

마멸입자가 운동이력이 다른 금속재료의 마찰 마멸현상에 미치는 영향

Effect of Wear Particles on the Friction and Wear Behavior of Metals in Motion History

황동환*(연세대학교 대학원), 김대은(연세대학교 기계공학과), 이상조(연세대학교 기계공학과)

ABSTRACT

The effects of wear particles on the friction and wear behavior of metals in dry sliding conditions are presented. The tribological tests were performed using pure metal specimens which were selected based on their degrees of compatibility and hardness ratio. Friction and wear experiments were conducted using both pin-on-disk and reciprocating pin-on-plate type tribotesters to investigate the effect of motion history. Experimental results show that in the case of dry sliding the frictional behavior observed during pin-on-disk test differed from that of pin-on-reciprocator test for the given set of material pairs. The friction coefficient and wear rate were found to be higher for the pin-on-disk tests. It is suspected that the sliding motion of the pin affects the wear particle dynamics, which in turn influences the frictional behavior. The effect of material pair properties seemed to be relatively smaller than that of wear particles. The results of this paper is expected to aid in the design of mechanical systems for best tribological performance.

Key Words : friction(마찰), wear(마멸), wear particle(마멸입자), motion history(운동이력),
friction coefficient(마찰계수), wear rate(마멸률)

1. 서론

물체가 서로 접촉하면서 발생하는 소음, 열, 진동 등의 문제는 일상생활은 물론 산업현장 등에서 많은 문제들을 야기하고 있으며, 이러한 두 고체간의 미끄럼 혹은 구름접촉에 의해 발생하는 마찰 및 마멸 현상은 동적인 거동을 행하는 기계요소라면 피할 수 없는 물리적 현상이다. 일반적으로 마찰현상은 마찰에 의한 에너지 손실을 유발할 뿐만 아니라 접촉부의 불안정한 거동의 원인이 될 수 있으므로 정밀한 기계요소 설계시 고려하여야 할 매우 중요한 인자이다. 마찰 및 마멸에 영향을 미치는 인자는 경도, 표면조도 혹은 친화성등 재료간의 기계화학적 특성에 관계된 인자들 외에도 주변환경, 접촉 온도 또는 접촉시 운동형태등이 있으며 이러한 인자들이 서로 복잡하게 연관되어 마찰 마멸에 영향을 미치고 있다. 이에 대해서는 이제까지 수많은 연구가 진행되었다 [1-5]. 또한 최근에는 표면품위에 대한 인식이 새로

워 지면서 가공변질층이나 잔류응력등이 마찰 마멸 현상에 영향을 미치는 인자로 알려져 있으며[6], 마멸에 의해 발생한 마멸입자의 영향에 대한 연구도 많이 진행되어, 마찰 마멸현상을 이해하는 중요한 인자로 인식되었다[7]. 특히 마멸입자의 경우, 기존의 상대마찰재의 물성치로는 그 특성을 예측하기 힘들고, 또 실제로 접촉면사이에 삽입되었을 경우 두 고체간의 직접적인 접촉을 막고 별도의 영향을 미치므로 이에 대해서 최근 많은 연구가 행해지고 있다. 이런 많은 연구에도 불구하고 아직 마찰 마멸현상을 정확히 표현하고 이해할 수 있는 이론은 부재중이라 할 수 있다.

마찰 및 마멸에 대한 감소기술을 확보하기 위해서는 우선 가장 기초적이고 합리적인 이해를 위하여, 여러 인자들 중에서 가장 지배적인 인자의 추출과 메커니즘의 해석이 필수적일 것이다.

본 연구에서는 운동이력이 다른, 즉, 한방향 운동과 양방향 운동을 경험하는 금속재료의 마찰 마멸현

상에 대하여 마멸입자의 영향을 일반적인 재료의 물성치의 영향과 함께 실험적으로 비교 고찰하였다.

2. 실험방법 및 내용

2.1 실험장치

본 연구에서는 마멸입자가 운동이력에 따른 금속재료의 마찰 및 마멸현상에 미치는 영향을 비교실험을 행하기 위하여, 실험실에서 직접 설계 제작된 pin-on-disk 및 pin-on-reciprocator 마찰·마멸 실험장치를 이용하였다. Pin과 disk 또는 pin과 plate를 한쌍의 재료로 하여 시편을 구성하며, 두 장치 모두 pin부는 고정되어 있고, 각기 plate부와 disk부가 움직인다. 마찰력의 측정은 스트레인 게이지에 의해 검출된 스트레인량이 전압으로 변환되고 amplifier로 증폭되어 A/D board를 통해 PC에 저장됨으로써 실시간 측정이 이루어지도록 하였다. 실험장치에 대한 사양은 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of experimental setup

	Pin-on-Disk Tribotester	Pin-on-Reciprocator Tribotester
Configuration	Pin + Rotating disk	Pin + Reciprocating plate
Velocity	60~300 rpm	1~5 Hz
Load Capacity	50~500gf (Dead weight)	
Sensor	Strain Ring (Full-bridge strain gage)	

한편, 실험중에 pin과 plate 혹은 disk의 접촉면에서 나타나는 마찰현상 및 마멸입자의 거동을 고찰하고 이를 마찰계수와 실시간으로 비교분석하기 위하여, CCD camera와 vision board를 이용하였다. Vision system 및 데이터 수집 시스템에 관한 전체적인 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 표면 및 마멸입자의 관찰에는 광학현미경과 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하였으며, 또한 표면특성의 측정을 위해서는 미소경도기, surface profilometer 등을 이용하고, 질량의 변화는 10^{-5} g까지 측정 가능한 micro balance를 사용하였다.

2.2 실험시편 및 실험조건

마찰 마멸현상이 운동이력에 영향을 받는다는 것은 Cu와 일반 탄소강(SM45C)의 경우 이미 행하여

진 바가 있다[8]. 이때 운동이력에 따라 마찰 마멸현상이 차별화 되는 것은 마멸입자의 생성과 관계가 있다는 것이 밝혀졌다.

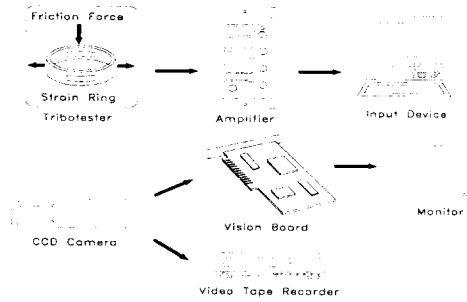


Fig. 1 Schematic diagram of data acquisition and vision system

본 연구에서는 이러한 현상이 다른 금속재료에 대하여 어떻게 나타나는지를, 그리고 이 때 어떤 인자가 지배적인 영향을 미치는지에 대해 살펴보기 위하여 많은 재료의 조합을 택하여 실험을 행하였다. 상대마찰재의 조합은 Table 2와 같은 재료의 조합을 선택하였다. 두 재료 중 상대적으로 경한 재료를 pin으로, 연한 재료를 disk 또는 plate로 하였다. 여기서 재료조합의 상대 조화성(relative compatibility)의 결정은 Rabinowicz의 조화표[2]에 근거하였는데, Table 2에서 조화비가 "High"인 경우는 조화비 계수(compatibility parameter)의 값이 0.5 이상인 경우를 뜻하고, 조화비 계수가 0.32에 해당하는 조합을 "Medium", 조화비 계수가 0.2 이하에 해당하는 조합의 경우를 "Low"로 하였다. 조화비가 높다는 것은 두 재료의 용해성이 높다는 것을 의미하는 것이다. 경도비(hardness ratio)는 disk 또는 plate 재료의 경도에 대한 pin재료의 경도비를 의미하며, 높은 경도비는 두 재료의 경도차가 작다는 것을 나타낸다. 조화비와 함께 경도비의 영향도 보기 위하여, Table 2에서 보듯이 같은 상대조화성에 해당하면서도 그 경도비값이 0.02 정도의 아주 작은 값부터 0.9 정도의 큰 값을 갖도록 다양하게 여러 금속 조합을 선정하였다. 시편재료는 불순물이나 기타 다른 화학원소의 영향을 배제하기 위하여 모두 99% 이상의 순도를 보장하는 순수금속으로 선정하였다.

시편의 가공은 선삭 또는 밀링가공 후 연삭을 행하고 polishing을 행하여 disk, plate 모두 표면거칠기를 $1 \mu\text{m}$ 이하(Ra value)로 제작함으로써 표면거칠

기로 인한 영향을 최소화 하였다. Pin의 끝부분은 말단부의 직경이 약 700~800 μm 인 원추형으로 제작하였다. Table 2의 각 case에 대한 모든 실험은 건조상태로 행하였으며, 이때 환경조건은 온도의 경우 15~24°C, 습도는 30~50% 내를 유지하였다. 실험조건으로는 하중 200gf, 미끄럼 선속도는 0.1~0.2 m/sec, 미끄럼거리는 예비실험의 결과를 이용해 마찰계수가 정상상태(steady-state)에 도달할 때까지를 선정기준으로 하여 모든 실험에서 150m로 설정하였다.

Table 2. Metal-pairs used for experiments

Case	Relative Compatibility	Corresponding Metal-Pairs having various hardness ratio
1	High	AgAl, NiCu, CuAl, MoCr, MoNi, MoTi, TiCr, TiFe, TiNi, NiAl, TiAl, AgSn, TiPb, TiSn
2	Medium	AgCu, FeCu, TiCu, MoAl, MoZn, TiZn, ZnSn, CuSn, NiIn, NiSn, TiIn, ZnIn
3	Low	CrCu, CuAl, FeAg, MoAg, MoCu, NiAg, AlPb, AlSn, ZnPb, CrSn, CuPb, FeSn
4		Identical Materials

3. 실험결과 및 고찰

먼저 실험의 초기와 정상상태에 이르렀을 때의 마찰계수를 측정하였다. 초기 마찰계수는 disk장치의 경우 한회전하였을 때의 마찰계수를 평균한 것이며, plate(양방향운동)의 경우 왕복하기 직전까지의 마찰계수를 측정하여 평균한 것이다. Fig. 2에 의하면 초기상태에는 한방향운동이나 양방향운동에 따른 마찰계수가 거의 차이가 나지 않는다.

또한 마찰현상의 주요원인으로 생각되어지고 있는 조화계수에 대해서도 별 경향을 나타내지 않는다. 그러나 정상상태에 이르렀을 때의 마찰계수를 비교해보면, 전반적으로 초기에 비해 상당한 마찰계수의 증가가 있었음을 알 수 있다. 한 방향 운동을 경험하는 경우(pin-on-disk)에는 초기에 비해 평균적으로 약 0.7 정도의 증가를 나타내는데 반하여 양방향 운동(pin-on-reciprocal)을 경험하는 경우에는 평균적으로 약 0.4정도의 증가를 보이고 있다. 정상상태에 이룬 마찰계수의 경우에도 조화계수와의 연관성

을 찾기 힘들다.

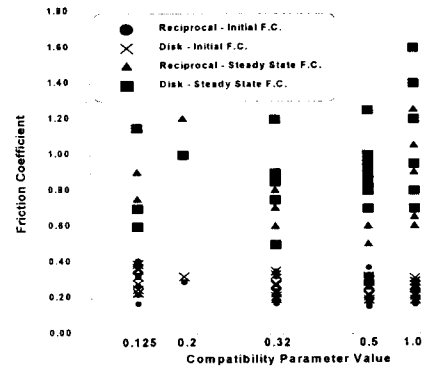


Fig. 2 Friction coefficient respect to the compatibility parameter value

따라서 일반적으로 마찰현상을 예측하기위해 흠착 이론에서 중요시 하는 두 고체간의 친화성은 실제적으로 큰 의미가 없어 보인다. 한편 이 결과를 경도비에 대하여 재정리하여 나타내면 Fig. 3과 같다. Fig. 3에 의하면 초기 마찰계수의 경우 경도비가 증가할수록 마찰계수의 감소를 알 수 있다. 즉, 상대하는 두 마찰재간의 경도차가 작을수록 초기 마찰계수는 감소한다는 것이다. 이는 경도차가 큰 시편의 조합에서는 초기에 핀의 요철이 상대적으로 연한 flat 시편의 표면에 침투하여 micro cutting과 같은 역할을 하기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 마찰계수의 경향은 정상상태에 이르러 경도비에 거의 무관한 것으로 나타났다.

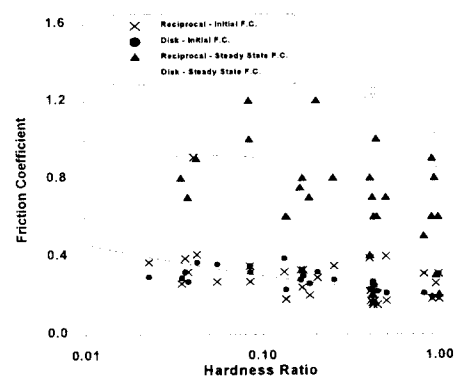


Fig. 3 Friction coefficient respect to the hardness ratio

이와같은 결과로부터 정상상태에 이르렀을때의 마찰계수는 상대하는 마찰재의 물성치로 표현하기는 어렵다는 것을 알 수 있다. 이 때 정상상태에 이르

기까지의 접촉현상을 살펴보면 많은 마멸입자의 발생을 발견할 수 있는데 CCD 촬영결과 마멸입자의 생성과 탈락, 그리고 접촉면에 삽입되는 과정등이 마찰계수의 거동은 물론 마멸현상에 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있었다. 이러한 마멸입자의 거동은 실험후 채취된 마멸입자의 모양과 크기에서 추측할 수 있다. Fig.4는 마멸입자가 마찰현상에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 입자제거실험을 행한 결과이다. 실험은 pin-on-reciprocal 장치에서 행하였다.

결과의 의하면 초기 마찰계수는 마멸입자의 발생과 더불어 급격히 증가하며, 잠시 후 마찰계수는 정상상태에 이르게 된다. 이때 마멸트랙과 접촉면사이의 마멸입자를 제거하면 거의 초기와 비슷한 크기의 마찰계수를 나타낸다.

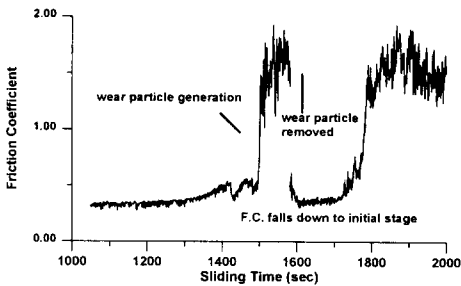


Fig. 4 Effect of wear particle on the frictional behavior

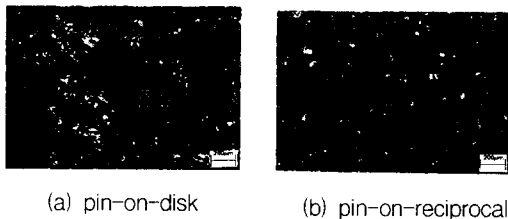


Fig. 5 Photographs of wear particles generated by uni-, and bidirectional motion (Cu/Cu)

접촉이 계속 진행되면 잠시 후 마찰계수는 마멸입자의 증가와 함께 증가하게 된다. 여기서 마찰마멸 현상에 대한 마멸입자의 영향을 잘 알 수 있다. 한편 실험 후 두 실험장치로부터 채취한 마멸입자를 Fig. 5에서 보여주고 있다. 한방향운동의 경우 마멸입자가 더 크며, 입자의 형상은 여러개의 입자가 뭉쳐져있다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 입자의 거동이 접촉계의 거동과 연관되어 한 방향의 경우

뭉침 현상이 지배적이 되며 이것이 다시 마찰 마멸 현상에 영향을 미친다는 것이고, 양방향운동의 경우 왕복운동에 의해 입자의 뭉침현상이 상대적으로 작아 한 방향에 비해 입자의 영향을 덜 받는다는 것이다.

4. 결론

1. 정상상태의 마찰거동은 경도비나 조화비와 같은 물성치보다는 접촉시 발생하는 마멸입자와 같은 인자에 더욱 큰 영향을 받는다.
2. 한방향운동의 경우 입자의 뭉침 현상이 더 활발하여 양방향운동에 비해 높은 마찰 마멸특성을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

후기

본 연구는 한국과학재단 CISD (97K3-0907-02-02-1)의 일부 지원 하에 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bowden, F.P., and Tabor, D., 1954, *The Friction and Lubrication of Solids*, Clarendon Press, Oxford.
2. Rabinowicz, E., 1971, "Determination of Compatibility of Metals through Static Friction Test", ASLE Trans., ASLE Vol. 14, pp. 198-205.
3. Suh, N.P., 1986, *Tribophysics*, Prentice-Hall.
4. Suh, N.P., and Saka, N., 1987, "Surface Engineering", CIRP, Vol. 36/1, pp. 403-408.
5. Kim, D.E., 1991, "Investigation of the Microscopic Mechanisms of Friction", Ph. D. Thesis, M.I.T.
6. Kim, D.E. and Hwang, D.H., 1995, "Surface Integrity and Tribological Properties of Machined Surfaces", KSTLE 1th Korea-U.S. Tribology Symposium, Seoul, pp.37-35.
7. Oktay, S.T., and Suh N.P., 1992, "Wear Debris Formation and Agglomeration", J. of tribology, vol. 114, pp. 379-393.
8. 황동환, 김대은, 1996, "건조 및 경계윤활 조건에서 응력이력에 따른 금속재료의 마찰 마멸 특성", 한국윤활학회 제23회 학술대회, pp.93-98.