

판스프링을 사용한 마모실험에서 마찰계수와 마찰온도를 고려한 마모식의 개선

김정현[#]

Development of Wear Equation according to Friction Coefficient and Temperature using a Dual Leaf-Spring in the Sliding Test

Jung-Hyun Kim[#]

ABSTRACT

The wear behavior as the hardness of the sliding elements on the dry wear has been investigated using a dual leaf-spring. 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 using dual leaf-spring wear system.

Key Words : Dual Leaf-spring(이중 판스프링), Wear Equation(마모 식), Wear Coefficient(마모계수), Friction Coefficient(마찰계수), Friction Temperature(마찰온도)

1. 서 론

자동차의 제동장치나 각종 기계들의 상대적으로 움직이는 부분들은 마찰을 동반하지 않을 수 없다.

마찰은 재료의 성질이 아니라, 인접한 재료와 집합적으로 영향을 미치는 요소에 의하여 구성되어지는 복잡한 마찰 시스템의 성질로 알려져 있다.

따라서 많은 연구자들은 마찰과 마모에 대하여 연구를 거듭하였고, 일반적으로 마모 문제를 해결하는

연구들은 잘 알려진 물리적인 양과 재료의 마모거동 사이에 비례하는 종속관계를 밝혀 왔었다^[1~4].

또한 이들은 일정한 하중이 작용하는 상태에서 마모거동에 대한 연구를 하였고, 선박의 스크류 축이나 자동차의 차륜 축 등 수밀, 기밀을 필요로 하는 스프링으로 지지된 채 작동하는 마모거동에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서 판스프링을 사용하여서, 스프링으로 지지된 채 마모실험을 시도 하게 된 동기이다.

마모모델을 살펴보면, 대표적인 모델로 Archard의 점착성 마모모델^[1]을 들 수 있다. 점착성 마모의 조건

[#] 교신저자 : 경일대학교 기계자동차학부
E-mail : jhk17751@hanmail.net

은 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 마모모델^[5]을 들 수 있으며, 마모저항과 재료의 경도 사이에 직접적으로 선형적 비례관계에 있다는 사실은 이미 잘 알려진 사실이다. 또한 서남표의 층상 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 카르단 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 한쪽시편의 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 마모 시스템에서는 핀은 많은 마모가 잃어나는 반면에 링은 아주 미미한 마모가 발생한다. 이 사실을 밝히기 위하여 Rice와 Wayne^[10]은 핀과 링의 재질(Al 과 Mg)을 바꾸어 가면서 마모실험을 하여 핀과 링의 역할을 규명하였다.

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^[11]의 마모 식을 보면,

$$V/L = k (W/H) \quad (1)$$

여기서 V 는 마모량이며, L 은 미끄럼 거리이며, W 는 수직하중이고, H 는 미끄럼재료 중의 한 개의 경도이며, k 는 마모계수이다. 마모 식에서 사용된 매개변수 외의 마찰계수, 마찰온도 마모환경 등의 다른 요소들은 모두 마모계수 k 에 묻혀 버리게 되는 단점을 지녔다.

따라서 본 연구에서는 디스크 언 디스크 시스템에서 판스프링을 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 k 를 마찰계수와 마찰온도의 함수로 나타내었다. 이 항을 이용하여 Archard의 마모 식의 k 항에 마찰계수와 마찰온도를 첨가시켜 마모 식을 개선하였다.

2. 실험 방법

마모 실험을 위한 시편의 재료와 재료의 특성을 Table 1에 나타내었다. 다양한 경도를 가진 재료들의 실험을 위하여 다양한 금속재료들과 열처리한 재료들을 사용하였다. 시편은 비커스 경도(Hv10) 100부근에서 400부근까지 균일하게 분포될 수 있도록 10가지 재료를 선정하였다. 시편은 위 시편과 아래시편의 크기를 같게 제작하였으며, 외경이 31.62mm, 내경이 15.91mm이고, 접촉면적은 586.45mm² 이다.

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. 1은 마모시편이 장착된 트라이보 머신으로서 판스프링이 장착된 디스크 언 디스크 시스템을 나타낸다. ①은 판스프링을 나타내며, 주축과 위 시편 사이에 장착되어 스프링역할을 하면서 동력을 전달한다. ②는 위 시편을 나타내고, 판스프링 지그로부터 동력을 받아서 회전운동을 할 수 있도록 되어 있다.



Fig. 1 Experimental set-up

③은 아래 시편으로서 아래 원형 테이블에 고정되

어 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. ④는 열전대로서 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 용량과 시편들의 재질을 고려하여 3조건으로 선정하였다. 특히 접촉조건 중 상대습도와 실내온도는 마모실험에 큰 영향을 미치므로⁸⁾, 마모실험에 미치는 영향을 배제하기 위하여 실험실내 온도를 20℃, 습도를 65%로 유지하였다. 마모실험 전에 시편의 표면조도를 일정하게(Ra: 4.84μm)평면 연삭기로 연마하여 사용하였다.

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 인성 처럼 파손저항에 관여하는 유연성 등의 변수들은 마모 역학에 있어 중요한 역할을 하는 것으로 수시로 언급되어져 왔다.

그러나 그러한 특성들과 마모율간의 직접적인 상호 관계를 밝혀내고자 하는 시도는 얼마 되지 않았다. 경도의 역할은 최근 Rigney¹⁴⁾에 의해 재차 확립되었다. 단단하지 않은 두 물질이 다른 하나에 맞닿아 마찰할 때에 일반 경도는 마모 식에서 사용되기 그리 적당한 값이라 보기는 어렵다. 예를 들어, Kalousek¹¹⁾은 거의 완전 마모된 martensite 강철표면의 높은 경도 값을 찾아내었고 이 보다 높은 경도가 마모저항에 관여될 수 있다는 것 또한 밝혀내었다. 따라서 사용

될 정도는 측정하기 어려울지 모르지만 이상적으로는 마모과정 중의 경도가 되어야 할 것이다. Rigney가 강조해 왔듯이 한 면 또는 양면으로 진행되는 대부분의 마모 과정 중에는 극 미립자의 기계적 융합으로 이루어진 이동 층, 혹은 마모층이 있다는 것이 인지되어야 한다. Table 2는 실험결과를 나타낸 것이다.

경도 값이 작은 재료(Hv10: 100부근의 시편)의 실험에서는 위 시편이 아래시편 보다 마모량이 크고^[2], 그 이상의 재료들의 마모량은 위 시편과 아래 시편의

마모량이 비슷하였다. 10개의 시편으로 3가지의 실험 조건으로 마모실험을 하여서 총 30항목으로 나열하였다. 여기서 하중은 4.53Kg(10lb), 9.06Kg(20lb)으로 실험하였고, 마모속도는 12.443 Cm S^{-1} (100rpm), 24.886 Cm S^{-1} (200rpm)로 실험하였다.

마찰계수 및 마찰온도는 실험데이터 중 평균값을 취하여 기록하였다. 마모율은 마모체적과 미끄럼거리를 사용하여 계산하여 나타내었고, 마모계수는 실험 데이터를 Archard의 마모 식에 대입하여 계산하였다.

Table 2 Results of wear tests

No.	H _{UP} (Hv/10)	H _{LO} (Hv/10)	Load W (kg)	Speed V (cms ⁻¹)	Wear rate V/L (cm ³ cm ⁻¹ ×10 ⁻⁷)	Calculated Wear Coefficient (×10 ⁻⁶)	Measured Temperature (°C)	Measured Friction Coefficient	WK (WV/Hmin)
1	96	96	4.53	12.44	21.47	45.49	43.9	0.912	0.59
2	123	123	4.53	12.44	10.41	28.27	42.3	0.811	0.46
3	141	141	4.53	12.44	1.55	4.82	42.1	0.811	0.40
4	186	186	4.53	12.44	1.54	6.32	40.8	0.786	0.30
5	234	234	4.53	12.44	0.37	1.91	39.4	0.761	0.24
6	294	294	4.53	12.44	0.20	1.3	39.0	0.738	0.19
7	327	327	4.53	12.44	0.18	1.3	38.9	0.575	0.17
8	345	345	4.53	12.44	0.15	1.14	37.2	0.431	0.16
9	372	372	4.53	12.44	0.15	1.23	37.0	0.378	0.15
10	434	434	4.53	12.44	0.14	1.34	36.1	0.335	0.13
11	96	96	4.53	24.88	18.54	39.29	56.0	1.078	1.17
12	123	123	4.53	24.88	9.09	24.68	51.8	0.794	0.92
13	141	141	4.53	24.88	0.85	2.64	49.8	0.764	0.80
14	186	186	4.53	24.88	2.13	8.75	49.4	0.739	0.61
15	234	234	4.53	24.88	0.42	2.17	49.0	0.733	0.48
16	294	294	4.53	24.88	0.32	2.08	47.7	0.711	0.38
17	327	327	4.53	24.88	0.16	1.15	46.6	0.683	0.34
18	345	345	4.53	24.88	0.12	0.91	44.6	0.55	0.33
19	372	372	4.53	24.88	0.11	0.9	43.4	0.395	0.30
20	434	434	4.53	24.88	0.10	0.96	42.1	0.315	0.26
21	96	96	9.06	12.44	48.23	51.1	55.7	1.009	1.17
22	123	123	9.06	12.44	18.15	24.64	49.4	0.739	0.92
23	141	141	9.06	12.44	2.75	4.28	48.8	0.732	0.80
24	186	186	9.06	12.44	3.03	6.22	47.9	0.674	0.61
25	234	234	9.06	12.44	0.68	1.76	46.8	0.671	0.48
26	294	294	9.06	12.44	0.40	1.3	46.4	0.608	0.38
27	327	327	9.06	12.44	0.33	1.19	45.2	0.606	0.34
28	345	345	9.06	12.44	0.31	1.27	43.8	0.439	0.33
29	372	372	9.06	12.44	0.27	1.11	41.3	0.363	0.30
30	434	434	9.06	12.44	0.24	1.15	40.3	0.287	0.26

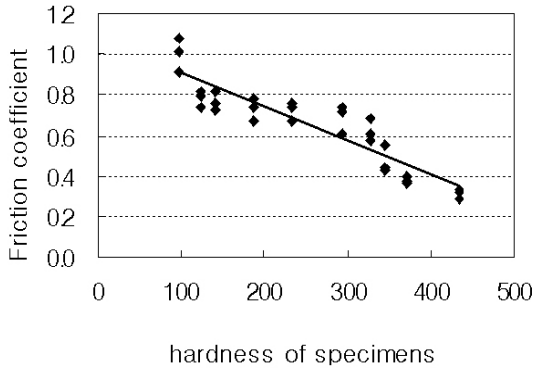


Fig. 2 The variation of the friction coefficient as hardness of specimens

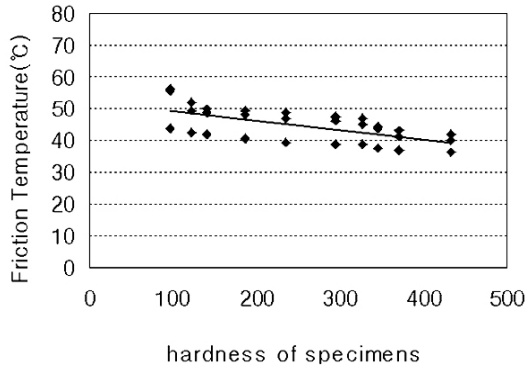


Fig. 3 The variation of the friction temperature as hardness of specimens

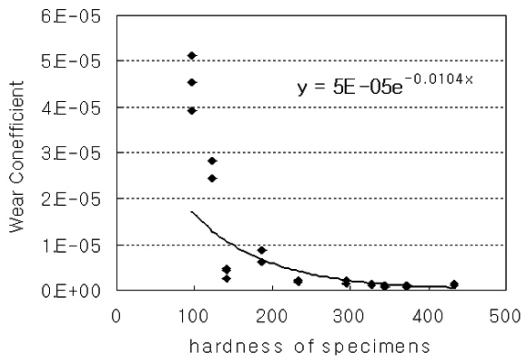


Fig. 4 The wear coefficient plotted against the hardness of specimens

Fig. 2는 재료의 경도 크기에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었다. 재료의 경도가 커짐에 따라 마찰계수는 강하게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 마찰계수의 값은 최고 1.1에서 0.3의 범위에서 재료의 경도 값에 따라 고르게 분포되어 나타났다. 실험조건인 하중 및 마찰속도의 변화에 따라서는 미소한 변동을 나타내나, 재료의 경도 값에 따라서는 현저한 차이를 나타내고 있다. 이 그래프에서 다소 흩어진 데이터가 있긴 하지만 대체적으로 선형적인 관계를 보여주고 있다. Fig. 3은 재료의 경도 크기에 따른 마찰온도와 의 관계를 나타내었다. 경도의 증가에 따라 마찰온도는 점차 선형적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 4는 재료의 경도변화에 따른 마모계수(k)의 변화를 나타내었다. 이 그림에서 재료의 경도 증가에 따른 마모계수는 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다. 역시 경도가 낮은 재료부분에서는 마모계수가 현저하게 높고, (Hv10) 200부터는 점차적으로 미소하게 감소하여서 경도와 마모율의 그림과 같은 경향을 나타내고 있다.

3.2 마모율의 영향

마모율은 미끄럼거리 당 마모량을 말한다. 이것은 미끄럼단위 길이 당 마모량에 따라서 과대마모와 평탄마모로 구별지을 수 있다.

Fig. 5는 재료의 경도 증가에 따른 마모율 (V/L)의 변화를 나타내었다. 재료의 경도 증가에 따라 마모율은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 구리 알

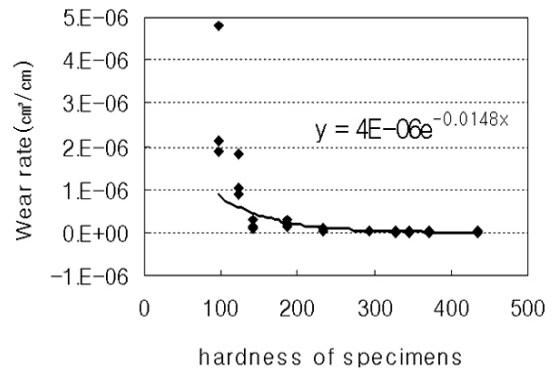


Fig. 5 The wear rate plotted against the hardness of specimens

루미늄과 같은 경도가 낮은 재료에서 마모율은 현저하게 높고, (Hv10)200부터는 점차적으로 미소하게 감소하는 경향을 보였다. 이 경향은 판스프링을 사용하지 않은 마모연구의 결과와 비슷하여, 일반적인 경향과 같았다.

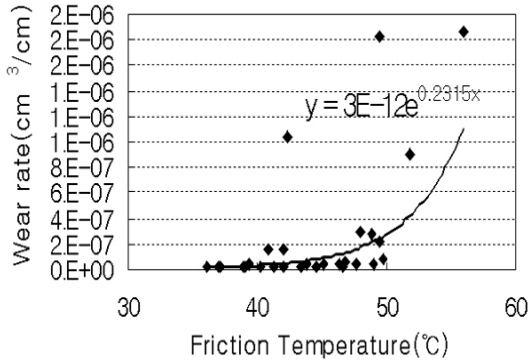


Fig. 6 Relationships between the rate of wear and the friction temperature

Fig. 6은 마모율과 마찰온도와의 관계를 나타낸다. 마모율이 증가함에 따라 온도가 증가하는 경향을 나타낸다. 마모율과 접촉조건의 측정들 사이에 관계들은 이 그림에 의하여 제시되었다. 특히 마모율이 2.0E-06을 지나면서 마찰온도는 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 조건에서 마모율의 값 2.0E-06은 평탄 마모와 과대 마모의 경계 값으로 볼 수 있다. 실험 후 마모 트랙의 표면 조도와 마모율의 관계를 살펴보면, 마모율이 증가함에 따라 마모트랙의 표면 조도도 거칠게 나타난다. 본 연구에서도 마모율이 2.0E-06을 지나면서 마모 트랙의 표면조도도 급격하게 거칠어질 것으로 사료된다.

3.3 마찰온도와 마찰계수의 영향

마찰열은 거시적인 마모실험 조건(하중, 속도, 재료의 경도)은 물론이고, 미시적인 접촉조건(표면층의 구조와 성질) 및 실험환경 조건에도 큰 영향을 받는다^[12]. 또한 마찰 온도는 금속성분의 마모손상에 현저한 영향을 미친다. 거기에는 주위의 온도가 증가했다가 감소하는 즉, 평탄 마모와 과대 마모로 구별할 수 있는 천이구역이 존재한다^[13].

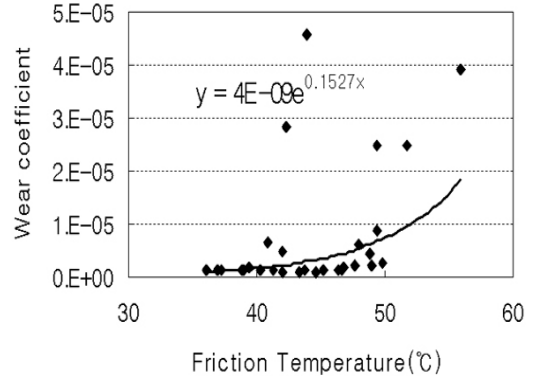


Fig. 7 The wear coefficient plotted against the friction temperature

Fig. 7에서 마모계수가 증가함에 따라 마찰온도는 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 추세선(curve fitting)을 적용하여 마모계수와 마찰온도와의 관계를 나타내면 아래 식과 같다.

$$W.C(k) = 4.0E-09e^{(0.1524 F)} \quad (2)$$

여기서 F는 마찰온도(°C)를 나타낸다. (2)식은 마모계수 k 를 마찰온도 F의 함수로 표현된 것이다. 이것은 k 에 묻혀있던 여러 변수 중 마찰온도를 나타낸 것이다. 즉 마모계수(k)를 마찰온도(F)의 함수로 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. Fig. 8은 Table 2의 마모계수(k)와 마찰계수와의 관계를 나타내었다. 마모계수가 증가함에 따라 마찰계수는 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. 추세선(curve fitting)을 적용하여 마모계수와 마찰계수와의 관계를 나타내면 아래 식과 같다.

$$W.C(k) = 1.0E-07e^{(5.1372 \mu)} \quad (3)$$

여기서 μ 는 마찰계수를 나타낸다. (3)식은 마모계수 k 를 마찰계수 μ 의 함수로 표현한 것이다. 이것은 k 에 묻혀있던 여러 변수 중 마찰계수 μ 를 나타낸 것이다.

(2)식과 (3)식을 조합하면 (4)식으로 표현 할 수 있다.

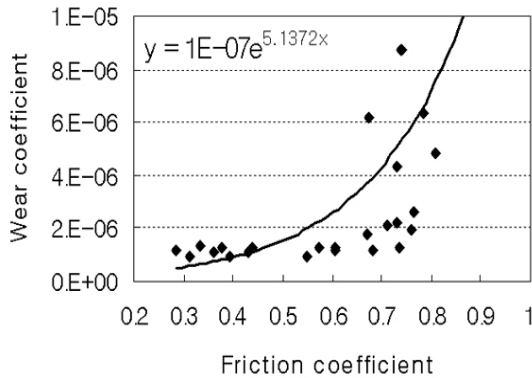


Fig. 8 The wear coefficient plotted against the friction coefficient

$$W.C(k) = [2.0E-09e^{(0.1524 F)} + 0.5E-07e^{(5.1372 \mu)}] \quad (4)$$

(4)식은 마모계수 k 를 마찰온도 F 와 마찰계수 μ 의 조합으로 표현한 것이다. 즉 이것은 k 에 묻혀있던 여러 변수 중 마찰온도 F 와 마찰계수 μ 의 함수로 나타내었다. 즉 마모계수 k 에 마찰온도와 마찰계수의 공헌정도를 나타낸다고 볼 수 있다. (4)식을 이용하여 Archard의 마모 식에 마모계수 k 대신에 대입하면, (5)식으로 나타낼 수 있다.

$$V/L = [2.0E-09e^{(0.1524 F)} + 0.5E-07e^{(5.1372 \mu)}](W/H) \quad (5)$$

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

4. 결 론

경도가 다른 10가지의 마모 시편재료를 선정하였고, 판스프링을 사용한 마모실험을 하여 마모무게 (loss weight), 마찰계수, 마찰온도를 측정하였다. 이 데이터들을 분석 및 응용한 결과는 아래와 같다.

1. 마모율 2.0E-06은 마모 면의 표면조도와 마찰온도 급격히 상승시키는 지점으로 평탄마모와 과대 마모의 경계 값으로 제안한다.

2. 마찰계수와 마모계수와의 관계를 규명하였다.
3. 마찰온도와 마모계수와의 관계를 규명하였다.
4. 마찰온도와 마찰계수를 첨가시킨 새로운 마모식을 제안하였다.

참고문헌

1. Archard, J. F., "Contact and rubbing of flat surfaces," Journal of applied physics, Vol. 24, No. 8. pp. 981-988, 1953.
2. Krause, H., and Tackenberg, W., "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, 64, 291-302. 1980.
3. Bian, S., Maj, S. and Borland, D. W., "The unlubricated sliding wear of steels: the role of the hardness of the friction pair," Wear, Vol. 166, pp. 1-5. 1993.
4. Rigney, D. A., "The roles of hardness in the sliding behavior of materials," Wear, Vol. 175, pp. 63-69. 1994.
5. Arnell, R. D., Davies, P. B., Halling J. and Whomes, T. L. "Tribology principles and Design Applications," Macmillan, London, chapter 3. 1991.
6. Suh, N. P., "Tribophysics," Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1996.
7. So, H., "Characteristics of wear results tested by pin-on-disc at moderate to high speeds," Tribology international Vol. 29, 415-423. 1996.
8. Hug, M. Z. and Celis, J. P., "Expressing wear rate in sliding contacts on dissipated energy," Wear, Vol. 252, pp. 375-383. 2002.
9. Borland, D. W. and Bian, S., "Unlubricated sliding wear of steels: towards an alternative wear equation," Wear, Vol. 209, pp. 171-178. 1997.
10. Stephen L. Rice and Steven F. Wayne, "Specimen material reversal in pin-on-disc Tribotesting," Wear, Vol. 88, pp. 85-92. 1983.
11. Kalousek, J., Fegredo, D. M. and Laufer, E. E.,

“The wear resistance and worn metallography of pearlite, bainite and tempered martensite rail steel microstructures of high hardness,” *Wear*, Vol. 105, pp. 199-222. 1985.

12. Wang, Y., Li, X. D., and Feng, Z., “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. 1995.
13. Stott, F. H., “High-temperature sliding wear of metals,” *Tribology International* Vol. 35, pp. 489-495. 2002.