



칼날형 마모시험기를 이용한 SBR 배합고무의 마모속도 결정

김동희* · 강신영**,*†

*전남대학교 신화학소재공학과, **전남대학교 응용화학공학부
접수일(2014년 5월 2일), 수정일(1차: 2014년 5월 20일, 2차: 5월 26일), 게재확정일(2014년 5월 27일)

Determination of Abrasion Rate of SBR Rubber Compounds using a Knife-blade Abrader

Dong-Hui Kim* and Shinyoung Kaang**,*†

*Department of Advanced Chemicals and Engineering, **School of Applied Chemical Engineering,
Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

(Received May 2, 2014, Revised May 20, May 26, 2014, Accepted May 27, 2014)

요약 : 실리카와 카본블랙을 함유한 SBR 배합고무를 대상으로 마찰 및 마모거동을 조사하였다. 인열에너지 이론을 배경으로 설계된 칼날형 마모시험기를 이용하였으며 마찰일의 크기가 SBR 배합고무의 마모속도에 미치는 영향을 평가하였다. 마찰일이 증가할수록 마모속도가 증가하는 power law 관계를 확인하였다. 칼날형 마모시험기를 통해 기존의 간헐적 마모손실무게 측정 대신 연속적 마모이동거리 측정이 가능했으며 보다 정확한 마모속도를 결정할 수 있었다.

ABSTRACT : Friction and abrasion behaviors were investigated for SBR rubber compounds reinforced by silica and carbon black. Knife-blade abrader, newly designed based on tearing energy theory, was utilized in order to evaluate the effect of frictional work on the wear rate of the rubber compounds. It was found that the power law relation between frictional work and wear rate worked, in which as the wear rate was increased as frictional work increased. The wear rate could be determined successfully using the knife-blade abrader in which a moving distance of the knife blade in the process of wearing was measured continuously, instead of intermittent measurements of weight loss by wear during experiment.

Keywords : abrasion, friction, test method, knife-blade abrader, SBR rubber compound

I. 서론

고무재료는 고유한 점탄성적 특성을 갖고 있어 타이어, 신발류, V-벨트 등과 같은 고무제품에 주로 사용되고 있다. 고무재료에 보강제로 첨가하는 대표적인 충전제로는 silica와 carbon black 등이 있다. 이들 충전제는 다양한 입자크기와 입체적 구조, 표면 관능기 등이 있어 고무제품의 물리적, 기계적 거동에 영향을 미친다.^{1,2} 특히 제품의 사용수명과 안정성과 관련 있는 마모-마찰 거동에도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.³⁻⁵

고무재료의 마모 및 마찰 현상에는 대단히 복잡한 메커니즘이 작동하고 있다.^{6,7} 우선 고무재료가 단단한 고체 표면 위를 이동할 때, 계면 사이에서 일어나는 마찰력은 다음의 두 메커니즘에 기인한다. 첫째, 접촉면에 형성된 접촉이다. 따라서 겹보기 접촉면적이 아닌 실제 접촉면적이 중요하다. 고무탄성체의 경우 수직하중, 미끄러짐 속도, 그리고 온도의 영향을

크게 받는다. 둘째, 고무탄성체의 이동과정에서 수반되는 소성변형의 결과이다. 변형과정에서 발생하는 히스테리시스적 에너지 소산의 크기가 마찰력 발생에 기여한다.

마모현상을 해석하는 메커니즘은 비교적 복잡적이다. 먼저 날카롭거나 거친 고체표면에 의해 고무탄성체의 일부가 마모 부스러기(debris)로 분리되어가는 현상, 즉 마멸마모가 있으며 거친 표면을 반복적으로 이동할 때 수반하는 주기적 응력으로 고무재료의 일부가 떨어져 나가는 현상, 즉 피로마모가 있다. 동시에 분위기 환경에 의해 접촉계면에서의 화학적 열화에 의해서도 마모는 가속화된다. 따라서 고무탄성체의 마모거동에는 고무혼합물의 조성뿐만 아니라 하중, 온도, 그리고 표면 조건에 따라 달라지는 등 여러 가지 요인들이 복합적으로 영향을 미친다. 또한 마모와 마찰실험의 경우 실제 현장에서의 사용조건과 동일한 조건을 재현하기가 쉽지 않아 실험결과를 통해 실제거동을 예측하는데도 무리가 따른다. 따라서 마찰-마모실험의 재현성도 다른 물질실험에 비해 상대적으로 크지 않다. 이는 마모와 마찰특성이 분위기 조건뿐만 아니라 상대

† Corresponding Author. E-mail: kaang@chonnam.ac.kr

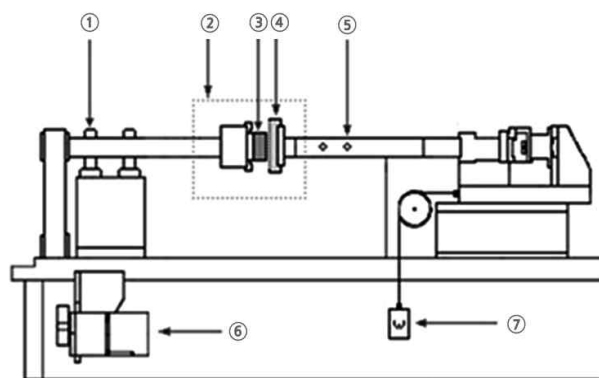
표면의 거친 정도가 일정하게 유지되는지의 여부에 민감하게 의존하기 때문이다. Schallmach는 고무재료의 마모 메커니즘을 규명하는데 지대한 기여를 하였으며,^{8,9} Gent 등은 칼날형 마모시험기를 이용하여 인열에너지 이론을 배경으로 고무재료의 마모현상을 조사하는데 기여하였다.^{10,11} 이론을 배경으로 인열에너지를 접근하는 시험방법은 데이터 편차가 비교적 적고 실제 마모현상과의 상관성이 상대적으로 높다고 알려져 있다.

본 연구에서는 충전제인 silica와 carbon black이 첨가된 SBR 배합고무를 대상으로 마모·마찰특성을 평가하였다. 기존의 칼날형 마모시험기를 기본으로 마모진행 과정을 연속측정이 가능하도록 개선 설계하였다. 이는 간헐적으로 수행되는 마모손실 무게 측정 과정에서 생성되는 실험오차의 가능성을 최소화하는데 기여하였다. 최종적으로 마모속도와 마찰에너지의 상관관계를 규명하도록 하였다.

II. 실험

1. 칼날형 마모시험기 설계

배합고무의 마모·마찰 특성을 조사하는데 오늘날 다양한 시험기들이 활용되고 있다. 본 연구를 위해서 칼날형 마모·마찰 시험기를 설계 제작하였다.^{12,13} 시험기 개략도를 Figure 1에 나타내었다. 고무시편을 먼저 알루미늄 디스크 홀더에 4개의



① 2-Unit bearing ② Temperature Chamber ③ rubber specimen ④ knife blade ⑤ Torque cell ⑥ Geared motor ⑦ normal load application

Figure 1. A schematic diagram showing a knife-blade abrasion machine

고정나사로 고착시켜 크램프에 장착시킨다. 모터를 통해 고무시편을 일정속도로 회전시킨다. 이때 시편에 수직으로 하중을 가해주면 마모칼날과 고무시편의 접촉표면에서 마찰이 일어나면서 동시에 마모가 진행된다. 따라서 본 시험기는 마모속도와 마찰력을 동시에 측정할 수 있도록 설계되었다. 기존의 마모시험기들은 대부분 마모로 인한 손실된 무게를 간헐적으로 측정하여 마모특성을 평가한다. 반면에 본 연구에서는 마모에 따른 고무시편의 두께 감소로 칼날의 이동거리를 측정하여 마모속도를 결정하는 방법을 채택하였고, 이를 위해 마모

Table 1. Formulation of SBR Rubber Compounds

<Silica-filled Rubber Comp'd>	
Composition (phr*)	
SBR ¹	137.5
Sulfur	2.1
RD ²	1.5
6PPD ³	1.5
Zinc oxide	3.0
Stearic acid	2.0
Silica ⁴	50/60/70/80
TESPT ⁵	4.0/4.8/5.6/6.4
CBS ⁶	1.5
DPG ⁷	2.0

<C/B-filled Rubber Comp'd>	
Composition (phr*)	
SBR ¹	137.5
Sulfur	1.75
RD ²	1.5
6PPD ³	1.5
Zinc oxide	3.0
Stearic acid	1.0
C/B ⁸	50/60/70/80
TBBS	1.38

* Part per hundred parts of rubber

1. Tufdene3835
2. Polymerized trimethyl-1,2-dihydroquinoline
3. Dimethylbutyl p-phenylene diamine
4. Hi-Sil 255 (Oriental Silicas Cooperation)

5. Bis-(3-(triethoxysilyl)-propyl)-tetrasulfide)
6. N-Cyclohexyl benzothiazolyl-2-sulfenamide
7. Diphenylguanidine
8. N330 (OCI)

칼날을 지지하는 지지대에 포텐시오미터(potentiometer)를 장착하였다. 포텐시오미터 장착으로 마모시험기는 연속적인 실험이 가능하였으며, 마모거리 측정만으로 마모속도를 결정하는 수단을 제공하였다. 마모시험 중 고무시편과 칼날 사이에서 발생하는 마찰력을 측정하기 위해 칼날을 잡고 있는 팔에 스트레인 게이지를 부착하였다. 마찰력의 크기 조절을 위해 마모표면에 수직방향으로 다양한 중량의 무게 추를 달아 하중을 주었으며, 분위기 온도 조절이 가능한 챔버 속에서 온도 변화에 따른 마모-마찰 거동을 측정할 수 있도록 설계하였다. 마모속도는 마모손실 무게를 회전수로 나누어 결정하였다. 마찰일은 칼날의 중간지점에서 걸리는 힘을 시편의 단면적으로 나누어 결정하였다. 본 연구에서는 마찰일 변화에 따른 마모 속도 변화를 조사하여 마찰일이 마모속도에 미치는 영향을 검토하였다.

2. 마모시험 준비

실리카와 카본블랙이 충전된 SBR 배합물 조성을 Table 1에 나타내었다. 배합고무는 3단계로 나누어 준비하였다. 먼저 SBR을 내부 혼합기(Namyang Co., Korea)에 투입하여 30초 동안 기계적으로 분해시킨 후 충전제, 산화아연(ZnO), 스테아린산(S/A), poly(2,2,4-trimethyl-1,2-dihydroquinoline) (TMDQ, RD), *N*-phenyl-*N'*-(1,3-dimethylbutyl)-*p*-phenylenediamine (HPPD, 6PPD)을 투입하여 6분 동안 배합하였다. 로터 속도는 45 rpm으로 하였고, 온도는 120°C를 유지하였다. 배합이 끝난 후 혼합기의 온도를 60°C로 유지하면서 sulfur, *N*-cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide (CBS), diphenyl guanidine (DPG)를 첨가하여 추가로 3분 동안 배합하였다. 배합된 고무를 50°C에서 8 rpm으로 회전하는 2.2 mm 간격의 two-roll mill (Brabender Instruments, Inc., PM-300, model #138-B)을 이용하여 3/4 절단 2분, end-wise 밀링을 8회를 시행하였다. 가교시간은 ODR (Benz, Model #674)로부터 얻은 가교 그래프의 최대토크로부터 결정하였으며, 가열프레스 (Dake, model #44-251)를 이용하여 160°C에서 가교하였다. 본 실험에서는 시편의 적정 가교시간이 t_0 이지만 시편의 두께를 감안하여 t_{max} 을 대신 적용하였다.

3. 마찰토크와 칼날 이동거리 교정

마찰토크의 교정을 위해 금속막대의 중간부분을 칼날 고정 장치에 장착하였다. 이 금속막대의 중앙부분으로부터 10 cm 떨어진 지점에 무게 추를 달아 0.5 kg, 1 kg, 1.5 kg의 하중을 주고 토크 값을 측정하였으며, 이를 통해 교정하였다. 고무시편이 마모됨에 따라 움직인 칼날의 이동거리는 칼날을 잡고 있는 막대에 설치된 포텐시오미터로부터 측정된 길이와 측정 현미경을 이용하여 직접 관찰한 이동거리 결과를 비교하였으며 이를 Figure 2에 나타내었다. 포텐시오미터를 통해 측정된 이동거

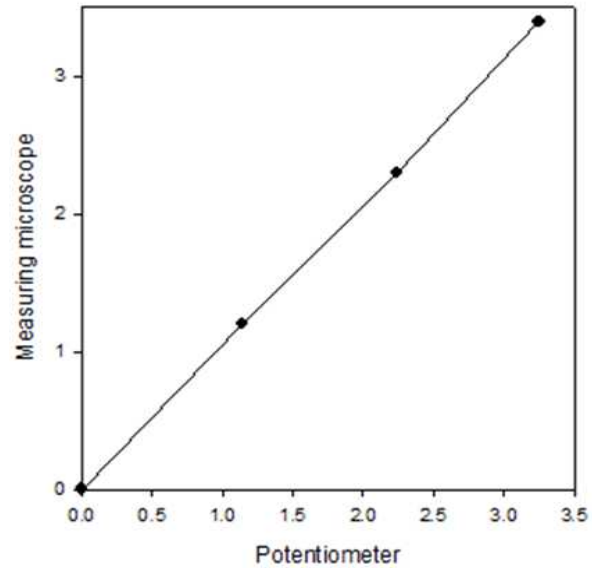


Figure 2. Comparison of potentiometer measurements with microscopic measurements for the knife-blade movement along abrasion of rubber testpiece.

리가 실제 이동거리와 동일하다는 것을 확인할 수 있었다.

4. 예비마모

마모속도의 정확한 측정을 위해 칼날의 예리함(sharpness)이 고무시편의 마모속도에 미치는 영향을 평가하였다. 실험의 재현성을 조사하기 위해 다양한 배합고무를 준비하여 실험하였으며 silica를 첨가한 SBR 배합고무에 대한 결과를 대표적으로 Figure 3에 나타내었다. 시편의 회전속도는 10 rev/min으로

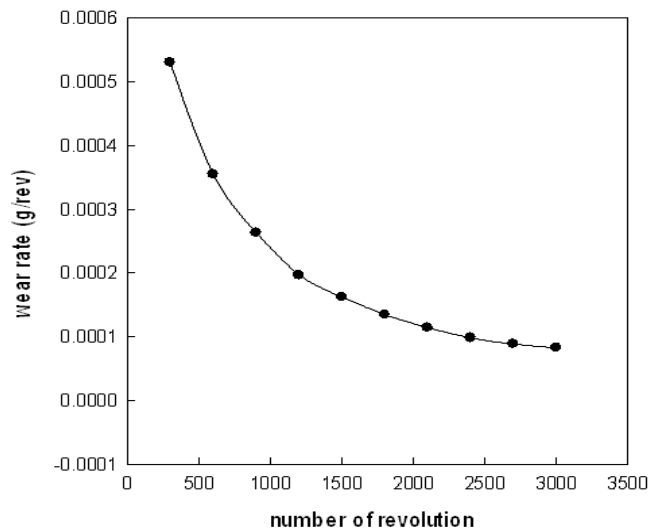


Figure 3. Change of wear rate along the revolution of specimen rotation for SBR rubber compound: normal force; 1kg, temperature; 25°C, rotation speed: 10rpm.

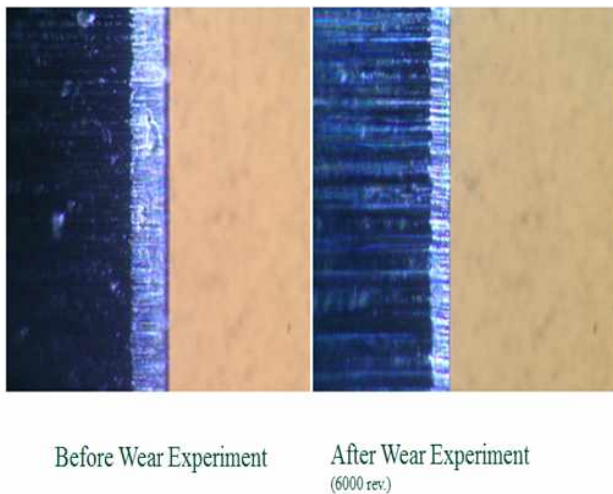


Figure 4. Comparison of knife-blade before and after wear test (6000 rev).

고정하였으며 새로운 칼날을 이용하여 시작된 마모실험은 그림에서 확인한 것처럼, 마모초기에는 칼날의 날카로움으로 인해 매우 높은 마모속도를 보였으나 마모가 진행될수록 마모속도가 점진적으로 둔화되어 비교적 일정한 마모패턴이 형성되는 1000회전 이상의 회전 수에서는 마모속도의 변화 폭이 마모초기에 비해 크지 않음을 알 수 있었다. Figure 4에는 마모전과 마모후의 칼날을 반사현미경 (Carl Zeiss, DE/AXOILAB-A)을 이용하여 20X/0.40의 배율로 확대 비교하였다. 그림에서 보는 것처럼, 최초의 예리한 마모칼날이 고무시편을 접촉한 상태에서 6,000 회전의 마모실험을 거친 후 그 칼날이 상당부분 마멸되어 무더진 현상을 확인할 수 있었다.

칼날 마모에 의한 고무시편의 마모속도 변화에 대한 예비실험 결과를 바탕으로 표준 마모·마찰 시험절차에서 예비마모조건을 설정하였다. 칼날과 고무시편의 예비 마모는 2 kg 하중에서 10 rev/min의 회전속도로 1,000 회전까지 고무시편을 마모시켜 칼날 예비마모와 고무시편의 패턴을 형성하도록 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 마찰일 및 마모속도 결정

칼날형 마모·마찰 시험기를 이용한 기존의 배합고무 마모시험 방법에 따르면 마모속도 결정은 마모에 의해서 손실된 고무시편의 무게를 측정하여 회전수로 나누어 결정한다. 본 연구에서는 마모칼날의 이동거리 측정 결과를 무게단위로 환산하여 마모속도를 결정하는 새로운 시험방법을 채택하였다. 시편의 마모손실 무게를 측정하여 마모속도를 결정하는 방법은 주기적으로 실험을 멈추고 손실무게를 측정해야 한다. 이 과

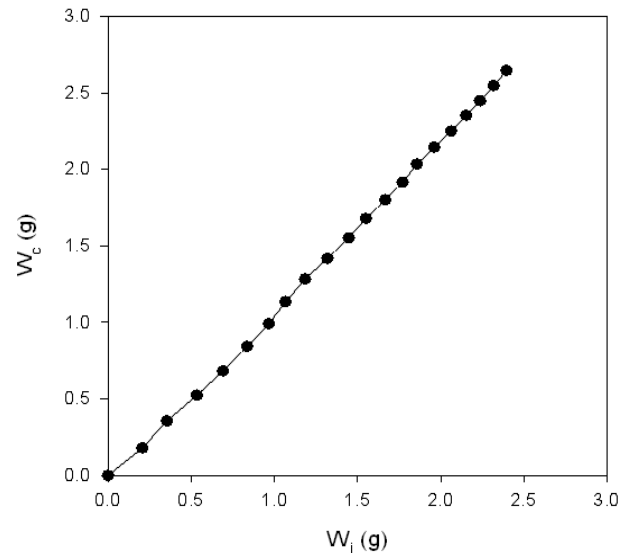


Figure 5. Correlation between the weight loss, W_c , calculated from the knife-blade movements and the weight loss, W_i , by intermittent measurements during abrasion experiment.

정에서 새로운 마모조건이 형성되고 마모실험에 영향을 미쳐 결과적으로 오차를 유발하는 단점을 야기할 수 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 개선된 실험방법이 칼날 이동거리 측정을 통한 마모속도의 결정이다. 이동거리 측정방법은 연속적인 마모실험을 통해서 마모손실 무게측정이 안고 있는 단점을 피할 수 있는 장점을 제공한다. Figure 5에는 고무시편이 마모에 의해 손실된 무게를 직접 측정된 결과(W_i)와 포텐시미터를 통해 측정된 칼날의 이동거리를 무게단위로 환산한 결과(W_c)를 비교하여 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼, 주기적으로 측정된 마모손실 무게의 변화량과 마모칼날의 이동거리 측정결과로부터 환산하여 얻은 마모손실 무게를 비교하였을 때 상호 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 포텐시미터를 이용하여 측정된 칼날 이동거리는 식 (1)을 이용하여 시편의 마모손실 무게로 환산하였다.

$$W_c = L_m \pi \rho (r_o^2 - r_i^2) \quad (1)$$

여기서 L_m 은 마모손실에 따른 칼날의 이동거리를 나타내며, ρ 는 고무시편의 밀도, r_o 와 r_i 는 시편의 외부와 내부 반지름을 각각 나타낸다. 그림에서 보여주는 것처럼 W_i 와 W_c 를 회전수에 대해 비교한 결과 두 값이 일치하는 것을 볼 수 있었다. 따라서 본 연구를 통해 새로 개발된 마모·마찰 시험기는 시험 중 주기적인 마모손실 무게측정이 아닌 단지 연속적인 마모이동거리측정으로 마모속도를 결정할 수 있는 대안을 제시하게 되었다. 칼날의 이동거리를 마모손실 무게로 환산된 W_c 로부터 마모속도는 식 (2)를 이용하여 결정하였다.

$$R_w = \frac{W_c}{n} \quad (2)$$

여기서 R_w 는 칼날의 이동거리로부터 결정된 마모속도이며, n 은 회전수를 나타낸다. 본 연구에서는 SBR 배합고무의 마모속도와 마찰에너지의 상관관계를 조사하기 위해 마모·마찰실험에서 얻어진 마모속도를 단위면적당 걸린 마찰일, 즉 W_f ($J/m^2/rev$)의 함수로서 나타내었다. 실린더형 마모시편에서 마찰력은 식 (3)을 이용하여 구할 수 있으며, 시편의 평균반경인 $r_m[(r_o+r_i)/2]$ 에서 작용하는 힘을 구해야 한다.

$$F = \frac{M}{2r_m} \quad (3)$$

여기서 F 는 마찰력 (frictional force, N), M 은 마찰토크 (frictional torque, Nm)이다. 마찰일, 즉 W_f (frictional work input)은 식 (4)와 같이 칼날의 중간지점에서 걸리는 힘을 시편의 단위면적으로 나누어줌으로써 얻을 수 있다.

$$W_f = \frac{M}{r_o^2 - r_i^2} \quad (4)$$

2. 마찰에너지와 마모속도와의 상관관계

Silica와 carbon black은 배합고무의 보강을 위해 첨가하는 대표적인 충전제로 실험에 사용된 마모시편은 충전제 함량을

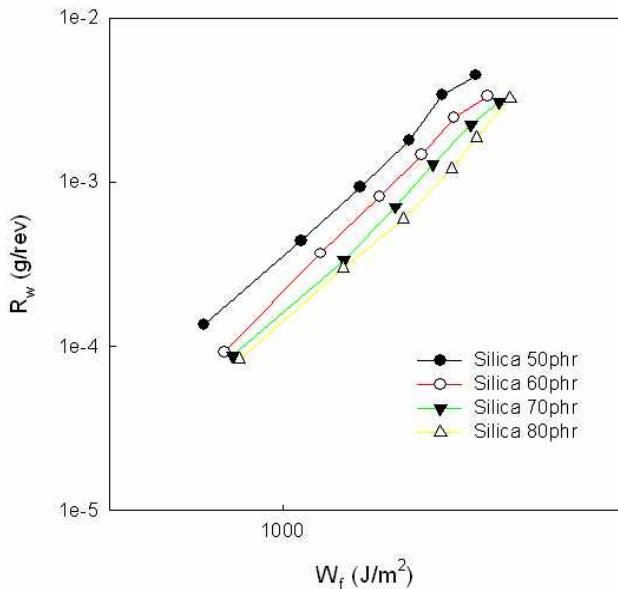


Figure 6. Plot of wear rate, R_w , against frictional work input, W_f , for Silica reinforced SBR rubber compounds.

50, 60, 70, 80 phr로 달리하여 배합하였다. 마찰일 증가에 따른 마모특성을 평가하기 위해 1~6 kg의 하중 하에서 마모실험을 실행하였다. 예비마모는 10 rev/min의 회전속도로 1000 회전 동안 진행 하였고, 실험 온도는 25°C를 유지하였다. 예비마모가 끝난 후 10 rev/min의 회전속도로 최대 4000 회전까지 마모 실험을 실행하여 마찰일과 마모속도를 측정하였다. Silica 50 phr이 첨가된 SBR 배합고무의 경우 4 kg 이상의 하중에서 빠른 마모속도를 나타냈으며 4000 회전 이전에 시편이 모두 마모되어 실험을 종료하였다. 이처럼 높은 하중 하에서 낮은 마모 저항성을 가진 고무시편의 경우 마모가 모두 이루어지는 지점까지의 순간적인 마모속도를 측정하였다. Figure 6은 실리카 함유 SBR 배합고무에 대해, 그리고 Figure 7은 카본블랙 함유 SBR 배합고무에 대해 각각 마모속도(R_w)와 마찰일(W_f)의 상관관계를 log-log 스케일로 보여주고 있다.

Silica와 carbon black을 함유한 고무시편에서 일정한 마찰일, 즉 시편에 수직적으로 가한 하중을 일정하게 유지하였을 경우, 이들 충전제의 함량이 증가할수록 마모속도는 상대적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 마찰일이 증가함에 따라 마모속도가 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 이를 수식으로 표시하면 다음의 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_w = k W_f^\alpha \quad (5)$$

여기서 k 와 α 는 각각의 배합고무가 갖는 마모·마찰 특성 상수이다. 실험결과에서 마찰일과 마모속도와의 상관관계, 즉 식 (5)로 표현되는 power law는 모든 배합고무에 적용되기 때문에 하나의 표준화된 시험방법으로 널리 활용될 수 있을 것

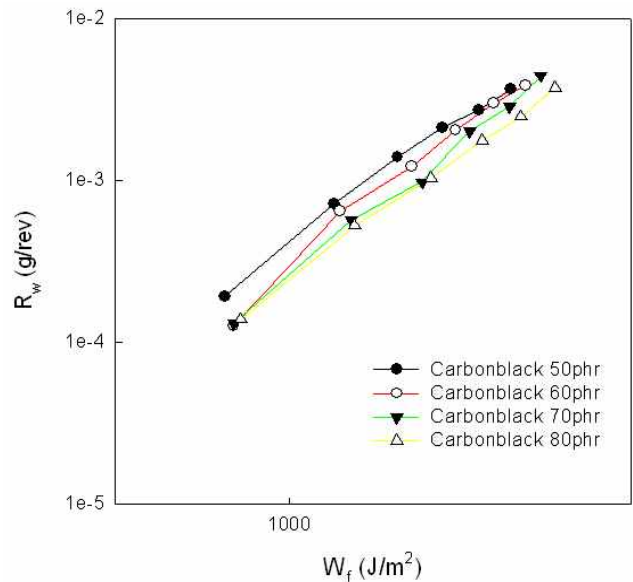


Figure 7. Plot of wear rate, R_w , against frictional work input, W_f , for C/B reinforced SBR rubber compounds.

으로 평가된다. 특히 식 (5)의 지수 α 는 Figure 6에 나타난 직선의 기울기에 해당되는 값으로 배합고무의 마모특성을 나타내는 중요한 지표가 된다.

IV. 결론

본 연구에서는 실리카와 카본블랙을 첨가한 SBR 배합고무에 대해 칼날형 마모시험기를 이용하여 마찰 및 마모특성을 조사하였다. 마찰일이 증가할수록 마모속도가 증가하였으며 마모속도와 마찰에너지 사이에는 power law 관계를 보여 주었다. 배합고무의 마모시험 결과, 마모손실 무게측정을 통해 마모속도를 결정하는 간헐적인 측정 방법 대신 마모손실에 따른 칼날 이동거리 측정으로 연속 실험이 가능하였으며 비교적 정확한 마모속도를 결정할 수 있었다. 마모칼날 이동거리 측정방법을 도입한 칼날형 마모-마찰 시험기는 향후 배합고무에 대한 보편화된 마모시험 방법으로서의 활용 가능성을 보여주었다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 전남대학교 연구년교수연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사합니다.

References

1. M. E. Semmaan, C. A. Quarles, and L. Niciel, "Carbon black and silica as reinforcers of rubber polymers: Doppler broadening spectroscopy results", *Polym. Degrad. Stab.*, **75**, 259 (2002).
2. S. S. Choi, B. H. Park, and H. Song, "Influence of filler type content on properties of styrene-butadiene rubber(SBR) compound reinforced with carbon black or silica", *Polym. Adv. Technol.*, **15**, 122 (2004).
3. B. B. Boonstra, "Role of particulate fillers in elastomer reinforcement: a review", *Polymer*, **20**, 691 (1979)
4. G. Kraus, "A carbon black structure-concentration equivalence principle. application to stress-strain relationships of filled rubbers", *Rubber Chem. Technol.*, **44**, 199 (1971).
5. C. k. Hong, H. Kim, C. Ryu, C. Nah, Y. I. Huh, and S. Kaang, "Effect of particle size and structure of carbon blacks on the abrasion of filled elastomer compounds", *J. Mater. Sci.*, **42**, 8391 (2007).
6. A. Schallamach, "Friction and abrasion of rubber", *Wear*, **1**, 384 (1958).
7. K. A. Grosch, "The relation between the friction and visco-elastic properties of rubber", *Proc. Roy. Soc.*, **A274**, 21 (1963).
8. A. Schallamach, "Abrasion of rubber by a needle", *J. Polym. Sci.*, **9**, 385 (1952).
9. A. Schallamach, "Recent advances in knowledge of rubber friction and tire wear", *Rubber Chem. Technol.*, **41**, 209 (1968).
10. A. N. Gent, C. T. R. Pulford, "Mechanisms of rubber abrasion", *J. Appl. Polym. Sci.*, **28**, 943 (1983).
11. A. N. Gent and C. Nah, "Abrasion of rubber by a blade abrader: effect of blade sharpness and test temperature of selected compounds", *Rubber Chem. Technol.*, **69**, 819 (1996).
12. C. Nah, J. Cho, and S. Kaang, "An Improved test method of abrasion of rubber in a blade abrader", *Polym. Test.*, **17**, 11 (1998).
13. J. H. Youn and S. Kaang, "Wear behavior of C/B filled NR compounds using a blade-type abrader", *Elast. Compos.*, **49**, 73 (2014).