 마멸기구가 발생한 데에 따른 것이라 생각된다. 접촉부에 틈새가 존재할 경우 접촉 시간과 마멸기구에 대해서는 충격마멸 현상에 대한 분석이 추가적으로 필요할 것으로 생각되며 이를 위해서는 기존의 문헌을 참고하여야 할 필요가 있다[2].

한편 Fig. 6 에 나타낸 진동변위는 튜브의 횡방향(transverse direction) 미끄럼 변위가 되며 이 값이 접촉부에 틈새가 발생하며 현저히 증가하는 것을 보여주었다. 본 연구에서 사용한 시험기를 이용한 마멸시험에서 스프링과 튜브 사이의 접촉형상에 따른 영향이 있으나 대부분 횡방향의 미끄럼에 의한 마멸의 발생이 축방향의 미끄럼에 의한 마멸량보다 상대적으로 적었다[3]. 그러나 본 실험에서 횡방향의 미끄럼 변위가 축방향의 미끄럼 변위에 비해 매우 큰 값을 갖는 것으로 나타났으므로 횡방향의 미끄럼에 의한 튜브마멸을 다시 고려하여야 할 필요가 있을 것으로 보인다. 또한 횡방향의 미끄럼 변위는 틈새가 존재할 경우 현저히 증가함을 알 수 있었으므로 축방향 미끄럼일 때의

plowing 기구와 함께 접촉부에 틈새가 있을 경우 마멸이 가속될 것을 명백히 예상할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 경수로 핵연료의 핵연료봉과 지지격자체와 같이 판스프링에 의해 지지되는 튜브가 외력에 의해 가진될 때 튜브와 지지 스프링과의 접촉부에서 발생하는 마멸에 대한 정량적 분석을 위해 접촉부에서의 미끄럼 변위를 구할 수 있는 실험방법과 수식을 개발한 것으로 분석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 튜브 진동 시 접촉부를 포함하는 부근의 진동현상은 본 논문에서 정의한 모우드 I(동위상)과 모우드 II(역위상)가 모두 나타나며 가진한 주파수 외에 복잡한 주파수가 포함되게 된다.
- 2) 접촉부를 기준으로 왼쪽의 센서(스팬 내부)와 오른쪽의 센서(스팬 외부)에서 측정된 진동진폭의 접촉조건에 따른 거동이 다르다. 따라서 접촉부 부근에서 튜브의 진동 현상이 매우 복잡하다는 것을 알 수 있고 이것은 접촉형상의 영향을 받는다.
- 3) 틈새가 존재하는 경우의 미끄럼 변위가 접촉력이 존재하는 경우에 비해 항상 크지는 않다. 따라서 틈새가 있는 경우에 심한 마멸이 발생하는 것은 마멸기구에 있어서 plowing 등이 포함되기 때문인 것으로 생각되며 미끄럼 변위의 절대적인 크기를 고려할 때 마멸은 억제하기 위해서는 접촉력이 존재하도록 하는 것이 중요하다는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. 김형규 외 4 인, 한국원자력학회 2001 추계학술대회 논문집 245-251.
2. P.A. Engel, Impact Wear of Materials (1978)

Elsevier Scientific Publishing Company.

3. 김형규 외 4 인, 한국원자력학회 2002 춘계학술발표회 논문집.