

인코넬 690 증기발생기 세관의 고온 마모 거동

High Temperature Wear Behavior of Inconel 690 Steam Generator tube

홍진기, 김인섭, 김형남*, 장기상*

한국과학기술원 원자력공학과, *한국전력공사 전력연구원

Abstract Flow induced vibration in steam generators has caused dynamic interactions between tubes and contacting materials resulting in fretting wear . Series of experiments have been performed to examine the wear properties of Inconel 690 steam generator tubes in various environmental conditions. For the present study, the test rig was designed to examine the fretting wear and rolling wear properties in high temperature(room temperature - 290°C) water. The test was performed at constant applied load and sliding distance to investigate the effect of test temperature on wear properties of the steam generator tube materials. To investigate the wear mechanism of material, the worn was observed using scanning electron microscopy. The weight loss increase at higher test temperature was caused by the decrease of water viscosity and the mechanical property change of tube material. The mechanical property changes of steam generator tube material, such as decrease of hardness or yield stress in the high temperature tests. From the SEM observation of worn surfaces, the severe wear scars were observed in specimens tested at the higher temperature.

key word : steam generator, Inconel 690, wear, mechanical property.

1. 서론

원자력발전소의 매우 많은 구성요소 중 얇고 긴 형태의 구조물이 유체에 의한 진동에 노출되어 있다. 더구나 설계 및 가동조건에 따라 얇고 긴 세관과 지지판사이의 틈이 존재하게 되므로 마모 및 고주기 피로에 취약해진다. 이러한 마모의 위험은 세관에서만 일어나는게 아니라 원자로 노심의 제어봉관 같은 곳에서도 일어날 수가 있다. 즉 원자력발전소의 내부는 항상 고온 고압

의 유체에 의한 진동이 항상 존재하며 이에 대한 설계과정에서의 충분한 고려가 필요하다.

원자력발전소 증기발생기 세관은 고온 고압의 유체에 의한 진동으로 인해 세관과 세관 지지판 사이의 상대적인 운동에 의해 마모 및 마손, 그리고 피로 현상이 일어난다. 가동경험으로 볼 때 매우 많은 국내외 증기 발생기에서 이러한 현상이 발생하여 원자력발전소의 가동률을 현저히 감소시키어 왔다

증기발생기 내부는 그 형태에 따라 다소 차이는 있으나 고온/고압 환경 하에서 가동되고 있다. 또한 원자력발전소에서의 증기 발생기 고유의 역할 수행으로 인해 내부는 매우 빠른 유체의 흐름이 일어나고 있다. 이에 따라 증기발생기 상부의 U-자관 영역과 세관 지지판에서 유체에 의한 진동이 발생한다 [1, 2].

마모는 접촉하고 있는 물체들의 주기적이고 반복적인 상호 운동에 의해서 발생하며 이러한 반복적인 상호 운동의 결과로 물체의 표면 손실 및 손상으로 정의 된다. 특히 프레팅 마모의 경우 일반적인 슬라이딩 마모와는 접촉 물체의 상대적 운동 변위의 크기에 의해서 구분되며 원자력발전소 증기발생기의 유체유발진동에 의해서 일어나는 마모 현상은 슬라이딩과 충격 두 종류의 운동이 모두 일어나는 충격프레팅 마모이다 [3].

최근, 증기발생기 2차측에 내부구조물과 손 및 작업자의 부주의 등으로 인하여 유입된 금속성 물질이 증기발생기 내부의 유체 흐름으로 인한 유체유발진동으로 인하여 세관과 지지구조물 사이에서 일으켜 세관의 전전성을 위협하는 일이 빈번히 발생하고 있다. 이러한 증기발생기 2차측 내 잔류물질에 의한 마모는 기존의 세관과 지지구조물 사이에서 발생하는 마모와는 달리 이 물질의 형상 및 진동형태가 제대로 확인되지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 마모량에 있어서 가장 보수성을 가진다고 판단되는 동종재질을 사용하여 마모 실험을 수행하였다.

2. 고온고압 마모실험

본 시험을 위하여 고온/고압 마모시험기를 설계 제작하였으며 개략적인 사진을 그림 1에 나타내었다. 마모시험기는 압력용기, 미끄럼 마모실험장치, 회전 마모실험장치, 부하장치로 구성되어있으며 최대 350°C까지 실험이 가능하다.

회전 마모실험장치의 경우 자기 구동장치(magnetic drive)를 사용하였으며, 미끄럼 마모실험장치의 경우에는 캠(cam)을 이용하여 모터의 회전 회전운동을 직선 왕복운동으로 변환 하였다.

마모량 측정은 실험 수행 전, 후 초음파 세척기를 사용하여 세척 후 0.1mg 까지 측정이 가능한 저울을 사용하였다. 또한 마모량의 정확한 측정을 위하여 10번 측정 후 평균하여 산출하였다.

① 온도

Inconel 690의 마모에 미치는 온도의 영향들을 확인하기 위하여 상온, 150, 250°C에서도 동일한 변위, 시간에 대해서 실험을 수행하였다.

② 변위

프레팅 영역은 변위의 크기에 따라 4개의 영역으로 나뉘며 stick slip, mixed stick and slip, gross slip 및 sliding 영역으로 구분할 수 있다. 본 실험은 sliding 영역인 변위 1200 μm 에서 수행되었다. sliding 영역은 gross slip 영역과는 다르게 마모 상수가 변위의 크기에 영향을 받지 않는 것으로 보고 되고 있다.[4]

③ 하중

본 실험에서는 마모에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보고되고 있는 충격하중은 고려하지 않고 미끄럼 하중만을 고려하였다. 실

험 시의 하중은 10N으로 결정하였다. 또한 본 실험에서는 하중과 실험 시간의 상관 관계를 확인하기 위하여 20N에서 실험한 결과와 10N에서 2배의 시간동안 실험한 결과를 서로 비교하였다.

④ 시간

실험은 일반적으로 600rpm의 속도로 1시간 동안 수행하였으며 실험 하중과의 상관 관계를 확인하기 위하여 300rpm의 속도로 2시간 실험을 수행하였다.

⑤ 재료

실험에 사용된 인코넬 690 재료는 울진 3, 4호기 증기발생기에 제작에 사용된 재질의 원통형 시편을 사용하였으며 그림 2에 실험 장치장착 후의 상태를 나타내었으며 표 1에 조성을 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

대부분의 재료는 고온 물 분위기에서 산화에 의한 질량 증가 현상이 발생한다. 이러한 질량 증가를 확인하기 위하여 실험에서 사용된 것과 동일한 시편을 압력용기 내부에 삽입하여 질량의 증감을 확인한 결과 질량의 변화가 없었음을 확인하였다.

온도 변화에 따른 마모량의 변화를 그림 3과 4에 나타내었다. 마모량은 온도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이며 150°C근처에서 최대가 되는 것을 확인 할 수 있으며 더 높은 온도 범위에서는 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 이러한 경향은 하중을 걸어주기 위한 시편과 미끄럼 운동을 하는 시편에서 모두 확인되었다. 위와 같은 온도 변화에 따른 마모량의 변화는 P. L. Ko[5, 6]등의 논문에서도 유사한 경향을 확인할 수

있다. 이러한 마모량의 변화는 주로 고온 물 분위기에 의한 재료의 산화와 온도변화에 따른 기계적 성질변화가 주된 원인으로 보고되고 있다. 하지만 본 실험에서 시편으로 사용된 인코넬 690시편은 고온에서 매우 안정된 산화 성질을 가지고 있는 것으로 보아 마모량 변화에 영향을 미치는 원인은 온도 증가에 따른 경도 및 항복강도 등 기계적 성질의 변화에 기인한 것으로 판단된다. 마모실험 후의 500 배의 배율로 주사전자현미경을 이용하여 관찰한 마모 손상면을 그림 5에 나타내었다. 25°C와 150°C의 마모 손상면은 유사한 형태를 보였으며 250°C 실험 후의 손상면은 앞의 손상면과 다른 형태를 가지는 것으로 관찰되었다. 250°C 손상면의 경우 25, 150°C와 비교할 때 더욱 심한 마모가 일어난 것으로 판단되나, 조도계를 사용하여 손상면의 깊이를 측정한 결과 150°C에 비해 손상면이 더 얕은 깊이를 가지는 것으로 확인되었다.

앞의 실험 결과 인코넬 690은 150°C부근에서 마모에 가장 취약하며 주사전자현미경 관찰 결과 25°C와 150°C에서는 유사한 마모기구에 의해 마모가 일어나며 250°C의 경우 이와는 다소 차이가 있는 마모기구에 의해 마모가 일어나는 것으로 판단된다.

4. 결론

인코넬 690 증기발생기 세관의 온도에 따른 마모량 변화는 150°C 근방에서 최대 마모량을 보였으며, 주사전자현미경 관찰 결과 온도 변화에 따라 다른 마모기구에 의해 마모가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 마모량의 변화와 마모기구의 변화는 고온에서 재료의 기계적성질 변화에 기인한 것으로

판단된다.

후기

본 연구는 한국전력공사·증기발생기 세관재료 고온/고압 마모시험연구' 과제와 교육인적자원부의 '두뇌한국21' 사업에서 부분 지원 했음.

참고 문헌

1. Vikram N. Shah, Philip E. Macdonald, "Aging and life extension of major light water reactor", Elsevier (1993).
2. C. E. Taylor, M. J. Pettigrew, T. J. Dickinson, I. G. Currie and P. Vidalou, Journal of Pressure Vessel Technology, **120**, pp283 (1998).
3. N. J. Fisher, A. B. Chow and M. K. Weckwerth, Transaction of the ASME, Journal of Pressure Vessel Technolodgy., **117**, pp 312 (1995).
4. K. Kato, Wear, **153**, pp 277 (1992).
5. P. L. Ko, Journal of Tribology, **107**, pp149 (1985).
6. P. L. Ko, Transaction of ASME, Journal of pressure vessel technology, **101**, pp 125 (1979).

Table1. Chemical composition of Inconel 690 tube

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.002	0.27	0.28	0.008	0.001	29.4	59.2	0.01
Co	Ti	Cu	Al	Nb	B	N	Fe
0.011	0.28	0.01	0.027	0.01	0.004	0.012	10.5

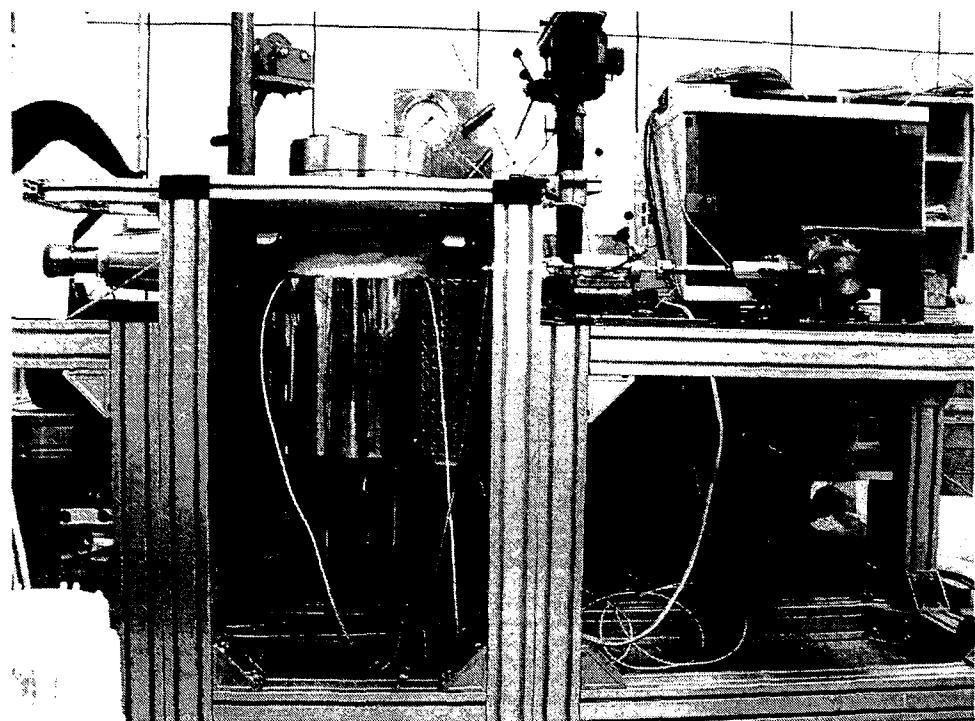


Fig. 1 High Temperature Wear Test Rig

Specimen : Inconel 690

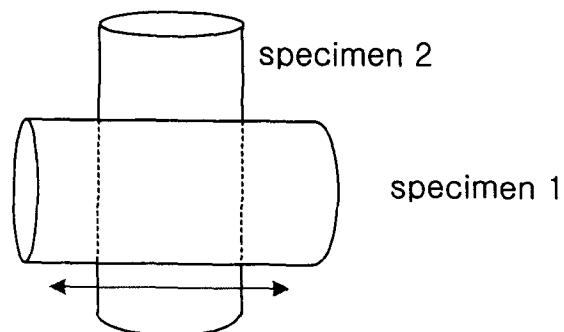


Fig. 2 Specimen Setup

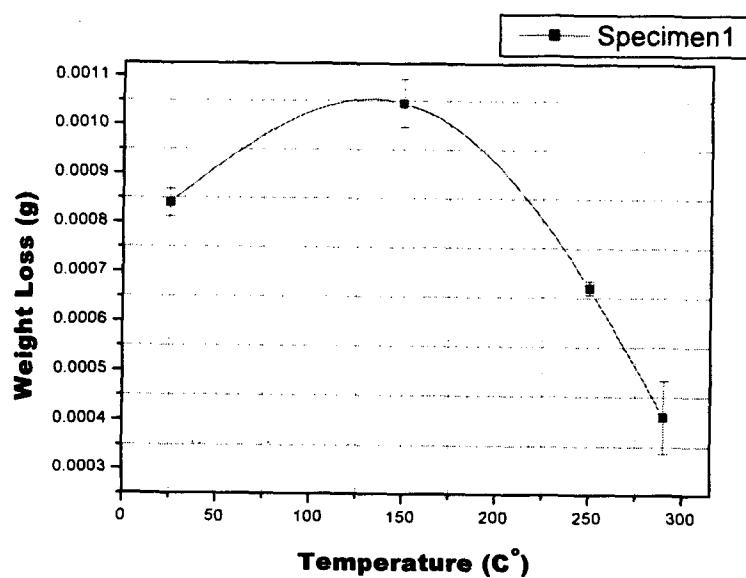


Fig 3. Weight Loss of Specimen1

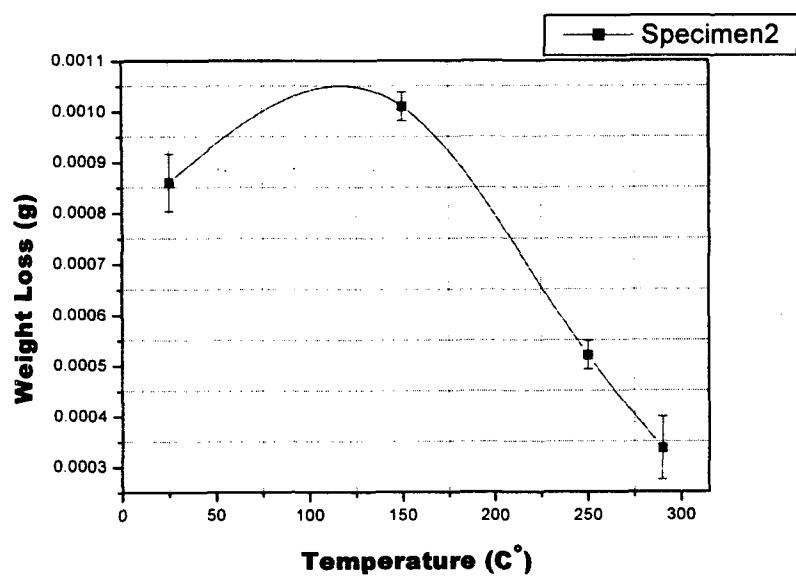


Fig.4 Weight Loss of Specimen 2

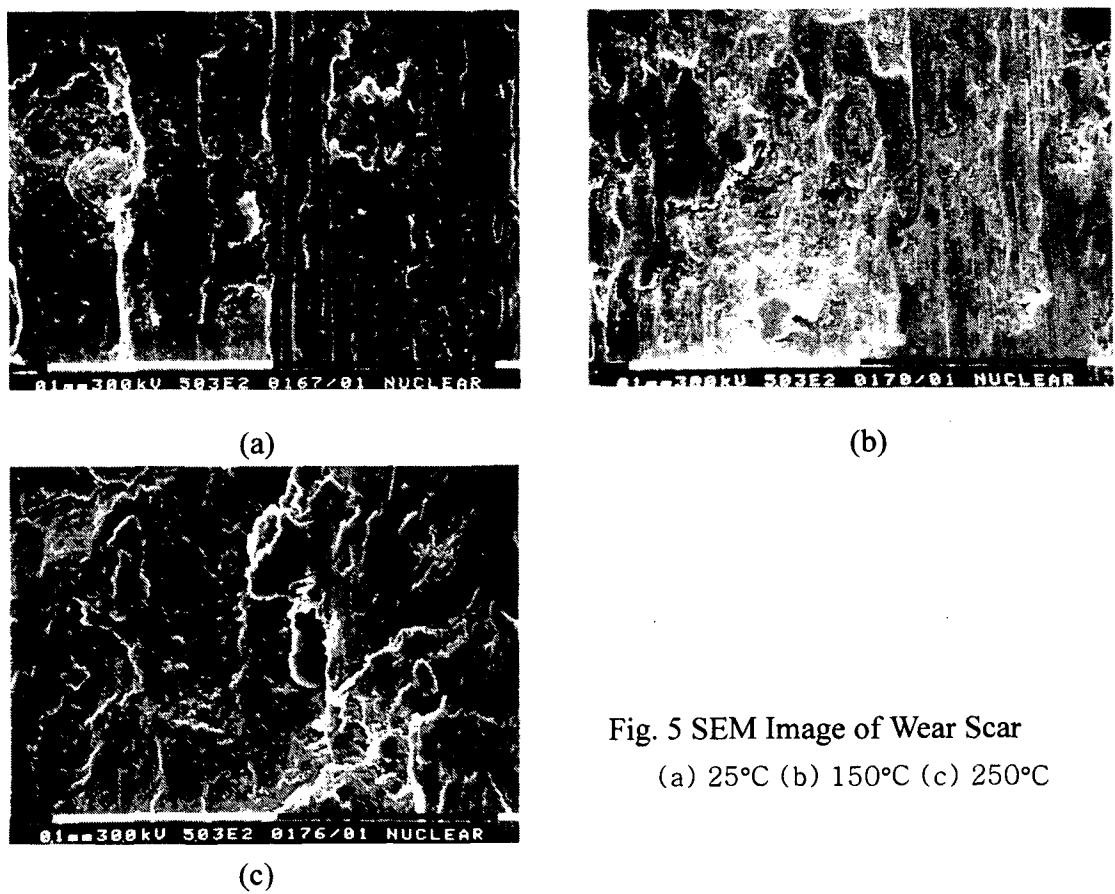


Fig. 5 SEM Image of Wear Scar

(a) 25°C (b) 150°C (c) 250°C