

프레팅 마모에서 증기발생기 전열관 재료의 소성변형층 형성에 관한 연구

A Study on the Formation of Plastic Deformation Layer in the Steam Generator Tube Materials during Fretting Wear

이영호, 김인섭

한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

박영섭

전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

증기발생기 전열관 재료인 인코넬 600 및 690에 대한 마모실험을 물 분위기 하에서 페라이트 계열의 스테인레스 강 지지구조물을 이용하여 수행하였다. 상온 공기분위기와는 달리 마모입자층의 형성은 관찰하기 어려웠으며, 이에 따라 증기발생기 전열관 재료의 마모속도에 영향을 미치는 주된 인자는 프레팅 마모실험 과정중의 표면 기계적 특성변화로 나타났다. 이러한 표면 및 표면아래의 기계적 특성변화를 관찰하기 위하여 마찰계수 및 경도의 변화를 관찰하였으며, 마모손상면 아래에서의 변형에 필요한 에너지를 산출하기 위하여 단면에 대한 Nano-indentation 실험을 수행하였다. 그 결과 표면경화가 높은 인코넬 690에서 마찰계수가 낮게 나타났고 이에 따라 마모량이 감소함을 관찰하였다. 두 전열관 재료에서 나타난 경도변화는 기본적인 차이점인 크롬함량에 따른 적층결함에너지의 차이가 주된 원인으로 보이며, 이것이 마모과정에서 표면가공경화의 차이를 일으켜 마모속도의 차이로 나타났다. 또한 현재 널리 사용되고 있는 Work-rate 모델에서 마모계수의 큰 편차를 마모과정중의 마찰계수 값의 변화를 고려하여 설명하였다.

Abstract

The wear test of steam generator (SG) tube materials against ferritic stainless steels has been performed to evaluate the wear mechanism in water environment. It is difficult to observe the wear particle layers that are frequently formed in air environment. So the wear rate of SG tube materials in water environment depends on the change of mechanical properties between contact surfaces during fretting test. From the result of the subsurface hardness test, Inconel 690 has high hardness value than Inconel 600 as close to surface and this means that more energy must be consumed in the contact surface of Inconel 690 to plastically deform the same volume. Main cause of hardness variation is due to the difference of the stacking fault energy with the chromium content. Besides, the deviation of wear coefficient in the Work-rate model was explained by the change of friction coefficient during

fretting wear.

1. 서론

프레팅 혹은 슬라이딩 마모 과정 중에서 마모속도를 결정하는 중요한 인자는 접촉면에서의 기계적 특성, 접촉조건 및 윤활 조건으로 알려져 있으며, 마모량은 결국 방출되는 마모입자의 양과 비례하기 때문에 대부분의 마모모델은 이러한 마모입자 방출에 중점을 두고 있다. 따라서 마모모델을 제안하기 위해서는 마모과정중의 마모입자 형성 및 방출 단계에 대한 명확한 규명 및 이해가 필수적이며 이에 따른 마모입자 방출과 관련된 기계적 해석은 많이 수행되어 왔다. 공기 분위기 하에서 상온 및 고온의 실험결과를 살펴보면 대부분의 연구는 마모입자들이 기지금속에서 충분한 소성변형을 경험한 뒤 방출되며 주변 분위기 및 마찰열에 의해 쉽게 산화되어 입자층을 형성하여 마모속도가 둔화되는 경향을 보이고 있다[1,2]. 그러나 물 분위기 및 진공 분위기 하에서는 이러한 마모입자의 층 형성이 용이하지 못하며 이에 따라 마모를 결정하는 중요한 인자는 접촉면에서의 기계적 특성변화가 주된 역할을 하는 것으로 보고하고 있다.

접촉면에서 마모과정 중 형성되는 표면 변형층에 관한 Sauger[3]등의 연구에서 특정두께의 마찰에 의한 변형구조(Tribological Transformed Structure, TTS)를 형성하며 이것은 소성 변형층과 다소 구분이 되며 마모속도에 밀접한 관계가 있음을 보이고 있다. 특히 일반 탄소강의 경우, 마찰 및 마모에 의한 상변태를 경험하게 되며 이러한 변태는 기존의 구조와는 완전히 다르기 때문에 접촉면에서의 마모거동 또한 변화하는 것으로 표현하고 있다. 따라서 증기발생기 전열관 재료의 발생하는 마모현상은 마모입자 방출에 따른 마모입자층 형성보다는 마모과정 중 변화하는 접촉면의 기계적 특성이 매우 중요한 역할을 하는 것으로 보이나 이에 따른 연구는 수행되지 않고 있다.

증기발생기 전열관의 프레팅 마모현상은 증기발생기 내부에서 발생하는 냉각수의 빠른 유속과 설계요건에 따라 전열관 재료와 지지구조물 사이의 열팽창을 고려한 틈의 존재로, 전열관과 지지구조물 사이에서 유체유발진동(Flow-Induced Vibration, FIV)에 의해 발생하는 전열관 재료의 손상기구조의 하나이며, 최근 들어 국내외에서 마모에 의한 전열관 손상사례는 빈번히 발생하고 있으며 이에 따른 마모연구도 활발히 수행되고 있다[4-8]. 그러나 최근까지의 연구결과를 살펴보면 대부분이 수명평가를 목적으로 수행된 마모계수 산출이 주된 목표이며 마모기구에 대한 연구는 거의 없는 실정에 있다. 따라서 본 연구에서는 상온 물 분위기 하에서의 프레팅 마모실험을 통하여 두 재료의 마모속도를 비교하며 이에 따라 표면에서 생성되는 마모변형층의 영향에 대하여 알아보았다.

2. 실험과정

2.1 마모 시편

실험에 사용된 전열관 재료는 현재 국내 원전에서 사용되는 인코넬 600, 690합금을 사용하였으며 이에 대한 지지구조물 재료로 페라이트계열의 스테인레스 강을 사용하였다. 각 시편의 조성 및 경도 값을 표 1에 나타내었으며, 실험을 수행하기 전에 정확한 질량을 측정하기 위하여 0.1mg의 정확도를 가진 미세저울을 사용하였으며, 측정에서의 오차를 줄이기 위하여 5회 이상 반복 측정과 기준시편을 사용하였다. 실험을 수행한 후 마모입자를 충분히 제거하였으며 Ultrasonic 용기에서 세척하여 건조시킨 후 질량을 측정하였다.

2.2 실험 장치 및 변수

마모실험에 사용된 대략적인 장치의 개요를 그림 1에 나타내었다. 반복 슬라이딩 진폭, 수직하중 및 수평하중은 실험 중에 연속적인 측정을 수행하여 마찰계수를 산출하였으며 모터의 속도로 주파수를 조정하였다. 실험에 사용된 변수로 수직하중은 10~40N, 슬라이딩 진폭은 150~400 μ m이며 상온 물 분위기에서 30Hz의 주파수를 적용하여 실험을 수행하였다.

2.3 손상면 아래에서의 경도변화

손상면 아래에서의 경도변화를 관찰하기 위하여 단면을 절단하여 소성변형층의 두께를 비교하였고 기계적 특성에 관련된 정보를 획득하기 위하여 미세경도 실험을 수행, 표면아래에서의 가공경화정도를 비교하였다.

2.4 Work-rate 모델로의 적용

일반적으로 증기발생기 전열관의 마모와 관련된 모델은 Work-rate 모델을 많이 사용하고 있으며, 이에 따른 마모계수를 산출하여 전열관의 잔류수명을 예측하고 있다. 그러나 이러한 모델은 마모속도가 충분히 정상상태(Steady state)를 유지할 경우에만 잘 맞는 경향을 보이고 있다. 따라서 마찰계수의 변화가 Work-rate 모델에서의 마모계수 값의 선형성에 미치는 영향을 알아보았다.

3. 실험결과 및 토론

3.1 전열관 재료의 마모거동

그림 2에 하중에 따른 전열관 재료의 상대적인 마모속도(마모량/슬라이딩 거리)를 나타내었다. 하중이 증가함에 따라 상대적인 마모속도는 서서히 증가하는 거동을 보이고 있으나 매우 큰 편차를 보이고 있다. 이러한 거동은 두 전열관 재료에서 모두 나타나고 있으며 인코넬 690에서 다소 낮은 마모속도를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 큰 편차를 보이는 원인은 슬라이딩 거리에 따라 마모량이 선형적으로 증가하지 않은 것을 의미한다.

일반적으로 초기 슬라이딩 과정에서는 돌출부들간의 상호작용이 우세하게 작용하여 방출되는 마모입자의 크기도 다소 크며 이에 따라 마모량의 증가속도는 매우 빨라진다. 이러한 작용은 초기 수백~수천 사이클 내에서 끝나게 되며 이후의 마모량은 접촉면 사이에서 변화된 기계적 특성에 의해 결정되게 된다. 특히 물 분위기 하에서 마모입자의 방출이 더욱 용이하게 되며 이에 따라 계속적인 접촉면에서의 마모입자방출은 충분한 소성변형을 경험한 표면의 특징에 따라 결정되는 것으로 알려져 있다.

일반적으로 표면의 경도가 높을 경우, 마모실험에서 흡착경향은 다소 감소하며 이에 따른 마찰계수 값 또한 감소하는 경향을 보인다. 따라서 본 실험에서의 마찰계수의 변화를 파악하기 위하여 각 실험에서 산출된 평균 마찰계수 값의 변화를 그림 3에 나타내었다. 하중이 증가함에 따라 마찰계수는 감소하는 경향을 보이고 있으나 평균 마찰계수 값이므로 슬라이딩 거리에 따라 다소 편차를 보이고 있다. 따라서 일정한 하중 하에서도 슬라이딩 거리가 증가함에 따라 평균 마찰계수 값 또한 변화하는 것을 알 수 있다. 이것을 확인하기 위하여 슬라이딩 변위가 210 μ m에서의 사이클이 증가함에 따른 마찰계수 값의 변화를 그림 4에 나타내었다. 초기 수천 사이클 내에서 인코넬 690의 마찰계수 값은 인코넬 600에 비해 매우 큰 값을 보이고 있다. 그러나 마모가 계속됨에 따라 두 전열관 재료의 마찰계수 값은 다소 비슷한 경향을 보이고 있으나 4만 사이클 이상에서는 인코넬 600에서의 마찰계수 값이 더 큰 값을 가지는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 우선 수천 사이

클 내에서는 인코넬 690에서의 돌출부들간의 상호작용과 흡착경향이 더욱 크게 작용하여진 것으로 보여진다. 그러나 4만 사이클 이상에서의 마찰계수 값의 변화에서 알 수 있듯이 물 분위기에서의 마모입자층 형성이 용이하지 못하기 때문에, 반복적인 변형에 의한 표면에서의 경도변화가 마찰계수를 변화시켜 인코넬 690에서의 마모량이 슬라이딩 거리(사이클)가 증가함에 따라 서서히 감소하는 경향을 보이고 있다.

3.2 접촉면 아래에서의 경도변화

두 전열관 재료의 마모실험결과로부터 슬라이딩 거리가 증가함에 따라 표면에서의 기계적 특성 변화와 관련된 마찰계수의 변화로 인하여 마모량은 다소 차이를 보이고 있다. 따라서 이러한 변화를 확인하기 위하여 마모 손상면 아래에서의 경도변화를 관찰하였으며 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 초기 두 전열관 재료의 경도 값은 매우 비슷하게 나타났으나 마모실험후의 결과로부터 인코넬 690의 경우 표면에서 가까울수록 더욱 높은 값을 보이고 있다. 따라서 이러한 높은 표면경도 값이 마모속도에 영향을 미친 것으로 보인다.

두 전열관 재료는 니켈 기지합금으로 기본적인 조성의 차이점은 크롬의 함량이다. 일반적으로 크롬 함량이 증가함에 따라 니켈의 적층결함에너지(Stacking Fault Energy, SFE)는 그림 6에서와 같이 감소하게 된다[9]. SFE가 낮을 경우 소성변형에 의해 손상면 아래에서의 전위밀도는 급격하게 증가하게 되며 표면의 경화가 빠른 시간 내에 발생한다. 슬라이딩 거리가 증가함에 따라 표면에서의 소성변형 및 변형강화로 인해 생성된 마모변형층이 마찰계수를 감소시켜 마모속도의 증가가 둔화하는 것으로 보인다. 그러므로 두 전열관 재료는 손상표면 아래에서 변형특성의 차이가 존재하는 것으로 보이며, 소성변형에 의한 마모변형층의 제거기구가 물 분위기 하에서의 주된 마모속도의 영향인자로 판단된다.

따라서 마모입자의 방출이 접촉면에서 가까운 마모변형층에서 충분한 소성변형을 경험한 뒤 방출되므로 마모속도가 낮은 인코넬 690의 경우 소성변형을 일으키는데 필요한 에너지는 더욱 많이 필요하게 된다. 이것을 확인하기 위하여 Nano-indentation 실험을 수행하였고 그 결과를 그림 7에 나타내었다. 그림에서 하중 및 깊이에 따른 면적은 단위부피의 변형을 일으키는데 필요한 에너지로 정의될 수 있으며 그 결과 인코넬 690은 인코넬 600에 비해 약 13%정도의 많은 에너지를 소모하는 것으로 나타났다. 따라서 기본적인 크롬함량의 차이에 의한 변형특성의 차이가 마모속도에 영향을 미친 것으로 파악되었다.

3.3 손상파면 관찰

마모실험을 수행한 후 손상면에 대한 SEM 관찰을 수행하였으며 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 우선 공기분위기에서 나타난 마모입자층의 흔적은 거의 찾아볼 수가 없었으며 이에 따라 물 분위기의 경우 접촉면에서의 소성변형층의 파괴가 마모입자 방출의 주된 기구로 보인다. 파면에서와 같이 인코넬 600에서는 떨어져 나간 마모입자의 크기는 다소 크며 두께 또한 굵은 형태를 보이고 있으나 인코넬 690의 경우 변형층 끝단에서 우선적으로 얇은 입자가 방출되는 것이 우세하게 나타났다. 따라서 실험과정동안 슬라이딩 거리(사이클)가 증가함에 따라 마찰계수 값은 인코넬 690이 다소 낮아지는 경향을 보이고 있기 때문에 같은 수직하중 하에서도 전단하중의 크기는 다소 작아지게 된다. 따라서 이러한 전단하중의 차이가 마모입자의 방출 혹은 마모속도에 영향을 미치게 된다.

이러한 결과로부터 입자방출이 접촉면에서 전열관 재료의 표면이 충분한 소성변형을 경험한 후 방출된다면 마찰계수변화로 인한 전단하중의 차이로 인해 손상면 깊이방향으로의 전단응력분포 또한 변화하게 되어 생성되는 소성변형층의 크기는 비슷하나 변형층에서 방출되는 입자의 크기는

다르게 나타난 것으로 보인다.

3.4 마모 모델에 미치는 마찰계수의 영향

Work-rate 모델은 기본적으로 Archard 마모방정식을 기초로 마모과정 중 방출되는 부피속도는 가해진 Work rate(하중*변위/시간)에 비례하며 이때의 비례상수를 마모계수로 표현하고 있다. 그러나 마모입자의 방출은 표면에서 충분한 소성변형을 경험하게 되며, 마모입자의 방출에 필요한 하중은 수직하중보다는 접촉면에서의 전단하중이 주된 역할을 하게된다. 따라서 마찰계수가 클 경우 같은 수직하중에서 전단하중이 증가하게 되어 마모입자의 방출이 더욱 용이하게 될 것이다. 이것을 확인하기 위하여 상대적인 마모속도와 전단하중사이의 관계를 그림 9에 나타내었다. 그 결과 전단하중에 따른 마모량의 변화는 다소 선형성을 보이고 있다. 따라서 각 하중조건 하에서 변위가 변화함에 따라 서로 다르게 나타난 마찰계수가 마모량의 차이로 나타난 것으로 보인다. 그러므로 수직하중에 따른 마모속도의 변화는 각 전열관 재료의 마모속도를 충분히 표현하지 못하고 있으며 이것은 마찰계수를 포함하고 있는 전단하중으로 표현할 경우 마모속도와 전단하중사이에는 어느 정도 선형적인 관계를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 현재까지 슬라이딩 마모에서 표현하고 있는 마모와 하중 및 변위사이의 관계에서 하중은 수직하중보다는 전단하중을 적용하는 것이 더욱 타당한 것으로 보인다.

4. 결론

증기발생기 전열관 재료로 사용되고 있는 인코넬 600, 690에 대한 마모실험을 물 분위기 하에서 페라이트 계열의 스테인레스 강을 사용하여 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 물 분위기 하에서 두 전열관 재료의 마모속도는 인코넬 690이 다소 낮은 경향을 보이고 있다. 이러한 원인은 크롬함량의 차이에 따른 가공경화의 정도가 주된 원인으로 보인다. 소성변형층에 대한 경도실험 결과 인코넬 690에서 표면에 가까울수록 보다 높은 경도 값이 관찰되었다.
- (2) 초기 높은 마찰계수 값에서 반복하중에 따른 가공경화로 인해 표면경도가 증가할 경우 마찰계수는 감소하는 경향을 보이고 있으며, 슬라이딩 거리가 증가할수록 마모속도의 증가폭은 둔화되는 경향을 보인다.
- (3) 손상과면 관찰결과 소성변형층에서 방출되는 입자의 크기는 두 재료에서 다소 차이를 보이고 있었으며 이것은 슬라이딩 거리가 증가함에 따른 마찰계수의 변화가 주된 원인으로 보인다.
- (4) 접촉면에서의 마모입자를 방출시키기 위해서는 수직하중보다는 전단하중이 더욱 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다. 따라서 마모계수를 산출하기 위해서는 기존의 증기발생기 마모모델에서 고려하지 않고 있는 마찰계수를 포함시킬 경우, 마모량과 접촉면사이의 관계는 보다 선형적인 관계로 나타났다.

5. 후기

본 연구는 교육 인적 자원부에서 지원하는 두뇌한국 21과 한국전력공사의 차세대 원자로 기술개발과제에서 부분 지원되었음.

6. 참고문헌

[1] F. H. Stott. " The role of oxidation in the wear of alloys. ", Tribology International, Vol.

31, p61-71, 1998

[2] J. Jiang et al. " The role of triboparticulates in dry sliding wear. " Tribology International, Vol. 31, p245-256, 1998

[3] E. Sauger et al. " Tribologically transformed structure in fretting ", Wear, Vol. 245, p39-52, 2000

[4] N. J. Fisher et al. " Experimental fretting-wear studies of steam generator materials ", J. Pressure Vessel Technology, Vol. 117, p312-320, 1995

[5] F. M. Guerout et al, " Effect of temperature on steam generator fretting-wear ", ASME Int' Conf, of PVP, Vol. 328, Flow-Induced Vibration, p233-246, 1996

[6] P. L. Ko et al, " Friction and wear studies of nuclear power plant components in pressurized high temperature water environments ", ASME Int' Conf, of PVP, Vol. 328, Flow-Induced Vibration, p211-218, 1996

[7] M. K. Au-Yang, " Flow-induced wear in steam generator tubes - Prediction versus operational experience ", J. Pressure Vessel Technology, Vol. 120, p138-143, 1998

[8] F. M. Guerout and N. J. Fisher, " Steam generator fretting wear damage: A summary of recent findings ", J. Pressure Vessel Technology, Vol. 121, p304-310, 1999

[9] D. M. Symons, " Hydrogen embrittlement of Ni-Cr-Fe alloys ", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 28A, p655-663, 1997

표 1. 실험에 사용된 시편의 화학적 조성(wt%) 및 경도

시 편	Cr	Fe	C	Si	Mn	Ti	P	S	Co	Ni	경도(HV)
I600	16.81	9.1	0.026	0.32	0.81	0.35	0.008	0.002	0.012	Bal.	194
I690	29.5	10.4	0.02	0.33	0.26	0.32	0.004	0.001	0.012	Bal.	193
405SS	11.5~ 14.5	Bal.	0.08	1.00	1.00	0.1(Al)	0.04	0.03	-	-	215
409SS	10.5~ 11.75	Bal.	0.08	1.00	1.00	6*%C	0.045	0.045	-	-	229

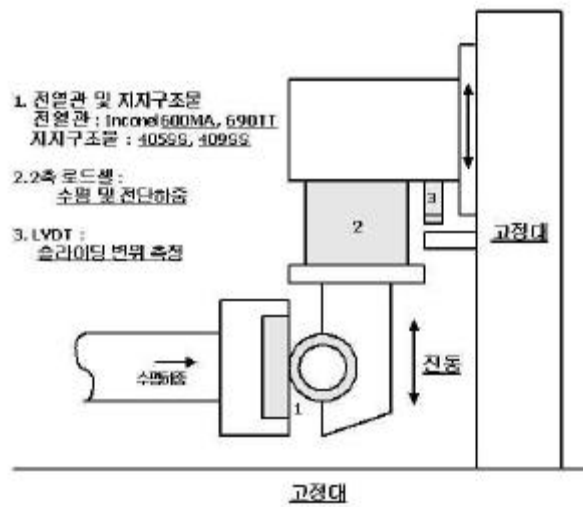


그림 1 실험에 사용된 마모장치의 개략도

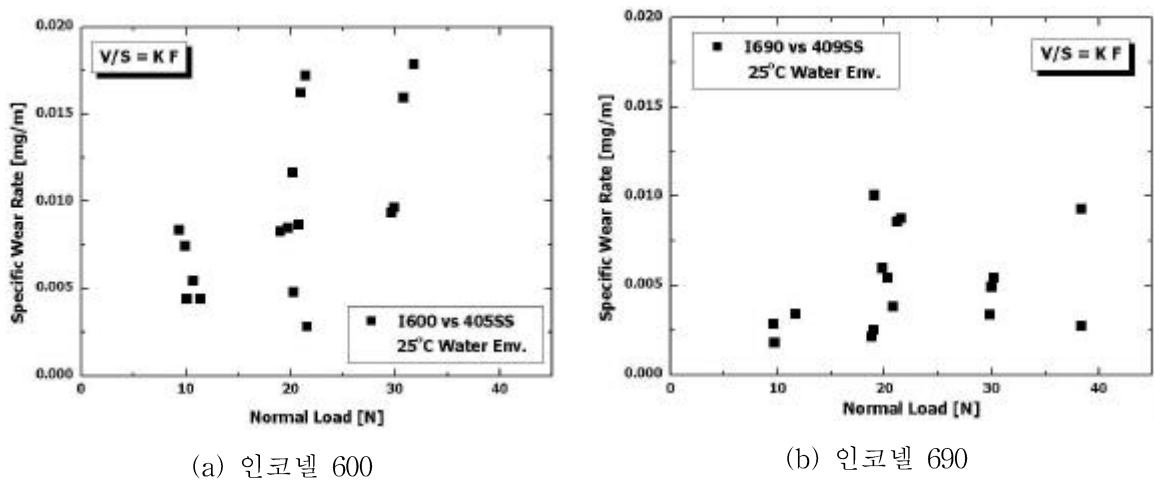
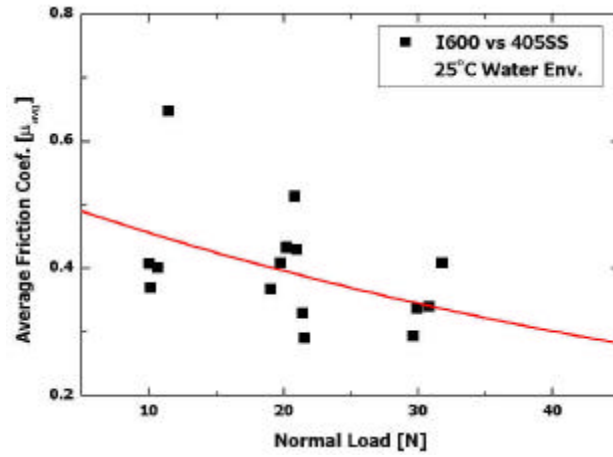
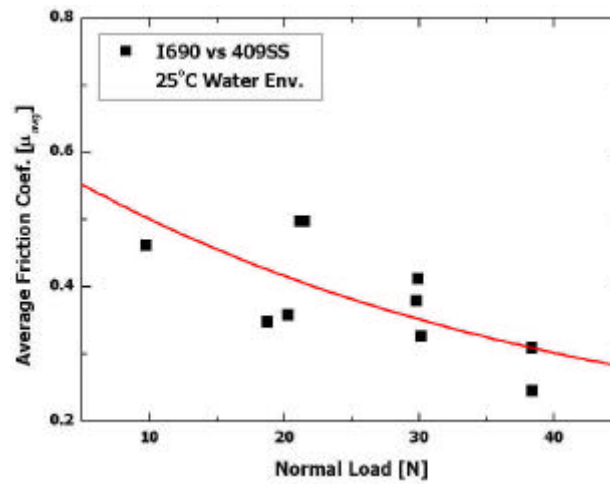


그림 2 하중의 변화에 따른 상대적인 마모속도의 변화. 두 재료 모두 큰 편차를 보이고 있다.



(a) 인코넬 600



(b) 인코넬 690

그림 3 하중에 따른 평균 마모계수 값의 변화

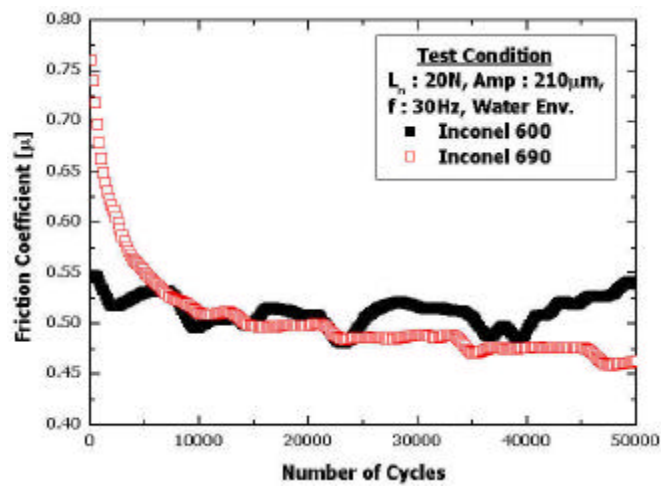


그림 4 사이클의 증가에 따른 마찰계수의 변화

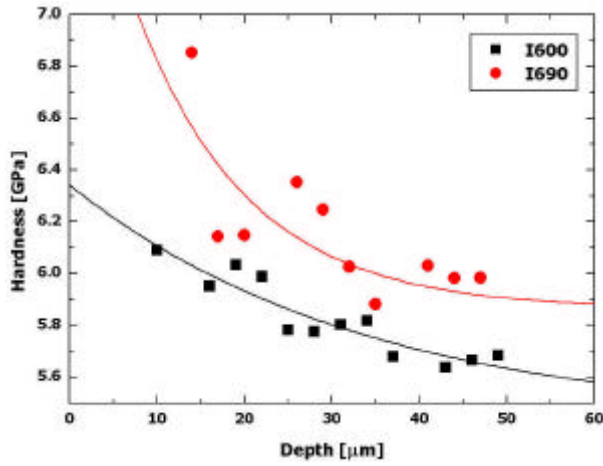


그림 5 마모실험후 손상면 아래의 경도의 변화.

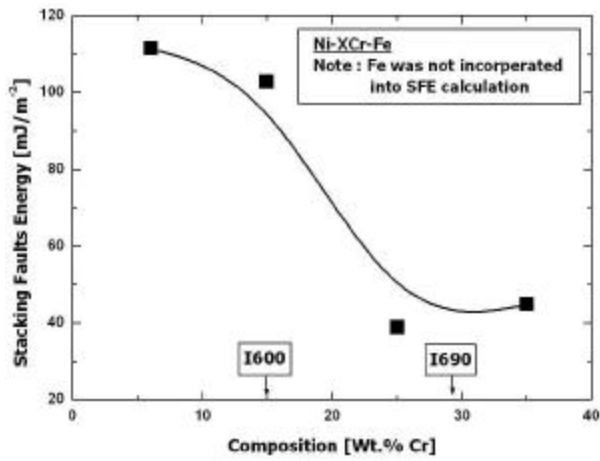
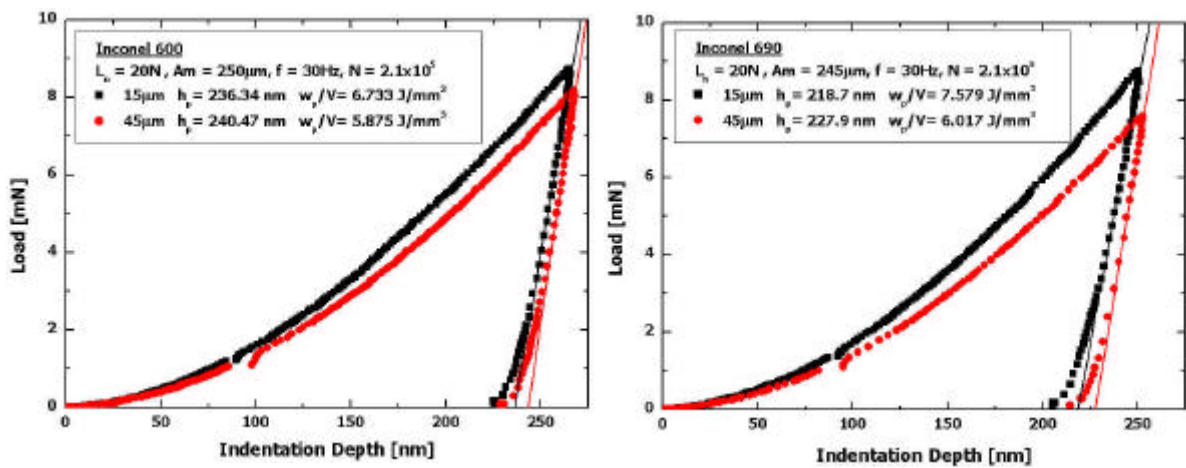


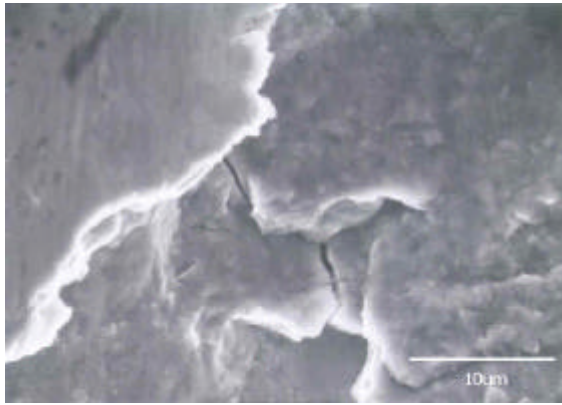
그림 6 니켈합금에서 크롬함량에 따른 적층결함에너지의 변화



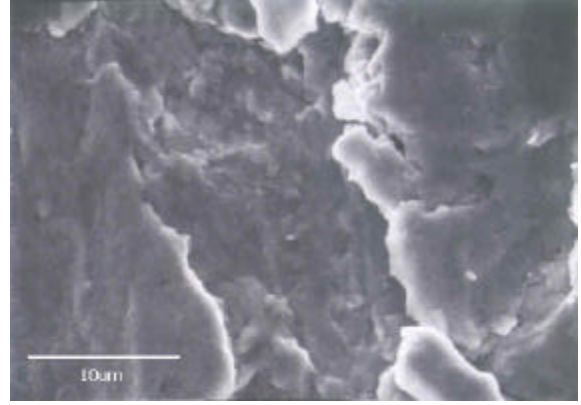
(a) 인코넬 600

(b) 인코넬 690

그림 7 Nano-indentation 실험 결과. 하중 및 깊이로 둘러싸인 면적이 단위 부피당 소성변형에너지로 정의할 수 있다.



(a) 인코넬 600



(b) 인코넬 690

그림 8 마모실험 후 손상파면에 대한 SEM 관찰 결과

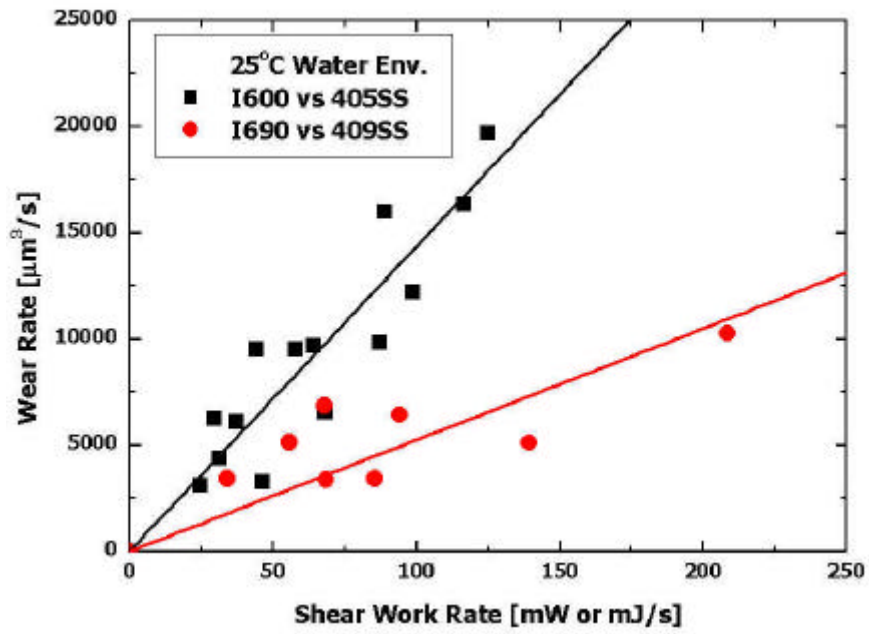


그림 9 마찰계수를 고려한 Work-rate 모델