고온하에서 지르칼로이-4 튜브의 프레팅 마멸 특성

백승철, 김태형, 김석삼*

경북대학교 기계공학과 대학원
*경북대학교 기계공학부

The Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube at High Temperature

Seung-Chul Baek, Tae-Hyung Kim, Seock-Sam Kim*

Graduate School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University
*School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

Abstract - The fretting wear characteristics of Zircaloy-4 tube at room and high temperature were investigated experimentally. In this study, the number of cycles, slip amplitude and temperature were selected as main factors of fretting wear. The results of this research showed that the wear volume increased with the increase of slip amplitudes and the number of cycles but decreased with temperature and the coefficient of friction were observed different tendency between room and high temperature. According to SEM(EDS) only gross slip were observed on the surface of both specimens and compacted oxide were on worn surfaces. XRD patterns showed that the crystallization of ZrO_2 were observed on the worn surface at high temperature. The fretting wear were investigated due to oxidation and accumulation of plastic flow.

Keywords : Fretting, Zircaloy-4, High temperature, Oxidation

1. 서 론

원자로 내에서 핵연료봉은 그 모양이 직경에 비해 길이가 긴 튜브의 집합체로 이루어져 있고 유동하는 유체속에 잠겨있어서 진동에 매우 취약한 구조물이다. 노심의 핵연료봉은 장전시간에 따라 핵연료봉의 크립에 의한 봉직경의 감소와 축방향으로 핵연료봉을 잡아주고 있는 스프링의 강성도가 줄어듦으로써 결국 간격이 발생하기도 한다. 또한 핵연로봉 외부를 흐르는 유체에의해 발생되는 미세진동에 의해 핵연료봉과 지지격자 사이에서 프레팅 손상이 일어나게 된다.[1-3] 특히, 핵연료봉의 손상은 방사능 유출과 직결되기 때문에 원자력 발전소의 안전성에 있어 매우 중대한 문제이다.

프레팅이란 작은 진폭의 왕복상대운동을 하는 재료들의 접촉계면에서 발생하는 표면손상을 말한다.[4,5] 이러한 프레팅은 매우 작은 접촉면적 및 미끄럼거리에서 50가지 이상이나 되는 인자들의 복합적인 작용으로 여러 가지 마멸기구들이 동시에 발생하기 때문에 해석하기가 매우 어렵다.[6,7] 그러므로, 프레팅 연구는 진폭, 하중, 온도, 환경, 주파수 등 프레팅에 영향을 주는 인자 중 주된

관련인자들만을 선별하여 여러 가지 재질에 대해서 연구가 수행되고 있다.[8,9]

이렇듯 핵연료봉 피복재로 사용되고 있는 지르칼로이-4튜브에 대해서도 프레팅에 대한 여러 가지 연구가 진행되어왔으나, 환경에 따른 프레팅 연구가 아직은 미진한 실정이다. 지르칼로이-4튜브는 고온, 고압의 원자로내 환경에서 사용되며 그 예를 Table 1.에 나타내었다.[10]

따라서 본 연구에서는 현재 원자력 발전소에서 핵연료봉 피복재로 사용되고 있는 지르칼로이-4튜브에 대해 대기중의 고온 마멸특성을 연구, 분석하고자 한다.

2. 실 험

본 실험에서는 지르칼로이-4 튜브를 가공없이 5㎜씩 절단하여 사용하였다. 시편의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

Table. 1 Reactor parameters of YGN3&4

REACTOR PARAMETERS	YGN 3&4
Primary system pressure	15.6MPa
Reactor inlet coolant temp.	296℃
Reactor outlet coolant temp.	327℃

Table. 2 Chemical composition and mechanical properties of Zircaloy-4

Chemical Element	Sn	Fe	Cr	C	O	Zr
Composition (wt%)	1.25	0.21	0.11	0.0153	0.0134	balance

		Room temperature	399℃
Mechanical Properties	UTS(MPa)	722	369
	0.2%YS (MPa)	525	268
	Elongation 5.00(cm)%	23	29

실험장치는 Fig. 1과 같다.[8] 모터와 편심 플레이트를 통해 프레팅 운동을 발생시키며, 2개의 투명한 유리-실리카 튜브로 구성된 가열로는 안쪽 튜브에 니켈-크롬 와이어가 감겨져있고 바깥 튜브는 금도금을 해서 반사벽 같은 역할을 하도록 제작되어있다. 온도측정은 chrome-alumel thermocouple을 사용하였으며, 마찰력은 스트레인 게이지 통해 구하였다. 마멸량은 Fig. 2에서와 같이 3차원 표면형상측정기를 사용하였다.

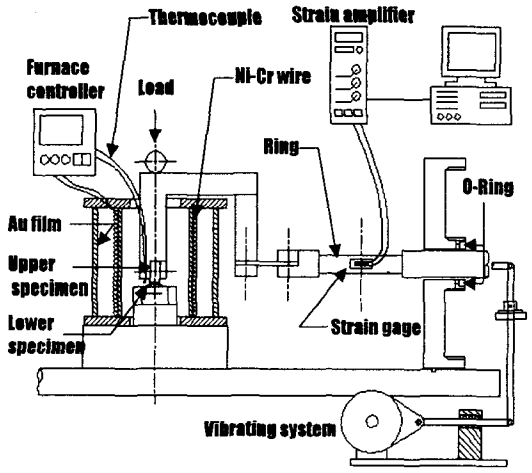

Fig. 1 Schematic diagram of fretting wear tester

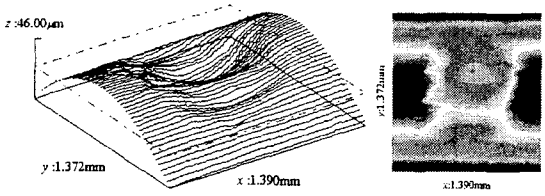

Fig. 2 Wear scar shape of a specimen (Room temp., 70㎛, 10N, 3×10^5cycles)

고온환경하에서 지르칼로이-4 튜브의 프레팅 마멸특성을 알아보기 위해 상온과 고온(300℃, 350℃, 400℃)으로 구분하였다. 미끄럼 거리(40㎛, 70㎛, 100㎛, 130㎛)와 왕복수(1×10^4cycles, 5×10^4cycles, 1×10^5cycles, 3×10^5cycles)를 각각 4단계씩, 하중과 주파수는 10N, 10Hz로 고정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 마찰계수

Fig. 3은 왕복수에 따른 마찰계수를 나타낸 것이며, Fig. 4는 온도에 따른 마찰계수를 나타낸 것이다. 고온과 상온에서 마찰계수의 형태가 다름을 알 수 있다. 상온에 비해 고온에서 마찰계수가 높아졌고 고온과 상온의 마찰계수 곡선의 형태가 다름을 알 수 있다.

Fig. 5는 마멸면의 XRD pattern을 나타낸 것이다. 상온에서 실험한 시편의 XRD pattern은 원재료와 동일하였으나 고온에서 실험한 시편의 XRD pattern은 Fig. 5와 같이 ZrO_2의 결정상이 나타났다. EDS 관찰을 통해보면 상온과 고온 모두 ZrO_2가 생성된 것으로 보이지만 상온에서는 비결정 상태로 존재하고 고온에서는 비결정상태와 결정상태가 같이 존재하는 것으로 생각된다.

고온의 경우 약 100cycles 이후 상승하여 약 10,000cycles 이후 일정해지는 경향을 나타내었다. 약 100cycles 이전은 초기산화층이 분쇄되면서 초기 oxide debris가 발생하며, 마찰계수가 상승하는 구간은 고온산화의 영향으로 ZrO_2층이 빠르게 형성되고 반복되는 미끄럼 운동으로 탈락되면서 금속과 금속간의 응착으로 인해 마찰계수가 상승한 것으로 보인다.

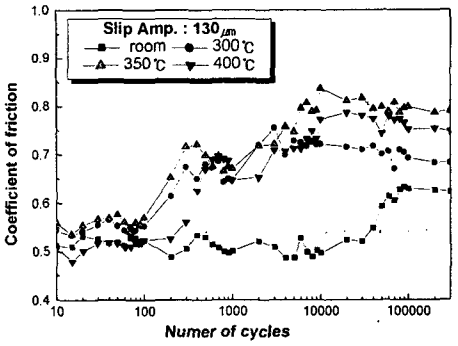

Fig. 3 Coefficient of friction as a function of number of cycles at 130㎛

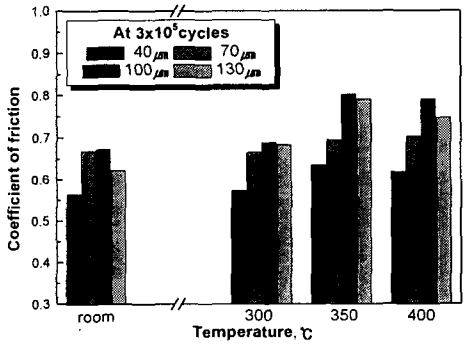

Fig. 4 Coefficient of friction as a function of temperature at 3×10^5cycles

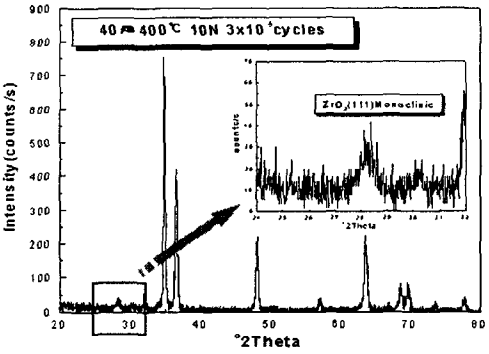

Fig. 5 XRD patterns of wear scar (40㎛ 400℃ 10N 3×10^5cycles)

10,000cycles 이후는 마멸면 전체에 퍼진 ZrO_2층이 탈락과 생성을 반복하며, ZrO_2의 결정화로 인한 oxide debris의 abrasive 현상으로 마찰계수가 높은 값에서 일정해지는 것이라 생각된다. 상온에서는 약 20,000cycles까지 일정하며 이후 급격히 증가하다가 100,000cycles 이후 일정한 경향을 나타내고 있다. 이는 고온에 비해 ZrO_2층의 생성이 늦어지기 때문으로 생각된다. 20,000cycles 이후로 ZrO_2층이 반복되는 미끄럼 운동으로 탈락되며 응착의 영향으로 마찰계수가 상승하며 100,000cycles 이후로는 비결정상태의 ZrO_2층이 생성 및 탈락을 지속하면서 마찰계수가 일정해진 것으로 보인다.

3.2 마멸량

Fig. 6은 왕복수 증가에 따른 마멸량의 변화를 나타낸 것이다. 왕복수가 증가할수록 마멸량의 증가하며, 작은 왕복수에서 마멸량이 급증하다가 이후 서서히 증가하는 형태를 보인다. 이는 왕복수 증가에 따른 전체 미끄럼 거리의 증가와, 실험초기에는 이론적인 접촉면적 상태에서 마멸이 시작되지만 마멸이 진행됨에 따라 접촉면적의 증가로 접촉압력이 감소하기 때문이다.

Fig. 6은 미끄럼 진폭에 따른 마멸량의 변화를 보여준다. 진폭이 증가함에 따라 마멸량이 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 마찰력과 시편의 SEM관찰을 통해 실험한 모든 시편이 전체미끄럼 영역(gross slip region)으로 보이므로 부분미끄럼 영역(partial slip region)에서 전체미끄럼 영역으로의 전환에 따른 영향은 없고 진폭의 증가로 인한 총미끄럼 거리의 증가와 마멸입자가 마멸면으로부터 더 잘 탈락되기 때문으로 생각된다.

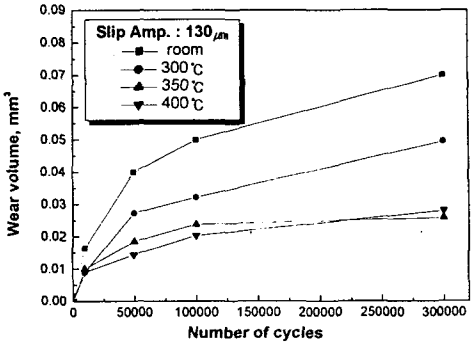

Fig. 6 Wear volume as a function of number of cycles at 130㎛

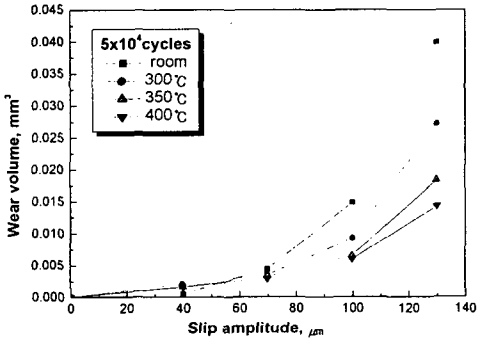

Fig. 7 Wear volume as a function of slip amplitude at 5×10^4cycles

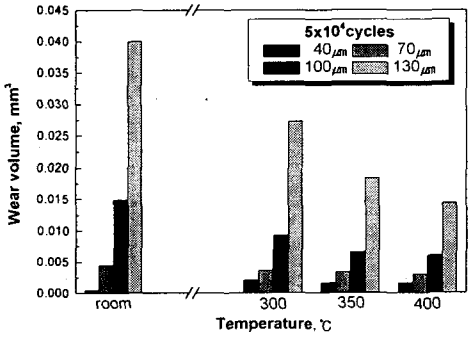

Fig. 8 Wear volume as a function of temperature at 5×10^4cycles

Fig. 8은 온도에 따른 마멸량을 나타낸 것이다. Fig. 6.7.8의 결과에 의하면 상온에서보다 고온에서 마멸량이 적은 것을 알수 있다.

이는 고온산화의 영향으로 고온에서 압축산화물(compacted oxide)의 생성이 빠르게 진행되고 소성유동에 의한 크랙 전파에 의해 마멸면으로부터 탈락되기 전까지 압축산화물(compacted oxide)이 재료간의 접촉을 막아서 재료의 마멸량이 적어진 것으로 생각된다.

3.3 마멸면의 미시적 관찰

Fig. 9는 마멸면에 생성된 마멸입자(debris)가 접촉압력에 눌려 압축된 모습을 보여주고 있다. 이렇게 압축된 마멸입자는 산화물의 형태를 지니고 있으며 이러한 산화물층이 점차 마멸면 전체로 퍼지는 것으로 생각된다. Fig. 10은 마멸면 가장자리에서 소성유동에 의해 표면이 밀리고, 크랙이 전파되는 것을 보여주고 있다. Fig. 11은 압축된 산화물층이 계속되는 소성유동에 의해 크랙이 전파하면서 박편형태로 떨어져 나가면서 다시 신생면을 생성하는 모습을 보여주고 있다. 이렇듯 대기중의 지르칼로이-4튜브의 프레팅 마멸은 상온과 고온 모두 산화물의 생성과 압축으로 압축산화물(compacted oxide)를 생산하며 이러한 산화물층이 재료간의 직접적인 접촉을 막는 산화마멸(oxidative wear) 기구를 가지는 것으로 생각된다.

SEM 관찰을 통해볼 때 Fig. 12와 같이 고온에서 작은 미끄럼진폭일 때 압축산화물(compacted oxide)이 마멸면 전체에 퍼져있는 것을 볼 수 있었고, 상온에서 큰 미끄럼진폭일 때는 마멸면에 부분적으로 압축산화물(compacted oxide)이 발생한 것을 볼 수 있었다.

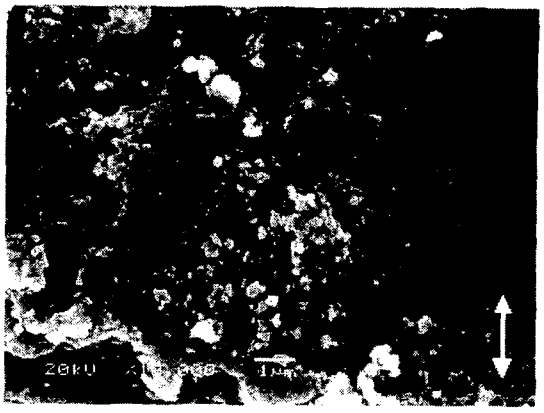

Fig. 9 Compaction of debris in the wear scar (70㎛ 350℃ 10N 5×10^4cycles)

Fig. 10 Plastic flow and cracks in the edge of the wear scar (100㎛ 400℃ 10N 3×10^5cycles)

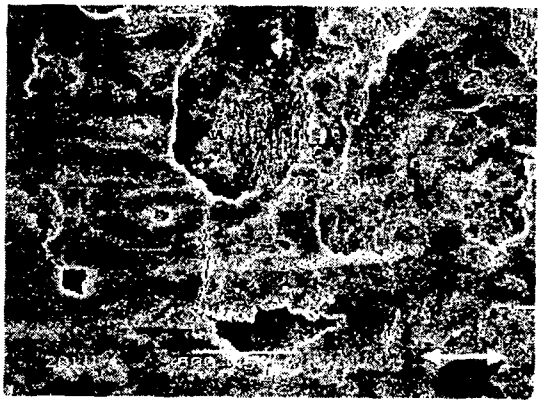

Fig. 11 Propagation of cracks and Detachment of compacted oxide (130㎛ room 10N 3×10^5cycles)

Fig. 13의 고온에서 발생한 압축산화물층(compacted oxide layer)에 긁힌 흔적은 결정화된 ZrO_2 마멸입자에 의한 연삭(abrasive)영향으로 생각된다.

이렇듯, 지르칼로이-4튜브의 마멸은 대기중의 산소로 인한 산화물이 돌기(asperity)에 의해 압축되어 압축산화물이 만들어지며, 반복되는 소성유동에 의해 크랙이 전파되면서 산화물층이 박판형태로 떨어지는 마멸형태로 볼 수 있다. 특히 고온에서는 산화에 의한 마멸이 상온에 비해 훨씬 뚜렷하며, 결정화된 ZrO_2에 의한 연삭(abrasive)을 포함하는 것으로 생각된다.

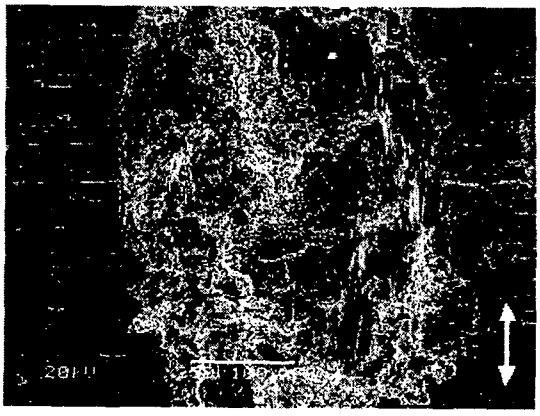

Fig. 12 Compacted Oxide layer over the wear scar (40㎛ 350℃ 10N 3×10^5cycles)

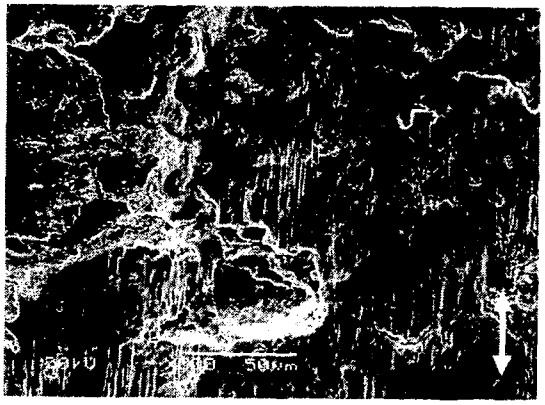

Fig. 13 Scratched surface by hard and abrasive debris particles (40㎛ 400℃ 10N 3×10^5cycles)

4. 결 론

본 연구에서는 대기중, 상온과 고온에서의 지르칼로이-4튜브의 프레팅 마멸실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 왕복수 혹은 미끄럼 거리의 증가는 전체 미끄럼 거리를 증가시켜 마멸량이 증가하였다.

2. 대기중의 지르칼로이-4튜브의 마멸은 산화 마멸과 반복되는 소성유동에 의한 크랙 등으로 인해 마멸이 진행되었으며, 특히 고온의 경우 산화마멸이 주된 마멸기구이며 결정화된 ZrO_2의 연삭의 영향이 존재하였다.

참고문헌

1. P.L. Ko, "Wear of Zirconium Alloys due to Fretting and Periodic Impacting", Wear of Materials, pp.388-395, 1975.
2. Vingsbo, O., Massih, Ali R. and Nilsson, S., "Evaluation of Fretting Damage of Zircaloy Cladding Tubes", Journal of Tribology, Vol.118, pp.705-710, 1996.
3. Cho, K. H., Kim, T. H. and Kim, S. S.,

"Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube", Wear, Vol. 219, pp.3-7, 1998.
4. OECD, "Glossary of Terms and Definitions in the Field of Friction, Wear and Lubrication", OECD pub., Paris, 1969.
5. Waterhouse R. B., "Fretting Corrosion", p.36, Pergamon Press, 1975.
6. Vincent. L., Berthier, Y., Dubourg, M. C. and Godet, M., "Mechanics and Materials in Fretting", Wear, Vol. 153, pp. 135-148, 1992.
7. Beard. J., "An Investigation into the Mechanism of Fretting Fatigue", Ph.D. Thesis, Univ. of Salford, 1982.
8. A. Iwabuchi., "Fretting Wear of Inconel 625 at High Temperature and in High Vacuum", Wear, Vol. 106, pp 163-175, 1985.
9. R.B. Waterhouse, "The Fretting Wear of Nitrogen-Bearing Austenitic Stainless Steel at Temperatures to 600℃", Journal of Tribology, Vol. 108 pp. 359-362. 1986.
10. 한국전력공사, "Final Safety Analysis Report (YGN 3,4)" Vol. 7.