

온도 상승이 개량형 핵연료 피복관과 지지격자 사이의 프레팅 마멸에 미치는 영향

박용창 · 정성훈 · 김진선 · 김용환* · 이영제**†

성균관대학교 대학원 기계공학과, *한전원자력연료주식회사, **성균관대학교 기계공학부

Influence of Temperature on the Fretting Wear of Advanced Nuclear Fuel Cladding Tube against Supporting Grid

Yong-Chang Park, Sung-Hoon Jeong, Jin-Seon Kim, Yong-Hwan Kim* and Young-Ze Lee**†

Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

*Fuel Technology Center, Korea Nuclear Fuel Co.

**School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract – The experimental investigation was performed to find the associated changes in characteristics of fretting wear with various water temperatures. The fretting wear tests were carried out using the zirconium alloy tubes and the grids with increasing the water temperature. The tube materials in water of 20°C, 50°C and 80°C were tested with the applied load of 20 N and the relative amplitude of 200 μm. The worn surfaces were observed by SEM, EDX analysis and 2D surface profiler. As the water temperature increased, the wear volume was decreased, but oxide layer was increased on the worn surface. The abrasive wear mechanism was observed at water temperature of 20°C and adhesive wear mechanism occurred at water temperature of 50°C, 80°C. As the water temperature increased, surface micro-hardness was decreased, but wear depth and wear width were decreased due to increasing stick phenomenon. Stick regime occurred due to the formation of oxide layer on the worn surface with increasing water temperatures

Key words – fretting wear, supporting grid, cladding tube, wear depth, wear coefficient, stick-slip.

1. 서 론

국내 상용으로 가동중인 가압 경수로형 원자력 발전소는 크게 1차 계통과 2차 계통으로 분류된다. 1차 계통에는 원자로, 가압기, 증기발생기, 원자로 냉각재 펌프 등이 있고, 2차 계통은 터빈, 발전기, 복수기 및 각종 펌프들로 구성된다. 이 중 원자로 냉각재 내부에 위치한 핵연료 피복관은 원자력 발전소의 핵심부품으로 핵연료 속에서 핵분열에 의해 생긴 에너지를 원자로 냉각재에 전달하여 발전을 가능하게 하며, 핵분열에 의해 생긴 방사성 물질들을 피복관내에 포용함으로써 핵분열 생성물에 대한 1차 방호재 역할을 한다.[1]

현재 우리나라에서 주로 사용되고 있는 가압 경수로용 핵연료 피복관은 이산화 우라늄(UO₂) 소결체를 지르코늄 합금 튜브에 넣은 후 상부에 스테인레스강으로 만든 코일 스프링을 넣고 양단에 지르코늄 합금의 봉단 마개를 용접하여 밀봉한 구조로서 헬륨을 가압·봉입하고 있다[1]. 핵연료 피복관은 얇은 튜브 내에 핵연료 펠렛이 저장된 형태로 핵연료가 발생한 열에너지를 냉각재에 전달하고 핵연료를 직접 냉각재에 노출되는 것을 방지하는 역할을 한다[1]. 핵연료 피복관은 냉각재 내에 위치하며 축 방향으로의 유체 유동에 의해 가진 된다. 가진 된 핵연료 피복관은 인접한 핵연료 피복관과 충돌하거나 지지격자 내에서 충돌을 일으키게 되며 이로 인해 피복관 및 핵연료 집합체에 마멸을 일으키는 것으로 알려져 있다. 이 현상이 과도할 경우, 핵

†주저자 · 책임저자 : yzlee@skku.edu

연료 집합체에 프레팅 마멸(Fretting Wear) 및 피로(Fatigue)현상, 계통운전의 어려움, 그리고 음향잡음(Acoustic Noise)등의 현상이 발생하게 된다[2]. 또한 핵연료 피복관은 열 팽창에 의한 응력을 최소화하기 위해 격자 형 지지대(grid assembly)내의 스프링에 의한 마찰력으로 지지된다. 이러한 이유로 핵연료 피복관은 진동에 대해 민감한 특성을 가진다[3,4].

핵연료 피복관은 고효율의 운전조건을 만족시키기 위해 다양한 제품이 개발되고 있으나, 새롭게 개발되는 제품의 신뢰성에 대한 프레팅 마멸의 특성평가는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 개량형 핵연료 피복관에 대해 온도가 프레팅 마멸에 미치는 영향을 밝히고자 한다.

2. 실험

2-1. 실험장치 및 시편

프레팅 마멸실험을 수행하기 위한 실험장치가 Fig. 1에 나타나 있다. 실험장치는 0 Hz~50 Hz까지 주파수를 조절할 수 있으며 0 μm~1000 μm의 왕복 변위를 가진다. 진폭을 정확하게 조절하기 위해 서보 모터(Servo-Motor)를 장착하였고, 서보 모터에 캠(Cam)을 부착하여 회전운동을 편심에 의한 직선운동으로 변화시켰다. 하중은 screw-bar type의 하중적용 장치에 로드 셀(Load Cell)을 부착하여 적용하였다. 또한 다양한 온도의 증류수 환경을 구현하기 위해 water bath를 설치하고 하부에 열선을 장착하여 가열할 수 있도록 하였다.

실험에 이용된 시편은 튜브 형상의 핵연료 피복관과 판 스프링 형상의 지지격자로 분류된다. 피복관 시편은 길이 50 mm 단위로 가공하였고, 기존에 이용되던

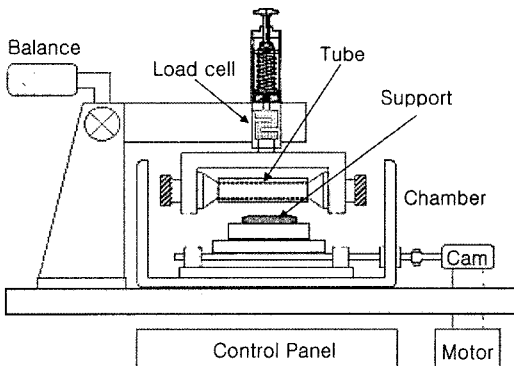


Fig. 1. Schematic diagram of fretting wear.

Table 1. Chemical compositions and mechanical properties of nuclear fuel cladding tube

Chemical Composition	Iron (%)	0.09~0.13
	Oxygen (%)	0.105~0.145
	Tin (%)	0.6~0.9
	Nb (%)	0.80~1.20
Mechanical Properties	Ultimate Tensile Strength (MPa)	818
	Yield Strength (MPa)	610
	Elongation (%)	17.5
	Grain Size (μm)	13.1
	Ra (ASTM No.)	×
	Diameter (mm)	9.5

Zr합금재료에 Nb를 첨가하여 내식성을 향상시킨 개량형 핵연료 피복관을 사용하였다. 지지격자 시편은 실험이 용이하도록 날개 형태로 가공하였고 피복관을 지지하는 스프링의 형상을 개량한 개량형 지지격자를 사용하였다. 개량형 핵연료 피복관의 화학적 조성과 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다.

2-2. 프레팅 마멸실험

피복관과 지지격자 사이에서 발생하는 프레팅 마멸에 미치는 온도의 영향을 살펴보기 위해 최대마멸 부피가 일어나는 하중을 파악하는 예비실험을 수행하였다. 하중을 변화시켜 수행한 예비실험 결과 개량형 핵연료 피복관과 개량형 지지격자는 20 N 부근에서 최대 마멸이 일어남을 알 수 있었다. 따라서 본 실험에서의 작용 하중은 20 N으로 설정하였고, 진동 주파수는 10Hz, 진폭은 200 μm로 설정하였으며 실험시간은 2시간으로 고정하였다. 본 연구의 주요 변수인 온도는 20°C(상온), 50°C, 80°C 세가지로 설정하였고, 마멸량은 실험 후의 마멸 면을 광학적 측정 방식의 마이크로미터와 2차원 표면 조도계를 이용하여 산출하였다.

실험에 사용된 핵연료 피복관과 지지격자의 접촉 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 상부의 피복관에 하중이 가해지고 하부의 지지격자에 진동이 가해지는 방식으로 프레팅 마멸 실험이 수행되었다

3. 실험 결과

3-1. 온도변화에 따른 경도변화

온도 변화에 따른 핵연료 피복관의 경도변화를 미어

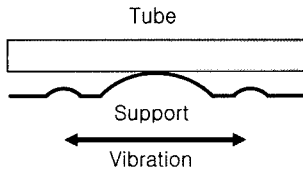


Fig. 2. Schematic diagram of specimen.

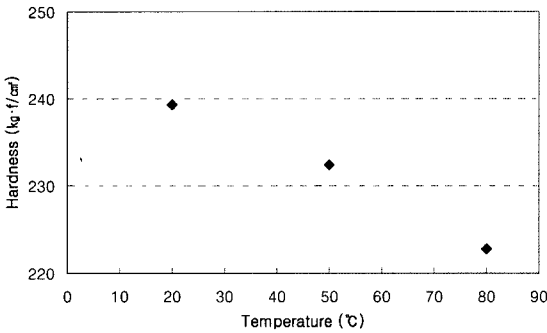


Fig. 3. surface hardness of Zirconium Alloy Tube with various water temperatures.

크로 경도계로 측정하여 Fig. 3에 나타내었다. 지르코늄 합금 역시 일반적인 금속의 경향과 마찬가지로 온도가 증가할수록 경도가 낮아짐을 관찰할 수 있다. 실험결과 상온에서 80°C까지 표면 경도는 선형적으로 낮아짐을 알 수 있었다.

3-2. 온도변화에 따른 마멸량

세 단계의 온도에서 수행한 프레팅 마멸면의 지배율 광학사진을 Fig. 4에 나타내었다. 온도가 증가할수록 점차 마멸자국의 크기가 작아졌으며, 중앙에 위치한 마멸자국 외에 2개의 바깥쪽 원형 마멸면이 80°C에서는 나타나지 않았다. 이는 지지격자 스프링 형상에 기인한 특성으로 Fig. 2에서 살펴볼 수 있듯이 최초의 표면접촉은 중앙 돌출부에서 일어난다. 지지격자의 형상은 마멸이 진행함에 따라 중앙 돌출부에서 바깥 돌출부로 접촉이 일어나는 특성을 가지고 있으나 실험결과 온도가 증가할수록 중앙 돌출부의 마멸이 바깥 돌출부가 접촉할 정도로 충분히 진행되지 않았음을 알 수 있다.

광학사진에 나타난 마멸면을 관찰해 보면, 중앙부 마멸면에서 어두운 색의 마멸면이 점차 증가하는데 이는 지르코늄 합금의 마멸면이 산화되면서 발생한 지르코늄 산화막으로 추정되며 이를 입증하기 위해 논문 후

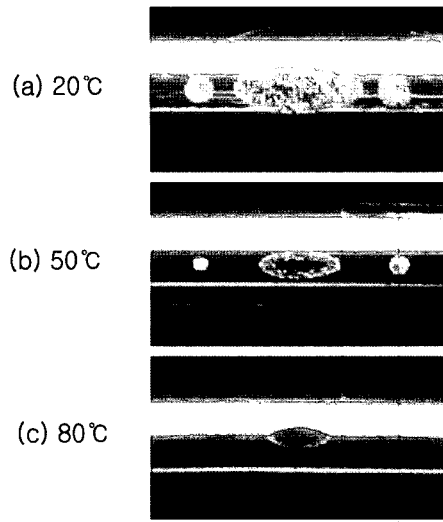


Fig. 4. Optical microscope images of Zirconium Alloy Tube after the fretting test: (a) 20°C, (b) 50°C, (c) 80°C.

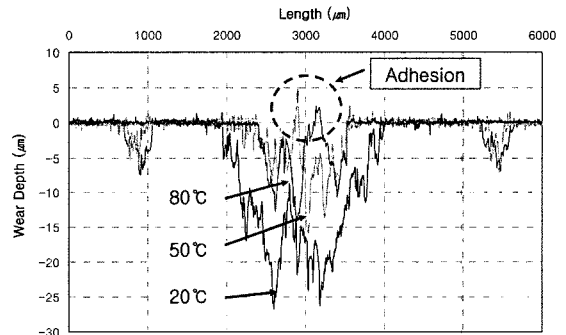


Fig. 5. Topographic graphs of the worn surfaces by water temperature increase.

반부에 표면의 성분을 분석하였다.

프레팅 마멸 실험 후 시편의 형상 변화를 2차원 표면 조도계를 이용해 Fig. 5에 나타내었다. 온도가 증가할수록 최대마멸 깊이가 작아지고 있으며, 마멸면의 폭 역시 작아지고 있다. 50°C와 80°C의 실험결과에서 마멸면의 중앙부에 원래 표면의 높이보다 높은 부분이 관찰되는데 이는 마멸입자 및 상대재의 재료가 응착되어 소성 변형된 부분이다

이러한 현상은 프레팅에서 발생하는 스틱과 슬립 (stick-slip)현상으로 설명할 수 있다. 미세하게 진동하는 두 표면은 스틱과 슬립에 의해 상대운동이 제약을 받게 된다. 하중이 증가하거나 진폭이 작아지면 응착

Table 2. Wear scar width, wear depth and wear volume with various temperatures

	20°C	50°C	80°C
Wear Width (μm)	2083	1661	1410
Wear Depth (μm)	26.73	15.88	14.07
Wear Volume (mm ³)	0.06	0.02	0.01

이 활발해서 슬립현상은 줄어들고 스틱현상이 활발해져 상대운동이 줄어든다[5]. 지르코늄 합금 튜브는 주위의 온도가 증가함에 따라 산화막 생성이 활발해지게 된다. 이렇게 생성된 산화막은 Fig. 3에서 보듯이 경도가 낮아 응착이 발생하기 쉽고, 따라서 마찰계수가 높아지기 때문에 마멸면에서 스틱현상이 발생하게 된다. 그리고 표면에서 발생하는 심한 소성변형은 원래의 표면 높이보다 높은 면을 형성하게 된다. 이로 인해 상대적으로 고온에서는 마멸이 억제되어 바깥 돌출부가 접촉하기 어려워지며 중앙부에서는 심한 소성변형이 발생하여 Fig. 5와 같은 표면의 변화를 나타내게 된다.

Table 2는 Fig. 5에 나타난 마멸면의 최대 마멸폭, 최대 마멸깊이, 그리고 마멸부피를 나타낸다. 온도가 증가할수록 마멸폭, 마멸깊이 및 마멸부피가 감소함을 관찰할 수 있다.

Fig. 6은 지르코늄 합금 튜브의 온도별 마멸계수 (Wear Coefficient, K)를 나타낸 것이다. 마멸계수 K는 마멸에 대한 저항성을 나타내는 것으로 그 수치가 낮을수록 마멸에 대한 저항성이 우수한 것으로 평가된다. 프레팅 마멸 실험에서 얻어진 데이터를 Work rate model에 적용하여 산출한 결과 20°C 경우 $1.041 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{N}$, 50°C 경우 $0.277 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{N}$, 그리고 80°C

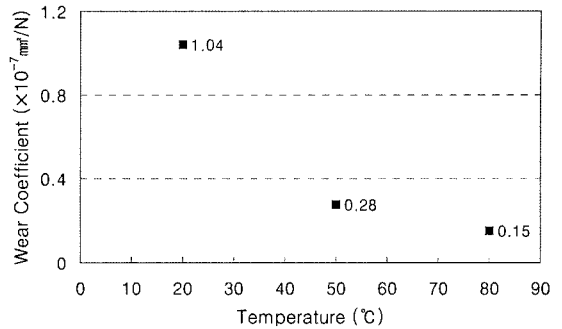


Fig. 6. Wear coefficients of zirconium alloy tube with various temperatures.

경우 $0.153 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{N}$ 으로 감소함을 알 수 있었다. 지르코늄 합금의 프레팅 마멸에서 주위온도 80°C까지의 온도 증가는 프레팅 마멸에 대한 마멸 저항성을 높여주는 효과를 보였다.

3-3. 마멸면 분석

프레팅 마멸 실험을 통해 얻어진 시편의 마멸면을 분석하기 위해 SEM(Scanning Electron Microscope)과 EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) 분석을 이용하였다.

프레팅 마멸실험 후 핵연료 피복관의 SEM 사진과 EDX 분석결과를 Fig. 7에 나타내었다. 마멸면에 나타난 어두운 부분이 산화막임을 확인하기 위해 밝은 부분(A)과 어두운 부분(B)의 EDX 분석을 실시 하였다. Fig. 7의 표는 각 마멸면의 EDX 분석 결과를 보이고 있다. Fig. 7의 성분 분석표에서 보는 바와 같이 밝은 부분(A) 보다 상대적으로 어두운 부분(B)에서 산소의

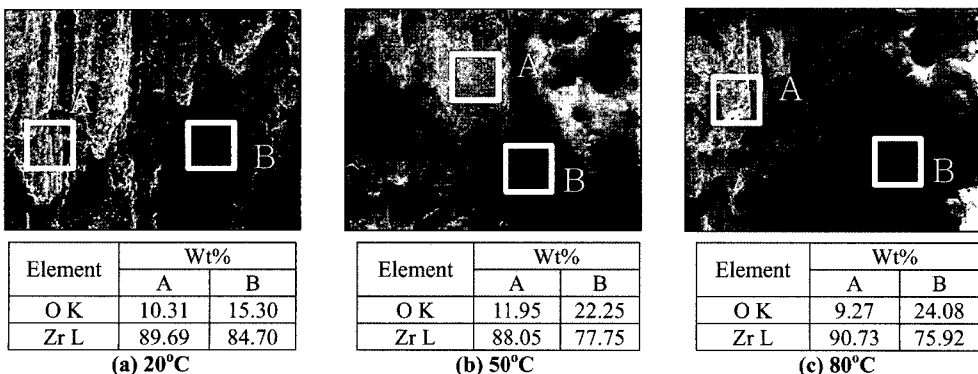


Fig. 7. SEM images and EDX analysis of worn surfaces with increasing the temperature.

농도가 높게 나와 어두운 부분이 산화막 임을 확인할 수 있다. 또한 온도가 증가할수록 산소성분의 검출량이 증가하는 것으로 보아 주변온도의 증가가 마멸면의 산화를 촉진시키는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 원자력 발전소 핵연료 피복관에서 발생하는 프레팅 마멸에 온도가 미치는 영향을 알아보기 위하여 실험을 실시하였다. 프레팅 마멸 실험에서 얻어진 마멸량 데이터를 Work rate model에 적용하여 온도에 따른 마멸계수(Wear Coefficient) K를 구하였다. 그리고 광학 현미경 및 SEM과 EDX 분석을 통해 온도에 따른 마멸 메커니즘을 파악하였다.

1. 20°C에서 80°C까지의 온도 증가시 마멸면의 면적, 최대마멸 깊이, 마멸부피가 감소하였으며, 응력이 집중되는 중앙부를 중심으로 산화막이 형성되었다.
2. 지르코늄 합금 튜브의 프레팅 마멸시 주변 온도의 상승은 산화막 생성을 가져오며, 이 산화막이 접촉면의 마찰력을 높여주어 스틱이 발생하고, 스틱 발생으로 인해 마멸폭과 최대 마멸깊이가 감소하게 되어 결과적으로 프레팅 마멸에 대한 저항성이 높아진다.
3. 지르코늄 합금 튜브는 온도가 증가함에 따라 표면부의 미세경도는 일정하게 감소한다. 하지만 재료의 연

화로 인한 마멸량의 증가 경향보다 산화막의 스틱 발생에 따른 마멸량 감소의 경향이 더욱 크게 나타난다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 전력산업연구개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 핵기계공학, pp. 9-29, 한국원자력학회, 1989.
2. P.L. Ko and H. Basista, "Correlation of Support Impact Force and Fretting-Wear for a Heat Exchanger Tube," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 106, pp. 69-77, 1984.
3. J.M. Voisin, A.B. Vannes., L. Vincent and J. Daviot, "Analysis of a Tube-grid Oscillatory Contact: Methodology for the Selection of Superficial Treatments," *Wear*, Vol. 181, pp. 826-832, 1995.
4. Hyung-Kyu Kim, Seon-Jae Kim, Kyung-H Yoon, Heung-Seok Kang and Kee-Nam Song., "Fretting Wear of Laterally Supported Tube," *Wear*, Vol. 250, pp. 535-543, 2001.
5. 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.