

핵연료 피복관과 지지격자 사이에 발생하는 프레팅 마멸에 미치는 유동의 영향

김진선 · 박세민 · 박동신 · 이영제*

성균관대학교 기계공학부

The Effect of Water Flow on Fretting Wear of the Nuclear Fuel Cladding Tubes against the Supporting Grids

Jin-Seon Kim, Se-Min Park, Dong-Shin Park and Young-Ze Lee[†]

School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

(Received June 24, 2008; Revised July 25, 2008; Accepted July 31, 2008)

Abstract – The flow induced vibration in the nuclear fuel assembly causes the fretting wear between the fuel cladding tubes and the supporting grids. The reduction in tube thickness due to the fretting wear could be related to the serious damage on nuclear fuel assembly. In this paper, the effect of the water flow on fretting wear of nuclear fuel cladding tube against supporting grid was investigated through the fretting wear tester with water spout equipment. The test results were compared with the data conducted in the stationary water. At stationary water environment the wear debris was trapped between fretting surfaces, and then the fretting wear occurred by three-body abrasion. However, in the case of water flow, the two-body abrasive wear was the dominant wear mechanism, because the wear debris was easily removed by water flow.

Key words – fretting wear, fuel cladding tube, supporting grid, water flow, wear debris

1. 서 론

프레팅 마멸(fretting wear)은 서로 접촉한 두 표면 사이에 작용하는 미세한 진동에 의한 상대운동으로 발생하는 마멸이다. 프레팅 마멸은 왕복하는 운동거리가 매우 작아서 일반적인 마멸 현상과는 다른 특성을 보이게 되며 진폭, 하중, 주파수, 온도, 분위기 등 많은 인자에 영향을 받는다[1]. 특히 마멸입자의 생성과 이탈은 프레팅 마멸 특성 및 마멸에 의한 표면파괴에 큰 영향을 미친다[2].

국내 상용으로 가동중인 가압 경수로형 원자력 발전소의 원자로 냉각재 내부에 위치한 핵연료 피복관은 원자력발전을 가능하게 하는 핵심부품이다[3]. 핵연료 피복관은 유체유동에 기인한 진동에 의해 지지격자와의

접촉부에서 프레팅 마멸이 발생하게 되고, 마멸에 의하여 피복관의 두께가 감소하게 된다. 핵연료 피복관의 두께 감소는 방사선 누출 등 원자력발전소의 안전성 확보를 저해하는 큰 위험 요소가 된다[4,5]. 따라서 핵연료 피복관과 지지격자 사이에 발생하는 프레팅 마멸에 대한 특성을 평가하는 것이 매우 중요하다.

지금까지 국내의 핵연료 피복관의 프레팅 마멸 특성 평가는 주로 물속에서 하중 및 진폭변화, 온도변화에 따른 특성평가에 국한되어 있다[4]. 실제 핵연료 피복관은 주변의 냉각수가 빠른 속도로 흐르는 환경에 놓여있다. 피복관과 지지격자의 접촉부에 유동이 존재하는 경우 마멸입자가 접촉부에서 이탈하는 것에 매우 큰 영향을 줄 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 유체유동의 존재에 따른 마멸입자의 생성과 이탈이 피복관과 지지격자 사이에 발생하는 프레팅 마멸 특성에 어떠한 영향을 미치는지 알아보려고 한다.

*주저자 · 책임저자 : yzlee@skku.edu

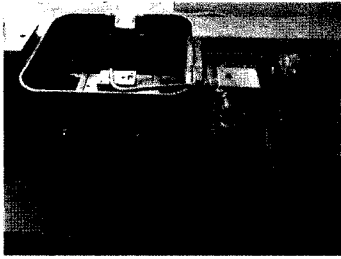


Fig. 1. Fretting wear tester installed with water spout equipment.

2. 실험

2-1. 실험장치 및 시편

프레팅 마멸 실험장치를 이용하여 핵연료 피복관과 지지격자 사이에 프레팅 마멸을 발생시켰다. 피복관과 지지격자의 접촉부에 미세한 진폭의 상대운동을 캠(cam)을 이용하여 부여하였으며, screw-bar type의 하중부여 장치를 이용하여 피복관을 지지격자에 접촉시켜 수직하중을 부여하였다[6].

유동환경을 만들기 위하여 유동부여장치를 프레팅 마멸 실험장치에 설치하였으며, Fig. 1에 유동부여장치를 나타내었다. 유동부여장치는 유동펌프를 이용하여 핵연료 피복관과 지지격자의 접촉부에 유동을 직접 부여할 수 있으며, 유량계를 통하여 유동의 속도를 제어할 수 있게 하였다.

실험에 사용한 시편은 튜브형상의 핵연료 피복관과 판 스프링 형상의 지지격자로 분류된다[5]. 튜브시편과 지지격자 시편 모두 지르코늄 합금재이며, 실험에 적절하게 사용할 수 있도록 절단 및 가공을 하였다. 시편에 대한 개략도 및 진동모드와 유동의 방향을 Fig. 2에 나타내었다.

2-2. 프레팅 마멸 실험

피복관과 지지격자 사이에 발생하는 프레팅 마멸에

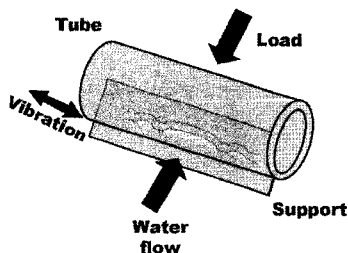


Fig. 2. Specimens and fretting mode for fretting tests.

미치는 유동의 영향을 살펴보기 위하여 실험환경은 크게 유동이 존재하는 유동환경과 유동이 없는 일반 수중환경으로 나누어진다. 유동의 영향을 하중변화에 따라 살펴보기 위하여 5 N에서 25 N까지 총 5단계로 수직하중을 변화시켜 가며 실험을 수행하였다. 지지격자가 고정되어 있는 하부지그와 연결된 캠(cam)에 의해 진폭이 부여되며, 가진 진폭은 200 μm 로 고정시켰다. 진동 주기는 10 Hz, 수조 내부의 물의 온도는 32°C로 유지하면서 총 3시간 동안 프레팅 실험을 수행하였다.

프레팅 마멸 실험 후 표면조도계를 이용하여 표면형상을 측정하였으며, 최대마멸깊이 및 마멸 부피를 산출하였다. 이어서 튜브시편의 마멸면을 광학사진으로 촬영하였으며, 정밀한 분석을 위하여 SEM분석을 하였다. 또한 지지격자 시편의 마멸표면에 대한 SEM분석을 통하여 마멸입자의 영향을 알아보았다.

3. 실험 결과

3-1. 하중변화 실험 결과

3-1-1. 광학사진 및 SEM 이미지

지르코늄합금 튜브의 프레팅 마멸에 유동이 어떠한 영향을 미치는 지 알아보기 위하여 유동이 없는 비유동환경, 유동이 존재하는 유동환경하에서 하중을 5 N, 10 N, 15 N, 20 N, 그리고 25 N으로 증가시켜가며 프레팅 마멸실험을 수행하였다.

Fig. 3.1은 프레팅 마멸실험을 수행한 뒤 튜브시편의 마멸표면을 광학현미경으로 관찰한 사진이다. Fig 3.2는 15 N과 20 N 하중에서 실험한 튜브시편의 SEM 이미지이다. 비유동실험과 유동실험결과를 살펴보면 5 N, 10 N에서 타원형의 마멸이 발생하고 15 N, 20 N, 25 N에서는 타원형 마멸이 일어난 중앙부를 기준으로 양측면에 원형의 마멸이 발생한 것을 볼 수 있다. 이는 저하중 상태에서는 중앙부에서만 튜브와 지지격자가 접촉을 하다가 하중이 증가함에 따라 양측면의 돌출부에서도 접촉하여 튜브를 지지하도록 설계된 지지격자의 스프링형상에 기인한 것이다. 비유동과 유동실험 모두 하중이 증가함에 따라 튜브를 지지하는 지지격자의 지지능력에는 큰 차이가 없어 보이지만 마멸된 표면을 살펴보면 차이점과 유사점을 구분할 수 있다.

Fig. 3.1의 광학사진 결과를 살펴보면, 15 N의 비유동실험 후 마멸표면에 희미하지만 검게 변한 부분을 발견할 수 있고, 유동실험의 경우 중앙부에 약간 검게 변한 것을 볼 수 있다. 검게 보이는 부분이 스틱

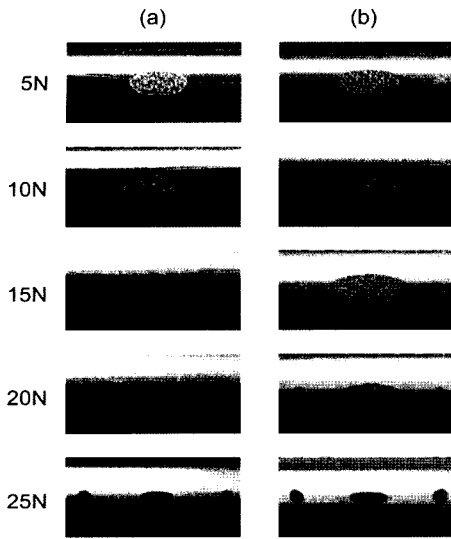


Fig. 3.1. Optical images of worn surfaces (a) Stationary water (b) water flow.

(stick) 현상이 발생한 부분으로 Fig. 3.2를 보면 주변부의 슬립(slip) 영역에 비해 소성변형으로 표면이 변한 흔적임을 알 수 있다. 또한 표면의 파손 형태를 보면 표면의 박리와 연삭마멸에 의한 스크래치를 볼 수 있다. 20 N의 하중에서 비유동실험결과 마멸면 전역에 걸쳐 스틱(stick)영역이 나타나는 것을 확인할 수 있고, 유동실험결과 중앙부의 스틱(stick)영역이 더 넓어진 것을 볼 수 있다. 그리고 25 N의 하중에서는 유동실험을 한 경우에도 마멸면 전역에 스틱(stick) 영역이 나타나며 비유동실험결과와 표면에 큰 차이가 없음을 확인할 수 있다.

따라서 유동에 의해 스틱(stick)현상이 유동이 없는 경우에 비해 좀 더 높은 하중에서 발생하며 고하중(25 N)에서 차이가 없어짐을 알 수 있다.

3-1-2. 최대마멸깊이, 마멸부피

Table 1은 각각의 지지격자에 의해 마멸된 튜브시편의 최대마멸깊이를 나타낸 것이다. 전반적으로 유동이 있는 경우 마멸깊이가 더 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며 유동이 있는 경우 최대 3배 최대마멸깊이가 더 크게 나타났다.

Table 2는 마멸부피를 나타낸 것이다. 최대마멸깊이와 마찬가지로 전반적으로 유동이 있는 경우 마멸량이 더 큰 것을 알 수 있으며 유동이 있는 경우 최대 2배 마멸이 더 진행한 것을 확인할 수 있다.

최대마멸깊이 및 마멸부피를 살펴보면 하중이 증가함에 따라 마멸이 증가하다 어느 임계하중 이후의 하

Table 1. Maximum wear depth of worn surfaces with increasing the load

	Maximum wear depth (μm)				
	5 N	10 N	15 N	20 N	25 N
Stationary water	31.87	46.05	31.05	13.01	9.75
Water flow	34.79	46.05	50.05	39.29	12.47

Table 2. Wear amount of worn surfaces with increasing the load

	Wear amount (10 ⁻⁹ m ³)				
	5 N	10 N	15 N	20 N	25 N
Stationary water	4.91	7.09	5.45	1.36	0.6
Water flow	5.57	9.81	11.04	3.65	0.95

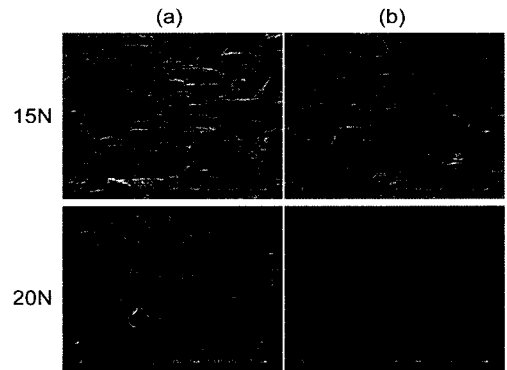


Fig. 3.2. SEM images of worn surfaces (a) Stationary water (b) water flow.

중에서 마멸이 줄어들게 되는 것을 볼 수 있는데 표면 분석결과와 비교해 보면 스틱(stick)영역이 발생하는 하중 또는 그 이후로 마멸이 줄어들어 가는 것을 알 수 있다. 저하중 보다 고하중(15 N, 20 N)에서 유동이 있는 경우 마멸의 차가 더 컸으며, 25 N의 하중에서 유동이 있는 경우와 없는 경우 모두 최대마멸깊이 및 마멸량의 차이가 크게 줄어들어 가는 것을 확인할 수 있다.

3-2. SEM 이미지 분석 결과

Fig. 3.3은 프레팅마멸 실험 후 세척하지 않은 상태에서 지지격자의 표면을 SEM촬영한 결과이다. 비유동 실험의 경우 무수히 존재하는 마멸입자를 확인할 수 있다. 프레팅마멸에 의해 생긴 마멸입자들이 유동의 영향으로 접촉부에서 이탈했음을 확인할 수 있다. Fig. 3.4는 중앙부의 이미지로 마멸입자들이 박리된 표면으로부터 생성되고 박리되어 파인 부분에 갇혀 있는 것을 확인할 수 있다.

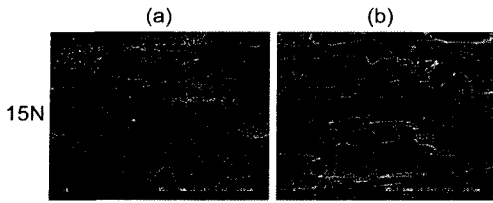


Fig. 3.3. Worn surfaces of supporting grid at central zone (a) Stationary water (b) Water flow.

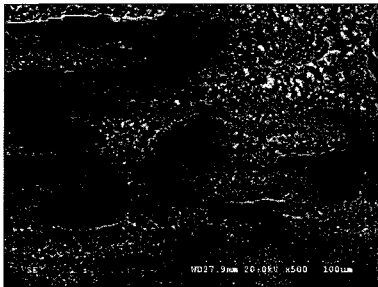


Fig. 3.4. Worn surfaces of supporting grid at central zone (10 N).

지금까지의 결과들을 종합해 보면 표면의 박리와 연삭마멸에 의해 마멸입자들이 생성되고 유동이 있는 경우 생성된 마멸입자들이 접촉부에서 이탈하게 된다. 반면 유동이 없는 경우에는 마멸입자들이 접촉부에 남아 있게 된다. 따라서 유동이 없는 경우에는 남아 있는 입자들에 의해 세물체 연삭마멸(three-body abrasion)이 진행되고 유동이 있는 경우 입자들이 제거됨에 따라 두 표면이 직접 접촉하여 두물체 연삭마멸(two-body abrasion)이 진행하게 되는 것을 알 수 있다. 일반적으로 세물체 연삭마멸(three-body abrasion)이 일어나게 되면 입자들의 구름작용에 의해 두물체 연삭마멸(two-body abrasion) 보다 마멸이 더 느리게 진행된다[7]. Table 1과 Table 2를 살펴보면 비유동환경에서의 프레팅마멸이 유동환경에서의 프레팅마멸에 비해 전반적으로 마멸이 많이된 것을 알 수 있다. 이는 두물체 연삭마멸(two-body abrasion)이 일어나는 유동이 있는 경우의 마멸이 세물체 연삭마멸(three-body abrasion)이 일어나는 유동이 없는 경우 보다 상대적으로 더 진행한 결과이다.

4. 결 론

핵연료 피복관과 지지격자 사이에 발생하는 프레팅

마멸에 유동이 미치는 영향을 알아보기 위한 시험을 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 표면분석결과 유동에 의해 튜브시편과 지지격자시편의 접촉부에 마멸입자들이 이탈하게 되며, 유동이 없는 경우 접촉부에 무수히 많은 마멸입자들이 존재한다. 따라서 유동에 의한 마멸입자의 제거효과가 프레팅마멸에 영향을 미치는 주요 요인임을 확인할 수 있다.

2. 프레팅마멸의 주요 메커니즘은 표면의 박리와 연삭마멸이었으며, 유동에 의한 마멸입자의 제거효과 때문에 비유동환경에서는 세물체 연삭마멸(3-body abrasion), 유동환경에서는 두물체 연삭마멸(2-body abrasion)이 발생하게 된다. 따라서 유동이 있는 경우 전반적으로 마멸이 더 진행된다.

3. 하중이 증가함에 따라 마멸이 점차 증가하다 임계하중 이후로 마멸이 감소하게 된다. 그 임계하중은 스틱(stick)이 나타나기 시작한 하중이다. 유동에 의해 스틱(stick)영역이 더 높은 하중에서 나타났으며 하중이 증가함에 따라 점차 유동의 영향이 증가하다가 25 N의 하중에서 유동의 영향이 줄어든다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 전력산업연구개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. Abkra Iwabuchi, The Role of Oxide Particles in the Fretting Wear of Mild Steel, pp. 301-311, Wear, Vol 151, 1991.
2. M. Varenerg, G. halperin and I. Etsion, Different Aspects of the Role of Wear Debris in Fretting Wear, pp. 902-910, Wear, Vol. 252, 2002.
3. 핵기계공학, pp. 9-29, 한국원자력학회, 1989.
4. 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.
5. P.E. MacDonald, V.N. Shah, et al., Report NUREG/CR-6365, pp. 1-77, 1996.
6. S.H. Jeong, C.Y.Park and Y.Z.Lee, Key Engineering Materials, Vol. 293-300, pp. 1412-1417, 2005
7. Halliday, I.S. and Hirst, W., "The Fretting Corrosion of Mild Steel", Proc. Roy.Soc. Lond., Ser.A, Vol. 236, pp. 411-425, 1956.