

# 반복 미끄럼 접촉에 의한 표면층의 경화에 대한 연구

박준목\*, 김석삼\*\*

\* 경북대학교 기계공학과 대학원

\*\* 경북대학교 기계공학과

( A study on the surface hardening by repeated sliding contact )

## Abstract

Repeated sliding contact wear test was performed with copper specimens to obtain the relationship between wear and surface hardening. Wear surface and wear track section were observed by optical microscopy. Wear volume and micro-vickers hardness of sublayer below wear surface were obtained. These results suggested that wear mechanism depended on contact load than sliding velocity. Therefore wear mechanism was abrasive wear within critical contact load and adhesive wear over critical contact load. Wear rate increased with contact load, sliding distance but decreased with sliding velocity. Surface hardening increased with sliding velocity and sliding distance but decreased with contact load.

*keywords:* Sliding contact, Surface hardening, Wear volume

## 1. 서론

두 물체간의 미끄럼접촉에 있어 접촉압력이 작용하고 마찰속도가 있으면 마멸이 발생하고, 계면에는 마찰력과 마찰계수가 존재한다. 이러한 미끄럼접촉에 의해 발생된 마멸면을 광학현미경 또는 전자주사현미경을 통하여 관찰하여 보면 두 접촉재료간의 특성에 의해 연삭 마멸(Abrasive wear) 또는 응착마멸(Adhesive wear)이

발생하고 이러한 마멸기구에 대해서는 이미 수 많은 실험결과와 이론이 제시되었다. Suh<sup>(1)</sup>에 의한 Delamination 이론은 마멸기구의 규명에 있어 큰 영향력을 미치고 있으며, 마멸의 기원을 밝히는 중요한 단서로 인식되고 있다. 그러나 마멸의 기구를 밝히기 위한 연구는 Meng<sup>(2)</sup> 등이 서술하였듯이 재료의 조건, 환경적인 영향 등과 같은 100여 가지 이상의 많은 인자에 의해 영향을 받으므로 마멸기구를 정

확히 정의하는 것은 어려운 일이다. 그럼에도 불구하고 두 물체의 접촉에 따른 마멸현상을 규명하는 것은 기계기구의 수명예측 등에 필수불가결하므로 탄소성적 이론접근과 실험이 뒷받침된 실험식들이 제시되고 있다. 최근 Hughes<sup>(3)</sup> 등은 표면하의 응력을 평가하기 위하여 실험한 결과 표면하 깊이 방향의 응력은 재료의 flow stress와 dislocation 경계의 간격과 관계된다는 것을 발표하였다.

또한 Kral<sup>(4)</sup> 등은 표면층의 잔류응력에 의해 경계층에서 표면하의 응력보다 2-4 배 정도 항복응력이 커졌고, 반복하중에 의한 잔류응력, 변위, 접촉압력에 의한 delamination을 확인한 바 있다. Alpas<sup>(5)</sup> 등은 OFHC를 이용한 실험을 통하여 표면하의 응력과 변형률은 미끄럼 접촉에 의하여 Voce type의 constitutive equation에 의함을 보여주고 있으며 이러한 응력조건에서 void는 성장하게 되고 정수압적 접촉압력에서 damage를 받게되면 균열이 생성되어 어느 깊이에서 delamination 균열이 전파하는 것으로 이해하였다. 강<sup>(6)</sup> 등은 Cr-Ti합금강의 회전접촉에 의한 표면층의 잔류응력을 X-선을 이용하여 측정하고 이론적 전단응력분포와 비교하는 연구 결과를 발표하기도 하였다.

일반적으로 반복되는 구름접촉하에서는 표면층의 피로에 의한 표면층 경화현상에

관한 연구가 많이 이루어져 왔으나 미끄럼접촉하에서의 표면경화는 표면의 마멸이 연속적으로 발생하므로 이러한 경화현상에 대한 관찰이 매우 곤란하다. 또한 탄소가 포함된 강류에서는 표면층의 높은 접촉열로 인한 표면층의 침탄효과 등에 의한 경화 또는 탈탄현상에 의한 연화등이 예상되므로 접촉조건에 따른 표면층의 순수한 경화현상을 관찰하는 재료로서는 부적절하다고 판단된다.

그러므로 본 연구에서는 탄소가 포함되지 않은 구리(OFHC)를 이용한 마멸실험을 통하여 두 재료간의 반복되는 미끄럼접촉에 의한 마멸현상을 관찰하고 표면에서의 미끄럼접촉이 표면층에 미치는 변형을 현미경적인 관찰과 경도를 측정하여 미끄럼접촉에 의한 표면층의 경화가 마멸에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

## 2. 실험

### 2-1 시편준비

마멸실험은 Ball on Disk형의 실험장치를 사용하였으며 시편은 직경 25mm, 두께 7mm의 Disk형태로 제작하였고 Ball은 베어링강(STB2)의 직경 12.7mm 강구를 사용하였다. 시편은 구리봉재를 절단, 평면도를 맞추기 위해 기계가공을 실시하고 표면 연마 후 polishing 하였다. 시편 준비 과정에서의 변형과 잔류응력의 제거를 위

해 315°C에서 1시간동안 수소분위기에서 annealing처리를 하였으며 열처리시 발생된 표면의 scrach를 제거하기 위해 alumina powder(0.3 $\mu$ m)로 재 polishing 후 아세톤으로 초음파 세척하였다.

## 2-2 실험

(1) Ball on Disk형의 마찰마멸시험기를 이용한 마멸실험 조건은 Table 1과 같다.

Table 1 Wear test conditions.

접촉 하중(N)	마찰속도 (m/s)	미끄럼거리(m)
15, 30, 45	0.06	36, 72, 144
	0.12	

(2) 마멸실험이 끝난 시편은 아세톤으로 세척후 광학현미경으로 마멸면을 육안 관찰 및 사진촬영하였다.

Roughness Tester로 마멸단면을 측정하고 Planimeter로 마멸단면적을 구하였다. 그 후 트랙면과 평행한 단면을 얻기 위해 트랙중앙에서 2~3mm 떨어진 지점을 다이아몬드 절단기를 이용하여 절단하여 아세톤으로 초음파 세척 하였으며 단면이 연마 또는 polishing에 의해 마멸면이 훼손되는 것을 방지하기 위해 수지로 마운팅처리하였다. 광학현미경을 통하여 단면을 관찰하면서 220번 사포로 조금씩 연마하여 마멸 트랙면의 중앙부에 도달하면 1500, 2000번 사포와 1 $\mu$ m, 0.3 $\mu$ m 알

루미나 입자로 polishing하였다. 이는 급격한 연마로 인한 단면의 경화와 변형 등을 방지하기 위함이다.

(3) 트랙 단면의 현미경적 관찰과 사진을 촬영하기 위하여 시편은 과황산 암모늄 10% 수용액으로 etching처리하여 금속현미경을 통하여 육안관찰 및 사진촬영을 실시하였다.

(4) 단면상의 표면위 접촉에 의한 표면층의 경화를 확인하기 위하여 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 압자하중 10gf, 마멸면에 수직 방향으로 25 $\mu$ m씩 이동하며 경도를 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1 마멸면의 현미경적 관찰

Fig. 1, 2, 3 은 미끄럼 마멸 실험 후의 마멸면 사진이다. Fig. 1은 접촉하중 15N인 경우로서 마멸기구는 연삭마멸이며 마멸트랙의 중앙에서는 Ploughing 또는 표면층의 균열발생에 의해 표면층이 sublayer와 분리되어 마멸입자가 생성되었음을 나타내고 있다. Fig. 2는 접촉하중 30N의 경우에서도 연삭마멸로서 표면층이 마멸입자로 탈락되어 sublayer가 새로운 표면으로 생성됨을 보여주고 있으며 탈락되지 않은 표면에서는 표면 균열이 미끄럼 방향과 직각방향으로 발생하고 있음을 보여주고 있다. 특히 하중이 증가함에 따

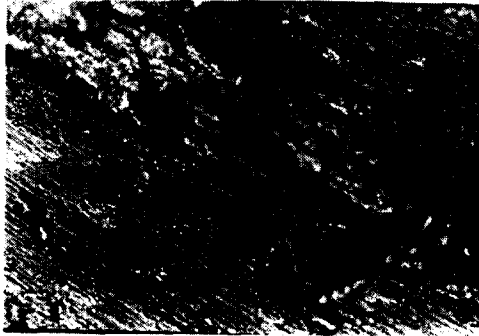


Fig. 1 Wear track photograph for normal load 15N, sliding velocity 0.12m/s, sliding distance 36m( $\times 200$ )

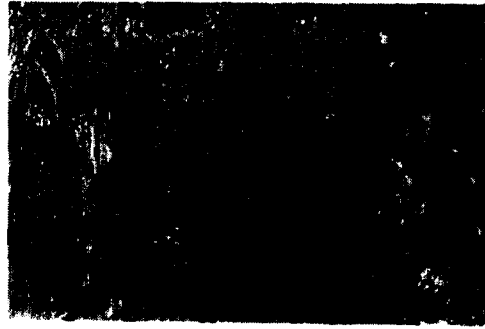


Fig. 3 Wear track photograph for normal load 45N, sliding velocity 0.06m/s, sliding distance 36m( $\times 200$ )



Fig. 2 Wear track photograph for normal load 30N, sliding velocity 0.12m/s, sliding distance 36m( $\times 200$ )

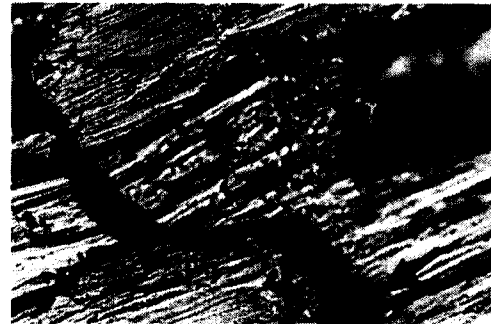


Fig. 4 Wear surface crack for normal load 15N, velocity 0.12m/s, sliding distance 36m

라 표면하 sublayer에서도 균열이 진전되고 있음을 나타낸다. Fig. 3은 접촉하중 45N의 경우로서 마멸면에 adhesion이 발생하여 마멸면은 짓이겨져 있으나 어느 일정 미끄럼거리까지는 연삭마멸로 진행되다 높은 접촉 마찰열로 인해 응착마멸로 천이된 것으로 판단된다. 이로 미루어 큰 접촉하중에 의한 표면층의 소성변형이 크다해도 마멸초기에는 연삭마멸이 발

생하며 임계미끄럼거리 이후 응착마멸로 진행됨을 알 수 있었다. 이는 표면층에서의 미끄럼접촉에 의하여 표면층이 경화될 수 있는 임계 접촉하중이 존재함을 의미한다.

그러므로 접촉하중에 의한 압축응력과 마찰열에 의한 열응력에 의하여 재료의 항복응력을 크게 초과하고 또한 재료의 용융점을 초과하는 높은 마찰열 발생시 응착마멸 발생 및 표면층의 소성영역 확



Fig. 5 Surface Crack of Wear track section for normal load 15N, sliding velocity 0.12m/s( $\times 200$ )



Fig. 6 Photograph of Wear track section for normal load 45N, sliding velocity 0.12m/s( $\times 200$ )

대로 인해 표면층의 경화는 미미할 것으로 판단된다. Fig. 4는 접촉하중 15N, 미끄럼속도 15m/s, 미끄럼거리 36m인 마멸면의 사진이다. 연삭마멸인 상태에서 표면 균열이 발생되었음을 보여주고 이는 곧 마멸입자로 분리되기 직전임을 나타내고 있다. Fig. 5는 접촉하중 15N, 미끄럼속도 0.12m/s, 미끄럼거리 72m인 마멸단면 사진이다. 표면하 균열의 발생을 보여주고 있으며 이러한 균열발생의 깊이는 5-30 $\mu\text{m}$ 으로 측정되었으며 이는 Alpas 등<sup>(1)</sup>의 결과와도 잘 일치하고 있다. 일반적으로 표면 산화층의 두께는 2-3 $\mu\text{m}$ 으로 알려져 있으며 표면산화층을 포함한 이러한 표면하 균열발생 깊이는 바로 표면에서 탈락된 마멸입자의 두께라고 생각할 수 있다. etching한 조직은 미끄럼 방향으로 표면조



Fig. 7 Photograph of Micro vickers indentation (load 10gf)

직이 slip되어 있으며 일부 쌍정이 보이기도 한다. Fig. 6은 접촉하중 45N, 미끄럼속도 0.12m/s, 미끄럼거리 72m로서 탈락된 마멸입자가 응착에 의하여 마멸면에 이착되어 있음을 보여 주고 있다. Fig. 7은 표면층의 경화를 확인하기 위하여 마멸단면에 25 $\mu\text{m}$  간격으로 경도를 측정할 마이크로 비커스

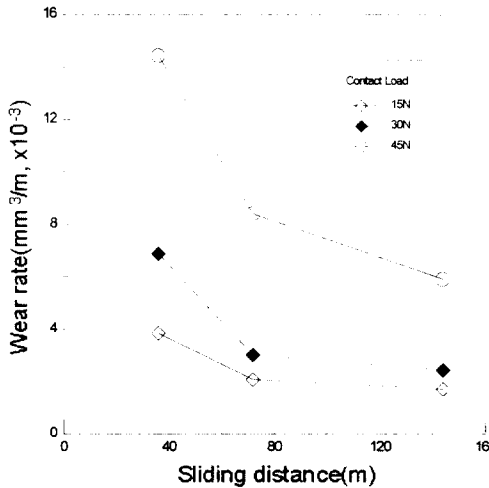


Fig. 8 Wear rate vs. sliding distance for contact load variation (sliding velocity 0.12m/s)

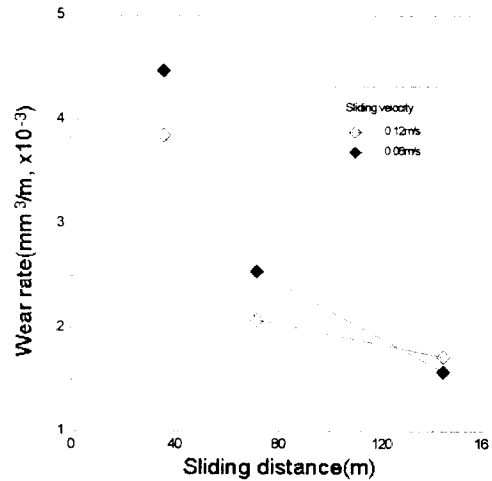


Fig. 9 Wear rate vs. sliding distance for sliding velocity variation (normal load 15N)

압자 흔적을 나타내고 있다.

### 3-2. 마멸률과 표면층의 경도

Fig. 8, 9는 측정된 마멸량을 미끄럼거리로 나눈 마멸률을 그림으로 나타내었다. Fig. 8은 미끄럼속도 0.12m/s에서 접촉하중에 따른 마멸률의 변화를 나타내었다. 동일 미끄럼 거리에서는 접촉하중이 증가할수록 마멸률은 증가하나 미끄럼거리가 증가할수록 마멸률은 감소하는 것으로 나타났다. 접촉하중 15N, 30N의 경우 앞서 마멸면의 고찰에서 마멸기구는 연삭마멸의 경우로서 마멸률은 45N의 경우보다 서서히 감소하였다. 이것은 45N의 경우 응착마멸과 함께 Ploughing에 의한 마멸이 발생하였으나 15, 30N의 경우 반복적인 미끄럼접촉에 의해 표면층이 경화되었

음을 나타낸다. 그러므로 어떤 임계접촉하중 이하에서는 표면층의 경화로 인해 연삭마멸률은 감소함을 알 수 있다.

Fig. 9는 접촉하중 15N의 일정하중에서 속도의 변화에 따른 마멸률을 미끄럼거리에 따라 나타내었다. 속도가 작은 경우 마멸률은 증가하나 미끄럼거리가 증가할수록 마멸률은 감소함을 알 수 있다. 이는 Chen<sup>(7)</sup> 등의 Cu-Nb에 대한 마멸실험 결과와도 일치하고 있다.

그러므로 마멸량의 측정결과로서 마멸률은 접촉하중이 커질수록 커지며, 미끄럼거리가 증가할수록 마멸률은 감소함을 알 수 있었다. 또한 미끄럼속도는 작을수록 마멸률은 커지고 미끄럼거리가 증가할수록 감소하였다. 그러므로 미끄럼 접촉에서

의 마멸은 접촉돌기의 반복접촉에 의한 압축 잔류응력의 존재에 의하여 발생하는 표면경화(surface hardening)를 관찰할 필요가 있으며 이는 마멸실험 후 마멸단면을 접촉돌기의 이동 방향과 평행하게 절단하여 얻은 단면을 마이크로 비커스 경도기를 이용하여 측정한 결과를 Fig. 10, 11, 12에 나타내었다. Fig. 10은 미끄럼속도 0.12m/s, 미끄럼거리 72m인 경우 접촉하중에 따른 표면층의 경도변화를 깊이에 따라 나타내었다. 접촉하중은 15N인 경우 앞서의 고찰에서와 같이 표면층의 경도가 상승하여 표면층이 경화되었음을 나타내고 있다. 그러나 30N, 45N의 경우는 경화 정도가 작으므로 이는 표면층에서의 경화 속도보다 마멸이 먼저 일어나고 있음을 알 수 있다, Fig. 11은 미끄럼속도의 변화에 따른 표면층의 경도를 깊이에 따라 나타내었다. 미끄럼속도에 따른 표면층의 경도는 미끄럼속도가 클수록 경도가 커졌으며 이는 마멸률의 결과와 비교할 때 이러한 경도의 상승이 마멸률을 감소시켰다고 할 수 있다. Fig. 12는 접촉하중 15N, 미끄럼속도 0.12m/s에서 미끄럼거리에 따른 표면층의 경도변화를 나타내었다. 미끄럼 길이가 증가할 수록 표면층의 경도는 증가하였으며, 72m, 144m에서의 경도는 표면층에서 큰 차이를 나타내지 않는 것은 표면층에서 지속적인 마멸이 발생함으로

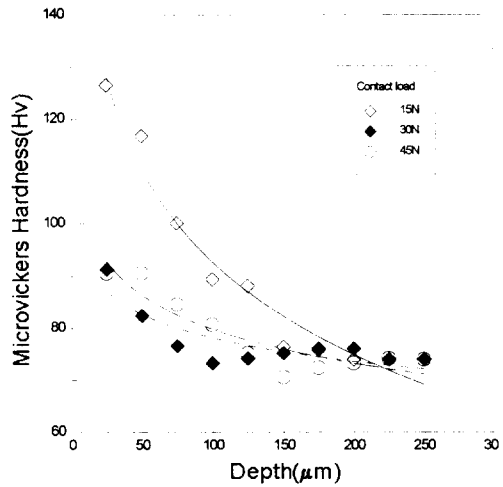


Fig. 10 Microvickers hardness of sublayer by normal load variation on the sliding velocity 0.12m/s and sliding distance 72m

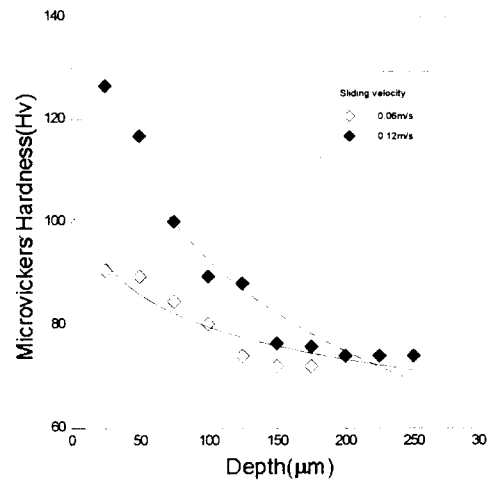


Fig. 11 Microvickers hardness of sublayer by sliding velocity variation on the normal load 15N and sliding distance 72m

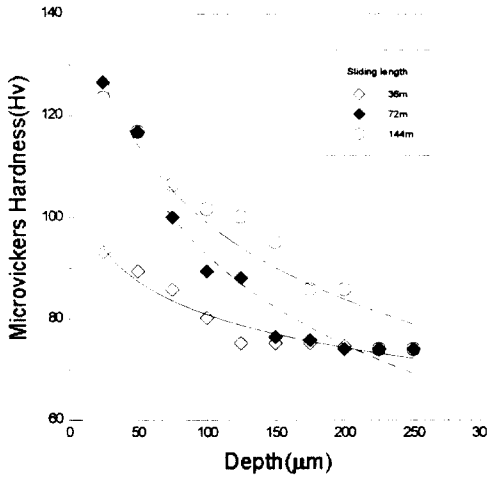


Fig. 12 Microvickers hardness of sublayer for sliding velocity 0.12m/s, normal load 15N

서 표면층의 경도는 일정 경도이상 증가할 수 없음을 나타내고 있다. 그러므로 미끄럼거리의 증가는 접촉돌기의 접촉회수가 증가한다는 것을 의미하며 일정하중, 일정 속도조건에서는 미끄럼 접촉회수가 많을 수록 표면의 경도가 증가함을 나타낸다.

그러므로 임계 접촉하중 이하에서는 표면의미끄럼 접촉에 의하여 표면층의 경화가 발생하며 이는 접촉하중이 작을수록, 미끄럼속도가 클수록 표면층의 경도는 커지며, 이는 마멸에 대한 저항으로 마멸률을 감소시키는 역할을 함으로써 연삭마멸로 나타난다. 또한 일정 깊이 에서의 균열 발생에 의하여 마멸입자로 생성하는데 기여하고 있다. 임계 접촉하중 이상에서는

높은 마찰열과 압축응력으로 마멸이 표면층의 경화보다 선행되어 발생하므로 응착마멸의 마멸기구를 나타내고 있다.

#### 4. 결론

이상의 실험결과로서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 미끄럼접촉에 있어 마멸률은 접촉하중이 증가할수록, 미끄럼속도가 감소할수록 증가하였으나, 미끄럼거리가 증가할수록 감소하였다.

(2) 미끄럼마멸에 있어 마멸기구를 결정하는 임계 접촉하중이 존재하며, 임계 접촉하중 이하에서는 연삭마멸이, 임계 접촉하중 이상에서는 응착마멸이 발생함을 알 수 있었다.

(3) 표면층의 경화는 이러한 임계 접촉하중 이하의 범위내에서 반복 미끄럼 접촉에 의해 표면층의 경도는 접촉하중이 작을수록, 미끄럼속도가 증가할수록 경도가 증가하여 마멸률이 감소됨을 알 수 있었으며, 임계하중 이상에서는 표면층의 경화보다 마멸이 선행되므로 표면층의 경화가 마멸에 미치는 영향이 작다고 할 수 있다.

#### 참고문헌

1. Suh, N. P., "An Overview of the Delamination Theory of Wear", *Wear*, 44, pp. 1-16, 1977.



2. H. C. Meng, K.C. Ludema, "Wear models and predictive equations: their form and content", *Wear*, 181-183, pp. 44-457, 1995.
3. D. A. Hughes, D. B. Dawson, J. S. Korellis, L. I. Weingarten, " A micro-structurally based method for stress estimates", *Wear*, 181-183, pp. 458-468, 1995.
4. E. R. Kral & K. Komvopoulos & D.B. Bogy, "Finite Element Analysis of Repeated Indentation of an Elastic-Plastic Layered Medium by a Rigid Sphere, Part I : Surface Results", *Transactions of the ASME*, Vol. 22, pp. 20-42, 1995.
5. A. T. Alpas & H. Hu and J. Zhang, "Plastic deformation and damage accumulation below the worn surfaces", *Wear*, 162-164, pp. 188-195, 1993.
6. 강계명, 김선진, "회전접촉에 의해 발생하는 Subsurface Zone의 잔류응력에 관한 해석", *한국재료학회지*, 제3권 제1호, pp. 58-64, 1993.
7. Z. Chen, P. Liu, J. D. Verhoeven, E. D. Gibon, "Sliding wear behavior and microstructure change of deformation processed Cu-20vol.%Nb in situ composite", *Wear*, 181-183, pp. 263-270, 1995.