

충전제의 입자크기 및 구조에 따른 고무 배합물의 마찰 마모특성

류 창 석·홍 창 국·문 채 우*·강 신 영†

전남대학교 응용화학공학부, *전남테크노파크

(2006년 7월 27일 접수, 2006년 8월 11일 수정 및 채택)

Effects of Particle Size and Structure of Fillers on the Friction and Wear Behavior of Filled Elastomer

Changseok Ryu, Chang Kook Hong,

Chae Woo Moon*, and Shinyoung Kaang†

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

*Chonnam Technopark, Sunchon 540-742, Korea

(Received July 27, 2006, Revised & Accepted August 11, 2006)

요약 : 본 연구에서는 카본블랙 충전제의 입자크기 및 구조에 따른 고무 배합물의 마찰 마모 특성을 고찰하였다. 카본블랙의 입자크기와 구조에 따라 마모속도 및 형상이 다르게 되며, 최적 마모성능을 설계하기 위해서는 충전제의 입자크기와 구조의 마모 영향도를 사용조건에 따라 고려하여야 한다. 충전제의 입자크기와 구조에 따른 마모속도(W_R) 영향도를 수준별로 고찰하기 위해 본 연구에서는 구조와 입자크기가 다른 10가지의 카본블랙을 선택하여 동일한 양을 천연고무와 배합하였다. 자체 제작한 칼날형 마찰 마모 시험기를 이용하여 마찰 마모 특성을 평가하였고, 카본블랙의 입자크기와 구조의 영향을 고려한 특성인자($\Psi = \sqrt{N_2^2 + DBP^2}$)와의 관계를 고찰하였다. 마모속도(W_R)와 마찰일(W_f)의 간에는 power-law 관계가 있었으며, 마모속도는 카본블랙의 특성인자에 역비례 관계를 보였다. 이는 카본블랙의 입자 크기가 작고 구조가 잘 발달 될수록 마모 저항특성은 향상된다는 것을 나타낸다.

ABSTRACT : The effects of the particle size and the structure of carbon blacks on the friction and the wear behavior of filled natural rubber were investigated in this study. The particle size and the structure of carbon black had a significant effect on the wear rates and the worn surface pattern, and the effect of them on abrasion resistance should be considered for the optimum design of desired wear properties. Ten carbon blacks with various sizes and structures are mixed with natural rubber in order to investigate the effects on the wear rate (W_R). The friction and the wear behavior were examined by self-made blade type friction-wear abrader, and the relation with characteristic parameter ($\Psi = \sqrt{N_2^2 + DBP^2}$), obtained from the particle size and the structure, was studied. The wear rate (W_R) had a Power Law relation with the frictional work (W_f) and it was inversely proportional to the characteristic parameter of carbon black. It means that smaller particle size and better structure development of carbon black resulted in improved abrasion resistance.

Keywords : carbon black, particle size, structure, wear, characteristic parameter

† 대표저자(e-mail : kaang@chonnam.ac.kr)

I. INTRODUCTION

고무 재료는 플라스틱 재료와 달리 높은 점탄성을 갖고 있으며, 이러한 점탄성 특성은 연속적으로 반복변형을 계속하는 제품에서 안전하게 오랜 수명을 유지할 수 있다. 사용 조건에서 만족할 만한 성능을 얻기 위해서 단순히 고무만을 사용하지 않고 보강제를 첨가하여 사용하게 된다. 현재 보강제로 가장 많이 사용되는 카본블랙(carbon black)은 그 제조 조건에 따라 다양한 입자크기(particle size), 응집체 구조(structure)와 표면 관능기 등의 성질을 갖는 것으로 알려져 있고,¹ 이러한 특징에 따라 다양한 물리적, 기계적 거동을 나타낸다. 특히 수명과 관련 있는 마모, 마찰 거동에도 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

고무재료의 마모 및 마찰 현상은 대단히 복잡한 메커니즘으로 일어나기 때문에 이를 명확히 규명하는 것은 어렵다.² 마모 및 마찰 현상은 혼합물의 조성에만 의존하는 것이 아니라 실험 조건인 하중, 온도 및 내적 상태 등에도 영향을 받는다.³ 시편의 마모형태는 카본블랙의 입자크기 및 구조에 따라 달라지며, 이는 마모속도보다는 가해지는 하중에 더 큰 영향을 받는다. 하중에 따른 마모형태는 피치의 크기로 나타낼 수 있으며, 피치와 하중 크기에 따라 마모 성능을 평가 및 예측할 수 있다. Schallamach^{3,5}는 고무재료의 마찰 마모 메커니즘을 이해하는데 많은 공헌을 했다. 또한, 마찰 및 마모에 대한 메커니즘을 좀 더 실제적으로 이해하기 위해 Gent 등^{6,7}은 칼날형 마모시험기를 이용하여 고무재료의 마모에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구는 천연고무에 구조 및 입자 크기가 다른 카본블랙 10 종류를 동량(50phr)씩 혼합하고, 그 고무배합물의 마모 및 마찰 특성을 칼날형 마모시험기를 이용하여 조사하였다. 카본블랙 입자크기 및 구조에 따라 마찰 마모 특성을 비교하였고 마모된 표면을 전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다. 영탄성율(Young's modulus), 인장강도 (tensile stress) 그리고 파단신율 (elongation at break)에 대해서도 고찰하였다.

II. EXPERIMENTAL

1. 재료

본 실험에서 사용된 고무배합물의 조성을 Table 1에 나타내었다. 점도가 균일한 천연고무(SMR 60 CV)에 충전제로 10가지의 카본블랙 (한국 컬럼비 아사)을 사용하였다. 가교 활성화제로 ZnO와 Stearic Acid (한일화학)을 사용하였으며, 가교제인 황과 축진제인 TBBS는 몬산토(주) 제품을 정제 없이 사용하였다. 충전제로 사용된 카본블랙의 입자크기와 구조별 마찰 마모 특징을 관찰하기 위해 입자크기

Table 1. Formulation of Rubber Compounds.

Ingredients	Composition (phr*)
SMR CV60 ^a	100.0
Carbon Black ^b	50.0
Znic Oxide	5.0
Stearic Acid	2.0
TBBS ^c	0.6
Sulfur	2.5

*. part per hundred of rubber

a. Standard Malaysian Rubber-constant viscosity

b. N103, N121, N220, N326, N330, N351, N358, N550, N660, N990

c. N-t-butyl-2-benzothiazole sulfenamide

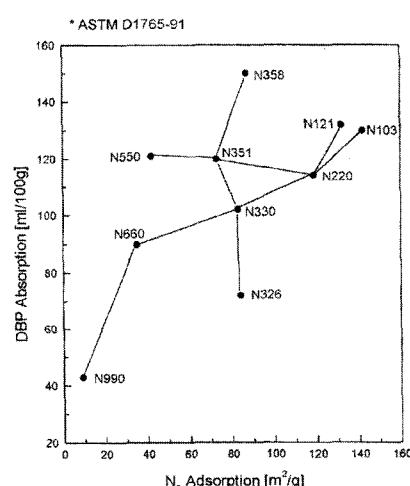


Figure 1. DBP absorption vs. N₂ adsorption of ten types of carbon blacks.

는 질소 흡착량을 이용하였으며, 구조는 대용특성인 dibutylphthalate (DBP) 흡유량을 이용하였다. 카본블랙의 구조는 단위결합체당 입자수 혹은 중량으로 정의되며, 반응조건 또는 첨가물로 조절되며 흡유 특성을 이용하여 입자와 입자 사이의 공극의 부피를 측정하므로써 구조의 발달정도를 측정한다. Figure 1은 본 실험에서 사용된 10종의 카본블랙의 DBP 흡유량과 질소 흡착량을 도시한 것이다.

2. 배합고무 제조

천연고무와 카본블랙 배합은 Farrel사의 BR-82 배합기(Banbury Mixer)를 사용하였으며 배합조성을 배합기의 75% 부피비율로 충진 하였다. 배합기의 온도는 105 °C, 로타 속도는 40 rpm으로 맞춘 후, 천연고무, 카본블랙, ZnO와 stearic acid를 투입 한 후 4분 10초 동안 1차 배합을 하였다. 황화 TBBS 를 1차 배합분과 같이 배합기에 투입한 후 배합물의 온도가 105 °C가 될 때까지 배합을 하였다. 균일한 배합을 위해 이축밀(two-roll mill, Farrel R/B[K-04])을 사용하여 5회 밀링하였다. 이때 이축밀의 온도는 100 °C, 앞과 뒷롤(roll) 속도비는 1:1.3 이었으며, 회전속도는 22 rpm이었다.

3. 샘플가교

배합된 천연고무의 가교특성 평가는 Oscillatory Disk Rheometer (Benz, Model #674)를 이용하였다. 설정된 온도에서 총 가교의 90%가 이루어질 때의 시간인 t_{90} 을 결정하였으며, 칼날형 마모시험기에 사용되는 실린더 형 고무시편에 대한 가교시간을 결정하였다. 실험용 샘플 제조는 가교 프레스 (Dake, model #44-251)를 금형과 함께 150 °C로 예열한 다음, 금형에 고무시편을 채운 후 40톤의 힘을 가하여 45분 동안 가교시켰다.

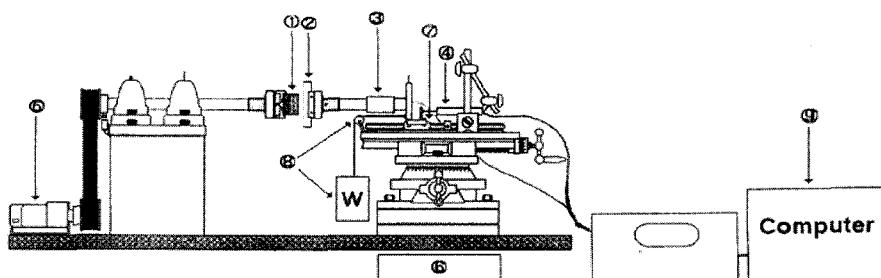
4. 인장실험

인장 시편은 14x14x2(mm)의 금형을 이용하여 150 °C에서 가교시켰다. 시편절단기 (Toyoseiki)를 이용하여 딥벨 모양의 시편을 만들고, 만능 인장시험기(Shimadzu Autograph AGS-550D)를 이용하여 인장 특성을 조사하였다. 만능인장시험기의 Crosshead Speed는 100 mm/min이었고 실온에서 진행하였다.

5 마모실험

Figure 2는 본 연구에 사용된 칼날형 마모 시험

Schematic Drawing Showing Friction and Abrasion Tester for Rubbery Materials



①rubber specimen, ②knife blade, ③strain gauges for measuring frictional torque,
④potentiometer for measuring knife movement, ⑤electric motor, ⑥power regulator,
⑦frictionless linear slider, ⑧normal load application system, ⑨strain amplifier and
personal computer

Figure 2. A schematic diagram showing the actual wear machine.

기를 보여주고 있으며, 실험에 사용된 고무 시편 모양은 Figure 3에 나타내었다. 시편의 한쪽 면은 칼날과 마찰력을 발생시키며, 다른 쪽은 알루미늄 금속판에 접착되어 있다. 칼날형 마모 시험기는 마모속도와 마찰력을 동시에 측정할 수 있도록 한 것이 특징이다. 본 실험에서는 손실무게의 측정과 함께, 마모가 일어나면서 줄어드는 고무시편의 마모된 길이를 측정하여 순간적인 마모속도를 결정할 수 있도록 포텐시오미터(Precision Potentiometer : LP-50F, Midori, Precisions)를 장착하였다. 그리고 마모가 일어나는 동안 고무시편과 마모용 칼날 사이에서 발생되는 마찰력은 스트레인 게이지(Strain Gauge Bridge Measurements Group, Inc.: CEA-06-125UW-120)를 이용하여 측정하였다. 예비 마모를 통해 시편의 표면에 일정한 마모패턴이 형성되고 마모속도가 정상상태에 도달하면 새 칼날로 교환하고 원하는 하중을 걸어줌과 동시에 모터를 10 rpm으로 회전시켜 마모속도를 측정하였다. 이때 시편에 가해준 하중은 9.8, 19.6, 29.4, 그리고 39.2N이고 하중을 증가시키면서 마모량을 측정하였다.

마모속도는 시편이 마모에 의해서 손실된 무게를 측정한 후 마모회전수로 나누어 결정하였다.

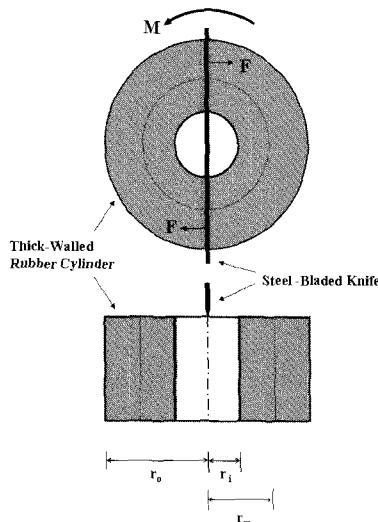


Figure 3. A schematic of a friction test sample.

$$W_R = T/n_R \quad (1)$$

여기서 W_R 은 마모속도(g/rev), T 는 마모로 손실된 무게 그리고 n_R 은 회전수이다. 실린더형 고무시편에 작용하는 마찰력을 구하기 위해서는 고무시편의 평균반경인 $r_m = (r_o + r_i)/2$ 에서 작용하는 힘을 계산한다.

$$F = M/2r_m \quad (2)$$

여기에서 F 는 마찰력 (frictional force, N), M 은 마찰 토오크 (frictional torque, Nm)이다. 마찰일(Frictional work input)은 칼날의 중간지점에서 걸리는 힘을 시편의 단위면적으로 나누어 주면 얻을 수 있다.

$$W_f = M/(r_o^2 - r_i^2) \quad (3)$$

본 실험에서 사용된 r_o 는 18.6 mm였고 r_i 는 5.9 mm였다. 마모속도는 마찰일에 의존하고⁶ 마찰일과 마모속도를 log-log scale로 도시하였을 경우 여러 가지 고무재료가 선형관계를 유지한다. 따라서 실험적으로 결정된 마모속도(W_R)와 마찰일(W_f)의 관계식은 다음과 같이 power-law 형태로 나타낼 수 있게 된다.

$$W_R = kW_f^n \quad (4)$$

여기서 k 와 n 은 고무재료의 특성을 나타내는 값들이다. 마모표면을 조사해 보면 낮은 마찰일의 수준에서는 마모량이 적고 마모표면이 비교적 매끄러우며, 높은 마찰일에서는 빠른 마모와 더불어 거친 마모표면이 관찰되어 진다. 그리고 마찰계수 μ 는 다음과 나타내어진다.

$$\mu = \frac{2F}{N} \quad (5)$$

여기에서 N 은 시편에 가해준 수직 하중이다.

III. RESULTS AND DISCUSSION

1. 카본블랙을 함유한 고무시편의 기본물성

카본블랙을 함유한 고무재료의 영탄성을은 카본블랙 함량뿐만 아니라 구조특성을 감안한 유효부피분율에 의존하는 것으로 알려져 있고, 유효부피를 계산하는 식은 여러사람에 의해 제안되었다.⁸⁻¹¹ 본 연구에서는 이를 확인하기 위해 Wang 등¹¹이 제안한 식(6)에 따라 유효부피분율(V)을 계산하였고, 이를 영탄성을과 함께 Figure 4에 도시하였다.

$$V = \phi \left(\frac{1 + 0.0182 \times CDBP}{1.60} \right) \quad (6)$$

여기에서 ϕ 는 조성물내 카본블랙의 부피분율이고 CDBP는 카본블랙이 고무에 혼입된 후의 카본블랙 구조를 나타내는 지표로서 24 MPa의 압축하중을 카본블랙에 부여한 다음 측정한 DBP 흡유량을 의미한다. 데이터 편차가 다소 있지만 대략 1차 비례관계를 나타내고 있다. 따라서 영탄성을, E 는 다음과 같은 1차 선형식으로 표현할 수 있다.

$$E = c + zV \quad (7)$$

여기서 z , c 는 상수이고 본 실험에서는 50 phr 카본블랙을 함유한 고무 배합물에 대해 z 는 31, c 는 -3.8의 결과를 얻었다. 그러나, 유효 부피분율에는 카본블랙의 구조만을 고려했으며 카본 입자크기의 영향을 고려하지 않았다. 입자크기 또한 여러 가지 물리적 특성에 영향을 미칠 것으로 판단되기 때문에 카본블랙의 특성을 나타낼 수 있는 소위 카본블랙 특성인자(Ψ)⁷를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Psi = \sqrt{N_2^2 + DBP^2} \quad (8)$$

여기서 N_2 는 카본블랙 표면에 대한 질소 흡착량이고 DBP 는 DBP 흡유량이다. 카본블랙 특성인자와 영탄성을 간의 관계를 Figure 5에 도시하였다. 역시 1차 비례관계(회귀변수 $R^2=0.96$)를 나타내었으며 카본블랙 특성인자 값과 영탄성을 관계를 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

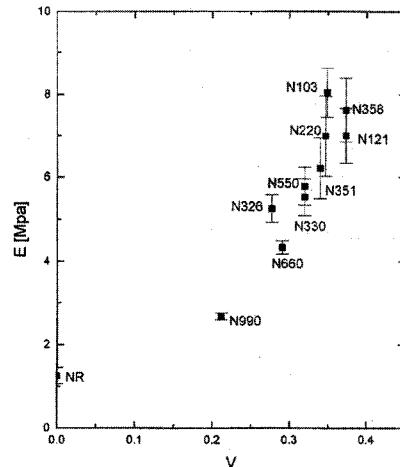


Figure 4. Young's modulus as a function of the effective volume fraction for carbon black filled NR compounds. NR represent an unfilled natural rubber compound.

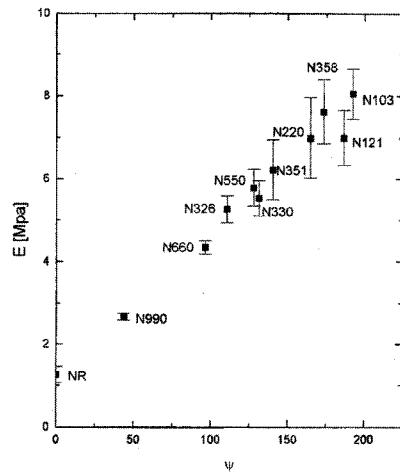


Figure 5. Young's modulus as a function of Ψ for carbon black filled NR compounds.

$$E = A + B\Psi \quad (9)$$

여기에서 A , B 는 상수이며, 본 실험에서는 결정된 값은 $A=0.18$, $B=1.19$ 였다. 인장강도에 대한 특성인자와의 관계도 1차 비례관계를 보였고 Figure 6으로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$\sigma = 0.38 \Psi + 17 \quad (10)$$

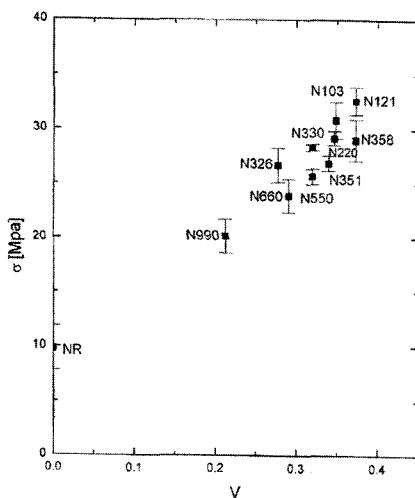


Figure 6. Tensile strength as a function of the effective volume fraction for carbon black filled NR compounds.

인장강도는 N121이 가장 큰 값을 나타내었고 N990이 가장 작은 값을 보였다. 파단신율은 입자크기가 클수록 구조의 발달정도가 낮을수록 큰 값을 나타내었다.

2. 마찰 마모 특성

2.1 카본블랙 입자 크기에 따른 영향

카본블랙의 입자크기는 배합물의 물리적 성질에 가장 큰 영향을 준다. 입자크기에 따른 마모속도 비교를 위해 본 실험에서 사용된 카본블랙을 입자가 작은 순서로 배열하면 다음과 같다.

$$\text{N103} > \text{N220} > \text{N351} > \text{N550} > \text{N990}$$

일반적으로 입자가 작으면 카본블랙 비표면적은 커진다. 따라서 N103은 고무분자와 결합할 수 있는 면적이 다른 카본블랙보다 상대적으로 크고 여러 물리적 성질들도 우수해 질 수 있다. 입자크기가 다른 카본블랙이 충전된 고무 배합물의 하중변화에 따른 마찰계수를 Figure 7에 나타내었다. 하중이 커짐에 따라 마찰계수는 작아지는 것을 보이고 있고, 입자크기가 작을수록 높은 마찰계수를 나타내었다. Figure 8은 마찰일에 따른 마찰속도를 log-log scale로 도시한 것이다. 모든 경우에 있어서 직선의 관계를 보이며, 마모속도(W_R)와 마찰일(W_f)의 간에는 식 (4)에 나타난 'Power-Law' 관계를 보

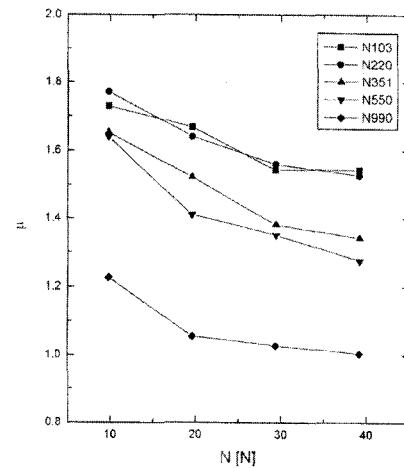


Figure 7. Frictional coefficient as a function of the normal force for carbon black filled NR compounds.

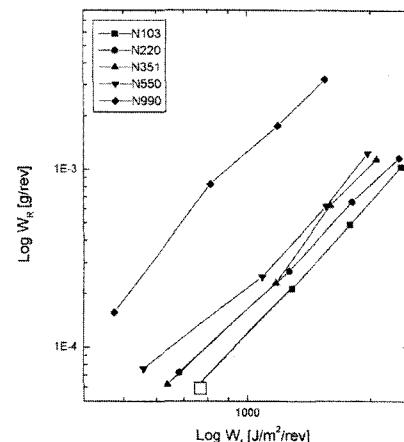


Figure 8. Wear rate vs. frictional work input for NR compounds filled with various particle sizes of carbon blacks.

이고 있다. 또한 마모속도는 카본블랙 입자가 작을수록 낮은 경향을 나타내고 있다.

입자크기에 따른 power index와 마모속도에 대한 영향을 보다 정량적으로 나타내기 위해 3수준의 마찰에너지 즉 300, 1000, 3000 J/m²/rev 조건에서 마모속도를 예측하여 k값과 n값과 함께 Table 2에 비교하였다. 카본블랙의 종류에 따라 power index (n)은 2.18 - 2.56 (평균 2.37)으로 거의 일정한 값을 보인 반면, k값은 입자 크기가 작을수록 작아졌다.

Table 2. Wear Rates of Rubber Compounds Containing Various Sizes of Carbon Blacks.

Type of Carbon Black	DBP (ml/100g)	질소흡착 비표면적 (m^2/g)	Wear Rate (g/rev) $\times 10^{-6}$			Slope, n	k
			@300 (J/m ² /rev)	@1000 (J/m ² /rev)	@3000 (J/m ² /rev)		
N103	130	142	5	111	1852	2.561	-11.6
N220	114	119	11	167	1988	2.253	-10.5
N351	120	73	9	180	2811	2.503	-11.3
N550	121	42	18	247	2701	2.179	-10.1
N990	43	9	54	1147	18652	2.538	-10.6
NR	-	-	25	1623	72447	3.457	-13.2

그러나 충진되지 않은 천연고무의 경우 $n = 3.46$ 으로써 카본블랙이 충진된 고무재료와 다른 결과를 보였다. 마모 실험 결과, 카본블랙의 입자가 작을수록 마모속도는 낮아지나 power index에는 큰 영향을 받지 않는다. 입자의 크기가 큰, 즉 보강성이 가장 낮은 N990의 경우 입자가 가장 작은 N103에 비해 마찰에너지에 따라 약 10배 이상 높은 마모속도를 보였다.

2.2 카본블랙 구조의 영향

카본블랙 구조의 발달정도는 입자크기 다음으로 고무배합물에 영향을 준다. 본 실험에서 사용된 카본블랙의 구조 발달 정도에 따라 나타내 보면 다음과 같다.

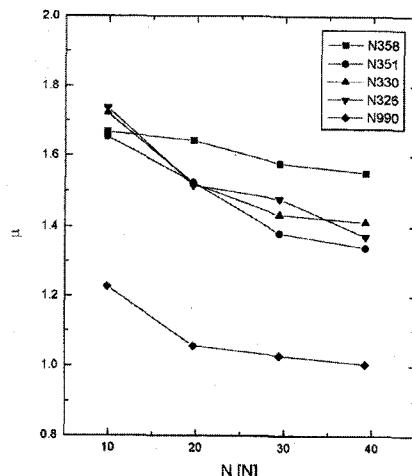


Figure 9. Frictional coefficient as a function of the normal force for NR compounds filled with various structures of carbon blacks.

N358 > N351 > N330 > N326 > N990

Figure 9는 마찰계수를 하중에 따라 나타내었는데, 하중의 증가에 따라 전체적으로 마찰계수는 낮아지는 결과를 보였고, 대체로 구조가 발달된 카본블랙일수록 높은 마찰계수를 나타내었다. Figure 10은 여러 가지 구조의 카본블랙을 함유한 배합물들의 마모속도에 대해 마찰에너지를 log-log scale로 도시한 것이다. 입자크기의 영향에서와 같이 마모속도와 마찰에너지 간에는 power law 관계식을 보이고 있으며, power index (n)도 카본블랙의 구조 발달정도에 따라 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 보다 정량적인 비교를 위하여 Table 3에 3가지 조건에서 마모속도를 비교하였다. 구조발달

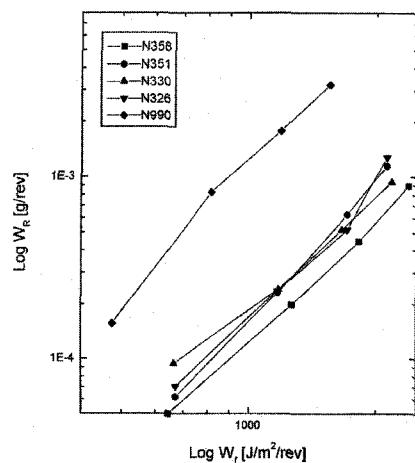


Figure 10. Wear rates vs. frictional work input for NR compounds filled with various structures of carbon blacks.

Table 3. Wear Rates of Rubber Compounds Containing Various Structures of Carbon Blacks.

Type of Carbon Black	DBP (ml/100g)	질소흡착 비표면적 (m^2/g)	Wear Rate ($g/rev \times 10^{-6}$)			Slope, n	k
			@300 (J/ m^2/rev)	@1000 (J/ m^2/rev)	@3000 (J/ m^2/rev)		
N358	150	87	9	126	1368	2.174	-10.4
N351	120	73	9	180	2811	2.253	-11.3
N330	102	83	19	196	1638	1.933	-9.5
N326	72	84	10	173	2443	2.441	-11.0
N990	43	9	54	1147	18652	2.538	-10.6
NR	-	-	25	1623	72447	3.457	-13.2

이 가장 잘된 N358은 구조발달 정도가 가장 낮은 N990에 비해 약 10배 낮은 마모속도를 보였고, N351, N330, N326에 비해서는 약 2배 낮은 마모속도를 보였다. 카본블랙 구조에 따라 power index는 1.93 - 2.54로써 거의 일정하였다.

2.3 특성인자의 영향

충전된 고무의 인장특성, 마찰 및 마모특성은 입자 크기와 구조의 발달 정도에 영향을 받으므로 이 두가지 인자를 동시에 고려할 수 있도록 Figure 1의 대각선 방향에 놓여 있는 카본블랙을 다음과 같이 선택하여 마찰특성 및 마모속도에 대한 영향을 살펴보았다.

N121 > N220 > N330 > N660 > N990

Figure 11에는 수직하중에 따른 여러 가지 카본블랙을 함유한 배합물의 마찰계수를 나타내었다. 하중증가에 따라 마찰계수는 역시 감소하였고, 입자 크기가 작고 구조가 발달한 카본블랙 일수록 높은 마찰계수를 보였다. Figure 12는 마찰일에 따른 마모속도를 도시하였다. 비교적 보강성이 강한 N121, N220, N330간에는 마모속도에서 큰 차이를 나타내지 않았지만, 보강성이 비교적 약한 N660과 N990과는 각각 4배, 10배의 차이를 보였다. N660과 N990은 다른 카본블랙과 비교하여 비교적 입자 크기가 크다. 입자의 크기가 크면 고무분자와 결합할 수 있는 비표면적이 작아지기 때문에 보강효과

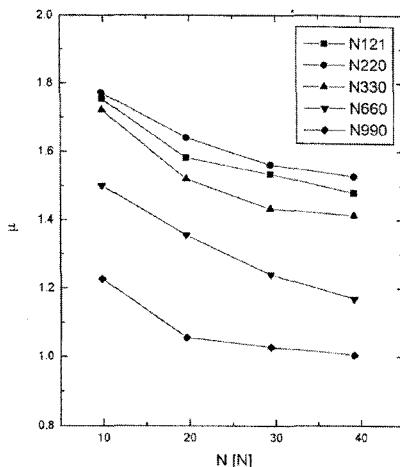


Figure 11. Frictional coefficient as a function of the normal force for NR compounds containing various particle sizes and structures of carbon blacks.

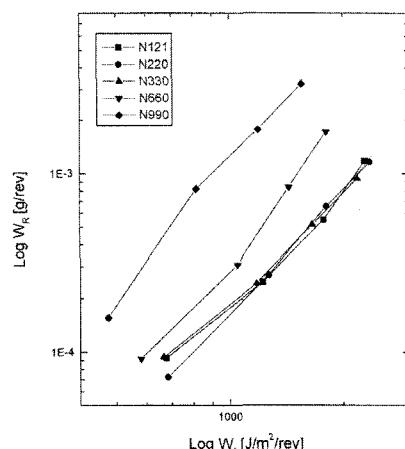


Figure 12. Wear rates vs. frictional work input for NR compounds containing various particle sized and structures of carbon blacks.

Table 4. Wear Rates of Rubber Compounds Containing Carbon Blacks with Various Particle Sizes and Structures.

Type of Carbon Black	DBP (ml/100g)	질소흡착 비표면적 (m^2/g)	특성인자 Ψ	Wear Rate ($g/rev \times 10^{-6}$)			Slope, n	k
				@300 (J/m ² /rev)	@1000 (J/m ² /rev)	@3000 (J/m ² /rev)		
N121	132	132	187	16	188	1766	2.039	-9.8
N220	114	119	165	11	167	1988	2.253	-10.5
N330	102	83	165	19	196	1638	1.933	-9.5
N660	90	35	132	15	336	5579	2.558	-11.1
N990	43	9	97	54	1147	18652	2.538	-10.6
NR	-	-	-	25	1623	72447	3.457	-13.2

가 낮아지게 된다.

카본블랙 특성에 따른 마모속도를 보다 정량적으로 살펴보기 위하여 Table 4에 3수준의 마찰에너지 조건에서 마모속도를 얻었고, 이를 n 과 k 그리고 특성인자 Ψ 와 함께 나타내었다. 여기서 Ψ 는 카본블랙의 입자크기와 구조 발달정도를 함께 고려한 특성인자이다. 마찰에너지 1000J/m²/rev에서 마모속도와 특성인자와의 관계를 Figure 13에 도시하였다. 예상한 바와 마찬가지로 마모속도는 특성인자에 역비례 관계를 보였다. 따라서 카본블랙의 입자 크기가 작고 구조가 잘 발달 될수록 마모 저항성은 개선된다고 할 수 있다.

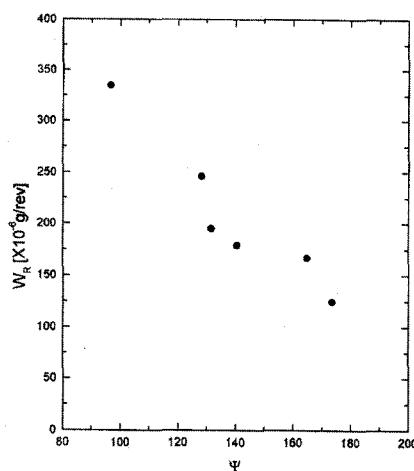


Figure 13. Wear rates as a function of the characteristic parameters of carbon black filled NR compounds at 1000J/m²/rev.

3. 마모표면의 모풀로지

마모현상을 해석하는데 그 표면의 분석이 중요한 부분을 차지한다. 카본블랙이 충전된 고무재료는 카본블랙의 구조 및 입자 크기에 따라 마모형태가 달라지며, 가해지는 하중에 큰 영향을 받는다. 하중에 따른 마모형태는 피치의 크기로 나타낼 수 있으며, 피치와 하중 크기에 따라 마모 성능을 평가 및 예측 할 수 있다. 일반적으로 고무 시편에 가해진 하중이 커지면 마모패턴의 간격이 커지고 거친 표면을 나타낸다. Figure 14는 칼날형 마모시험기를 통하여 진행된 카본블랙 N358을 적용한 고무 배합물의 마모형태를 전자현미경 사진으로 나타내었다. 수직하중의 크기가 증가 될수록 마모성능을 나타내는 피치의 크기가 증가되는 것을 보여주고 있다. Figure 15는 카본블랙의 입자 크기와 구조에 따른 마모표면의 영향을 나타내었다. 그러나 본 실험에서는 카본블랙의 특성인자에 따른 마모패턴의 차이는 분별하기 어려웠다.

IV. CONCLUSIONS

본 연구에서는 카본블랙의 입자크기 및 구조 발달정도에 대한 고무 배합물의 인장특성, 마찰 마모 특성을 고찰하였으며 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 영탄성율과 인장강도는 카본블랙 입자크기가 작고, 구조가 발달된 것일수록 크게 나타났으며, 카본블랙의 구조와 입자크기의 영향을 고려한 특성인자(Ψ)와는 1차 선형적 관계를 나타내었다.

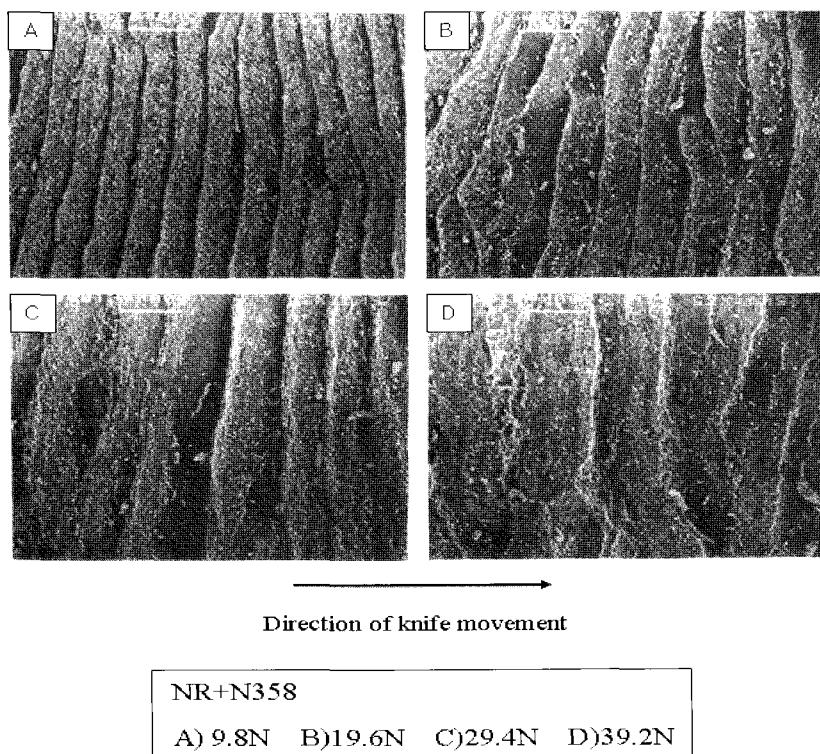


Figure 14. Worn surfaces of the NR compounds containing N358.

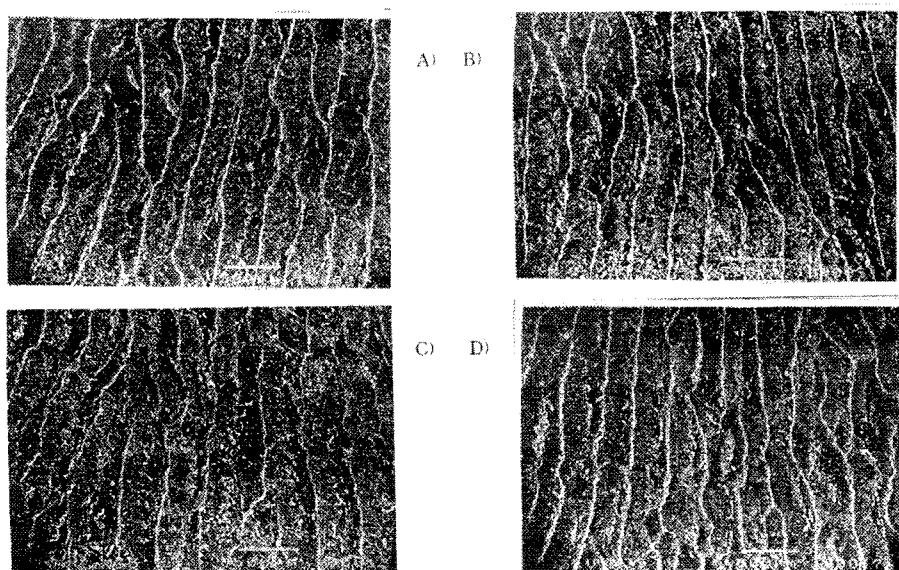


Figure 15. Worn surfaces of NR compounds filled with various characteristic parameters of carbon blacks at 9.8N: A) N121, B) N220, C) N330 and D) N660.

2. 마찰계수는 시편에 가해준 수직하중이 증가함 따라 감소하였고, 입자크기가 작고 구조가 발달될 수록 높은 마찰계수를 나타내었다.
3. 마모저항 특성은 카본블랙의 입자크기가 작고, 구조가 발달될수록 향상되었다. 마모속도(W_R)와 마찰일(W_f)의 간에는 power-law 관계가 있었으며, 카본블랙의 종류에 따라 power index (n)은 거의 일정한 값을 보였다. 마모속도는 카본블랙의 특성인자에 역비례 관계를 보였으며 이는 카본블랙의 입자 크기가 작고 구조가 잘 발달 될수록 마모저항성은 개선된다고 결론내릴 수 있다.
4. 전자현미경을 이용하여 마모패턴을 조사하였으며 고무 시편에 가해진 하중이 커짐에 따라 마모 패턴의 간격이 커지고 거친 표면을 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 전남대학교 연구년교수연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사합니다.

참고문헌

1. A. M. Gessler, W. M. Hess and A. I. Medalia, "Reinforcement of Elastomers with Carbon Black", *Plastics and Rubber: Processing*, **3**, 37 (1978).
2. S. Kaang, J. Cho, S. Kim, C. Nah, and C. Cho, "Friction and Wear of Rubber Compounds Containing Powdered Polynorbornene Vulcanizate", *Journal of Polymer Engineering*, **18(1-2)**, 83 (1998).
3. A. Schallamach, "Abrasion of Rubber by a Needle", *J. Polym. Sci.*, **9**, 385 (1952).
4. A. Schallamach, *Wear*, "Anisotropic Rubber Friction", **35**, 375 (1975).
5. A. Schallamach, "Recent Advances in Knowledge of Rubber Friction and Tire Wear", *Rubber Chem. Technol.*, **41**, 209 (1968).
6. A. N. Gent and C. Pulford, "Mechanisms of Rubber Abrasion", *J. Appl. Polym. Sci.*, **28**, 943 (1983).
7. 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. Tech.*, **69**, 819 (1996).
8. A. I. Medalia, "Effective Degree of Immobilization of Rubber Occluded within Carbon Black Aggregates", *Rubber Chem. Technol.*, **45**, 1171 (1972).
9. A. I. Medalia, "Selecting Carbon Blacks for Dynamic Properties", *Rubber World*, **168**, 49, (1973).
10. G. Kraus, "A Carbon Black Structure-Concentration Equivalence Principle. Application to Stress-Strain Relationships of Filled Rubbers", *Rubber Chem. Technol.*, **44**, 199 (1972).
11. M. J. Wang, S. Wolf and E. Tan, "Filler-Elastomer Interactions. Part VII. Study on Bound Rubber", *Rubber Chem. Technol.*, **66**, 163 (1993).