

튜브진동 시 지지부에서의 축·횡방향 미끄럼변위 분석

송주선[†] · 김형규[‡] · 이영호 · 김재훈^{*}

Analysis of Axial and Transverse Slip Displacements during the Oscillation of a Supported Tube

Ju-Sun Song[†], Hyung-Kyu Kim[‡], Young-Ho Lee, Jae-Hoon Kim^{*}

Key Words : Tube fretting wear(튜브 프레팅마멸), Slip displacement(미끄럼변위), Axial slip(축방향 미끄럼), Transverse slip(횡방향 미끄럼)

Abstract

Slip displacement is brought into focus to study the tube fretting wear that occurs on the contact by the springs. An oscillating tube was in contact with plate support springs. The contact condition was varied as normal force 5 N, and gaps of 0.1 and 0.2 mm in the experiment. The oscillation range of the tube was also varied as 0.2, 0.3, 0.4 and 0.7 mm. Formulas for predicting the slip displacement range were derived in terms of the vibration amplitudes measured during the tube oscillation. It was found that the slip displacement in transverse direction was much higher (720~33000 times) than that in axial one. This resulted in the severer wear on the contact suffered from transverse slip.

1. 서 론

튜브와 이를 지지하는 스프링 구조물의 접촉부에서 미세한 진동에 의한 상대 미끄럼 운동이 발생할 때 접촉면에는 일반적으로 마멸손상이 발생하게 된다. 이러한 예의 하나가 원자로 내에서의 프레팅 손상이며, 이것은 원자로 내부의 유동장에 의해 발생하는 유체유발진동에 기인한다. 이러한 프레팅 손상에 대한 연구를 위해서는 접촉부에서의 하중과 상대미끄럼 변위에 대한 정보가 필요하다. 그러나 고온고압과 방사능 분위기하의 운전조건에서 발생하는 유체유발진동에서 접촉부의 상대미끄럼 변위를 측정한다는 것은 거의 불가능하다. 이를 위해 본 논문은 튜브가 진동할 때 지지부에서의 진동거동과 상대 미끄럼 변위 거동을 분석하기 위한 측정방법을 제안하고,

그 결과를 분석한 것이다.

이때 지지조건으로는 튜브 스프링 사이에 접촉하중이 존재하는 경우와, 지지력이 소실되었을 때의 틈새가 존재하는 경우로 하였다. 또한, 튜브의 진동거동 변화를 실시간으로 조사하였으며, 그로부터 얻은 진동데이터로부터 접촉부에서의 미끄럼 변위를 알 수 있는 간단한 수식을 개발하고 지지조건에 따른 미끄럼 변위의 크기를 비교하였다.

본 연구 결과는 핵연료봉 프레팅마멸 시험에 좀 더 타당한 시험변수를 적용할 수 있는 방법으로 사용할 수 있을 것이며, 아울러 핵연료봉의 유체유발진동 연구에도 상호보완적으로 활용할 수 있을 것이다.

2. 실험

2.1 시험기

Fig. 1 에 본 연구에 사용된 미끄럼/충격 프레팅 마멸시험기의 개략도를 나타내었다. 이 시험기는 회전속도를 가변할 수 있는 서보모터와 편심원통, 링크 및 지렛대기구를 이용한 것으로 상세한 설명은 이미 발표되었으므로[1] 본 논문에서 생략하였다.

[†] 논문발표자의 소속 : 한국원자력연구소

E-mail : bruce95@cnu.ac.kr

TEL : (042)868-2529

[‡] 책임저자 : 한국원자력연구소 (hkkim1@kaeri.re.kr)

^{*} 충남대학교 기계설계공학과

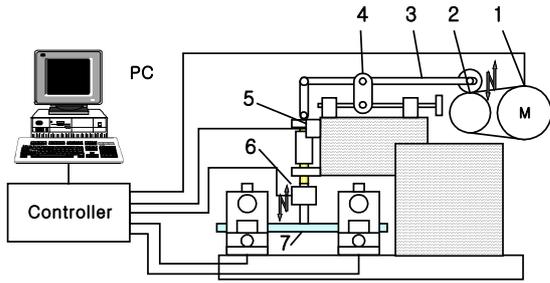


Fig. 1 Sliding/Impact Fretting Wear Tester; 1: Servo-Motor, 2: Eccentric Cylinder, 3: Lever, 4: Movable Hinge, 5: LVDT, 6: Load Cell, 7: Tube Specimen.

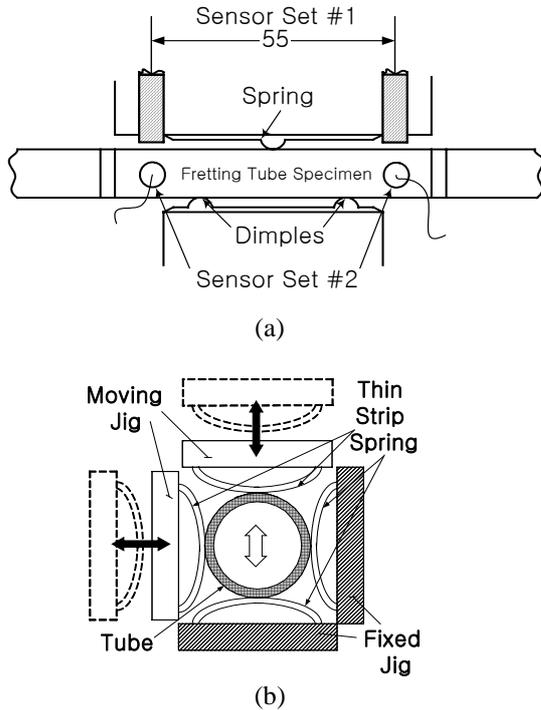


Fig.2 (a) Sensor configuration, (b) Specimen arrangement.

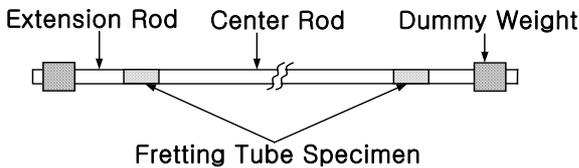


Fig. 3 Tube assembly specimen.

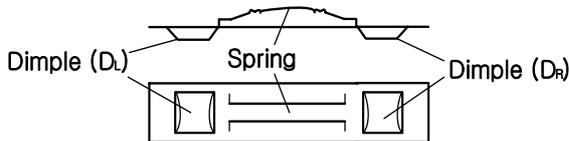


Fig. 4 Spring specimen

본 연구의 목적인 튜브시편의 진동거동조사는 Fig. 2 에 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 일정(센서 중심사이의 거리가 55 mm)하도록 하였으며, 한 쌍의 센서는 튜브시편을 가진하는 방향과 동일한 상하방향의 진동을 측정할 수 있도록 배열(Sensor Set #1)하고, 다른 한 쌍은 전후방향의 진동을 측정할 수 있도록 배열(Sensor Set #2)하였다.

2.2 시편 및 접촉부의 형상

본 실험에 사용된 튜브집합체 시편은 Fig. 3 에 보여준다. 튜브 외경은 9.5 mm, 두께는 0.6 mm 이며, 중앙봉(center rod)의 길이는 467 mm 이고 중앙봉의 좌우에 프레팅 튜브시편(길이 55 mm)을 조립하고 다시 그 바깥쪽에 추를 설치하였다. 스프링 시편은 프레팅 튜브시편에 접촉하게 되며 좌우 스프링의 접촉부 사이의 거리는 522 mm 로 하였다.

본 실험에 사용한 튜브와 스프링 시편은 모두 상용 경수로 핵연료에 사용되는 핵연료봉 피복관과 지지격자체로부터 절취한 것으로 지르코늄계 합금이다. 한편, 스프링 시편은 Fig. 4 에 개략을 나타낸 것과 같이 한쪽면은 튜브와 3 군데의 선접촉을 하고(스프링부), 그 반대편은 아래위 두군데에서(딤플부) 튜브와 선접촉을 하는 특징을 갖고 있다.

2.3 실험 방법

본 연구에서의 실험은 상온, 공기 중에서 수행하였으며, 이때 튜브집합체 시편의 중앙(즉, 중앙봉의 중앙)을 시험기의 구동장치에 연결하여 상하방향의 중앙변위범위를 먼저 0.2, 0.3, 0.4 mm 세 가지로 하여 30 Hz 로 가진하였고, 이때에는 Sensor Set #1 만을 설치하였다. 또한, 마멸 발생의 증가가 클 것으로 예상된 중앙변위 0.7 mm 의 시험을 추가로 수행하였으며, 이때에는 Sensor Set #1 뿐만 아니라 Sensor Set #2 도 같이 설치하여 횡방향의 변위도 함께 측정하였다.

실험에서 스프링 시편과 프레팅 튜브시편 사이의 접촉조건으로는 5 N 의 접촉하중이 있는 경우와 0.1 mm 의 틈새가 있는 경우의 두 가지 조건으로 실험을 행한 후 추가로 0.2 mm 를 반복 수행하였다.

3. 실험결과 및 토의

3.1 진동변위

Fig. 5 는 중앙부에서의 가진 변위(0.2, 0.3, 0.4 및 0.7 mm)와 접촉조건(접촉하중 5 N 및 틈새

0.1, 0.2 mm)의 변화에 따른 튜브 구조체의 진동 변위의 평균값을 나타낸 것이다. 우선 중앙부의 가진 변위가 증가할수록 각각의 경우에서의 변위도 증가함을 알 수 있으며, 중앙변위 0.4 mm 일 때 바깥쪽 센서에서 측정된 변위를 제외하고는 튜브와 스프링/딴플 사이에 틈새가 있을 때의 진동변위가 현저히 큰 것을 알 수 있다.

접촉하중이 있는 경우에는 안쪽 센서의 변위가 바깥쪽 센서의 변위보다 작다. 그러나 중앙변위가 0.3 mm 보다 클때, 틈새가 발생하면 이와 반대로 바깥쪽 센서의 변위가 안쪽 센서의 변위보다 커진다. 중앙변위 0.4 mm 에서 틈새가 존재할 경우의 변위가 접촉하중이 있을 때의 변위보다 오히려 작은 이유는 튜브집합체 시편이 가진 될 때 프레팅 튜브시편이 변형하였거나 회전중심의 위치가 다른 세 경우와 반대였던 것으로 설명된다.

한편, 중앙변위 0.2 mm 에서는 틈새가 존재하더라도 바깥쪽 센서에서 측정된 변위가 안쪽보다 큰데, 이것은 다른 경우(중앙변위 0.3~0.7 mm)와 달리 접촉력이 존재할 때와 비교하여 진동위상이 달라지지 않았기 때문이다. 튜브 진동시 위상의 변화에 대해서는 다음 절에 나타낸다.

또한, 접촉하중이 존재할 때와 틈새가 있을 때의 변위 차를 비교해보면 안쪽 센서의 변위 차가 바깥쪽의 그것보다 훨씬 크게 나타난 것을 알 수 있다. 중앙변위 0.7 mm 에서 튜브 구조체의 전후방향을 측정한 센서의 진동변위를 보면 상하방향의 진동거동형태와 유사한 경향으로서, 접촉하중이 있을때보다 틈새가 있을 때 진동변위가 크게 나타났다. 이러한 변위차가 발생한 것은 피복관의 진동 진폭이 가진방향에 대해 Out-of-Plane 으로서도 발생하기 시작한 것으로 알 수 있다.

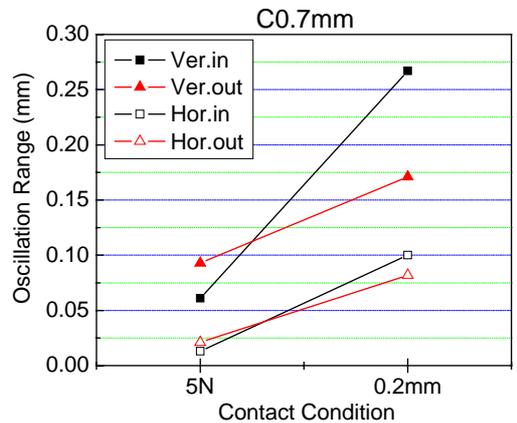
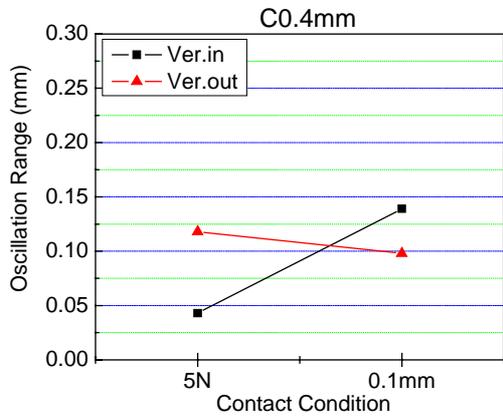
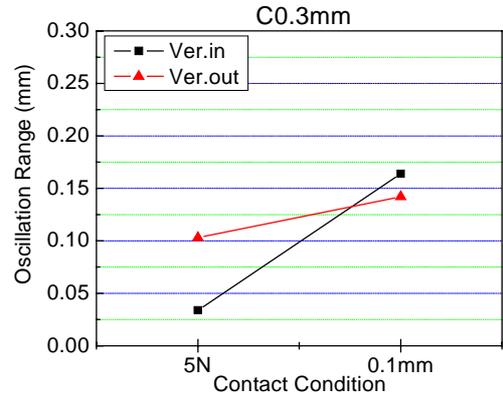
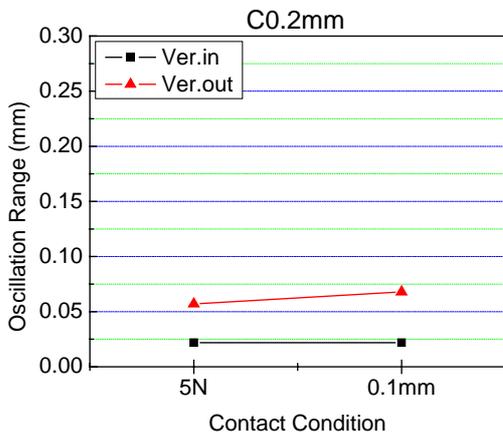


Fig. 5 Measured oscillation ranges (peak-to-valley) near contact region at various center oscillation ranges and contact conditions

3.2 튜브의 진동 위상

미끄럼 변위를 구하기 위해서는 프레팅튜브 시편의 진동 위상을 우선 파악하여야 하는데, Fig. 6 은 이를 위해 좌우측에 위치한 변위측정 센서 (Sensor Set #1 및 #2)로부터 실시간으로 기록된

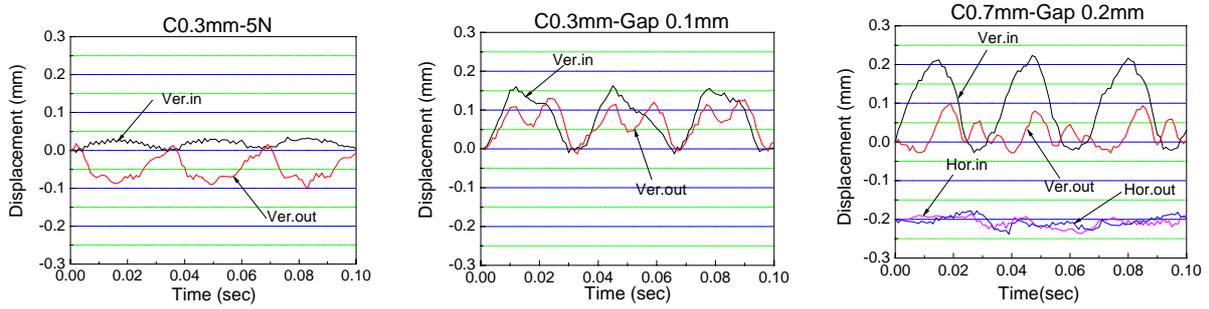


Fig. 6 Tube oscillation behavior near contact region relevant to various contact conditions.

프레팅튜브 시편의 특징적인 진동 거동을 두 가지 조건(중양변위 0.3, 0.7 mm)에서 나타낸 것이다.

Fig. 6 에서 알 수 있듯이 중양변위와 접촉조건에 따라 변위의 크기가 달라지고, 접촉력이 존재하는 경우에는 역위상(180°의 위상차)을 갖는 반면 틈새가 있는 경우에는 동위상을 갖는 즉, 지지조건에 따라 위상이 변화됨을 보였다. 한편, 전후방향(Sensor Set #2)에서 기록된 프레팅시편의 진동 거동은 변위 폭이 극히 작은 관계로 역위상인지 동위상인지 명확히 구분지을 수 없었다. 이로부터 튜브가 상하방향으로 진동할 때 전후방향으로는 임의적인 진동이 발생한 것을 알 수 있다.

4. 미끄럼변위 예측

4.1 축방향 미끄럼 변위 예측식

축방향 미끄럼 변위에 대한 계산 유도식에 관한 상세한 설명은 이미 발표[3]되었으므로 본 논문에는 결과식만 다시 나타내었다. (Fig. 7 참조)

모우드 I

$$S_{ax, I} = \frac{(l_1 + x)(1 - \cos \theta)}{\cos \theta} \quad (1)$$

여기서,

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

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

모우드 II

$$S_{ax, II} = \frac{l_2(1 - \cos \theta)}{\cos \theta} \quad (2)$$

여기서,

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

(l_2 : 회전중심으로부터 스프링 또는 덤플 위치까지의 거리)

4.2 횡방향 미끄럼 변위 예측식

중양봉이 상하방향으로 가진될 때, 프레팅 튜브시편과 스프링과의 접촉부에는 위치에 따라 축방향과 횡방향의 미끄럼이 나타나게 된다. 본 논문에서는 축방향과 횡방향의 미끄럼 변위 차이를 평가하고, 이로 인해 마멸 크기에는 어떠한 차이가 발생하는지 알아보려고 하였다.

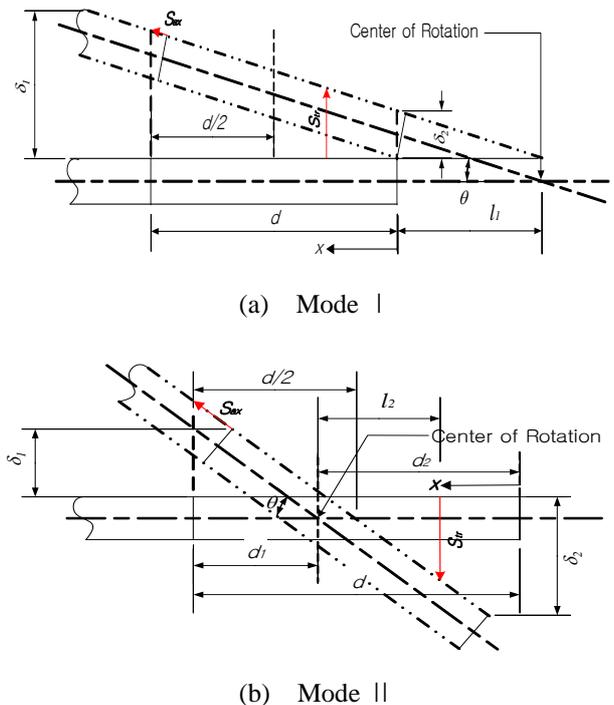


Fig. 7 Two possible modes during tube oscillation.

Table 1 Axial slip range ($\times 10^{-3} \mu\text{m}$)

Contact conditions	Loc.*	Center range			
		0.2 mm	0.3 mm	0.4 mm	0.7 mm
5 N	S	3.33	8.38	5.50	21.26
	D _L	3.78	20.05	7.86	33.74
	D _R	2.74	6.74	5.23	9.82
0.1 mm Gap	S	1.53	126.59	90.97	-
	D _L	3.35	139.22	104.82	-
	D _R	1.20	115.02	78.26	-
0.2 mm Gap	S	-	-	-	219.2
	D _L	-	-	-	334.6
	D _R	-	-	-	113.35

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

축방향에서와 마찬가지로 회전중심이 스프링/딴플 시편의 좌우측에 설치된 센서의 바깥에 위치하는 경우를 모우드 I 이라 하고, 내부에 위치하는 경우를 모우드 II 라한다.

Fig. 7 에서 d 는 센서 사이의 거리(55 mm)이고, δ_1 , δ_2 는 각각 핵연료봉 시편이 가진될 때 우측(중앙에서 먼쪽)과 좌측 센서로부터 기록된 값이다. 한편, x 는 센서의 중심으로부터 스프링 또는 딴플 위치까지의 거리를 나타내며, 각 위치에서의 진동 반주기 동안 횡방향의 미끄럼 변위를 s 라 표기하였다. 결과적으로 튜브집합체 시편의 진동 1 주기 동안 각 접촉부에서의 축방향 미끄럼 변위는 $2s$ 가 된다.

모우드 I 은 프레팅 튜브시편의 회전중심이 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 변위는 Fig. 7(a)에서 정의된 기하학적 조건으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$Str_{,I} = \frac{x(|\delta_1 - \delta_2|)}{d} + \delta_2 \quad (3)$$

한편, 모우드 II는 좌우측의 센서로부터 측정된 δ_1 과 δ_2 가 반대의 위상(즉, 위상차가 180°) 일 때에는 프레팅 튜브시편의 회전중심이 두 개의 측정 센서 사이에 있는 경우로서 Fig. 7(b)에서 정의된 기하학적 조건으로부터 미끄럼 변위 s 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$Str_{,II} = \frac{|(d_2 - x)\delta_2|}{d_2} \quad (4)$$

여기서,

Table 2 Transverse slip range (μm)

Contact conditions	Loc.*	Center range			
		0.2 mm	0.3 mm	0.4 mm	0.7 mm
5 N	S	42	37	84	47
	D _L	4	20	6	74
	D _R	42	90	156	22
0.1 mm Gap	S	17	275	189	-
	D _L	8	303	218	-
	D _R	40	250	162	-
0.2 mm Gap	S	-	-	-	158
	D _L	-	-	-	240
	D _R	-	-	-	82

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

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

4.3 미끄럼 변위의 계산

앞 절에서 설명한 축방향과 횡방향에서 모우드 변화에 따른 미끄럼 변위의 계산식을 이용한 결과값을 Table 1, 2에 나타내고 있다. 프레팅 튜브와 접촉하는 스프링 시편의 배열 상태는 Fig. 2(b)와 같고, 프레팅 튜브 시편의 오른쪽 센서의 중심으로부터의 거리(x)는 각각 13.82, 27.5, 2.42 mm 이다.

Table 1, 2에서 알 수 있듯이 스프링 위치에서의 변위는 스프링 좌우측 딴플에서 계산된 미끄럼 변위의 사이값을 가지게 되며, 중앙변위 0.2 mm(접촉력이 존재할 경우와 틈새가 존재할 경우 모두 동위상을 가짐)를 제외한 나머지에서는 스프링 또는 딴플과의 접촉조건에서 접촉력이 존재한 경우에 비해 틈새가 존재하는 경우의 축방향, 횡방향 미끄럼 변위가 현저히 크게 나타났다. 그러나 중앙변위가 증가함에 따라 접촉부의 진동폭이 증가하더라도 미끄럼 변위가 이에 따라 증가하지는 않는다는 것을 알 수 있다.

축방향과 횡방향의 미끄럼 변위값의 특징을 살펴보면 횡방향의 미끄럼 변위값이 축방향의 그것보다 작게는 약 720 배에서 크게는 약 33000 배의 값을 나타내는데, 이는 중앙봉을 상하방향으로 가진한 결과로 사료된다. 따라서 중앙봉을 상하방향이 아닌 전후방향으로 가진할 시 이와는 반대의 현상이 발생할 것으로 추정된다.

4.4 토의

Fig. 8에 중앙변위 0.7 mm, 미끄럼 반복수 10^6 회로 실험한 후 축방향과 횡방향 미끄럼에 의해 표면에 나타난 마멸의 형상과 마멸부피를 나타내었다.

미끄럼 변위의 특징과 유사하게 접촉력이 준

Table 3 Wear scar in the axial and transverse directions Length (mm), Volume ($\times 10^{-6} \text{mm}^3$)

Condition	Wear Scar on Tube			
	Axial		Transverse	
	dimple	spring	dimple	spring
5 N				
	X:0.43, y:0.92 (Vol: 87.18)	X:0.34, y:0.82 (Vol: 14)	X:0.71, y:1.18 (Vol: 904.13)	x:0.54, y:0.68 (Vol: 45)
0.2 mm Gap				
	X:0.6, y:3.26 (Vol: 993.53)	X:0.6, y:1.62 (Vol: 354.98)	X:1.29, y:4.74 (Vol: 22052.34)	X:0.65, y:1.24 (Vol: 598.24)

재하는 경우에 비해 틈새가 존재하는 경우의 마멸크기가 크고, 축방향보다 횡방향 부분에서 발생한 마멸이 더 큰 것을 분명히 알 수 있다.

특히, 접촉력이 존재할 때는 프레팅 튜브시편의 회전중심이 두 개의 측정 센서 사이에 있는 경우로서 마멸이 거의 한 점에서 발생하지만 틈새가 존재하면 튜브의 회전중심이 측정 센서의 외부에 있는 경우로서 접촉력이 있을때보다 움푹임이 현저히 커져 마멸의 폭과 길이가 훨씬 커지게 된 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 튜브와 지지격자 스프링의 접촉부에서 발생하는 마멸을 미끄럼 방향과 크기에 따라 상세히 분석하고자 접촉부에서의 미끄럼 변위를 예측할 수 있는 실험방법 및 예측식을 개발한 것으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 접촉조건에 따라 진동위상이 변하며 (역위상에서 동위상으로의 변화) 미끄럼 변위는 접촉력이 존재하는 경우에 비해 틈새가 존재하는 경우 훨씬 큰 값을 나타낸다.
- 2) 중앙봉을 상하방향으로 가진할 때 횡방향의 미끄럼 변위가 축방향의 미끄럼 변위보다 현저히 크며, 이에 따라 마멸도 횡방향 미끄럼에 의해 심하게 발생한다.
- 3) 틈새가 존재하면 미끄럼 뿐 아니라 충격에 의한 마멸도 발생할 것이므로 틈새조건에 의한 마멸

분석을 위해서는 마멸기구의 변화에 따른 고려가 필요하다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Hyung-Kyu Kim, Seon-Jae Kim, Heung-Seok Kang, Kee-Nam Song, 2001, Fretting wear of laterally supported tube, *Wear*, 250, pp. 535-543.
- (2) Hyung-Kyu Kim, Young-Ho Lee, Ju-Sun Song, 2003, Prediction of slip amplitude at the contacts in fuel rod fretting, *Proceedings of KNS 2003 Autumn Conference*
- (3) Hyung-Kyu Kim, Young-Ho Lee, Ju-Sun Song, 2003, Analysis of slip displacement and wear in oscillating tube supported by plate springs, *Proceedings of KSTLE 2003 Autumn Conference*, pp. 245-251.