

판스프링을 사용한 건식마모실험에서 재료경도에 따른 마모거동

김정현*

(논문접수일 2007. 9. 21, 심사완료일 2008. 4. 3)

Wear Behavior as Hardness Difference of Material in the Dry Sliding Wear Tests of Using Leaf-Spring

JungHyun Kim*

Abstract

It is shown that the rate of wear can be related to 'index of wear intensity' using a leaf-spring in the disc on disk on wear tests. Since both upper and lower specimens have used the same hardness values, equivalent hardness of 'the index of wear intensity' used the mean hardness value of specimens. This index is derived from the external variables of load, sliding speed and the hardness of the sliding pairs. 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. Using experimental data, we figured the relationship between wear rate and index of wear intensity. A newly wear equation had been derived the result using a leaf-spring in disc on disc wear system.

Key Words : wear rate(마모율), index of wear intensity(마모세기의 지수), wear equation(마모식), leaf-spring(판스프링)

1. 서론

마찰은 재료의 성질이 아니라, 인접한 재료와 집합적으로 영향을 미치는 응력, 마찰파트너들로 구성되어지는 복잡한 마찰 시스템의 성질이다. 일반적으로 마모 문제를 해결하는 이러한 시스템에 관한 연구들은 잘 알려진 물리적인 양과

재료의 마모거동 사이에 비례하는 종속관계를 밝히는 것이다. 많은 금속재료 연구자들은 재료의 경도와 잘 알려진 마모 기구사이의 밀접한 관계를 발견해 왔었다^(1~4).

그러나 선박의 스크류 축이나 자동차의 차륜 축 등 수밀, 기밀을 필요로 하는 스프링으로 지지된 채 작동하는 마모거동에 대한 연구는 아직도 부족한 실정이다.

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

마모모형을 살펴보면, 대표적인 모델로 Archard의 점착성 마모모형⁽¹⁾을 들 수 있다.

Archard의 마모 식은 아래와 같다.

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

여기서, V는 마모량이며, L은 미끄럼 길이이며, W는 수직하중이고, H는 미끄럼재료 중의 한 개의 경도이며, κ 는 마모계수이다. 마모 식에서 사용된 매개변수 외의 마찰계수, 마찰온도 마모환경 등의 다른 요소들은 모두 마모계수 κ 에 묻혀 버리게 되는 단점을 지녔다.

점착성 마모의 조건은 낮은 저항 압력에 변형되는 연한금속속에서 특히 잘 일어난다고 알려져 있다. 응착성(abrasive) 마모 모델로는 Halling의 응착성 마모모형⁽⁵⁾을 들 수 있으며, 마모저항과 재료의 경도사이에 직접적으로 선형적 비례 관계 있다는 사실은 이미 잘 알려진 사실이다. 또한 서남표의 층상 마모모형⁽⁶⁾을 들 수 있는데, 이는 아주 작은 기구들을 사용하는 가정아래 얻어졌고, 어떤 식들은 간단하고, 어떤 식들은 많은 매개변수를 포함한 매우 복잡한 식으로 표현되는 것도 있다.

실험형태도 여러 가지로 시행되었다. Krause⁽²⁾는 카르단 조인트(cardan joints)에 의하여 평면 미끄럼 실험형태를 이용하여 재료의 경도가 마모거동에 미치는 영향을 규명하였고, So⁽⁷⁾는 핀 언 디스크 실험형태를 이용하여 마모의 특성을 규명하였다. Hug와 Celis⁽⁸⁾는 볼 언 플레이트 마모형태를 이용하여 상대습도에 따른 마모거동을 발표하였다. Bian⁽³⁾과 Rigney⁽⁴⁾는 핀과 링의 실험형태를 이용하여 마모거동에서 경도의 역할을 규명하였다. Borland와 Bian⁽⁹⁾은 핀과 링의 마모 실험형태를 이용하여 마모 식을 발전시켰다. 그러나 핀과 링 마모형태에서는 핀은 많은 마모가 일어나는 반면에 링은 아주 미미한 마모가 발생한다. 이를 밝히기 위하여 Rice와 Wayne은 핀과 링의 재질(Al과 Mg)을 바꾸어 가면서 마모실험을 하여 핀과 링의 역할을 규명하였다. 또한 핀은 온도가 많이 상승하고, 링은 온도가 적게 상승한다. 이 연구⁽⁹⁾에서 핀과 링의 경도차이의 해결을 위하여 균형경도(equivalent hardness, $H_{eq} = H_{pin} + CH_{ring}$)를 제안하였으며, 균형경도는 핀의 경도에 링의 경도 값과 상수 C와의 곱을 합한 것으로 나타내었다. 이것은 핀과 링의 경도차이의 영향과 핀은 계속 마찰하면서 열을 받아들이고, 열을 받아들이는 링 부분은 마모트랙의 어떤 한 부분이기 때문이다. 이런 점을 개선하기 위하여 디스크 언 디스크 시스템이 개발되었다⁽¹⁰⁾.

두 물체 사이에 마찰을 일으킬 때 마모기구와 마모물에

영향을 미치는 요소는 많이 있다. 많은 연구자들은 오랫동안 마모에 영향을 미치는 요소들에 대하여 연구하여 왔다. 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.

따라서 본 연구에서는 불균형적인 열의 흡수를 지향할 수 있는 디스크 언 디스크 시스템을 이용하였고, 위 시편과 아래 시편을 같은 재질로 하여 위 시편과 아래 시편의 균일한 마모를 유도하였으며, 판스프링을 장착하여 스프링으로 지지된 채 마모실험을 시행하여 마모 특성을 찾고자 하였다. 마모 식은 Archard의 마모 식을 기본으로 하였으며, 실험 데이터를 이용하여 스프링으로 지지된 마모실험에서 새로운 마모 식을 유도하였다.

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.

연성 재료인 구리로 제작한 시편부터, 연강을 500°C에서 어닐링 열처리한 시편, 경강을 500°C에서 어닐링 열처리한 시편, 알루미늄 시편, 황동 시편, 알루미늄 청동시편, 스테인레스 강 시편, 300°C에서 어닐링 열처리한 연강시편, 연강

Table 1 Material characterization

Material	Hardness (Hv10)	Density (kg/m ³)
1 Copper	96	8.81
2 Annealed Mild Steel(500°C)	123	7.63
3 Annealed Hard Steel(500°C)	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°C)	345	7.51
9 Mild Steel	372	7.87
10 Hard Steel	434	7.93

시편, 경강 시편 등을 위, 아래 시편으로 각각 사용하였다.

시편은 위 시편과 아래시편의 크기를 같게 제작하였으며, 외경이 31.62mm, 내경이 15.91mm이고, 접촉면적은 586.45mm²이다.

Fig. 1은 마모시편과 판스프링이 장착된 트라이보 머신으로서 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. ③은 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. 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 마모무게를 계산하였으며, 시편재료의 밀도를 고려하여 마모 부피를 계산하였다.

마모실험조건은 예비실험을 통하여 트라이보 머신의 용량과 시편들의 재질을 고려하여 3조건(44.4N, 100rpm, 30min), (44.4N, 200rpm, 30min), (88.8N, 100rpm, 30min)으로 선



Fig. 1 Schematic diagram of disc-on-disc systems using a leaf-spring

정하였다. 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 표면 거칠기를 일정하게 평면연삭기로 연마하여 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 재료경도의 영향

pin-on-ring 마모 실험에서는 어느 시편이 pin으로 사용되고, 어느 시편이 ring으로 사용되었느냐가 실험 결과에 영향을 미친다. pin과 ring의 재질이 반전되었을 경우 또 다른 실험결과가 양산되기 때문이다. 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. 단 경도가 낮은 재료(Hv10 : 100부근의 시편)의 실험에서는 위 시편의 재료가 아래 시편의 재료 보다 약간 많이 닳고, 그 이상의 재료들의 마모량은 위 시편과 아래 시편의 마모량이 비슷하였다.

Table 2에 마모실험의 결과를 나타내었다. 10개의 시편으로 3가지의 실험조건으로 마모실험을 하여 총 30항목으로 나열하였다. 여기서 하중은 44.4N, 88.8N으로 실험하였고, 마모속도는 100rpm(12.443Cm S⁻¹), 200rpm(24.886Cm S⁻¹)으로 실험하였다. 디스크 언 디스크 실험형태에서, 경도 값의 사용을 위하여 위 시편과 아래 시편이 같은 재료로 마모실험을 하였기 때문에 평균경도 값을 사용하였다.

Fig. 2에 재료의 경도 증가에 따른 마찰계수의 변화를 나타내었다. 재료의 경도 증가에 따라 마찰계수는 감소하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 3에 재료의 경도변화에 따른 마모온도의 변화를 나타내었다. 시편경도에 따라 각 실험 조건에서 마모실험 후 마모무게를 측정하여 재료의 밀도를 고려하여 마모체적을 계산하였고, 이 마모체적과 실험조건들을 식 (1)에 대입하여 마모계수를 구하였다. 마모계수와 재료의 경도와의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 이 그림에서 재료의 경도 증가에 따른 마모계수는 점차 감소하는 경향을 나타내고 있고, 추세선(curve fitting)을 적용하여 마모계수와 재료의 경도와의 관계를 나타내면 아래 식과 같다.

$$W.C(\kappa) = 5.0E-05\exp(-0.0104H) \quad (2)$$

여기서, H는 재료의 경도 값을 나타낸다. 식 (2)를 Archard

Table 2 Results of wear tests

No.	H _{UP} (Hv/10)	H _{LO} (Hv/10)	Load W (N)	Speed V (cm s ⁻¹)	Wear rate V/L (cm ³ cm ⁻¹ ×10 ⁻⁷)	Calculated Wear Coefficient (×10 ⁻⁶)	Measured Temperature (°C)	Measured Friction Coefficient	Wk (WV/Hmea.)
1	96	96	44.4	12.44	21.47	45.49	43.9	0.912	0.59
2	123	123	44.4	12.44	10.41	28.27	42.3	0.811	0.46
3	141	141	44.4	12.44	1.55	4.82	42.1	0.811	0.40
4	186	186	44.4	12.44	1.54	6.32	40.8	0.786	0.30
5	234	234	44.4	12.44	0.37	1.91	39.4	0.761	0.24
6	294	294	44.4	12.44	0.20	1.3	39.0	0.738	0.19
7	327	327	44.4	12.44	0.18	1.3	38.9	0.575	0.17
8	345	345	44.4	12.44	0.15	1.14	37.2	0.431	0.16
9	372	372	44.4	12.44	0.15	1.23	37.0	0.378	0.15
10	434	434	44.4	12.44	0.14	1.34	36.1	0.335	0.13
11	96	96	44.4	24.88	18.54	39.29	56.0	1.078	1.17
12	123	123	44.4	24.88	9.09	24.68	51.8	0.794	0.92
13	141	141	44.4	24.88	0.85	2.64	49.8	0.764	0.80
14	186	186	44.4	24.88	2.13	8.75	49.4	0.739	0.61
15	234	234	44.4	24.88	0.42	2.17	49.0	0.733	0.48
16	294	294	44.4	24.88	0.32	2.08	47.7	0.711	0.38
17	327	327	44.4	24.88	0.16	1.15	46.6	0.683	0.34
18	345	345	44.4	24.88	0.12	0.91	44.6	0.55	0.33
19	372	372	44.4	24.88	0.11	0.9	43.4	0.395	0.30
20	434	434	44.4	24.88	0.10	0.96	42.1	0.315	0.26
21	96	96	88.8	12.44	48.23	51.1	55.7	1.009	1.17
22	123	123	88.8	12.44	18.15	24.64	49.4	0.739	0.92
23	141	141	88.8	12.44	2.75	4.28	48.8	0.732	0.80
24	186	186	88.8	12.44	3.03	6.22	47.9	0.674	0.61
25	234	234	88.8	12.44	0.68	1.76	46.8	0.671	0.48
26	294	294	88.8	12.44	0.40	1.3	46.4	0.608	0.38
27	327	327	88.8	12.44	0.33	1.19	45.2	0.606	0.34
28	345	345	88.8	12.44	0.31	1.27	43.8	0.439	0.33
29	372	372	88.8	12.44	0.27	1.11	41.3	0.363	0.30
30	434	434	88.8	12.44	0.24	1.15	40.3	0.287	0.26

의 마모 식의 마모계수 k 대신에 사용함으로써, 마모조건을 대입하여 마모율 혹은 마모체적의 예측에 사용될 수 있을 것으로 생각 된다.

Fig. 5는 재료의 경도에 따른 마모율과의 관계를 나타낸다.

이 그림에서 재료의 경도 값이 100(Hv)을 중심으로 경도 값이 낮아질수록, 마모율이 1.0E-06을 지나면서 급격하게 상승하는 것을 볼 수 있다. 이와 같은 조건에서 마모율의 값 1.0E-06은 평탄 마모와 과대 마모의 경계 값으로 볼 수 있다.

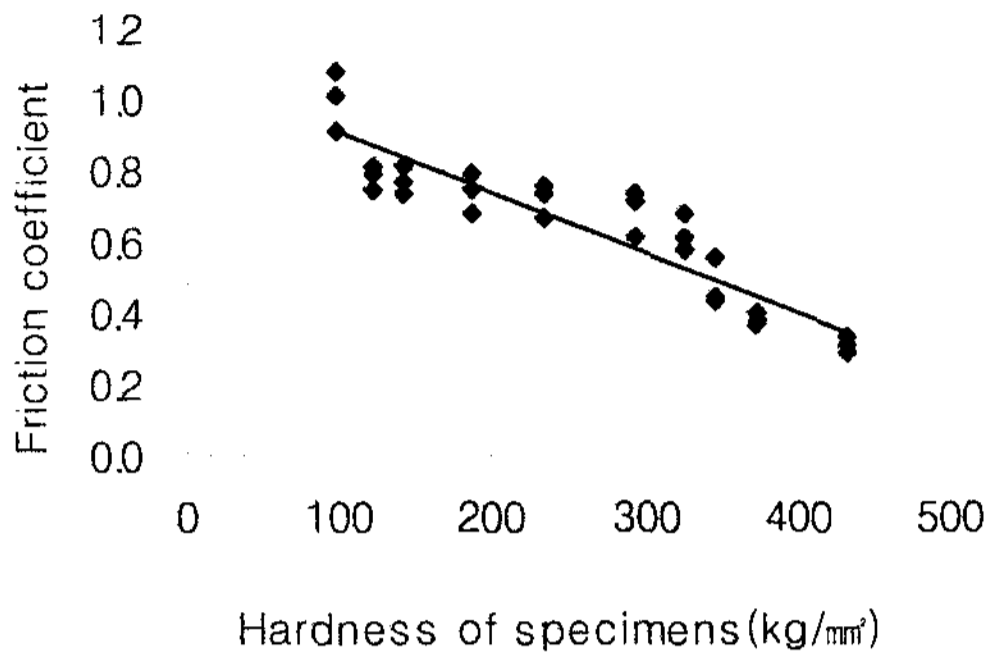


Fig. 2 The variation of the friction coefficient as hardness of specimens

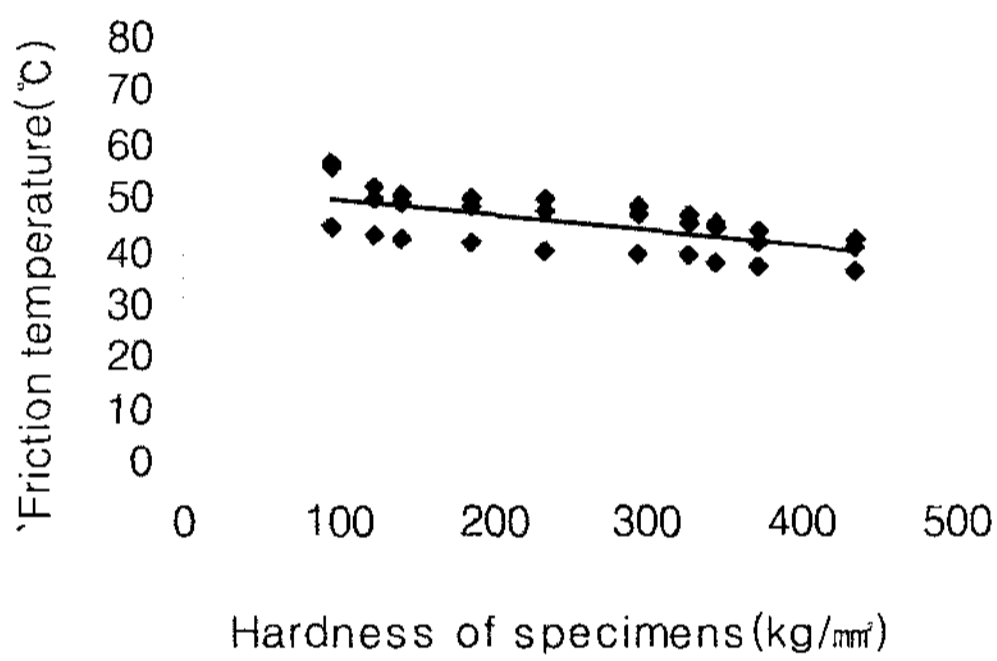


Fig. 3 The variation of the friction temperature as hardness of specimens

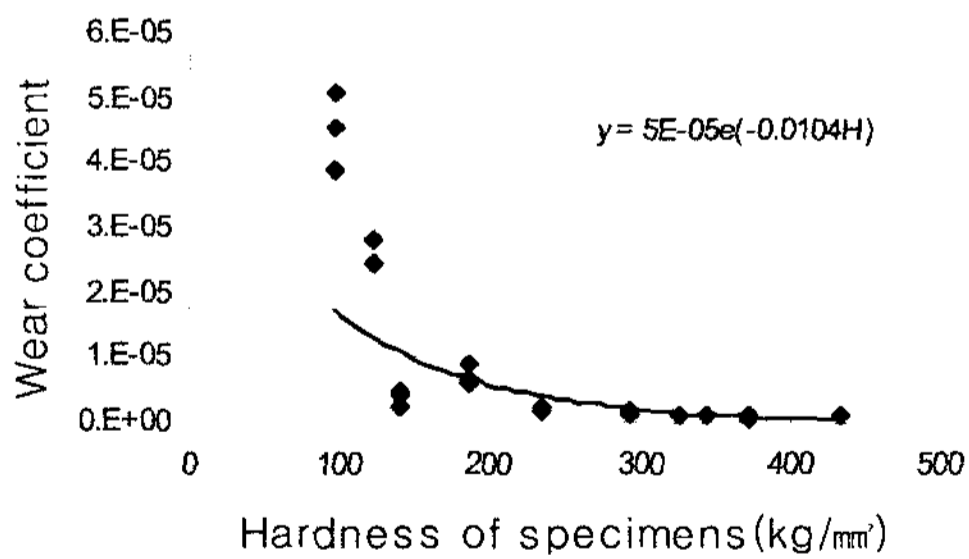


Fig. 4 The wear coefficient plotted against the hardness of specimens

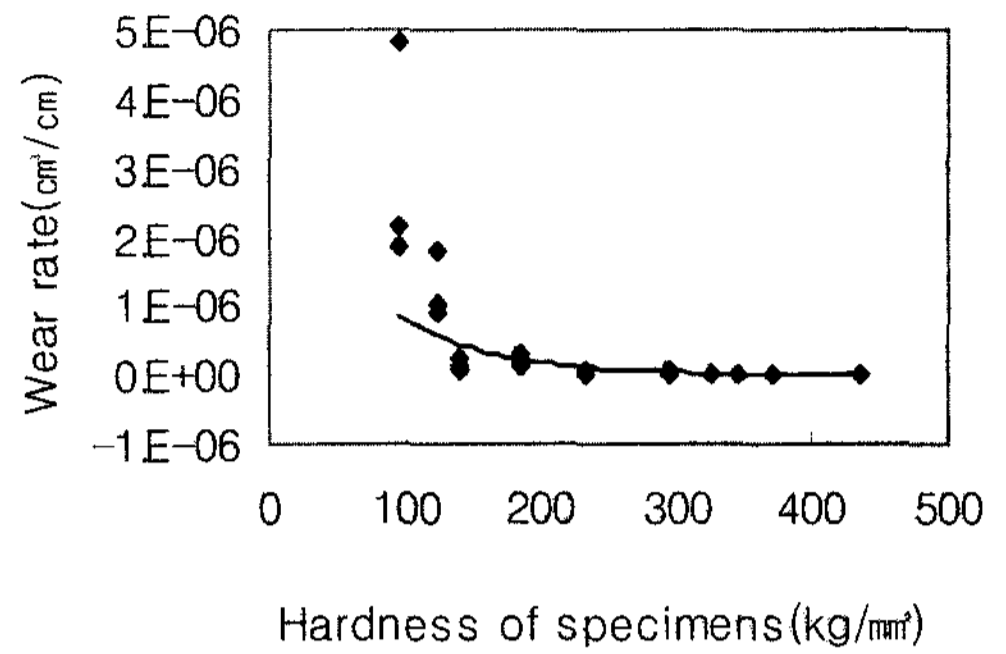


Fig. 5 The wear rate plotted against the hardness of specimens

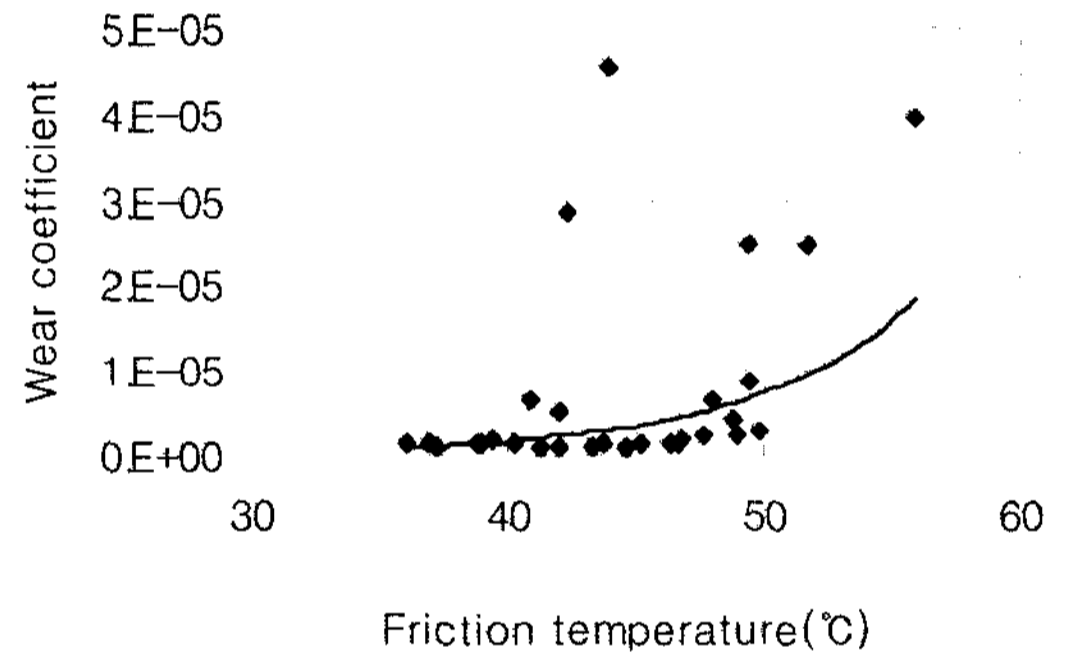


Fig. 6 The wear coefficient plotted against the friction temperature

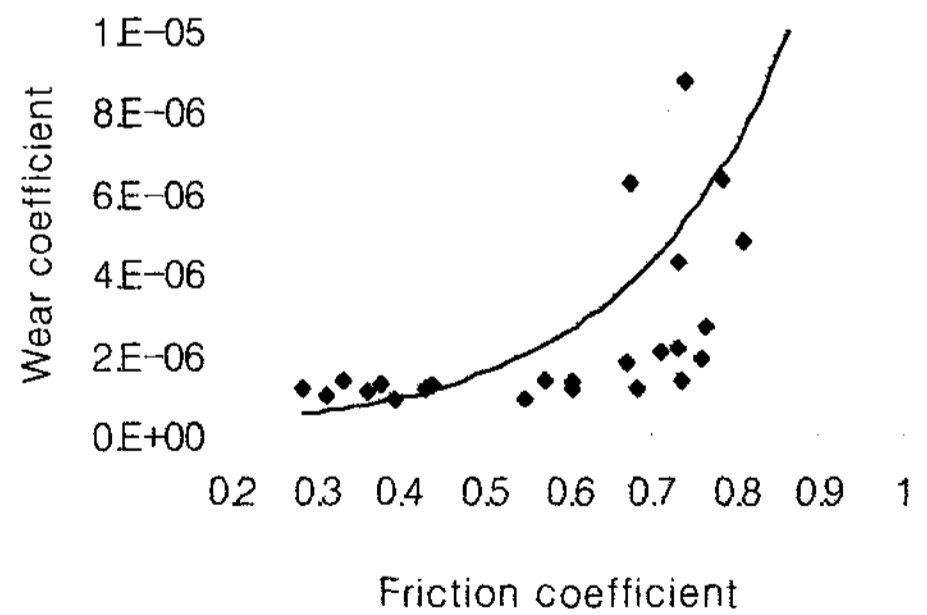


Fig. 7 The wear coefficient plotted against the friction coefficient

3.2 마찰온도와 마찰계수의 영향

마찰열은 거시적인 마모실험 조건(하중, 속도, 재료의 경도)은 물론, 미시적인 접촉조건(표면층의 구조와 성질) 및 실험환경 조건에도 큰 영향을 받는다. 또한 마찰 온도는 금

속입자의 크기가 마모손상에 현저한 영향을 미친다. 거기에는 주위의 온도가 증가했다가 감소하는 즉, 평탄 마모와 과대 마모로 구별할 수 있는 천이구역이 존재한다. Fig. 6에 Table 2의 마모계수 k 와 마찰온도와의 관계를 나타내었다.

Fig. 6에서 마모계수가 증가함에 따라 마찰온도는 점차적으로 증가하는 경향을 보였다. Fig. 7에 Table 2의 마모계수 k 와 마찰계수와의 관계를 나타내었다. 마모계수의 값이 0.7을 지나면서 마찰계수는 현저하게 증가하는 경향을 보였다.

3.3 마모세기 지수의 영향

마모 식을 만들기 위하여 마모기구와 마모율을 결정하는데 효과적인 매개변수를 선택하는 것이 대단히 중요한 부분이다. 하중이 증가할수록 마찰 온도가 증가하는 다소 선형적인 관계를 보이는 것은 일반적인 사실이다. 그러므로 여기서 이 3개의 매개변수를 조합하여 항을 결정 한다⁽⁹⁾. 이 항들은 마모율과 잘 일치할 것으로 기대한다. 이 항을 식으로 나타내기 위하여 “마모세기의 지수”(index of hardness intensity)

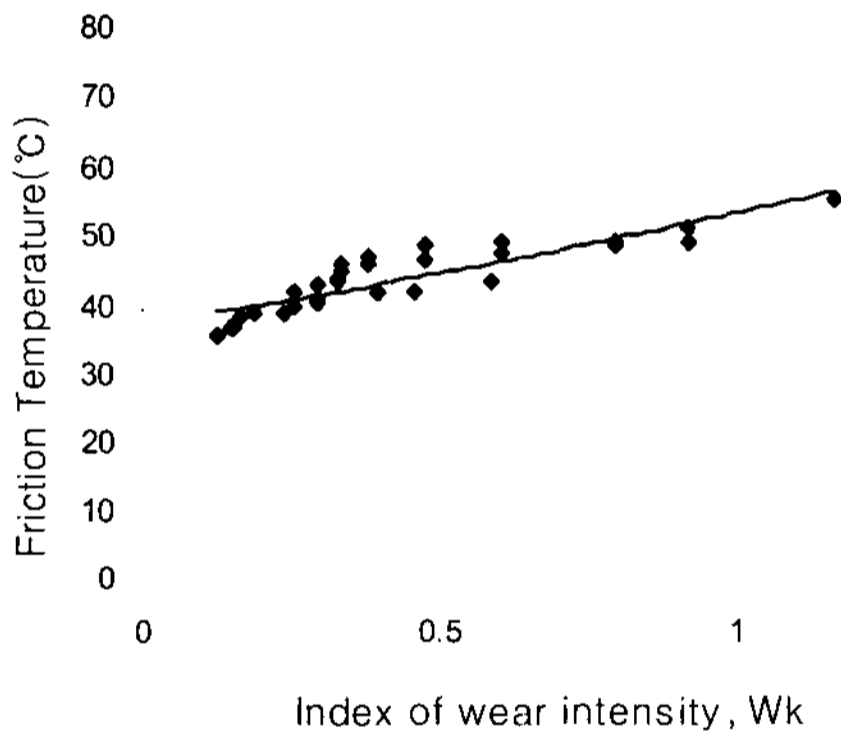


Fig. 8 The friction temperature plotted against the index of wear intensity, W_k

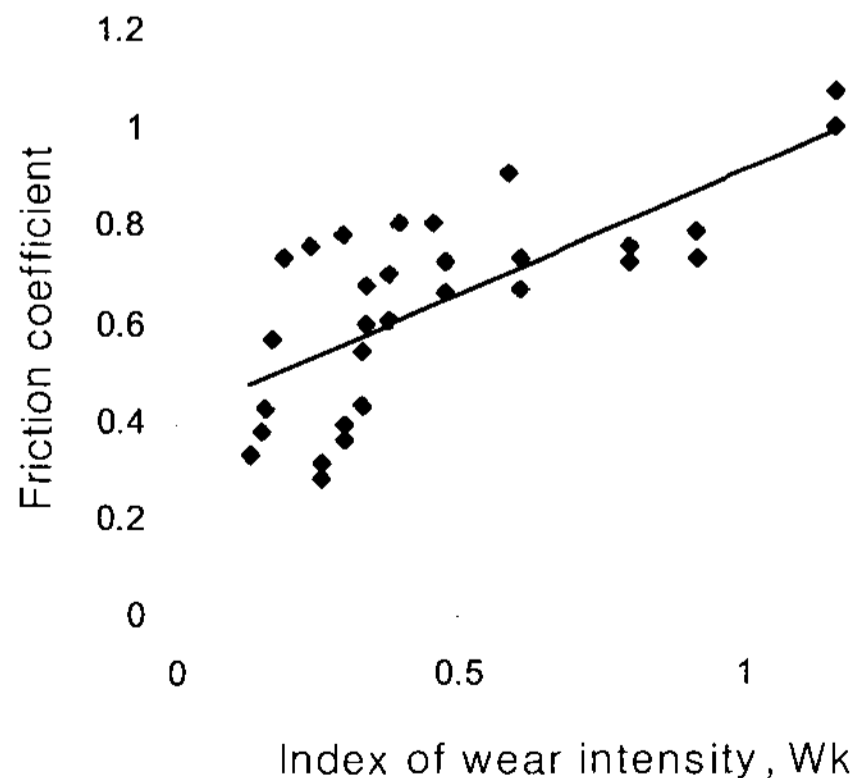


Fig. 9 The friction coefficient plotted against the index of wear intensity, W_k

를 사용하였다.

$$W_k = Wv / H_{mea} \quad (3)$$

여기서, W_k 는 마모세기의 지수, W 는 수직하중, v 는 미끄럼속도 이고, H_{mea} 은 위에서 정의한 평균경도이다. 이 제안은 Borland와 Bian의 마모세기의 지수를 기초로 하여 본 연구에 맞게 수정한 것이다.

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10의 X축 방향에 식 (3)에 의하여 계산된 마모세기의 지수 값을 나타내고, Y축에 각각 마찰온도, 마찰계수, 마모율을 나타낸다. Fig. 8과 Fig. 9에서 보는 바와 같이 W_k 는 마찰온도와 마찰계수에 선형적인 관계를 보여준다.

마모율과 W_k 과의 관계를 Fig. 10에 나타내었다. 여기에서 다소 데이터가 흩어져 있고, 미처 실험하지 못한 영역의 데이터들은 추세선(Curve fitting)을 적용하여 단순화 하였다. 그 식은 아래와 같다.

$$V/L = 7.0E-09 \exp(5.391W_k) \quad (4)$$

이 새로운 마모 식은 판스프링을 사용한 디스크 언 디스크 실험형태에서 미끄럼속도 V 가 포함된 Archard의 마모 식을 개선하였다.

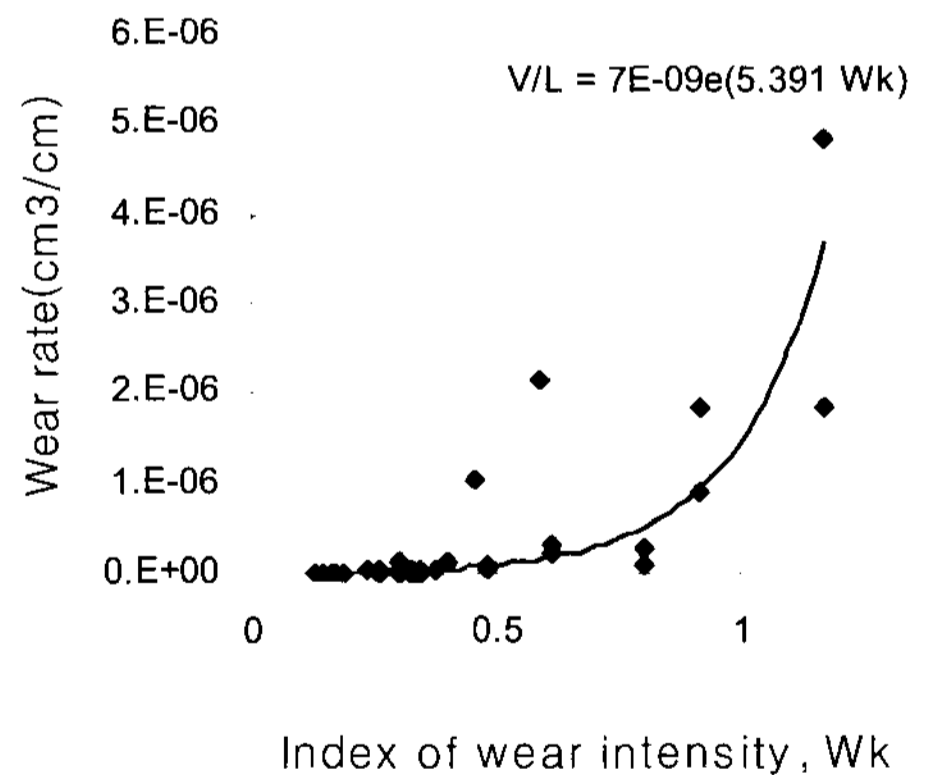


Fig. 10 The wear rate plotted against the index of wear intensity, W_k

4. 결론

판스프링을 사용한 마모실험에서 마모체적, 마찰계수, 마찰온도를 측정하여, 데이터들을 분석 및 응용한 결과는 다음과 같다.

- (1) 마모계수와 재료경도와의 관계식을 유도하였다.
- (2) 마모율 $1.0E-06$ 은 마모 면의 표면조도와 마찰온도를 급격히 상승시키는 지점으로 평탄 마모와 과대 마모의 경계 값으로 제안한다.
- (3) 미끄럼 속도 V 를 고려한 새로운 마모 식을 제안한다.

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) Kim, J. H., 2004, "A dry wear behavior as hardness difference in a dual disc on disc sliding wear tests," *Journal of the Korean Society Precision Engineering*, Vol. 13, No. 5, pp. 16~23.