

고온고압 미끄럼/충격조건에서 마멸평가 변수 연구

이영호*, 송주선, 김형규, 정연호(한국원자력연구소)

A Study on the Evaluation Parameter of Sliding/Impact Wear in a High Temperature and Pressure Water Condition

Young-Ho Lee*, Ju-Sun Song, Hyung-Kyu Kim, Youn-Ho Jung
(Korea Atomic Energy Research Institute) ex-leevh@kaeri.re.kr

ABSTRACT

The impact/sliding wear tests have been performed in high temperature high pressure water in order to evaluate the effect of spring shape on the wear behavior of a spring supported tube for nuclear fuel fretting study. The results indicate that the tube wear volume and the size of the wear scar are closely related to each spring shape. From the analysis of the wear scar, it is possible to extract the real worn area (A_w) from the size of the wear scar (A_t). In addition, we found that the wear volume has a linear relation with the real worn area rather than the size of wear scar and this was only determined by each spring shape in the high temperature and pressure water condition. From the above results, it is possible to evaluate the wear resistant spring using the correlation between the variation of the real worn area and the wear behavior at each spring.

Keywords : Impact/sliding wear, nuclear fuel rod, worn area, high temperature and pressure water, spring shape

1. 서론

최근 빈번히 발생하는 원자력발전소의 마멸현상에 대한 연구가 여러 기관에서 활발히 진행중에 있으며, 마멸로 인해 문제를 경험한 대표적인 원전 구조물로 증기발생기 전열관, 핵연료봉 및 노심 제어봉 등이 있다. 이러한 마멸현상은 그 원인이 유체유발 진동(Flow-Induced Vibration, FIV)이라는 공통점을 가지고 있으나 실제 현상에서 각 구조물간의 진동형태, 접촉 및 마멸기구에 대한 정확한 관찰은 고온고압조건이라는 특수한 상황 때문에 직접적으로 수행하기가 매우 어렵다. 이에 따라 각 구조물의 접촉부를 모사한 실험을 수행하고 결과로 나타난 마멸량을 기존의 일반적인 마멸모델로 적용하여 가동중 발생가능한 마멸량을 추정하여 다음 주기까지의 안전성을 평가하는 수단으로 사용하고 있다.

이에 따라 개발된 모델이 최근 널리 사용되고 있는 Work-rate 모델이며 간략하게 접촉면에서 소모된 에너지에 따른 마멸량의 비로 정의할 수 있다. 그러나 마멸현상의 복잡성 및 다양성을 고려해 볼 때 이 모델

을 사용하여 산출한 마멸계수 K 값이 실험을 수행한 연구자별로 매우 큰 편차를 보일 것으로 쉽게 예상할 수 있다. 접촉면에서 소모된 에너지는 접촉하중 및 미끄럼 변위 혹은 거리의 곱으로 표현이 가능하다. 이에 따라 소모된 에너지가 증가할수록 마멸량을 증가하게 되고 이 두 값 사이의 기울기를 마멸계수 K 로 정의하여 내마멸성을 평가하는 기준으로 나타내고 있다. 그러나 이 모델을 이용하여 계산한 마멸계수 K 는 일정한 값을 갖지 않으며 실험조건에 따라 매우 민감하게 변할수 있음을 확인하였다[1]. 특히 일정한 하중하에서 미끄럼 진폭이 증가함에 따라 마멸량의 증가거동이 선형적이지 못하며 특정 미끄럼 진폭이하에서는 마멸이 거의 발생하지 않은 임계진폭이 존재함을 확인하였다. 또한 하중이 증가할수록 Stick-slip 현상이 발생하여 오히려 마멸이 감소하는 경향이 나타났다. 이에 따라 내마멸성을 평가할수 있는 새로운 변수가 필요하며 본 연구에서는 이에 대한 기초연구로서 접촉면에서 형성된 마멸면을 분석하고 제안한 내마멸성 평가변수의 적용 가능성을 판단하고자 한다.

2. 실험관련

2.1 시편 및 실험장치

본 실험에 사용된 핵연료 피복관 재료는 현재 상용으로 사용되는 Zirlo 를 사용하였으며 마멸실험을 위하여 50 mm 의 길이로 가공하여 실험에 적용하였다. 마멸실험에 사용된 네가지 형상의 스프링 시편에 대한 개략적인 설명과 모습을 Table 1 및 Fig. 1 에 나타내었다. 충격/미끄럼 마멸시험에 사용된 장치는 본 실험실에서 자체 제작한 고온고압 마멸시험기(Fig. 2)를 사용하였으며 장치에 대한 설명은 기존의 문헌에 자세히 설명되어 있다[2].

Table 1 Spring characteristics

	Axial	Trans.	Contact shape
Type A	Convex	Convex	1 point
Type B	Chamfered	Concave	Round
Type C	Chamfered	Concave	Flat
Type D	Convex	Convex	3points

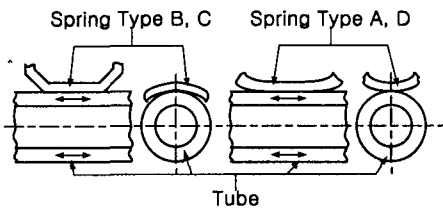


Fig. 1 Contact shape for each spring.

2.2 시험조건

본 실험에서는 30 Hz 의 충격하중 주파수를 이용하여 15~30 μm 의 미끄럼 진폭에서 충격/미끄럼 마멸시험을 수행하였다. 실험은 고온고압(300 $^{\circ}\text{C}$, ~88 kgf/cm^2) 물속에서 증류수를 사용하였으며 10 만 사이클 동안 수행하였다. 최대 충격하중은 10 ± 2 N 을 적용하여 하중의 영향을 배제하였고 충

격축의 왕복이송거리는 $100 \pm 20 \mu\text{m}$ 로 유지하였다. 각 실험조건에서 3 회 반복시험을 수행하여 다음과 같이 기존의 Work-rate 모델[3]에 적용하여 마멸계수를 산출하였다.

$$\dot{V} = K\dot{W} \quad (1)$$

여기서 \dot{V} 는 wear-rate, \dot{W} 는 work-rate 을 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{W} = 1/t \square FdS \quad (2)$$

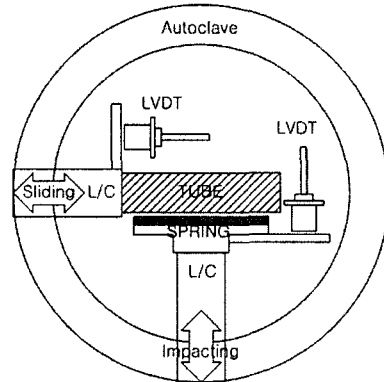


Fig. 2 Configuration of specimens.

2.3 손상면 관찰 및 부피측정

실험을 수행한 후 마멸면의 크기와 마멸의 경향을 확인하기 위하여 광학현미경을 이용하여 크기를 측정하였으며 마멸면에서의 입자의 분포를 확인하였다. 이러한 정보를 이용하여 실제 마멸면의 크기를 계산하였다. 또한 2 차원 표면조도계를 이용하여 마멸면에 대한 깊이를 산출하였으며 결과를 3 차원으로 배열하여 마멸부피, 최대깊이 및 돌출부 높이 등을 산출하여 각 실험조건에서의 마멸정도를 상호 비교하였다.

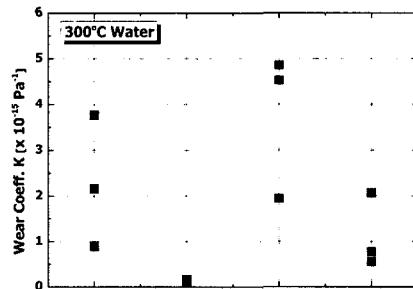


Fig. 3 Variation of wear coefficient K that calculated from the wear test results.

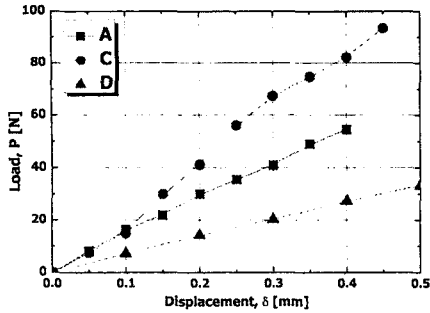


Fig. 4 Variation of load-displacement curve in room temperature water.

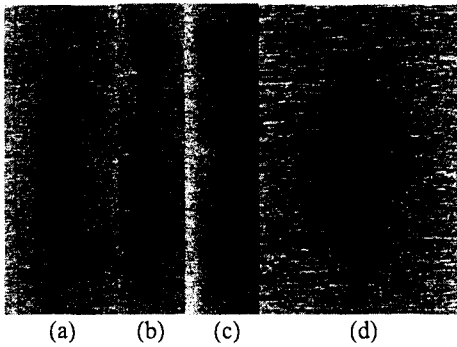


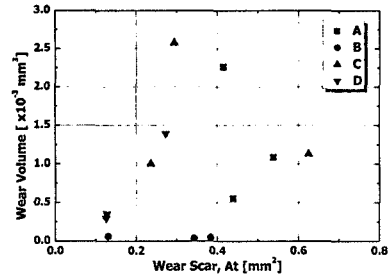
Fig. 5 Results of wear scar observation using optical microscopy.

3. 결과 및 고찰

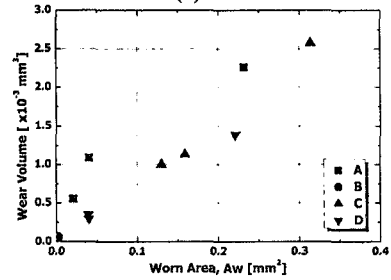
3.1 마멸계수 비교

식 (1) 및 (2)에 나타난 Work-rate 모델을 사용하여 마멸계수 K 를 구한 결과를 Fig. 3 에 나타내었다. 여기서 가장 큰 마멸계수값을 보이는 조건은 C 스프링 조건이며 B 스프링 조건에서 가장 낮은 값을 보였다. 이러한 결과는 스프링 형상에 따라 충격하중이 작용할 때의 스프링 거동의 차이로 판단된다.

Fig. 4 에 상온 물속에서 수행한 각 스프링의 하중-변위 곡선을 나타내었다. 여기서 곡선의 기울기는 스프링의 강성(Stiffness)을 나타내고 있으며 스프링 강성과 마멸계수 K 값이 서로 유사한 경향을 가지는 것을 확인할 수 있다. 결국 충격하중이 작용하는 순간에 미끄럼 변위가 동시에 작용하게 되면, 온도의 영향으로 인해 감소한 스프링 강성이 실제 접촉면에서의 상대미끄럼 진폭에 영향을 미치게 된다는 것을 알 수 있다. 이것은 특히 강성이 낮을수록 충격마멸에서의 마멸량이 감소하는데에 영향을 미치는 것으로 생각된다.



(a) At



(b) Aw

Fig. 6 Variation of wear volume with increasing At and Aw.

그러나 본 실험결과에서 나타난 마멸계수 K 값은 스프링 형상의 영향을 고려하지 못하므로 단순한 K 값의 비교만으로 내마멸성을 가지는 스프링 형상을 도출하기에는 다소 부족한 점이 있다. 이에 따라 내마멸성을 평가하기 위하여 마멸기구를 포함한 새로운 변수를 도출할 필요가 있다.

3.2 마멸면 분석

마멸실험을 수행한 후 마멸면을 관찰하여 스프링 형상에 따른 마멸면의 차이를 Fig. 5 에 나타내었다. 상온 물속에서 수행한 결과와 동일하게 B 및 C 스프링의 경우 상하 끝단에서 마멸이 시작되어 내부로 진행되는 반면 A 및 D 스프링에서는 중심에서 시작되어 상하 방향으로 마멸이 진행되는 형상을 보인다. 또한 본 실험에서 적용한 최대 충격하중은 거의 일정하나 실험결과로 나타난 마멸면적의 크기는 다소 차이를 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 6 에 마멸면적과 마멸부피사이의 관계를 나타내었다. 여기서 At 는 광학현미경을 이용하여 측정된 전체 마멸흔적이며 Aw 는 표면 측정결과 3 μm 이상 깊이로 마멸된 면적을 나타낸다. 그 결과 마멸흔적(At)과 마멸량사이의 관계에서는 (Fig. 6(a)) 데이터 분산이 매우 심하게 나타났으나 Aw 를 이용하게되면 하나의 직선으로 표현할 수

있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 실제 내마멸성을 평가하는데 있어 마멸면의 특성을 고려할 필요가 있음을 의미한다.

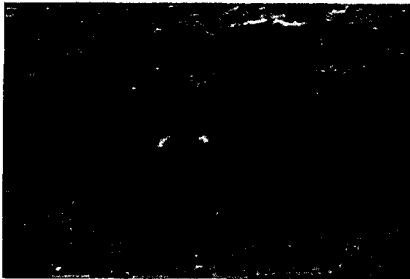


Fig. 7 Typical result of worn surface observation using SEM (Type D).

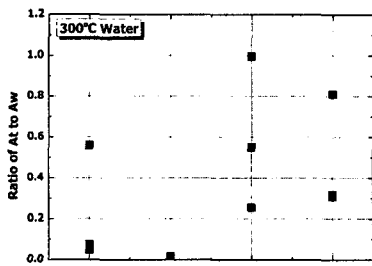


Fig. 8 Variation of the ratio of At to Aw.

3.3 마멸면을 이용한 내마멸성 평가

고온고압 물속에서 수행된 마멸시험에서 SEM 을 이용한 손상면 관찰 결과 매우 미세한 입자가 접촉면 주위에 층을 이루는 것을 쉽게 확인할 수 있었다 (Fig. 7). 이러한 균일한 마멸입자층은 지속적인 마멸을 방해할 뿐만 아니라 접촉하중을 분산시키는 역할을 할 것으로 예상되며 결국 마멸량을 감소시킨다.

마멸흔적(At)와 마멸면(Aw)의 관계를 살펴보면 스프링 형상의 영향을 관찰할 수 있다. 초기 접촉은 미세한 돌출부들간의 상호작용이 시작되며 이때의 마멸은 metal-to-metal 접촉이 우세하게 작용한다. 마멸이 진행됨에 따라 접촉면에서 형성된 마멸입자가 접촉면내의 적절한 위치에서 잔류하게 되며 분쇄과정에서 산화 및 상변태등의 작용으로 입자층을 형성하게 되어 마멸흔적(At)이 증가하는 동시에 실제 마멸이 발생하는 Aw 의 크기도 변하게 된다.

만약 접촉면에서 발생한 마멸입자가 외부로 쉽게 방출할 수 있는 스프링 형상일 경우 마멸면의 비(Aw/At)는 급격히 증가하

게 되며, 이와 반대로 마멸입자층 형성이 용이하게 되면 metal-to-metal 접촉으로 인해 발생가능한 흡착(Adhesion)이 감소하여 마멸량이 작아지게 된다. Fig. 8 에 각 스프링에 따른 Aw/At 의 비를 나타내었으며 마멸량 혹은 마멸계수 K 와 매우 유사한 경향이 나타남을 확인할 수 있다.

4. 결론

핵연료봉과 이를 지지하는 지지격자 스프링사이에서 발생가능한 고온고압 미끄럼/충격 마멸실험을 수행하였고 그 결과를 이용하여 스프링 형상에 따른 내마멸성을 평가할 수 있는 방법으로 마멸면을 고려하였다.

(1) 고온고압 물속에서 미끄럼/충격 마멸 시험을 수행하였으며 각 스프링 조건에 대하여 마멸계수 K 를 산출하였다.

(2) 마멸부피와 면적사이의 관계에서 마멸흔적에서 나타난 많은 편차가 마멸면적을 사용할 경우 선형적인 관계가 있음을 확인하였다. 결국 마멸면적의 증가속도가 느린 형상의 스프링 조건이 내마멸성을 가지는 것으로 판단할 수 있다.

(3) 마멸흔적에 대한 마멸면의 비(Aw/At)를 이용하여 각 스프링에서의 내마멸성을 평가하였으며 나타난 결과가 마멸계수 K 의 변화와 유사한 것을 확인하였다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

1. 이영호 외, "미끄럼 및 충격/미끄럼 하중에서 스프링 형상에 따른 핵연료봉 프레팅 마멸", 2003 년도 춘계원자력학회 논문집, 2003.
2. 김형규 외, "고온고압 프레팅 마멸시험기 개발" 2003 년도 춘계원자력학회 논문집, 2003.
3. Frick et al, "Overview on the Development and Implementation of Methodologies to Compute Vibration and Wear of Steam Generator Tubes", Symposium on Flow-Induced Vibrations: Vol. 3, Vibration in Heat Exchanger, 1984, 149-161