

# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 에서 미끄럼시의 마모 및 마모전이 기구

(Wear and wear transition mechanism in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> during sliding)

한 국 표 준 연 구 소  
조 성 재

## 1. 서 문

고온성질 및 내마모 성질이 우수한 것으로 알려져 있는 요업재료가 아직 그 사용 영역이 크게 확장되지 못하고 있는 이유는 마모문제 때문이다. 종래 엔진재료로서 사용될 수 있을 것으로 크게 기대되어 왔던 사실과는 달리 아직도 성공하지 못하고 있는 것이 좋은 한 예이다. 이와같이 요업재료에서의 마모가 중요한 문제로 대두함에 따라 최근 마모를 이해하기 위한 연구들이 실험적으로 또 이론적으로 활발히 진행되어 왔다. 그러나 마모는 접촉표면 및 부표면(subsurface)에서의 탄성 및 소성변형 또 화학적 반응등이 통상 복합적으로 작용하여 나타나는 매우 복잡한 것이기 때문에 아직도 그 기구는 분명하지 않다. 따라서, 요업재료에서 마모가 어떻게 일어나는 지를 밝히는 것 아직도 매우 중요하다.

본 연구의 목적은 요업재료에서 미끄럼시의 마모기구를 실험적으로 밝히는 것이다. 비교적 제 성질이 잘알려져 있는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 모델계로 택하여 마모시험을 행하였으며, 미끄럼 시간에 따른 마모양상의 변화 및 접촉표면과 부표면에서의 미세구조 변화를 관찰하여 마모기구를 규명하였다.

## 2. 실험방법

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>는 고순도(99.99%) 분말에 약 150 ppm의 MgO를 첨가하여 1650 °C, 45 MPa에서 직접 hot pressing으로 제조하여 사용하였다. Figure 1은 이와같이 제조한 시편의 미세조직으로, 기공이 거의 없으며, 입자크기가 균일하여 모델계토써 적당함을 보여 주고 있다.

마모시험은 사용의 4구(four ball) 장치를 밑의 3구대신 disk형의 시편을 사용할 수 있도록 약간 변형시킨 것을 사용하여 시행하였다. Figure 2는 시편의 접촉상태를 보여주는 도시적인 그림이다. Diamond paste 1 μ까지 polishing한 직경이 약 6.35 mm

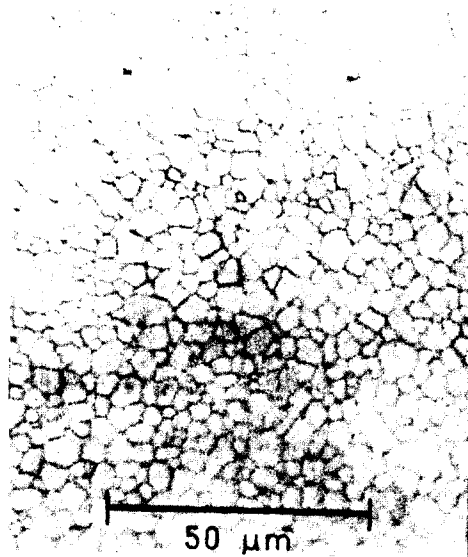


Fig. 1. Optical microstructure of hot pressed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (thermally etched).

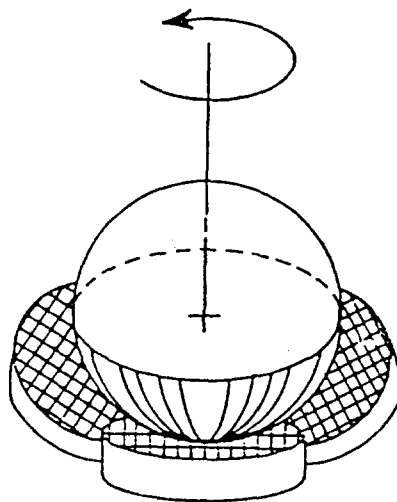


Fig. 2. Schematic illustration of specimen contact geometry at modified four ball wear tester.

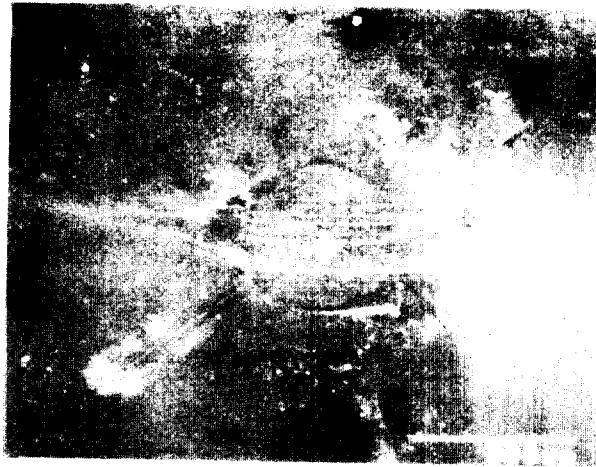


Fig. 3. Typical wear scar formed on  $Al_2O_3$  specimen surface.

인 세개의 disk형 시편위에 직경이 약 12.7 mm인 상용의  $Si_3N_4$  구를 올려 놓고  $Si_3N_4$  구에 하중을 가하면서 회전시켰다.  $Si_3N_4$  구의 회전속도는 100 rpm으로 고정시켰으며, 하중은 45, 55, 65, 75 kg으로 각각 변화시켰다. 윤활유로는 paraffin oil을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 1) 마모 및 마모전이 기구

$Al_2O_3$  시편에는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 원형의 마모흔적(wear scar)이 나타난다. 본 연구에서는 이 마모흔적의 직경을 약 60배로 확대된 광학현미경 상에서 측정하였으며, 이 측정된 값으로써 마모된 정도를 표시하였다. 서로 직각 되는 두 직경을 측정하여 그 평균값을 취하였다.

Fig. 4는 '0' h hot pressing한 시편을 각각 45, 55, 65, 75 kg 에서 시험하였을 때의 미끄럼 시간에 따른 마모량의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 마모는 모든 하중하에서 두 단계로 분명히 나누어졌다. 시험초기에는 마모량이 작았으며, 그 증가속도는 매우 작았다. 그러나 어느 임계점 이후에는 마모속도가 크게 증가하였다. 그리고 임계점은 하중이 클 수록 빨리 도달되었다.

위의 마모결과는, 마모량이 시간(또는 미끄럼 거리)에 비례한다는 종래까지의 보고들과 완전히 다른 것으로 아주 중요한 의미를 가지는 것이다. 지금까지는

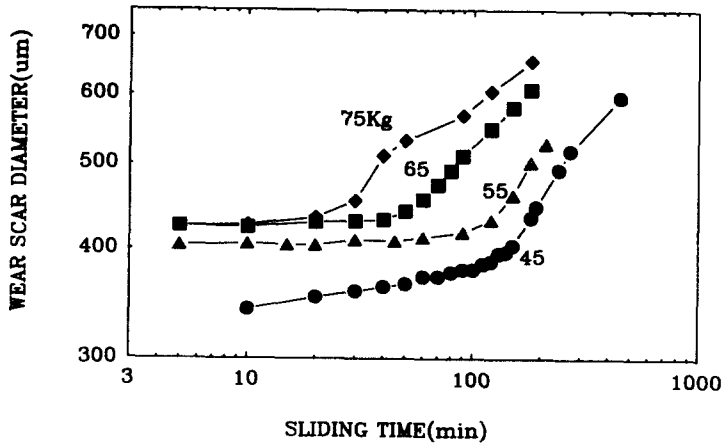


Fig. 4. Change of wear scar diameter as a function of sliding time at various loads.

마모량이 미끄럼 거리(미끄럼 속도가 일정할 때는 미끄럼 시간과 같은 의미이다)에 비례한다는 바탕하에 마모상수를 구하여 이를 가지고 재료의 마모를 나타내었다. 즉 마모부피( $V$ )  $\propto$  상수( $k$ )  $\times$  미끄럼거리( $s$ ) (또는 미끄럼 시간( $t$ ))의 관계식으로 부터  $V$ 를 측정하여 마모상수  $k$ 를 구하였으며, 이를 가지고 재료의 내마모도를 나타내었다. 그러나 Fig. 4에서 보는 바와 같이 마모량은 미끄럼시간에 결코 비례하지 않는다.

위의 마모결과는 실제 응용면에서 볼 때에도 중요한 의미를 가진다. 일단 임계점을 지나서 마모속도가 증가하면 그 재료는 더 이상 사용하기가 어려워 진다는 점이 그것이다. 따라서, 각 단계에서의 마모기구를 규명하는 것은 물론, 마모전이(wear transition)가 왜, 어떻게 일어나는가를 밝히는 것은 아주 중요하다. 본 연구에서의 가장 큰 목적중의 하나가 이것이다.

Fig. 5 - 7은 각 단계에서의 접촉표면 미세구조의 변화를 보여 주는 것이다. 초기 단계에서는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 grooving에 의하여 마모가 일어났다. 미끄럼 시간이 길어짐에 따라 grooving이 좀더 심하게 일어났으나 근본적인 마모기구의 차이는 없었다. 그러나, 일단 임계점에 이르면 Fig. 6에서 보는 바와 같이 부표면에 균열이 발생하였다. (Fig. 6에서 화살표로 표시된 흰 부분들이 부표면의

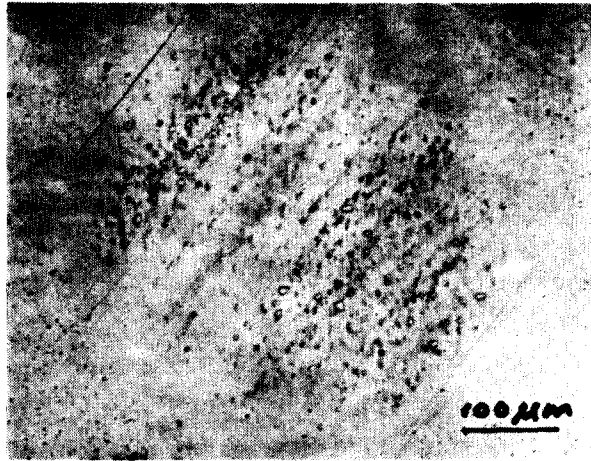


Fig. 5. Optical microstructure of worn surface in specimen before wear transition.



Fig. 6. Optical microstructure of worn surface in specimen near transition.

균열을 나타내는 것으로, 빛이 투명성의  $Al_2O_3$  표면을 투과하여 균열에서 산란되기 때문에 이와 같이 회색 나타난다). 그리고, 이 부표면의 균열이 표면으로 연결됨에 따라 후기단계에서의 마모는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 grain pull-out에 의하여 일어났다.

이상에서와 같이 마모 데이터의 갑작스런 증가는 마모기구가 grooving에서 grain pull-out으로 바뀌기 때문이다. 그리고, grain pull-out은 부표면에 생성된 균열이 표면으로 전파함에 따라 일어난다. 중요한 점은 부표면에 균열이 생성되자마자

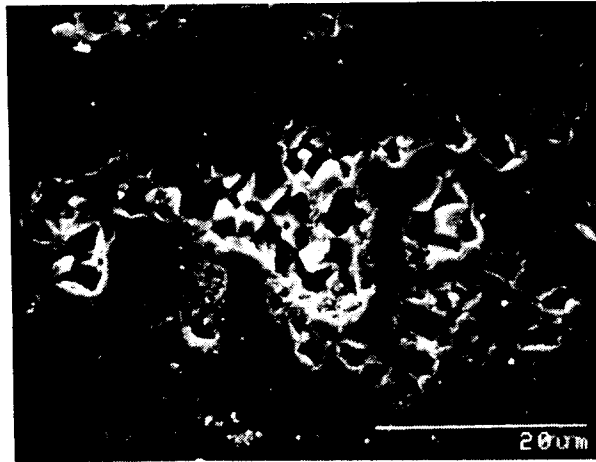


Fig. 7. Microstructure of worn surface in specimen after transition.

표면으로 연결되어 grain pull-out 이 일어난다는 점이다. (즉, 입계점에서 처음으로 부표면에 균열이 존재함이 관찰되었다.). 따라서, 어떤 과정으로 부표면에 균열이 발생하는가를 밝히는 것이 중요하게 된다.

본 연구에서는 마모시험이 진행됨에 따른 부표면에서의 손상(damage)을 투과전자 현미경(TEM)을 사용하여 관찰함으로써 이를 규명하였다. Fig. 8은 초기단계의 시편의 TEM 사진이다. 전위들이 축적되어 있음을 보여주고 있다. 더우기 여러 미끄럼 시간에서 TEM 관찰을 한 결과 전위들은 미끄럼 시간이 길어질 수록 더 많이 축적됨이 분명하였다.

본  $Al_2O_3$ 에서와 같이 slip system이 5개 미만인 다결정 재료에서 전위들이 생성 되면 입계에는 잔류응력이 생성된다. 이 응력은 어떤 입계에서는 압축, 또 다른 어떤 입계에서는 인장이 될 수 있다. 미끄럼 시간이 길어져 충분한 양의 전위들이 생성되어 축적되면 이러한 응력의 크기가 증가하며, 인장응력이 걸린 입계에서 균열이 발생할 수 있다. 따라서, Fig. 6의 부표면 균열은 전위의 축적에 의하여 생성된 입계균열임이 분명하다. TEM 사진인 Fig. 8은 부표면의 균열들이 입계균열임을 직접적으로 보여주고 있다. 이 입계균열들이 표면에서 생성되지 못하고 부표면에서 먼저 생성되는 이유는 Hertzian 접촉이론에서 알 수 있듯이 전위생성의 구동력인 전단응력(shear stress)이 표면으로부터의 어떤 깊이에서 최대가 되기 때문이다.



Fig. 8. TEM microstructure showing subsurface damage (dislocations).

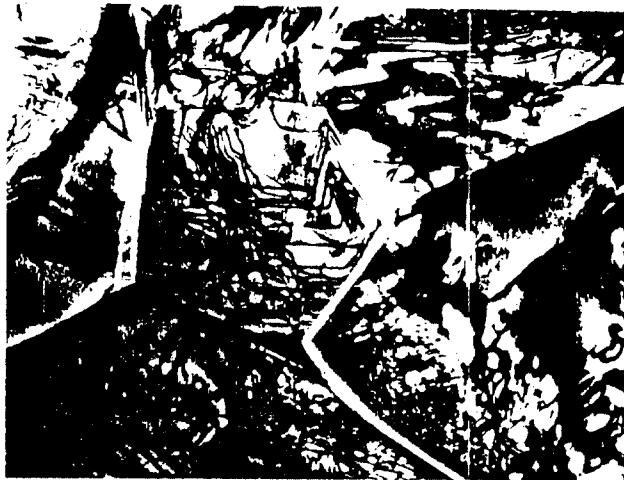


Fig. 9. TEM microstructure showing subsurface grain boundary crack.

#### 4. 결 론

$Al_2O_3$ 에서 미끄럼시 마모가 어떻게 일어나는 지를 미세구조의 관찰을 통하여 분명히 보여 주었다. 마모는 초기단계에서는 grooving에 의해서 후기단계에서는 grain pull-out에 의하여 주로 일어난다. 초기단계로부터 후기단계로의 마모천이는 부표면에서의 전위축적에 의한 cracking에 의하여 일어난다.

이와같이 마모가 두 단계로 분명히 나누어지는 현상은 본 실험의  $Al_2O_3$ 에만 극한 되는 것이 아니고  $Si_3N_4$ , SiC 등의 취성요업 재료에서는 대부분 관찰되는 일반적인 것이다. 더우기 이들 공유결합 물질에서도 미끄럼시 전위들이 축적됨이 관찰된 바 있다. 다만  $Si_3N_4$ , SiC 등의 공유결합 물질에서는 전위의 생성이  $Al_2O_3$  등의 이온결합 물질에서 보다 어렵기 때문에 마모에 대한 저항성이 커서 일반적으로 마모천이가 보다 늦게 도달된다.