



칼날형 마모시험기를 이용한 C/B충전 NR 배합고무의 마모거동

윤재훈* · 강신영†

전남대학교 응용화학공학부, *전남대학교 신화학소재공학과
접수일(2014년 2월 19일), 수정일(2014년 2월 28일), 게재확정일(2014년 3월 6일)

Wear Behavior of C/B filled NR Compounds using a Blade-type Abrader

J. H. Youn* and Shinyoung Kaang†

*School of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea

**Department of Advanced Chemicals and Engineering, Chonnam National University, Gwangju, 500-757, Korea
(Received February 19, 2014, Revised February 28, 2014, Accepted March 6, 2014)

요약 : 칼날형 마모·마찰 시험기를 이용하여 NR배합고무의 마모 거동을 조사하였다. 온도, 하중, 그리고 회전속도를 변화시켜 마모속도에 미치는 영향과 열화된 배합고무의 마모 현상에 대해 평가하였다. 시편의 회전속도와 수직 하중이 증가할수록 마모속도가 증가하였다. 실험온도가 증가할수록 마찰계수가 감소하였고, 마모속도도 감소하였다. 마찰에너지와 마모속도 사이에 Power-Law 관계를 나타냈으며 마모속도는 열화에 의해 급격히 증가하였다. 시편의 마모패턴은 마모조건에 의해 영향을 받았으며 특히 수직 하중을 변화시켰을 때 마모용기(ridge)간격에 큰 변화를 보였다. 배합고무의 마모속도를 결정하는데 간헐적 마모손실 무게측정 대신 칼날형 마모시험기를 이용한 연속적인 마모이동 거리측정으로 대체할 수 있음을 확인하였다.

ABSTRACT : Friction and wear behaviors of natural rubber(NR) compounds were investigated using a blade-type abrader. The effects of temperature, normal load, and rotation speed on wear rate were studied, and wear behaviors of deteriorated compounds were also evaluated. As the rotation speed of specimen and the normal load to specimen increased, the wear rate increased. However, as the experimental temperature increased, the frictional coefficient decreased and the wear rate decreased accordingly. It was found from the wear studies that a power-law relation works between the frictional work input and the wear rate. It was observed that the wear rate dramatically increased by the degradation of the rubber specimen. The wear pattern was developed and the bigger ridge space of the pattern was observed usually in the higher normal load applied. In determining the wear rate of rubber compound, the continuous measurements of wear distance using the blade-type abrader could be successfully used instead of intermittent measurements of wear-loss weight.

Keywords : friction, wear, test method, blade-type abrader, natural rubber compound

I. 서론

타이어와 신발 등의 고무제품들은 마모·마찰 현상이 수반된 가혹한 동적 조건에 노출되어 있다. 배합고무의 마찰·마모 특성은 이들 고무제품의 사용수명과 직접 연관되어 있어 매우 중요한 요소로 인식되고 있다. 따라서 다양한 가혹 조건에서의 마찰·마모 거동 연구는 필수적이다.

본 연구에서는 카본블랙(carbon black, C/B)으로 보강된 NR (natural rubber) 배합고무를 대상으로 다양한 조건에서 마모거동을 조사하였다. 실험에서 사용된 NR은 특히 비교적 내마모

성, 내인열성, 내피로성 등, 기계적 물성이 우수하며¹, 이런 성질 때문에 대형차용 타이어, 승용타이어의 카카스, 베어링 등에 많이 사용되고 있다.²

고무재료의 마모·마찰 현상에는 물리적, 화학적 반응이 복합적으로 작용한다. 따라서 이들 현상에 대한 명확한 규명이 힘들뿐 아니라 주변 환경의 영향에도 민감하게 반응한다. Schallmach와 Grosch는 이러한 복잡한 마모·마찰 메커니즘을 밝히는데 크게 기여하였으며³⁻⁸, Gent 등은 인열에너지 이론을 기초로 칼날형 마모시험기를 제작하여 마모 현상을 연구하였다.⁹⁻¹¹ 본 연구에서는 자체 설계 제작한 칼날형 마모시험기를 이용하여 carbon black이 충전된 NR 배합고무의 마모·마찰 특성을 평가하였다.^{12,13}

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

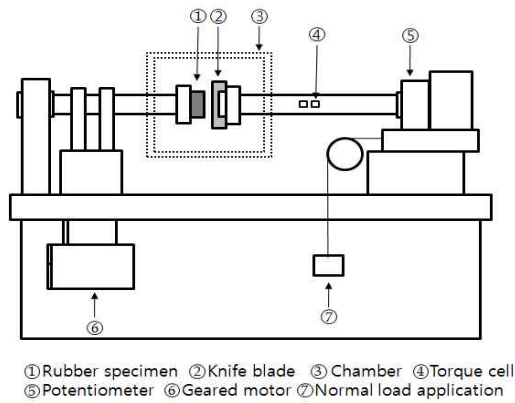


Figure 1. A schematic diagram showing knife-blade wear machine.

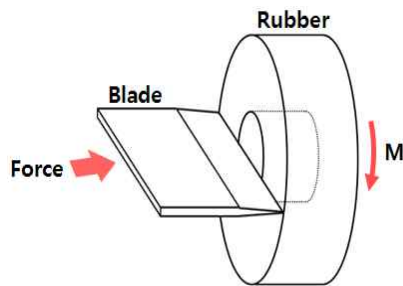


Figure 2. A schematic diagram showing rubber specimen in contact with the knife-blade.

II. 실험

1. 칼날형 마모시험기 설계

본 실험에서는 인열에너지 이론을 기초로 Gent와 Nah에 의해 설계된 칼날형 마모시험기를 근간으로 새로운 칼날형 마모시험기를 제작하였다. 실험에서 사용된 마모시험기의 개략도와 실제 접촉모습을 Figure 1와 Figure 2에 나타내었다. 고정된 금속 칼날에 의해 접촉하고 있는 고무시편의 회전으로 마모될 수 있도록 설계되었으며, 마모특성에 영향을 미치는 요소인 수직 하중, 시편 회전속도, 마찰력, 분위기 온도 등의 시험조건들을 변경할 수 있도록 하였다.

기존의 마모무게 측정 방법에서는 구간을 설정하여 간헐적으로 손실된 고무량을 측정하는 불편을 수반한다. 반면에 칼날형 마모시험기는 포텐시미터를 장착하여 시편의 마모에 따라 장착된 칼날의 이동거리를 측정함으로써 연속적인 마모속도 측정이 가능하도록 설계되었다.

2. 시편 준비

NR 배합물의 조성은 Table 1에 나타내었다. 고무배합은 3단계로 나누어 진행하였다. 먼저 2.2mm 간격의 Two-roll mill(C.W Brabender Instruments, PM-300, model #138-B)을 이용하여 50°C에서 5분간 밀링하였다. 다음으로 Internal Mixer(Namyang Co.

Table 1. Formation of Natural Rubber Compound.

Composition	Loading(phr)
NR	100
Carbon black (N330)	50
Stearic acid	3
Zinc oxide	5
RD	2
6PPD	2
Sulfur	2.5
TBBS	0.6

Inc, Korea)에 투입하여 30초 동안 기계적으로 분해시킨 후 TBBS, Stearic acid, Zinc oxide, Carbon black을 투입하여 5분 동안 배합하였으며, RD, 6PPD, Sulfur를 투입하여 총 8분 동안 배합하였다. Rotor 속도는 40rpm, 온도는 120°C로 유지하였다. 배합된 고무를 70°C에서 8rpm으로 회전하는 2.2mm 간격의 Two-roll mill에 넣고 3/4-cutting 2분, end-wise 6회 시행하였다.

가교시간은 Oscillatory Disk Rheometer(Benz, Model #674)를 이용하여 가교온도, 즉 145°C에서 얻은 가교 그래프로부터 결정하였으며, Cure Press(Dake, model #44-251)를 이용하여 가교하였다. 본 실험에서는 시편의 적정 가교 시간이 t_{90} 이지만 시편의 두께를 참조하여 t_{100} , 즉 22분 동안 가교하였다. 가교시편은 마모, 인장, 경도 측정의 목적에 따라 각각 다른 형태로 제작하였다.

3. 마모 실험

3.1 예비마모

고무재료는 마모 칼날의 예리함(sharpness)에 따라 마모거동이 크게 영향을 받는다. 그 영향을 최소화하기 위해 예비마모를 실시하였다. 예비마모는 새 칼날을 이용하여 시편의 회전속도 10rpm, 온도 25°C, 하중 2kg의 조건에서 실시하였다. 시편의 회전 수 증가에 따른 NR 배합고무의 마모속도 변화를 Figure 3에 나타내었다. 마모 초기에는 높은 마모속도를 보였으나 실험이 진행될수록 마모속도는 점진적으로 감소하여 일정 패턴이 형성되는 2000회전 이상의 회전 수에서는 마모속

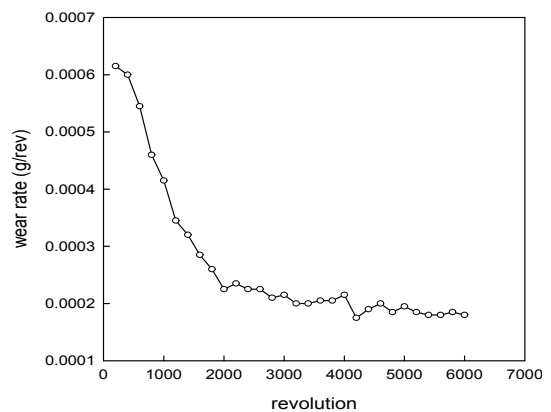


Figure 3. Change of the wear rate along the revolution of specimen rotation : normal load:2 kg, temperature: 25°C, rotation speed:10rpm.

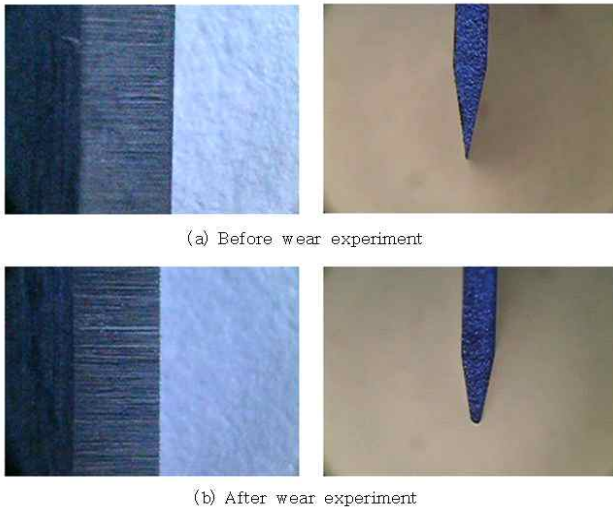


Figure 4. Comparison of knife-blade (a) before and (b) after wear experiment.

도의 변화 폭이 크지 않음을 알 수 있었다. 예비마모를 통해 마모속도가 평형상태에 도달하는 지점, 즉 분위기 온도 25℃, 하중 2kg, 회전속도 10rpm, 회전 수 2000rev의 예비마모 조건을 설정하였다. 예비마모가 끝난 칼날의 여러 형태를 Reflected Light Microscope(Carl Zeiss, DE/AXIOLAB-A)를 이용하여 10×/0.2의 배율로 측정된 사진을 Figure 4에 나타내었다.

3.2 마모실험 조건 설정

비교적 짧은 시간 내에 마모 손실량과 속도를 얻기 위해서는 가혹한 마모조건이 필요하다. 고무시편의 회전속도가 마모 거동에 미치는 영향을 조사하기 위해 하중 3kg, 온도 50℃의 조건에서 고무시편 회전속도를 5, 10, 20, 35rpm으로 달리하여 최대 4000회전까지 마모 실험을 실행하여 마찰일과 마모속도를 측정하였다.

분위기 온도는 배합고무의 마모거동에 지대한 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 마모거동에 대한 분위기 온도의 영향을 평가하기 위해 온도를 25, 50, 75, 100℃로 설정하여 마모실험을 실행하였다. 하중 3kg과 20rpm 회전속도 조건에서 분위기 온도를 달리하여 최대 4000회전까지 마모 실험을 실행하였고 온도 변화가 마모속도에 미치는 영향을 조사하였다.

실험 칼날에 가해지는 수직하중이 증가하면 칼날과 실험시편 사이에서 발생하는 마찰일이 증가된다. 여기서는 수직하중을 변화시켜 마모거동을 평가하였다. 온도는 25℃로 유지하였으며, 회전속도 10rpm 하에서 시편에 가해지는 수직하중을 1, 2, 3, 4, 5, 6kg으로 변화시켜 최대 4000회전까지 마모 실험을 진행하였다.

4. 마찰일 및 마모속도 결정

칼날형 마모시험기에서 마모속도를 결정하는 방법으로 고무시편이 칼날에 의해 손실된 무게를 측정하고 이를 회전수로

나누어 주는 방법과 고무시편의 마모에 따른 칼날의 이동거리를 측정하여 무게단위로 환산하는 방법이 있다. 첫 번째 방법은 마모속도를 측정하기 위해 실험을 일정 회전 수 마다 멈춰 시편의 마모손실 무게를 측정해야 한다. 두 번째 방법으로 시험장치에 포텐시미터를 설치하여 고무시편이 마모되어 칼날이 이동하는 거리를 측정하여 마모속도를 결정하는 방법이 있다. 첫 번째 방법을 통해 얻은 마모량(W_i)과 두 번째 방법을 통해 얻은 칼날이 이동하는 거리를 식(1)을 통해 변환한 마모량(W_c)을 비교하여 Figure 5에 나타내었다.

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

그 결과 두 값의 상호관계를 나타내는 기울기 값이 1.02임을 확인하였다. 따라서 기존의 무게측정 실험 방법 대신 칼날의 이동거리 측정만으로 연속적인 마모속도의 결정이 가능하다는 결론을 얻을 수 있었다.

4.1 마찰일 측정

본 실험에서는 칼날형 마모시험기에 장착된 torque cell을 통하여 실험 중 마찰토크 값을 측정할 수 있다. 마모실험 시편의 평균반경인 r_m 에서 작용하는 힘을 마찰력 F (frictional force, N)이라 할 때, 마찰력(F)은 실험에서 얻은 마찰평균 토크값 M (frictional torque, Nm)으로부터 식 (2)를 통해 얻을 수 있다.

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

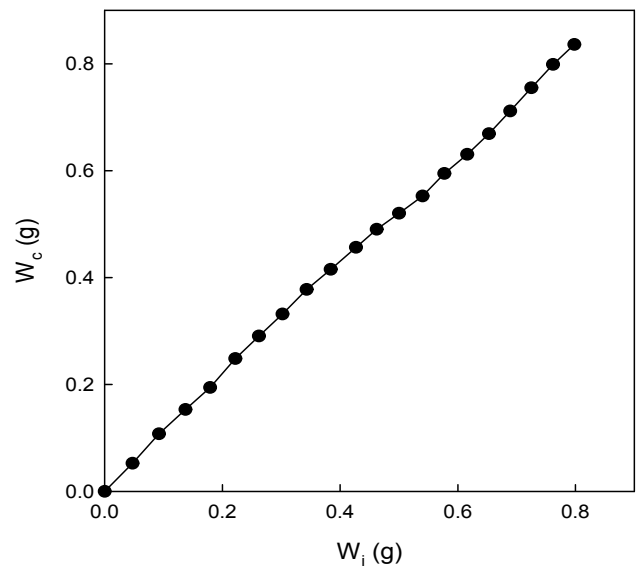


Figure 5. Correlation between wear loss weight, W_i , and calculated weight loss obtained from the displacement of knife-blade, W_c .

단위 면적당 마찰일 W_f (J/m²/rev)은 칼날의 중간지점에서 걸리는 힘을 시편의 단위면적으로 나눠줌으로써 얻을 수 있다. 그리고 마찰계수 μ 는 시편에 걸어준 하중 N 으로부터 식 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\mu = \frac{2F}{N} \quad (3)$$

4.2 마모속도 결정

이동거리 측정과정에서 마모패턴, 즉 spaced ridge에 의해 노이즈가 관찰되었다. 따라서 그래프의 추세선을 이용하여 마모속도 W_r (mm/rev)를 결정하였다. 식 (4)을 이용하여 길이단위인 마모속도 W_r (mm/rev)를 무게단위 마모속도 W_{rc} (g/rev)로 환산하였다.

$$W_{rc} = W_r \pi \rho (r_o^2 - r_i^2) \quad (4)$$

5. 노화 실험

가교된 실험시편을 오븐 (model OF-22GW, JEIOTECH)을 이용하여 100°C 조건 하에서 열노화시간을 달리하여 노화시켰다. 24, 48, 96, 192, 384, 768 시간동안 노화시간을 변화시켜 인장강도, 경도, 마모 실험을 실시하였다. 열화된 시편을 24 시간 동안 상온에 방치한 후 실험을 진행하였다. 인장특성 실험을 위해 2mm 두께의 금형으로 판재 형태의 시편을 제작하였고, 시편절단기(Toyoseiki, Japan)를 이용하여 덤벨모양 시편을

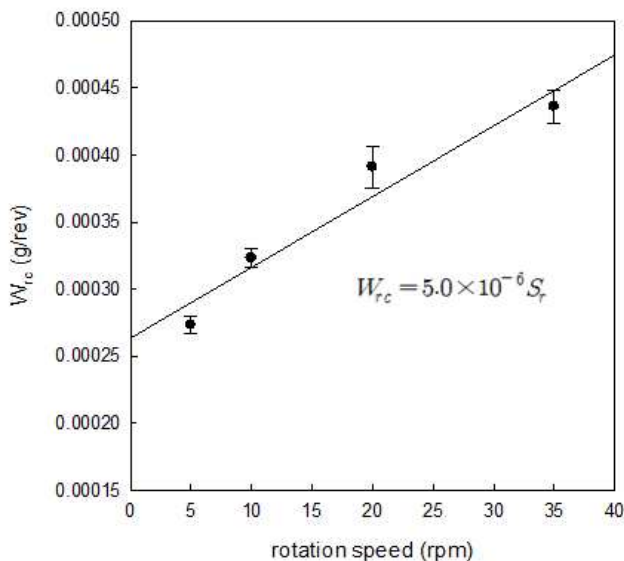


Figure 6. Plot of wear rate, W_{rc} , as a function of rotation speed for NR rubber compound.

준비하였다. 열노화시간을 달리하여 노화시킨 실험시편은 만능인장실험기(Universal Tensile Tester, Shimadzu Autograph AGS-500D, Japan)를 이용하여 인장강도와 신율을 측정하였다. 인장실험은 crosshead speed 100mm/min, 25°C의 조건에서 실시하였다. 경도를 측정하기 위해 금속 몰드를 이용하여 실험 시편을 제작하였다. 열노화 시간을 달리하여 노화시킨 실험시편을 IRHD 경도계(Bareiss, Germany)를 이용하여 경도를 실온에서 측정하였다. 시편의 경도는 IRHD 경도계를 이용하여 3번 측정 후 평균하였다. 열노화 시간을 달리하여 노화시킨 마모 시편의 마모속도를 측정하였다. 실험은 상온에서 회전속도 10rpm, 하중 3kg 조건 하에서 실시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 회전속도가 마모거동에 미치는 영향

칼날형 마모시험기를 이용하여 가혹한 마모조건 중 시편의 회전속도에 변화를 주어 그에 따른 마모거동을 연구하였다. 예비마모를 실시한 후, 분위기 온도 50°C, 3kg 하중에서 시편의 회전속도를 5, 10, 20, 35 rev/min 으로 설정하여 마모속도를 측정하였다. 실험의 재현성 평가를 위하여 동일 실험을 5회 반복하여 마모속도를 결정하였다. 고무시편의 회전속도에 따른 마모속도 변화를 Figure 6에 나타내었다. 배합고무의 마모속도는 시편의 회전속도에 의해서 절대적 영향을 받으며 회전속도의 증가에 따라 마모속도는 비교적 선형적으로 증가하였다. 여기서 마모는 예리한 칼날에 의한 물리적 절단뿐만 아니라 칼날과 고무시편 접촉계면에서의 마찰열에 기인한 것으로 판단된다.

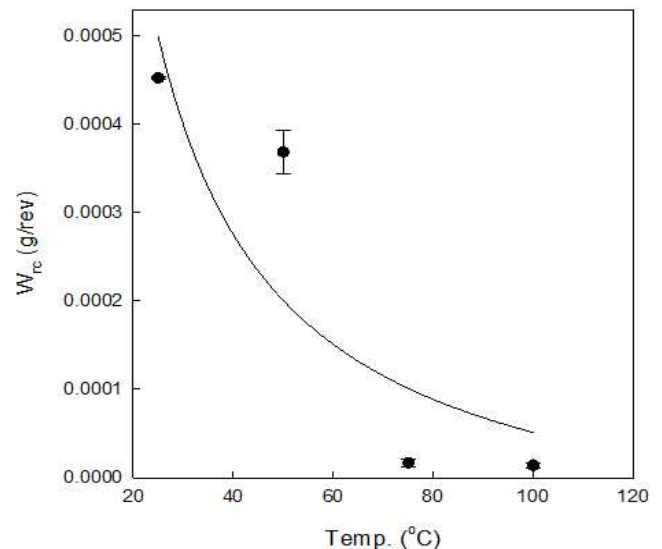


Figure 7. Plot of wear rate, W_{rc} , as a function of test temperature for NR rubber compound.

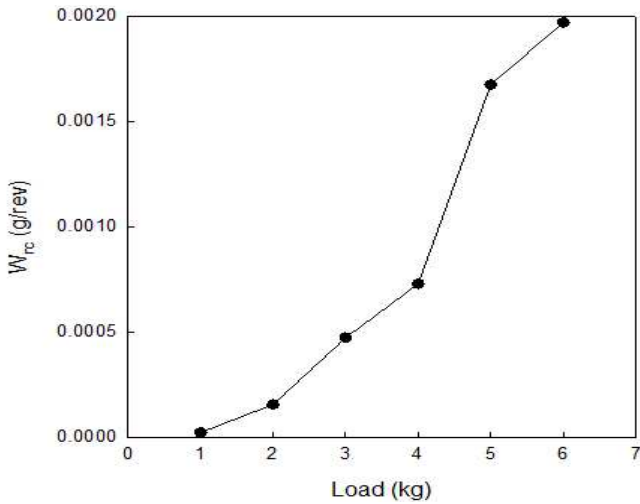


Figure 8. Plot of wear rate, W_{rc} , as a function of applied load to rubber specimen.

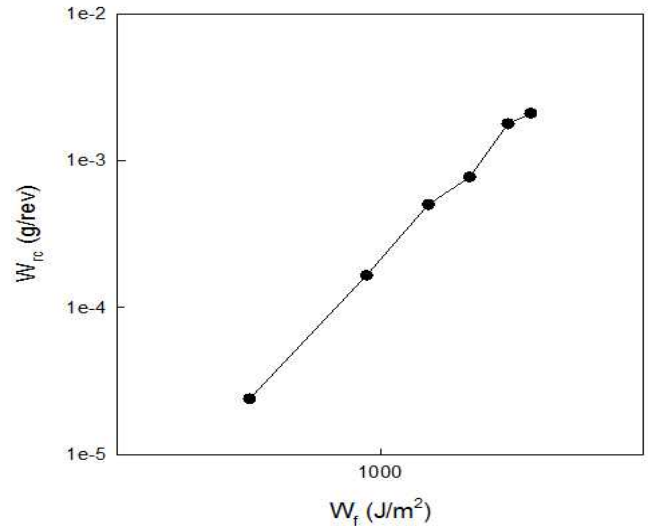


Figure 10. Plot of wear rate, W_{rc} , as a function of frictional work input, W_f , in log-log scale for NR rubber compound.

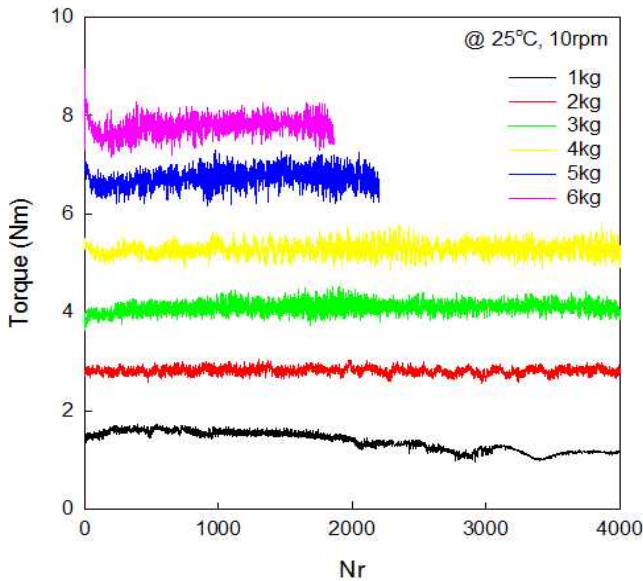


Figure 9. Plot of frictional torque as a function of revolution number under various applied loads.

2. 마모속도에 대한 온도의 영향

고무재료의 가혹한 환경중의 하나가 온도라 할 수 있다. 그 영향을 평가하기 위해 예비마모를 실시한 후, 3kg 하중, 20rev/min의 회전속도에서 분위온도를 25, 50, 75, 100°C로 설정하여 마모속도를 측정하였다. 실험결과를 Figure 7에 나타내었다. 온도가 상승함에 따라 마모속도가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있었다. 높은 온도에서 시편의 열화로 경도가 증가하였고, 결과적으로 마모칼날과 고무시편 사이의 마찰력 감소로 인해 마모속도가 떨어지는 경향을 나타낸 것으로 보인다.

3. 마찰일과 마모속도에 대한 수직하중의 영향

칼날형 마모시험기의 칼날에 주어지는 수직 하중의 크기는 칼날과 배합고무 시편 사이의 마찰일을 변화시킬 수 있다. 실험결과, 수직 하중이 증가할수록 칼날의 이동거리가 증가하였다. 이 이동거리를 마모속도로 변환하여 Figure 8에 나타내었다. 그리고 칼날형 마모시험기에 설치된 torque cell에 의해서 측정된 마찰력의 크기를 Figure 9에 나타내었다. 배합고무의 마모속도(W_{rc})와 마찰일(W_f)의 상관관계를 log-log스케일로 Figure 10에 나타내었다. 마찰일이 증가함에 따라 마모속도가 선형적으로 증가하였으며 이를 식(5)과 같이 표현할 수 있었다. 따라서 마모속도와 마찰일은 Power-Law 관계를 가짐을 확인할 수 있었다.

$$W_{rc} = k W_f^\alpha \quad (5)$$

4. 배합고무 물성에 대한 노화시간의 영향

고온에 노출되어 있는 고무제품의 경우 열에 의한 노화현상으로 물성들이 약화된다. 열에 노출되는 시간을 달리하여 열화에 따른 물성변화를 측정하여 마모현상과의 관계를 정리하였다. 노화시간을 달리하여 측정된 신율과 인장강도 값을 Figure 11에 나타내었다. 노화시간이 증가함에 따라 신율과 인장강도 값이 현저하게 감소하였다. Figure 12에는 노화시간에 따른 배합고무의 경도변화를 나타내었다. 노화 초기에는 증가하다가 곧 감소하는 경향을 나타냈고, 노화시간이 200시간이 지난 후 다시 증가현상을 보였다. 이는 열화시킨 고무배합물이 노화 초기에는 분자 사슬의 절단이 주요 열화 메커니

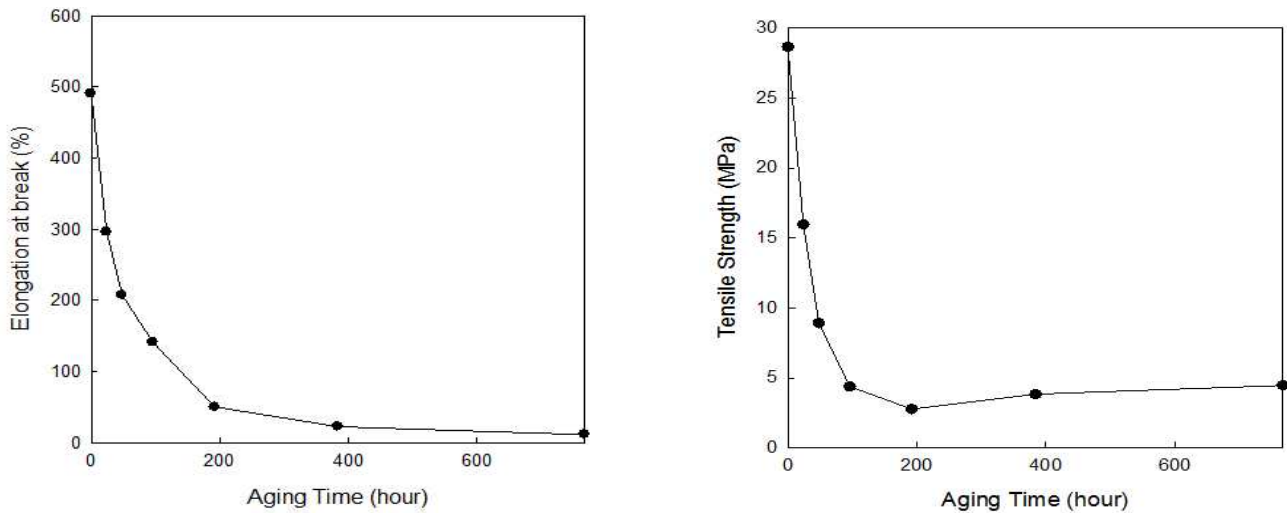


Figure 11. Variation of elongation at break (left) and tensile strength (right) with aging time for NR rubber compound.

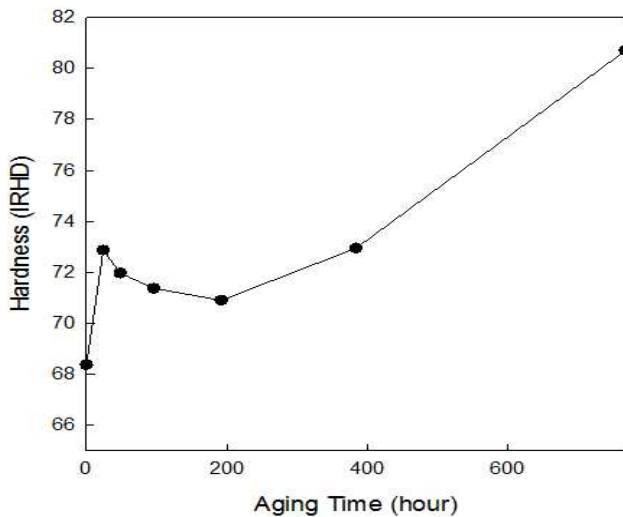


Figure 12. Plot of hardness as a function of aging time for NR rubber compound.

증으로 작동되었고 노화시간이 지속됨에 따라 추가 가교가 열화의 주 메커니즘이 된 것으로 보인다. 장시간 열노화시켰을 경우 고무시편은 고무특성을 상실한 열경화수지로 변화된 것으로 판단된다. 노화시간 변화에 따른 마모실험 결과 장시간 열노화시킨 시편의 경우 고무시편의 마모거동과 전혀 다른 거동을 보이는 것을 Figure 13을 통해서도 확인할 수 있었다. 고무시편의 경도증가로 마모칼날에 의한 마찰일이 감소되어 결국 마모감소로 귀결된 것으로 판단된다.

5. 마모 표면

칼날형 마모시험기를 통해 마모실험이 끝난 후 마모시편의 표면은 단일 방향으로 일정한 패턴의 마모형태가 나타난다.

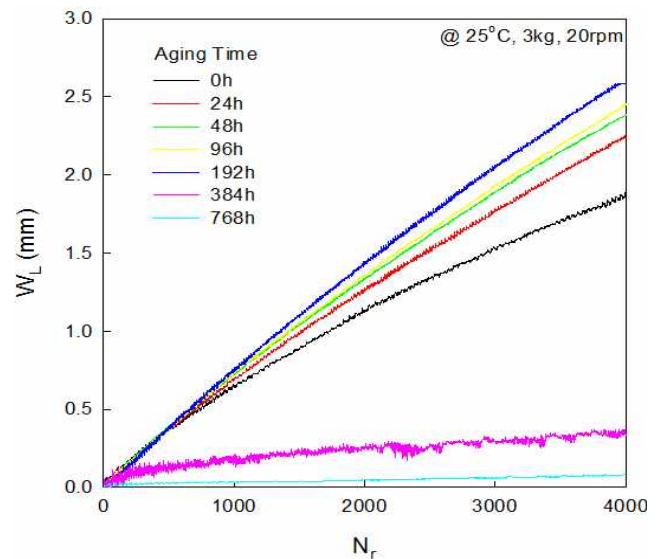


Figure 13. Plot of displacement of knife-blade as a function of revolution number under various aging times

이 마모형태는 마모조건에 따라 다르게 나타나는데 Reflected Light Microscope(Carl Zeiss, DE/AXIOLAB-A, 10×/0.2)을 이용하여 관찰하였다. Figure 14, 15, 16, 그리고 17에 시편의 회전 속도, 실험온도, 수직하중, 노화시간을 변화시켰을 때 각각의 마모표면을 나타내었다. 시편의 회전속도와 200 시간까지는 노화시간을 변화시켰을 때 패턴 자체의 모양 변화는 크지 않았다. 하지만 온도변화를 주었을 경우 낮은 온도와 높은 온도에서 마모패턴의 차이를 확인할 수 있었다. 수직하중을 변화시켰을 때 역시 마모패턴의 변화가 두드러졌으며 이는 칼날형 마모시험에서 수직하중이 마모패턴 형성에 큰 비중을 차지한다는 것을 알 수 있었다. 마모시편 표면에 하중이 증가할수록 ridge space가 넓어졌으며, 실험온도가 높을수록 그 간격이

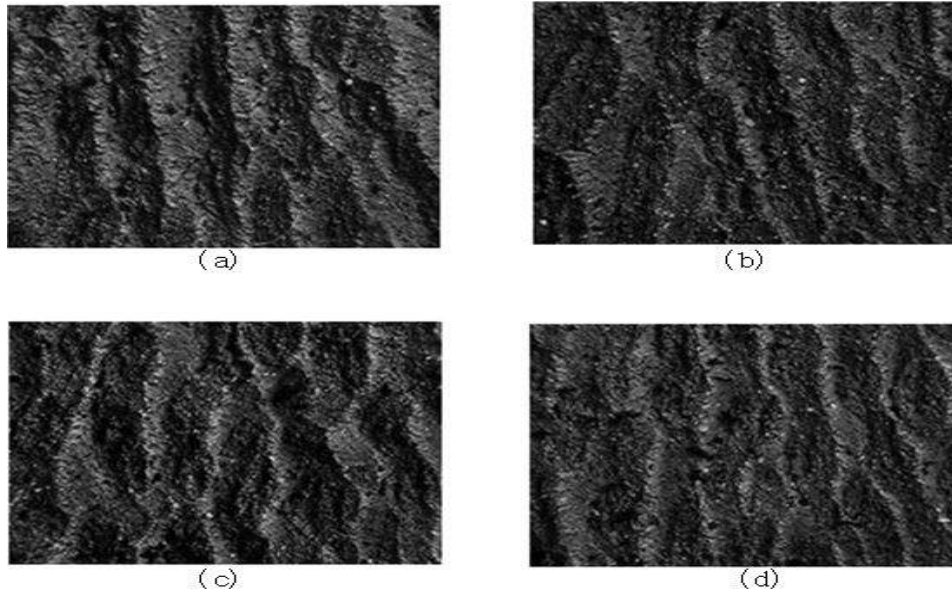


Figure 14. Worn surfaces of NR rubber compounds ($\times 10$) : rotation speed (a) 5rpm, (b) 10rpm, (c) 20rpm, (d) 35rpm.

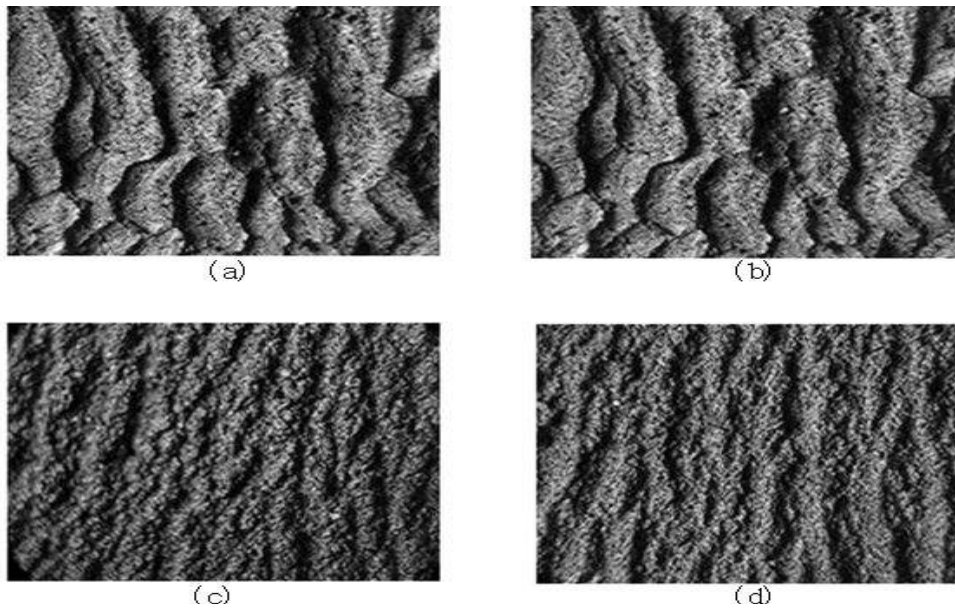


Figure 15. Worn surfaces of NR rubber compounds ($\times 10$): test temperature : (a) 25°C, (b) 50°C, (c) 75°C, (d) 100°C.

조밀해졌다. 마모표면의 ridge space 는 마모속도와 밀접한 관계가 있었으며 그 간격이 커질수록 마모속도는 증가하였다.

IV. 결론

본 연구에서는 카본블랙이 충전된 NR배합고무의 마모·마찰 특성을 칼날형 마모시험기를 이용하여 조사하였으며 그 결과는 다음과 같았다.

기존의 간헐적인 손실무게 측정 대신 칼날형 마모시험기를 이용한 연속적인 마모이동 거리 측정으로 배합고무의 마모속

도를 결정할 수 있었다. 시편의 회전속도 증가에 따라 마모속도가 현저히 증가하였고, 실험 온도가 증가할수록 마모속도가 감소되는 경향을 관찰하였다. 특히 고온에서 장시간 노화시킨 배합고무는 경도가 크게 증가하였으며 그 결과 마모속도 또한 현저하게 감소하였다. 칼날에 적용되는 수직하중이 증가할수록 마찰일이 증가하였고 따라서 마모속도 또한 증가하였다. 이를 통해 마모속도와 마찰일간의 Power-Law 관계를 확인할 수 있었다. 마모실험에서 얻어진 마모패턴은 특히 수직하중이 증가할수록, 낮은 온도일수록 spaced ridge 간격이 현저히 커졌으며 마모속도 또한 증가하였다.

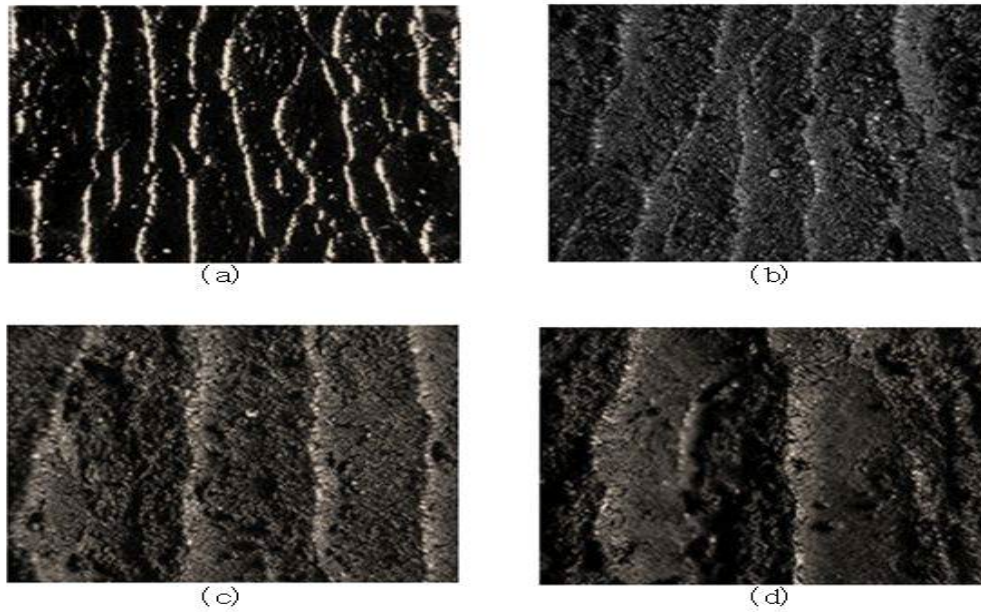


Figure 16. Worn surfaces of NR rubber compounds ($\times 10$): normal load applied (a) 1kg, (b) 2kg, (c) 4kg, (d) 6kg.

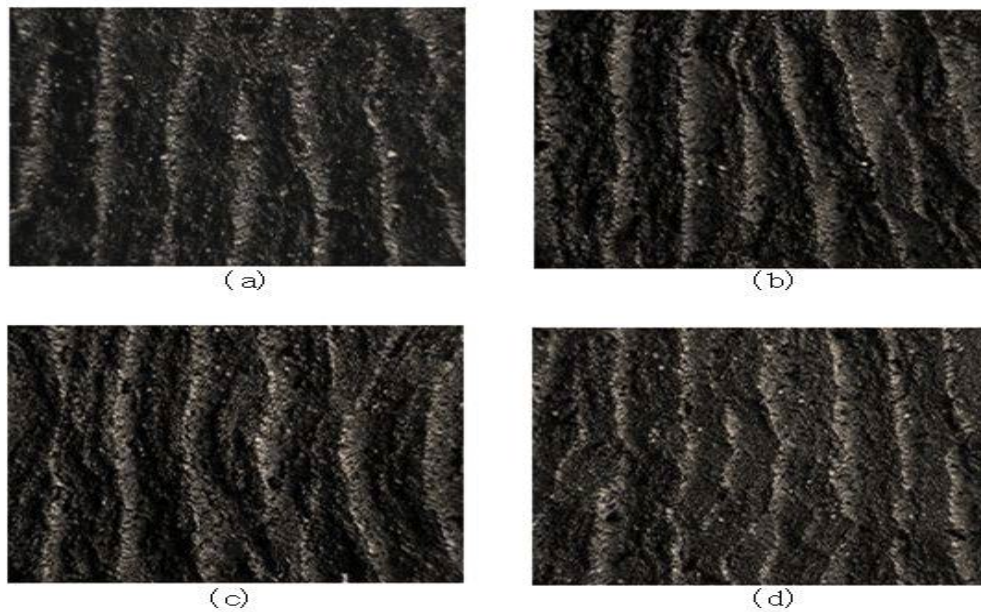


Figure 17. Worn surfaces of NR compounds ($\times 10$): Aging time @100°C (a) 24hour, (b) 48hour, (c) 96hour, (d) 192hour.

감사의 글

이 논문은 산업기술혁신사업(국가표준기술력향상사업)으로 수행된 것이며(과제번호:10041499) 이에 감사를 드립니다.

References

1. G.J. Lake and A.G. Thomas, "Natural Rubber Science and Technology" ed. by A.D. Roberts, Chap. 15, p.731, Oxford University Press, New York, 1988.
2. K.P. Jones, P.M. Lewis, P.McL. Swift, and I.R. Wallace, "Natural Rubber Science and Technology" ed. by A.D. Roberts, Chap. 8, p.283, Oxford University Press, New York, 1988.
3. A. Schallamach, "Abrasion of rubber by a needle", *J. Polym. Sci.*, **9**, 385 (1952).

1. G.J. Lake and A.G. Thomas, "Natural Rubber Science and

4. A. Schallamach, "Friction and abrasion of rubber", *Wear*, **1**, 384 (1958).
5. A. Schallamach, "Recent advances in knowledge of rubber friction and tire wear", *Rubber Chem. Technol.*, **41**, 209 (1968).
6. K. A. Grosch, "The relation between the friction and visco-elastic properties of rubber", *Proc. Roy. Soc.*, **A274**, 21 (1963).
7. G. M. Bartenev and V. V. Lavrentiv, "Friction and Wear of Polymers", Chap. 4, p.111, Elsevier North-Holland, Amsterdam, 1981.
8. A.N. Gent and C.T.R. Pulford, "Mechanisms of rubber abrasion", *J. Appl. Polym. Sci.*, **28**, 943 (1983).
9. A.N. Gent and C.T.R. Pulford, "Wear of steel by rubber", *J. Wear*, **49**, 135 (1978).
10. A.N. Gent and C.T.R. Pulford, "Wear of metal by rubber", *J. Materials Sci.*, **14**, 1301 (1979).
11. A.N. Gent and C. Nah, "Abrasion of rubber by a blade abrader: effect of blade sharpness and test temperature for 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". *Poly. Test.*, **17**, 11 (1998).
13. S. Kaang, J. Cho, S. Kim, C. Nah, and C.T. Cho, "Friction and wear of rubber compounds containing powdered poly-norbornene vulcanizate", *J. Polym. Eng.*, **18(1-2)**, 83 (1998).