

부식된 핵연료 피복관과 지지격자 사이의 프레팅 마멸 특성

김진선 · 박세민 · 김용환* · 이승재* · 이영제†

성균관대학교 기계공학부, *한전원자력연료주식회사

Fretting Wear Characteristics of the Corroded Fuel Cladding Tubes for Nuclear Fuel Rod against Supporting Grids

Jin-Seon Kim, Se-Min Park, Yong-Hwan Kim*, Se-Min Park,
Seung-Jae Lee* and Young-Ze Lee†

School of Mechanical Engineering, SunKyunKwan University

*Fuel Technology Center, Korea Nuclear Fuel Co.

Abstract – Fuel cladding tubes in nuclear fuel assembly are held up by supporting grids because the tubes are long and slender. Fluid flows of high-pressure and high-temperature in the tubes cause oscillating motions between tubes and supports. This is called as FIV (flow induced vibration), which causes fretting wear in contact parts of tube and support. The fretting wear of tube and support can threaten the safety of nuclear power plant. Therefore, a research about the fretting wear characteristics of tube-support is required. The fretting wear tests were performed with supporting grids and cladding tubes, especially after corrosion treatment on tubes, in water. The tests were done using various applied loads with fixed amplitude. From the results of fretting tests, the wear amounts of tube materials can be predictable by obtaining the wear coefficient using the work rate model. Due to stick phenomena the wear depth was changed as increasing load and temperature. The maximum wear depth was decreased as increasing the water temperatures. At high temperatures there are the regions of some severe adhesion due to stick phenomena.

Key words – corroded fuel cladding tube, fretting wear, supporting grid, wear coefficient, wear depth.

1. 서 론

국내 상용으로 가동중인 가압 경수로형 원자력 발전소의 원자로 냉각재 내부에 위치한 핵연료 피복관은 원자력 발전소의 핵심부품으로 핵연료 속에서 핵분열에 생긴 에너지를 원자로 냉각재에 전달하여 발전을 가능하게 하고, 핵분열에 의해 생긴 방사성 물질들을 피복관내에 포용함으로써 핵분열 생성물에 대한 1차 방호재 역할을 한다[1].

핵연료 피복관은 얇은 튜브 내에 핵연료 펠릿이 저장된 형태로 핵연료가 발생한 열에너지를 냉각재에 전달하고 핵연료를 직접 냉각재에 노출되는 것을 방지하는 역할을 한다[1].

하지만 유체유동에 기인하여 핵연료 피복관과 지지격자 사이에 진동이 발생하게 되고 이는 피복관과 지지격자의 접촉부에 프레팅 마멸을 발생시켜 피복관의 두께를 감소시키고 있다[2,3]. 또한 방사선 조사가 냉각재의 오염원으로 작용하게 되며, 이로 인해 피복관에 부식이 발생하여 두께 감소가 가속되고 있다[4]. 핵연료 피복관의 두께감소는 방사선 누출 등의 원자력발전소의 안정성에 큰 위험 요소가 되기 때문에 피복관과 지지격자 사이의 프레팅 마멸 특성 평가가 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 부식된 핵연료 피복관을 사용하여 집속하중 및 온도 변화에 따른 프레팅 마멸 거동이 피복관 표면에 어떠한 영향을 미치는지 알아보고자 한다.

†주저자 · 책임저자 : yzlee@skku.edu

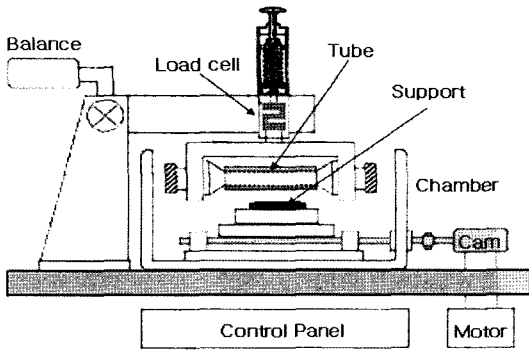


Fig. 1. Schematic diagram of fretting wear tester.

2. 실험

2-1. 실험장치 및 시편

Fig. 1에 나타난 프레팅 마멸 실험장치를 이용하여 핵연료 피복관과 지지격자의 접촉부에 프레팅 마멸을 발생시킨다. 피복관과 지지격자 사이의 직선왕복운동은 캠(cam)에 의해 부여되며, screw-bar type의 하중 적용 장치를 이용하여 피복관과 지지격자의 접촉부에 하중을 부여하였다. 또한 주변온도를 높일 수 있도록 chamber를 장착하였다.

실험에 사용한 시편은 튜브형상의 부식된 핵연료 피복관과 판 스프링 형상의 지지격자로 분류된다. Fig. 2는 프레팅 시험기 내부의 fixture에 고정된 피복관과 지지격자 시편이다. 윗 부분의 시편은 Zr합금재에 Nb와 Tin이 첨가된 핵연료 피복관으로 50 mm길이로 가공하였다. 아랫부분의 시편은 Zr합금재에 Tin이 첨가된 지지격자이고 실험에 용이하도록 날개 형태로 가공하였다. 지지격자의 스프링 형상은 피복관과의 접촉하중이 적을 경우 중앙부에서 타원형으로 접촉하며 하중이 증가함에 따라 양 측면의 돌출부에서도 접촉하게 되어 하중을 효과적으로 분산 시킬 수 있도록 설계되었다. 두 시편 모두 water vessel 내에서 부식 시켰으며, 부식과정은 3시간 동안 이루어 졌다. vessel 내부 압력



Fig. 2. Specimens and the fixture.

은 18.6 MPa이고 물의 온도는 360°C이다.

2-2. 프레팅 마멸 실험

피복관과 지지격자 사이에서 발생하는 프레팅 마멸에 미치는 하중의 영향을 살펴보기 위해 10 N에서 30 N까지 5 N으로 증가시키면서 총 5단계의 하중으로 나누어 실험을 수행하였다. 진폭은 예비실험결과 마멸이 급격히 증가하기 시작하며 마멸형상을 뚜렷히 관찰할 수 있는 200 μm로 고정 시켰으며 진동 주파수는 10 Hz, chamber내부의 물의 온도를 20°C로 하여 3시간 동안 프레팅 마멸을 발생시켰다.

이어서 마멸이 가장 많이 나타난 25 N의 하중에서 물의 온도를 50°C, 80°C로 각각 상승시켜 온도의 영향을 알아보기 위한 실험을 수행하였다. 나머지 실험 조건은 하중변화 실험과 동일하게 하였다.

실험 후 표면조도계를 이용하여 피복관 표면의 마멸형상의 변화를 측정하였다. 또한 이를 이용하여 최대 마멸깊이와 마멸부피를 산출하였다.

3. 실험 결과

3-1. 하중변화 실험 결과

하중변화 실험은 다섯 단계의 하중 하에서 수행하였

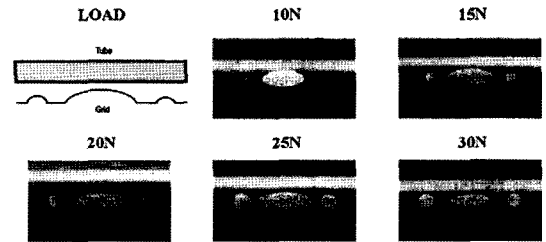


Fig. 3. Worn surfaces of cladding tubes with increasing the applied load.

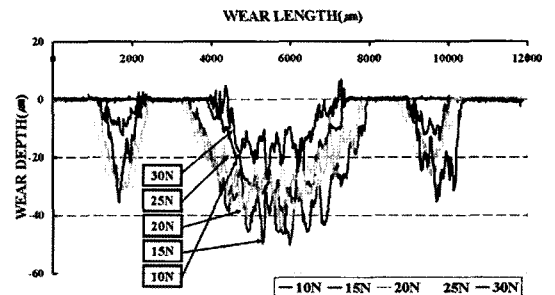


Fig. 4. Profiles of worn surfaces with increasing the applied load.

Table 1. Wear depth and Wear volume with increasing the applied load.

	10 N	15 N	20 N	25 N	30 N
Wear Depth (μm)	46.54	50.2	45.1	43.63	35.6
Wear Volume (×10 ⁻¹⁰ m ³)	0.89	1.72	1.67	1.78	0.98

다. 피복관의 마멸면에 대한 저배율 광학사진을 Fig. 3에 나타내었으며 Fig. 4는 피복관의 길이방향으로 표면조도계를 이용하여 측정된 피복관 표면의 마멸형상이다.

10 N에서는 피복관이 지지격자의 중앙부에서만 접촉하지만 15 N 이후로는 양 측면의 작은 돌출부에도 접촉함을 볼 수 있다. 그리고 25 N까지 하중이 증가함에 따라 마멸이 증가하였지만 30 N에서 마멸정도가 감소하였다. 이는 중앙부 뿐만 아니라 양 측면에서도 접촉하게 됨에 따라 지지격자의 하중분산 능력이 증가하여 마멸을 감소시킨 것이다. 또한 25 N부터 마멸흔에 겹쳐 변한 부분이 나타나게 된다. 이는 25 N 이전의 하중에서는 slip에 의한 연삭마멸이 마멸부 전 영역에 걸쳐 일어났기 때문에 마멸흔이 일정한 것이다. 그리고 25 N 이후로는 stick에 의한 응착마멸이 진행됨을 보여주는 것으로서 응착마멸을 발생하는 영역이 주변부와 달리 검게 보이는 것이다. 따라서 하중증가에 따른 stick-slip에 의해 상대운동이 제약을 받음에 따라서 마멸이 감소하는 것을 나타낸다.

Table 1은 최대마멸 깊이와 마멸 부피를 나타낸다. 양 측면부에 접촉이 일어나긴 했으나 아직 효과적으로 하중 분산이 이루어지지 않은 15 N에서 최대마멸 깊이가 가장 깊으며 점차 마멸 깊이가 감소한다. 반면에 하중변화에 따른 마멸량의 변화를 살펴보면 최대마멸 깊이와는 달리 15 N 이후의 하중에서도 마멸량은 계속 증가하는데 이는 주변 돌출부에서의 마멸이 증가했기 때문이다. 그리고 하중증가에 따른 stick현상이 나타나기 시작하는 25 N까지 피복관의 전체적인 마멸량은 증가하지만 30 N에서는 감소하게 된다.

피복관의 마멸수명을 예측하기 위한 마멸계수(wear coefficient, K)를 구하기 위하여 work rate model을 적용하였으며 wear rates와 work rates를 Fig. 5에 나타내었다[5]. wear rate는 work rate에 비례한다. 마멸계수 K값은 프레팅 마멸에서 마멸특성을 비교할 수 있는 값이므로 재료들의 마멸 특성을 비교하거나 한계 수명을 결정하는데 유용하게 사용된다. 따라서 K값은

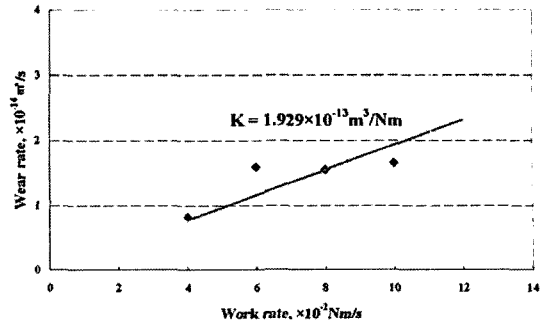


Fig. 5. Wear coefficient of corroded cladding tube.

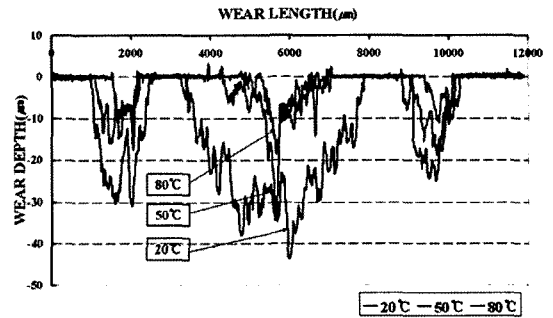


Fig. 6. Profiles of worn surfaces with increasing the water temperature.

마멸깊이와 마멸량을 예측하는데 효과적으로 사용될 수 있다.

3-2. 온도변화 실험 결과

Fig. 6은 25 N의 하중에서 온도 변화에 따른 프레팅 마멸 실험을 한 후 각 피복관의 표면을 표면조도계를 이용하여 측정된 마멸형상이다. Table 2에서도 나타난 바와 같이 온도가 증가함에 따라 마멸 깊이 및 마멸량이 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7(a)의 광학사진 촬영 결과를 보면 마멸정도가 온도가 증가함에 따라 크게 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 특히 50°C 및 80°C에서는 마멸면이 검게 변해있는 것을 볼 수 있다. 따라서 변형된 부분을 좀더 정밀히 분석해 보기 위하여 SEM(Scanning Electron Microscope)촬영 및 EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)분석을

Table 2. Wear depth and wear volume with increasing the water temperature.

	20°C	50°C	80°C
Wear Depth (μm)	43.62	33.35	18.6
Wear Volume (×10 ⁻¹⁰ m ³)	1.78	0.33	0.16

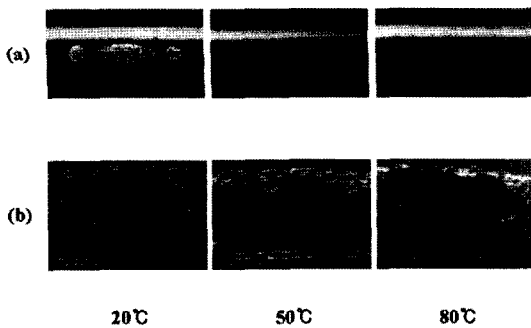


Fig. 7. Optical microscope images and SEM images of Zr alloy tube after the fretting test.

Table 3. EDX analysis of worn surfaces with increasing the temperature.

Temperature	Element	Wt%	At%
20°C	O K	8.7	35.2
	Zr L	91.3	64.8
50°C	O K	20.25	59.15
	Zr L	79.75	40.85
80°C	O K	29.29	70.25
	Zr L	70.71	29.75

하였다.

SEM 사진과 EDX 분석결과는 Fig. 7과 Table 3에 각각 나타내었다. 20°C에서는 마멸면 전영역에 걸쳐 slip이 일어나 마멸이 가장 많이 진행 되었다. 50°C의 마멸면을 관찰해보면 바깥부분에서는 slip이 일어났지만 중앙부에서는 표면을 변형을 한 흔적을 볼 수 있다. 또한 중앙부의 EDX분석결과 이 부분에서 산소량이 20°C의 마멸면에 비해 약 2배 이상 검출되었다. 따라서 온도의 증가로 인한 소성변형에 의해 stick현상이 발생하고 산화막이 형성되어 마멸을 억제하는 역할을 한 것을 알 수 있다[6,7]. 80°C에서는 마멸면 전역에 걸쳐 소성 변형 및 그에 따른 응착마멸이 진행된 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자력 발전소의 부식된 핵연료 피복

관을 이용하여 하중 및 온도 변화에 따른 프레팅 마멸 특성을 다음과 같이 평가하였다.

1. 하중이 증가함에 따라 지지격자가 효과적으로 하중을 분산하게 됨에 따라 마멸 깊이가 감소한다. 또한 고하중(30 N)에서는 stick현상으로 인해 마멸이 감소하게 된다.

2. 온도가 증가함에 따라 소성변형의 발생 및 산화막 생성으로 인해 마멸 깊이 및 마멸량이 감소하였다. 특히 고온에서는 stick-slip현상에 의한 응착마멸영역이 나타나게 된다.

3. 마멸계수, K를 구하기 위하여 wear rates와 work rates를 도출하였으며, 이는 핵연료 피복관의 마멸수명(Wear life) 예측에 효과적으로 이용할 수 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 전력산업연구개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 핵기계공학, pp. 9-29, 한국원자력학회, 1989.
2. Dong-Goo Kim and Young-Ze Lee, Experimental investigation on sliding and fretting wear of steam generator tube materials, *Wear*, Vol. 250, pp. 673-680, 2001.
3. S.C. Kang, M.H. Song, et al, Report KINS/AR-669, pp. 5-37, 1999.
4. P.E. MacDonald, V.N. Shah, et al, Report NUREG/CR-6365, 1-77, 1996.
5. C. Phalippou et al, The Predictive Analysis of Wear Work-rates in Wear test Rigs, *Journal of Pressure Vessel Piping*, 328, 1996.
6. Sung-Hoon Jeong and Young-Ze Lee, Wear Characteristics of Inconel 690 and Inconel 600 in Elevated Temperature, *Key Engineering Materials*, Vol. 297, pp. 1424-1429, 2005.
7. S.H. Jeong, C.Y.Park, Y.Z.Lee, *Key Engineering Materials*, Vol. 293-300, pp. 1412-1417, 2005.