

미끄럼 마찰하에서의 베어링강의 마모 diagram 과 마모기구

임대순, 박성길, 조성재, 방건웅, 문한규

한국표준연구소 재료·화학연구부

Wear diagram and Wear Mechanisms of Bearing Steel in Frictional Sliding

Dae-Soon Lim, Seong-Khil Park, Seong-Jai Cho,
Gun Woong Bahng, Hahnque Moon

Div. of Materials and Chemistry, KSRI

Abstract – Wear diagrams, which are the three dimensional representations of the dependence of the wear rate on the applied pressure and the sliding speed, were constructed with the pin on ring type wear test results using 52100 wear couples. The pressure and speed ranges from 0.45 MPa to 45.30 MPa and from 0.012 m/sec to 0.12 (0.120) m/sec, respectively.

The results show the mild to severe transition, which suggests the change of the wear mechanisms as a function of the pressure and sliding speed. The SEM micrographs of the corresponding worn area shows clearly that different wear mechanisms dominate.

1. 서 론

재료의 마모를 측정하고 그 현상을 이해하는 것은 대단히 복잡하다. 재료의 마모와 마찰현상은 흔히 재료 고유의 물성이 아니고 tribo system의 특성이라고 말하여지는 것도 이러한 이유 때문이다. Tribo-system의 변수에는 하중, 속도, 분위기, 윤활유 상태, 재료의 물성 및 표면상태 등이 있다. 이러한 복잡성 때문에 종종 시간의 변화에 따른 마모의 변화와 같은 단순 작동 조건에서 시험을 하여 국부적 현상을 전체 작동조건에서 나타나는 것으로 결론이 유추될 수도 있다. 어느 특정한 작동 조건에서 지배하는 마모기구가 다른 조건에서 반드시 같은 형태로 나타나지는 않기 때문이다. David Tabor는 1983년에 열린 “80년대의 tribology” (1)라는 회의에서 영국의 Ashby 등에 의해 만들어진

변형도(deformation map) [2]와 같은 형태의 마모도(wear map)의 필요성에 대해 강조하였다. 이와 같은 마모도는 특정한 조건에서 일어날 수 있는 마모기구의 예측과 특정영역에 적용할 수 있는 마모 제산식을 제공할 수 있을 것이라고 하였다. 그 이후 이와같은 복잡한 형태의 마모를 종합적으로 나타내고자 하는 것이 tribology 분야의 공통적인 관심사였다. 그러나 실질적으로 이에 대한 명확한 대답을 제시하는 연구는 이때까지 거의 없었다.

이러한 요구에 따라 Ashby 등은 비 윤활상태에서의 철강의 마모기구도를 발표하였다[3]. 이 마모기구도는 지금까지 발표된 철강의 마모 데이터를 모은 다음에 정규화된 압력과 속도의 축을 사용하여 마모율을 나타내고 이를 seizure, melt, 산화(oxidation), plastic deformation 등의 기구가 지배하는 영역으로 구분하였

다. Archard 등과 Welsh는 이 연구에 앞서 비 윤활상태에서 철강 재료의 마모형태가 하중 혹은 속도, 또는 미끄럼 거리에 따라 mild wear와 severe wear로 대별됨을 부분적으로 보여주었다[4-6]. Ashby 등의 연구결과는 Fig. 1에서 나타난 것과 같이 넓은 영역의 압력과 속도를 포함하고 있어 개괄적으로 마모형태를 이해하는데는 도움이 된다. 그러나, 마모현상은 시편의 재료특성과 형상 및 시험방법에 큰 영향을 받으므로 여러 연구자들에 의해 생산된 데이터가 하나의 정규화된 축에서 비교되는 데는 문제점이 있다. Chiou [7] 등은 0.45% 탄소강의 마모율과 속도 곡선, 그리고 마모율과 하중 곡선이 현저하게 이동을 하며 시험기의 강성에 따라 mild 및 severe wear의 transition 영역이 영향을 받음을 보여주었다. 그러므로 본 연구에서는 위와 같은 문제점을 극복하고자 체계적인 연구를 수행하였다. 즉 일정한 마모시험법을 통해 넓은 영역의 하중과 미끄럼 속도를 동시에 조절하였고 그때의 마모량을 측정하여 마모율을 압력과 속도, 혹은 압력과 미끄럼 거리 등의 변수로 3 차원적으로 나타내어 작동조건의 변화에 따른 마모율 변화와 마모기구가 급하게 변화하는 마모기구 전이를 관찰하고자 하였다. 또한 mild wear와 severe wear로 대별되는 대표적인 마모시편을 SEM으로 관찰하여 마모기구를 구명하고자 하였다.

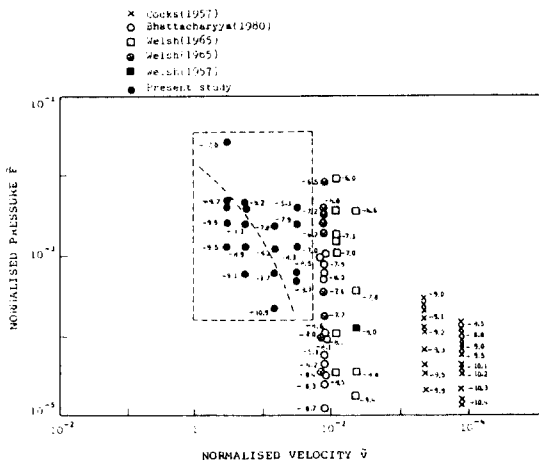


Fig. 1. Wear map for high carbon steel.[3].

2. 실험방법

본 연구에서는 Fig. 2에서 처럼 미끄럼 운동에 의해

ring위의 pin이 회전하는 접촉방법을 선택하였다. Fig. 3에서 알 수 있는 것과 같이 구(ball) 등에 의한 점 접촉은, 초기에는 점 접촉을 하게 되나 마모가 진행됨에 따라 그 접촉면적이 늘어나게 되고 표면에 가해지는 압력이 변하게 된다. 그러므로 일정하중에서 응력이 감소하게 되어 마모형태가 바뀔 수가 있고, 순간적으로 변하는 가시적 응력조차 예측하기가 힘들게 되어 마모 형태를 예측하려는 diagram의 작성목적에 반하게 되므로 마모 중에도 비교적 가시적 접촉 압력이 변하지 않는 형태인 면접촉 방식을 선택하였다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 내경 2.9mm, 외경 6.3mm인 ring 시편은 직경 1.65mm의 pin에 의해 압력을 받고 pin이 ring의 상단을 회전하게 되어 있다. 기계 가공된 시편은 1 μ m diamond paste까지 polishing 하여 접촉면을 유리면과 같이 매끄럽게 만들었다. 예비 실험을 통해 pin이 disk 위에서 회전시 전체적으로 밀착되지 않고 부분적으로 접촉하는 문제점이 발견되었으며, 시편의 평면 유지와 시편 holder의 평면유지가 최우선이므로 평면유지에 유의하여 가공하였다. 이와 같이 하여 시편 holder와 시편의 평면을 최대한으로 유지함으로써 문제가 많이 감소되었으나 완전한 접촉을 위

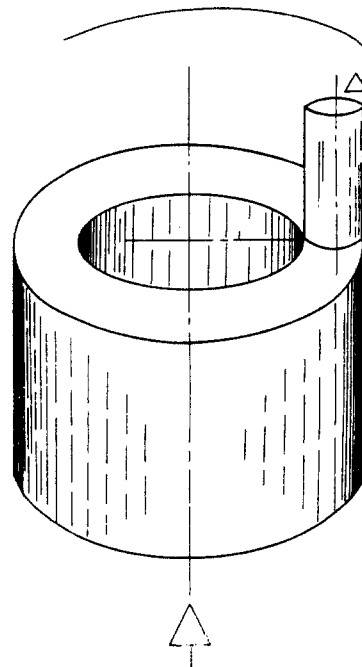


Fig. 2. Schematic diagram of pin on ring wear specimen configuration.

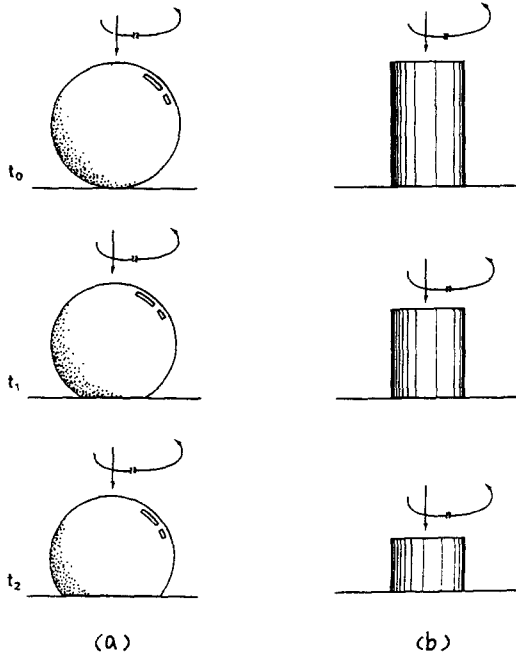


Fig. 3. Schematic diagram of worn samples.
(a) ball on disk (b) pin on disk

해 마모시험기 시편 holder에 시편을 정착한 채로 polishing을 다시하였다. 이렇게 해서 pin과 ring 표면의 완전한 접촉을 이룰 수 있었다.

본 모델재료를 이용한 마모실험에서는 9.8 N에서 98 N까지의 하중을 가하고 50rpm에서 500rpm까지 회전 속도를 조절하여, 0.45Mpa에서 45.31Mpa까지의 압력이 부하되고 0.012m/s에서 0.120m/s까지의 속도로 조절하였다. 각 조건에서 공히 16000회전(회전거리 230.4m)까지 마모시험을 하였으며 각 2000회전(회전거리 28.8m)후에 pin과 ring 사이의 마모에 의한 변위를 digitized 된 micrometer로 측정하여 마모량을 알아내었다. Pin에서는 5개부위, ring에서는 9개 부위에서 마모에 의한 길이 및 깊이변화를 측정하였고 이로 부터 마모부피를 계산하였다. 실험실 온도는 일정한 상온을 유지하였고, 습기 등 외부의 영향을 되도록 배제하기 위하여 실험 중에는 투명한 플라스틱으로 시편주위를 둘러쌌다. 마모시편의 오염상태 역시 시험결과에 영향을 주므로 시편을 polishing한 뒤에는 hexane과 acetone으로 초음파 세척기를 이용하여 세척한 후 건조된 공기로 건조시켜서 데시케이터(desiccator)에 보관 후 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

재료의 마모, 마찰특성은 시험조건, 재료의 상태, 분위기 조건 등에 의해 변하게 되며, 일반적으로 시험 조건에는 하중, 속도, 마모실험시간 등의 변수가 있다. 그러므로 기본이 되는 시험조건인 속도, 응력, 마모실험시간 등에 따른 베어링 강도의 마모의 양의 변화에 관해서 조사하였다. Fig. 4에서 Fig. 6까지의 결과에서 보듯이 일정한 속도에서 압력이 증가됨에 따라 마모부피가 증가되며, 이것이 어느 응력 수준에서 급격히 증가한다. 속도가 증가함에 따라 마모량이 급격히 증가하는 소위 심한 마모(severe wear) 상태가 상대적으로 낮은 응력에서도 일어날 수 있음을 알 수 있다.

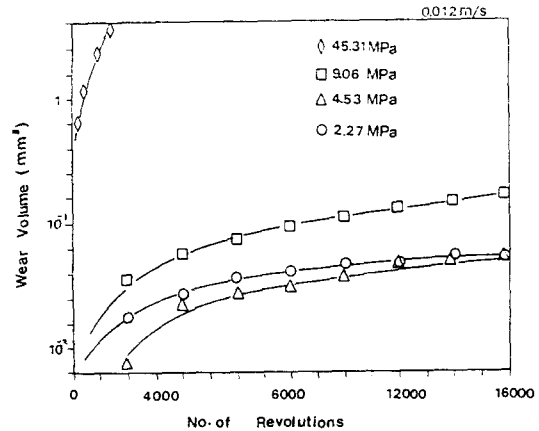


Fig. 4. Wear of bearing steel at various applied pressure (speed;0.012m/s)

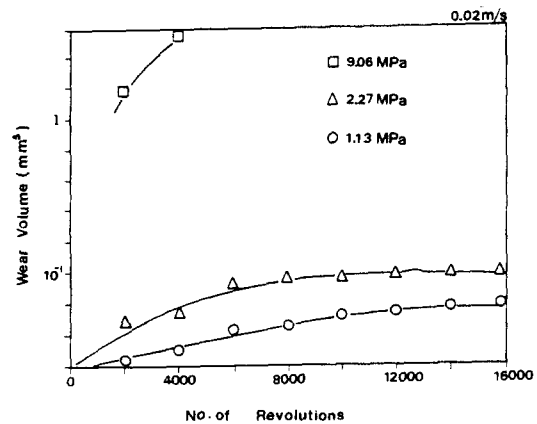


Fig. 5. Wear of bearing steel at various applied pressure (speed;0.02m/s)

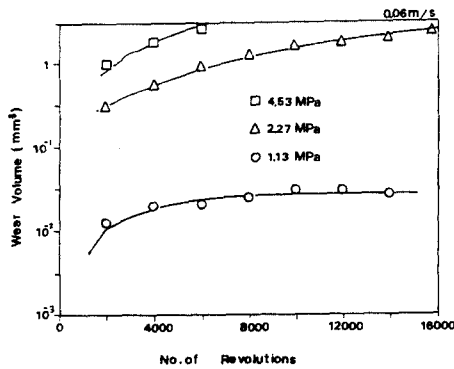


Fig. 6. Wear of bearing steel at various applied pressure (speed;0.06m/s)

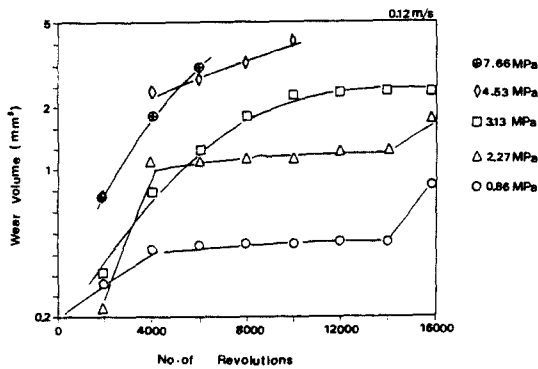


Fig. 7. Wear of bearing steel at various applied pressure (speed;0.12m/s)

Fig. 7은 4.53 MPa의 일정 압력에서 속도에 따른 마모부피의 변화를 보여준다. 이와같이 한 재료에서도 압력과 진행속도에 따라 마모율이 바뀌며, 이러한 변화를 나타내기 위해서는 수많은 도표가 사용되어야 한다. 그러나 주어진 재료와 분위기(윤활조건 및 온도등)에서 다음과 같은 3차원적인 diagram을 작성하면 위와 같은 문제를 줄일 수 있다.

- (1) 속도와 압력에 따른 마모변화
- (2) 속도와 미끄럼 거리에 따른 마모변화(일정 압력에서)
- (3) 압력과 미끄럼 거리에 따른 마모변화 (일정 속도에서)

이와같은 여러 set의 마모 diagram을 통해서 한 재료의 마모거동을 비교적 완전하게 표현할 수 있게 된다.

이러한 diagram을 그리려면 표준화된 축의 결정이 정확한 마모거동을 나타내기 위해 필수적이다. Lim과 Ashby는 다음과 같은 형태의 축의 방정식을 제안하였다. [3].

$$W=W/A$$

$$F=F/A \cdot H$$

$$V=V \cdot r/a$$

여기에서 W=단위 미끄럼 거리당 마모부피

A=가시적 접촉면적

F=하중

H=상온에서의 경도

r=원접촉의 반경

V=미끄럼 속도

a=열확산도

Lim과 Ashby [3]는 각종 금속재료에 대한 마모기구도(wear mechanism map)를 그렸고, 이 마모기구도를 통해서 모양과 크기가 다른 여러 형태의 시편을 사용해 여러 사람들이 구한 마모 데이터가 상관관계를 보이고 있음을 나타냈다. 이와같은 축의 사용은 물질의 경도와 열확산도에 따라 마모율이 변한다는 단순한 관계식을 사용한 것으로서 단위가 없이 상수만으로 나타내어진다. 재료의 어떠한 물성이 마모기구를 지배하는가 하는 것은 논란의 여지가 있는 것으로 보고, 본 연구에서는 기본적인 압력과 미끄럼속도를 축으로 하고 마모율은 마모부피를 미끄럼거리로 나눈 값으로 나타냈다[8].

$$W=V/S=A \cdot h/s \tag{1}$$

$$P=F/A \tag{2}$$

$$=S/t \tag{3}$$

여기서 W=마모율(mm/mm)

P=압력(MPa)

v=진행속도(m/s)

V=pin의 마모된 부피(mm)

A=핀(pin)의 단면적(mm²)

h=핀의 마모된 길이(mm)

t=마모진행시간(sec)

S=미끄럼 거리(mm)

F=하중

Fig. 8에서 처럼 위와 같은 축을 사용하여 압력과 진행속도에 따른 마모율의 변화를 3차원적으로 나타냈다. 이 diagram을 그릴 때 SURFER라는 상용의 3차원 graphics 프로그램을 이용하였다. 그림에서 마모율은 처음부터 2000회전수까지의 마모된 양을 그 미끄

름거리로 나누어서 얻어진 값이다. Fig. 9는 14000회전으로부터 16000회전까지의 마모율로부터 얻어진 마모 diagram이다. Fig. 8과 Fig. 9 공회 저압력, 저속도에서는 낮은 마모율을 나타내는 연한 마모(mild wear) 영역과, 하중과 속도의 증가에 따라 마모율이 급속히 증가하는 심한 마모(severe wear) 영역으로 구분됨을 보여주고 있다. 이러한 급격한 마모율 변화하는 응력과

속도가 증가됨으로써 그 지배되는 마모기구가 급격히 변화됨을 의미한다.

Fig. 10에 4.53 MPa의 접촉압력에서 속도가 증가함에 따라 pin의 마모부위가 변화하는 것을 보여주는 SEM 미세사진이 실려있다. Fig. 11은 0.012m/s의 속도에서 하중이 증가함에 따른 재료손상 변화를 보여주고 있다. Fig. 12에 나타낸 것과 같이 베어링강의 마모기구는 두가지로 대별됨을 보여주고 있다. 즉 낮은 하중과 속도에서는 소위 연한 마모(mild wear)가 나타나고 높은 하중과 속도에서는 심한 마모(severe wear)가 나타난다. 연한 마모 상태에서는 pin과 disk가

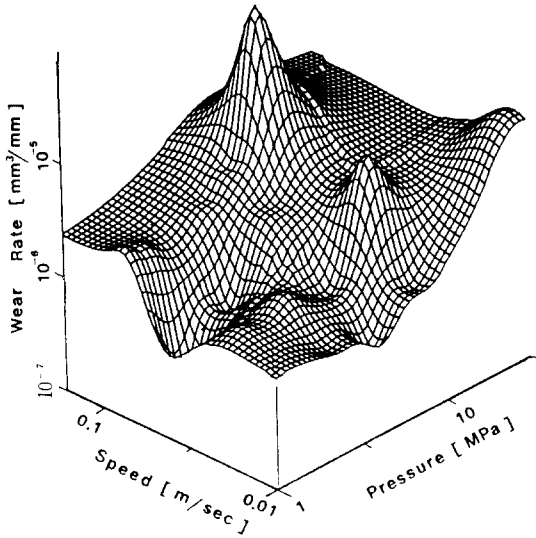


Fig. 8. Wear diagram for bearing steel(From beginning to 2000 revolutions).

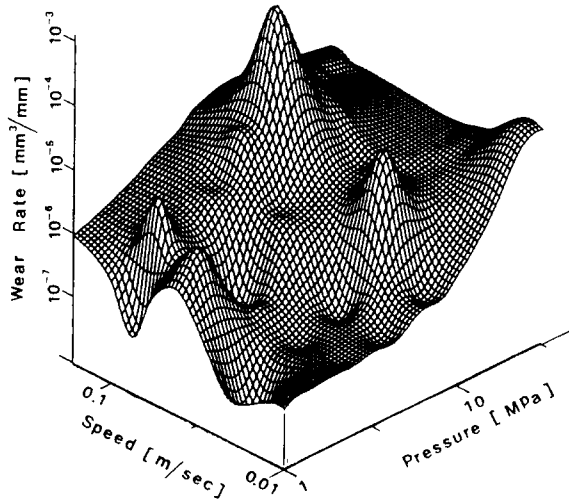
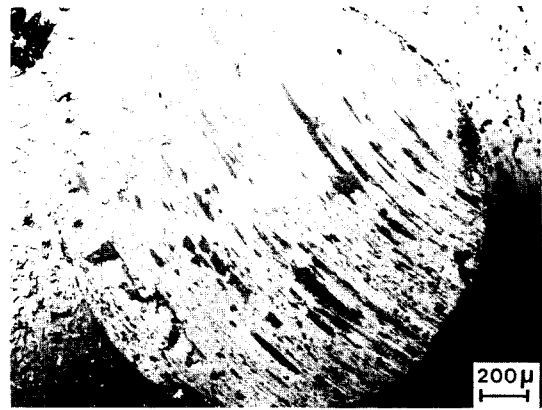
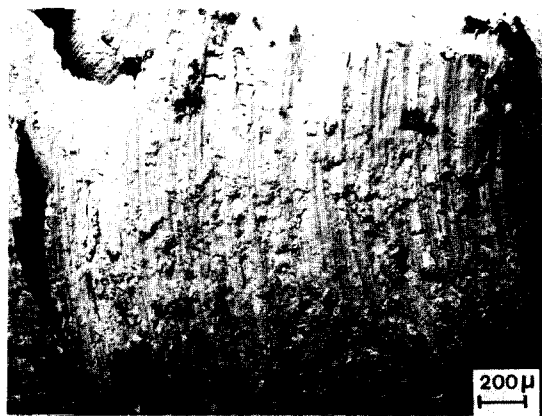


Fig. 9. Wear diagram for bearing steel(From 14000 to 16000 revolutions).



(a)



(b)

Fig. 10. SEM micrographs of damaged pins at 4.53MPa and (a) 0.024m/s, (b) 0.060 m/s.

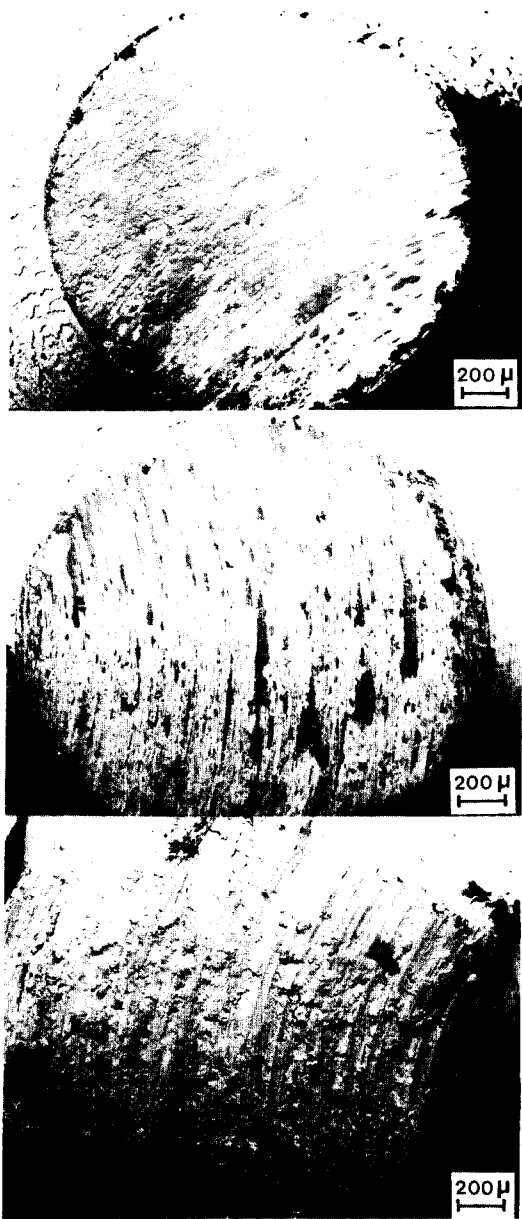


Fig. 11. SEM micrographs of damaged pins at 0.012m/sec and (a) 4.53MPa (b) 9.06MPa (c) 22.66MPa.

Fig. 13에서와 같이 산화된 분말(oxide powder)로 부분적으로 덮여 있는 것을 볼 수 있다. 이 결과는 Archard[4] 등이 이미 비운활상태에서 금속이 산화되어 생긴 입자가 지배하는 mild wear 상태와, 금속의 큰 입

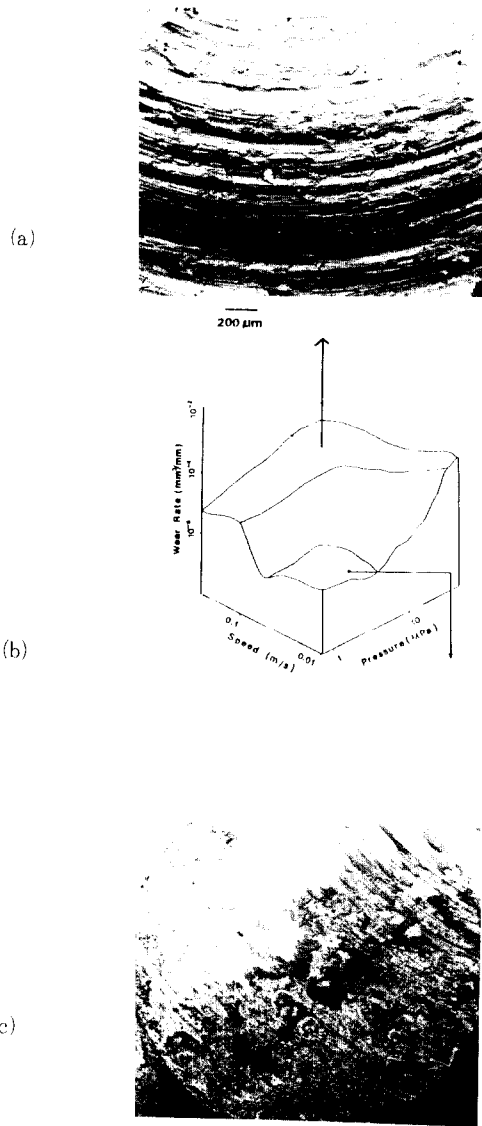


Fig. 12. Typical SEM micrographs of worn surfaces representing mild and severe wear regions.

자가 대부분인 severe wear 상태를 관찰한 결과와 일치하는 것이다. Bahattacharyya [9]는 이와 같은 mild wear 상태를 퍼얼라이트조직(pearlitic steel)과 구상화조직(spherodized steel)에서 관찰하였고, 이것은 미세적인 접촉모서리에서의 마찰열에 의해 표면이 공기와 반응하여 산화되고, 이 산화된 층이 반복되는 미끄럼에 의해 부서지면서 또 둥글게 닳게 된다고 보았다. 심한

마모상태 (severe wear)에서 금속의 대표적 마모기구로 간주되는 adhesive 마모형태가 관찰된다(10). Adhesive 마모기구는 비교적 높은 속도와 하중에 의해 pin과 disk간에 adhesive junction이 형성되고 이 junction의 접착강도가 매우 강하여 금속의 표면층의 일부분이 떨어져 나가게 되는 것을 말한다. Fig. 14에 이러한 형태에 의해 형성된 전형적인 접촉면 형상이 나타나 있다. Fig. 14에서 볼 수 있는 바와 같이 표면부위는 소성변형 (plastic deformation)과 plowing 형태를 나타내고 있다. 이러한 조건에서 하중 증가에 따라 급격히 증가하는 소성변형량을 Lim [11] 등은 양전자소멸 분광법 (positron annihilation spectroscopy)에 의해 정량적으로 측정할 바 있다. 이 결과에 따르면 하중의 증

가에 따라 소성변형에 의해 생기는 결함이 증가함을 알 수 있다.

이 severe wear의 상태에서는 Fig. 15와 같은 소위 white etching area가 [12] 관찰되었다. 이와 같이 주위의 모재보다 단단하고 다른 구조를 보이는 영역은 베어링강에서 종종 관찰되어 왔으며, 소성변형과 마찰에 의한 온도상승의 결과로 보고되고 있다. 특히 white etching area와 모재와의 경계면 사이에서 많은 기공들이 형성되었음을 볼 수 있다. 압력과 속도가 증가함에 따라 국부적 응력과 마찰력이 증가하고 이에 따라 상변태가 일어나면서 반복되는 응력에 의해 경계면에 균열이 생성되고 이 균열에 의해서 delamination 형태와 같이 상변태된 부분이 떨어져 나가게 됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 마모기구가 앞에서 설명한 adhesive에 의한 금속이 떨어져 나가는 현상과 더불어 diagram에서 나타나는 높은 마모율의 주요 원인이라고 추정할 수 있다.



Fig. 13. SEM micrographs of damaged pin partially covered with debris. The pressure and sliding speed was 4.53Mpa and 0.024m/sec respectively.

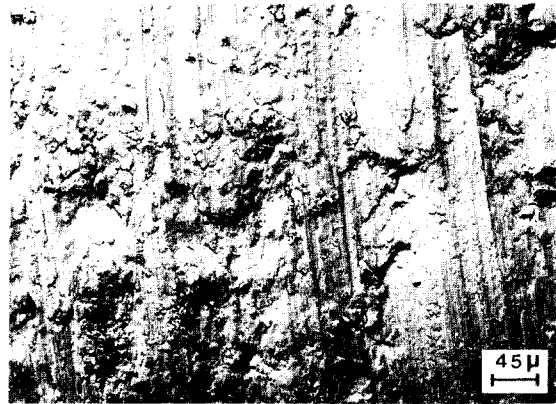


Fig. 14. SEM micrographs of damaged pin at 0.012m/sec and 22.65MPa.



Fig. 15. SEM micrograph of cross sectional view of damaged pin showing white etching area(nital etch).

결 론

본 연구에서는 베어링강이 비운활상태의 미끄럼 마찰하에서 속도와 압력의 변화에 따라 어떻게 마모율이 변화되는가를 3차원적인 마모 diagram을 통해 나타내었다. Diagram에서 보는 것과 같이 저하중과 저속도에서는 mild wear 형태가, 고하중과 고속도에서는 마모율이 급격히 증가하여 severe wear 형태가 나타난다. 이 diagram으로부터 mild wear에서 severe wear로 변하는 임계 하중 및 속도를 얻을 수 있으며, 이를 tribological design 자료로 활용할 수 있을 것이다. 분석장비에 의한 표면과 부표면 관찰을 통해 mild wear 상태에서는 산화에 의한 마모가 주도적으로, severe wear 영역에서는 소형변형(plastic deformation) 및 금속이 떨어져 나오는 adhesive wear와 상변태에 의해 생성된 균열에 의한 delamination 현상이 지배적으로 작용하여 높은 마모율이 나타남을 알 수가 있다.

후 기

본 연구는 과학기술처에서 시행한 출연연구 과제인 "요업재료의 표준마모 diagram 개발"의 일부로서 수행된 것으로 재정적 지원에 대하여 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. D. Tabor, New Directions in Lubrication, Materials, Wear, and Surface Interactions, Loomis (ed), Noyes, Pub. P11, (1985).
2. H.J. Frost and M.F. Ashby, Deformation-Mechanism Maps: The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics, Pergamon Press, Oxford, (1982).
3. S.C. Lim and M.F. Ashby, Acta., Metall, 35(1), Pl, (1987).
4. J.F. Archard and W. Hirst, Proc. R. Soc. London, Ser A, 236, 397(1956).
5. N.C. Welsh, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser A, 257 31(1964).
6. N.C. Welsh, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser A, 257, 51(1964).
7. Y.C. Chiou, K. Kato, T. Kayaba, J. of Tribology, 107, 491(1985).
8. S.M. Hsu, D.S. Lim and R. Munro, Proceed, for 3rd inter Symp., Ceram. Mater. and Comp. for Engines, V.J. Tennery (ed), Amer. Ceram. Soc., pp.1236(1989).
9. S. Bhattacharyya, Wear, 61, 133-141, (1980).
10. H. Czichos, New Directions in Lubrications, Materials, Wear, and Surface Interactions, William R. Loomis (ed), Noyes Pub., P.805(1985).
11. D.S. Lim, Y.K. Park, H. Moon, Sliding friction and defect density in plastically controlled wear of bearing steel (in preparation).
12. K.H. Zum Gahr, Microstructure and Wear of Materials, Elsevier, p.113(1987).