

## 상온 물분위기에서 증기발생기 전열관 재료의 마모기구에 대한 연구

### A Study on the Wear Mechanism of Steam Generator Tube Materials in Room Temperature Water

이 영호, 김 인섭

한국과학기술원

대전광역시 유성구 구성동 373-1

박 영섭, 김 병섭

전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

상온 물분위기에서 두 전열관 재료(인코넬 600 및 690)의 마모기구를 규명하기 위해 10~40N의 수직하중과 50~400 $\mu$ m의 진폭 및 30Hz의 주파수로 마모실험을 수행하였다. 그 결과 인코넬 690은 인코넬 600에 비해 상대적으로 낮은 마모량을 보이고 있다. 또한 손상면에 대한 SEM 관찰결과로부터 마모입자층 형성보다는 접촉면에서의 소성변형층에서의 파괴에 의한 마모입자 방출이 우세하게 나타났으며, 마모입자의 크기 또한 두 전열관에서 차이를 보이고 있다. 손상면 아래에서는 변형층이 형성되는 것을 관찰하였으며 마모가 계속 진행됨에 따라 특정한 두께를 유지하였다. 이러한 원인은 두 전열관 재료의 기본적인 차이점인 크롬의 함량이 주된 원인으로 판단되며 이에 따른 소성변형특성이 마모에 미치는 영향에 대하여 논의하였다.

#### Abstract

Fretting wear test in room temperature water was performed to evaluate the wear mechanism of steam generator (SG) tube materials (Inconel 600 and 690) against ferritic stainless steels. Test conditions are 10~40N of normal load, 50~400 $\mu$ m of sliding amplitude and 30Hz of frequency. The result indicated that the fretting wear rate of Inconel 600 was higher than those of Inconel 690TT with increasing normal loads and sliding amplitudes. From the results of SEM observation, there was little evidence of particle agglomeration on the worn surfaces, while wear particles were released from deformation substructures formed by severe plastic deformation during fretting wear. Main cause may be due to the difference of stacking fault energy with the chromium content in SG tube materials. Effects of deformation properties on the wear rate and wear mechanism in room temperature water are discussed.

## 1. 서론

최근 들어 증기발생기 전열관의 프레팅 마모현상이 원자력발전소의 건전성을 위협하는 매우 중요한 열화기구로 인식되어가고 있다. 이러한 현상은 2차측에서 발생하는 빠른 유속으로 인해 전열관과 지지구조물사이에서의 진동이 주된 원인으로 알려져 있으나, 내부 구조물 파손 및 작업자의 부주의 등으로 인하여 유입된 금속성 물질(이하 이물질)과 유체흐름으로 인한 유체유발진동(Flow-Induced Vibration, FIV)으로 인하여 충격 및 미끄럼 마모이 빈번히 발생하고 있다. 이러한 이물질에 의한 전열관의 마모현상은 기존의 전열관 및 지지구조물에 의한 마모와는 달리 이물질의 재질 및 형상의 파악이 매우 어렵고, 또한 그 진동형태 역시 확인이 어렵다.

이러한 증기발생기 마모현상을 억제하기 위하여 설계 및 재질변경을 수행하고 있으나, 기본적인 진동현상을 완전히 제거하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 마모에 의한 전열관 손상이 발생할 경우, 잔류수명예측을 위한 평가모델개발은 매우 중요하다. 증기발생기 마모모델인 work rate 모델이 현재 널리 사용되고 있으나 [1-3], 실험조건에 따라 매우 큰 편차를 보이고 있는 단점이 있으며 이러한 편차는 각 실험조건에서 서로 상이하게 발생하는 마모기구의 차이가 주된 원인으로 보인다. 따라서 전열관 재질의 마모계수값 산출이 매우 중요하나, 보다 근원적인 문제점을 해결하기 위해서는 각 실험조건에서의 마모기구 규명이 매우 중요하다.

현재까지의 증기발생기 마모연구에서 알수 있듯이 마모기구를 규명하는 것은 매우 어려우며 거의 대부분의 연구는 마모계수 산출이 주된 목표로 나타났다. 특히 고온고압환경의 경우, 접촉면에서의 산화가능성, 재질의 물성변화 등 매우 복잡한 기구를 가질것으로 예상되나 이에 대한 연구는 거의 전무한 상태에 있다. 따라서 최종목표인 고온고압환경에서의 마모기구를 규명하기 전에, 본 연구에서는 상온 물분위기에서 마모기구를 규명하고 마모기구와 마모계수와의 상관관계를 알아보았다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시편

본 실험에 사용된 재료는 현재 국내 원전에서 사용되는 인코넬 600 및 690 합금을 사용하였으며, 이에 대한 지지구조물 재료로 페라이트 계열의 스테인레스 강을 사용하였다. 각 시편의 조성 및 경도값은 표 1에 나타내었으며, 마모량의 측정은 0.1mg의 정확도를 가진 미세저울을 이용하여 실험 전후에 수행하였다. 측정의 오차를 줄이기 위하여 5회 이상 반복 측정과 기준시편을 이용하였으며 측정전에 초음파 용기에서 세척하여 마모입자를 충분히 제거한 후 건조시켜 질량을 측정하였다.

### 2.2 실험변수

마모시험에서 나타난 반복 미끄럼 진폭, 수직 및 수평하중은 실험중에 연속적으로 측정하여 마찰계수를 산출하였으며, 모터의 속도로 주파수를 조정하였다. 실험에 사용된 변수로 수직하중은 10~40N, 미끄럼 진폭은 50~400 $\mu$ m이며 30Hz의 주파수를 적용하여 실험을 수행하였다.

## 2.3 경도 및 손상면 관찰

손상면 아래에서의 경도변화를 관찰하기 위하여 단면을 절단하여 소성변형층의 두께를 비교하였다. 또한 기계적 특성변화에 대한 정보를 획득하기 위하여 미세경도 실험을 수행, 표면아래에서의 변형정도를 비교하였다. 물분위기에서의 전열관 재료에 대한 마모기구를 파악하기 위하여 실험을 수행한 후 손상면에 대한 주사직 전자현미경(SEM) 관찰을 수행하였으며, 표면변형층의 두께를 확인하기 위하여 단면을 관찰하였다.

## 3. 실험결과 및 토의

### 3.1 마모량의 변화

그림 1에 전체 미끄럼 거리에 따른 마모량의 변화를 나타내었다. 미끄럼 거리가 증가함에 따라 두 재료 모두 마모량이 증가함을 보이고 있다. 또한 수직하중이 증가함에 따라 마모량의 증가 역시 두 재료에서 유사하게 나타났다. 두 재료의 마모속도를 비교해 볼때 모든 하중조건하에서 인코넬 690이 다소 낮은 마모량을 보이고 있다. 낮은 미끄럼 거리에서는 마모량이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있으나, 미끄럼 거리가 클 경우 마모량의 증가속도가 서서히 둔화되는 경향을 보이고 있다. 이것은 미끄럼 거리가 증가함에 따라 접촉면에서 마모에 대한 저항성을 가진 인자가 생성되는 것을 나타낸다.

일반적으로 초기 미끄럼 과정에서는 돌출부들간의 상호작용이 우세하게 작용하여 방출되는 마모 입자의 크기도 다소 크며 이에 따라 마모량의 증가속도는 매우 빠르다. 그러나 이러한 영향은 마모초기에 끝나게 되며 이후의 마모량은 마모입자층이 형성되지 않을 경우, 접촉면 사이에서 변화된 기계적 특성에 의해 결정된다. 특히, 물분위기하에서 마모입자의 방출이 더욱 용이하게 되며, 이에 따라 지속적인 접촉면에서의 입자방출은 충분한 소성변형을 경험한 표면 가공경화 정도에 따라 결정되는 것을 알 수 있다. 접촉면의 가공경화에 따른 경도의 변화는 결국 마찰계수의 변화로 나타나게 된다. 일반적으로 표면의 경도가 높을 경우, 마모실험에서 흡착경향 및 실제 접촉면적은 다소 감소하게 되어 마찰계수값 또한 변화하게 된다. 따라서 이것을 확인하기 위하여 미끄럼 진폭이 210 $\mu\text{m}$ 에서의 실험 사이클에 따른 마찰계수의 변화를 그림 2에 나타내었다. 초기 수천 사이클 내에서 마찰계수값은 인코넬 690이 인코넬 600에 비해 매우 높은 값을 보이고 있다. 그러나 마모가 진행됨에 따라 두 전열관 재료의 마찰계수값은 다소 비슷한 경향을 보이다가 4만사이클 이상에서는 인코넬 690이 더욱 낮은 값을 보이고 있다. 이러한 경향은 물분위기에서는 마모입자층의 형성이 용이하지 못하기 때문에, 반복적인 변형에 의한 표면에서의 가공경화가 인코넬 690에 더욱 크게 작용하여 마찰계수의 감소로 나타났다. 이에 따라 인코넬 690에서의 마모량 증가속도가 미끄럼 거리가 증가함에 따라 급격히 둔화되는 것으로 생각된다.

### 3.2 손상면 아래에서의 경도변화

두 전열관 재료의 마모실험결과로 부터 미끄럼 거리가 증가함에 따라 표면에서의 기계적 특성변

화와 관련된 마찰계수의 변화로 인하여 마모량은 다소 차이를 보이고 있다. 이러한 변화를 확인하기 위하여, 마모 손상면 아래에서의 경도변화를 관찰하였으며 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 초기 두 전열관 재료의 경도 값은 매우 비슷하게 나타났으나, 마모실험 후 인코넬 690의 경우 표면에 가까울수록 더욱 높은 값을 보이고 있다. 따라서 이러한 높은 표면경도 값이 마모속도에 영향을 미친 것으로 보인다.

두 전열관 재료는 니켈 기지합금으로 기본적인 차이점은 크롬의 함량이 증가함에 따라 니켈의 적층결합에너지(Stacking Fault Energy, SFE)는 그림 4과 같이 감소하게 된다 [4]. SFE가 낮을 경우, 소성변형에 의한 손상면 아래에서의 전위밀도는 급격하게 증가하게 되며 표면의 경화가 빠른 시간내에 발생하게 된다. 따라서 미끄럼 거리가 증가함에 따라 표면에서의 소성변형 및 변형경화로 인해 생성된 마모 변형층이 마찰계수를 감소시켜 마모속도의 증가가 둔화되는 것으로 보인다. 따라서 물분위기하에서는 마모입자의 방출이 접촉면에서 생성된 마모변형층에서 충분한 소성변형을 경험한 뒤 방출되므로 마모속도가 낮게 나타난 인코넬 690의 경우, 소성변형을 일으키는데 더욱 많은 에너지가 필요하게 된다. 이것을 확인하기 위하여 Nano-indentation 실험을 수행하였고 그 결과를 그림 5에 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 변형 특성의 차이가 마모속도에 영향을 미친 것으로 파악되었다.

### 3.3 물분위기에서의 전열관 마모 기구

마모실험을 수행한 후 손상면에 대한 관찰을 주사식 전자현미경(SEM)으로 관찰하였으며 그 결과를 그림 6에 나타내었다. 손상면에서의 마모입자는 거의 대부분 외부로 방출되었으며 마모입자층 형성에 대한 흔적은 찾아보기 어려웠다. 인코넬 600의 경우, 변형층에서 떨어져 나갈 마모입자의 크기는 다소 크며 두께 또한 굵은 형태로 보이나 인코넬 690은 변형층 끝단에서 우선적으로 얇은 입자가 방출되는 것으로 나타났다.

표면아래에서의 변형특성을 파악하기 위하여 손상면의 단면을 그림 7와 같이 관찰하였다. 그림에서와 같이 특정두께의 균열을 포함한 변형층의 형성을 관찰하였다. 따라서 이러한 변형층이 두 전열관 재료의 마모에 영향을 미치는 것으로 보인다. 마모입자의 방출이 이러한 특정 두께의 손상면에서 방출된다면 이러한 소성변형층의 형성과 파괴가 마모속도를 결정하는 중요한 것으로 생각된다. 우선 초기 사이클이 증가함에 따라 우선적으로 표면에서의 마모입자방출이 우세하게 작용하며 평활한 접촉면을 형성한다. 계속적인 변형에 의해 접촉면 아래에서의 소성변형층을 형성하게 되며 표면에서의 변형을 이러한 층에서 수용하기 때문에 마모입자의 방출은 다소 느려진다. 따라서 접촉면에서 실제 변위는 소성변형층에 의해 매우 낮아지게 되며 이에 따라 마모입자의 방출보다는 소성변형층 아래의 균열생성이 더욱 우세하게 된다.

접촉면에서 생성된 매우균열의 전파경로는 현재까지 모호한 상태이다. 그러나 일반적으로 접촉면에서 슬라이딩 마모가 발생할 경우, 표면에서의 변형률은 매우 큰 값을 보이고 있다. 이러한 변형률을 수용하기 위해서는 내부조직의 변화가 필수적이다. 그러나 증기발생기 전열관의 경우 약 1000°C까지 안정한 상을 유지하므로 이에 따라 전위집적에 의한 셀조직형성이 용이한 것으로 알려져 있다. 이러한 셀조직은 재료의 적층결합에너지와 밀접한 관련이 있으며 적층결합에너지가 적

을수록 셀 크기는 감소하는 경향을 보인다 [5]. 또한 이러한 셀 경계는 균열전파의 우세한 경로로 알려져 있다. 따라서 적층결합에너지가 낮은 인코넬 690의 경우 생성되는 마모입자의 크기는 그림 6에서와 같이 작게 나타나며 이에 따라 마모량이 감소하는 것으로 보인다. 따라서 물분위기하에서 마모기구는 접촉면에서 생성되는 소성변형층에서 셀 경계를 통한 마모입자의 분리와 깊이방향으로의 변형층 생성이 평형을 이루면서 마모가 진행되는 것으로 보인다. 따라서 결과적으로 마모속도는 이러한 소성변형층에 따라 결정되며 결국 표면에서의 변형특성과 마모량에 따른 마모계수는 매우 밀접한 관계를 보이고 있다.

#### 4. 결론

상은 물분위기하에서 두 전열관 재료(인코넬 600 및 690)에 대한 마모실험을 수행하였고 그 결론은 다음과 같다.

- (1) 마모실험결과, 상온 물분위기하에서 인코넬 690이 인코넬 600에 비해 보다 큰 마모저항성을 가지는 것으로 나타났다. 주된 원인은 마모가 진행됨에 따른 표면에서의 마찰계수 감소로 보인다.
- (2) 손상면 아래에서의 경도변화로 부터 인코넬 690의 경화가 매우 크게 나타났다. 이러한 표면에서의 경화는 마모과정에서 마찰계수의 감소 및 소성변형에 대한 저항성으로 나타났다.
- (3) SEM 관찰결과 표면에서 방출되는 마모입자의 크기는 소성변형에 의한 셀조직의 크기와 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 보이며, 이것은 두 전열관 재료의 기본적인 차이점인 크롬함량에 따른 적층결합에너지(Stacking Fault Energy)가 차이가 주된 원인으로 나타났다.
- (4) 상온 물분위기하에서 마모기구는 접촉면에서 생성되는 소성변형층에서 셀 경계를 통한 마모입자의 분리와 깊이방향으로의 변형층 생성이 평형을 이루는 것으로 나타났다.

#### 후기

본 연구는 교육인적자원부에서 지원하는 두뇌한국 21과 한국전력공사의 차세대 원자로 기술개발 과제에서 부분지원되었음.

#### 참고문헌

- [1] N. J. Fisher et al. " Experimental fretting-wear studies of steam generator materials ", J. Pressure Vessel Technology, Vol. 117, p312-320, 1995
- [2] 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
- [3] 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
- [4] D. M. Symons, " Hydrogen embrittlement of Ni-Cr-Fe alloys ", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 28A, p655-663, 1997

[5] D.A. Rigney et al, " Deformation substructures associated with very large plastic strains ", Scripta Metall. et Mater. Vol. 27 975-980, 1992

표 1. 실험에 사용된 전열관 및 지지구조물 재료의 화학적 조성(w/o) 및 경도값

시편	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	6x%C	0.045	0.045	-	-	229

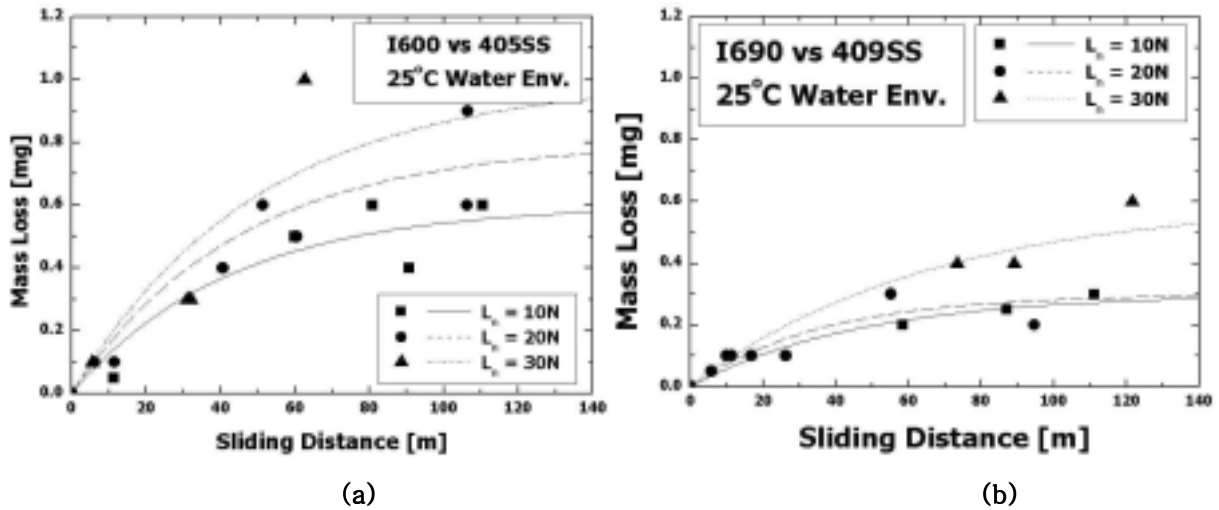


그림 1. 슬라이딩 거리에 따른 두 전열관 재료의 마모량의 변화

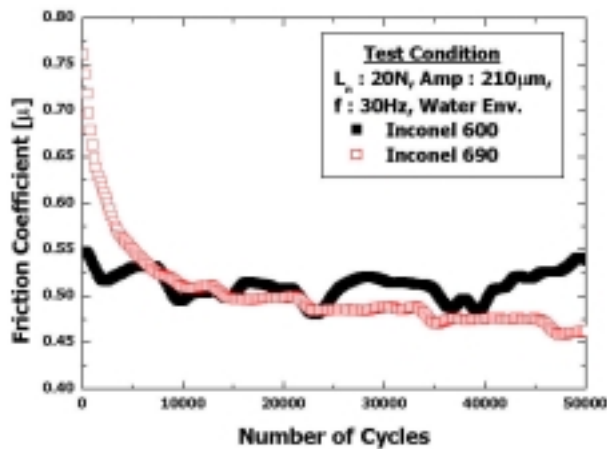


그림 2. 사이클에 따른 두 전열관 재료에서의 마찰계수의 변화

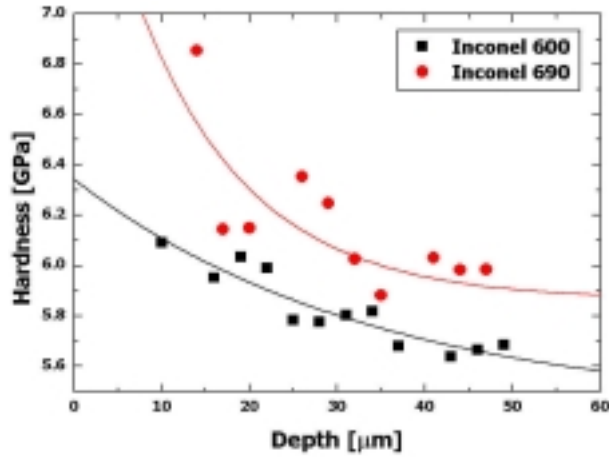


그림 3. 손상면 아래에서의 경도 변화

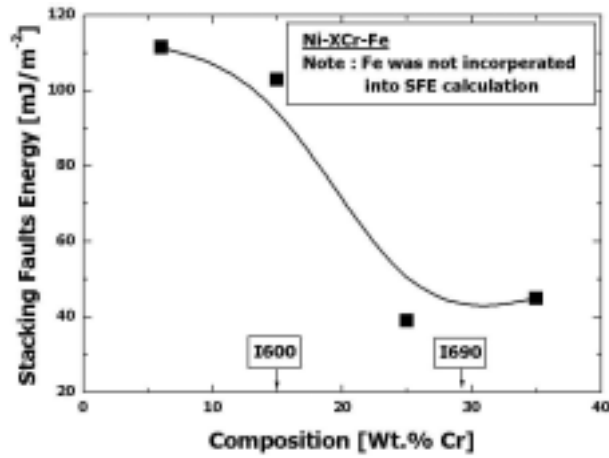


그림 4. Ni-Cr-Fe합금에서 크롬함량에 따른 적층결함에너지(SFE)의 변화

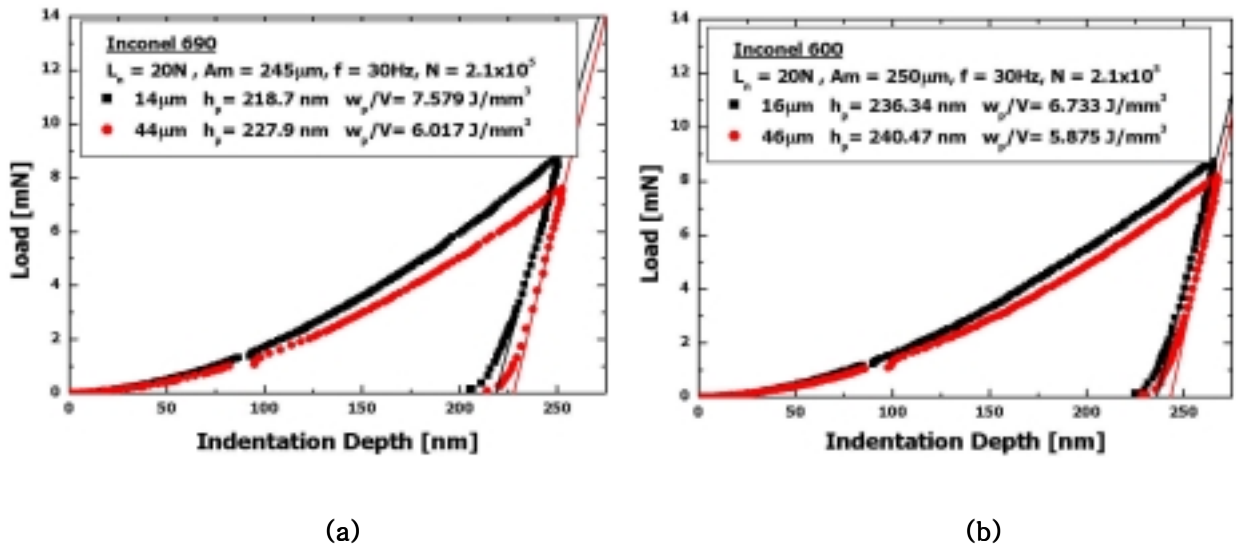
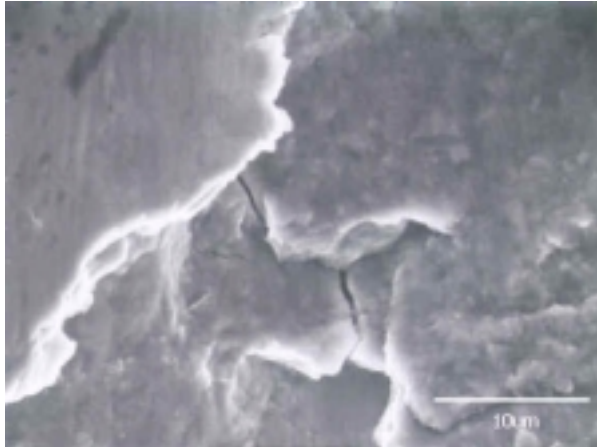
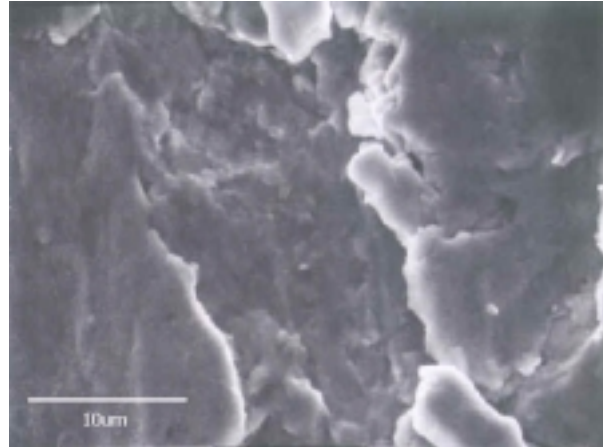


그림 5. 손상면 아래에서의 소성변형에너지의 변화. Load-depth면적이 적을수록 변형에 대한 저항성을 가진다.

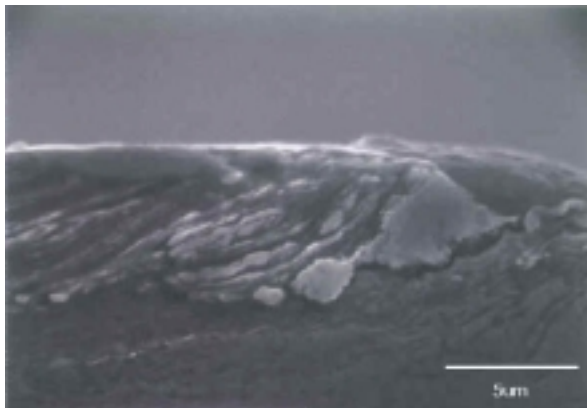


(a) 인코넬 600

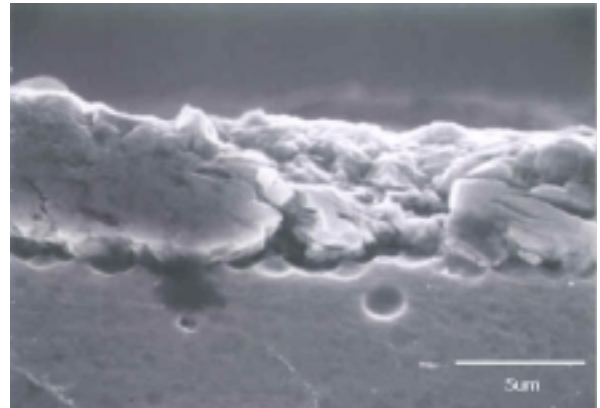


(b) 인코넬 690

그림 6. SEM을 이용한 손상면 관찰 결과



(a) 인코넬 600



(b) 인코넬 690

그림 7. 손상면 아래에 형성된 소성변형층. 마모가 계속진행됨에 따라 특정두께를 형성하는 것으로 나타났다.