

플라스틱성형용 KP-4M강의 마멸특성 및 이의 기구에 관한 연구

박흥식 · 전태옥 · 김동호*

동아대학교 공과대학 기계공학과
*대한전문건설협회 부산광역시회

A Study on the Wear Characteristics and the Mechanism of KP-4M Steel for Plastic Molding

Heung-Sik Park, Tae-Ok Jun and Dong-Ho Kim*

Department of Mechanical Engineering, Dong-A University
*Korea Specialty Contractors Association Pusan Branch Association

Abstract—This study was undertaken to investigate the dry wear characteristics and mechanism of KP-4M steel for plastic molding against SKD 61 hardened by heat treatment. The wear test was carried out under different conditions such as sliding speed, contact pressure, sliding distance, with frictional tester of pin on disc type. The wear loss on variation of sliding speed was little in lower speed range below 0.5 m/sec and in higher speed range above 1.5 m/sec, but wear loss was high in intermediate speed range. The critical sliding speed, which showed the maximum value of specific wear rate, became lower with increased contact pressure. Increasing the contact pressure, the critical sliding distance L_{cr} which the wear mechanism changes from severe wear to mild wear was increased due to the decrease of oxidation reaction velocity. Through this study we suggested a model of generation and elimination process of wear debris of KP-4M steel for plastic molding.

1. 서 론

플라스틱 성형용 금형에 있어서는 유리섬유나 금속 분말을 첨가한 강화수지에 의한 정밀기계부품의 엔지니어링 플라스틱화, 부식성가스 성형수지 등 금형에 요구되는 특성은 플라스틱의 종류나 용도에 따라 결정된다. 즉 열경화성수지나 유리섬유 등을 첨가한 강화수지로서는 내마멸성이, 전화기나 coupling 등에 사용되는 PVC는 내식성이, 광학렌즈나 투명제품에는 鏡面性이, 또한 자동차나 가전제품 등에는 피삭성이 요구되지만 전반적으로는 피삭성과 내마멸성이 동시에 요구되고 있다. 따라서 기존의 플라스틱 型鋼인 SM재와 SCM재 등으로서는 이러한 요구특성을 충분히 만족할 수 없기 때문에 특수한 성형배합이나 제조 공정에 의하여 플라스틱성형용 금형용강이 개발되어 그 사용이 급격히 증대하고 있다.

型 제작기간의 단축으로 열처리가 필요없는 free harden강의 사용, 고도의 내마멸성이 요구되는 냉각 dies강, 고속도공구강의 사용, 또는 초정밀 마무리 가공용으로 maraging강 사용 등 금형재의 용도별의 특용鋼化의 경향이 강해지고 있다[1,2].

근래 개발된 플라스틱 금형강인 KP-4M은 진공 탈가스 처리한 강괴로서 단조하였으므로 재질의 청정도가 높고, 가공과 성분의 편석이 없으며 또한 내부응력이 제거되어 금형가공시 변형의 발생이 적으므로 널리 사용되고 있다. 그러나 이 재료의 금형수명을 결정해 주는 마멸특성과 마멸분의 생성 및 탈락거동에 관한 계되는 마멸기구에 대하여서는 아직 불분명한 상태로 남아 있다.

따라서 본 연구에서는 현재 플라스틱성형용 금형강으로 사용되고 있는 KP-4M을 이용하여 대기 중에서 미끄럼속도, 접촉압력 및 미끄럼거리 등의 마찰조건

의 변화에 따른 마멸특성을 조사하고, 이와함께 마멸 분 생성 및 탈락거동에 관한 마멸기구를 상세히 규명하여 플라스틱 금형강의 tribology 설계에 대한 기초 자료를 제시하고자 하는 것을 그 목적으로 하였다.

2. 실험방법

2-1. 실험재료

본 실험에 사용한 실험재료로서 pin 시험편으로는 시판용 플라스틱성형용 금형강인 KP-4M (312 Hv)이며, 이를 Fig. 1과 같이 정방형 단면으로 가공하였으며, 상대재료인 disc 시험편은 SKD 61로서 직경 150 mm인 환봉을 두께 13 mm로 wire cutter로 절단하여 사용하였다. 이들의 화학적 성분은 Table 1과 같고, Table 2에는 KP-4M의 기계적 성질을 나타내었다. 그리고 상대재료인 SKD61은 마찰시험기에 부착시키기 위하여 직경 20 mm의 구멍을 뚫고 key홈을 만든 후

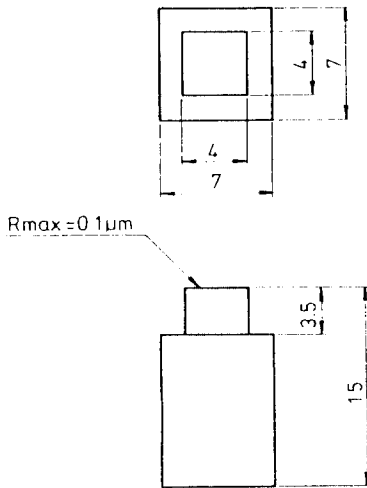


Fig. 1. Shape and dimension of KP-4M.

Table 1. Chemical composition of the specimen (wt.%)

Material	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
KP-4M	0.38	0.22	0.87	1.66	0.4	included
SKD61	0.40	1.00	-	5.25	1.25	-

Table 2. Mechanical properties of the KP-4M

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness (Hv)
1078	901	14	38	312

표면경화를 위하여 고주파처리 하였다.

2-2. 실험방법

Fig. 2에는 건조미끄럼 마찰실험을 하기 위한 실험 장치의 선도를 나타내었다. pin 시험편과 disc 시험편은 에머리페이퍼 #1200으로 정밀연마하여 마찰면조도를 $R_{max}=0.1 \mu m$ 로 하고 이를 3분간 초음파세정 후 건조시킨 후 실험재료와 상대재료는 pin on disc 형으로 하여 각 실험조건에 따라 disc 시험편을 회전시켜 미끄럼 마찰이 되도록 하였다. 실험 후에는 마찰면에 부착된 마멸분 및 산화물을 제거하기 위하여 다시 3분간 초음파세정 후 건조시켜 감도 0.1 mg의 디지털 천칭으로 그 중량감소량을 측정하였다. 각 실험은 실험회수를 3회 반복 실시하여 그 평균값을 구하였고, 시험편은 실험조건마다 매회 교환하여 항상 새로운 시험편으로 행하였다. 또한 마찰면 평균온도를 측정하기 위하여 시험편의 마찰면에서 上方 0.5 mm지점에 지름 1 mm의 구멍을 뚫어 C.A. (Chromel-Alumel) 熱電對를 이용하여 디지털 온도계로 측정하였고, 시험편 holder에 strain gauge를 부착하여 미끄럼속도 변화에 따른 마찰계수를 구하였다. 마찰계수의 측정에서는 실험시간에 따라 그 값이 변동하고 또한 그 진폭도 다소 변화하였지만 본 실험에서는 각 실험완료 시간에서 진폭의 최대값과 최소값의 평균치를 취하였다. 그리고 마찰면의 마멸과정을 알기 위하여 주사전자현미경을 사용하여 마찰면을 조사하였고, 마찰면 하방의 변질층을 조사하기 위하여 실험 후 시험편을 절단기로 길이방향으로 절단한 후 마이크로 비커스경도계를 이용하여 시험편 하방으로 내려오면서 경도분포를 측정하였다. 또한 마찰면에 부착되어 있는 마멸분과 실험 후 채취한 마멸분 X-線回折機를 사용하여

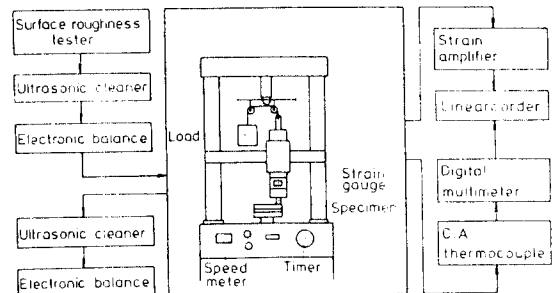


Fig. 2. Diagram of experimental apparatus.

그 성분을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 마멸에 미치는 미끄럼속도 특성

Fig. 3은 접촉압력 P 를 2.5 kgf/cm², 5.0 kgf/cm² 및 7.5 kgf/cm²로 각각 일정하게 하고 미끄럼속도 V 를 단계적으로 변화시켰을 때의 마멸량 W 를, Fig. 4는 비마멸을 W_s 를 나타내었다. 여기서 W_s 는 단위 하중과 단위 미끄럼거리당 마멸량을 나타낸 것으로 다음 식으로 구하였으며, F 는 접촉하중을, L 은 미끄럼거리를 표시한다.

$$W_s = W/F \cdot L$$

Fig. 3에서 처럼 W 는 미끄럼속도 V 가 0.5 m/sec이하의 저속영역에서와 1.5 m/sec이상의 고속영역에서는 적고, P 가 2.5 kgf/cm²에서는 V 가 1.0 m/sec, 5.0 kgf/cm²는 0.9 m/sec, 또한 7.5 kgf/cm²는 0.8 m/sec에서 각각 극대치를 나타내고 있다. 그리고 P 의 상승과 함께 W 는 급격히 증가하지만 W_s 의 극대치를 나타내는 V 가 저속측으로 이행하는 것을 알 수 있다. 또한 실험 후 마찰면상에 저속영역에서는 적갈색의 산화물이, 고속영역에서는 흑색의 산화물이 덮혀 있었으나 그 중간속도 영역에서는 유색의 산화물은 거의 나타나 있지 않았지만 응착마멸과 연삭마멸로 인하여 마찰면에는 굵힌 자국이 나타났다. 그리고 상대재료인 disc에도 저속영역과 고속영역에서는 적갈색 및 흑색의 산화물이 실험재료에서 전이되었다. V 가 0.5 m/sec이하인 저속영역에서는 미세한 마멸분이 즉시 산화하여 적갈색의 산화철 미분이 되어 마찰면의凹凸에 덮혀 두 면의 금속접촉을 방지하여 응착마멸을 감소시키는 輕마멸(mild wear)이 되므로 W 는 적다고 생각된다. 그러나 중간속도 영역에서는 V 가 증가함에 따라 마멸에 의한 新生面이 다음 접촉을 할 동안 산소의 흡착을 행하는 데 요하는 시간인 산화반응 속도보다 마멸속도가 빠르게 진행되어 이의 결과로 산화물의 생성은 극히 적고 양 금속간의 미소돌기부의 연속적인 응착이 일어나 이들의 전단에 의하여 생성된 마멸분이 랩제(lapping powder)와 같은 역할[3]을 하여 마찰면은 금속광택을 나타내는 重마멸(severe wear)이 되어 W 는 각 P 에서 극대치가 나타나게 된다고 생각된다. 또한 V 가 1.5 m/sec이상의 고속영역에서 W 가 다시 감소

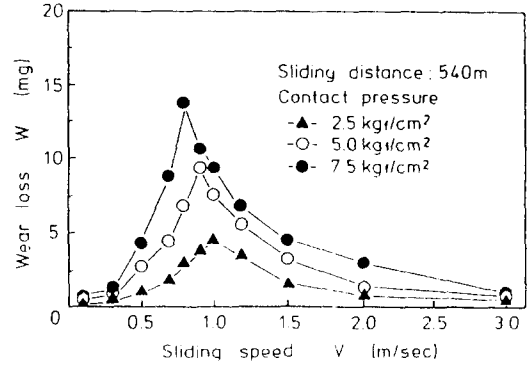


Fig. 3. Relation between wear loss and sliding speed.

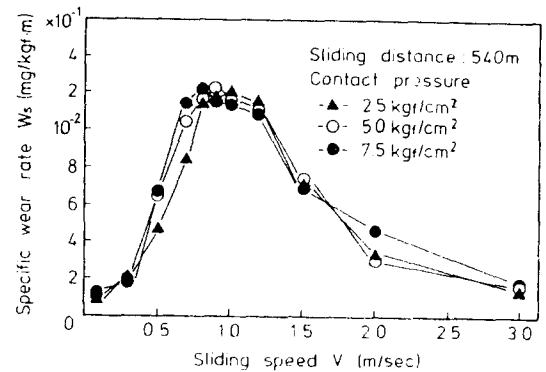


Fig. 4. Effect of sliding on the specific wear rate.

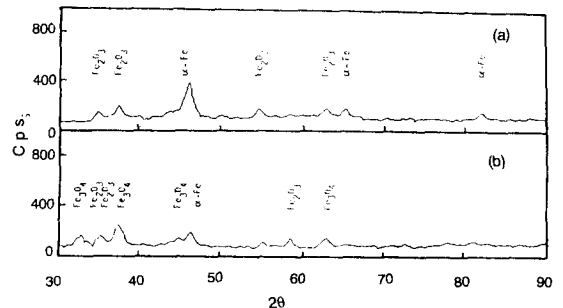


Fig. 5. X-ray diffraction of wear debris with variation of sliding speed; (a) $V=0.3$ m/sec, (b) $V=1.5$ m/sec.

하는 것은 마찰면 온도가 상승하여 다시 산화반응 속도가 마멸속도보다 증가되어 마멸분의 산화가 급속히 진행하여 이것이 흑색의 산화물로 되어 이들이 마찰면상에서 보호피막을 형성하여 소성유동을 쉽게 일어나게 하므로 한층 양호한 윤활제의 역할을 하여 경마멸이 되기 때문이라고 생각된다. 이처럼 미끄럼속도

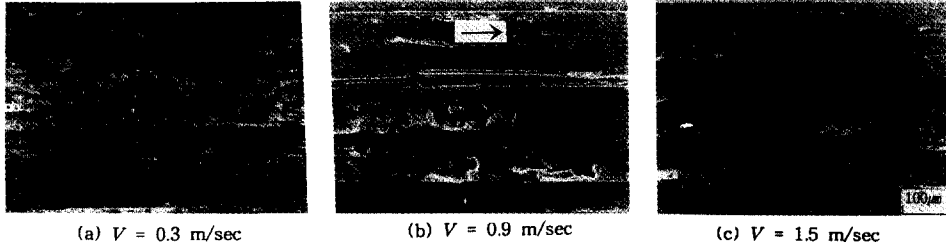


Fig. 6. Photo. of the rubbed surface; $P=0.5 \text{ kgf/cm}^2$, $L=540 \text{ m}$.

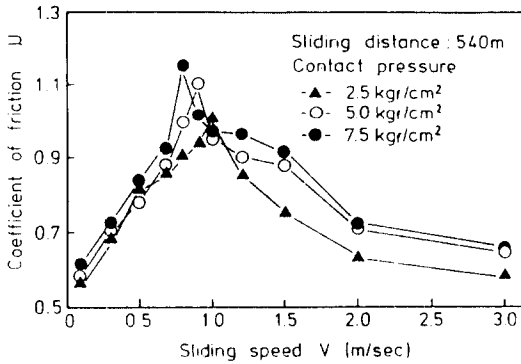


Fig. 7. Variation in the coefficient of friction with sliding speed.

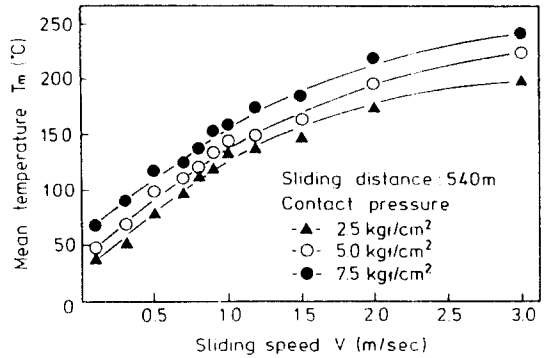


Fig. 8. Relation between mean temperature and sliding speed.

의 변화에 따라 마찰면에 생성되는 유색의 산화물을 X-線回折로 측정한 것을 Fig. 5에 나타내었다. 그림 (a) V 가 0.3 m/sec에서는 Fe_2O_3 가, 그림 (b) V 가 1.5 m/sec에서는 Fe_3O_4 가 주성분으로 나타나 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 P 가 5.0 kgf/cm^2 에서의 V 의 변화에 따른 마찰면을 나타낸 것으로서 V 가 0.3 m/sec인 (a)와 1.5 m/sec인 (c)에서는 적갈색 및 흑색의 산화물이 마찰면 전체 영역에 걸쳐 분포되어 있는 경마멸 상태인 것을 볼 수 있지만 V 가 0.9 m/sec인 (b)에서의 마찰면에는 유색의 산화물은 거의 찾아볼 수 없으며 응착마멸로 인한 심한 요철면과 깊게 파인 홈이 미끄럼방향(→표)으로 분포되어 있는 중마멸 상태인 것을 알 수 있다. 그리고 P 가 증가하면 W 의 증가와 함께 마멸의 극대치를 나타내는 임계속도가 저속측으로 이행하는 것은 P 가 증가함에 따라 실접촉점의 수와 실접촉면적이 크게 되어[4] 접촉부의 온도가 상승하여 산화반응 속도에 영향을 주기 때문이라 생각된다. 그러나 Fig. 3에서 처럼 W 의 극대치를 나타내는 V 는 P 에 따라 변화하지만 Fig. 4에서와 같이 P 에 대한 W 의 극대치가

거의 비슷한 값을 나타내는 것은 W 가 P 에 거의 비례하기 때문[5]이라는 것을 나타내고 있다.

Fig. 7에는 V 의 변화에 따른 마찰계수 μ 를 표시한 것으로서 μ 의 변화는 W 의 변화와 대체로 유사하지만 P 가 7.5 kgf/cm^2 인 경우 V 가 0.8 m/sec에서 극대치를 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 이것은 결합부의 전단파괴를 일으키는 데에 필요한 마찰일이 0.8 m/sec에서 최대가 되기 때문이라고 생각된다. 그리고 저속영역과 고속영역에서 μ 가 감소하고 있는 것은 저속과 고속영역에서는 界面에서 생성된 산화물이 母地金屬보다 결합력이 약하므로 쉽게 전단파괴되거나 산화물의 생성이 계속되기 때문이라고 생각된다.

한편 마멸은 접촉계면 혹은 마찰면 하부에서의 파괴에 의하여 마멸분이 생성되기 때문에 그 파괴가 일어나는 위치의 온도가 중요한 인자로 작용하게 된다. Fig. 8에는 V 의 변화에 따른 마찰면 평균온도 T_m 을 나타내었다. V 가 증가할 수록 T_m 은 점차적으로 상승하고 있으며, T_m 이 약 130°C 부근의 온도에서 Fig. 4와 같이 W 의 극대치를 나타내는 중마멸 상태가 되는 것을 알 수 있다. 이것은 실접촉부의 온도에 의하여 받

생한 마멸분의 산화과정이 다르고, 또한 생성된 산화물층의 파괴속도 및 회복속도, 산화물의 형태 및 성질에 의하여 마멸을 방지하는 효과가 변화하기 때문이라고 생각된다. 따라서 마찰면의 온도가 상승하여 T_m 이 130°C 이상에서 W_s 가 저하하는 것은 마찰면이 고온이 됨에 따라서 응착접합부의 강도가 저하함과 함께 산화물층의 파괴속도가 회복속도 보다 느리게 진행된다는 것을 의미하고 있다. 그러나 T_m 은 마찰면 上方 0.5 mm 지점에서 측정된 온도이지만 閃光溫度 (flash temperature)는 이보다 더 높은 온도가 될 것이라고 생각되며, 岡林[8] 등은 섬광온도는 접촉부에서의 응착의 용이성, 剛性 혹은 마찰면 및 그 하부의 접선력이 관계된다고 하였으며, 담금질한 특수강 및 주철 등의 철강재료의 섬광온도를 동적 열기전력으로 측정하여 이 온도는 $300\sim 400^\circ\text{C}$ 정도가 된다고 하였다.

3-2. 마멸에 미치는 미끄럼거리 특성

Fig. 9에는 미끄럼속도 V 를 0.3 m/sec로 일정하게 하고 미끄럼거리 L 을 단계적으로 변화시켰을 때 접촉압력 P 에 대한 마멸량 W 의 磨滅進行曲線을 나타내었다. 여기서 L 은 미끄럼거리의 실험 조건을 설정한 후 시험편은 항상 새로운 것으로 교환하여 실험하였다. P 가 2.5 kgf/cm^2 에서는 L 이 540 m, 5.0 kgf/cm^2 에서는 720 m 그리고 7.5 kgf/cm^2 에서는 900 m까지는 W 가 L 에 비례하여 급격히 증가하지만 그 이상의 L 에서는 천이를 일으키며 실험조건이 L 이 끝날 때까지 완만하게 상승하고 있다. 각 P 에 대한 W 가 직선적으로 상승하는 L 까지는 금속간의 응착에 의하여 미소돌기부의 소성변형이 진전되어 다량의 금속성 입자인 마멸분이 형성되고 마찰면은 산화물의 생성이 극히 적은 초기 마멸 상태인 중마멸이 되기 때문이라고 생각된다. 그리고 그 이상의 L 에서는 L 의 증가와 함께 마찰열에 의한 고온으로 양 금속의 마찰계면에서 산화반응의 속도가 빠르게 진행되어 생성된 마멸분은 조속히 산화되고 이것이 유색의 산화물로 되어서 마찰면을 덮어 응착을 방지하는 보호피막의 역할을 하므로 정상 마멸 상태인 경마멸이 되기 때문이라고 생각된다. 그리고 실험 후 마찰면의 상태관찰과 마멸량의 측정치에서 마멸형태가 초기마멸에서 정상마멸로 천이하는 임계 미끄럼거리 L_c 의 크기는 정상마멸이 나타나기 위한 잠복기간으로 산화마멸 입자의 생성과 그것으로 인한 산화물층의 형성에 의존한다고 생각된다. 초기

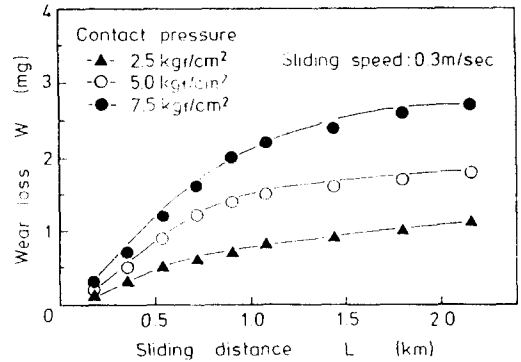


Fig. 9. Wear curves in wear loss with sliding distance.

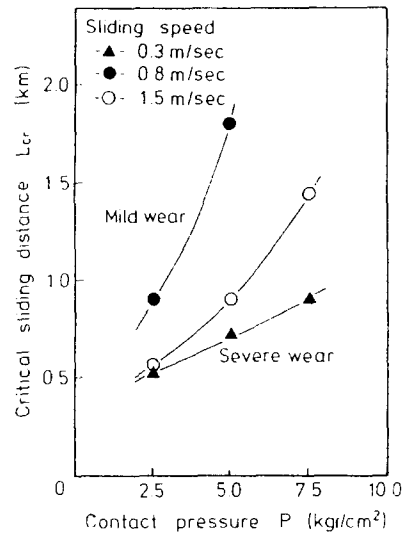


Fig. 10. Variation in the critical sliding distance with contact pressure.

마멸에서는 전단강도가 작은 실험재료에서 탈락된 마멸분이 접촉계면에 존재하기 때문에 이들에 의하여 부분적으로 시험편의 양 돌기부 사이의 간격이 상대적으로 크게 되며, 정상마멸로 천이하기 위해서는 계면에서의 금속간 접촉을 방지하여 하중을 지지하는데에 충분한 양의 산화물층이 필요하게 된다. 이와 같이 산화물층이 마찰면 전체표면에 형성되면 실질적으로 증대하기 때문에 접촉압력이 저하하여 접촉에서 다음 접촉에 이르기까지의 시간이 길어지기 때문에 산화막의 형성이 가능하게 된다고 생각된다. 이러한 산화막의 형성에 대하여 Quinn[7]은 공기중에서 정적으로 생성된 산화막은 100 \AA 이하 정도로 대단히 얇기

때문에 미끄럼 마멸의 초기단계에서는 마멸방지 작용을 하지 못하지만 마찰중에는 실접촉부에서 2~3 μm 정도의 두꺼운 산화막의 생성유무에 따라서 경마멸의 가능성을 표시하는 지표가 된다고 하였다. 그리고 각 접촉압력 P에 있어서 L_{cr}이상이 되는 경마멸 영역에서 W가 거의 일정하지 않고 완만하게 상승을 하는 것은 산화물층의 파괴와 회복이 항상 반복되기 때문이며, 만약 파괴속도가 회복속도보다 빠르게 되면 다시 중마멸로 천이가 일어나지만 경마멸 영역에서는 산화물층의 파괴속도가 회복속도보다 늦기 때문에 경마멸이 계속된다고 생각된다.

Fig. 10에는 미끄럼속도 V의 접촉하중 P에 따른 L_{cr}의 변화를 나타낸 것이다. 각 속도곡선의 상부는 경마멸 영역을, 하부는 중마멸 영역을 표시한다. 각 속도에서 P가 증가함에 따라 L_{cr}은 거의 직선적으로 증가하며, V가 0.8 m/sec인 경우가 저속과 고속에 비하여 중마멸 영역을 나타내는 L_{cr}이 훨씬 길어진다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 P가 상승함에 따라 실제 접촉면적이 증가하여 접촉계면의 연이은 소성변형으로 금속 응착마멸이 지배적으로 작용하여 저속과 고속의 경우에는 산화물의 생성속도가 양 금속의 미소돌기부에 의한 마멸속도 보다 증가하므로 L_{cr}이 짧아진다고 생각된다.

3-3. 마멸분의 생성 및 탈락거동

Fig. 11에는 접촉압력 P를 5 kgf/cm², 미끄럼속도 V를 0.8 m/sec로 일정하게 한 경우 미끄럼거리 L에 따른 접촉표면 하방의 경도(Hv)의 분포를 나타내었다. 접촉표면으로부터의 경도는 접촉표면 하방의 어떤 깊이의 위치 d에서 최대치를 나타내고 그 값은 L이 클 수록 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 즉 경도분포는 반복회수의 증가에 따라 상승하며 대체로 d가 120 μm 이하가 되면 L에 관계없이 모재와 거의 같은 경도를 가

진다. 그림에서 처럼 최대경도를 표시하는 접촉표면에서의 위치 d는 응력 반복회수가 증가하여도 대체로 동일위치에 나타나며 거의 표면에서 40 μm에서 나타난다는 것을 알 수 있다. 이처럼 d에 따른 경도의 분포는 표면하에서 소성유동이 시작되어 접촉응력의 반복작용으로 소성영역이 확대되면서 전단변형률이 증가하기 때문이며[8], 최대 경도치를 나타내는 d는 접촉압력에 의한 수직응력과 마찰력에 의한 전단응력이 최대되는 위치에 나타난다고 생각된다.

Fig. 12에는 L에 따른 마멸분의 생성 및 탈락거동을 나타낸 것으로서 이것은 마찰면을 마찰방향에 평행하게 절단한 뒤 3%의 나이탈 부식액에서 에칭한 것이다. 그림 (a)에서 L이 0.5 km인 경우 마찰력에 의하여 전단 변형된 표면층하에서 미시적으로 결정내의 미끄럼에 의한 소성유동으로 미끄럼 방향과 평행인 변형대(deformation band)가 형성되어 있다. 이처럼 소성유동은 표면하의 경도상승에 직접적인 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 그림 (b)에서 L이 1 km에서는 소성영역에서 전단응력의 반복작용으로 전위 및 개재물에 의한 void가 발생하고[9], 이것이 진전되어 균열의 핵으로

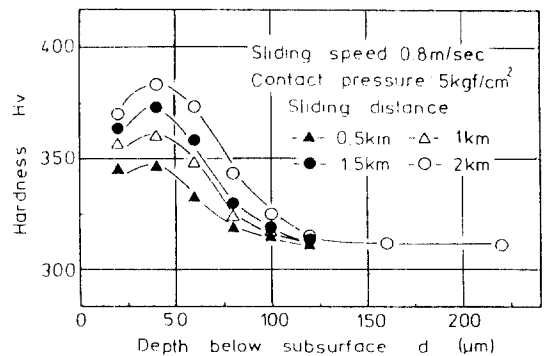


Fig. 11. Hardness distribution depending on the depth below subsurface.

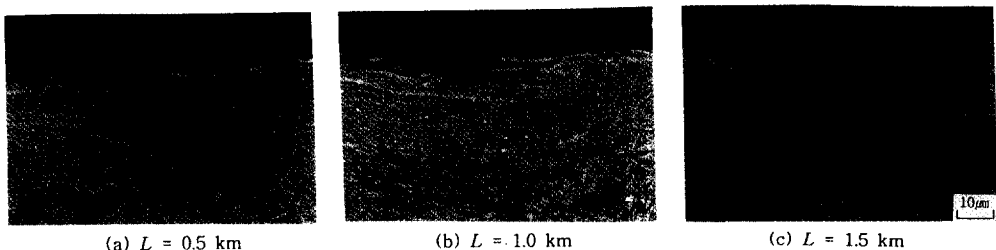


Fig. 12. Metallographic cross section on the sliding distance; P=5.0 kgf/cm², V=0.8 m/sec.

되어 계속되는 가공경화의 진행에 수반하여 void의 합체에 의한 균열이 접촉표면과 어떤 각도를 가지고 진행하여 그 전파방향이 표면에 대하여 거의 평행하게 진행되고 있다. 이것은 Suh[10]의 박리마멸의 이론에 정성적으로 잘 일치하지만 정량적으로는 불분명하므로 설명이 어렵다고 생각된다. 이처럼 균열의 전파는 소성역과의 경계부가 소성의 차 및 경도차 등에 의하여 응력집중원으로 작용[11]하여 균열을 심부까지 유도하게 되며, 균열의 전파깊이는 전단응력이 최대가 되는 위치에 분포된다고 추측된다. 따라서 접촉응력의 반복에 의한 균열도 일반의 피로파괴현상에서 나타나는 것처럼 소성영역이 어느 크기 이상으로 되면 발생과 전파가 용이하게 되고 경도의 최대치도 이곳에서 나타난다고 생각된다. 그리고 그림 (c)에서 L이 1.5 km에서는 이미 합체된 균열이 계속되는 반복응력으로 어느 깊이까지 전단파괴되어 모재와 분리된 큰 마멸분으로 탈락된 후 pit가 형성된 단면을 나타내고 있고, 연이어 탈락된 마멸분의 하부에 void가 형성되고 그 하부는 조직이 변화되어 있는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

플라스틱성형용 금형강인 KP-4M을 사용하여 대기 중에서 마멸특성 및 마멸분의 생성 및 탈락거동에 관계되는 마멸기구를 알기 위하여 대기중에서 미끄럼속도, 접촉하중 및 미끄럼거리를 변화시켜 건조미끄럼 마찰실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미끄럼속도에 따른 마멸량은 0.5 m/sec 이하의 저속영역과 1.5 m/sec 이상의 고속영역에서는 적고 그 중간속도 영역에서는 극대치를 가진다.
2. 비마멸율의 극대치를 나타내는 임계속도는 접촉압력이 증가함에 따라서 저속측으로 이행한다.
3. 중마멸에서 경마멸로 천이하는 임계 미끄럼거리

는 접촉압력이 증가함에 따라 산화반응 속도의 감소로 길어진다.

4. 플라스틱 성형용 금형강인 KP-4M의 응착마멸에 의한 마멸분의 생성 및 탈락거동의 과정을 제시하였다.

참 고 문 헌

1. 野呂瀬進, "耐摩耗材料とその將來", 潤滑, 第32卷, 第4號, pp.241-246, 1987.
2. 荒木田豊, "射出成形機用耐摩耗・耐蝕材料", トライボロジスト, 第35卷, 第10號, pp.701-708, 1990.
3. 朴興植, "오스텝퍼링 한 低合金球狀黑鉛鑄鐵의 機械的性質 및 磨滅特性에 관한 研究", 博士學位論文, pp.46-48, 1989.
4. 岩田一明, "高接觸面壓力下における摩擦と凝着(2)", 機械の研究, 第24卷, 第7號, pp.905-910, 1972.
5. R.Holm, "Electric Contacts", Hugo, Gerbers Ferlag, p. 214, 1946.
6. 岡林邦夫, 川本 信, "摩擦面溫度と摩耗", 潤滑, 第26卷, 第26號, pp.337-382, 1982.
7. J.F.J.Quinn, "The Effect of Hot-Spot Temperature on the Unlubricated Wear of Seal", ASLE Trans., 10, pp. 158-168, 1967.
8. 萱場孝雄, "微視的觀察を主とした最近の摩耗の研究", 潤滑, 第29卷, 第1號, pp.9-14, 1984.
9. 須藤一, "液體窒素および液體酸素中の金屬の摩耗", 潤滑, 第30卷, 第5號, pp. 335-340, 1985.
10. N.P.Suh, "Delamination Theory of Wear", Wear, 25, pp.111-340, 1985.
11. Takashi Fukui, Kimio Matuda, Takeo and Tadanori Tokunaga, "The Influence of Work Hardening on the Rolling Contact Fatigue Strength of the Stainless Steel(SUS 304, SUS 405)", JSLE, vol.30, No.11, pp. 811-815, 1985.