

핵연료봉재의 프레팅 마멸 특성

Fretting Wear Characteristics of Nuclear Fuel Rod Material

김 태 형*, 조 광 회**, 김 석 삼***

* 경북대학교 대학원 기계공학과

** 한국원자력 연구소

*** 경북대학교 기계공학과

(Abstract) The fretting wear characteristics for Zircaloy-4 tube used as fuel rod in the nuclear power plant have been investigated. The fretting wear tester was designed and manufactured for this experiment. This study was focused on main factors of fretting wear, cycle, slip amplitude and normal load. The worn surfaces were observed by SEM.

Key Words : Fretting(프레팅), Nuclear fuel rod material(핵연료봉재), Critical slip amplitude(임계 미끄럼 거리), Stick-slip region(고착-미끄럼 영역)

1. 서 론

일반적으로 fretting은 수백 μm 이내의 미소한 거리를 상대운동하는 재료들의 접촉계면에서의 표면손상을 말한다.⁽¹⁾ 그런데, fretting이 발생하는 거의 모든 상황은 설계시에는 예상하지 못한 우발적인 미세진동이나 응력변동에 의한 것이므로 이러한 손상이 반복되어 치명적인 결과를 초래할 수 있다.

그러나, fretting 현상은 상대적으로 엄청나게 작은 접촉면적 및 미끄럼 거리에서 여러 가지 마멸 기구들의 복합적인 작용으로 발생하기 때문에 해석하기가 매우 어렵다.⁽²⁾

에너지의 고효율화와 안정적 공급을 위해 시도되었던 원자력 발전소 내에서 1970년대로 접어들면서 많은 문제점들이 발생하기 시작하였는데, 그 중 하나의 큰 과제가 fretting현상이었다. 원자력 발전소의 원자로 및 열교환기 내에서 고온·고압의 유체의 흐름으로 말미암아 설계시에는 예상하지 못한 진동이 tube system에 발생하고 그러한 진동으로 인해 fretting으로 인한 손상이 관측되었다. 여기에 대해서는 현재까지도 일반적인 해결책

을 찾기 위한 많은 연구가 집중되고 있다.

Ko 등은 대부분 열교환기로 구성된 원자력 발전소에서 고온·고압의 유체의 흐름으로 인한 fretting 현상을 충격력의 영향까지를 포함한 다양한 실험조건상태로 모델링하여 많은 연구결과를 보고하였다.^(3, 5)

일본에서도 1970년대말부터 fretting에 대한 연구가 고조되어 여러가지 환경하에서 많은 재질들에 대해 fretting연구가 활발히 진행 중인데 그 대표적인 예로서 Iwabuchi^(6, 8)는 상온 및 고온, 대기압 및 진공, 공기 및 해수 등 여러환경을 변화시키면서 많은 연구결과들을 제시하였다.

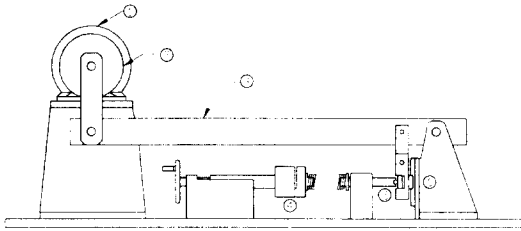
많은 연구에도 불구하고 수명예측 및 파손 방지를 위한 일반적인 방법은 여전히 제시되지 못한 상태에 있으며 국내에서는 fretting에 관한 연구가 거의 없는 상태이다.

따라서, 본 연구에서는 경수로형 원자력 발전소의 핵연료봉과 동일한 Zircaloy-4 tube⁽⁹⁾를 이용하여 fretting에 가장 주된 인자로 작용하는 하중, 미끄럼 거리 및 왕복수의 영향에 대해 fretting마찰·마멸실험을 수행하여 각 인자들의 변화에 따른 천이현상에 주목하여 천이시점을 찾아내고자 한다

2. 실험

2.1 실험 장치

본 실험에서 사용된 fretting 마멸시험기는 자체 설계제작된 것으로 모터에 부착된 편심조정plate에 의해 편심량을 조정하고 지렛대의 원리를 이용하여 편심량을 10:1로 감소시켜 실험에 필요한 미끄럼 거리를 얻을 수 있도록 되어있다.



- ①Motor ②Eccentric plate ③Vibrating beam
④Load cell ⑤Specimens ⑥LM guide

Fig. 1 Schematic diagram of fretting wear tester

2.2 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 현재 경수로형 원자로의 핵연료봉재로 사용되는 Zircaloy-4 tube로서 화학적 조성 및 기계적 성질은 Table 1과 같으며 Fig. 2에서 나타난 형상으로 실험을 수행하였다.



Fig. 2 Crossed cylinder arrangement of test specimens

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of specimen(Zircaloy-4 tube)

Chemical element	Sn	Fe	Cr	C	O	Zr
composition (wt%)	1.25	0.21	0.11	0.0153	0.0134	balance
Mechanical properties					Room temperature	399℃
	UTS, MPa		696		365	
	0.2%YS, MPa		517		296	
	Elong, 5.00cm		24		32	

2.3 실험 방법

본 실험은 초음파세척→건조→마찰·마멸실험→초음파세척→건조→현미경 관찰→마멸면의 단면 곡선 측정→마멸량 계산 순으로 실시하였다.

왕복수, 미끄럼 거리 및 하중 등의 인자들이 fretting마멸에 미치는 영향을 조사하기 위해 미끄럼 거리는 40, 70, 100, 200, 300, 400 μ m의 6단계, 하중은 20, 40, 60, 80, 100N의 5단계로 구분하여 왕복수 10^5 , 3×10^5 , 5×10^5 cycle에 대해서 각각 조합하여 실험을 수행하였다.

마멸량의 측정은 구해진 단면곡선을 구의 일부로 가정하여 Fig. 3의 모델링을 이용하여 다음 식에 의해서 계산하였다.

$$V = \int_{R-h}^R \pi y^2 dx = \int_{R-h}^R \pi (R^2 - x^2) dx$$

$$\text{여기서, } R^2 = a^2 + (R-h)^2$$

또, 비마멸량을 구하기 위해서 다음 식을 이용하였다.

$$v = V / (WL) = V / (2W Sn) \quad \text{mm}^3/\text{Nm}$$

여기서, W : 수직하중 (N)

L : 전 미끄럼 거리 (m)

S : 미끄럼 거리 (m)

n : 왕복수 (cycles)

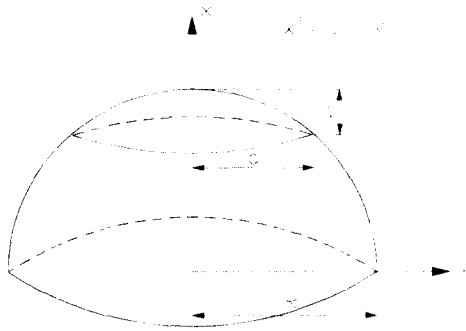


Fig. 3 Wear scar shape assumed as a part of sphere

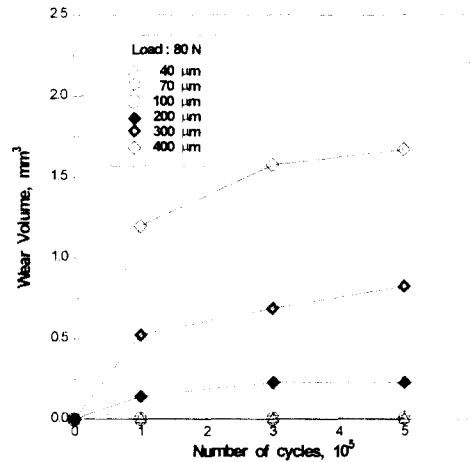


Fig. 4 Wear volume as a function of number of cycles at 80N

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 왕복수 증가에 대한 마멸량의 변화

Fig. 4는 하중 80N에서의 왕복수에 대한 마멸량의 변화를 각각의 미끄럼 거리에 대하여 나타낸 것이다.

Fig. 4에서는 미끄럼 거리가 커짐에 따라 마멸량이 증가하고 있는 것을 보여주고 있는데, 이러한 현상은 왕복수 증가에 따른 전체 미끄럼 거리의 증가로 인하여 마멸량이 커지는 것으로 생각된다.

실험 초기에서부터 10⁵사이클까지의 마멸량의 변화가 10⁵사이클에서부터 3×10⁵사이클까지의 마멸량의 변화 및 3×10⁵사이클에서부터 5×10⁵ 사이클까지의 마멸량의 변화보다 훨씬 급격하게 일어나고 있다. 이것은 초기 시편들의 접촉형태가 이론적으로 점접촉으로부터 시작하여 마멸 진행에 따라 점접촉면적의 증가로 인해 접촉 압력이 감소하여 발생하는 것으로 생각된다.

3.2 미끄럼 거리 증가에 대한 마멸량의 변화

Fig. 5는 미끄럼 거리에 대한 마멸량의 변화를 각각의 하중에 대해 나타낸 것이다. 주어진 왕복수에서 하중에 따라 마멸량이 급격하게 증가하고

있으나, 100μm미만의 미끄럼 거리에서는 마멸량 차이가 거의 나지 않는다는 것을 알 수 있다. 이것은 미끄럼 거리가 어느 정도 이상의 크기가 되어야지만 마멸량의 변화가 급격해 질 수 있다는 것을 보여주고 있다. 이렇게 천이를 나타내는 미끄럼 거리를 임계 미끄럼 거리(critical slip amplitude)라고 정의하였다.

Fig.6에서와 같이 미끄럼 거리가 100μm미만의 마멸면에서는 중심부에서 거의 손상이 없고 링(ring)형태로 마멸이 진행되는 고착-미끄럼 영역(stick-slip region)이 존재하는 것을 관찰할 수 있었다. 이러한 현상에 기인하여 미끄럼 거리 100 μm이하에서 마멸량은 굉장히 작게 되며 각 하중에 따라서도 거의 차이가 나지 않는 것으로 생각된다.

3.3 비마멸율에 대한 고찰

미끄럼 거리가 100μm이하인 영역에서는 비마멸율이 매우 작아서 서로 구분하기가 어려우나, 미끄럼 거리가 커짐에 따라 비마멸율이 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 급격한 증가가 시작되는 미끄럼 거리는 임계 미끄럼 거리와 거의 일치하고 있다.

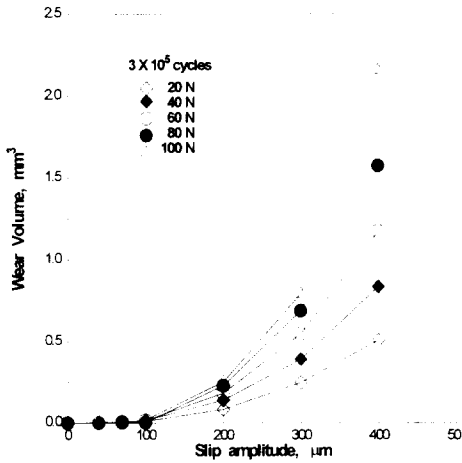


Fig. 5 Wear volume as a function of slip amplitude at 3×10^5

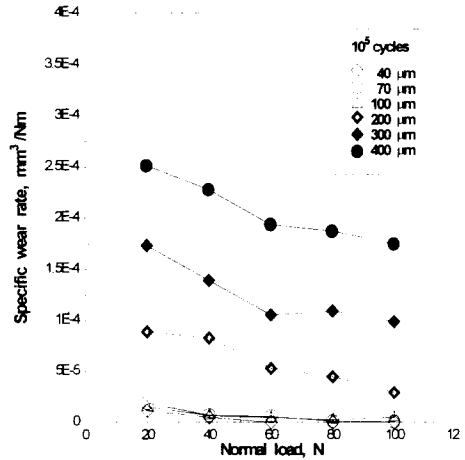


Fig. 7 Specific wear rate as a function of normal load at 10^5 cycles

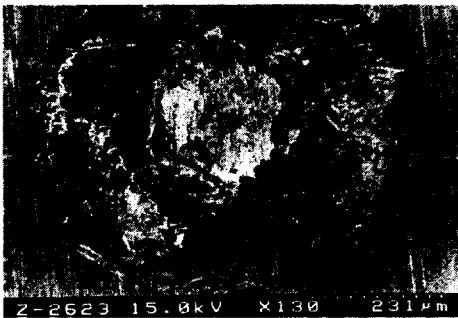


Fig. 6 SEM photograph showing stick-slip ($70 \mu\text{m}$, 80N , 3×10^5 cycles)

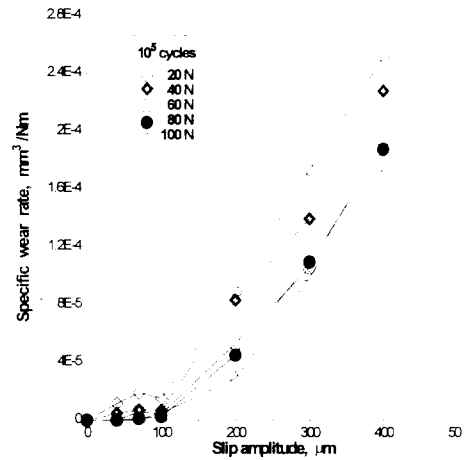


Fig. 8 Specific wear rate as a function of slip amplitude at 10^5 cycles

3.4 미시적 관찰

Fig. 9와 Fig. 10은 접촉부와 비접촉부의 경계 지점에 발생한 균열을 비교한 것이다.

Fig. 9에서는 Fig. 10에서보다 상대적으로 균열이 적은 깨끗한 경계선을 볼 수 있으나, 왕복수가

증가함에 따라서 깊고 긴 균열을 경계부에 형성함을 알 수 있다.

이러한 현상은 왕복수의 증가에 따른 마멸량의 증가로 인한 경계지점에서의 압력이 증가하여 발생하는 것으로 생각된다.

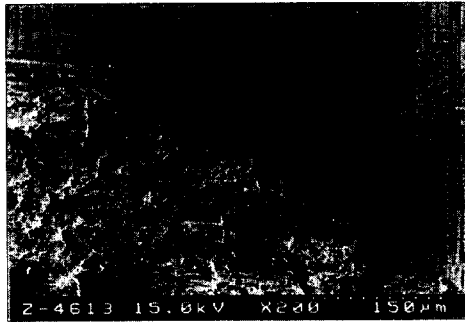


Fig. 9 SEM photograph showing boundary crack (200 μ m, 80N, 3×10^5 cycles)



Fig. 10 SEM photograph showing boundary crack (200 μ m, 100N, 5×10^5 cycles)

4. 결 론

본 연구에서 핵연료봉재의 fretting 마멸특성을 평가하기 위해 Zircaloy-4 tube를 사용하여 fretting 마멸실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 왕복수가 증가함에 따라 전체 미끄럼 거리의 증가로 마멸량이 급격하게 증가하였다.
- (2) 접촉면적의 증가로 인한 접촉압력의 감소로 10^5 사이클 이상에서는 마멸량의 변화가 완만해졌다.
- (3) 마멸량을 급격하게 증가시키는 임계 미끄럼 거리(critical slip amplitude)가 존재함이 확인되었다. 본 실험에서의 임계 미끄럼 거리는 약 100 μ m였다.
- (4) 고찰-미끄럼 영역(stick-slip region)의 존재로 마멸량이 급격하게 감소하는 천이점이 발생하였다.
- (5) 접촉면과 비접촉면의 경계지점에서 왕복수의 증가로 말미암은 균열이 발생하였다.

< 참 고 문 헌 >

1. OECD, Glossary of Terms and Definitions in the Field of Friction, Wear, and Lubrication, OECD Publications, Paris, 1969.
2. 岩淵 明, フレッチング摩耗の特異性について,

トライボロジスト, 35, 6, pp.386-391, 1990.

3. P. L. Ko and H. Basista, Correlation of Support Impact Force and Fretting Wear for a Heat Exchanger Tube, J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 106, 1984.
4. P. L. Ko, J. H. Tromp and M. K. Weckwerth, Heat Exchanger Tube Fretting Wear : Correlation of Tube Motion and Wear, ASTM STP, 1982.
5. P. L. Ko, Heat Exchanger Tube Fretting Wear : Review and Application to Design, Journal of Tribology, 107, 1985.
6. 岩淵 明, 萱場孝雄, フレッチング摩耗におよぼす振幅と荷重の影響, 日本機械學會論文集, pp.692-700, 1981.
7. A. Iwabuchi, K. Kato and T. Kayaba, Fretting Properties of SUS304 Stainless Steel In a Vacuum Environment, Wear, 110, pp. 205-216, 1986.
8. 萱場孝雄, 岩淵 明, フレッチング摩耗におよぼす温度の影響, 日本潤滑學會誌, Vol.27, No.1, pp.31-38, 1982.
9. P. L. Ko, Wear of Zirconium Alloys due to Fretting and Periodic Impacting, Wear of Materials, pp.388-395, 1975.