

〈연구논문〉

발포고무의 마찰 및 마모특성에 관한 연구

강신영 · 범석훈 · 손은산 · 박흥철* · 송한중** · 니창운***

전남대학교 공과대학 정밀화학과, *공업화학과,
미국 아크론대학교 고분자과학과, *금호기술연구소
(1995년 3월 17일 접수)

A Study on Friction and Wear of Foam Rubbers

Shinyoung Kaang, Seokhoon Bumm, Eun San Sohn,
Heung Chul Park*, Hanjong Song** and Changwoon Nah***

Department of Fine Chemicals and Process Engineering
*Department of Chemical Technology
College of Engineering, Chonnam National University
Kwangju 500-757, Korea

**Department of Polymer Science, The University of Akron
Akron, Ohio 44325, U.S.A.

***Kumho R & D Center, Kumho Co., Inc.
Kwangju 506-040, Korea

(Received March 17, 1995)

요 약

겨울용 타이어인 '발포고무 타이어'의 트레드에 적용되는 발포고무의 물성과 마찰 및 마모특성을 조사하였다. 천연고무인 SMR (Standard Malaysian Rubber)-CV60과 합성고무인 BR-01 (Cis-1, 4 Polybutadiene)을 70 : 30 비율로 혼합하였고 발포제로는 개질화된 azodicarbonamide (상품명 : UNICELL AD #2)을 변량 첨가하여 다양한 발포도의 발포고무를 준비하였다. 발포도의 증가로 발포고무의 Young's modulus와 파괴에너지는 점진적으로 감소하였으나 Tan δ 는 일정한 값을 유지하였다. 매끄러운 유리표면위에서 높은 마찰계수를 보인 발포고무는 발포도의 증가로 크게 감소하였고 거친 표면일수록 마찰계수는 상승하였다. 이같은 마찰계수의 증감경향이 교차되는 발포도는 30~40%이었다. 0°C에서의 마찰계수도 유리표면에서 감소하고 거친 표면에서 상승하는 경향을 보였으며 증감경향이 교차하는 발포도는 20%로 낮아졌다. 마찰표면을 마그네시아 분말로 처리하면 전반적으로 마찰계수는 감소하였고 발포도의 크기에 관계없이 마찰표면이 거칠수록 큰 마찰계수를 나타내었다. 발포고무의 발포도가 커지면 마모손실량도 비례하여 증가하였으며 발포도가 낮은 고무에서는 비교적 규칙적인 용기간격이 보였으나 발포도가 30%이상으로 되면 불규칙적인 마모표면과 더불어 많은 마모 부스러기가 관찰되었다.

Abstract—Physical properties, friction, and abrasion resistance of foam rubbers suitable for tread compound of snow tires, "Foam Rubber Tire", were investigated. Natural rubber(SMR-CV60) and synthetic rubber(BR-01, Cis-1,4 polybutadiene) were mixed with a blend ratio of 70:30. Foam rubber vulcanizates having various degrees of foaming were prepared by varying the content of a foaming agent(UNICELL AD #2, azodicarbonamide). Young's modulus and fracture energy of the foam rubbers gradually decreased with increasing the degree of foaming, whereas Tan δ stayed

constant. Frictional coefficient of the foam rubbers considerably decreased on a smooth glass surface, but increased on a rough surface, as the degree of foaming was increased. A cross-over of the trends on the frictional coefficient occurred at the degree of foaming of 30~40%. When the test temperature was decreased from 25°C to 0°C, frictional coefficient decreased on the glass surface, however, slightly increased on the rough surface. The degree of foaming showing the cross-over, therefore, lowered to 20%. When a magnesia powder was applied to the contact surface, the frictional coefficient generally decreased, and it was found to be higher at the rougher surface, regardless of degree of foaming. The wear loss increased as the degree of foaming was increased. Regular ridge spacings were observed over a relatively low range of degree of foaming. However, somewhat irregular wear pattern and corresponding wear debris were observed above the degree of foaming of 30%.

Keywords : Foam rubber, fracture energy, Tan δ , friction coefficient, wear

1. 서 론

고분자재료가 단단한 재료표면위를 미끄러져 이동할 때 두 재료간에 발생하는 마찰력은 다음의 두 기구(mechanisms)로 설명된다[1, 2]. 그 중 한 기구는 접촉계면의 분자결합을 파괴하는데 필요한 에너지라고 설명되는 접착(adhesion)기구이고, 다른 한 기구는 접촉계면에서 형성된 물리적 결합으로 고분자재료의 변형에 소요되는 에너지라고 설명되는 변형(deformation)기구이다. 접착기구에 의존하는 마찰은 두 물체의 접촉면적에 큰 영향을 받는다[3]. 특히 고분자재료의 경우 가해진 하중으로 변형정도가 커서 접촉면적은 고분자재료의 경도(hardness) 및 탄성률에 영향을 받는다[4, 5, 6]. 마찰과정에서 점탄성적 변형을 수반하면 공급된 에너지는 분자완화(molecular relaxation)과정에서 소산(dissipation)되어 일부에너지는 회복되거나 원래의 에너지와 같지 않다. 이 에너지차이가 마찰의 히스테리시스(hysteresis)요소를 극복하는데 소요된 일을 나타낸다[7, 8, 9].

고분자재료의 마모속도(wear rate)는 마찰력과 직접적인 관련이 있다[10, 11]. 마모현상은 공급된 에너지의 히스테리시스 손실과정에서 마찰력이 올라가면 마모속도는 급격히 상승한다. 고분자재료가 반복 변형의 연속으로 피로하게 되고 그 결과 재료일부가 표면으로부터 분리되는, 피로마모(fatigue wear)를 초래한다는 마모이론도 마모현상을 해석하는데 유효한 이론이다[12]. 그러나 짧은 시간에 나타나는 마모 부스러기(debris)는 고분자 조각의 파괴된 결과라고 보는 관점에서 마모현상을 응집인열(cohesive tearing)의 파괴에너지로 취급하여 설명하는 것이 보다 설득력이 있다[13].

고분자재료의 마찰 및 마모특성이 중요시되는 대표

적인 제품중의 하나가 자동차타이어이다. 타이어의 제동력은 자동차의 정지능력에 결정적인 영향을 미치는 중요인자이다. 타이어의 구성요소중에 자동차가 유일하게 노면과 접촉하면서 주행 중에 가장 심하게 압축되고 굴곡되는 부분은 트레드(tread)이다. 타이어의 제동력은 이 트레드와 노면사이의 마찰력에 크게 의존한다. 최근 국내의 타이어 제조업체에서는 겨울용 타이어 신제품인 '발포고무 타이어'를 개발하였다. '발포고무'란 배합고무에 발포제를 혼합, 가황후에 수많은 미세기포가 형성된 고무이며 발포고무 타이어는 트레드에 이 발포고무를 대체 적용한 제품으로써 겨울철 빙설 노면에서 미끄러짐이 비교적 효과적으로 제동되는 것으로 소개하고 있다. 발포고무 트레드는 그 기능상 제동성과 직접적으로 관련된 마찰특성이 유지되어야 하지만 반면에 마찰력의 향상은 노면과의 동적 접촉(dynamic contact)으로 마모특성을 저하시키는 상반된 결과를 초래할 수도 있다. 발포고무에 대한 대부분의 기술정보는 해외 연구기관에 의해 특허로 보호되어 있고 그 연구결과는 아직 보고된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 배합조성을 달리하여 준비한 발포고무의 발포도 변화에 따른 물성을 평가하고 거칠음정도가 다른 몇 가지 마찰표면위에서 마찰특성을 조사하였으며, 마모시험기를 이용하여 발포도에 따른 마모특성을 동시에 평가하였다.

2. 실험

2.1. 재료(materials)

1차 배합에서 사용된 고분자재료로는 SMR-CV60 (Standard Malaysian Rubber-Constant Viscosity 60, Malaysia)과 합성고무인 BR-01(Cis-1,4 Polybutadiene, Cis contents: 97%이상, Korea Kumho Petro

Table 1. Compounding recipe for the foam rubbers
(Unit : phr)

재 료	1st Mixing	2nd Mixing
SMR-CV60	70.00	
BR-01	30.00	
N-234(C/B)	55.00	
Aromatic Oil-2	10.00	
Structol-40MS	3.00	
ZnO-S	5.00	
Stearic Acid	2.00	
Kumanox-13	2.50	
Kumanox-RD	1.00	
Paraffin Wax	1.00	
MOR(NBS)		0.90
Sulfur		1.80
Unicell AD #2		0,2,4,6,8,10변량

chemical Co., Ltd)을 사용하였다. 보강제로는 carbon black인 N-234(Lucky Material Co., Ltd., Korea), 연 화제(softener)로는 Aromatic Oil-2(Aromatic 40%, Paraffin 27%, Naphthalene 33%, Chonkwang Uwha, Korea), Homogenizing agent는 STRUCTOL-40MS (Chonkwang Uwha, Korea)를 각각 사용하였다. 또한 촉진제와 노화 방지제로 사용되는 ZnO-S(Sambo Co., Ltd., Korea)와 Stearic Acid(Pyonghwa Chemical Co., Ltd., Korea), KUMANOX-13(Kumho Monsanto Co., Ltd., Korea), KUMANOX-RD (Kumho Monsanto Co., Ltd., Korea), Paraffin Wax(Japan Oil, Korea)등을 첨 가하였다.

2차배합에 적용된 재료로는 가교촉진제로 MOR (NBS, Dongyang Chemical, Korea)와 가교제로 gro- und sulfur(Seikwang Chemical, Korea)를 사용하였 다. 그리고 발포제로는 개질화된 azodicarbonamide 로써 분해온도가 $135 \pm 5^\circ\text{C}$ 인 UNICELL-AD #2(Do- ngjin Chemical Ind. Co., Ltd., Korea)를 사용하였다.

2.2. 배합(mixing)

1차 배합에서는 SMR-CV60과 cis-polybutadiene (BR-01)을 70:30의 비율로 120°C 를 유지하고 있는 실험실용 0-type Intensive Mixer(Yaskawa Electric, Ja- pan)에 넣고 40초동안 혼합한 후 carbon black을 첨 가하였다. 약 1분 20초 후에 1차배합약품을 넣고 다 시 혼합하였다. 1차배합에 소요된 총시간은 6분이었

으며 고무혼합물은 90°C 의 표면온도를 유지하고 있는 실험실용 mill roller(Farrel Corporation, USA)를 이 용하여 3분동안 밀링(milling)한 후 약 1시간동안 실 온에 방치하였다.

1차배합고무를 다시 약 2분 동안 밀링한 후 2차배 합약품을 균일하게 혼합하였다. 발포제인 UNICELL- AD #2는 0, 2, 4, 6, 8, 10 phr로 각각 변량하였다. 2 차배합에 소요된 총시간은 8분이었다. 배합순서는 ASTM D3182와 D3184를 참고하였다. 배합고무의 혼 합비내용은 Table 1에 나타내었다.

2.3. 가황(sulfur-crosslinking)

배합고무의 가황시간은 Rheometer ODR 2000E (Monsanto, USA)를 이용하여 가황온도인 145°C 에서 얻어진 가황곡선으로부터 결정하였으며 가황시간은 20분이었다. 145°C 를 유지하고 있는 가황프레스(Hanil, Korea)로 시편을 가황하였다. 발포제를 8 phr 이상 혼 합한 배합고무는 가교중에 비교적 심한 변형을 초래 하였다. 이같은 변형을 최소화하기 위해 초기에 25 ton의 압력을 가하고 30초 후에 5 ton으로 낮추어 가 황하였다.

2.4. 밀도(density)측정

시편의 무게(M)를 측정한 후 밀도가 0.79 g/cm^3 인 ethyl alcohol(Duksan Pharmaceutical Co., Ltd., Ko rea)용제속에 시편이 완전히 잠기게 한 후 무게(M_i)를 다시 측정하였다. 이 때 시편의 밀도(ρ)는 다음식 을 이용하여 결정하였다.

$$\rho = \frac{0.79M}{M - M_i} \quad (1)$$

이같이 결정된 밀도는 다음에 발포고무의 발포도를 결정하는데 이용하였다.

2.5. 발포고무의 물성평가

발포고무의 Young's modulus는 20 mm 간격의 초 기구간을 설정한 $75 \times 6 \times 1.5$ (mm) 규격의 시편에 대 한 stress-strain곡선의 초기기울기로부터 결정하였다. 이때 적용한 crosshead 이동속도는 2.0 mm/sec 이었 다. 발포고무의 동적특성은 Qualimeter(Gabo, Germ- any)를 이용하여 -80°C 에서 70°C 까지의 온도범위내

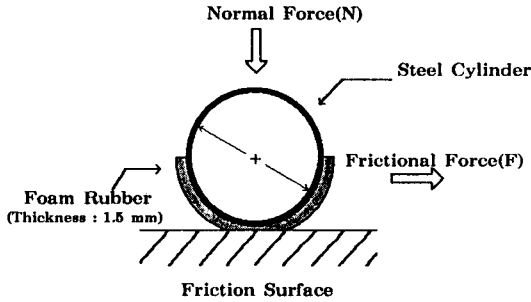


Fig. 1. Schematic diagram showing measurement of frictional force for the foam rubber on various frictional surfaces.

에서 측정하였다. 이 때의 실험조건으로는 2°C/min의 가열속도와 11 Hz의 frequency이었다. 발포고무의 인열강도는 Instron 6021(Instron, England)로 측정하였으며 두께가 약 1.5mm인 C-type의 trousers시편을 이용하였다. 그 절차는 ASTM D624-86을 따랐으며 이때 적용된 crosshead의 이동속도는 2.0 mm/min이었다. 물성실험은 실온에서 실시하였다.

2.6. 마찰 (friction) 실험

발포고무의 마찰특성을 평가하기 위해 마찰실험장치를 제작하였다. 실험장치의 주요내용으로는 최대 RPM이 1750인 DC motor(Myungsung Electric Co., Ltd., Korea)를 장착하여 실제로 미끄러짐 속도가 0.14 mm/sec에서 2.95 mm/sec까지 가능토록 하였다. 또한 마찰력을 측정하기 위해 220N의 정격하중을 갖고 있는 load cell(Interface, Inc., Model SM-50, Japan)을 부착하였다. 마찰력은 flatbed형의 recorder(Rikadenki Kogyo Co., Ltd., Japan)를 load cell에 연결하여 동시에 기록되도록 하였다. 저온분위기에서의 마찰력은 마찰대를 온도조절장치(Myungji Industrial, Korea)속에 설치하여 측정하였다. 삼각형의 마찰썰매(friction sled)바닥에 직경이 50mm인 cylinder형의 시편지지대를 부착하고 75×20×1.5(mm)의 발포고무시편을 양면접착의 Scotch tape(3M, USA)로 지지대에 고착하였다. Stick-slip을 최소화하기 위해 Kevlar(Du-pont, USA)선으로 마찰썰매를 free roller를 거쳐 90° 방향으로 load cell에 연결하였다. 마찰력은 마찰썰매가 마찰대위에서 수평이동케함으로써 측정하였으며 이를 Fig. 1에 나타내었다.

마찰력에 대한 온도의 영향을 보기 위해 0°C와 25°C

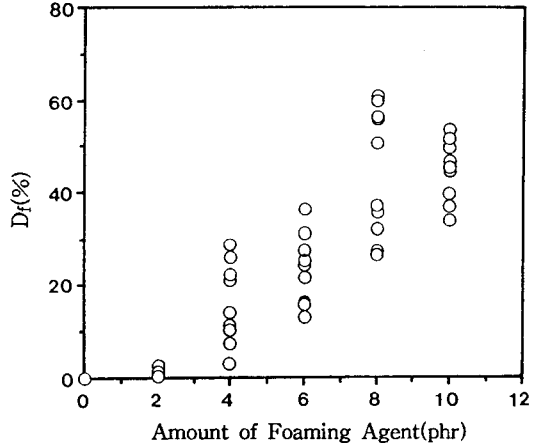


Fig. 2. Relationship between degree of foaming(Df) and amount of foaming agent(phr) for the foam rubber.

(온도편차: ±1°C)에서 각각 실험하였으며 발포고무시편이 부착된 마찰썰매를 실험온도에 5분 동안 적응시킨 후 실험을 시작하였다. 마찰표면의 거칠음 정도의 영향을 평가하기 위해 매끄러운 표면의 유리판, 비교적 표면의 거칠음 정도가 낮은 연마지인 mesh #1200(M-1200), 그리고 비교적 거칠음 정도가 큰 연마지인 mesh #60(M-60)을 마찰대위에 부착하여 각각 실험하였다. 마찰표면의 표면에너지가 낮은 Teflon판 위에서도 마찰력을 측정하였다. 동일 마찰표면 위에 magnesia분말(Kanto Chemical Co., Inc., Japan)을 적용, 마찰실험을 수행하였고 그 결과를 비교하였다.

마찰력의 측정조건으로 마찰썰매의 미끄러짐 속도는 2.0 mm/sec이었고 시편에 가한 수직력은 69N이었다. Glass와 Teflon의 마찰표면은 acetone 용제로 매 실험마다 닦은 후 실험하였으며 마찰표면이 연마지인 경우 매 실험마다 새로운 연마지로 교체하여 실험하였다.

2.7. 마모 (wear) 실험

발포고무의 마모특성은 BS903에 근거한 Akron abrasion tester(Myungji Industrial, Korea)를 이용하여 평가하였다. 여기서 사용된 마모표면은 연마석 No. 4 6이었다. 중심의 직경이 15 mm인 내부구멍을 가지고 있는 원통형(직경: 66 mm, 폭: 13mm)의 시편을 장

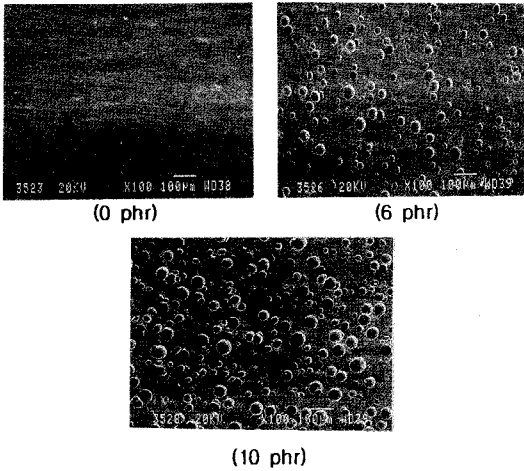


Fig. 3. Scanning electron micrographs of cut-section of the foam rubbers mixed with various amounts(phr) of foaming agent.

착하고 2500회 일정방향으로 회전시킨 후 그 첫번째 무게를 측정하였으며 500회씩 3번 회전시킨 후 그때의 무게를 각각 측정하여 무게 차이로부터 평균마모량을 결정하였다. 마모량은 시편의 밀도를 이용하여 마모부피로 환산하였다. 시편은 105°C에서 24시간 동안 방치시킨 후 실험을 시작하였다. 실험조건으로는 시편에 가해 준 하중은 45N이었으며 회전각은 20°이었고 회전속도는 250 ± 5 rpm이었다. 마모실험은 실온에서 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 발포고무의 발포도

발포고무의 발포도는 기본적으로 배합고무에 섞은 발포제의 함량에 의해 달라진다. 그러나 발포도는 가황조건에 의해서도 영향을 받았다. 발포제의 함량이 비록 많더라도 일정온도에서 가황압력이 높으면 발포도가 비교적 감소되었고 가황압력이 낮으면 단일기포의 크기가 비교적 큰 발포고무가 얻어졌다.

발포고무의 발포도 결정은 다음식을 이용하였다[14].

$$D_f = \left[\frac{(\rho_r - \rho_g)}{(\rho_r - \rho_g)} - 1 \right] \times 100 \quad (2)$$

여기서 D_f 는 발포도(%)이며 ρ_r 는 발포고무에 있어서 고무층의 밀도, ρ_g 는 발포고무 기포내의 기체밀도,

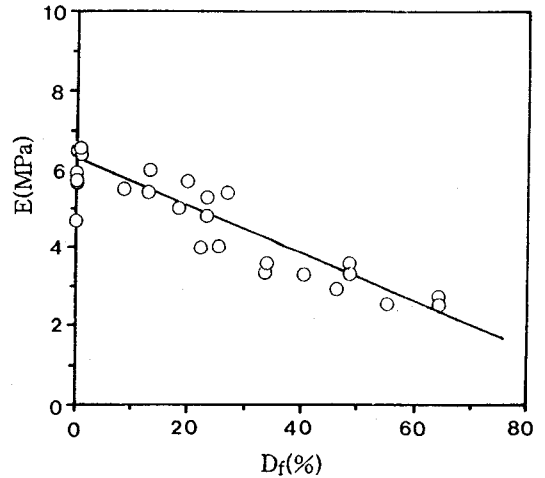


Fig. 4. Relationship between Young's modulus(E) and degree of foaming(D_f) for the foam rubber.

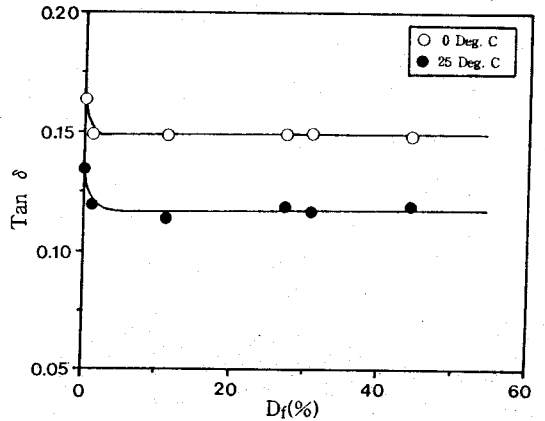


Fig. 5. Relationship between Tan δ and degree of foaming (D_f) for the foam rubber at 0°C and 25°C.

그리고 ρ_r 는 발포고무의 밀도를 각각 가리킨다. ρ_g 는 ρ_r 나 ρ_r 에 비해 무시할 정도로 작은 값이므로 (2)식은 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$D_f = (\rho_r / \rho_r - 1) \times 100 \quad (3)$$

발포고무의 발포도는 순수고무 시편과 발포고무 시편의 밀도를 각각 측정, 상기(3)식에 대입하여 결정하였다. 발포제의 함량에 대한 발포도의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 발포제 함량이 증가하면 발포도도 점진적으로 상승하였으나 발포제를 일정량 혼합한 발포고무에서도 발포도가 비교적 큰 편차를 보였다. 이는 위에서 언급한 것처럼 가황중에 적용된 압력이 영향을

미치기 때문에 여겨진다. 고무배합물에 함유되어 있는 발포제는 $135 \pm 5^\circ\text{C}$ 에서 분해되어 기화된다. 가황 온도인 145°C 에서 프레스(press)로 가해지는 압력 조건에 따라 기포의 크기나 그 수가 영향을 받았다. 분해기체의 일부가 가황중에 손실되기 때문이다. 따라서 적정 발포도를 얻기 위해서는 발포제의 함량뿐 아니라 가황압력조건을 설정하는데 축적된 경험을 필요로 하였다.

발포고무의 단면을 주사전자현미경(SEM)을 통해 관찰하였다. Fig. 3은 발포고무의 단면을 보여주고 있다. 발포제의 함량이 증가할수록 기포의 수량 뿐 아니라 기포의 크기도 증가하는 경향이 관찰된다. 발포고무의 단면에 대한 영상분석(Image Analyzer, Leica, Cambridge Ltd., England)을 통해 발포도를 다시 조사하였으며 이는 전체면적에 대해서 기포부분이 차지하는 면적의 비로 결정하였다. 이같이 결정된 발포도를 밀도측정으로 얻은 발포도와 비교한 결과 영상분석이 밀도측정으로 결정한 발포도보다 15~20%정도 높게 평가되었다. 이는 극히 일부분의 단면적(333mm^2)을 영상분석한 결과이며 조사부분을 선택하는 경향에 따라 그 값이 크게 영향을 받았다. 따라서 이후에 언급되는 발포도는 밀도측정으로 얻은 값을 사용하였다.

3.2. 발포고무의 물리적 특성

발포도의 증가에 따른 Young's modulus의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 발포되지 않은 고무의 Young's modulus는 6.5MPa 이었고 발포도가 60%로 증가하면 2.5MPa 로 하락되어 62%의 modulus가 감소되었다. 고무탄성체의 modulus 감소는 필연적으로 마찰 및 마모특성에 영향을 미친다[15]. 즉 Young's modulus가 감소하면 경도(hardness)가 낮아지고[16] 그 결과 접촉면적이 증가한다. 접촉면적의 증가는 결국 마찰력의 상승을 초래한다[4, 17]. 본 실험에서는 경도변화가 접촉면적에 미치는 영향을 최소화하기 위해 가능한 한 발포고무 시편의 두께를 얇게 하였다. 마이크로톱으로 얻은 약 1.5mm 두께의 시편을 마찰설매의 시편지지대에 부착하여 마찰설매를 마찰표면위에서 10mm 정도 이동시킨 후 발포고무의 표면에 나타난 접촉흔으로부터 결보기 접촉면적의 변화를 조사하였다. 접촉면적은 발포도가 커지면 다소 증가하는 경향을 보여주었으나 그 폭은 무시할 정도로 작았다. 평균 접촉면적은 270mm^2 이었다.

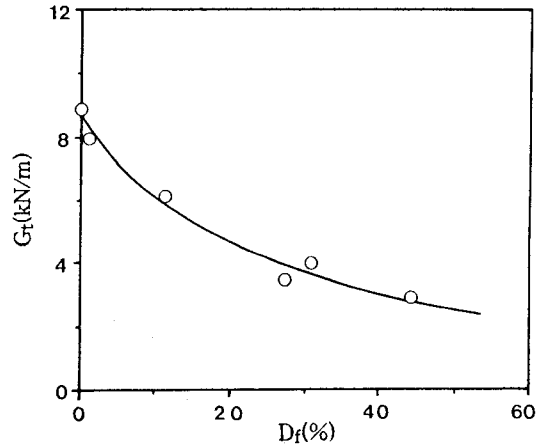


Fig. 6. Tear energy(G_t) as a function of degree of foaming (D_f) for the foam rubber.

Qualimeter를 이용하여 발포고무의 $\tan \delta$ 를 조사하였고 발포도의 증가에 따른 $\tan \delta$ 의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 발포되지 않은 고무에 비해 발포고무에서 $\tan \delta$ 값은 10%정도 감소하였으나 일단 발포된 고무는 발포율에 관계없이 일정한 값을 유지하였다. 발포되지 않은 고무에 있어 $\tan \delta$ 가 약간 높은 것은 충전물들간의 비교적 높은 내부마찰에 기인한 것으로 추측되며 발포된 고무에서는 상대적으로 그 영향이 미소하게 감소된 것으로 보인다. 이같은 결과로부터 고무내부에 형성된 기포의 증가는 고무재료 자체의 동적에너지 손실특성에 크게 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다. 0°C 와 25°C 에서의 $\tan \delta$ 값을 비교하였다. 0°C 에서의 $\tan \delta$ 값은 평균 0.149임에 반하여 25°C 에서는 평균 0.118이었다. 즉 온도가 25°C 에서 0°C 로 하락하면 발포고무의 손실특성은 26% 증가되었다. 겨울용 타이어에 적용되는 발포고무에 있어 낮은 온도에서 손실특성의 증가는 바로 마찰력의 증가로 이어진다.

Trouser시편으로 평가한 발포고무의 파괴에너지(G_c)는 다음 식으로부터 결정하였다[18].

$$G_c = \frac{2F_t}{t} \quad (4)$$

여기서 t 는 시편의 두께이며 F_t 는 시편을 인열하는데 공급된 힘이다. Fig. 6에 발포도의 변화에 따른 발포시편의 G_t 를 나타내었다. 발포도가 증가하면 파괴에너지는 점진적으로 감소하였다. 고무재료의 마찰특성을 향상키기 위한 발포는 필연적으로 인열강도의 회

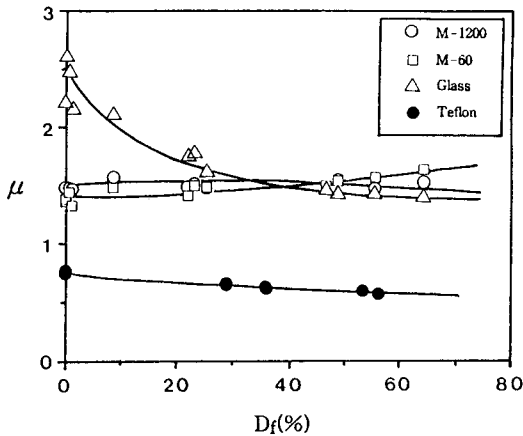


Fig. 7. Frictional coefficient(μ) as a function of degree of foaming(Df) for the foam rubber on various surfaces at 25°C.

생을 수반한다는 것을 의미한다. 고분자재료의 마모가 파괴과정의 결과라는 관점에서[19, 20] 이같은 실험결과는 발포고무의 마모특성을 이해하는데 유용하게 된다.

3.3. 발포고무의 마찰특성

Fig. 1에서와 같이 시편에 수직으로 가해진 힘을 수직력(N), 미끄러져 이동하는데 저항하는 힘을 마찰력(F)이라고 할 때 측정된 두 힘으로부터 마찰계수(μ)는 다음과 같이 정의된다.

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

상기(5)식으로부터 결정한 마찰계수는 0.14 mm/sec에서 2.95 mm/sec까지의 속도범위와 70N까지의 수직력 범위내에서 비교적 일정하였다. 그러나 발포고무의 마찰실험에서는 발포도의 크기에 의해서 마찰계수가 큰 영향을 받았다. Fig. 7은 여러가지 마찰표면에서 측정된 마찰계수를 나타낸 그림이다. 발포도가 증가하면 유리표면에서의 마찰계수는 반대로 감소하였다. 마찰표면의 거칠음정도가 미세한 M-1200에서는 발포도의 증가에 관계없이 마찰계수는 거의 동일한 수준을 유지하였다. 거칠음정도가 상대적으로 높은 M-60에서는 발포도가 커질수록 마찰력이 증가하였다. 발포도가 30%~40%정도 진행되었을 때 마찰표면의 거칠음에 따라 마찰계수의 증감경향이 전환되었다. Teflon은 표면에너지가 작아 다른 마찰표

면에 비해 마찰력이 크게 낮았다. 또한 발포도가 증가할수록 마찰계수가 낮아지는 경향도 관찰되었다.

거칠음정도가 낮은 마찰표면에서는 분자접촉에 의한 접촉력에 의해서 마찰력이 영향을 받는다. 이 때 실제접촉면적(real contact area)은 마찰력의 주요인자로 작용하게 된다. 유리와 같은 매끄러운 표면과 접하고 있는 발포고무의 경우 발포도가 증가할수록 실제접촉면적은 점점 작아진다. 그 결과 발포고무의 마찰력은 유리표면에서 발포도가 증가할수록 감소하게 된다. 거칠음정도가 높은 마찰표면의 경우, 발포도가 작은 발포고무에서는 상대적으로 높은 경도때문에 국부변형이 쉽지 않아 실제접촉면적이 감소되고 그 결과 마찰력이 오히려 낮아진다. 그러나 발포도가 증가하면 고무표면의 국부변형으로 실제접촉면적이 증가하게 되어 거친 접촉계면에서 물리적 결합(mechanical interlocking)이 용이해진다. 이것이 M-60표면에서 발포도가 증가할수록 마찰계수가 커지는 원인으로 유추된다.

마찰표면을 magnesia분말로 처리한 후 마찰력을 다시 측정하였다. 이 경우에는 magnesia 분말에 의해 접촉계면에서의 분자접촉이 용이치 않아 발포고무의 변형만으로 야기된 마찰력을 분리평가할 수 있게 된다[1, 21]. 이에 대한 실험결과를 Fig. 8에 나타내었다. 마찰표면의 거친 정도에 따라 마찰력이 크게 영향을 받았다. 거친 표면에서는 큰 마찰력, 그리고 매끄러운 표면에서는 낮은 마찰력이 측정되었다. 유리 표면에서의 마찰계수는 Teflon표면에서 측정된 값에 접근하였다. 접촉계면에 형성된 접촉력을 제거하면 발포고무의 점탄성적 특성때문에 반복되는 변형을 수반하는 미끄러짐 과정에서 공급된 일부 에너지는 손실된다[7, 22]. 이 손실된 에너지가 곧 변형에 의한 마찰력이다. 따라서 마찰표면이 거칠어지면 보다 큰 변형을 유발하게 되어 마찰계수가 올라가게 된다. 발포고무의 마찰계수는 발포도의 변화에 거의 영향을 받지 않았다. 이것은 발포고무의 동적특성인 $\tan \delta$ 와 관련이 있다[23]. 즉 Fig. 5에서 검토한 바와 같이 발포도의 증가에도 불구하고 $\tan \delta$ 값은 일정하였다. 발포고무가 발포도에 관계없이 일정한 동적에너지 손실특성을 유지하고 있다는 것을 의미한다. 발포고무의 마찰계수가 발포도의 크기에 영향을 받지 않는 것은 결국 이같은 일정한 손실특성에 기인한다고 할 수 있다.

동일한 마찰표면에서 온도를 0°C로 낮추어 마찰계수

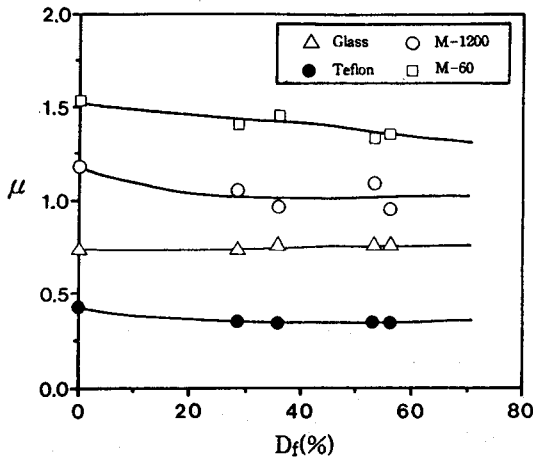


Fig. 8. Frictional coefficient(μ) as a function of degree of foaming(D_f) for the foam rubber on the surfaces dusted with magnesia powder at 25°C.

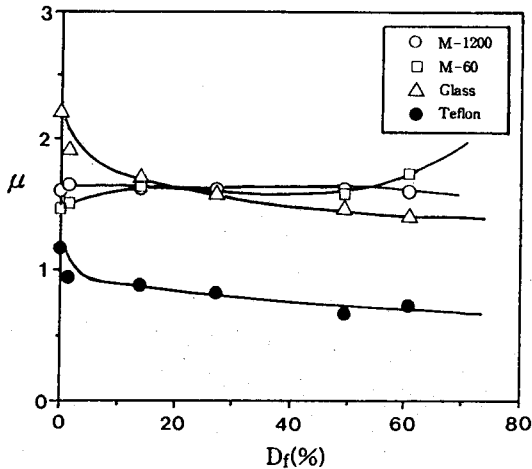


Fig. 9. Frictional coefficient(μ) as a function of degree of foaming(D_f) for the foam rubber on various surfaces at 0°C.

를 측정하였고 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 25°C에서와 경향이 비슷한 결과를 얻었다. 그러나 유리 표면에서의 마찰계수는 낮은 발포도에서 상대적으로 크게 낮아진 반면 M-60의 거친 표면에서는 높은 발포도에서 약간 상승하였다. 마찰계수의 증감경향이 전환되는 발포도도 30%~40%에서 20%로 낮아졌다. 0°C에서는 25°C에 비해 동적 에너지손실의 증가로 마찰력이 상승하는 효과와 접촉면에 형성된 얇은 수막으로 감소되는 마찰력이 서로 상쇄되어 25°C에서 측정된 마찰력으로부터 크게 변하지 않은 것으로 보인다.

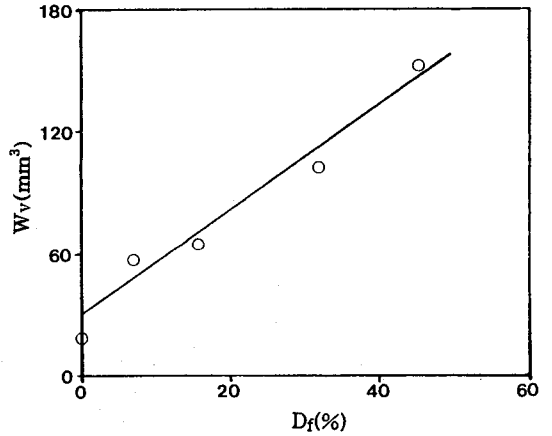


Fig. 10. Wear loss(W_v) as a function of degree of foaming(D_f) for the foam rubber, using the Akron abrasion tester.

3.4. 발포고무의 마모특성

발포고무의 마모실험 결과를 Fig. 10에 나타내었다. 발포고무의 발포도가 커지면 마모량도 비례하여 증가하였다. 발포되지 않은 고무의 마모량이 30 mm³인데 반해 발포도가 30% 진행되면 마모량은 100 mm³으로 3 배이상 마모특성이 악화되었다. Fig. 4와 Fig. 6에서 각각 확인한 것처럼 발포고무의 Young's modulus와 파괴강도가 발포도의 증가와 더불어 현저하게 낮아진 실험결과는 마모실험결과와 무관하지 않다. 마모는 접촉면에서 가해지는 전단응력으로 말미암아 발포고무표면의 일부가 파손된 결과로 발포고무의 발포도 증가에 따른 파괴강도의 약화가 그 원인으로 생각된다[12].

Fig. 11은 주사전자현미경으로 관찰한 마모시편의 표면이다. 발포되지 않은 시편의 마모표면과 발포율이 7.1%인 시편(발포제 4 phr 첨가)의 마모표면, 그리고 발포율이 31.9%인 시편(발포제 8 phr 첨가)의 마모표면을 각각 보여주고 있다. 발포되지 않은 고무의 마모표면에서는 비교적 규칙적인 융기간격(ridge spacing)이 관찰된다. 이같은 융기간격은 시편에 전단응력을 가했을 때 재료의 임계강도(critical strength)까지 저항하다 고무표면의 일부가 규칙적으로 파괴되어 분리되는 과정이다[24, 25]. 전단탄성율이 올라가면 반대로 융기간격이 좁아지며 탁월한 마모특성을 지니는 고무는 융기발생이 비교적 억제된다. 발포고무의 융기간격은 발포도가 높을수록 불규칙적이면서 매우 거친 마모표면으로 변하였다. 발포도가 30%이상으로 되면 규칙적인 융기간격은 거의 사라지고 불규칙적인

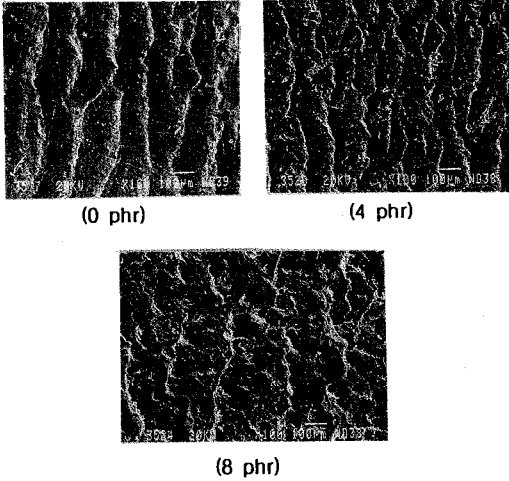


Fig. 11. Scanning electron micrographs of wear surfaces of the foam rubber mixed with various amounts(phr) of foaming agent.

파괴표면과 함께 많은 마모 부스러기(debris)가 관찰되었다. 이같은 결과는 발포고무의 마찰손실이 발포율과 함께 증가하는 것과 무관하지 않으며, Young's modulus의 감소로 변형은 용이하나 파괴강도의 감소로 작은 변형이 바로 파괴로 이어지기 때문으로 간주된다.

4. 결 론

본 연구실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 발포고무의 발포도가 증가하면 Young's modulus와 파괴에너지는 점진적으로 감소하였다. 그러나 동적에너지 손실특성인 $\tan \delta$ 값은 발포도의 크기와 관계없이 일정하였다.

2. 발포고무의 마찰계수는 발포도의 크기와 마찰표면의 거칠음 정도에 의해 영향을 받았다. 매끄러운 유리표면위에서 가장 높은 마찰계수를 보였으나 발포도가 증가하면 그 값은 점진적으로 감소하였다. 가장 거친 마찰표면에서는 발포도가 증가할수록 마찰계수는 오히려 상승하였다. 마찰계수의 증감경향이 교차하는 발포도는 25°C에서는 30~40% 였고 0°C에서는 20%로 낮아졌다.

3. 마찰표면을 magnesia powder로 처리하여 접촉제면에 형성된 접촉력을 제거하면 전반적으로 마찰계수는 감소하였고 주로 마찰표면의 거칠음 정도에 의

해서만 마찰계수는 영향을 받았다. 발포도의 크기에 관계없이 거친 마찰표면에서는 큰 마찰계수, 그리고 매끄러운 표면에서는 낮은 마찰계수를 나타내었다.

4. 발포고무의 발포도가 커지면 마모손실량도 비례하여 증가하였다. 발포도가 낮은 범위에서는 전단응력이 가해지는 방향으로 규칙적인 용기간격이 관찰되었으나 발포도가 30%이상이 되면 불규칙적인 마모표면으로 변하면서 많은 마모 부스러기가 발생하였다.

감 사

이 논문은 1991년도 교육부지원 한국학술진흥재단의 자유공모과제 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 이에 감사를 표합니다.

기 호

- M : weight of foam rubber
- M_L : weight of foam rubber in liquid
- ρ : density
- ρ_r : density of solid rubber
- ρ_f : density of foam rubber
- ρ_g : density of gas in the foam rubber
- D_f : degree of foaming
- G_t : tearing energy
- F_t : tearing force
- t : thickness of testpiece
- F : frictional force
- N : normal force
- μ : frictional coefficient

참고문헌

1. K. A. Grosch, *Proc. Roy. Soc.*, **A274**, 21(1963).
2. G. M. Bartenev and V. V. Lavrentiv, "Friction and Wear of Polymers," Elsevier North-Holland, Amsterdam, 1981, Chap. 4.
3. M. Barquins, *Mat. Sci. and Eng.*, **73**, 45(1985).
4. K. L. Johnson, K. Kendall, and A. D. Roberts, *Proc. Roy. Soc.*, **A324**, 301(1971).
5. P. J. Aird and B. W. Cherry, *Wear*, **47**, 231 (1978).
6. A. N. Gent, *Trans. Inst. Rubber Ind.*, **34**, 46 (1958).

7. K. Kendall, *Wear*, **33**, 351(1975).
8. D. F. Moore and W. Geyer, *Wear*, **22**, 113 (1972).
9. V. G. Zankin and W. O. Yandell, *Wear*, **72**, 157 (1981).
10. A. G. Thomas, *J. Polym. Sci.*, **31**, 467(1958).
11. A. W. J. Degee, *Wear*, **65**, 397(1981).
12. A. N. Gent and C. T. R. Pulford, *J. Appl. Poly. Sci.*, **28**, 943(1983).
13. D. H. Champ, E. Southern, and A. G. Thomas, in "Advance in Polymer Friction and Wear," L. H. Lee ed., Plenum Press, New York, 1974, pp 133-142.
14. Bridgestone corp., *Japan Pat.* 63-90402(1988).
15. A. D. Roberts and A.G. Thomas, *NR Technol.*, **7**, 38(1976).
16. A. N. Gent, *Trans. Inst. Rubber Ind.*, **34**, 46 (1958).
17. M. Barquins, in "Wear and Friction of Elastomers", ed. by R. Denton and M. K. Kesha-
van, ASTM, MD, 1992, p 82.
18. G. J. Lake and A. G. Thomas, in "Engineering with Rubber, How to Design Rubber Components", ed. by A. N. Gent, Hanser, New York, 1992, Chap. 5. 19. A. G. Thomas, *J. Polym. Sci., Polym. Symp.*, **48**, 145(1974).
20. K. A. Grosch, *Rubber Chem. Technol.*, **65**, 78 (1992).
21. B. J. Briscoe, M. D. Steward and A. J. Groszek, *Wear*, **42**, 99(1977).
22. G. A. D. Briggs and B. J. Briscoe, *Nature(London)*, **260**, 313(1976).
23. D. Tabor, *Proc. Roy. Soc. London Ser.*, **A229**, 198(1955).
24. A. Schallmach, *Rubber Chem. Technol.*, **41**, 209(1968).
25. E. Southern and A. G. Thomas, *Rubber Chem. Technol.*, **52**, 1008(1979).