

공기중에서 인코넬-지르칼로이 접촉의 프레팅 마멸특성 Fretting Wear Characteristics of Inconel-Zircaloy Contact in Air

노규철*, 김석삼**

* 경북대학교 기계공학과 대학원

** 경북대학교 기계공학부

Abstract

The fretting wear characteristics of the contact between Zircaloy-4 tube and Inconel 600 tube have investigated. Zircaloy-4 is used for fuel rod in nuclear reactor and Inconel 600 is used for tube in steam generator of nuclear power plant. A fretting wear tester was designed to be suitable for this fretting test. In this study, the number of cycles, slip amplitude and normal load were selected as main factors of fretting wear. This study shows that the wear scar length of Zircaloy-4 and Inconel 600 increases as number of cycles, normal load and slip amplitude increase and the wear scar length of Zircaloy-4 is more longer than that of Inconel 600 due to the surface hardness.

Keyword : Fretting, Zircaloy-4, Inconel 600, Wear scar

1. 서론

최초의 상업용 원자력발전소(PWR)인 미국의 Shippingport 발전소가 1957년 가동되기 시작한 후 원자력이 청정에너지 공급의 주원으로 인정되어 세계 여러 나라에서 원자력발전소를 건설, 운전하고 있다. 근래에 들어서는 국가 총발전량의 반 이상을 원자력에 의존하는 국가도 생기게 되었다.[1] 자원보다는 기술에 크게 의존하는 원자력은 수송과 비축이 용이하며, 이산화탄소와 같은 환경오염 물질의 배출이 없어 환경보존 차원에서도 매우 유리한 에너지원으로 각광을 받고 있다.

이러한 원자력발전소를 건설하고 운영함에 있어 가장 큰 관건이 되고 있는 사항은 발전소의 운전시에 발생할 수 있는

방사성 물질의 유출을 최소화하여 운전자뿐만 아니라 일반대중에 대한 방사선 피해가 최소가 되도록 하고 주변환경을 깨끗한 상태로 보전할 수 있도록 안전성을 확보하는 것이다.

국내에서는 고리 1호기가 가동된 1978년부터 1996년 9월까지 11기의 원자로에서 모두 288회의 고장이 발생한 것으로 알려져 있다. 그러한 방사능 관련 사고의 대부분은 크게 두 가지 원인으로 나누어 볼 수 있다.

첫째는 증기발생기 내에서 1차계통 냉각수의 흐름에 의한 증기발생기 튜브의 미세 진동으로 인해 발생하는 튜브 지지격자와 튜브사이의 충격과 미끄럼운동에 의한 튜브의 손상[2-5]이다.

둘째는 원자로 내에서 핵연료봉과 지지

격자 사이에서 발생하는 미세진동에 의한 핵연료봉의 손상[6-7]이다. 특히, 핵연료봉의 손상은 방사능 유출과 직결되기 때문에 원자력 발전소의 안정성에 있어 매우 중대한 문제이다. 핵연료봉은 노내에서 연소 중에 직경이 감소하며 이에 따라 봉을 지지하고 있는 그리드와의 간격 증대로 지지격자의 스프링 힘이 약해져 프레팅 현상이 발생하게 된다.[7]

OECD에서 규정한 프레팅이란 “작은 진폭을 갖는 두 표면사이에서 반복운동에 의해 발생하는 마멸손상”이다. 즉 프레팅은 일반적으로 수백 μm 이내의 미소한 거리를 상대 운동하는 재료들의 접촉계면에서 발생하는 표면손상을 말한다.[8-10] 이러한 프레팅은 매우 작은 접촉면적 및 미끄럼거리에서 여러 가지 마멸 기구들의 복합적인 작용으로 발생하기 때문에 해석하기가 매우 어렵다.[11-14]

Beard[13], Collins[14]는 50가지 이상이나 되는 인자들의 복합적인 작용으로 프레팅 과정이 이루어지기 때문에 어떠한 인자들이 어떻게 얼마만큼 프레팅 손상에 기여하게 되는지를 예측하기가 곤란하므로 프레팅으로 말미암아 발생하는 손상들을 규명·예방하기 위한 일반적인 방법을 제시하기는 어렵다고 보고한 바 있다.

그러므로, 프레팅 연구에서 모든 인자들의 작용을 예측한다는 것은 거의 불가능하므로 지금까지 제시된 연구결과들을 보면 진폭, 하중, 온도, 환경, 주파수 등 프레팅 마멸에 영향을 주는 인자중 주된 관련인자들만을 선별하여 여러 가지 재질에 대해서 연구가 수행되고 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 원자력 발전소에서 핵연료봉으로 사용되고 있는 지

르칼로이(Zircaloy-4) 튜브와 지지격자 중 재질이 다른 하단의 지지격자와 유사한 재질의 인코넬(Inconel 600) 튜브 간 접촉의 프레팅 실험을 통한 마멸특성을 연구, 분석하고자 한다.

2. 실험

2-1 실험장치

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같다. 두 시편의 접촉하중은 Screw식으로 주어지고, 진폭은 편심 플레이트의 조정에 의해 결정된다.[6]

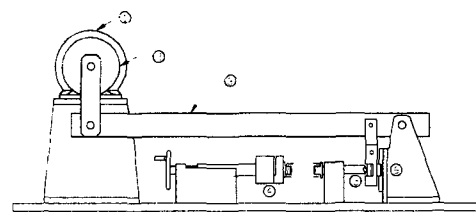


Fig. 1 Schematic diagram of fretting wear tester

- | | |
|------------------|-------------------|
| ① Motor | ② Eccentric plate |
| ③ Vibrating beam | ④ Load cell |
| ⑤ Specimen | ⑥ LM guide |

2.2 시험편

원자력발전소 핵연료봉은 11개의 지지격자(spacer grid)에 의해 등 간격으로 지지되어 있는데, 가장 아래의 지지격자만 인코넬이며 나머지는 핵연료봉과 동일한 지르칼로이-4이다. 실제 원자로에서 인코넬은 고정되어 있고 지르칼로이 튜브가 진동한다고 가정을 해서 인코넬 튜브를 고정시편으로, 지르칼로이 튜브를 이동시편으로 정해서 실험을 하였다.

실험 전에 시험편의 표면 거칠기를 측정(Surftest 500)한 결과, 지르칼로이-4 튜

브는 $0.6\mu\text{m}$, 인코넬 600 튜브는 $0.8\mu\text{m}$ 의 R_{max} 값을 나타내었다. 이동시편 (Zircaloy-4 tube)과 고정시편(Inconel 600 tube)의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2에 나타난 바와 같다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of Zircaloy-4 tube

Element	Sn	Fe	Cr	C	O	Zr
Composition (wt%)	1.25	0.21	0.11	0.0153	0.0134	balance
Mechanical Properties	At room temperature					
	UTS (MPa)		696			
	0.2%YS (MPa)		517			
	Elong. 5cm, %		24			

Table 2 Chemical composition and mechanical properties of Inconel 600 tube

Element	Cr	Fe	Mn	Al	Ti	Ni
Composition (wt%)	15.42~15.54	8.29~8.32	0.20~0.21	0.14	0.3	75.33~75.48
Mechanical Properties	At room temperature					
	UTS (MPa)		552			
	0.2%YS (MPa)		241			
	Elong. 5cm, %		30			

2.3 실험조건

실제 운전조건 부근의 미끄럼 거리, 하중 및 왕복수 등의 인자들이 프레팅 마멸에 미치는 영향을 조사하기 위해 미끄럼 거리는 $40\mu\text{m}$, $70\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $200\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$ 의 5단계, 하중은 20N, 40N, 60N, 80N, 100N의 5단계로 구분하여 왕복수 10^5 사이클, 2×10^5 사이클, 3×10^5 사이클에 대해서 각각 조합하여 실험을 실시하였다. 이 때, 이상의 왕복수들을 시간으로 환산하면 각각 166.7분, 333.3분, 500분이 된다.

3. 실험결과와 고찰

3.1 왕복수 증가에 대한 마멸길이의 변화

Fig.2와 Fig.3은 각각의 미끄럼 거리에서 왕복수의 증가에 따른 마멸길이의 변화를 나타낸 그림으로 왕복수가 증가할수록 지르칼로이-4와 인코넬 600의 마멸길이가 모두 커짐을 보여 주고 있다. 그리고 동일 왕복수에서도 미끄럼 거리가 클수록 지르칼로이-4와 인코넬 600의 마멸길이가 모두 크다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 왕복수와 미끄럼 거리가 증가할수록 전체적인 접촉면적이 증가하게 되어 마멸길이가 커지는 것으로 보인다.

그림에서 보면 동일한 조건에서 지르칼로이-4의 마멸길이가 인코넬 600보다 조금씩 크지만, 왕복수 증가에 따른 마멸길이의 변화율은 두 재료 모두 유사한 것을 알 수 있다. 지르칼로이-4의 마멸길이가 인코넬 600보다 더 큰 것은 지르칼로이-4의 경도가 인코넬 600보다 작기 때문인 것으로 생각된다.[15] 변화율에 있어서 두 재료가 유사한 것은 두 재료에 동일한 마멸기구가 작용한 때문인 것으로 보인다.

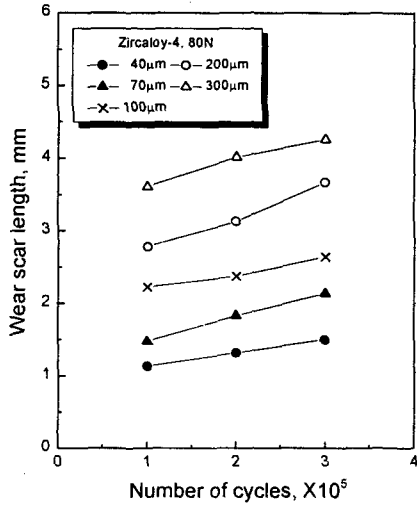


Fig.2 Wear scar length vs. number of cycles at 80N (Zircaloy-4)

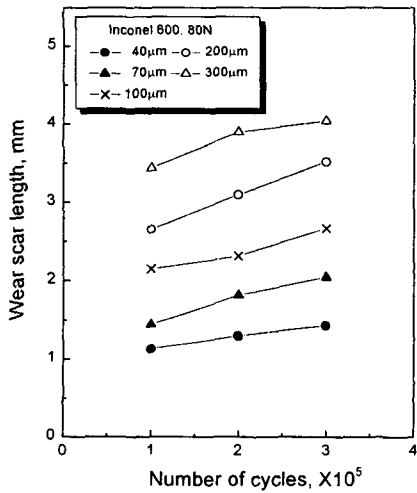


Fig.3 Wear scar length vs. number of cycles at 80N (Inconel 600)

3.2 미끄럼 진폭 증가에 대한 마멸길이의 변화

Fig.4와 Fig.5는 각각의 하중에서 미끄럼 진폭의 증가에 따른 마멸길이의 변화를 나타낸 그림으로 수직하중의 크기에

따라 다소 차이는 있지만 미끄럼 진폭이 증가할수록 마멸길이가 급격히 커짐을 알 수 있다. 지르칼로이-4와 인코넬 600의 마멸길이가 모두 커짐을 보여 주고 있다. 이는 미끄럼 진폭의 증가가 전체 미끄럼 거리의 증가를 뜻할 뿐만 아니라, 두 재료들

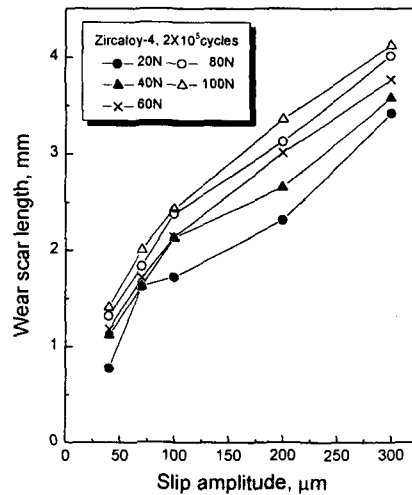


Fig.4 Wear scar length vs. slip amplitude at 2×10^5 cycles (Zircaloy-4)

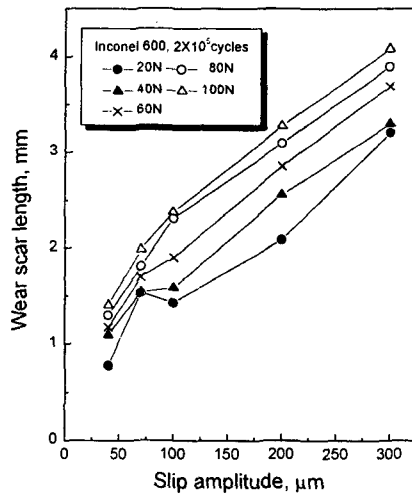


Fig.5 Wear scar length vs. slip amplitude at 2×10^5 cycles (Inconel 600)

의 접촉면적과 직결되기 때문인 것으로 보인다. 앞의 3.1에서와 마찬가지로 동일한 조건에서 지르칼로이-4의 마멸길이가 인코넬 600보다 조금씩 크지만, 그 변화율은 지르칼로이-4와 인코넬 600 모두 유사한 것을 알 수 있다.

3.3 수직하중의 증가에 대한 마멸길이의 변화

Fig. 6과 Fig. 7은 각각의 미끄럼 진폭에서 수직하중의 증가에 따른 마멸길이의 변화를 나타낸 그림으로 수직하중이 증가할수록 마멸길이가 커짐을 알 수 있다. 이는 수직하중의 증가로 두 재료간의 접촉면적이 증가하게 되어 마멸길이가 커지는 것으로 보인다. Fig. 7의 경우, 수직하중 20N으로 프레팅 실험을 했을 때 미끄럼 진폭 100 μ m일 때가 70 μ m일 때 보다 마멸길이가 작게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 이는 인코넬 600의 기계적 성질이 튜브 전체에 균등하게 분포되어 있지 않고 불

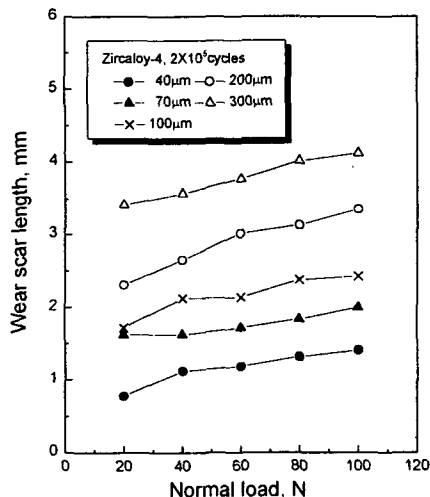


Fig. 6 Wear scar length vs. normal load at 2×10^5 cycles (Zircaloy-4)

균일성을 가지기 때문인 것으로 보인다.

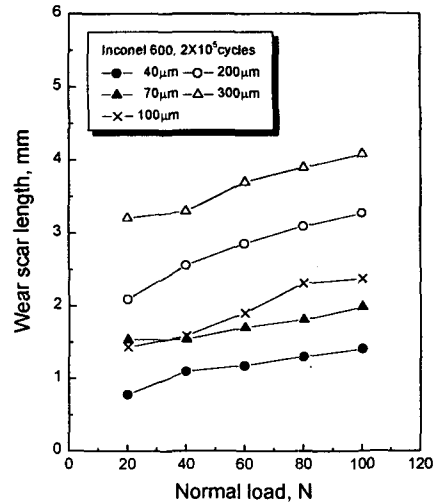


Fig. 7 Wear scar length vs. normal load at 2×10^5 cycles (Inconel 600)

3.4 프레팅 마멸면의 미시적 관찰

프레팅의 마멸 단계는 일반적으로 스틱 (stick), 부분 슬립 (partial slip), 전체 슬립 (gross slip)의 3단계로 구분할 수 있다. 스틱 단계란 프레팅의 초기 단계로서 마멸이 거의 일어나지 않는 단계를 말하며, 부분 슬립의 단계는 스틱과 슬립이 공존하는 단계로서 스틱 영역에서는 마멸이 거의 발생되지 않고 슬립 영역에서 주로 마멸이 발생된다. 이 단계에서는 스틱과 슬립 영역의 경계부근에서 크랙생성이 활발하다. 전체 슬립의 단계는 스틱된 영역이 없어지고 마멸면 전체에서 슬립이 발생하는 단계로서 마멸량이 급격히 증가한다.[16]

이러한 프레팅의 마멸단계와 마멸면의 미시적 형상을 조사하기 위해 SEM과 표면 거칠기 측정기(Surftest 500)를 이용했다. Fig. 8 (a)는 미끄럼 진폭 40 μ m, 수직

하중 100N으로 3×10^5 사이클 동안 프레팅 마멸 실험한 후 지르칼로이-4의 마멸면을 100배 확대한 사진이다. 이 사진은 진폭이 작고 하중이 큰 경우에 발생하는 부분 슬립의 마멸 단면 형상을 잘 보여 주고 있다. 접촉형태가 점접촉임을 고려해 볼 때 접촉면의 중심부에서 더 많은 마멸이 발생할 것으로 예상되지만, 사진에서 보면 중심부 보다는 오히려 가장자리 부분에서 더 많은 마멸이 발생함을 볼 수 있다.

Fig. 8 (b)는 표면 거칠기 측정기로 (a)의 마멸면을 측정한 그림이다. 그림에서 보듯이 마멸이 접촉면 전체에서 골고루

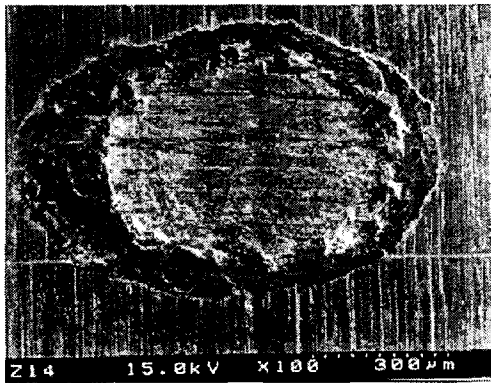


Fig. 8 (a) SEM photograph of a worn surface(Zircaloy-4, $40\mu\text{m}$, 100N, 3×10^5 cycles)



Fig. 8 (b) Profile curve of a worn surface (Zircaloy-4, $40\mu\text{m}$, 100N, 3×10^5 cycles)

발생하는 것이 아니라 가운데 보다는 가장자리 부분에서 더 많이 발생하는 것을 알 수 있다. Vingsbo[16] 등에 의하면 스틱과 슬립의 경계 영역에서 많은 크랙들이 발생하는 것으로 보고하고 있는데, Fig. 8의 마멸면에서도 마멸이 접촉면의 가장자리에서부터 중심부쪽으로 진행하기 때문에 스틱과 슬립의 경계영역에서 많은 표면손상이 있는 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 인코넬-지르칼로이 접촉의 프레팅 마멸특성을 평가하기 위해 가압경수형 원자로에서 핵연료봉재로 사용되고 있는 지르칼로이-4 튜브와 하단의 지지격자와 유사한 재질의 인코넬 600 튜브를 사용하여 상온·상압하에서 무윤활 상태로 프레팅 마멸실험을 수행하였다.

실험결과, 왕복수와 수직하중이 증가할수록 지르칼로이-4와 인코넬 600의 마멸 길이가 모두 완만하게 커짐을 알 수 있었다. 미끄럼 진폭의 경우는 그 값이 증가할수록 지르칼로이-4와 인코넬 600의 마멸 길이가 모두 급격하게 커짐을 알 수 있었다.

지르칼로이-4의 마멸길이가 인코넬 600 보다 크지만, 그 변화율은 유사한 것으로 보아 두 재료에 동일한 마멸기구가 작용하는 것으로 보인다. 지르칼로이-4와 인코넬 600 접촉의 프레팅 마멸에는 스틱(stick), 부분 슬립(partial slip), 전체 슬립(gross slip)의 단계가 존재함이 확인되었다.

참고문헌

- [1]원자력산업, KAIF News Letter, No. 582, 1998.
- [2]Fisher, N. J., Chow, A. B. and Wec-kwerth, M. K., "Experimental Fretting-Wear Studies of Steam Generator Materials", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 117, pp.312-320, 1995.
- [3]Ko, P. L., "Heat Exchanger Tube Fretting Wear : Review and Application to Design", Journal of Tribology, Vol. 107, pp.149-156, 1985.
- [4]Cha, J. H., Wambsganss, M. W. and Jendrzejczyk, J. A., "Experimental Study on Impact/Fretting Wear in Heat Exchanger Tubes", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 109, pp.265-274, 1987.
- [5]Ko, P. L., "Experimental Studies of Tube Frettings in Steam Generators and Heat Exchangers", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 101, pp.125-133, 1979.
- [6]Cho, K. H., Kim, T. H. and Kim, S. S., "Fretting Wear Characteristics of Zircaloy-4 Tube", Wear, Vol. 219, pp.3-7, 1998.
- [7]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.
- [8]OECD, "Glossary of Terms and Definitions in the Field of Friction, Wear, and Lubrication", OECD Publications, Paris, 1969.
- [9]Waterhouse, R. B., "Wear of Materials-1981", ASME, 17, 1981.
- [10]Vingsbo, O. and Söderborg, S., "Wear of Materials-1987", ASME, 885, 1987.
- [11]Vincent, L., Berthier, Y., Dubourg, M. C. and Godet, M., "Mechanics and Materials in Fretting", Wear, Vol. 153, pp.135-148, 1992.
- [12]岩淵 明, "フレッチング摩耗の特異性について", トライボロジスト, 35, 6, pp.386-391, 1990.
- [13]Beard, J., "An Investigation into the Mechanism of Fretting Fatigue", Ph. D. Thesis, Univ. of Salford, 1982.
- [14]Collins, J. A., "A Study of the Phenomenon of Fretting Fatigue with Emphasis on Stress Field Effects", Dissertation, Ohio State Univ., 1963.
- [15]Iwabuchi, A., "The Effects of Slip Amplitude and Load in Fretting Wear", Japanese Society of Mechanical Engineers, Vol. 44, No. 378, pp.692-699, 1978.
- [16]Vingsbo, Olof, "On Fretting Maps", Wear, Vol. 126, pp.131-147, 1988.