

튜브 프레팅마멸 분석을 위한 미끄럼변위 해석방법 개선

송주선* · 김형규† · 이영호* · 김재훈**

Improvement of Slip Displacement Evaluation for the Analysis of Tube Fretting Wear

Ju-Sun Song, Hyung-Kyu Kim, Young-Ho Lee, Jae-Hoon Kim

Key Words : Tube fretting wear(튜브 프레팅마멸), Slip displacement(미끄럼변위), Vibration behavior(진동거동)

Abstract

Fundamentally, slip displacement should be known to solve the problem related to the fretting wear. For this, methods for measuring the slip displacement range in the contact surface of the tube and the supports were introduced and analyzed in this study. Also the increment of the slip displacement during a cycle was calculated using the revised formulas. As a result, the slip displacement newly evaluated was much higher (7~50 times) than that previously evaluated especially in the case of the gap existence. This enables to explain the severe wear found when there was a gap between the tube and the supports.

1. 서 론

원자로 내부의 핵연료, 제어봉 또는 원자로 외부의 증기발생기 전열관 등을 예로 들 수 있는 튜브구조물의 유체유발진동에 의한 프레팅마멸 손상을 분석하고 억제방안을 도출하기 위해서는 프레팅마멸에 영향을 미치는 인자들에 대한 상세한 분석이 필수적이다. 일반적으로 마멸을 발생시키는 역학적 인자는 접촉면에서의 수직 및 전단하중(응력)과 두 접촉물체의 상대적인 변위에 의해 나타나는 접촉면에서의 미끄럼변위이다.

그러나 이때의 하중 및 미끄럼변위는 접촉조건에 따라 매우 크게 변한다. 즉, 상기 예들의 마멸문제에서 일반적으로 나타나는 현상으로서, 접촉물체 사이에 간격이 발생하였을 경우, 하중은 주기 혹은 비주기성의 충격하중이 되며 튜브의 진동거동이 현저히 달라지는 데에 따라 미끄럼변위도 두 물체가 접촉을 유지하고 있을 때에

비해 매우 다른 거동을 보이게 된다.

따라서 가진되는 튜브구조물의 프레팅마멸 분석을 위해서는 접촉조건과 이에 따른 진동거동이 고려된 하중 및 미끄럼변위를 해석할 것이 요구된다. 물론 실제의 구조물에서 접촉조건이 한 가지로 고정되어 있다하더라도 전체의 가진시간 동안 일정한 진동거동을 나타내지는 않을 것이나 푸리에변환 등을 통하여 주된 주파수 영역을 파악하고 적어도 이 범위의 진동에 대한 접촉하중 및 미끄럼변위를 분석하는 것이 신뢰성을 높일 수 있을 것이다.

이를 위해 튜브 프레팅마멸에서 상대적으로 직접측정이 어려운 미끄럼변위의 계산방법 및 마멸량과의 관계를 다양한 접촉형상과 접촉조건을 이용한 실험을 수행하고 이론적으로 분석한 연구가 수행되고 있다[1-4]. 그러나 이들 연구에서는 실제의 튜브 진동거동을 상당히 단순화하였다. 특히 접촉부에 간격이 존재하고 있는 경우에 나타나는 진동 신호는 접촉하중이 존재하는 경우에 비해 상당히 불규칙하였으므로 이때 단순화한 신호를 이용한 미끄럼변위의 결과를 마멸의 분석에 적용하는 데에 어려운 점이 있었다.

본 연구는 이와 같은 앞선 연구에서의 문제점을 해결하기 위해 실제 실험에서 취득한 튜브의 진동신호를 상세히 분석하고 미끄럼변위를 보다 정확히 구할 수 있도록 기존의 방법을 개선한 것

† 한국원자력연구소

E-mail : hkkim1@kaeri.re.kr

TEL : (042)868-2529

FAX : (042)863-0565

* 한국원자력연구소

** 충남대학교 기계설계공학과

이다. 이를 통해 접촉부를 갖는 튜브가 진동할 때 접촉부에서 발생하는 마멸을 분석할 수 있는 더욱 신뢰성 있는 도구를 마련하게 되었다.

2. 실험

2.1 시험기

본 연구에 사용된 미끄럼/충격 프레팅 마멸시험기의 개략도가 Fig. 1에 나타나있다. 이 시험기의 가장 큰 특징은 회전속도를 가변 할 수 있는 서보모터와 편심 원통, 링크 및 지렛대기구를 이용하여 진동수, 진동변위를 조절하고 시편 사이의 접촉력 및 간격 등을 변화시킬 수 있도록 설계 되어 있다. 본 시험기에 대한 상세한 설명은 이미 발표되었으므로[1] 본 논문에서는 생략하였다.

본 연구의 목적인 튜브와 스프링 시편사이의 진동거동과 미끄럼 변위를 조사하기 위해 Fig. 2에 보여주는 것과 같이 서로 접촉하고 있는 스프링 및 튜브시편 좌우에 변위 센서를 각각 배열하였다. 이때 좌우의 센서는 스프링과 튜브시편의

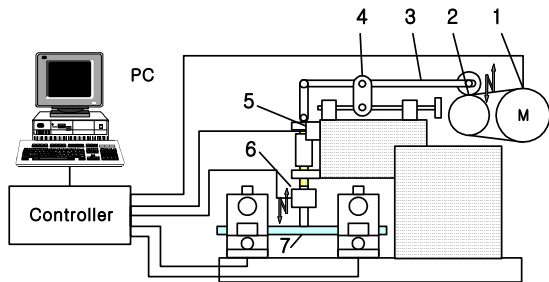


Fig. 1 Sliding/Impact Fretting Wear Tester; 1: Servo-Motor, 2: Eccentric Cylinder, 3: Lever, 4: Movable Hinge, 5: LVDT, 6: Load Cell, 7: Tube Specimen.

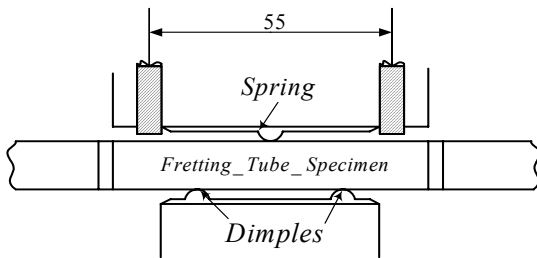


Fig. 2 Sensor configuration.

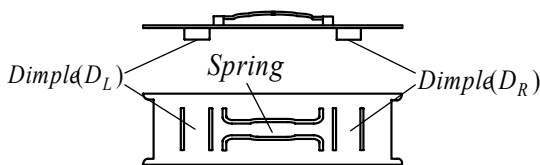


Fig. 3 Spring specimen.

접촉부로부터 거리가 일정(센서 중심사이의 거리가 55 mm)하도록 하였다. 또한, 각각의 센서는 튜브시편이 가진하는 방향과 동일한 상하방향의 진동을 측정할 수 있도록 하고, 튜브의 실제 진동현상을 파악하기 위해 실시간으로 데이터를 취득하였다.

2.2 시편 및 접촉부의 형상

본 실험에 사용된 튜브집합체 시편은 Fig. 2와 같다. 튜브의 바깥지름은 9.5 mm, 두께는 0.6 mm 이고, 중앙봉(center rod)의 길이는 467 mm 이며 중앙봉의 좌우에 프레팅 튜브시편(길이 55 mm)을 조립하고 다시 그 바깥쪽에 실제 사용되는 연료봉의 길이를 고려하여 추를 설치하였다. 스프링 시편은 프레팅 튜브시편에 접촉하게 되며 좌우 스프링의 접촉부 사이의 거리는 522 mm 로 하였다.

또한, 실험에 사용된 튜브와 스프링 시편은 모두 상용 경수로 핵연료에 사용되는 것으로 지르코늄계 합금이며, 핵연료봉 피복관과 지지격자체로부터 절취하였다. 한편, 스프링 시편은 Fig. 3에 나타낸 개략도와 같이 한쪽 면은 튜브와 3 군데의 선 접촉을 하고(스프링부), 그 반대편은 아래위 두 군데에서(딴플부) 튜브와 선 접촉을 하는 특징을 갖고 있다.

2.3 실험 방법

실험은 모두 상온, 공기 중에서 수행하였으며, 이때 튜브집합체 시편의 중앙(즉, 중앙봉의 중앙)부분을 시험기의 구동장치에 연결하고 중앙변위를 0.7 mm 로 하여 상하방향으로 30 Hz 의 속도(1800 rpm)로 가진하였다. 가진 주과수를 30 Hz 로 한 것은 해석에 의해 얻어진 핵연료봉의 1 차 공진주과수가 30 Hz 에 가깝기 때문이다.

실험에서 스프링 시편과 프레팅 튜브시편 사이의 접촉조건으로는 5 N 의 접촉하중이 있는 경우와 0.2 mm 의 틈새가 있는 경우의 두 가지 조건으로 실험을 수행하였다.

3. 개선된 미끄럼 변위 계산방법

3.1 튜브 진동의 모드 분류

튜브 진동시 접촉부에서의 거동을 Mode I 및 Mode II 로 분류하였다. 단 Fig. 4와 같이 프레팅 튜브 시편의 회전 중심이 좌우측 센서의 바깥쪽에 위치하는 경우를 Mode I 이라 하고 안쪽에 있는 경우를 Mode II 라 하였다.

여기서 δ_1 와 δ_2 는 좌우센서에 의해 취득된 정지해있던 봉으로부터 움직인 위치까지의 거리다. 그리고 x 는 센서 중심에서 스프링과

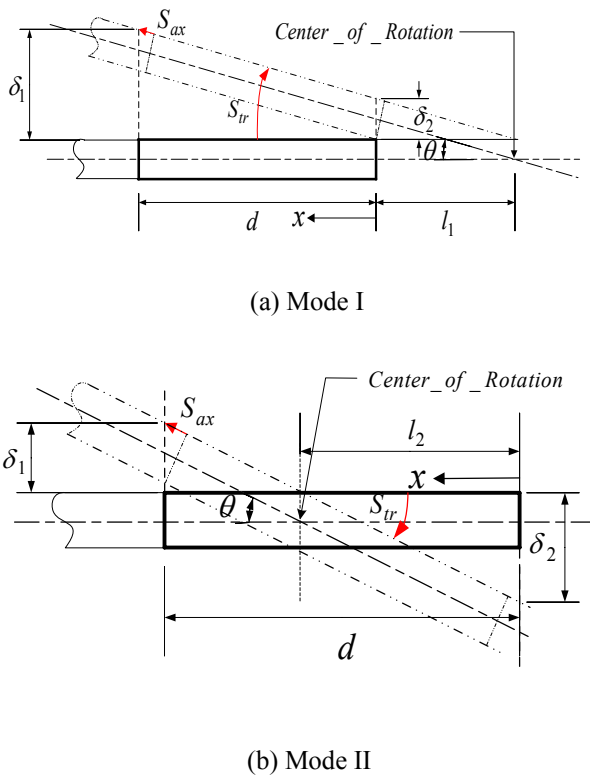


Fig. 4 Two possible modes during tube oscillation.

덤프위치까지의 거리이고, d 는 각 센서의 중심사이 거리이며 θ 는 이동각이다.

• Mode I

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

$$S_{tr}^I = (l_1 + x)\theta \quad (\text{단, 항상 } x > 0) \tag{2}$$

여기서, $l_1 = \frac{|\delta_2|}{\tan \theta} = \frac{|\delta_1|}{\tan \theta} - d$ 으로서 회전 중심과 센서 중심 사이의 거리이며 $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{|\delta_1 - \delta_2|}{d} \right)$ 이다.

• Mode II

$$S_{ax}^{II} = \frac{|x - l_2|(1 - \cos \theta)}{\cos \theta} \tag{3}$$

$$S_{tr}^{II} = |x - l_2|\theta \quad (\text{단, 항상 } x > 0) \tag{4}$$

여기서, $l_2 = \frac{d|\delta_2|}{|\delta_1| + |\delta_2|}$ 으로서 회전 중심과 센서 중심 사이의 거리이며 $\theta = \tan^{-1} \frac{|\delta_2|}{l_2}$ 이다.

Eqs. (1) - (4)에서 하첨자 ax 와 tr 은 각각 축방향 및 횡방향을 나타내고 I 과 II 는 각각 Mode I 과 Mode II 를 의미한다.

3.2 개선된 계산방법

기존에 소개되었던 미끄럼 변위 계산 방법은 튜브가 한 사이클 동안 움직인 거리에서 Mode I에서는 동위상을 Mode II에서는 역위상을 일정하게 보였다는 것을 가정하고 δ_1 과 δ_2 사이가 최대가 될 때 미끄럼 계산식에 적용해서 구한 값을 두 배한 것이었다. 그러나 좌우 센서에서 튜브의 진동현상을 실시간으로 취득한 일련의 데이터 값을 상세히 살펴보면 튜브와 스프링 사이에 틈새가 있는 경우에는 Fig. 5 와 같이 δ_1 과 δ_2 가 동위상을 보이며 변하지 않고 δ_1 은 거의 일정하게 30 Hz를 유지하는 반면에 δ_2 는 한 사이클 안에서 30 Hz 및 30 Hz 보다 큰 주파수의 진동을 보이며 Mode I와 Mode II가 동시에 존재하는 것을 알 수 있다.

이를 좀 더 자세히 관찰하기 위해 위 그래프 중 하나를 확대해 모우드가 변하는 구간별로 나누어 보면 Fig. 6 과 같다. 우선 이 그래프는 크게는 Mode I와 Mode II로 나눌 수 있다. 그러나 각각의 모우드에는 a, b, c 구간과 같이 모우드가 변하는 부분이 함께 포함되어 있다.

이처럼 튜브와 스프링 사이에 틈새가 존재할 시에는 튜브가 일정한 거동을 보이지 않고 임의대로 주파수 변화를 보이며 진동하는 것을 알 수

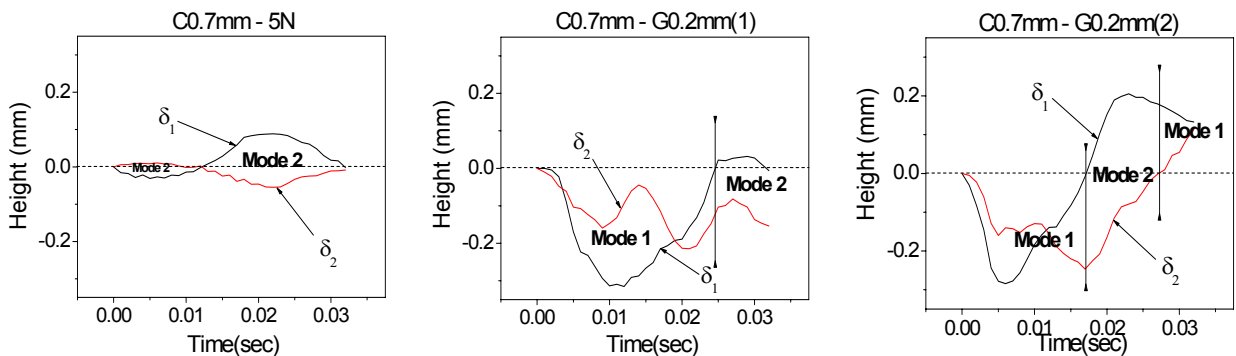


Fig. 5 Tube oscillation behavior near contact region relevant to various contact conditions.

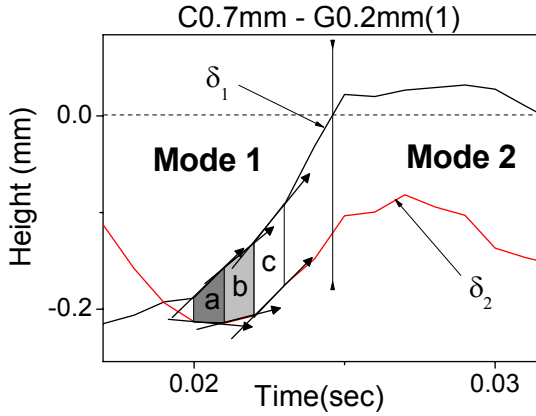


Fig. 6 Tube oscillation behavior(scale up)

있고 실제 원자로내의 유체유발진동에 의한 튜브의 진동은 훨씬 복잡하고 다양한 거동을 보일 거라 예상할 수 있다.

Fig. 6 에서 알 수 있듯이 한 번의 튜브 진동에 의해 사이클이 이루어진 것이 아니라 약 30여 개의 개별적인 데이터가 모여 한 사이클을 형성하였다. 따라서 미끄럼 변위를 구할 때 δ_1 과 δ_2 가 최대로 벌어졌을 경우만을 고려하여 미끄럼 변위를 구하기보다는 각 구간에서의 미끄럼 변위의 합이 더 타당한 결과값이라 생각된다.

먼저 임의의 구간 a에서 δ_1 과 δ_2 를 취득하고 아래의 1)에 해당하는 (5) 및 (6)식에 적용해서 변위 값을 구한다음 b, c구간에서도 마찬가지로 미끄럼 변위를 구하고 각각의 값을 더한다.

연속적인 튜브 진동에 있어 미끄럼 변위 값을 구하는 방법은 아래식과 같다. 미끄럼 변위를 구하는 식은 각각 Mode I 에서 Mode I 으로 변하는 경우와 Mode II 에서 Mode II 로 변하는 두 가지 식으로 분류하였다.

1) Mode I에서 Mode I으로 변하는 식은 Fig. 7 과 같이 θ_1 에서 θ_2 으로 변할 때 회전중심이 튜브 바깥쪽에 있는 경우를 말하는데 같은 회전축을 중심으로 회전한다고 가정한다.

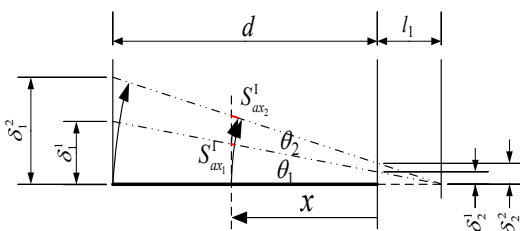


Fig. 7 Mode I → Mode I

θ_1 에서 θ_2 로 기울어졌을 때

$$S_{ax_1}^I + S_{ax_2}^I = \frac{(l_1 + x)(1 - \cos(\theta_1 + \theta_2))}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} \quad (5)$$

$$S_{ax_2}^I = \frac{(l_1 + x)(1 - \cos(\theta_1 + \theta_2))}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} - S_{ax_1}^I \quad (6)$$

$$\text{여기서, } \theta_2 = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{|\delta_1^2 - \delta_2^2|}{d} \right) - \theta_1$$

$$\left(\because (\theta_1 + \theta_2) = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{|\delta_1^2 - \delta_2^2|}{d} \right) \right)$$

2) Mode II에서 Mode II로 변하는 식은 Fig. 8 과 같이 θ_1 에서 θ_2 으로 변할 때 회전중심이 튜브 안쪽에 있는 경우를 말하는데 1)과 마찬가지로 같은 회전축을 중심으로 회전한다고 가정한다.

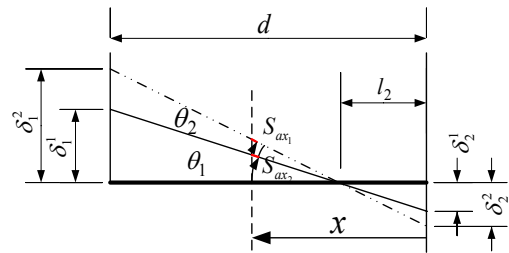


Fig. 8 Mode II → Mode II

$$(S_{ax_1} + S_{ax_2}) = \frac{|x - l_2|}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} - |x - l_2| = \frac{|x - l_2|}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} \{1 - \cos(\theta_1 + \theta_2)\}$$

$$\therefore S_{ax_2} = \frac{|x - l_2|}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} \{1 - \cos(\theta_1 + \theta_2)\} - \frac{|x - l_2|}{\cos(\theta_1)} (1 - \cos \theta_1) \quad (7)$$

$$S_{r_2} = (x - l_2)\theta_2 \quad (8)$$

where, $l_2 = \frac{d|\delta_2^2|}{|\delta_1^2| + |\delta_2^2|}$ (원래 Mode II 와 동일)

$$\theta_2 = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{|\delta_1^2|}{d - l_2} \right) - \theta_1$$

$$\left(\because \tan(\theta_1 + \theta_2) = \frac{|\delta_1^2|}{d - l_2} \right)$$

3.3 미끄럼 변위 계산을 위한 프로그램 개발

윗 절에서 설명한 각 구간(한 사이클에 약 30여 개의 데이터)에서 계산한 각각의 미끄럼 변위 증분을 계산하여 최종 미끄럼 거리를 구하는 프

Table 1. Axial slip range (μm)

	5N			0.2mm(1)			0.2mm(2)		
	Previous ^{a)}	present ^{b)}	b)/a)	Previous ^{a)}	present ^{b)}	b)/a)	Previous ^{a)}	present ^{b)}	b)/a)
S	0.04	0.28	7	0.37	9.49	25.6	0.8	5.9	7.4
D _L	0.14	0.77	5.5	0.51	10	19.6	0.94	7.9	8.4
D _R	0.05	0.17	3.4	0.23	8.92	38.8	0.67	6.17	9.2

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

Table 2. Transverse slip range (mm)

	5N			0.2mm(1)			0.2mm(2)		
	Previous ^{a)}	present ^{b)}	b)/a)	Previous ^{a)}	present ^{b)}	b)/a)	Previous ^{a)}	present ^{b)}	b)/a)
S	0.03	0.06	2	0.17	6.11	35.9	0.37	4.66	12.6
D _L	0.11	0.15	1.4	0.23	6.76	29.4	0.43	5.18	12
D _R	0.04	0.05	1.3	0.11	5.51	50.1	0.31	4.24	13.7

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

로그를 작성하였다. 이를 통해 계산 시간의 단축과 오류를 방지하도록 하였다. 프로그램은 Fig. 9 와 같이 flow chart 를 구성하고 상용 프로그램 (MATLAB V6.5[5])을 이용하여 작성하였다.

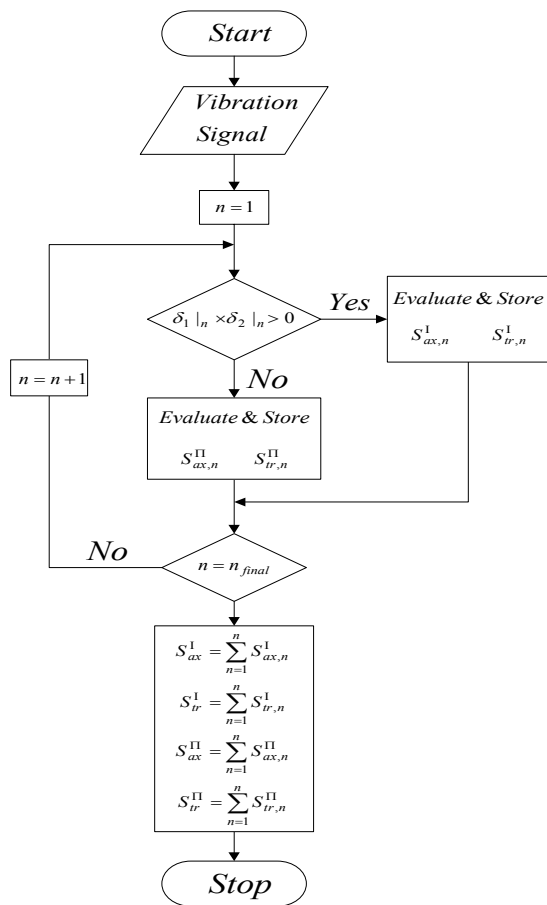


Fig. 9 Flow chart for slip distance evaluation.

프로그램에서는 Fig. 9 에서의 δ_1 과 δ_2 의 곱이 양의 부호(+)일 경우 Mode I을 적용하게 되고, δ_1 과 δ_2 의 곱이 음의 부호(-)일 경우 Mode II 를 적용하게 된다. 이런 방법으로 Mode I과 Mode II 에서 구해진 각 구간별의 합은 다시 하나의 합으로 구해진다.

3.4 미끄럼 변위의 계산

앞 절에서 논의된 새롭게 개발한 미끄럼 계산 식(5)-(8)과 기존의 계산식(1)-(4)에 의해 구해진 축방향과 횡방향에서의 미끄럼 변위 값이 Table1 및 2 에 나타나 있다.

우선 축방향과 횡방향에서 모두 미끄럼 변위가 증가한 것을 알 수 있다. 특히, 튜브와 스프링 사이에 접촉력이 있는 경우에는 Fig. 5 에서 알 수 있듯이 거의 일정하게 역위상을 나타낸 결과 미끄럼 변위 값이 비슷하게 나타나지만, 접촉부에 틈새가 발생하게 되면 주파수 변화가 생기고 튜브의 밀고 당기는 운동에 의해 미끄럼 변위 값이 접촉력이 존재할 때보다 현저하게 크게 발생한다. 특히 기존의 방법과 개선된 계산 방법을 비교했을 때 틈새조건에서의 미끄럼 변위 증가가 현저히 증가함을 알 수 있어 틈새조건에서 마멸량이 상당히 증가한 원인에 대해 설명할 수 있다.

또한, 기존에 발표된 논문[2-4]를 보면 윗 절의 미끄럼 계산식에 의해 얻어진 미끄럼 변위는 Mode I 일 때, 즉 역위상보다는 동위상에서 미끄럼 변위 값이 현저히 크게 나타났다. 따라서 Fig. 5 에 나타나듯이 Mode I 에서 Mode I 로 변하는 구간이 0.2 mm(2)보다 상대적으로 많이 발생할 0.2 mm(1)에서 미끄럼 변위가 크게 나타남을 Table 1 및 2 에서 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 튜브와 이를 지지하는 접촉부에서 발생하는 프레팅마멸을 분석하기 위하여 접촉부에서의 미끄럼 변위를 구하는 방법을 제안한 것으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 진동하는 튜브와 이를 지지하는 격자체 사이에서의 미끄럼 변위를 기존의 방법에 비해 더욱 정확히 계산하여 마멸을 분석하기 위한 수식을 개발하고 계산을 수행할 수 있는 프로그램을 구성하였다.
- 2) 튜브와 이를 지지하는 접촉부에 틈새가 존재하는 경우에는 튜브가 단순히 동위상의 거동을 보이지 않고, 가진 주파수 외의 여러 주파수가 나타나며 이로부터 실제 원자로 내에서 유체유동에 의한 튜브의 진동거동은 매우 다양한 주파수 및 모드의 변화가 존재할 것임을 예상할 수 있다.
- 3) 새롭게 개발한 계산식에 의해 미끄럼 변위를 계산한 결과, 특히 접촉부에 틈새가 존재할 경우, 기존의 방법에서 보다 현저히 크게 나타났다. 이로부터 접촉부에 틈새가 있을 경우 발생하는 마멸량의 상당한 증가를 설명할 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Kim, H. K., Yoon, K. H., Kang, H. S., Song, K. N., 2001, "Development of Fuel Rod Fretting Wear Tester," *Proc. of KSTLE*, Nov. pp. 245~251.
- (2) Kim, H. K., Lee, Y. H., Song, J. S., 2003, "Prediction of slip amplitude at the contacts in fuel rod fretting," *Proc. of KNS*, Oct. Vol. 2, Div. 7.
- (3) Song, J. S., Kim, H. K., Lee, Y. H., 2004, "Analysis of Axial and Transverse Slip Displacements during the Oscillation of a Supported Tube," *Proc. of KSME*, Apr. pp. 950~955.
- (4) Song, J. S., Kim, H. K., Lee, Y. H., 2004, "Experimental Analysis of the Relationship between Slip Displacement and Wear in Fuel Rod Fretting," *Proc. of KNS*, May Vol. 1, Div. 7.
- (5) Pärt-Enander, E., Sjöberg, A., Melin, B.,

Isaksson, P., 1996, *The MATLAB Handbook*, Addison-Wesley, UK.