

경수 및 공기중에서의 지르칼로이-4 튜브의 프레팅 마멸특성 비교 A Comparison of Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube in Light Water and in Air

조광희, 김태형, 김석삼*
경북대학교 기계공학과 대학원, *경북대학교 기계공학부

Abstract

The fretting wear behaviour of Zircaloy-4 tube used as the fuel rod cladding in PWR nuclear power plants has been investigated at the different test environment, in light water and in air as a function of slip amplitude, normal load, test duration and frequency. Zircaloy-4 tubes were used for both of oscillating and stationary specimens. A fretting wear tester was designed to be suitable for this fretting test. The wear volume and specific wear rate of Zircaloy-4 tube in water were greater than those in air under various slip amplitude. It was found that delaminate debris and surface cracks were observed at low slip amplitude and high load in water. Experimental results showed that the light water accelerated the wear of Zircaloy-4 tube at low slip amplitude in fretting.

Key words : fretting, Zircaloy-4, wear mechanism, environmental dependency

1. 서 론

프레팅마멸에 영향을 미치는 요소에는 진폭, 하중, 진동수 외에도 온도, 표면조도, 경도, 주파수(Hz), 시편의 움직이는 방향 등 많은 추가 인자들이 있다. Pearson[1]은 로프의 프레팅실험에서 진폭이 40 μ m 정도의 미소 진폭에서는 해수중에서의 프레팅 마멸이 대기중에서 보다 컸다고 보고했으며, Sato등도 약 30 μ m 이하 진폭에서는 해수중에서의 마멸이 대기중에서 보다 크게 나타났다고 보고했다.

Vingsbo 등[2]은 두 접촉면의 상호운동에 의해 마멸이 발생할 경우 운동속도가 빨라지면 접촉면의 마찰열에 의해 표면온도 상승으로 마멸량이 증가한다고 보고한 바 있다. Berthier 등[3]은 강의 프레팅 실험에서 주파

수가 커질수록 표면손상이 매우 커진다고 보고하였다. 그리고 그 원인은 주파수가 증가하면 새로 발생된 마멸입자가 보다 쉽게 접촉면을 이탈 할 수 있어 third-bodies의 접촉면 보호기능이 감소되기 때문이라고 설명하였다.

본 연구에서는 국내 가압경수형 원자력발전소의 핵연료봉 피복재로 사용되는 Zircaloy-4 튜브를 대기[4]와 경수중[5]에서 각각 프레팅 마멸실험을 수행하고 그 마멸특성을 비교하고 마멸기구를 규명하였다.

2. 실 험

2.1 실험장치 및 시험편

실험장치는 편심 조정식 프레팅시험기[4]

에 수조를 설치하여 경수중에서 실험하고, 공기중 실험시는 수조를 제거하고 실시하여 경수중과 공기중이라는 차이 외에는 경수중에서의 프레팅실험과 공기중에서의 프레팅실험의 조건들이 모두 동일하도록 하였다.

지르칼로이-2의 니켈(Ni)이 수소흡수를 촉진시켜 수소화물에 의한 취성의 원인이 된다는 사실이 1960년에 발견됨에 따라 지르칼로이-2의 조성 중 니켈을 없애고 대신 철(Fe)을 증가시킨 지르칼로이-4가 개발되어 가압경수형 원자로(PWR)의 핵연료 피복관으로 사용되고 있어[6] 본 실험에서는 고정 및 이동시편 모두 외경 9.7mm의 지르칼로이-4 튜브를 사용하였다. 튜브의 두께는 1.3mm이며, 그 표면의 표면 거칠기는 $0.6\mu\text{m} R_{\text{max}}$ 이었다.

2.2 실험조건

실험은 두 개의 지르칼로이-4 튜브를 직각으로 접촉시키고 수직하중은 20N, 40N, 60N, 80N 및 100N 까지 5단계로, 진폭은 $40\mu\text{m}$, $70\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$, 및 $400\mu\text{m}$ 의 6단계, 진동수는 1×10^5 , 3×10^5 , 및 5×10^5 cycles의 3가지로 정해서 각각의 조건들을 조합하여 실험을 실시하였다. 실험은 대기온도가 21-30°C인 실내에서 경수중에서와 공기중에서 각각 수행하였다. 시험편의 왕복

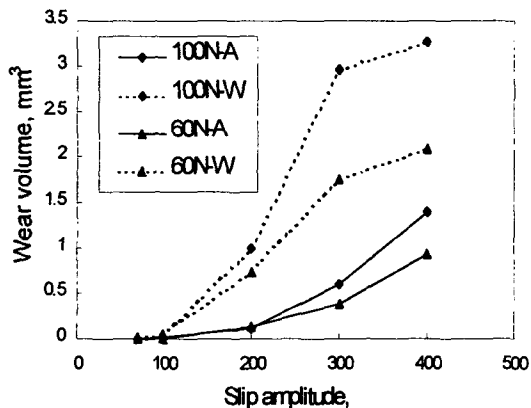


Fig. 1 Wear volume in air and in water on 60N and 100N at 10^5 cycles

미끄럼 주파수를 10Hz로 실험하고, 주파수변동에 대한 마멸량의 변화를 알아보기 위해 14Hz, 18Hz에서 추가로 수행하였다.

2.3 마멸량과 비마멸율의 계산

마멸량(V)은 $V = \frac{\pi h}{6} (h^2 + 3a^2)$, 비마멸율(v)은 $v = \frac{V}{2SnW}$ 식으로 산출하였다[4]. 여기서 a는 마멸면 반경(mm), h는 마멸 깊이(mm), W는 수직하중(N), S는 진폭(m), n은 진동수를 나타낸다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 진폭, 하중 증가에 대한 마멸량의 변화

공기중에서와 경수중에서 프레팅 마멸 실험을 수행한 경우 Fig. 1에서와 같이 약 $100\mu\text{m}$ 진폭까지는 마멸량이 거의 발생하지 않았다. 이러한 현상은 Iwabuchi 등[7]이 발표한 기존의 연구결과에서도 보여 주고 있다. 하중이 상대적으로 작은 20N과 40N의 경우 경수중에서 실험한 경우가 공기중에서 실험한 경우보다 마멸량이 20배 이상 많이 발생했다. $200\mu\text{m}$ 와 $300\mu\text{m}$ 의 진폭에서는 $100\mu\text{m}$ 진폭의 경우에 비해 미끄럼거리는 각각 2배와

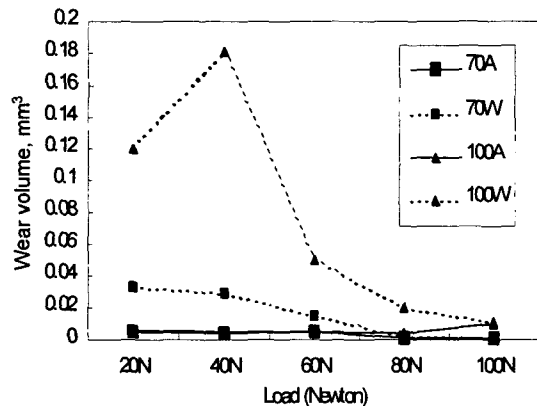


Fig.2 Wear volume in air and in water on $70\mu\text{m}$ and $100\mu\text{m}$ at 10^5 cycles

3배 증가하였으나, 마멸량은 공기중에서 최소 12배와 34배, 경수중에서 최소 3배와 4배 증가하였으며 공기중에서와 경수중에서 하중에 따라서 최대 127배와 260배까지 발생한 경우도 있었다. 따라서 이 구간은 마멸을 지배하는 주원인이 바뀌는 과도구간임을 알 수 있다. 진폭 $300\mu\text{m}$ 와 $400\mu\text{m}$ 사이의 경우 공기중에서는 Fig. 1과 같이 마멸량의 증가기울기가 더욱 급격해지고 있으나 경수중에서는 20N과 40N의 경우는 거의 직선적으로 증가하고 있지만 대부분의 경우 마멸량의 증가기울기가 현저히 감소하고 있다. 또한 하중과 마멸량의 관계를 보면 진폭 $300\mu\text{m}$ 와 $400\mu\text{m}$ 에서는 하중이 증가하면 공기중에서나 경수중에서 마멸량도 현저히 증가하지만, 진폭 $200\mu\text{m}$ 의 경우 경수중에서는 하중증가에 따라 마멸량이 조금씩 증가하는데 비해 공기중에서는 하중이 증가하여도 마멸량의 변화가 거의 없다.

$70\mu\text{m}$ 와 $100\mu\text{m}$ 의 진폭에서는 Fig. 2와 같이 동일 진폭에서 하중이 증가할수록 경수중에서와 공기중에서 모두 마멸량이 감소하고 있다. 이에 $130\mu\text{m}$ 와 $160\mu\text{m}$ 로 경수중에서 추가 실험을 한 경우 40N 이하에서는 하중이 증가하면 마멸량도 증가하였으나 그 이상의 하중에서는 하중 증가시 마멸량은 오히려 감소하여 140N에서는 마멸량이 거의 발생되지 않았다.

3.2 진동수 증가에 대한 마멸량의 변화

공기중에서 뿐만 아니라 경수중에서 프레팅 실험한 경우에도 진동수가 증가하면 증가율에 차이는 있으나 모든 진폭 구간에서 마멸량이 증가하였다.

Fig. 3에서 나타난 바와 같이 동일한 하중 20N에서 진동수가 증가할수록 마멸량은 진폭의 크기에 관계없이 공기중에서와 경수중에서 증가한다. 그러나 진폭이 $200\mu\text{m}$ 와 $300\mu\text{m}$ 인 경우는 진동수 증가에 따라 마멸량이

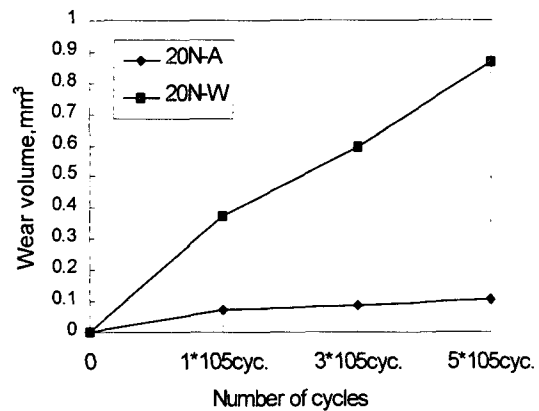


Fig. 3 Comparison of wear volume at 20N in water and in air

크게 증가하지만 진폭 $70\mu\text{m}$ 에서는 증가폭이 매우 작다. 공기중에서 프레팅 실험한 경우가 경수중에서의 경우보다 마멸량은 작지만 각 진폭에서 진동수 증가에 따라 마멸량이 증가하는 경향은 경수중에서와 유사하게 나타난다. 그러나 경수중에서는 마멸량이 진동수에 거의 비례하고 있으나 공기중에서는 프레팅 마멸시험 초기인 10^5 cycles까지는 마멸량이 상대적으로 많이 발생하고 그 이후 3×10^5 cycles와 5×10^5 cycles에서는 초기에 비해 적게 증가한다.

3.3 주파수 변화와 마멸량의 관계

경수중에서 주파수(Hz) 증가에 따른 마멸량의 변화를 알아보기 위해 진폭을 $200\mu\text{m}$ 로 고정하고 10Hz(14.4m/hr), 14Hz(20.16m/hr), 18Hz(25.92m/hr)로 10^5 cycles까지 20N, 40N과 60N에서 실험한 결과 각 하중에서 주파수가 증가할수록 마멸량이 증가하였다.

Fig. 4은 수직하중 60N, 진폭 $200\mu\text{m}$ 일 때 경수중에서와 공기중에서 주파수 증가에 따른 마멸량의 변화를 나타내고 있다. 주파수 증가에 따른 마멸량의 변화는 공기중에서도 경수중에서와 같이 주파수가 증가할수록 마멸량이 증가하고 있다. 10Hz, 14Hz, 18Hz의

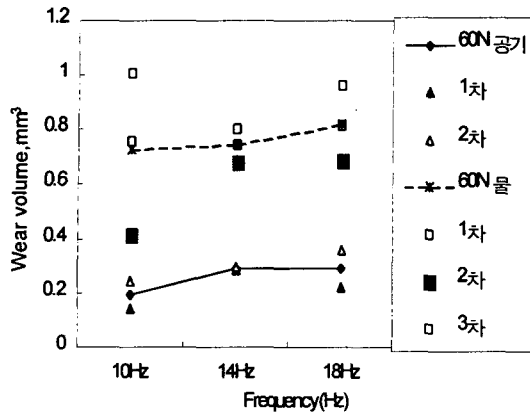


Fig. 4 Comparison of wear volume in water and in air on $200\mu\text{m}$ at 10^5 cycles

모든 경우에서 공기중에서보다 경수중에서 마멸량이 평균 3배 정도 많았다.

3.4 경수중에서와 공기중에서의 비마멸율 비교

Fig. 5에서 보면 프레팅에 의한 비마멸율은 실험한 모든 진폭 구간에서 공기중에서보다 경수중에서 크고 진폭이 증가하면 공기중에서와 경수중에서 모두 비마멸율이 증가한다. 진폭 $100\mu\text{m}$ 에서 비마멸율의 증가율이 급성장하지만 공기중에서는 진폭이 $100\mu\text{m}$ 에서 $200\mu\text{m}$ 로 증가할 때 2내지 4배 증가하고 그 이후에도 꾸준히 증가하는데 비해 경수중에

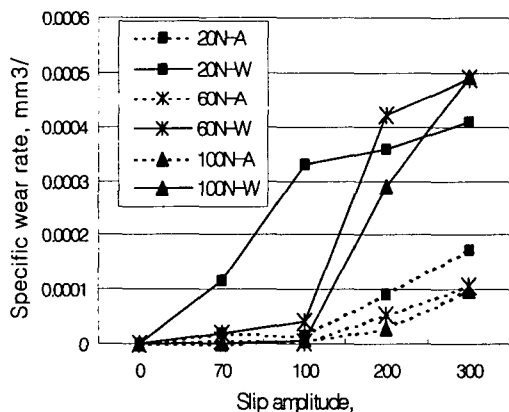


Fig. 5 Comparison of specific wear rate in air and in water (slip amplitude)

서는 이 구간에서 대부분 10배 이상 증가하고 그 이후는 증가폭이 완만하다. 비마멸율이 급격히 증가하는 이 구간은 접촉면의 중심에 stick된 부위가 없어지고 마멸량이 급격히 증가하는 gross slip 단계에 해당된다 [8]. 그러나 진폭이 더욱 증가하여 경수중에서 진폭이 $300\mu\text{m}$ 이상되면 gross slip이 sliding 현상으로 발전되며 sliding 구간에서는 하중이 증가하여도 비마멸율은 크게 변하지 않았다. 공기중에서는 진폭 $300\mu\text{m}$ 와 그 이상에서도 비마멸율이 $300\mu\text{m}$ 이하에서와 같이 계속 증가하고 있으나 경수중에서는 진폭 $300\mu\text{m}$ 이상에서 거의 일정한 크기를 유지하고 있다. 이는 작은 진폭에서 stick현상을 억제하여 비마멸율을 증가하게 하는 역할을 했던 경수가 진폭이 증가하여 마멸상태가 sliding regime으로 들어서면 상대운동하는 두 물체 사이에서 윤활 작용을 수행하여 하중이 증가하여도 비마멸율이 거의 일정하게 되어 마멸량은 하중에 비해 증가하는 sliding 특성을 나타나고 있다.

하중과 비마멸율과의 관계를 Fig. 6에서 보면 경수중 진폭 $300\mu\text{m}$ 이상에서 하중이 증가하여도 비마멸율은 거의 일정하지만 $200\mu\text{m}$ 이하에서는 하중이 증가하면 비마멸율이 감소하고 있다.

그러나 공기중에서는 전 진폭구간에서 하

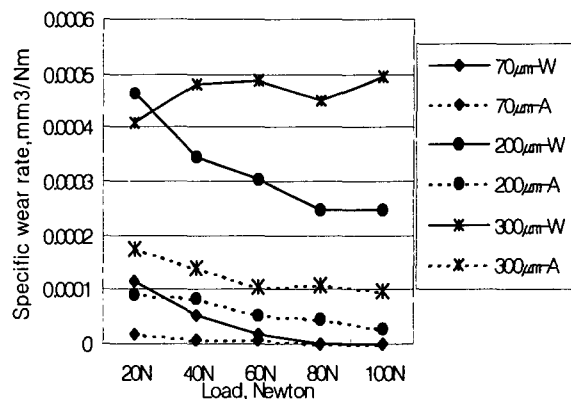


Fig. 6 Comparison of specific wear rate in air and in water (load)

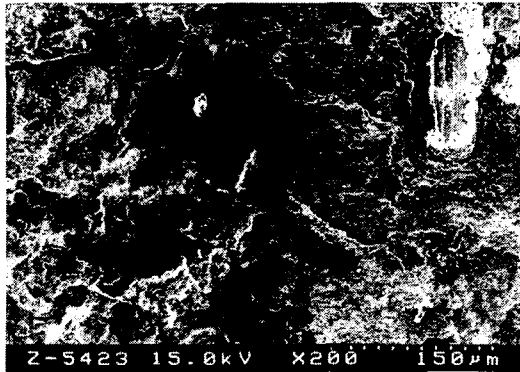


Fig. 7 Worn surface in air
(300 μ m, 40N, 3×10^5 cyc., air, vertical specimen)

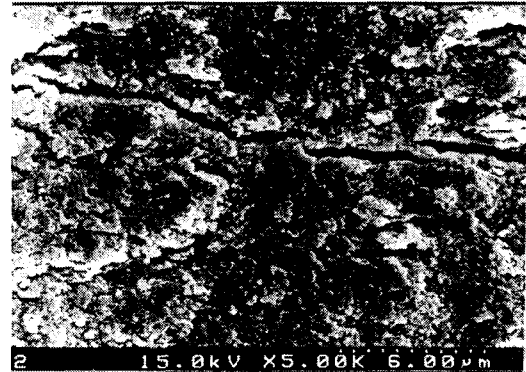


Fig. 8 Initiation and propagation of crack
(100 μ m, 60N, 1×10^5 cyc., water, horizontal specimen)

중 증가에 따라 비슷한 기울기로 비마멸율이 감소하고 있다. 공기중에서 하중증가에 따라 비마멸율의 감소가 경수중에서보다 민감한 것은 공기중에서는 두 접촉면이 건조마찰로 하중증가에 따라 마찰계수가 크게 증가하여 상대 미끄럼거리가 탄성변형에 의해 감소되는데 비해 경수중에서는 접촉면 사이에 있는 경수가 윤활작용을 하여 주어진 하중(20N-100N) 범위에서는 접촉면의 마찰계수가 공기중에서 보다는 적게 증가하기 때문이라고 생각된다. 100 μ m이하 진폭의 경우는 공기중에서와 경수중에서 공히 비마멸율이 아주 적었다.

3.5 공기중에서의 프레팅 마멸면의 미시적 관찰

Fig. 7는 진폭 300 μ m, 하중 40N, 3×10^5 사이클 동안 공기중에서 실험을 수행한 후의 마멸면을 SEM으로 관찰한 것이다. 마멸면 전체에 걸쳐 얇은 박판 형태가 층계를 이루어 마멸이 진행된 것을 관찰할 수 있다. 이러한 형태의 마멸면은 진폭, 하중과는 관계없이 대부분의 프레팅 마멸면에서 유사하게 관찰 되었다.

3.6 경수중에서 지르칼로이-4 튜브의 프레팅 마멸기구

두 개의 구가 미끄럼 없이 압축되면 최대 인장응력이 접촉면의 가장자리에서 발생되고 최대전단응력은 접촉표면의 조금 아래에서 발생된다. 마찰이 있는 경우 failure는 접촉면의 뒤 끝단(back edge)에서 발생되기 시작한다[9]. Ghasemi 등[10]은 1.25cm의 鋼球 시편으로 작은 진폭(약 20 μ m)과 다양한 하중(4-20N)에서 수행한 프레팅 실험에서는 미세균열과 박판상의 마멸입자 생성(delamination)이 주된 마멸기구라고 생각했다.

경수중 프레팅 마멸 실험에서 진폭 100 μ m 이하에서 실험한 시편을 확대 촬영한 마멸표면의 SEM사진을 Fig. 8에서 보면 60N 하중에서는 반복된 미끄럼운동에 의해 접촉표면에 균열들이 발생되고, 하중이 100N인 경우 Fig. 9에서는 인접 균열들과 연결되어 하나의 넓은 박판상의 마멸입자(delaminate)들을 만들고 모재로부터 떨어져 들려 있거나, 완전히 분리되고 있음을 볼 수 있다.

주파수는 10Hz로 고정된 상태에서 진폭을 300 μ m로 증가시켜 프레팅 마멸실험을 한 경우 미끄럼방향의 연삭마멸 현상과 소성유동이 있었음을 Fig. 10에서 알 수 있다.

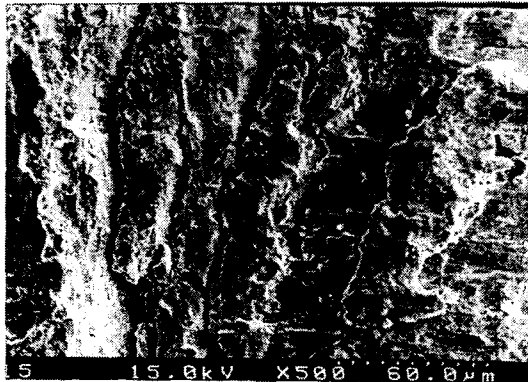


Fig. 9 Generation of delamination
(70 μ m, 100N, 1×10^5 cyc., water, vertical specimen)

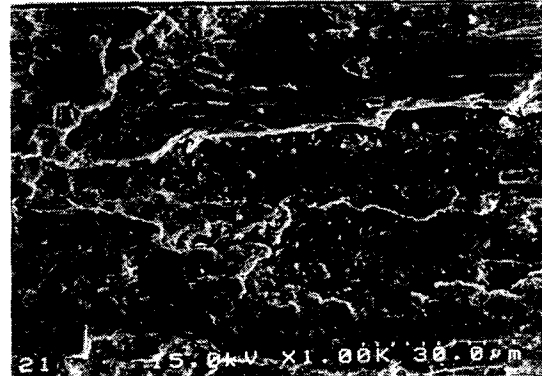


Fig. 10 Adhesion and Plowing
(300 μ m, 20N, 1×10^5 cycles, water, vertical specimen)

따라서 지르칼로이-4 튜브의 경수중 프레팅 마멸실험에서 진폭이 작은 경우(약100 μ m 이하)에는 마멸을 지배하는 주 원인이 피로에 의한 균열 발생과 박판상의 마멸입자 발생(하중이 큰 경우)이고, 진폭이 큰 경우(약 300 μ m 이상)는 표면의 돌기들이나 기 발생된 마멸입자에 의한 연삭 마멸임을 알 수 있다. 하중이 작은 경우(약 40N 이하)는 진폭의 크기에 관계없이 돌기들의 변형에 의한 마멸이 지배적이다.

4. 결 론

1. 지르칼로이-4 튜브의 마멸량은 경수중과 공기중에서 실시한 프레팅마멸 실험에서 임계진폭 이상에서는 진폭과 하중의 증가에 따라 마멸량이 증가하지만 경수중에서의 마멸량이 공기속에서 보다 많다.

2. 지르칼로이-4 튜브의 미소진폭(160 μ m 이하) 프레팅마멸 실험에서 하중이 증가하면 40N까지는 마멸량이 증가하지만 하중이 60N이상 증가하면 stick현상에 의해 경수중에서와 공기중에서 공히 프레팅에 의한 마멸량이 감소한다.

3. 지르칼로이-4 튜브 프레팅마멸은 공기중에서 실험한 경우는 모든 진폭에서 비마멸율이 서서히 증가하지만, 경수중에서는 비마멸율이 진폭 200 μ m이하에서 급격히 증가하는 구간이 존재한다.

4. 공기중에서의 마멸면은 대부분 연삭된 면이 관찰되었지만 경수중에서는 진폭 100 μ m 이하에서는 피로에 의한 균열과 박판상의 마멸입자가 주로 관찰되었고 진폭 300 μ m 이상에서는 응착과 연삭마멸면이 관찰되었다.

참고문헌

1. A.Iwabuchi, "Distinct Properties of Fretting Wear", Tribologist(トライボロジスト), Vol. 35, No.6, pp.386~391, 1990.
2. O.Vingsbo and S.Söderborg, "Wear of Materials", ASME, p.885, 1987.
3. Y.Berthier, L.Vincent and M.Godet, "Fretting wear mechanisms and their effects on fretting fatigue", ASME J. of Tribology, Vol. 110, pp.517~524, 1988.
4. K.H.Cho, T.H.Kim, S.S.Kim, "Fretting

- Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube",
Wear, Vol. 219, pp.3~7, 1998.
5. 조광희, 노규철, 김석삼, 조성재, "경수중에서 지르칼로이-4 튜브의 프레팅 마멸특성", 한국윤활학회 춘계학술대회, pp.55~63, 1998.
 6. 윤용구, 임상호, "지르코늄과 그 합금의 특성, 응용 및 제조기술", 대한금속학회지, 제22권, 제3호, pp.211~219, 1984.
 7. A.Iwabuchi, "The Effects of Slip Amplitude and Load in Fretting Wear", Japanese Society of Mechanical Engineers 44-378, pp.692~699
 8. N. J. Fisher, A. B. Chorv, and M. K. Weckwerth, "Experimental Fretting Wear Studies of Steam Generator Materials", J. of Pres. Vessel Tech., Vol. 117, pp.312~320, 1995.
 9. G.M.Hamilton, "Explicit Equations for the Stresses Beneath a Sliding Spherical contact", Proc.Instn. Mech. Engrs, Vol. 197C, pp53~59, 1983.
 10. H.M.Ghasemi, M.J.Furey and C.Kajdas, "Surface temp. and fretting corrosion of steel under conditions of fretting contact", Wear, 162-164, pp.78~83, 1993.