

디스크 언 디스크 시스템에서 경도에 따른 건식 마모거동

김정현*

(논문접수일 2004. 3. 22, 심사완료일 2004. 6. 15)

A dry wear behavior as hardness difference in a dual disc on disc sliding wear tests

Junghyun Kim*

Abstract

The wear behavior as the hardness of the sliding elements on the dry wear has been investigated using a disc on disc configuration. The materials of the specimens are used as ten kinds along their hardness. In this study, both upper and lower specimens have been used the same materials. Using experimental data, we figured the relationship between wear coefficient and friction coefficient, and the relationship between wear coefficient and friction temperature. Also we combined friction temperature and friction coefficient instead of wear coefficient. We substituted this into wear equation of Archard. The result had been derived a newly wear equation in disc on disc wear system.

Key Words : wear equation(마모 식), Wear coefficient(마모계수), friction coefficient(마찰계수), friction temperature(마찰온도)

1. 서론

산업이 발달됨에 따라 사용되는 기계들이 발전을 거듭하고 있다. 이러한 기계들은 상대적으로 움직이는 부분의 요소를 필수적으로 가지고 있다. 움직이는 부분은 마찰을 동반하지 않을 수 없다.

마찰은 재료의 성질이 아니라, 인접한 재료와 집합적으로 영향을 미치는 요소에 의하여 구성되어지는 복잡한 마찰 시스템의 성질로 알려져 있다. 일반적으로 마모 문제를 해결하는 연구들은 잘 알려진 물리적인 양과 재료의 마모 거동 사이에 비례하는 종속관계를 밝혀 왔었다. 많은 연구자들은 마모거동에서 중요한 변수인 재료의 경도와 마모

기구사이의 밀접한 관계를 발견해 왔었다⁽¹⁻⁴⁾. 그러나 재료의 기계적 성질 중 연성이나, 인성 등의 중요한 성질들과 마모 거동에서 중요한 요소로 알려진 마찰계수 및 마찰온도는 마모 식의 상수항에 포함되어 있는 실정이다.

마모모델을 살펴보면, 대표적인 모델로 Archard의 점착성 마모모델⁽¹⁾을 들 수 있다. 점착성 마모의 조건은 낮은 저항 압력에 변형되는 연한금속에서 특히 잘 일어난다고 알려져 있으며, 마모 식에서 마찰하는 두 물체의 경도 중 낮은 쪽을 사용하였다. 그러나 마찰하는 두 물체의 경도 차이에 따른 마모거동에 미치는 영향은 전혀 고려하지 않았다.

응착성(abrasive) 마모 모델로는 Halling의 응착성 마모

* 경일대학교 기계자동차학부 (jhk1775@hanmail.net)
주소: 712-701 경북 경산시 하양읍 부호리 33

모델⁽⁵⁾을 들 수 있으며, 마모저항과 재료의 경도사이 에 직접적으로 선형적 비례관계에 있다는 사실은 이미 잘 알려진 사실이다. 또한 서남표의 총상 마모모델⁽⁶⁾을 들 수 있다. 그들은 아주 작은 기구들을 사용하는 가정아래 얻어졌고, 어떤 식들은 간단하고 어떤 식들은 많은 매개변수를 포함한 매우 복잡한 식으로 표현되는 것도 있다.

실험시스템도 여러 가지로 시행되었다. Krause⁽²⁾는 카르 단 조인트(cardan joints)에 의하여 평면 미끄럼 실험시스템을 이용하여 재료의 경도가 마모거동에 미치는 영향을 규명하였고, So⁽⁷⁾는 핀 언 디스크 실험시스템을 이용하여 마모의 특성을 규명하였다. Hug와 Celis⁽⁸⁾는 볼 언 플레이트 마모시스템을 이용하여 상대습도에 따른 마모거동을 발표하였다. 이러한 실험시스템들을 구조상으로 보면, 어느 한쪽 시편의 마모가 많이 발생하는 반면에 어느 한쪽시편은 아주 미미한 마모가 발생한다.

또한 Bian⁽³⁾과 Rigney⁽⁴⁾는 핀과 링의 마모시스템을 이용하여 마모거동에서 경도의 역할을 규명하였다. Borland와 Bian⁽⁹⁾은 핀과 링의 마모 실험시스템을 이용하여 마모 식을 발전시켰다. 그러나 핀과 링 마모시스템에서는 핀은 많은 마모가 잃어나는 반면에 링은 아주 미미한 마모가 발생한다. 이 사실을 밝히기 위하여 Rice와 Wayne⁽¹⁰⁾은 핀과 링의 재질(Al과 Mg)을 바꾸어 가면서 마모실험을 하여 핀과 링의 역할을 규명하였다. 또한 핀은 온도가 많이 상승하고, 링은 온도가 적게 상승한다. 이 연구에서 핀과 링의 경도차이의 해결을 위하여 균형경도(equivalent hardness, $H_{eq} = H_{pin} + CH_{ring}$)를 제안하였고, 즉 균형경도는 핀의 경도에다가 링의 경도 값과 상수C와의 곱을 합한 것으로 나타내었다. 이것은 핀과 링의 경도차이의 영향과 핀은 계속 마찰하면서 열을 받아들이고, 링은 열을 받아들이는 부분은 마모 트랙의 어떤 한 부분이기 때문에 해석하였다.

두 물체 사이에 마찰을 일으킬 때 마모기구와 마모울에 영향을 미치는 요소는 많이 있다. 그러나 마모 식에 많은 요소들을 모두 고려한다는 것은 불가능한 일이다. 대부분의 연구자들은 소수의 마모요소를 고려하였고, 고려하지 못한 마찰계수, 마모온도, 실험환경 등의 요소를 마모계수라는 항목으로 처리하였다.

Archard⁽¹⁾의 마모 식을 보면,

$$V/L = \kappa (W/H)$$

여기서 V는 마모량이며, L은 미끄럼 길이이며, W는 수직 하중이고, H는 미끄럼재료 중의 한 개의 경도이며, κ 는 마

모계수이다. 마모 식에서 사용된 매개변수 외의 마찰계수, 마찰온도 마모환경 등의 다른 요소들은 모두 마모계수 κ 에 묻혀 버리게 되는 단점을 지녔다.

따라서 본 연구에서는 디스크 언 디스크 시스템을 사용하여, 위 시편과 아래 시편의 균일한 마모를 유도하였으며, 불균형적인 열의 흡수를 지양하였다. 또한 위 시편과 아래 시편을 같은 재질과 같은 경도 값을 가진 시편으로 실험하여, 위 시편과 아래 시편의 경도 차이에 따른 마모거동의 영향을 배제하였다. 마모 식은 Archard의 식을 기본으로 하였으며, 실험 데이터를 이용하여 마모계수와 마찰계수와의 관계를 규명하였고, 마모계수와 마찰온도와의 관계를 규명하였다. 또한 마찰계수와 마모계수와의 관계, 마찰온도와 마모계수와의 관계를 조합하여 마모계수 κ 를 마찰계수와 마찰온도의 함수로 나타내었다. 이 항을 이용하여 Archard의 마모 식의 κ 항에 마찰계수와 마찰온도를 참가시켜 마모 식을 개선하였다.

2. 실험 방법

마모 실험을 위한 시편의 재료와 재료의 특성을 Table 1에 나타내었다. 다양한 경도를 가진 재료들의 실험을 위하여 순수 금속 재료들과 열처리한 재료들을 사용하였다. 시편은 비커스 경도(HV10) 100부근에서 400부근까지 균일하게 분포될 수 있도록 10가지 재료를 선정하였다. 부드러운 재료인 구리(96)로 제작한 시편부터, 연강을 500℃에서 어닐링 열처리한 시편(123), 경강을 500℃에서 어닐링 열

Table 1 Material characterization

Material	Hardness (HV10)	Density (kg/cm ³)
1 Copper	96	8.81
2 Annealed Mild Steel(500℃)	123	7.63
3 Annealed Hard Steel(500℃)	141	7.70
4 Aluminum	186	2.70
5 Brass	234	8.25
6 Aluminum Bronze	294	8.05
7 Stainless Steel	327	8.03
8 Annealed Mild Steel(300℃)	345	7.51
9 Mild Steel	372	7.87
10 Hard Steel	434	7.93



Fig. 1 Schematic diagram of disc-on-disc configuration

처리한 시편(141), 알루미늄 시편(186), 황동 시편(234), 알루미늄 청동시편(294), 스테인레스 강 시편(327), 300℃에서 어닐링 열처리한 연강시편(345), 연강 시편(372), 경강 시편(434) 등 위, 아래 시편으로 각각 준비하였다.

시편은 위 시편과 아래 시편의 크기를 같게 제작하였으며, 외경이 31.62mm, 내경이 15.91mm이고, 접촉면적은 586.45mm²이다. Fig. 1은 마모시편이 장착된 트라이보 머신으로서 디스크 언 디스크 시스템을 나타낸다. ①은 위 시편을 나타내고, 주축으로부터 동력을 받아서 회전운동을 할 수 있도록 되어 있다. ②는 아래 시편으로서 아래 원형 테이블에 고정되어 있고, 하중장치에 의하여 필요한 하중을 위로 받쳐주는 역할을 한다. 또한 마찰계수를 측정하기 위한 센서가 원형테이블 아래에 장착되어 있어서 마모 실험을 할 때에 마찰계수를 측정할 수 있도록 되어 있다. ③은 열전도 대로서 아래시편에 마찰되는 면 아래에 심어져 있으며, 마모 실험을 할 때에 마찰열을 측정할 수 있다.

마모된 무게를 측정하기 위하여, 0.1mg의 정밀도를 지닌 디지털 저울(digital scale)을 이용하였다. 마모실험 전 후에 시편의 무게를 측정하여 닳은 마모무게를 계산하였으며, 시편재질의 밀도를 고려하여 마모 부피를 계산하였다.

마모실험조건은 예비실험을 통하여 트라이보 머신의 용

량과 시편들의 재질을 고려하여 3조건으로 선정하였다. 특히 접촉조건 중 상대습도와 실내온도는 마모실험에 큰 영향을 미치므로⁽⁸⁾, 마모실험에 미치는 영향을 배제하기 위하여 실험실내 온도를 20℃, 습도를 65%로 유지하였다.

마모실험 전에 시편의 표면조도를 일정하게(4.84μm) 평면 연삭기로 연마하여 사용하였으며, 마모실험 후 마모트랙의 표면 거칠기를 알아보기 위하여 광학적 3차원 표면 조도기를 이용하여 표면조도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 재료경도의 영향

사용될 시편의 경도는 측정하기가 쉽고 간접적이기는 하지만 경도가 마모저항의 특성을 결정하는데 있어 중요한 역할을 한다고 알려져 있다. 파괴 인성처럼 파손저항에 관여하는 유연성 등의 변수들은 마모 역학에 있어 중요한 역할을 하는 것으로 수시로 언급되어져 왔다. 그러나 그러한 특성들과 마모율간의 직접적인 상호관계를 밝혀내고자 하는 시도는 얼마 되지 않았다.

경도의 역할은 최근 Rigney⁽⁴⁾에 의해 재차 확립되었다. 단단하지 않은 두 물질이 다른 하나에 엿물러 마찰할 때에 일반 경도는 마모 식에서 사용되기 그리 적당한 값이라 보기는 어렵다. 예를 들어, Kalousek⁽¹¹⁾은 거의 완전 마모된 martensite 강철표면의 높은 경도 값을 찾아내었고 이 보다 높은 경도가 마모저항에 관여될 수 있다는 것 또한 밝혀내었다. 따라서 사용될 경도는 측정하기 어려울지 모르지만 이상적으로는 마모과정 중의 경도가 되어야 할 것이다. Rigney가 강조해 왔듯이 한 면 또는 양면으로 진행되는 대부분의 마모과정 중에는 극 미립자의 기계적 융합으로 이루어진 이동층, 혹은 마모층이 있다는 것이 인지되어야 한다.

핀 언 링의 마모 실험에서는 어느 시편이 핀으로 사용되고, 어느 시편이 링으로 사용 되었느냐가 실험 결과에 영향을 끼친다. 핀과 링의 재질이 반전되었을 경우 또 다른 실험 결과가 양산되기 때문이다⁽¹⁰⁾. 그러나 디스크 언 디스크 마모실험에서는 위 시편과 아래 시편의 크기가 같고, 위 시편이 움직이고, 고정된 아래 시편은 반작용의 비틀림 응력을 받으면서 마찰이 이루어지기 때문에 위 시편과 아래 시편의 마모량이 비슷하게 나타난다. 이 실험의 결과는 참고문헌⁽²⁾에 잘 나타나 있기 때문에 여기서는 생략하였다. 경도가 낮은 재료(HV10: 100부근의 시편)의 실험에서는 위 시편의 재료가 아래 시편의 재료 보다 약간 많이 닳고⁽²⁾, 그 이상의

재료들의 마모량은 위 시편과 아래 시편의 마모량이 비슷하였다.

Table 2는 마모실험의 결과를 나타내었다. 10개의 시편으로 3가지의 실험조건으로 마모실험을 하여서 총 30항목으로 나열하였다. 여기서 하중은 4.53Kg(10lb), 9.06Kg(20lb)으로 실험하였고, 마모속도는 12.443Cm S^{-1} (100rpm), 24.886Cm S^{-1} (200rpm)로 실험하였다.

마찰계수 및 마찰온도는 실험데이터 중 평균값을 취하여 기록하였다. 마모율은 마모체적과 미끄럼거리를 사용하여 계산하여 나타내었고, 마모계수는 실험데이터를 Archard의 마모 식에 대입하여 계산하여 나타내었다. 마모실험 후 마

모 트랙의 표면조도는 광학적 3차원 표면 조도기로 측정하여 나타내었다.

Fig. 2는 재료 경도의 증가에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었다. 재료의 경도가 커짐에 따라 마찰계수는 강하게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이 그림에서 다소 흩어진 데이터가 있긴 하지만 대체적으로 선형적인 관계를 보여주고 있다. Fig. 3은 재료의 경도 크기에 따른 마찰온도와와의 관계를 나타내었다. 경도의 증가에 따라 마찰온도는 점차 선형적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 4는 재료의 경도 증가에 따른 마모율(V/L)의 변화를 나타내었다. 재료의 경도 증가에 따라 마모율은 감소하는 경향을 나타내고

Table 2 Results of wear tests

No.	H _{up} (HV/10)	H _{lo} (HV/10)	Load W (kg)	Speed V (cm s ⁻¹)	Wear rate V/L (cm ³ cm ⁻¹ 10 ⁻⁷)	Calculated Wear Coefficient(× 10 ⁻⁶)	Ra (μm)	Measured Temperature(°C)	Measured Friction Coefficient
1	96	96	4.53	12.44	35.67	75.59	23.73	41.9	0.947
2	123	123	4.53	12.44	19.62	53.26	20.10	40.6	0.777
3	141	141	4.53	12.44	25.19	39.21	19.13	39.0	0.732
4	186	186	4.53	12.44	8.68	35.66	9.77	38.9	0.727
5	234	234	4.53	12.44	6.24	32.24	8.52	38.6	0.676
6	294	294	4.53	12.44	4.12	26.75	7.97	38.1	0.669
7	327	327	4.53	12.44	4.00	28.91	7.27	37.3	0.636
8	345	345	4.53	12.44	2.53	19.04	7.00	35.2	0.553
9	372	372	4.53	12.44	1.61	12.24	6.85	34.8	0.420
10	434	434	4.53	12.44	0.13	1.20	6.24	33.9	0.316
11	96	96	4.53	24.88	34.22	72.52		54.4	0.894
12	123	123	4.53	24.88	18.37	49.87		47.9	0.684
13	141	141	4.53	24.88	6.54	40.72		46.7	0.667
14	186	186	4.53	24.88	9.73	39.95		46.7	0.665
15	234	234	4.53	24.88	6.93	35.77		44.8	0.667
16	294	294	4.53	24.88	4.40	28.53		43.7	0.627
17	327	327	4.53	24.88	3.43	24.78		43.6	0.592
18	345	345	4.53	24.88	2.73	20.78		43.5	0.450
19	372	372	4.53	24.88	0.87	7.15		42.2	0.283
20	434	434	4.53	24.88	0.19	1.84		35.0	0.309
21	96	96	9.06	12.44	74.28	78.71		53.9	0.904
22	123	123	9.06	12.44	41.43	56.25		49.1	0.759
23	141	141	9.06	12.44	27.95	43.50		47.5	0.723
24	186	186	9.06	12.44	20.02	41.11		46.2	0.700
25	234	234	9.06	12.44	14.04	36.25		45.7	0.652
26	294	294	9.06	12.44	9.63	31.25		44.1	0.640
27	327	327	9.06	12.44	9.21	33.24		43.9	0.606
28	345	345	9.06	12.44	3.33	12.68		41.7	0.506
29	372	372	9.06	12.44	2.96	12.14		38.7	0.326
30	434	434	9.06	12.44	2.23	1.07		37.8	0.272

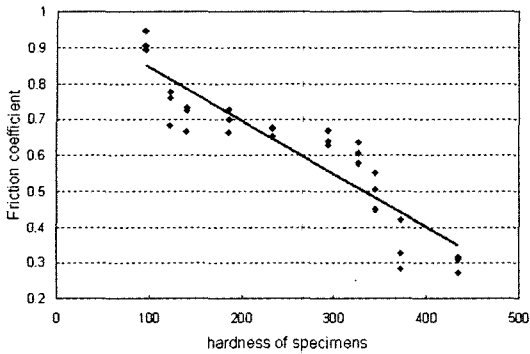


Fig. 2 The variation of the friction coefficient as hardness of specimens

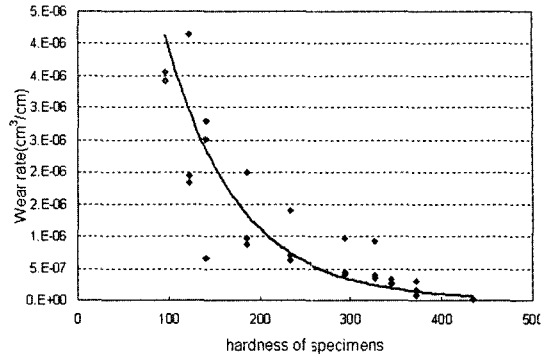


Fig. 4 The wear rate plotted against the hardness of specimens, H_{MIN} , where $H_{mean} = (H_{UP} + H_{LOW})/2$

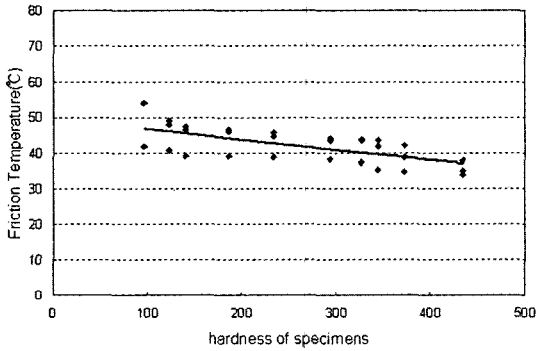


Fig. 3 The variation of the friction temperature as hardness of specimens

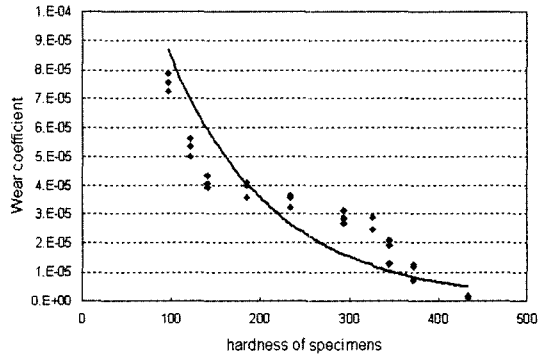


Fig. 5 The wear coefficient plotted against the hardness of specimens

있다. 이들의 결과는 일반적인 경향과 같았다.

Fig. 5는 재료의 경도변화에 따른 마모계수(K)의 변화를 나타내었다. 이 그림에서 재료의 경도 증가에 따른 마모계수는 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 역시 일반적인 경향을 나타내고 있다.

3.2 표면조도와 마모율의 영향

Kalousek⁽¹¹⁾ 등은 마모시험편의 조직을 퍼얼라이트(pearlite), 베이나이트(bainite), 마르텐사이트(martensite)로 열처리하여 높은 경도의 마모 시험편을 준비한 후 마모시험에 의하여 마모저항과 마모 표면형상에 대하여 연구하였다. Kato⁽¹²⁾는 미시적 마모기구라는 연구에서 마모 파편의 수와 크기에 따라 분류하고, SEM을 이용하여 점착성 마모에서 가공형(cutting), 췌기형(Wedge), 경작형(ploughing)으로 분류하였다.

Godet⁽¹³⁾은 마모율의 결정에 영향을 끼치는 변수를 내재한 'third body'라 부르는 층에 이목을 집중시켜왔다. Godet은 소성 유동의 파편 발생 역학을 주시함으로써 third body의 소성 특성에 관심을 나타내었지만 앞뒤 상황을 따졌을 때 우리는 해당 층의 경도가 무시되어서는 안 된다는 정도만 알 수 있을 뿐이었다. 접촉영역에서 조건들은 마모에서 직접적인 효과를 가져다 줄 것으로 믿는다. 이러한 조건들은 시편표면에서 재료의 성질, 온도, 표면의 형상 과 응력 상태 등을 포함한다.

Fig. 6은 마모율과 마찰온도와의 관계를 나타낸다. 마모율이 증가함에 따라 온도가 증가하는 경향을 나타낸다. 마모율과 접촉조건의 측정들 사이에 관계들은 이 그림에 의하여 제시되었다. 특히 마모율이 1.0E-06을 지나면서 마찰온도는 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 조건에서 마모율의 값 1.0E-06은 평탄 마모와 과대 마모의 경계 값으

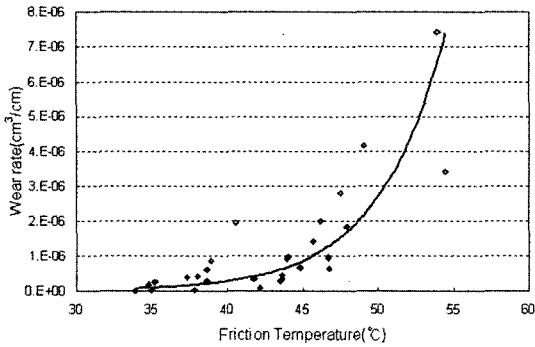


Fig. 6 Relationships between the rate of wear and the friction temperature

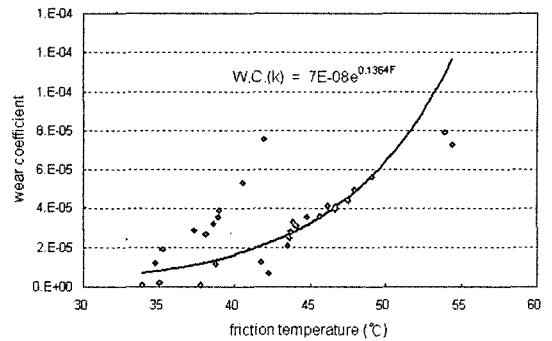


Fig. 8 The wear coefficient plotted against the friction temperature

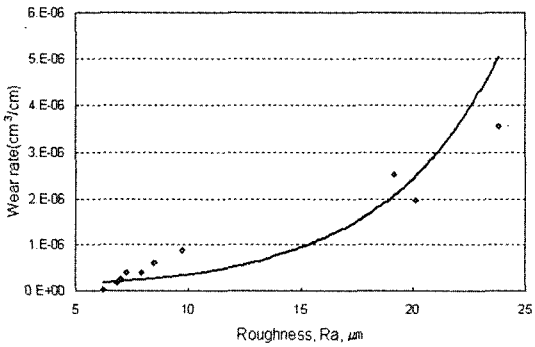


Fig. 7 Relationships between the rate of wear and the roughness of the wear track

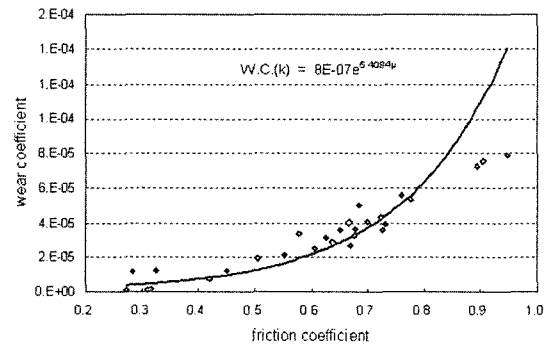


Fig. 9 The wear coefficient plotted against the friction coefficient

로 볼 수 있다. Fig. 7은 실험 후 마모 트랙의 표면 조도와 마모율의 관계를 나타낸다. 마모율이 증가함에 따라 마모트랙의 표면 조도는 거칠게 나타난다. 이 그림에서도 마모율이 1.0E-06을 지나면서 마모 트랙의 표면조도는 급격하게 거칠어지는 것을 볼 수 있다⁽¹⁴⁾. 마모과정 중에 발생하는 마모트랙의 표면조도와 마찰온도는 아주 밀접한 관계를 가지고 있음을 보여 준다.

3.3 마찰온도와 마찰계수의 영향

마찰열은 “열과 열역학에서 논의되고 있지만” 미끄럼조건의 마찰공학의 거동에서 대단히 중요한 영향을 미친다고 할 수 있다. 특히 마찰열은 거시적인 마모실험 조건(하중, 속도, 재료의 경도)은 물론이요, 미시적인 접촉조건(표면 층의 구조와 성질) 및 실험환경 조건에도 큰 영향을 받는다⁽¹⁴⁾. 또한 마찰 온도는 금속성분의 마모손상에 현저한 영향

을 미친다. 거기에는 주위의 온도가 증가했다가 감소하는 즉, 평탄 마모와 과대 마모로 구별할 수 있는 천이구역이 존재한다⁽¹⁵⁾. 앞에서 언급했듯이 Fig. 6에서 마모율이 1.0E-06을 지나면서 마찰온도는 급격히 상승하는 것을 볼 수가 있었다. 이와 같은 조건에서 마모율의 값 1.0E-06은 평탄마모와 과대마모의 경계 값으로 볼 수 있다. Fig. 8은 Table 2의 마모계수(k)와 마찰온도와의 관계를 나타내었다. 마모 식에서 마모계수 k 는 1보다 작으며, 종종 1보다도 현저하게 작을 때도 있다. 또한 마모계수는 다양한 방법으로 표현되어져 왔다. 마모계수는 요철 접촉이 마모 입자를 발생시킬 확률로, 요철이 많은 마모 입자의 영역으로서, 체적변형에 많은 체적의 비로써, 하중 주기의 임계 수에 역 비례하는 요소로서, 발생하는 마모입자에 관계없는 요소로서 나타내어졌다⁽⁴⁾.

Fig. 8에서 마모계수가 증가함에 따라 마찰온도는 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 추세선(curve fitting)을 적용

하여 마모계수와 마찰온도와의 관계를 나타내면 아래 식과 같다.

$$W.C(\kappa) = 7.0E-08e^{(0.1364F)} \quad (2)$$

여기서 F는 마찰온도(°C)를 나타낸다. 식 (2)는 마모계수 κ 를 마찰온도 F의 함수로 표현된 것이다. 이것은 κ 에 묻혀 있던 여러 변수 중 마찰온도를 나타낸 것이다.

마찰계수는 단위하중 당 마찰저항이다. 마찰계수는 마찰온도와 같이 거시적인 마모실험 조건(하중, 속도, 재료의 경도)은 물론이고, 미시적인 접촉조건(표면층의 구조와 성질) 및 실험환경 조건에도 큰 영향을 받는다⁽¹⁴⁾. Fig. 9는 Table 2의 마모계수(κ)와 마찰계수와의 관계를 나타내었다. 마모계수가 증가함에 따라 마찰계수는 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 추세선(curve fitting)을 적용하여 마모계수와 마찰계수와의 관계를 나타내면 아래 식과 같다.

$$W.C(\kappa) = 8.0E-07e^{(5.4084\mu)} \quad (3)$$

여기서 μ 는 마찰계수를 나타낸다. 식 (3)은 마모계수 κ 를 마찰계수 μ 의 함수로 표현된 것이다. 이것은 κ 에 묻혀있던 여러 변수 중 마찰계수 μ 를 나타낸 것이다.

식 (2)와 식 (3)을 조합하면 식 (4)로 표현 할 수 있다.

$$W.C(\kappa) = [3.5E-08e^{(0.1364F)}+4.0E-07e^{(5.4084\mu)}] \quad (4)$$

식 (4)는 마모계수 κ 를 마찰온도 F와 마찰계수 μ 의 조합으로 표현한 것이다. 즉 이것은 κ 에 묻혀있던 여러 변수 중 마찰온도 F와 마찰계수 μ 의 함수로 나타내었다. 즉 마모계수 κ 에 마찰온도와 마찰계수의 공헌정도를 나타낸다고 볼 수 있다. 식 (4)를 이용하여 Archard의 마모 식에 마모계수 κ 대신에 대입하면, 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$V/L = [3.5E-08e^{(0.1364F)}+4.0E-07e^{(5.4084\mu)}](W/H) \quad (5)$$

식 (5)는 마모 식에 미시적인 접촉조건 중 마찰온도와 마찰계수를 참가시킨 새로운 마모 식으로 제안한다. 가상적인 데이터 및 마모조건을 대입하여 마모율 혹은 마모체적의 예측에 사용될 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

경도가 다른 10가지의 마모 시험재료를 선정하였고, 디스크 언 디스크 마모시스템으로 마모실험을 하여 마모무게

(loss weight), 마찰계수, 마찰온도를 측정하였다. 이 데이터를 분석 및 응용한 결과는 아래와 같다.

- (1) 마모율 1.0E-06은 마모 면의 표면조도와 마찰온도를 급격히 상승시키는 지점으로 평탄 마모와 과대 마모의 경계 값으로 제안한다.
- (2) 마찰계수와 마모계수와의 관계를 규명하였다.
- (3) 마찰온도와 마모계수와의 관계를 규명하였다.
- (4) 마찰온도와 마찰계수를 참가시킨 새로운 마모식을 제안한다.

후기

이 논문은 2003년도 경일대학교 교원 연구년제 해외파견 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

- (1) Archard, J. F., 1953, "Contact and rubbing of flat surfaces," *Journal of applied physics*, Vol. 24, No. 8. pp. 981~988.
- (2) Krause, H., and Tackenberg, W., 1980, "The influence of hardness difference on the frictional and wear behaviour of steel/copper alloy pairs in plane sliding friction under mixed friction conditions," *Wear*, Vol. 64, pp. 291~302.
- (3) Bian, S., Maj, S., and Borland, D. W., 1993, "The unlubricated sliding wear of steels: the role of the hardness of the friction pair," *Wear*, Vol. 166, pp. 1~5.
- (4) Rigney, D. A., 1994, "The roles of hardness in the sliding behavior of materials," *Wear*, Vol. 175, pp. 63~69.
- (5) Arnell, R. D., Davies, P. B., Halling, J., and Whomes, T. L., 1991, *Tribology principles and Design Applications*, Macmillan, London, chapter 3.
- (6) Suh, N. P., 1896, *Tribophysics*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- (7) So, H., 1996, "Characteristics of wear results tested by pin-on-disc at moderate to high speeds," *Tribology international*, Vol. 29, pp. 415~423.

- (8) Hug, M. Z., and Celis, J. P., 2002, "Expressing wear rate in sliding contacts on dissipater energy," *Wear*, Vol. 252, pp. 375~383.
- (9) Borland, D. W., and Bian, S., 1997, "Unlubricated sliding wear of steels: towards an alternative wear equation," *Wear*, Vol. 209, pp. 171~178.
- (10) Rice, L. S. and Wayne, S. F., 1983, "Specimen material reversal in pin-on-disc Tribotesting," *Wear*, Vol. 88, pp. 85~92.
- (11) Kalousek, J., Fegredo, D. M., and Laufer, E. E., 1985, "The wear resistance and worn metallography of pearlite, bainite and tempered martensite rail steel microstructures of high hardness," *Wear*, Vol. 105, pp. 199~222.
- (12) Kato, K., 1992, "Micro-mechanisms of wear-wear modes," *Wear*, Vol. 153, pp. 277~295.
- (13) Godet, M., 1990, "Third-bodies in tribology," *Wear*, Vol. 136, pp. 29~45.
- (14) Wang, Y., Li, X. D., and Feng, Z., 1995, "The relationship between the product of load and sliding speed with friction temperature and sliding wear of a 52100 steel," *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 33, No. 7, pp. 1163~1168.
- (15) Stott, F. H. 2002, "High-temperature sliding wear of metals," *Tribology International*, Vol. 35, pp. 489~495.