

## SUS 304에 대한 Inconel 600의 Sliding 마모거동

김 훈 · 최종현 · 김준기\* · 박기성\*\* · 김승태\*\* · 김선진†

한양대학교 재료공학부

\*한국생산기술연구원

\*\*한전기공(주) 기술개발원

### The Sliding Wear Behavior of Inconel 600 Mated with SUS 304

Hun Kim, Jong-hyun Choi, Jun-ki Kim\*, Ki-sung Park\*\*, Seung-tae Kim\*\* and Seon-jin Kim†

Division of Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul

\*Korea Institute of Industrial Technology Korea

\*\*Plant Service & Engineering, Technology Department Board

(2001년 7월 12일 받음, 2001년 9월 18일 최종수정본 받음)

**Abstract** The steam generator tubes of power plant damaged by sliding wear due to flow-induced motion of foreign object. Amount of wear have been predicted by Archard's wear equation until now. However, there are large error and low reliability, because this equation regards wear coefficient(k) as constant. The sliding wear tests have been performed at room temperature to examine parameters of wear (wear distance, contact stress). The steam generator tube material for wear test is used Inconel 600 and foreign object material is used 304 austenite stainless steel. The sliding wear tests show that the amount of wear is not linearly proportional to the wear distance(for 304 austenite stainless steel). According to experimental result, wear coefficient is not constant k but function k(s) of wear distance. The newly modified wear predictive equation  $V = k(s)F$  have small error and high reliability.

**Key words** : wear, Archard's equation, Inconel 600, steam generator tube

### 1. 서 론

원자력발전소는 핵반응로, 가압기, 증기발생기 1차측을 포함하는 1차계통과 증기 터어빈, 복수기, 증기발생기 2차측을 포함하는 2차계통으로 구분된다. 이중 증기발생기는 1차계통과 2차계통을 연결하는 열교환 장치로, 원전 한 호기당 2~4개가 장착되어 있으며 각각의 증기발생기에는 3000~8000개의 전열관이 설치되어 있다. 증기발생기에서는 약 1mm 두께의 전열관벽을 경계로 내부에서는 압력이 2250psi인 288~330℃의 1차측 냉각수가 외부에서는 압력이 770~1050psi인 225~295℃의 2차측 냉각수가 흐르고 있다. 이러한 전열관이 손상되는 경우에는 방사성물질을 함유한 1차측 냉각수가 2차계통으로 유출되어 환경오염을 유발시킬 위험이 있다.

증기발생기 전열관의 손상원인은 크게 부식에 의한 손상과 마모에 의한 손상으로 분류되고 있다. 마모에 의한 증기발생기 전열관의 손상원인으로는 전열관과 TSP(Tube Support Plate) 및 AVB(Anti-Vibration Bar)간의 접촉부에서 나타나는 fretting 마모와 이물질의 운동에 의한 마모가 보고되어 있다.<sup>1)</sup> 이중 증기발생기 전열관의 fretting 마모에 대해서는 국내외에서 많은 연구가 이루어져 왔으나, 이물질에 의한 마모손상 연구는 거의 없는 상태이다.

Fretting 마모와 달리 이물질에 의한 마모는 이물질의 재질·형태·크기 등이 다양하여 마모거동을 예측하기가 쉽지 않지만 이물질에 의한 마모시 비교적 빠른 시일내에 큰 손상을 가져온다는 사례가 보고된 바가 있어<sup>1)</sup> 문제의 심각성이 크다고 할 수 있다.

현재 원전 증기발생기 전열관의 fretting 마모를 예측에 사용되고 있는 마모예측식은 기본적으로 응착마모(adhesive wear)에 대한 Archard's 마모식에 기초하고 있다. 국외에서는 Archard's 마모식을 전열관 마모에 적용하기 위해 forcing function과 work rate 등의 개념을 도입하여 사용하고 있으나 현재까지 연구된 바에 의하면 이러한 Archard's 마모식을 이용한 마모예측시 오차가 약 50% 정도로 매우 큰 것으로 보고되고 있어 보다 정밀한 마모예측 방법이 요구되고 있다.<sup>2)</sup> 본 연구에서는 이물질에 의한 전열관의 마모거동을 기존의 마모예측식에 비해 보다 정확하게 예측할 수 있는 마모예측 모델을 개발하기 위하여 접촉응력, 마모거리등의 여러 마모변수가 마모계수에 미치는 영향을 sliding 마모시험을 통해 조사하였다. 대상 전열관 재질은 현재 대부분 원전에서 사용되고 있는 Inconel 600을, 이물질 재질로는 이물질로 가장 많이 발견되는 304 austenitic stainless steel를 이용하였다.

† alloylab@hanyang.ac.kr

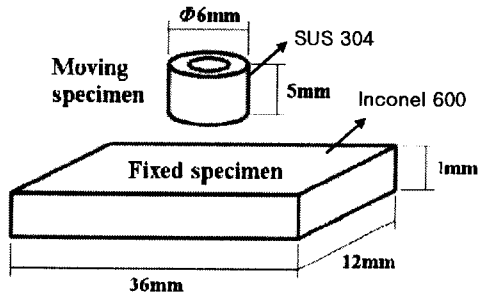


Fig. 1. Specimens of the sliding wear test.

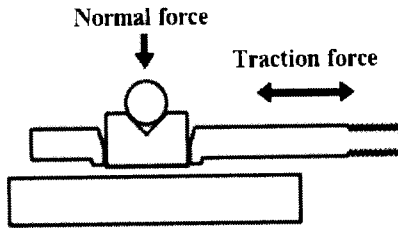


Fig. 2. Schematic diagram of the sliding wear test.

2. 실험 방법

Sliding 마모시험은 Fig. 1과 같이 실제 원전 증기발생기 전열관으로 사용되는 Inconel 600 tube를 rolling machine으로 펴서 고정시편으로 사용하였고 일반적인 304 austenitic stainless steel 재질을 운동시편 (직경 6mm)으로 하였다. 표면 조도는 초기 마모시에만 영향을 끼치는 것으로 알려져 있으나<sup>3)</sup> 모든 시편의 조건을 동일하게 하기 위해서 emery paper #2000까지 polishing한 후 시험을 수행하였다.

Sliding 마모시험 장치는 Fig. 2와 같이 PLINT사의 TE77 high frequency reciprocating friction machine을 사용하였다. Sliding 마모시험은 시험도중 접촉 단면적을 일정하게 유지하는 특징이 있으며, 접촉응력이 접촉면에 고르게 전달되게 하기 위해 하중전달 매개체로 2/16 inch stainless ball을 사용하였고, traction force 축과 접촉면 간의 거리가 최소가 되도록 운동시편 홀더를 설계하였다.

운동시편의 운동거리는 9mm이며 평균 24mm/sec로 최대 마모거리 1555m까지 실험을 수행하였다. 접촉응력은 0.2~1.2MPa까지 단계적으로 높여가며 실험하였고 온도는 상온에서 실시하였다.

마모량의 측정은 실험 후 무게손실을 측정하여 부피 (mm<sup>3</sup>)로 환산하였다. 그리고 접촉응력과 마모거리에 대한 마모량의 관계를 고찰한 후, Achard's 마모식을 이용하여 마모량을 예측해보고, 또한 마모계수를 마모 거리의 함수로 보는 개선된 Achard's 마모식으로 마모량을 예측하여 오차범위와 신뢰도를 비교하여 보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Inconel 600의 마모거동과 Achard's 마모식

Fig. 3에 304 austenitic stainless steel에 대한 Inconel

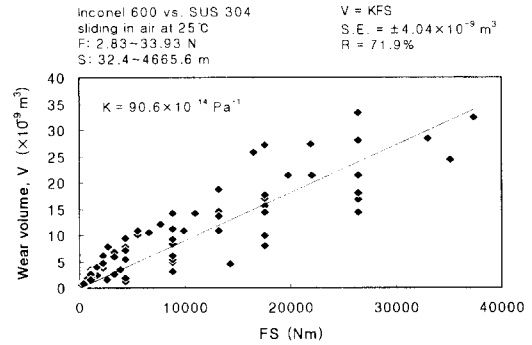


Fig. 3. The wear coefficient of Archard's equation obtained from sliding wear test at various contact stress and wear distance in air environment.

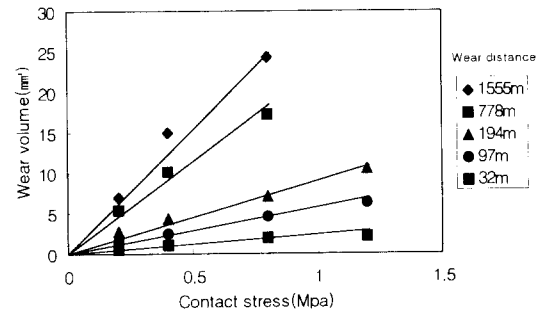


Fig. 4. The wear volume as a function of contact stress during the sliding wear test in air.

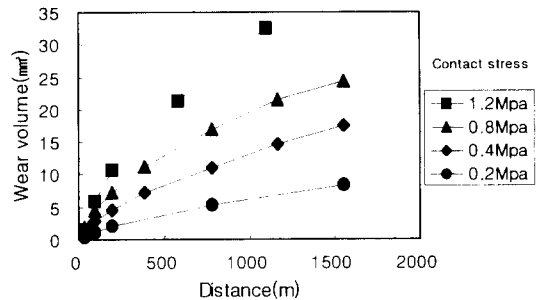


Fig. 5. The wear volume as a function of wear distance during the sliding wear test in air.

600의 마모 손실량을  $F$  (접촉응력)  $\times$   $S$  (마모거리)에 대한 함수로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이  $F$  (접촉응력)  $\times$   $S$  (마모거리)가 증가함에 따라 마모량은 증가하였다. 여기에 Achard's 마모식을 적용할 경우에는  $\pm 4.04 \times 10^{-9} \text{m}^3$ 의 표준오차와 71.9%의 신뢰도를 나타내었다. 그러나 이러한 Achard's 마모식은 에너지 투입량에 따라 마모량이 증가한다는 단순한 의미를 내포하고 있기 때문에 큰 오차범위와 낮은 신뢰도를 갖는 것으로 생각된다.

3.2 접촉응력에 따른 마모량

Achard's 마모식에서 접촉응력에 따른 마모량은 직선적인 비례관계를 갖는다는 것을 가정하고 있다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 본 실험에서도 각각의 일정한 마모 거리에 대해서 접촉응력에 따른 Inconel 600의 마모량은 직선적으로 증가하는 관계를 나타내었다.

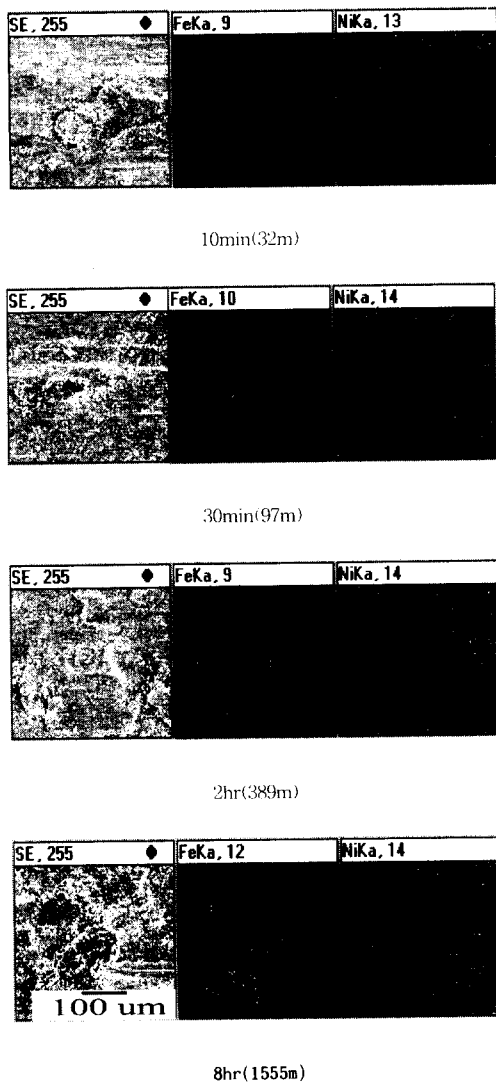


Fig. 6.EDS mapping analysis for the wear surface of Inconel 600 after sliding wear test at various wear distance.

### 3.3 마모거리에 따른 마모량

Achard's 마모식에서는 마모거리에 따른 마모량을 직선적인 비례관계로 가정하고 있다. 그러나 Fig. 5에서와 같이 일정 하중에 대해서 각각의 마모거리에 따른 마모량은 직선적인 비례관계에서 벗어나는 것을 알 수 있다. 이러한 경우 마모 거리와 마모량의 관계를 선형비례로 보는 기존의 식을 그대로 사용한다면 큰 예측오차가 발생할 것으로 예상된다. 이와 같이 마모거리에 따라 마모량이 직선적인 관계에서 벗어나는 이유에는 material transfer의 영향과 가공경화의 영향, 마모 debris의 영향, 상변태의 영향등을 생각해 볼 수 있다. 따라서 다음에서 그 영향들을 고찰하고자 하였다.

#### 3.3.1 Material transfer의 영향

Inconel 600의 마모 표면을 마모 거리에 따라 EDS mapping한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 마모 거리가 32m, 97m인 경우에는 Inconel 600의 Ni와 Fe성분이 고르게 분포하고 304 austenitic stainless steel의 Fe성분이 Inconel 600쪽으로 transfer된 흔적이 거의 없으나, 마모 거리에 따른 마모량이 직선적인 비례관계에서 벗어나는 구

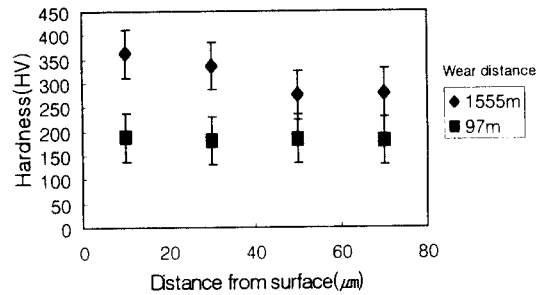


Fig. 7.The variation of micro-hardness of Inconel 600 beneath the wear surface after sliding wear test in air environment.

간인 389m, 1555m의 마모거리에서는 304 austenitic stainless steel의 Fe성분이 Inconel 600쪽으로 transfer된 것을 볼 수 있다. 이와 같은 material transfer는 마모로 인한 무게 손실을 감소시키고, 순수 metal 끼리의 접촉을 방해하는 요소로 작용하리라 생각된다. 이와 같은 현상으로 인하여 마모 거리가 증가할수록 마모거리에 따른 마모량이 직선적인 비례관계에서 벗어나는 것으로 생각된다.

#### 3.3.2 가공경화의 영향

0.4Mpa에서 각각 30분(97m), 8시간(1555m) 마모시험을 한 후의 Inconel 600의 마모 표면으로부터 깊이에 따른 미소경도 값을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 마모 초기(97m의 마모거리)에는 마모 표면과 matrix의 경도값이 200Hv로 비슷하지만, 마모 후기(1555m의 마모거리)에는 마모 표면이 matrix에 비해 경도값이 200Hv에서 350Hv로 크게 증가한 것으로 보아 가공경화가 발생한 것으로 생각된다. 이러한 가공경화는 마모 거리가 증가함에 따라 마모량의 증가율이 마모초기에 비해 감소하는 원인이 되며, 따라서 마모량이 마모 거리에 대해 직선적인 비례관계에서 벗어나는 것으로 생각된다.

#### 3.3.3 Debris의 영향

마모 거리가 짧은 구간과 마모량이 마모거리에 따라 직선적으로 벗어나는 마모 거리인 389m, 1555m구간에서 마모 debris를 광학 현미경으로 관찰한 사진을 Fig. 8에 나타내었다. 마모 초기에 비해 마모 후기로 갈수록 debris의 크기가 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 Table. 1에 마모 거리에 따른 debris의 미소 경도값을 나타내었는데 마모거리가 증가할수록 미소 경도값은 증가함을 알 수 있다. 즉 마모거리가 긴 구간에서의 작은 debris들은 비교적 큰 debris에 비해 마모 track에 trap되기 쉬우므로, 마모 후기에는 작은 debris들이 roller bearing의 원리 혹은 adhesion을 감소시키는등의 이유로 인해서 마모량이 줄어드는 것으로 생각된다."

#### 3.3.4 상변태의 영향

Fig. 9는 마모거리에 따른 debris를 X-ray diffractometer로 분석한 결과를 나타내었다. 8시간(1555m) 마모 시험후의 debris에서는 마모 초기 시편의 debris에서 관찰할 수 없었던 Fe α 상의 (110), (211)면에 해당하는 peak가 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 상변태의 결과는 앞서 고찰한 마모거리 증가에 따른 마모량의 감소 현상을

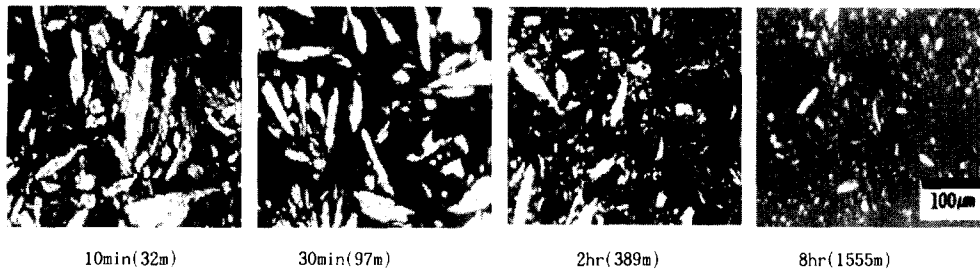


Fig. 8. The optical microscope analysis of debris after sliding wear test at various wear distance.

Table. 1. The variation of micro-hardness of debris after sliding wear test at various wear distance.

Wear distance(m)	Micro-hardness(Hv)
32	269
97	274
389	286
1555	291

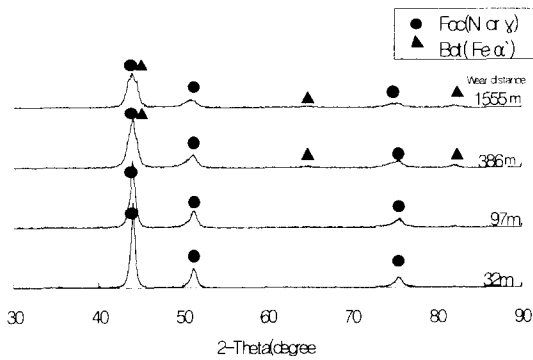


Fig. 9. XRD analysis of debris after sliding wear test at various wear distance.

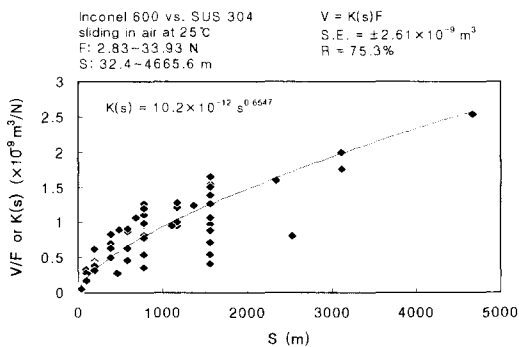


Fig. 10. The wear coefficient of newly proposed wear predictive equation obtained from sliding wear test at various contact stress and wear distance in air environment.

설명할 수 있는 것으로서, 외부에서 가해지는 에너지가 상변태의 구동력으로 작용하여 흡수되므로서 마모량의 감소를 가져왔다고 볼 수 있으며 또한 fcc→bct로의 구조 변화에 따른 마모표면의 강화에 기인된 마모량의 감소를 고려할 수 있겠다.

3.4 마모 예측식의 수정

이와 같이 마모 거리의 증가에 따라 material transfer,

마모표면의 가공경화, 마모 debris의 변화, 상변태가 발생함을 알 수 있었다. 이를 통하여 마모 계수를 상수가 아닌 마모 거리에 따른 함수로 고려하였으며, 마모 예측식의 오차를 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Fig. 3, Fig 11과 같이 대기중 sliding마모시험 결과들을 통하여 SAS (statistical analysis system)의 단일 회귀 분석법<sup>6)</sup>을 통해 마모계수를 구한 결과, Achard's 마모식에서 가정한 것처럼 마모계수를 상수로 가정한 경우에는 마모계수(K) =  $90.6 \times 10^{-14} \text{Pa}$ , 표준오차 =  $\pm 4.04 \times 10^{-9} \text{m}^3$ , 신뢰도 = 71.9%를 보였다. 반면 마모 계수를 마모거리의 함수로 본 경우 마모계수 K (s)는  $10.2 \times 10^{-12} \text{s}^{0.6547}$ 와 같이 마모거리의 누승의 형태가 가장 높은 신뢰도와 작은 표준 오차를 보였으며, 그 값은 표준오차 =  $\pm 2.6 \times 10^{-9} \text{m}^3$  신뢰도 = 75.3%로 나타났다. 결과적으로 마모계수를 마모 거리에 따른 함수로 나타낸 개선된 마모 예측식을 도입함으로써 이물질에 의한 전열관의 마모거동 예측에서 표준오차의 감소와 신뢰도의 향상을 기대할 수 있었다.

4. 결 론

원자력 발전소 증기발생기 전열관의 이물질에 의한 마모 손상거동을 조사하기 위하여, 전열관재료 Inconel 600과 304 austenitic stainless steel를 이용한 sliding마모시험으로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

기존의 Achard's 마모식에 기인한 forcing function이나 work rate등의 개념을 사용하여 마모 예측을 할 경우 50%정도의 큰 오차를 보이며, 이를 이용하여 증기발생기의 마모 예측을 하는 경우에는 표준오차가  $\pm 4.04 \times 10^{-9} \text{m}^3$ 로 상당히 비효율적으로 나타났다. 그러나 대기중 sliding마모 시험을 통하여 마모인자들을 독립적으로 고찰한 결과에 따르면 마모량은 마모 거리에 대해 직선적인 비례관계에서 벗어났으며, 이는 Achard's 마모식에 기초하여 마모 예측을 하는 경우에 큰 오차를 발생시키는 원인으로 작용하였다.

따라서, 이를 개선하기 위하여 least-square-method에 기초한 SAS (statistical analysis system)의 단일 회귀 분석법을 사용하여 마모 계수를  $K(S) = 10.2 \times 10^{-12} \text{s}^{0.6547}$ 과 같이 마모거리의 누승의 형태로 나타내었으며, 이를 이용한 마모 예측식은 표준오차가  $\pm 4.04 \times 10^{-9} \text{m}^3$ 에서  $\pm 2.6 \times 10^{-9} \text{m}^3$ 로 감소하고, 신뢰도는 71.9%에서 75.3%로 향상되었다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 중 · 장기 계획사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Regulatory Technical Report on the Steam Generator Safety of Nuclear Power Plants ; KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY, 104 (1999).
2. N.J. Fisher A.B. Chow M.K. ; Transaction of the ASME, Experimental Fretting-Wear Studies of Steam Generator Materials., 117, 312~320, NOVEMBER (1995).
3. ERNEST RABINOWICZ ; Friction and Wear of materials ; second edition ; PP177 ~ 179 ; A Wiley - Interscience Publication JOHN WILEY & SONS, INC.
4. R. WARD ; Wear ; 15 ; pp423~434 ; 1970 ; A comparison of reciprocating and continuous sliding wear ; International Research and development Co. Ltd. ; Fossway, Newcastle-upon-Tyne, 6 (Gt. Britain).
5. P.L. Ko ; Atomic Energy of Canada Limited ; AECL-8272 ; A BRIEF REVIEW OF TUBE FRETTING-WEAR IN HEAT EXCHANGERS. ; Chalk River Nuclear Laboratories ; Chalk River Ontario Canada KOJ 1J0 ; 1984 March.
6. 홍 중 선, 통계자료 분석, 탐진
7. Jiaren Jiang, F. H. Stott, M. M. Stack. ; WEAR ; 181-183, 20-31 (1995).