

순수금속의 재료물성치와 마찰·마멸특성에 대한 연구

황동환·성인하*·김대은**

연세대학교 대학원 기계공학과

*LG전자(주)

**연세대학교 기계공학과

The Effects of Relative Material Properties on the Friction and Wear Behavior of Pure Metals

Dong-Hwan Hwang, In-Ha Sung* and Dae-Eun Kim**

Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

*LG Electronics Co.

**Department of Mechanical Engineering, Yonsei University

Abstract—In this paper, the effects of material properties on the friction and wear behavior of pure metals are investigated. The sliding material pairs are selected based on their relative compatibility and relative hardness ratio of the specimen. The initial and steady-state friction coefficients are obtained in the experiments and the wear rates are quantitatively investigated. It is shown that the initial friction coefficient is affected by the hardness ratio of sliding materials. Furthermore, in steady state condition, neither hardness ratio nor compatibility has significant influence on the frictional behavior. As for wear, the ductility of the metal affects the wear particle generation process which in turn affects the frictional behavior. The findings of this research suggest that frictional interaction cannot be simply characterized by either compatibility or hardness ratio of the materials undergoing sliding contact.

Key words—friction, wear, relative compatibility, relative hardness ratio, material properties.

1. 서 론

두 고체간의 마찰현상은 매우 복잡한 현상으로, 재료의 물성치, 표면상태, 접촉조건 등이 서로 복잡하게 연관되어 마찰 메커니즘에 영향을 미친다. 동적인 기계요소간의 접촉에서 필연적으로 발생하는 마찰현상은 에너지 손실을 유발하며, 나아가 접촉면의 파손을 발생시켜 기계요소의 수명을 단축시키는 주요 요인으로 작용하므로, 지난 많은 세월동안 이론 및 실험적으로 연구의 대상이 되어왔다. 그러나 이러한 많은 연구결과에도 불구하고 마찰 및 마멸현상에 대한 일반적인 결론은 아직 요원하며, 기본적인 이론 또는 해석이 명확하게 정립되지 않고 있다.

이제까지의 연구를 정리해보면 마찰 및 마멸 메커

니즘에 관한 연구는 대표적으로 화학적 접근방식과 기계 역학적 접근방식의 두 관점으로 분류할 수 있다.

화학적 관점의 대표적인 이론은 응착이론(adhesion theory)으로서, 마찰현상에 대해서는 지배적인 이론으로 인식되고 있다. 이 이론은 마찰현상을 상대하는 재료표면간의 화학적 접촉, 즉, 표면에너지에 의한 접촉면간의 응착(adhesion)으로 해석하는 것으로서 상대재료의 화학적 성질 및 용해성을 마찰력 발생의 근본적 원인으로 본다[1, 2]. 응착이론에서는 두 고체의 접촉시 표면요철의 돌기(asperity)부위에 응착력이 형성되고, 마찰력이란 두 고체가 상대운동할 때 응착력을 극복해야 할 전단에너지에 기인한다고 설명하고 있다. Rabinowicz는 금속의 상태도로부터 한 재료와 다른 재료간의 화학적 작용, 즉 고용성(solid solubility)을

근거로 각 순수금속조합의 금속학적 친화성과 이에 따른 친화비계수를 5가지로 분류하고 이를 도식적으로 나타낸 친화표(compatibility chart)를 만들어 제시하였다[3-5]. 이를 토대로 Rabinowicz는 금속학적 친화성이 낮은 재료조합일 수록 마찰계수도 작아진다는 결과를 제시하기도 하였다. 한편, 다른 연구결과에 의하면 마찰력을 유발시키는 원인으로 응착력보다는 기계 역학적 상호작용(mechanical interaction)이 더욱 중요한 요소로 작용한다는 이론이 제안되고 있다[6-8]. 기계 역학적 접근방식에서는 표면 요철과 마멸입자의 중요성을 강조하면서, 마찰현상은 기본적으로 응착성, 돌기변형(asperity deformation), 그리고 마멸입자에 의한 표면 경작현상(plowing)으로부터 발생한다고 설명하고 있다. 또한 이들 세 인자 중 특히 마멸입자에 의한 경작 현상이 다른 인자들보다도 마찰력 발생에 가장 큰 영향을 끼친다는 것이 밝혀졌는데[6], M.I.T에서 행해진 일련의 연구에 의하면 기계 역학적 상호작용은 마멸입자의 크기 및 표면 침투되었을 때의 깊이 정도와 표면 요철상태에 영향을 받는다는 것을 보여주고 있다[9-11]. 아울러 마찰현상은 접촉조건에 따라 다양한 메커니즘이 작용하고, 이때 기여하는 메커니즘의 비율도 조건에 따라 상이하며, 따라서 마찰 및 마멸현상은 주어진 어떠한 미끄럼 접촉계에 대해서도 미끄럼이력(sliding history)에 의해 좌우된다고 주장하였다[6].

현재 마찰 및 마멸현상에 대해 주요한 이론으로 인식되고 있는 두 관점, 즉 응착성과 용해성을 중시하는 화학적관점과 고체의 기계적 물성치와 마멸입자의 거동을 중시하는 기계 역학적 관점은 해석방식이 상이할 뿐만 아니라 마찰현상에 대한 근본적 이해가 완전히 다르므로, 실제 응용현장에서 마찰 마멸 저감대책을 제시함에 있어 많은 어려움이 예상된다고 할 수 있다.

본 연구에서는 마찰 마멸 현상에 미치는 재료물성치의 영향을 전술한 두 가지 관점에 대해 실험적으로 비교하기 위하여 화학적 관점의 경우 두 재료간의 상대 친화성, 그리고 기계역학적 관점의 경우 두 재료간의 경도비를 시편 조합변수로 설정하였으며, 실험결과와의 신뢰성을 높이기 위하여 순수금속재료를 이용하였다.

2. 실험

2-1. 실험내용

재료물성치가 마찰 마멸현상에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 초기 및 정상상태 마찰 특성을 고찰하였다. 초기상태에서는 재료간 마멸현상이 발생하기 전이므로 마멸이 진행되어 표면이 거칠고 마멸입자 등이 발생하는 정상상태의 마찰현상과는 많은 차이가 있을 것으로 사료된다. Rabinowicz는 친화표를 산출하는 실험에서 마찰경사각을 이용하였는데[5], 이는 초기 마찰계수 이상의 의미는 없다고 판단되며, 또한 마찰경사각 실험은 하중이나 속도에 무관한 실험방법으로 마찰 마멸현상이 하중이나 속도에 좌우된다는 점을 고려하면 다소 비현실적인 실험방법이라 할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 2.3절에서 제시한 실험조건으로 초기 및 정상상태에 대한 마찰실험을 행하고 실험결과로부터 재료물성치의 영향을 좀 더 현실적으로 고찰해보고자 한다. 또한 실험후에는 평판의 마멸량을 정량적으로 측정하여 재료물성치와 마멸현상과의 관계를 고찰하였다.

2-2. 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 Pin-on-reciprocator 마찰 마멸 실험장치를 제작하여 이용하였다. 핀과 평판을 한쌍의 마찰재로 하며, 핀부는 고정되어 있고 왕복하는 reciprocator 위의 평판부가 운동을 한다. 이때 미끄럼 거리는 20 mm(왕복거리 40 mm)이고, reciprocator의 최대왕복주기는 5 Hz, 이에 따른 최대 속도는 약 0.5 m/sec이다. 마찰력은 핀부에 장착되어 있는 full-bridge 스트레인링에 의한 스트레인량을 전압으로 변환하고 이를 실시간으로 PC에 저장하였다. 하중은 dead weight를 핀위에 가해지도록 했으며, 센서용량에 따라 50~500 gf 범위의 하중을 가할 수 있도록 설계

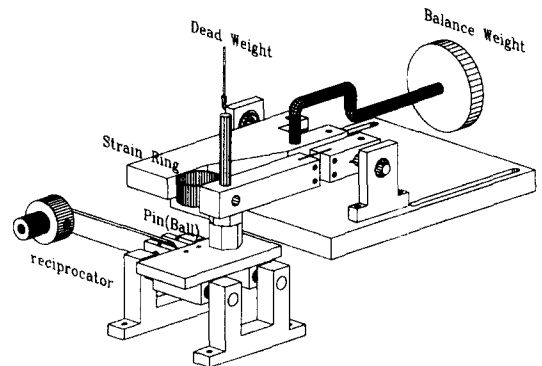


Fig. 1. Pin-on-reciprocator tribometer.

되었다. 마멸특성을 관찰하기 위하여 광학현미경과 접촉식 표면거칠기 측정기를 이용하였다.

2-3. 실험시편 및 실험조건

서론에서 기술한 바대로 두 재료의 친화성 또는 경도비를 비롯한 재료물성치들 중 어느 인자가 마찰 및 마멸현상에 더 큰 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 Table 1과 같은 상대마찰재료의 조합을 선택하였다. 이때 경도가 있는 재료조합의 경우 핀을 연한 재료로 하면 핀의 마멸이 가속화 될 것으로 사료되어 본 연구에서는 두 재료 중 상대적으로 경도가 큰 재료를 핀으로, 그리고 경도가 작은 재료를 평판으로 하였다.

Table 1에서 재료조합의 상대 친화성(relative compatibility)의 결정은 Rabinowicz의 친화표[3]에 근거하였는데, 친화표에서 친화비 계수(compatibility parameter)의 값이 0.5 이상, 즉 "Compatible pair" 및 "Identical pair"인 경우를 "High", "Partially compatible pair"인 0.32에 해당하는 조합을 "Medium", "Partially incompatible pair"과 "Incompatible pair"인 0.2 이하에 해당하는 조합의 경우를 "Low"로 하였다. 친화비가 높다는 것은 두 재료의 용해성이 높다는 것을 의미한다. 친화비와 함께 경도비의 영향도 보기 위하여, Table 1에서 보듯이 같은 상대친화성에 해당하면서도 그 경도비값

이 0.02 정도의 아주 작은 값부터 0.9 정도의 큰 값을 갖도록 다양하게 여러 금속조합을 선정하였다. 경도비(hardness ratio)는 핀 재료의 경도에 대한 평판재료의 경도비를 의미하며, 높은 경도비는 두 재료의 경도차가 작다는 것을 나타낸다. 따라서 경도비가 "1"인 경우 같은 재료로 실험을 행하였다는 것을 의미한다. 또한, 친화비 및 경도비의 영향을 모두 배제한 상태에서의 마찰 및 마멸양상을 보기 위하여 동일금속간의 조합도 고려하였다. 본 논문에서 금속조합의 표기는 앞에 표기한 것이 핀이고, 뒤에 쓴 것이 평판으로 사용된 금속을 의미한다.

시편재료는 불순물이나 기타 다른 화학원소의 영향을 배제하기 위하여 모두 99% 이상의 순도를 갖는 순수금속으로 선정하였으며, 본 연구에 사용된 각 금속의 경도값을 Table 1에 함께 제시하였다.

평판 시편의 표면은 정밀선삭 또는 밀링가공을 행한 후 연마를 행하였다. 시편은 표면거칠기를 $1 \mu\text{m}$ 이하(Ra value)로 제작하여 표면거칠기로 인한 영향을 최소화하도록 하였다. 핀은 미니선반을 이용하여 선삭한후 #1500~2000 정도의 사포로 끝단부를 연마하였으며, 핀의 끝부분의 형상은 직경 약 700~800 μm 의 원추형으로 제작하였다. 실험을 시작할 때에는 시편의 표면을 에탄올로 세척하여 표면에 존재할 오

Table 1. Metal-pairs used for experiments

Case	Relative Compatibility (Compatibility parameter value)	Corresponding Metal-Pairs (pin/plate) having various hardness ratio (Hardness ratio : $H_{\text{fin}}/H_{\text{pin}}$)
1	High (compatible:0.5 or higher)	Ag/Al(0.42), Ni/Cu(0.43), Cu/Al(0.42), Mo/Cr(0.96), Mo/Ni(0.92), Mo/Ti(1.0), Ti/Cr(0.96), Ti/Fe(0.8), Ti/Ni(0.92), Ni/Al(0.18), Ti/Al(0.17), Ag/Sn(0.1), Ti/Pb(0.02), Ti/Sn(0.04)
2	Medium (partially compatible:0.32)	Mo/In(0.01), Ni/In(0.01), Zn/In(0.04), Ti/In(0.01), Ag/Cu(1.0), Fe/Cu(0.5), Ti/Cu(0.4), Mo/Al(0.17), Mo/Zn(0.14), Ti/Zn(0.14), Zn/Sn(0.29), Cu/Sn(0.1), Ni/Sn(0.04)
3	Low (partially incompatible or incompatible:0.125~0.2)	Cr/Cu(0.42), Cu/Al(0.42), Fe/Ag(0.5), Mo/Ag(0.4), Mo/Cu(0.4), Ni/Ag(0.43), Al/Pb(0.14), Al/Sn(0.24), Zn/Pb(0.18), Cr/Sn(0.04), Cu/Pb(0.06), Fe/Sn(0.05)
4	Identical Metal-Pairs Initial Hardness of Materials(Hv)	Al, Cu, Pb, Ni, Ti, Sn, Zn, Steel (AISI 1045) In(~2), Pb(~6), Sn(~10), Zn(34), Al(42), Cu(100), Ag(100), Fe(200), AISI 1045(220), Ni(230), Cr(240), Ti(250), Mo(250)

염막을 가능한 제거하도록 하였다.

모든 실험은 건조상태에서 행하였으며, 15~24°C의 온도에서, 습도는 30~50%를 유지하였다. 초기 및 정상상태 마찰계수 실험에 적용된 미끄럼 선속도는 평균 0.04 m/sec(1 Hz, 최대 0.1 m/sec)였으며 200 gf의 하중이 적용되었다. 이때 데이터 산출은 초기 마찰계수 측정실험의 경우 10 Hz 단위로 수집된 데이터의 평균을 취하였으며, 정상상태 마찰계수 측정실험의 경우 10 Hz로 수집된 데이터를 1분단위로 평균하였다.

3. 실험결과

3-1. 초기마찰계수에 대한 재료물성치의 영향

각 재료조합의 친화비 계수(compatibility parameter)와 경도비에 대한 초기 마찰계수를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 본 연구에서의 초기 마찰계수는 정지에서 운동을 시작하기까지의 마찰계수로 정의되는 정마찰계수(static friction coefficient)와는 상이하며, 평판이 최초 한 방향으로 운동을 행하고 방향을 바꾸어 반대방향으로 운동을 시작하기 전까지의 마찰계수를 뜻한다. 즉, 시간적으로는 1 Hz로 왕복 운동하는 평판이 0.5초(미끄럼 거리 20 mm)간에 겪는 마찰계수를 평균한 것이다. 이는 핀과 평판이 새로운 접촉을 행하게 되는 시간이며 이후에는 이미 접촉이 이루어진 트랙위를 핀이 운동하게 되는 것이다. 실험결과와 각 조합에 대하여 3번 반복 실험한 것을 평균하였다.

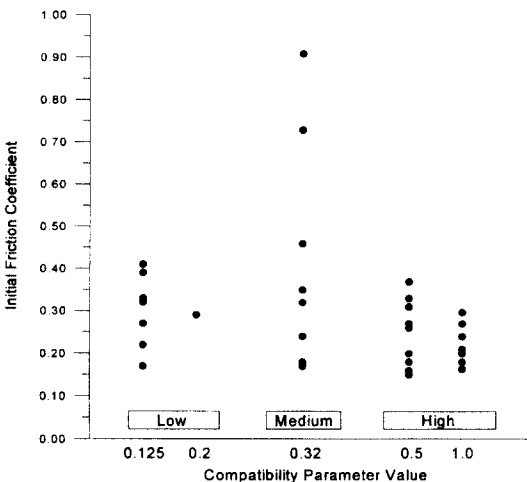


Fig. 2. Initial friction coefficient vs. compatibility parameter value.

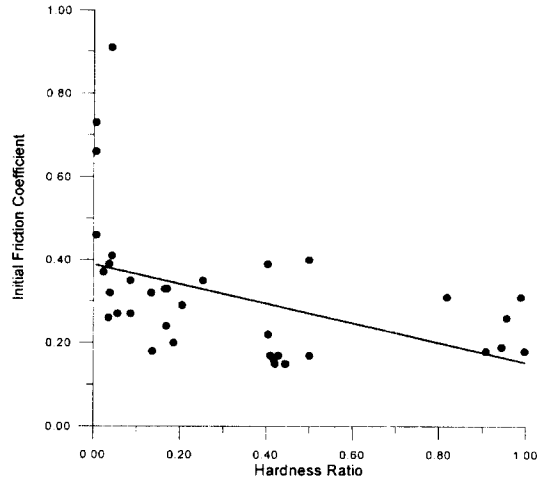


Fig. 3. Initial friction coefficient vs. hardness ratio.

Fig. 2에 의하면 각 친화비 계수에 대해서 마찰계수가 광범위하게 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 친화비가 증가하여 접촉하는 두 고체간의 응착이 발생하고 이를 깨기 위한 전단력의 발생이 마찰계수증가의 주된 요인이라는 응착력이론만으로는 설명하기 힘든 결과이다. 현실적으로 두 고체간의 응착이 발생하기 위해서는 노출조건 및 청정도 등의 주변환경이 매우 중요한데 본 연구에서와 같이 일반대기상태의 실험환경에서는 대기 중의 가스나 먼지 등으로부터 시편의 표면 청정도를 완벽하게 기대하기 힘들다. 따라서 산화막이나 먼지 등에 의한 표면 오염층이 두 고체간의 직접적인 접촉을 방해하므로써 응착력이 마찰력 발생의 지배적 영향을 미치지 못한 것으로 사료된다. 이러한 환경의 영향에 대해서는 Buckley[12] 및 Bowden 등[1]이 이미 연구한 바 있으며, 이들은 진공상태나 비활성기체상태에서는 응착력 발생에 의한 초기마찰계수가 지배적 요인이며 일반대기 상태에 비해 약 2배~5배에 이른다는 것을 보이기도 했다.

초기마찰계수 결과를 경도비에 따라 재분류한 결과를 Fig. 3에 보이고 있다. 결과에 의하면 경도비에 대해서는 경도비가 증가할 수록 즉, 두 재료간의 경도차가 작을수록 초기마찰계수가 감소하는 경향을 보인다. 특히 In를 평판으로한 재료조합 Ti/In(친화비 medium), Zn/In(친화비 medium) 및 Mo/In 등은 0.6이상의 높은 초기마찰계수를 보이고 있으나 이것은 In의 경도가 극단적으로 낮아(HV 2이하) 상대재료인 핀

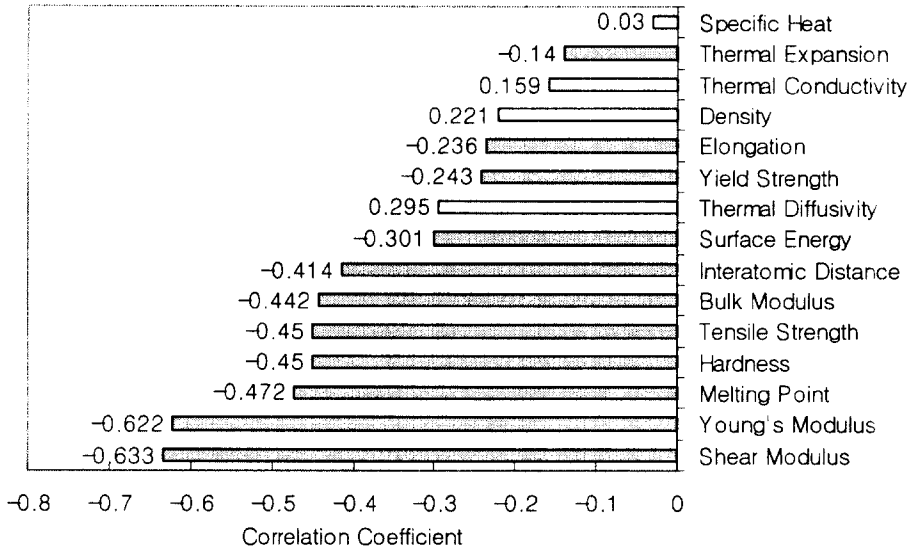


Fig. 5. Correlation coefficient between steady-state friction coefficient and material properties.

비한다. 예를 들어 상관계수가 1.0을 나타내는 재료물성치비가 있다면 그 재료물성치는 초기 마찰계수에 대하여 아주 높은 비례적 관계에 있다는 것을 의미한다. 역으로 -1.0을 갖는 재료물성치비의 경우 초기 마찰계수와 반비례적 관계에 있다는 것을 의미한다.

Fig. 5에서 각 재료물성치비와 초기 마찰계수간의 상관계수를 보여주고 있다.

결과를 살펴보면 경도와 비례적 관계에 있는 재료물성치들, 즉, 탄성계수나 전단계수등이 다른 재료물성치비에 비해 0.5 이상의 높은 상관관계에 있으며, 모두 역상관성을 나타냄으로서 Fig. 3에서 나타난 바와 같이 초기 마찰계수와 반비례적 관계에 있음을 알 수 있다. 또한 비열, 열팽창계수 및 열전도계수 등의 열적 물성치의 경우 0.3 이하의 값을 보임으로서 초기 마찰계수와의 상관성이 매우 작은 것을 볼 수 있는데, 이러한 결과는 초기 짧은 접촉시간에 의해 온도증가 등의 물리적 현상이 발생하기 어려움에 따라 나타나는 결과로 사료된다. 그러나 전반적으로 모든 상관계수가 0.7 이하의 비교적 낮은 상관관계를 보임으로서 재료물성치비가 초기 마찰계수에 직접적인 영향을 미친다고 할 수 없는 것으로 추정된다.

3-2. 정상상태(steady-state)의 마찰계수와 상대물성치비의 영향

상대적 물성치비와 정상상태(steady-state)의 마찰특

성을 보기 위하여, 초기 마찰계수측정과 별도로 정상상태에 도달한 마찰계수를 측정하였다. 실험에 사용된 시편의 조합은 앞서 Table 1에 제시한 바와 같으며, 미끄럼 거리는 마찰계수가 정상상태를 유지하는 150 m로 하였다. 실험결과는 3번의 실험결과를 평균한 것이다. 정상상태 실험의 경우 경도차가 매우 큰 시편은 실험조건으로 설정한 미끄럼 거리 150 m를 유지하기 어려워 시편조합의 수가 초기 마찰계수 때보다 적다.

Fig. 6은 정상상태 마찰계수를 친화비에 따라 분류하여 보여주고 있다.

Fig. 6에 의하면 초기 마찰계수의 결과와 같이 친화비에 대해 뚜렷한 경향성을 찾기 힘들다는 것을 알 수 있다. 정상상태에 이르렀을 때의 마찰현상은 연속적인 접촉으로 인한 마멸발생으로 새로운 표면이 생성되는 등 초기의 경우와는 달리 재료간의 직접적인 접촉이 발생할 확률이 높다. 또한 접촉온도의 상승 등으로 접촉하는 두 재료간의 응착이 촉진될 수 있다. 그러나 실험결과에 나타난 것처럼 두 재료의 상대 친화비에 대해서 지배적인 경향을 찾기 힘들다는 것은 정상상태에 이르러서도 친화비가 마찰현상의 직접적인 요인이 되지 못함을 의미한다.

정상상태 마찰계수를 경도비에 따라 재분류하여 나타내면 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에 의하면 초기 마찰계수(Fig. 3)와는 달리 지

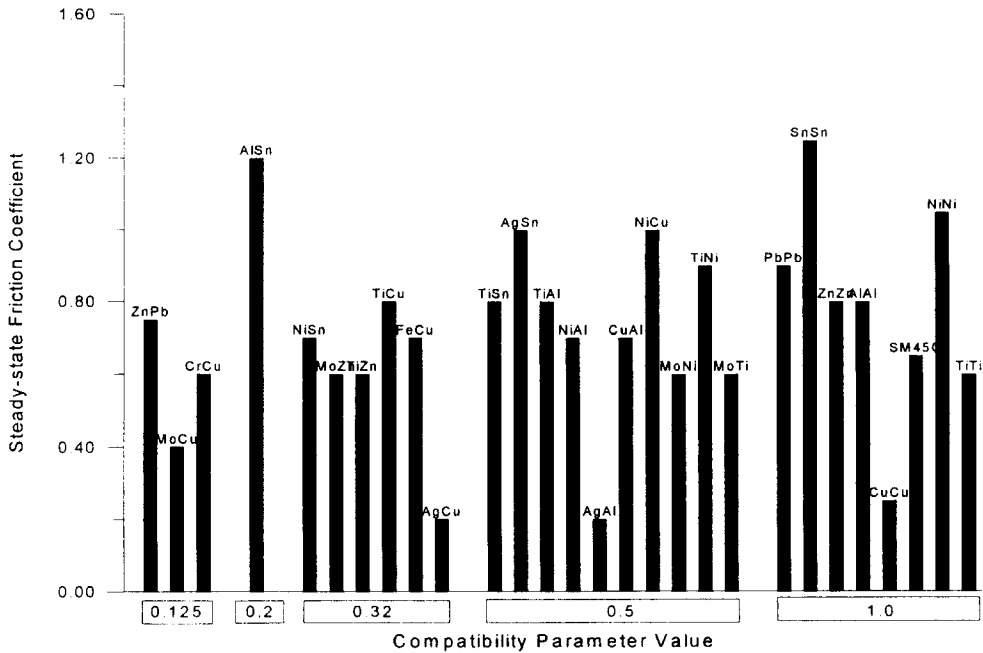


Fig. 6. Steady-state friction coefficient vs. compatibility parameter value.

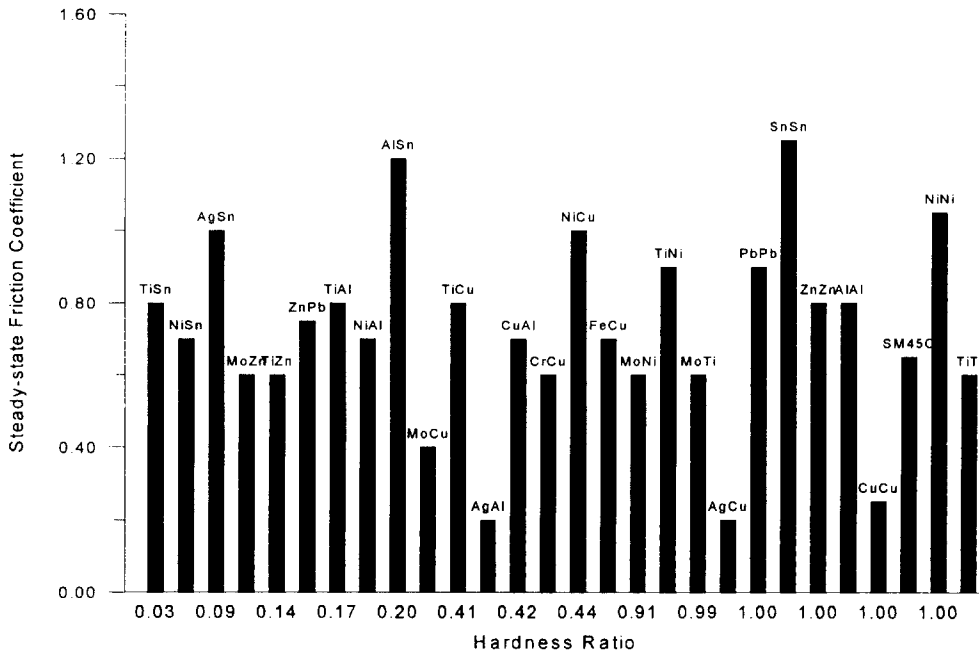


Fig. 7. Steady-state friction coefficient vs. hardness ratio.

배적인 경향을 찾기 힘들다. 또한 정상상태의 마찰계수는 초기 마찰계수에 비하여 증가된 결과를 보이는데 이는 접촉이 진행되는 과정에서 발생하는 마멸입

자의 출현, 온도의 증가, 산화 등의 영향이 복합적으로 작용하여 나타난 결과로 추정된다. 따라서 경도비나 친화비 등의 재료적 물성치로 마찰현상을 예측하

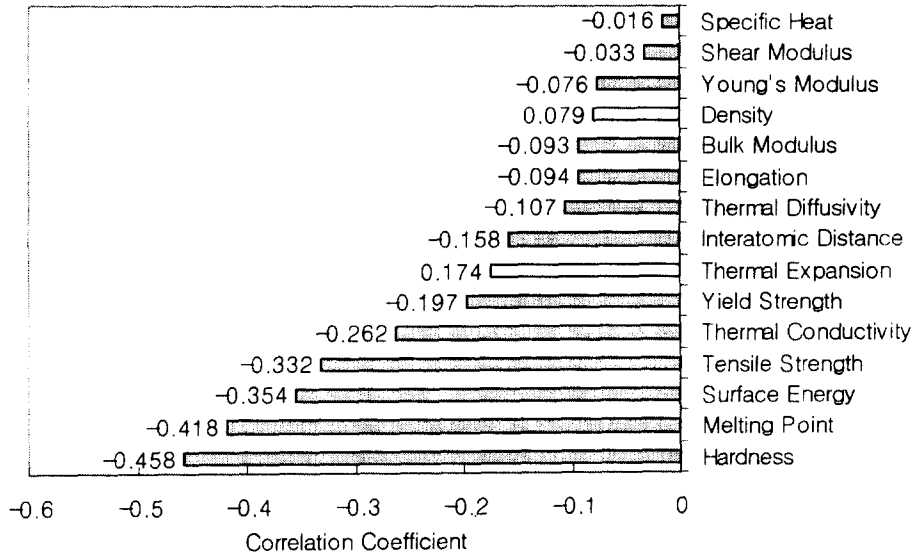


Fig. 8. Correlation coefficient between steady-state friction coefficient and material properties.

기에는 한계가 있음을 알 수 있다. Fig. 8은 정상상태 마찰계수와 각 재료물성치비와의 상관관계를 나타내고 있다. 초기 마찰계수(Fig. 5)와 비교하였을 때 비록 그 절대치는 작으나 열전도계수와 같은 열적물성치의 상관관계가 상대적으로 증가하였음을 알 수 있는데 접촉시 마찰면의 온도상승 등이 재료물성치 자체에 영향을 미칠뿐 아니라 산화현상 등의 현상을 촉진시키는 것으로 추정되나 이에 대해서는 향후 좀 더 정량적인 분석이 요구된다. 전반적으로 볼 때 초기 마찰계수때와는 달리 물성치와의 상관관계가 더 감소하였으므로(절대치 0.5이하) 재료물성치가 마찰계수의 지배적 인자라고 보기는 어렵다는 것을 알 수 있다.

한편 정상상태의 마찰계수에 대한 결과는 이전에 수많은 연구결과에서 제시되고 있으나[1, 2, 6, 13], 본 연구결과와는 다른 값을 보이고 있다. 이는 실험방법과 실험조건 및 주변환경 등이 다르다는데 원인이 있다고 생각된다. 예를 들어 일반적으로 많이 사용되는 pin-on-disk 장치는 한방향으로 마찰력이 작용한다. 본 연구에서 사용한 실험장치는 핀과 평판이 왕복운동을 행함으로써 마찰력이 양방향으로 작용하게 된다. 이러한 운동형태의 차이는 한방향 소성변형과 양방향 소성변형을 야기할 수 있다는 점에서 표면의 응력이력을 차별화시키킬 뿐만 아니라 마멸이 발생하여 마멸입자가 생성되었을 경우 접촉면에서의 마멸입자 뭉침현상이 한방향운동에서 관찰되기도 하는 등 여러

물리적현상이 상이하기 때문이다. 이와 같은 마찰재료 자체의 특성보다 외부적인 영향에 대해서는 앞으로 추가적인 많은 연구가 행해져야 할 것이다.

3-3. 마멸특성

일반적으로 마찰계수와 마멸특성은 특수한 경우 [13]를 제외하고 비례적 관계에 있는 것으로 알려져 있다. 마멸특성은 정상상태 도달후 평판시편의 마멸트랙을 측정하여 정량화하였다. 마멸특성은 단위 cycle당의 마멸체적을 나타내는 마멸률(wear rate)로서 계산하였으며, 평균 마멸트랙상의 임의의 점이 핀과 1mm씩 미끄럼 접촉하는 것을 1 cycle로 정의하였다. 마멸체적은 평균 마멸트랙을 3-4곳씩 측정하여 얻은 마멸된 부분의 평균단면적과 마멸트랙의 길이로부터 계산하였다. Fig. 9와 같이 마멸트랙의 surface profile로부터 평판의 트랙단면적을 계산하고 평판에 남겨진 마멸트랙의 길이 d를 구하여 이로부터 마멸체적을 산출하였다. Fig. 9에서 A_p 는 경현상에 의해 소성변형된 트랙의 단면적을 의미하며 A_s 는 마멸트랙의 단면적을 의미한다. 마멸체적은 A_p 와 A_s 의 차이로부터 트랙의 길이를 곱하여 산출하였으며 이는 실질적으로 재료가 제거된 마멸량을 의미한다. 마멸률은 마멸체적을 시편이 경험한 전체 접촉회수(cycle수)로 나눈 것이다.

Fig. 10는 마멸률을 경도비에 대해 도식화한 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이, 마멸률은 경도비에

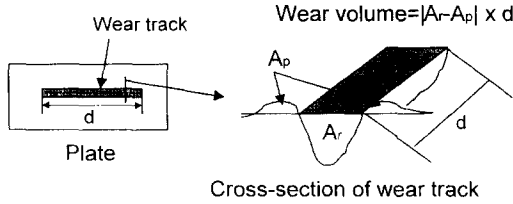


Fig. 9. Caculation of wear volume.

대해 별다른 상관성을 보이지 않는다. 매우 특이한 것은 Mo/Cu, Ag/Al, Ag/Cu, Cu/Cu 및 SM45C/SM45C의 재료조합에서 마멸률이 매우 직다는 점이다. 이들의 친화비를 살펴보면 Mo/Cu의 경우 0.125, Ag/Cu는 0.2, Ag/Cu는 0.5의 친화비계수를 나타내고 있으며 Cu 및 SM45C는 동일한 재료끼리의 조합이므로 높은 친화성을 나타낸다. 따라서 응착이론에서 중요시 하는 인자인 친화비가 정상상태에 이르러 마찰 마멸 현상에 영향을 미쳤다고 보기는 어렵다. 한편, 이들의 정상상태 마찰계수를 살펴보면 SM45C를 제외하고 공통적으로 0.4 이하의 낮은 값을 보이고 있다는 점에서 마멸현상이 마찰계수와 비례적 관계에 있다는 것을 간접적으로 유추할 수 있다. 즉, 마찰계수가 0.5 이하를 나타내는 재료조합의 경우 이들의 마멸률을 합산하여 평균을 취해보면 약 $1.01 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{cycle}$ 의 값을 보인다. 또한, 마찰계수가 0.5~0.6인 경우 평균마멸률은

$1.29 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{cycle}$, 마찰계수가 0.7이상인 경우 $1.3 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{cycle}$ 의 평균마멸률을 보이고 있어 한 차수씩 증가하는 경향을 보이고 있다.

Fig. 11에서는 측정된 정상상태 마찰계수와 마멸률과의 관계를 대수축으로 보여주고 있다. 마찰계수가 약 0.6인 경우를 기준으로 그보다 작은 마찰계수에서는 낮은 마멸률($1.01 \times 10^{-9} \text{ cm}^3/\text{cycle}$)을, 그 이상일 경우에는 높은 마멸률($3.0 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{cycle} \sim 4.0 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{cycle}$)을 나타낸다. 마찰계수가 0.6부근인 경우에는 비슷한 마찰계수에 대하여 최대마멸률과 최소마멸률간에 많은 차이를 보이고 있는데, 이들 재료조합을 살펴보면 경도비나 친화비가 제각각으로 나타나 물성치에 의한 영향과는 무관한 것으로 사료된다. 또한 0.6 이하의 저마찰계수에서 낮은 마멸률을 나타내는 경우의 재료조합과 고마찰계수에서 높은 마멸률을 나타내는 재료조합의 경우도 경도비나 친화비와는 큰 상관성을 발견할 수 없다. 그러나 전반적으로 높은 마찰계수에 대해서 높은 마멸이 발생함을 알 수 있다.

Fig. 12는 각종 재료물성치비와 마멸률과의 상관관계를 나타낸 것이다. 정상상태 마찰계수와 물성치와의 관계에서처럼 상관관계가 작은 것으로 나타났으며, 낮은 상관계수값에서 보이듯이, 물성치비가 정상상태 마찰계수 및 마멸률에 대해 어떤 일관된 경향을

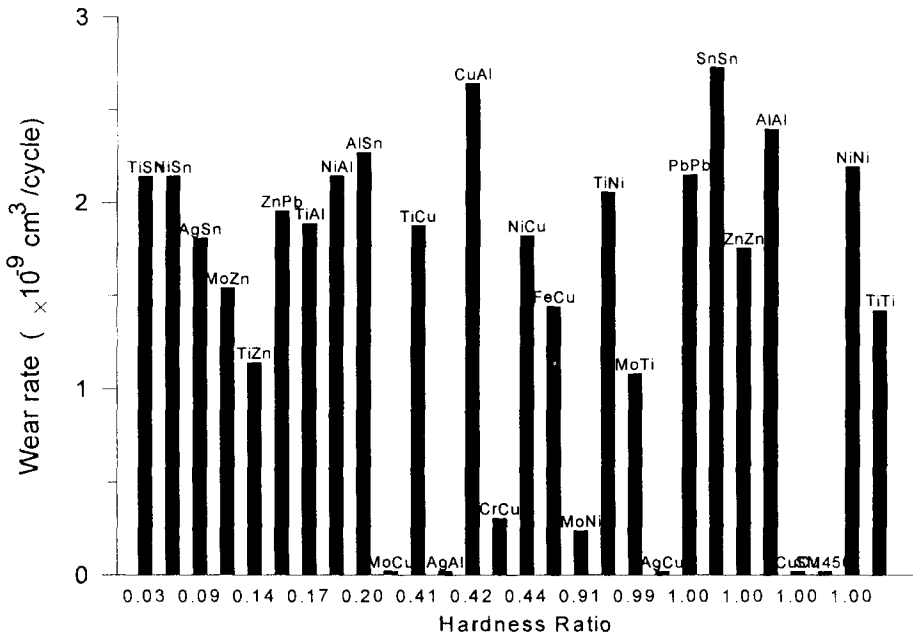


Fig. 10. Wear rate vs. hardness ratio.

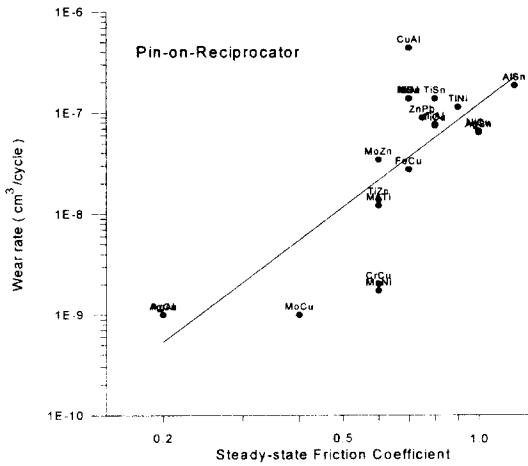


Fig. 11. Wear rate vs. steady-state friction coefficient.

나타내지는 않는 것으로 사료된다.

4. 고 찰

이상의 결과로부터 기계적 관점에서 마찰 마멸현상에 주요한 인자인 상대재료의 경도비는 초기 마찰계수에는 영향을 미치지만 정상상태 마찰계수 및 마멸 특성에는 지배적인 인자가 되지 못함이 밝혀졌다. 또한 화학적 관점, 응착력이론에서 중요시하는 상대친화성의 경우 초기 마찰특성은 물론 정상상태 마찰계수 및 마멸에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 이

는 마찰 마멸현상을 고려할 때 단순히 재료의 물성치만으로는 그 현상을 명확히 규명할 수 없으며 특히 본 연구에서와 같은 일반대기조건에서는 다른 물리적 현상, 예를 들면 마멸입자의 생성 및 그 역할, 접촉면의 온도변화, 온도변화에 따른 재료물성치의 변화, 접촉하는 재료간의 전이현상(material transfer) 등 복합적으로 발생하는 여러 요인을 함께 고려하여야 한다는 것을 말한다.

예를 들어 Sn나 Pb가 포함된 재료조합의 경우 모두 약 1.0 이상의 정상상태 마찰계수를 나타내는데, 이는 접촉이 진행되면서 생성된 마멸입자의 크기와 관련이 깊은 것으로 사료된다. 즉, 마멸이 진행되면서 연성이 강한 재료는 큰 마멸입자가 발생하는 반면 상대적으로 경한 재료는 미세한 입자가 발생하는 등 마멸이 진행되면서 발생하는 마멸입자의 크기가 차별화되며, 연성이 강한 재료의 경우 마멸입자가 서로 뭉치는 현상이 발생하여 마멸을 가속화시키고 마찰계수의 증가를 유발하는 것으로 추정된다. Oktay 등 [11]과 Sasada 등[14]에 의하면 마멸입자가 발생하면서 접촉면에 삽입되고 이러한 현상이 마멸을 가속화시키는 요인이 된다고 한다. 이외에도 온도, 습도와 같은 주변환경의 영향, 운동형태의 영향 등이 마찰 마멸에 영향을 미칠 수 있고 이러한 인자들이 윤활상태에서 어떠한 영향을 미치는지 또한 마찰 마멸의 중요한 과제가 될 것이다.

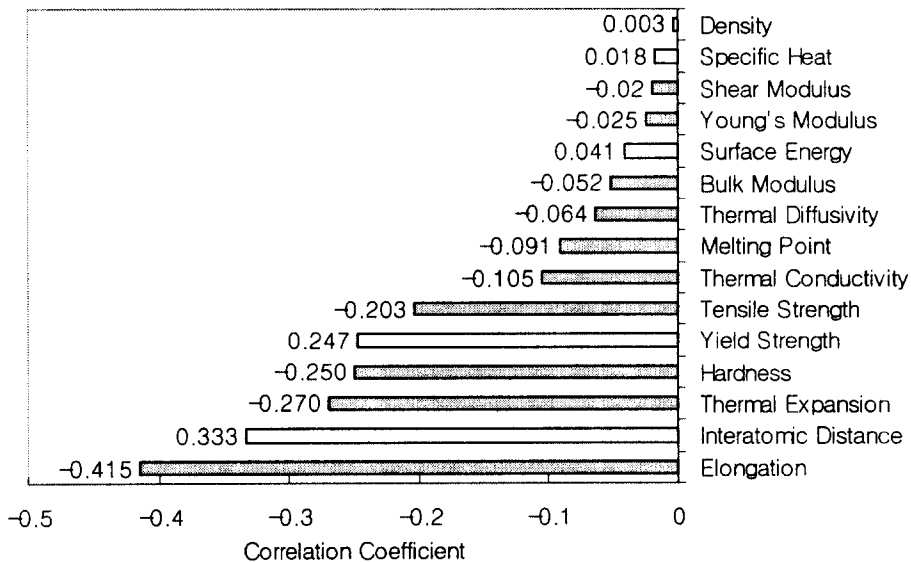


Fig. 12. Correlation coefficient between wear rate and material properties.

5. 결 론

본 연구에서는 재료의 물성치를 고려한 순수금속재료의 건조 마찰실험을 통하여, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 접촉하는 두 재료의 경도차가 작을 수록 초기 마찰계수는 대체로 작아지는 경향을 보인다. 따라서 재료의 상대적 경도비는 순수금속재료의 초기 마찰특성을 지배하는 인자임을 알 수 있다. 그러나 일반대기 상태에서 친화비는 초기 마찰계수에 큰 영향을 미치지 못한다.

2. 정상상태 마찰 마멸특성은 기존의 이론과는 달리 경도비 또는 친화비 중에 어느 인자도 마찰 및 마멸현상에 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 추정된다.

3. 연성이 강한 재료의 경우 대체적으로 높은 마멸률을 나타내며 이는 접촉시 발생하는 마멸입자와의 상호작용에 기인하는 것으로 사료된다. 따라서 향후 마멸입자의 영향에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 '95 핵심전문 연구과제 (과제번호 951-1009-055-2)의 연구비지원을 받아 수행된 연구의 결과로서 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Bowden, F. P., Tabor, D., *The Friction and Lubrication of Solids*, Clarendon Press, Oxford, 1954.
2. Rabinowicz, E., "The Role of Surface Energy in Adhesion in Metal Working," J. Inst. Met., Vol. 95,

pp. 321-326, 1967.

3. Rabinowicz, E., *Friction and Wear of Materials*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, INC., NewYork, 1995.
4. Rabinowicz, E., "Wear Coefficients-Metals," *Wear Control Handbook*, ASME, NewYork, pp. 475-506, 1980.
5. Rabinowicz, E., "The Determination of the Compatibility of Metals through Static Friction Test," *ASLE Trans.*, ASLE Vol. 14, pp. 198-205, 1971.
6. Suh, N. P., *Tribophysics*, Prentice-Hall, 1986.
7. Suh, N. P., Saka, N., "Surface Engineering," *Annals of the CIRP*, Vol. 36/1, pp. 403-408, 1977.
8. Kim, D. E., Suh, N. P., "On Microscopic Mechanism of Friction and Wear," *Wear*, Vol. 149, pp. 199-208, 1991.
9. Sin, H. C., Saka, N., and Suh, N. P., "Abrasive Wear Mechanisms and Grit size Effect," *Wear*, Vol. 55, pp. 163-190, 1979.
10. Tian, H., Saka, N., and Suh, N. P., "Boundary Lubrication Studies on Undulated Titanium Surfaces," *Tribology Transactions*, Vol. 32, pp. 289-296, 1989.
11. Oktay, S. T., Suh, N. P., "Wear Debris Formation and Agglomeration," *Journal of Tribology*, Vol. 114, pp. 379-393, 1992.
12. Buckley, D. H., "Definition and Effect of Chemical Properties of Surfaces in Friction, Wear, and Lubrication," in *Fundamentals of Tribology*, N.P.Suh and N. Saka, eds., MIT Press, 1980.
13. Blau, P., *Friction and Wear of Transitions of Materials*, Noyes Publication, New York, 1989.
14. Sasada, T., Norose, S., and Mishina, H., "The Behavior of Adhered Fragments Interposed Between Sliding Surfaces and the Formation Process of Wear Particles," *J. of Lubrication Technology*, Vol.103, pp. 195-202, 1981.