

‘99 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

증기발생기 전열관 재료의 마모특성 연구

Study on Wear Properties of Steam Generator Tube Materials

이영호, 김인섭
한국과학기술원 원자력공학과

김진원, 박치용
한국전력공사 전력연구원

요 약

최근 들어 증기발생기 마모현상이 원전의 주요한 열화기구로 등장하고 있다. 이러한 이유는 전열관을 내부식성이 뛰어난 Inconel 690TT로 교체함으로써 부식에 의한 열화현상이 감소하는 것이 주된 이유이다. 그러나 마모특성에 대한 연구는 현재까지 부족한 실정에 있다. 따라서 본 연구에서는 증기발생기 전열관 재료인 Inconel 600MA와 690TT에 대한 마모실험을 스테인레스 304강을 가지고 수행하였다. 시험조건으로 하중은 20N, 진동 변위는 $184\mu\text{m}$ 와 $284\mu\text{m}$, 분위기는 상온 공기 중에서 실험을 수행하였다. 마모실험 결과, 열처리를 수행한 Inconel 690TT의 마모속도가 600MA에 비하여 다소 낮게 나타났으며, 이러한 거동은 입계석출물의 분포 및 양과 밀접한 관련이 있는 것으로 보인다. 손상표면의 관찰결과 두 재료에서의 마모거동이 서로 차이를 보이는 것을 확인하였다. 또한 실험을 통하여 획득한 자료를 가지고 전열관 재료의 마모계수를 산출하였다.

Abstract

Fretting wear tests were performed using the Inconel 600MA and 690TT against 304 SS. Tests were performed on sliding wear under conditions such as 20N applied load, 184 and 284 μm vibration amplitude at air environment. Test results show that wear rate of Inconel 690TT is lower than that of 600MA. Worn surface Observation shows that there is different wear mechanism between Inconel 600MA and 690TT. Consequently, grain boundary carbides play a much important role that restrains the wear rates.

1. 서 론

증기발생기 내부는 필연적으로 설계조건 및 유체의 흐름으로 인한 진동현상이 발생한다. 이러한 유체유발진동(Flow-Induced Vibration)으로 인하여 증기발생기 전열관의 마모 및 피로현상이 현재 주요한 관심사로 떠오르고 있다. 일반적으로 마모는 그림 1에 나타나 있는 것과 같이 반복적으로 진동하며 미세한 진폭을 가진 두 표면사이에서 발생하는 마모현상이다. 그러나 마모현상은 증기발생기 전열관의 건전성을 위협하는 중요한 현상임에도 불구하고, 그 현상을 해석하는 것은 매우 어렵다. 특히 최근까지 많은 수의 원자력발전소가 프레팅 마모현상으로 인하여 증기발생기 전열관의 손상을 가져왔으며 그 대부분의 사례가 이물질에 의한 프레팅 현상이다.

증기발생기 전열관은 고온 고압 환경하에서 2차 냉각수의 흐름으로 인한 유체유발진동이 발생할 가능성을 항상 지니고 있다. 이러한 가능성의 완화가 증기발생기 설계의 목표이지만, 전열관과 지지판의 접촉조건은 증기발생기 설계변수인 전열관과 지지판의 간격, 2차측 냉각수의 유속 및 증기발생기 제작시의 허용한도에 의해 결정된다. 따라서 전열관의 마모 기구 역시 전열관의 진동폭, 접촉 주파수, 접촉 표면 조건 및 재료특성 등과 관계가 있는 매우 복잡한 현상이다.

증기발생기 마모현상에 대한 연구는 P. L. Ko에 의해서 70년대부터 수행되어 왔다.[1] 특히 최근의 연구결과에 따르면 고온 고압 환경하에서의 유체유발진동에 의한 마모현상은 전열관의 움직임이 충격(Impact)마모가 우세할 경우 마모속도는 느리나 미끄럼(Sliding)마모일 경우 마모속도가 증가함을 관찰하였다.[2] 그러나 이러한 두 가지 마모기구가 복합적으로 발생할 경우 마모속도가 더욱 커지는 연구결과도 발표되었다. 또한 N. J. Fisher는 온도가 마모속도에 미치는 영향을 관찰하였으며, 그 결과로 약 200℃에서 마모속도가 최대가 되는 것을 확인하였다.[3]

국내의 경우 전열관에 대한 마모연구는 다소 미흡한 실정이며, 핵연료 집합체에서의 마모연구가 현재 수행되고 있는 것으로 파악될 뿐 증기발생기 마모연구는 수행되지 않고 있다. 이러한 상황에서 국내 원전에서도 이물질에 의한 마모현상이 발생하여 원전의 가동이 일시적으로 중단되는 일이 발생하였으므로, 이에 따라 전열관 재료의 마모자료확보가 시급한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 증기발생기 전열관 재료인 Inconel 600MA(이하 600MA)와 Inconel 690TT(이하 690TT)의 마모성질에 대한 비교하기 위하여 지지판 재료로 스테인레스 304강(이하 304SS)을 가지고 실험을 수행하였다.

2. 실험 과정

2.1 재료

본 실험에 사용된 재료는 영광 3,4호기에 사용된 600MA 전열관과 작년에 교체되어 가동중인 고리 1호기 690TT 전열관으로, 그 화학적 조성은 표 1과 같다. 전열관 지지판 재료로 304SS를 사용하여 실험을 수행하였다. 마모실험을 수행하기 전에 부식특성과 관련된 입계석출물의 분포, 미세구조를 관찰하였으며 마모계수에 영향을 미치는 경도(HV)값을 50g의 하중으로 측정하였다.

2.2 실험장치

본 실험에 사용된 장치를 개략적으로 그림 2에 나타내었다. 본 장치에서는 미끄럼 변위와 하중을 실시간으로 받을 수 있도록 제작하였으며, 주파수는 모터의 속도로 조절이 가능하도록 하였다. 실험을 수행한 뒤 세척하여 부식물 및 마모 후 생성되는 입자를 제거한 후 미세저울로 0.1mg까지 질량감소를 측정하였다.

2.3 시편관찰

마모실험을 수행하기 전의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하였으며 각각의 조직 특성을 파악하였다. 특히 부식특성에 중요한 영향을 미치는 입계석출물의 분포를 확인하였다. 마모실험을 수행한 뒤 손상표면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며, 각각의 실험조건에 따른 손상표면의 특성을 파악하였다.

3. 실험 결과 및 토의

3.1 미세조직

600MA와 690TT의 미세조직을 그림 3에 나타내었다. 그림에서와 같이 결정크기는 각각 $50\mu\text{m}$ 와 $30\mu\text{m}$ 이다. 이러한 결정크기는 일반적인 증기발생기 전열관 재료의 결정크기인 $25\mu\text{m}$ 와 비교해 볼 때, 600MA의 경우 다소 큰 결정크기를 가지고 있었으며 690TT는 비슷한 결정크기를 가지고 있었다. 결정크기의 차이는 기본적으로 전열관 제작과정 중에 수행되는 용체화처리와 밀접한 관련을 가진다. 특히 용체화 처리온도와 시간에 따라 결정크기가 결정되며, 이러한 용체화 처리온도는 탄소함량에 따라 결정된다. 따라서 탄소함량이 0.02w/o인 690TT의 경우, 용체화 처리온도가 약 1070°C 이상에서 수행된 것으로 보이며, 탄소함량이 0.026w/o인 600MA의 용체화 처리온도는 약 930°C 이상으로 판단된다.[4] 또한 석출물의 분포는 600MA에서 입계 및 입내에 불연속적으로 분포하고 있었으며, 이와는 달리 690TT는 입계석출물 분포가 반연속적이었으며 입내의 석출물은 600MA에 비하여 적은 편이다. 이러한 석출물의 형태는 Inconel 600MA의 경우 Cr_7C_3 가 우세하게 나타나는 것으로 알려져 있으며 Inconel 690TT의 경우 Cr_{23}C_6 의 형태를 가지는 것으로 널리 알려져 있다.[5]

3.2 기계적 특성

실험에 사용된 재료의 기계적 특성을 표 2에 나타내었다. 항복응력과 인장강도는 690TT가 다소

높게 나타나 있으며, 연신율과 경도값은 큰 차이를 보이고 있지 않다. 지지판 재료로 사용된 304SS는 항복응력과 인장강도가 전열관 재료에 비해 다소 낮은 값을 보이고 있다. 전열관의 인장 성질은 일반적으로 690TT이 600MA에 비해 다소 높게 나오는 것으로 알려져 있으며 본 실험에 사용된 재료도 이러한 거동을 보이고 있는 것으로 보인다.

마모성질에 미치는 기계적 특성 중 가장 큰 영향인자는 경도값으로 알려져 있다. 이러한 경도값의 영향은 초기 경도가 큰 재료일수록 마모속도가 낮다고 알려져 왔으며 마모에서 가장 많이 사용되는 Archard Eq.에서 경도의 영향을 볼 수 있다. 그러나 최근 들어 이러한 경향을 만족하지 않은 연구결과가 발표되어 Archard Eq.대신 Work rate 개념을 도입하여 사용하고 있다.[6] 따라서 지금 현재 마모계수를 산출하여 두 재료의 마모정도를 비교하고 있으나, 증기발생기 전열관의 진동특정상 수직변위에 대한 이론적 배경이 미약하여 다소 적용에 어려움을 가진다. Archard Eq.과 Work rate 모델에 대한 식은 다음과 같다.

Model	$\dot{V}$: Wear rate[mm ³ /day] , F : force[N] , S : displacement [mm]
(1) Archard Eq.	$\dot{V} = k \frac{F \cdot S}{3 \cdot H}$
(2) Work rate Model	$\dot{V} = K \cdot \dot{W} , \quad \dot{W} = \frac{1}{t} \int F ds$

3.3 마모특성

전열관 재료의 마모실험을 상온 공기분위기, 하중은 20N, 주파수는 10Hz, 30Hz에서 수행하였으며 실험에 사용된 변위는 184 μ m와 284 μ m이다. 600MA의 마모실험 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 600MA는 주파수가 높을수록 마모량의 변화가 크게 나타나지 않고 있으나, 5×10^5 Cycle에서는 다소 증가하는 거동을 보이고 있다. 또한 변위가 적을 경우, 마모량이 감소함을 알 수 있으며 사이클의 증가에 따라 마모량의 변화가 거의 없는 것으로 보인다. 690TT의 실험결과는 그림 5와 같다. 5×10^4 Cycle이하에서는 600MA의 실험결과와 비슷한 거동을 보이고 있으나, 마모량을 600MA와 비교해 볼 때 다소 낮게 나타났다. 두 시편에서 주파수가 증가할수록 마모속도는 증가함을 알 수 있었으며, 변위가 증가함에 따라 마모속도는 증가하는 거동을 보이고 있다. 이러한 주파수에 대한 영향은 Cha의 연구결과와 유사하게 나타났다.[7] Cha에 의하면 10~30Hz까지는 마모속도의 변화를 보이지 않다가 40Hz이상에서는 급격히 마모속도가 감소하는 경향을 보이고 있었다. 이러한 주된 주파수의 영향은 주파수가 증가함에 따라 마모입자의 방출기구가 영향을 받기 때문이라 생각된다. 변위의 증가에 따른 마모량의 증가는 위의 두 모델을 모두 잘 만족하고 있었다. 이러한 결과를 통하여 상대적으로 마모량이 적은 690TT의 경우 마모계수가 낮음을 알 수 있다.

마모실험을 수행한 후 각각의 시편에 대한 손상표면을 SEM으로 관찰하였으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 600MA에서는 손상표면 대부분에서 미세한 균열이 전파됨을 확인하였으나, 690TT의 경우 다소 큰 균열이 약간이 보임을 관찰하였다. 이러한 파면에서의 차이점은 반복적인 하중하에서 전열관의 표면에 국부적인 소성변형이 발생하고 이때의 표면 가공경화 정도의 차이가 서로 다르게 나타나 접촉표면층 제거기구의 차이를 보이게 되는 것이다. 이것은 두 재료의 미세구조의 주된 차이인 입계석출물의 종류와 분포가 주된 영향으로 생각된다. 입계석출물의 역할에 대한 연구결과는 K. Yamanaka에 의해 발표되었으며[8], 그 결과로 입계석출물이 연속적인 분포에 가까울수록 입계에서의 변형률을 분산시키며, 더욱더 많은 변형을 수용할 수 있는 것이라고 제안하고 있다. 따라서 열처리를 수행하여 입계석출물의 분포를 반연속적으로 한 690TT의 경우, 600MA에 비하여 표면에서의 변형을 수용할 수 있으므로, 표면과 기지간의 변형차이가 작아져 표면층의 제거가 다소 용이하지 못한 것이라 생각된다. 이러한 석출물의 영향을 피로특성과 연관지어 볼 때, 입계석출물의 분포가 연속적일수록 변형수용능력이 증가하여 균열성장을 억제하는 것과 유사한 거동이라 생각된다.[9]

304SS에 대한 600MA와 690TT의 마모계수를 Work rate 모델을 적용하여 계산하였으며 그 결과를 그림 7에 나타내었다. Work rate 모델은 현재까지 증기발생기 전열관의 마모특성을 비교하기 위한 모델 중 최근 가장 많이 사용되는 모델이며, 이러한 모델을 사용하여 현재 전열관 손상평가 및 잔류수명 예측에 사용되고 있다. 계산을 수행한 결과, 마모계수는 690TT가 600MA에 비하여 다소 낮게 나타났으며, 이러한 Work rate 모델의 마모계수 값은 기존의 문헌에 나온 값과 비교해 볼 때 매우 유사한 값을 가지고 있음을 확인하였다.

4. 결 론

증기발생기 전열관 재료인 Inconel 600MA와 690TT에 대한 마모실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 반복진동이 발생할 경우, 주파수가 증가함에 따라 질량 감소량이 서서히 작아지나 사이클이 증가할수록 증가한다.
- (2) Inconel 600MA와 690TT의 마모거동은 표면미세구조관찰을 통하여 서로 다른 마모기구가 있음을 확인하였으며, 마모기구별 영향인자에 대한 충분한 연구가 필요하다.
- (3) 입계석출물은 변형을 분산시키는 역할을 하므로, 표면 가공경화정도에 영향을 미친다. 따라서 입계석출물의 분포는 전열관 재료의 마모기구에 영향을 미친다.
- (4) Work rate model을 적용하여 본 결과, Inconel 690TT가 600MA에 비해 낮은 마모계수를 보이고 있다.

5. 참고문헌

- (1) P. L. Ko, " Experimental Studies of Tube Frettings in S/Gs and H/Es ", Jour. of Pressure Vessel Tech, vol. 101, 1979
- (2) P. L. Ko, " Heat Exchanger Tube Fretting Wear: Reviews and Application to Design ", Jour. of Tribology, vol. 107, 1985
- (3) N. J. Fisher, " Effect of Temperature on S/G Fretting Wear ", PVP-Vol. 328, 1996
- (4) J.M. Sarver et al. " Carbide Precipitation and SCC Behavior of Inconel Alloy 690 ", Corrosion, Vol. 44, 1988
- (5) K. Stiller et al. " Structure, Chemistry and SCC of Grain Boundaries in Alloys 600 and 690 ", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 27A, 1996
- (6) C. Phalippou et al. " The Predictive Analysis of Wear Work-Rates in Wear Test Rigs ", PVP-Vol. 328, 1996
- (7) J. H. Cha et al. " Experimental Study on Impact/Fretting Wear in Heat Exchanger Tubes ", Jour. of Pressure Vessel Technology, Vol. 109, 1987
- (8) K. Yamanaka "The Role of Grain Boundary Chromium Carbides on The IGA Resistance of Ni-base Alloy 600 ", Sixth Int. Sym. on Env. Deg. of Mat. in Nucl. Pow. Plants, 1993
- (9) 차세대 원자로 기술개발 (II) 핵심기술연구(Vol.2.7), 한국전력공사 전력연구원, 1999

감사의 글

본 실험을 위하여 실제 가동중인 증기발생기 전열관 시편을 제공하여 주신 (주)한국중공업 모든 관계자 분들께 깊은 감사를 드립니다.

표 1. 시편의 화학적 조성(wt%)

시 편	Cr	Fe	C	Si	Mn	Ti	P	S	Co	Ni
600	16.81	9.1	0.026	0.32	0.81	0.35	0.008	0.002	0.012	Bal.
690	29.5	10.4	0.02	0.33	0.26	0.32	0.004	0.001	0.012	Bal.
304	18.26	Bal.	0.027	0.55	1.81	-	-	0.002	0.02	8.22

표 2. Inconel 600MA와 690TT, Sus304의 인장성질

시 편	항복응력(MPa)	인장강도(MPa)	연신율(%)	경도 (HV)
Inconel 600MA	283.5	682.6	47.3	194
Inconel 690TT	316.5	708.7	46	193
스테인레스 304	270	600.0	50	-

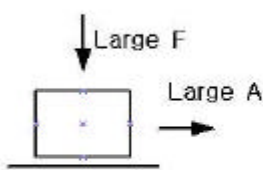
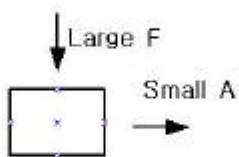
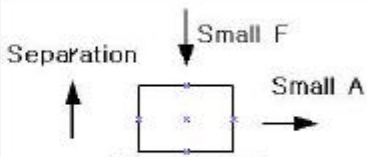
Sliding Wear	Fretting Wear	
 - Large preload - Large amplitude - appl : bearings fuel handing	Classical	Impact
	 - Large preload - Small amplitude - No Separation - appl : elec contacts	 - Small preload - Small amplitude - Separation - appl : S/G

그림 1. 마모현상의 분류

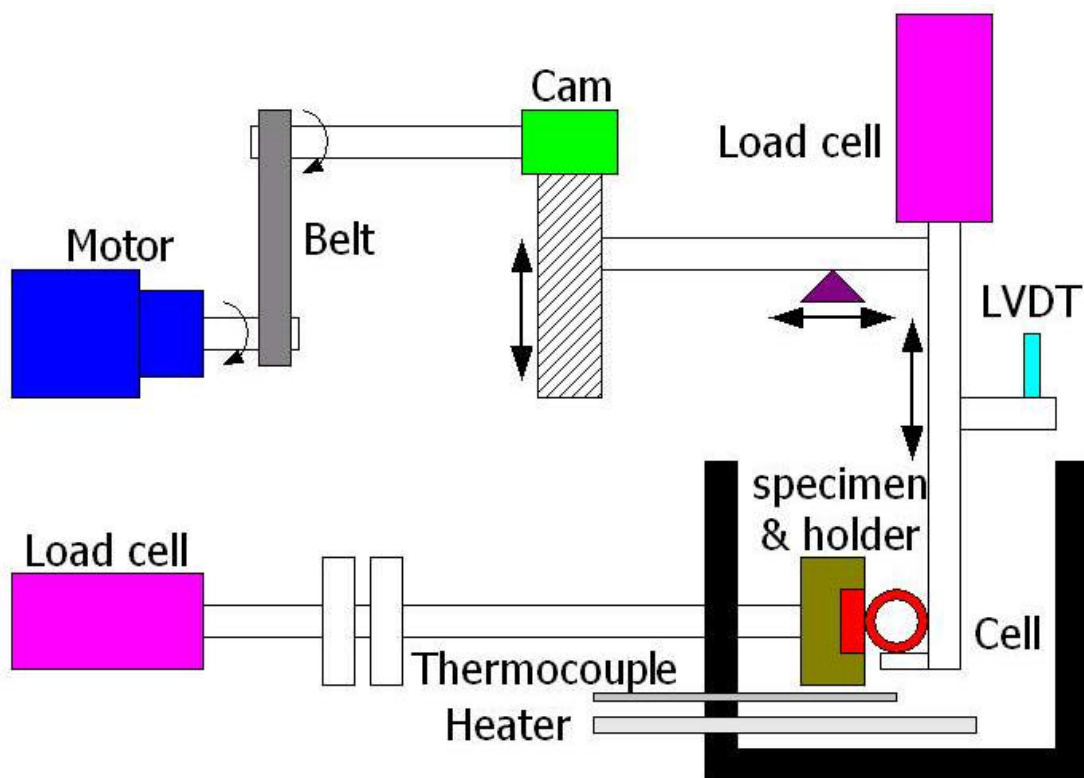
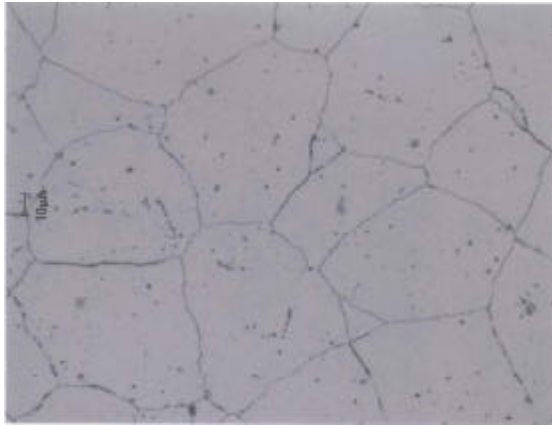
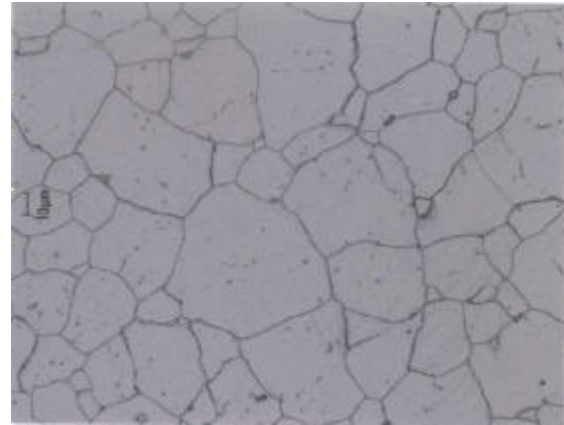


그림 2 마모장치 개략도



(a) 600MA



(b) 690TT

그림 3 Inconel 600MA와 690TT의 미세구조

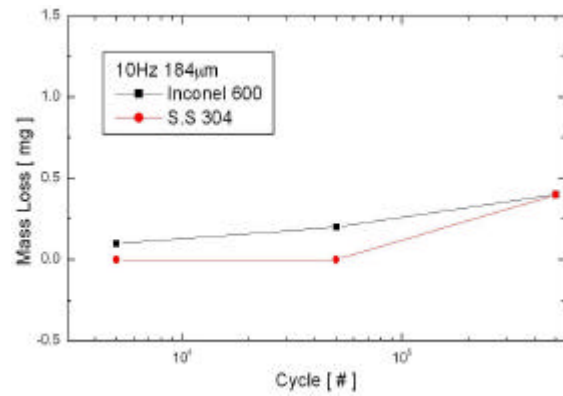
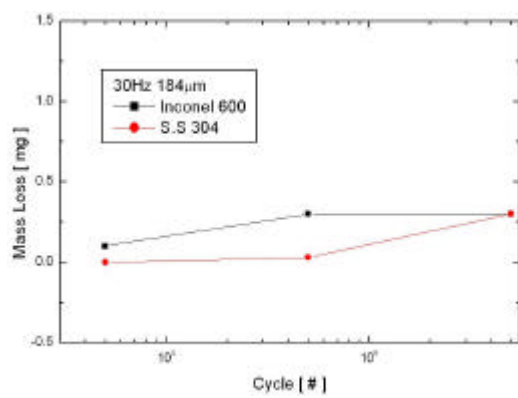
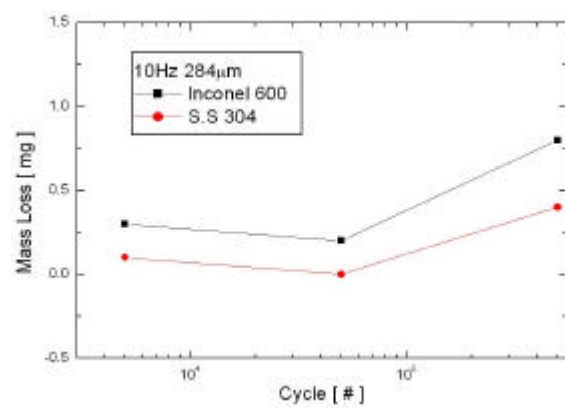
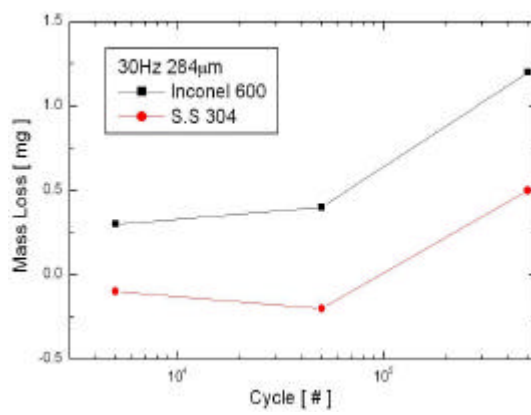


그림 4 Inconel 600MA의 마모실험 결과

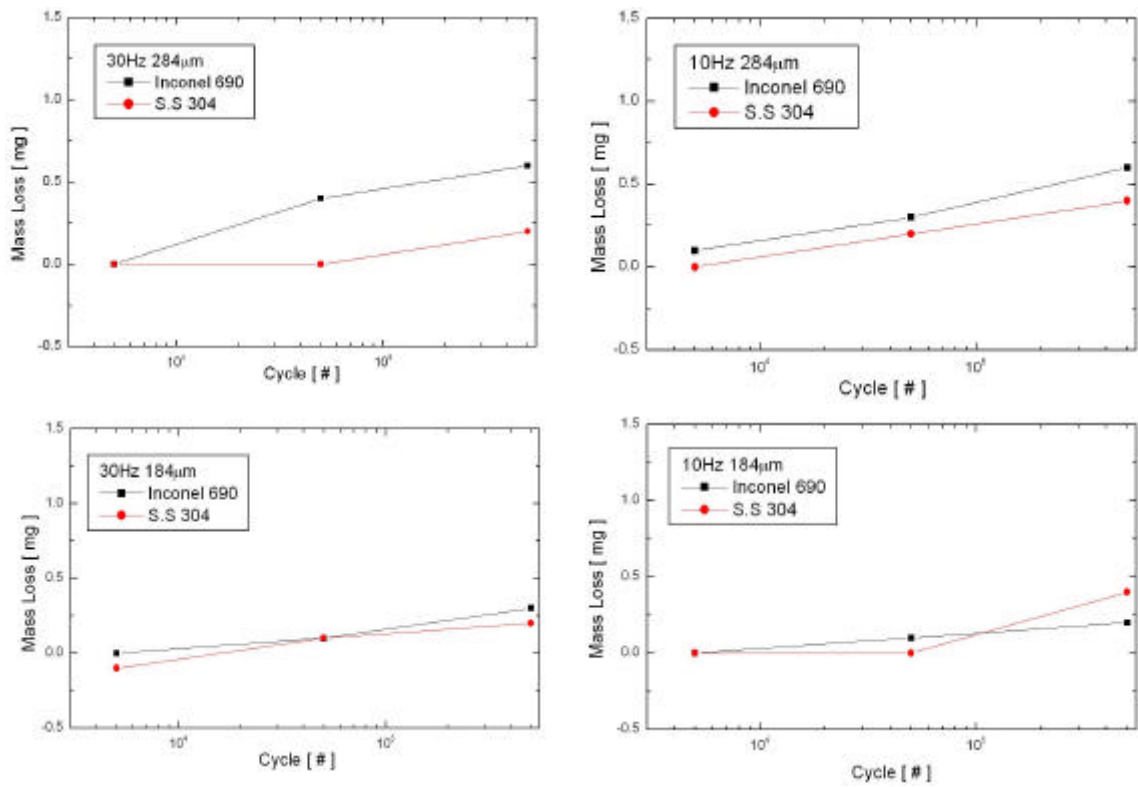
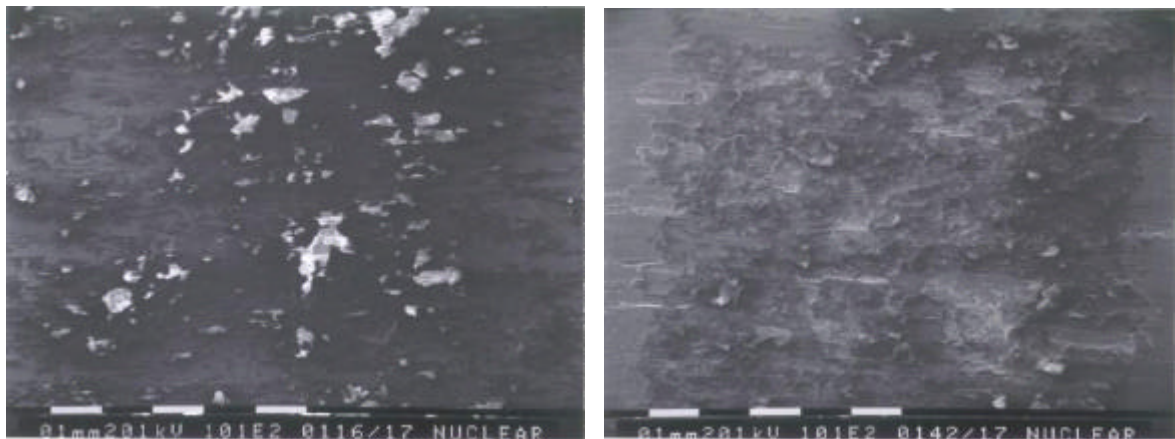


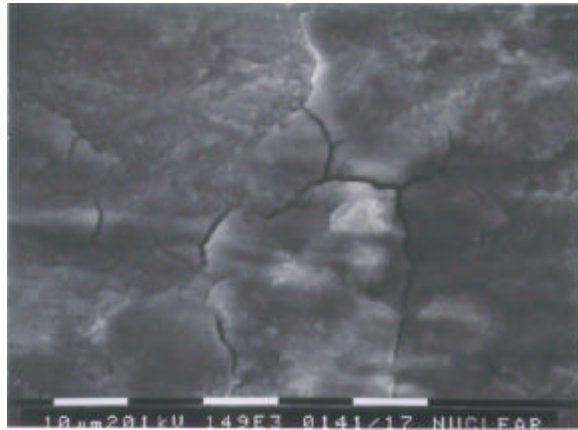
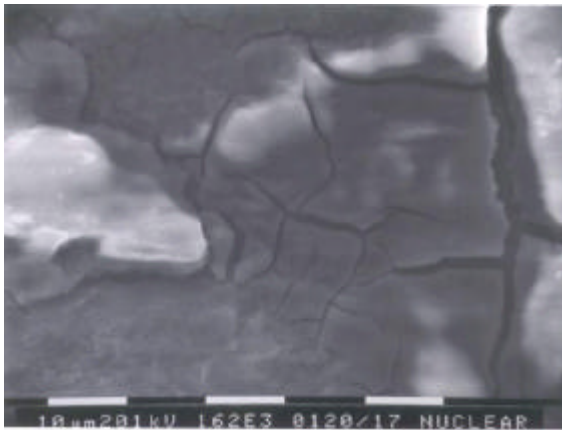
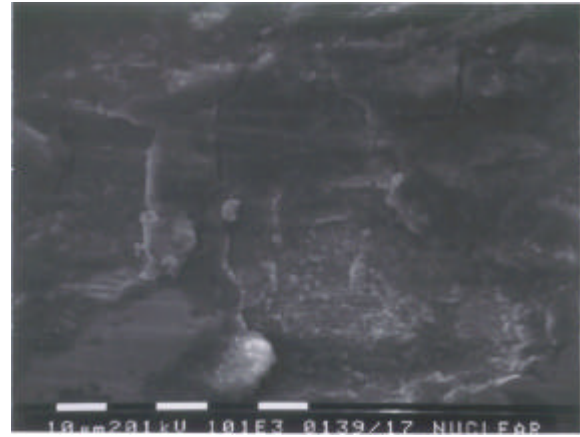
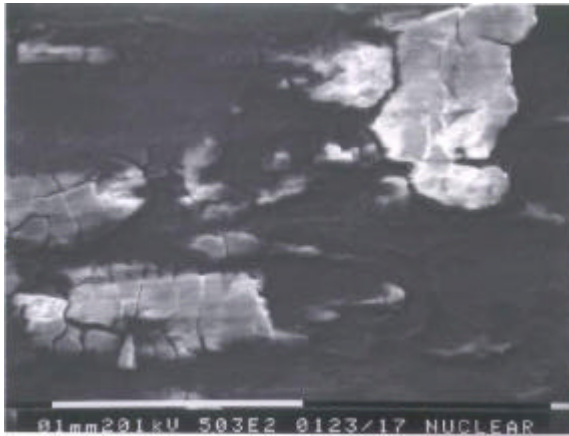
그림 5 Inconel 690TT의 마모실험 결과



(a) Inconel 600MA

(b) Inconel 690TT

그림 6 마모 실험후 손상표면 관찰



(a) Inconel 600MA

(b) Inconel 690TT

그림 6(계속) 마모실험의 손상표면 관찰

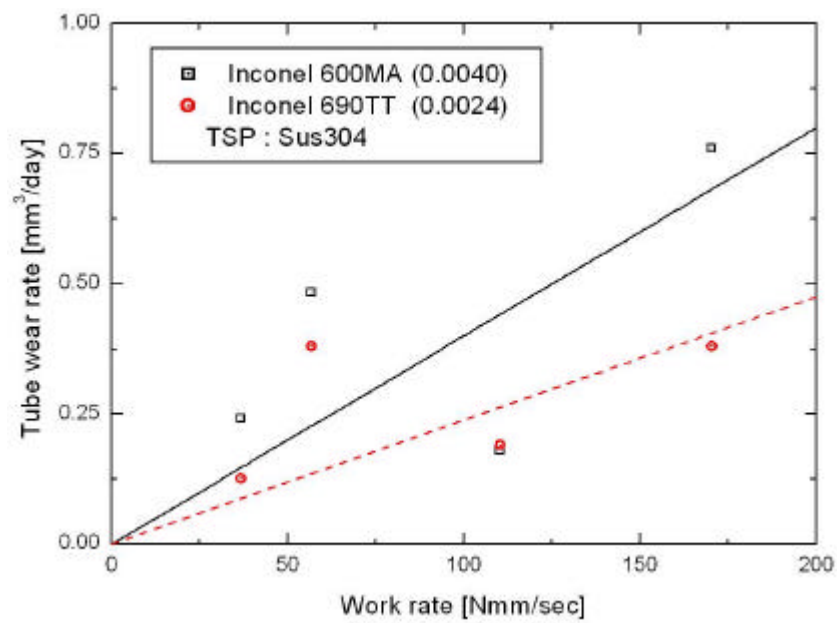


그림 7 Work rate 모델을 적용한 마모계수 비교