

고무의 마찰과 마모 특성에 대한 고찰

김현재* · 김세녕* · 김수형* · 김두만**

Characteristics of rubber friction and wear

Hyun-Jae Kim* · Se-Nyung Kim* · Su-Hyung Kim* · Doo-Man Kim**

ABSTRACT

The basic factor that affect wear performance is the wear characteristics, which come from sliding friction between rubber compound and road. Thus, this study focused on friction and wear of rubber. This paper briefly explain some characteristics of friction and wear referring to the papers on wear of rubber that scholars researched on. Research activities to predict the performance of the rubber wear is also explained.

Key Words: Friction, Quantification, Rubber, Tire, Wear

기호설명

W_{fr} : 마찰에너지
 F : 마찰력
 N : 수직하중
 w : 마모율
 E : 탄성계수
 μ : 마찰계수
 h : 마모깊이
 C, β, δ : 재료 상수

1. 서 론

고무제품은 종류나 용도가 다양하고 금속이나 기타재료로 대체할 수 없는 독특한 점탄성적 성질을 가지고 있다. 이러한 고무 생산량의 대부

분이 타이어 산업에 응용되고 있기 때문에 타이어 성능 예측을 위해 고무의 거동을 해석하려는 활동이 활발하게 진행되고 있으며, 그 중 마모 성능은 타이어의 수명을 좌우하는 가장 중요한 성능으로 인식되고 있다.

고무재료에서 마찰력의 증가는 필연적으로 내마모성의 저하를 초래하기 때문에 마찰특성과 마모 특성은 동시에 고려되어야 한다.

타이어의 마모는 고무의 표면과 노면 사이에 작용하는 마찰력이 고무의 강도보다 클 경우에 표면의 고무가 점차적으로 떨어져 나가는 현상이다. 이러한 마모현상은 고무의 성능과 타이어의 구조, 노면의 상태, 거칠기, 온도 등의 인자들이 상호 복합적으로 나타나는 매우 복잡한 현상이다. 상호 복합적인 고무의 마모 성능을 예측하기 위하여 실험을 통해 고무의 마모성능 특성을 획득하고 그것을 바탕으로 실제 타이어의 마모성능을 예측하려는 노력이 이어지고 있으나

* 학생회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

** 종신회원, 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과
 연락처, E-mail : dmkim@kau.ac.kr

실제 타이어의 마모와는 차이가 있거나 전혀 상반된 결과까지 보이는 경우도 발생하고 있다.

본 논문에서는 고무의 마찰과 마모에 대한 일반적인 특성을 기술하고, 마찰에너지와 관련하여 마모를 여러 인자들의 함수로 정량화하려 했던 연구 활동을 소개하고자 한다.

2. 고무의 마찰

2.1 고무 마찰의 주요 메커니즘

고무의 마찰은 일반적으로 접촉 메커니즘과 히스테리시스 메커니즘으로 설명될 수 있다.

고무가 아닌 나무와 같은 일반적인 재료는 움직이기 직전에 최대마찰력을 가진다. 그러나 자동차 타이어의 경우 타이어가 눌리면 타이어 트레드에 의해 그립력이 생기고 이는 마찰력을 더 유도하게 되며, 누르면서 당기면 어느정도 미끄러져 갈때까지는 더 큰 마찰력이 생기게 된다. 이것을 고무의 접촉 메커니즘이라 할 수 있다.

히스테리시스(Hysteresis)는 변형 회수당 에너지 손실을 말하며 힘과 변형량 곡선에서 힘을 가할 때와 제거해 갈 때의 변형량 사이에는 어긋남이 발생해 곡선이 일치하지 않게 된다. 타이어를 미끄러뜨리려고 하면 접지면에서 고무가 변형하고 진동하여 일부의 에너지를 열로 바꾸어 버리고 이것이 히스테리시스 로스라고 할 수 있다. 여기서 소산된 에너지가 마찰력에 활용된다고 보는 것이 히스테리시스 메커니즘이라고 보면 된다.

2.2 고무 마찰의 주요 메커니즘

마찰력 F 는 수직하중 N 에 비례하는 것이 가장 기본적인 마찰에 대한 특성이다.

$$F = \mu \cdot N \quad (1)$$

μ 는 마찰계수를 나타내는 것으로 고무가 아닌 일반적인 재료에서 마찰계수는 접촉면의 면적에 무관하며 미끄럼속도와 무관하다는 특성을 갖고 있다. 그러나 고무의 경우 마찰계수가 접촉면의 면적과 수직하중, 미끄럼 속도에 따라 달라지는

특성을 갖고 있다. 이는 평평하고 매끄러워 보이는 고무라도 미시적 관점에서 보면 표면이 울퉁불퉁하고 불규칙한 형상을 하고 있기 때문에 실제 접촉면적은 겉보기보다 적기 때문이다. 따라서 실제 접촉면적에 영향을 주는 인자들은 결국 마찰력에도 영향을 미치게 된다. 또한 마찰계수는 미끄럼 속도나 온도 등에 의해서도 영향을 받게 된다.

따라서 고무의 마찰계수는 일정한 값으로 정해 놓기 어려우며 여러 가지 인자들을 고려하여 마찰계수를 예측하거나 실험적으로 값을 얻어야 할 것이다.

J. J. Lazeration은 마찰계수를 실험적으로 구할 수 있는 방법을 제시하려 했으며 마찰계수가 예측될 수 있는 특성을 몇가지 제시하였다.⁽¹⁾ 첫째는 표면거칠기의 영향으로, 거친 마찰면에서의 마찰에 대하여 거친 표면을 가진 고무일 경우보다 매끄러운 표면을 가진 고무일 경우에 마찰계수가 훨씬 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이것은 매끄러운 표면을 가진 고무에서의 실접촉면적의 감소율이 적기 때문이며, 또한 거친 표면들이 만나게 되면 돌출부분이 뒤엎히는 부분이 커져서 접촉면적의 증가로 이어지기 때문이다. 둘째로 접지압(Contact Pressure)의 영향이 있으며 Fig. 1과 같이 실험 데이터에 의한 regression analysis에 의해 $\mu = AP^{-1/5}$ 의 fitting 모델을 얻어낼 수 있다고 하였다. 여기서 P 는 접지압이고 A 는 재료에 따른 상수이다.

2.3 마찰과 마모의 상관관계

마모를 설명하기 위해 마찰의 특성을 아는 것은 필수적이다. 고무재료에서 마찰력의 증가는 필연적으로 내마모성의 저하를 초래하기 때문에 마찰특성과 마모특성은 함께 고려되어야 한다. 고무 표면에서 노면과의 마찰일(Friction Work)에 의해 고무가 점차적으로 떨어져 나가는 현상이 마모 현상이며 Fig. 2와 같이 고무의 마찰은 마모 메커니즘과 밀접하게 관련되어 있다. 마찰계수가 대략 1.2정도 이하인 경우에는 피로에 의한 마모가 주로 발생하며 상대적으로 낮은 마

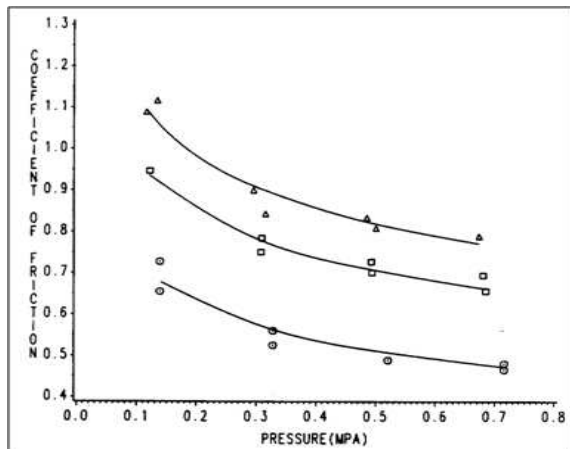


Fig. 1 Coefficient of friction as a function of pressure (MPa); different kind of compound Δ , \square , \circ) [1]

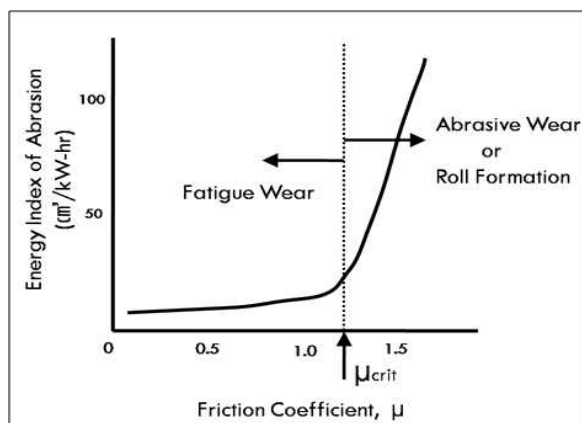


Fig. 2 Correlation between friction and wear [2]

모 속도를 보이고 있으며, 마찰계수가 대략 1.2 이상일 경우에는 abrasive wear 혹은 roll 형상에 의해 급속한 마모가 일어나는 것을 보인다.

3. 고무의 마모

고무의 마모는 크게 기계적인 마모와 화학적인 마모로 나눌 수 있다. 독일규격(DIN 50320)에 따르면 마모(wear)는 물체의 표면에서 기계적인 운동에 의해 물체가 점차적으로 부서져 떨어져 나가는 현상을 말한다고 되어 있다. 이것이 지칭하는 바가 기계적인 마모라고 볼 수

있으며 고유마모, 패턴마모, 피로마모가 이에 속한다. 화학적인 마모는 산소나 온도의 영향으로 고무의 강도가 떨어지는 현상 및 고무가 파괴되는 현상을 통틀어 지칭한다.

기계적인 마모와 화학적인 마모는 따로 일어나는 것이 아니라 복합적으로 작용하는 것이며 고무가 사용되는 환경에 따라 그 영향력의 차이가 있을 뿐이다.

3.1 고유 마모 (Intrinsic Wear)

고유 마모는 고무의 가장 기초적인 마모 과정으로 고무 표면이 굽힘에 의해서 $1\sim 5\mu\text{m}$ 의 아주 작은 고무 입자가 떨어져 나가는 현상이다. 고유마모는 가해지는 마찰힘, 고무의 고유강도, 시험온도 등의 마모 조건을 변화시켜도 마모되는 입자의 크기가 변화하지 않는 특징을 가지고 있다. Schallamach는 배합고무의 파괴강도와 같은 물리적 특성이 마모 성능을 지배하는 주요인자라고 설명하며 고유마모에서의 마모를 식 (1)과 같이 표현하였다.

$$\frac{A}{\mu} = \frac{C}{U_b} \quad (1)$$

A : volume loss / normal load & unit sliding distance

μ : Frictional coefficient

C : Material constant

U_b : Energy density at break

2.3 패턴 마모 (Pattern Wear)

일정한 방향으로 계속해서 고무를 마모시키면 미끌림 방향과 거의 수직인 방향으로 고무 특유의 마모패턴이 형성된다. A. Schallamach가 처음 발견하여 Schallamach Pattern이라고도 불리기도 한다. 일반적으로 마모패턴의 거칠기(ridge의 높이 및 간격)는 마모의 가속도를 증가시키에 따라 커지게 된다.[4]

마모 패턴의 ridge 간격이 마모량과 관련되어 있기 때문에 이것을 여러 가지 마모조건에 대하여 함수로 설명하려는 노력들이 있었다.[3,5]

먼저 연마재가 비교적 sharp한 사포(Garnet Paper)와 같은 경우에는 식(2)와 같이 ridge 간격이 주어진다.[5]

$$R_s = \text{const} \left(\frac{N r_g d^2}{E} \right)^{1/3} \quad (2)$$

R_s : ridge 간격

N : 수직하중

E : 탄성계수

r_g : abrasive_grain_curvature의 반경

d : grain의 크기

또한, 마찰힘과 탄성저장힘(Elastic Restoring Force) 사이의 평형에 근거한 식으로 일반 타이어 주행 노면 혹은 culvature의 반경이 큰 grain으로 된 연마재의 경우에 대하여 ridge 간격은 식(3)과 같이 주어진다.[3]

$$R_s = \text{const} \left(\frac{\phi}{E} \right) d \left(\frac{N}{E} \right)^{5/9} \quad (3)$$

여기서 d 는 밀집형태의 구형 연마재 grain의 직경, ϕ 는 실제 접촉면적에 대한 마찰힘 F 의 비로써 힘에 대한 인자이다. 연마재가 비교적 sharp한 경우보다 탄성계수 및 압력에 대한 의존성이 더 큰 것을 보이고 있다.

3.3 피로 마모 (Fatigue Wear)

고무의 피로마모는 주로 마모의 조건이 가혹하지 않을 때 현저히 나타난다. 끝이 무딘 마모면에 대해 피로 또는 균열성장 메커니즘을 기본으로 한 이론이 제안된 바 있으며,[6] 주기적인 변형을 가함으로써 파괴가 일어날 때까지의 사이클수 n_c 를 이론에 도입하였다.

$$n_c = \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^\delta \quad (4)$$

여기서 σ_0 는 단일 하중조건 하에서의 강도, σ 는 가해지는 응력의 크기, δ 는 폴리머의 종류에 따른 지수이다. 이 이론이 마모에 적용될 수 있

는지 실험을 통해 확인하려 하였고, 파단이 일어날 때까지 가해진 사이클과의 관계에 대하여 마찰힘과 인장응력이 비슷한 경향을 보임을 발견하였다. 이 결과로 마모되는 부피 A 를 식(5)와 같이 계산하였다.

$$A = \text{const} \cdot \left(\frac{\mu E}{\sigma_0} \right)^\delta \left(\frac{P}{E} \right)^{1+\beta\delta} \quad (5)$$

여기서 P 는 수직압력, E 는 탄성계수, β 는 트랙의 거칠기를 나타내는 인자이다.

3.4 화학적 마모

고무의 화학적 노화에 의한 고무의 물성 저하로 기계적 마모성능이 저하되는 현상이 발생한다. NR과 SBR을 마모시켜 보면 마모 시편의 표면에 끈적끈적한 마모 입자들이 생성되어 있는 현상이 종종 관찰되며 이러한 현상을 smearing이라 한다. 이 현상은 고무 내부에 존재하고 있던 저분자량 물질이 고무 표면으로 이동되어 형성하기도 하고 열, 산소 등에 의해 고무 분자가 화학적으로 노화되어 저분자량 물질이 생성되어 이런 저분자량 물질이 마모 표면에 나타나기도 한다.[7]

열, 산소 등에 의해 화학적으로 노화되어 생성되는 경우 가혹하지 않은 마모 조건에서는 이것이 마모 성능을 결정하는 주요 인자가 될 수 있다. 실제 도로에서 타이어 마모시험을 실시한 경우 타이어 표면에서도 끈적끈적한 물질이 발견되는 경우가 있다고 한다. Smearing 현상은 고무의 화학적 마모의 중요한 증거가 되며 smearing 현상이 발생하면 마모속도는 현저히 줄어들어 고무의 마모성능 해석에 오류를 일으키는 원인이 된다.

마모에 있어서 기계적 메커니즘과 화학적 메커니즘의 상대적인 비중을 설명하기 위해 연마재의 표면형상 및 재질을 달리하며 연마재의 표면에 대한 고무의 마모속도(단위 시간당 마모된 부피)를 측정된 결과[8] 매끄러운 주석판에서의 마모속도 보다 매끄러운 고무판에서의 마모속도가 약 15~100배 높은 것을 보였다. 고무판보다

주석판의 탄성계수가 훨씬 높으며 단단함에도 불구하고 고무판에서의 마모속도가 높은 것으로 볼 때 매끄러운 면에서는 혹은 낮은 마모 가속도에서는 마모 메커니즘 중 기계적 측면은 그다지 중요하지 않다고 생각할 수 있다. 반면에 매끄러운 주석판에서보다 단단하고 거친 금속판에서의 고무마모는 약 20~200배 큰 결과를 보였다. 이것으로 볼 때 거친면에서의 고무 마모는 주로 기계적인 파괴에 의해 진행된다고 할 수 있다.

3.5 마모에 대한 하중의 영향

다음의 식(6)은 일정한 거리에 대한 고무의 마모깊이 h 를 측정하여 압력과의 관계를 나타낸 식이다.[9]

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{P}{P_0} \right)^n \quad (6)$$

여기서 h_0 는 기준압력 P_0 에서의 마모깊이이고 n 은 재료에 따라 달라지는 power index이다. 기본적으로 Power Law의 형태를 취하고 있으며 실험에 의해 Fig. 3과 같은 그래프와 이에 따른 power index가 Table 1과 같이 주어졌다. 마멸 과정에서 이 식의 비선형적인 관계는 마찰에너지에 비례하는 tearing energy가 지배적으로 작용되어진 cut growth 현상의 기본 메커니즘으로

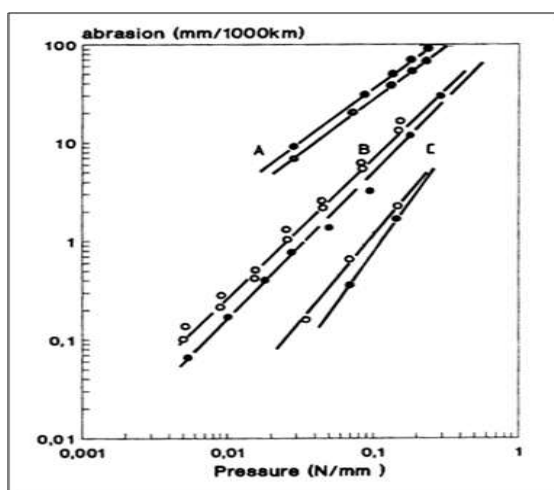


Fig. 3 Sliding abrasion loss of two different rubbers on three types of surface as function of the contact pressure[9]

Table 1 Power Index, n [9]

Compound	track			
	Grinding wheel	Concrete 1	Concrete 2	Tarmac
NR	1.09	1.49	1.31	1.57
SBR	1.45	1.52	1.57	1.96
BR	1.21	1.30	2.23	2.25

Table 2 c and n of eq.7 (attained experimentally)

재료	c	n
UNR	5.0×10^{-15}	2.60
USBR	9.3×10^{-15}	2.45
USBR1	2.2×10^{-16}	2.53
UPB	9.1×10^{-18}	3.38
UNBR	6.8×10^{-16}	2.53
UHNBR	1.5×10^{-15}	2.55

설명되어진다.

Fig. 3에서 ○은 NR, ●은 SBR을 나타내며, A는 grinding wheel에서, B는 콘크리트에서, C는 tarmac 위에서의 마모에 대한 실험을 나타낸다. 아래에 또 하나의 실험식을 소개한다. 여기서는 단위 미끌림 거리당 마모된 부피 A 와 수직하중 N , 그리고 특정 고무 종류와 마모 track에 따른 상수 c 와 n 을 사용하여 역시 Power Law의 형태로 실험식을 나타내었다.[10]

$$A = cN^n \quad (7)$$

Table 2에서 UPB의 값을 보면 c 값은 비교적 매우 작은 값을 가지지만 n 값이 상대적으로 큰 값을 가지는 것을 보인다[11]. 따라서 다른 고무보다 하중에 대한 의존도가 매우 크며 하중이 크게 작용되는 사용조건에서는 마모성능이 다른 고무에 비해 떨어질 것으로 생각된다.

3.6 마모에 대한 온도의 영향

타이어 표면의 온도와 마모율은 아래 그래프와 같이 비례하는 경향을 보인다.[12] 타이어 표면의 온도가 증가함에 따라 상대적인 마모율도 증가하는 경향을 보이고 있으며, 여름과 겨울의

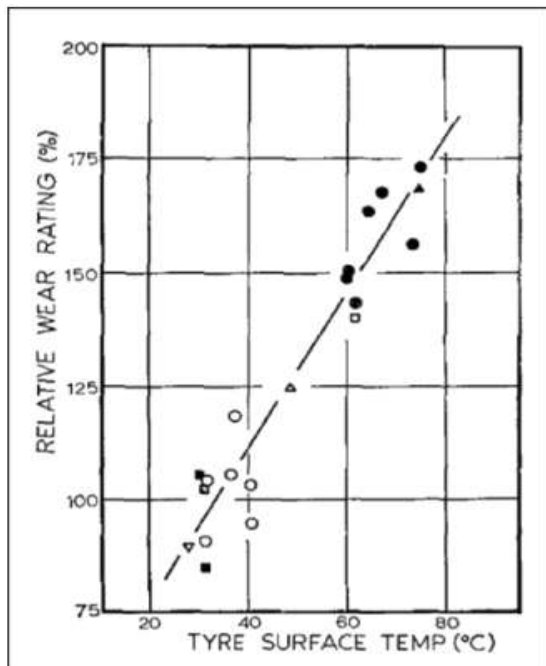


Fig. 4 Relative wear rating of Avon Commercial synthetic and natural rubber tires on dry and wet roads, and at various slip angles[12] (slip angle 1° : ●summer, dry ○winter, dry slip angle 2° : ▲summer, dry △winter, dry ▼winter, wet slip angle 4° : □winter, dry ■winter, wet)

Table 3 abrasion in $10^{-3} \text{cm}^3/\text{m}$ on garnet paper of different coarseness [3]

Grain size (mm)	0.13		0.29		0.63	
Normal Pressure (kg/cm^2)	0.53	1.84	0.53	1.84	0.53	1.84
NR with 50p.p.h HAF black	1.60	6.09	1.76	6.82	1.81	8.97
NR with 75p.p.h fine thermal black	2.00	10.05	2.97	12.05	3.23	13.70
SBR with 50p.p.h HAF black	1.43	5.96	1.83	7.50	2.11	10.10

상대적인 마모율 값을 보면 여름에 더 큰 값을 갖고 있는 것을 쉽게 볼 수 있다.

또한, 젖은 표면에서는 건조한 표면에 비해 상

대적으로 적은 마모율 값을 갖게 되는 것을 볼 수 있다. 타이어 표면이 젖음으로 인해 온도 감소의 효과가 있지만 그보다 젖은 표면에서의 마찰계수 감소로 인해 마모율이 감소하는 효과가 크게 작용하였다.

3.7 마모에 대한 표면거칠기의 영향

Schallamach의 실험 중에서 garnet paper(사포)의 coarseness에 따른 마모의 경향을 측정된 실험 결과가 Table 3과 같이 주어져 있다.⁽³⁾

연마재의 grain size와 수직 압력을 변경해가며 이에 따른 마모부피(cm^3/m)를 측정된 것으로 수직압력 변화에 따라 마모부피가 증가하는 경향은 grain size 변화에 관계없이 같게 나타나고 있다. 따라서 수직압력 변화의 영향은 무시하고 grain size 변화에 따른 경향을 살펴볼 수 있으며, 연마재의 grain size가 커질수록 마모율도 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 마모부피 증가율이 점점 작아지므로 그 의존도는 점차적으로 떨어짐을 관찰할 수 있다.

날카로운 연마재에서는 수직하중에 비례하여 마모가 증가한다. 또한 고무의 탄성계수, 온도, [13] 카본블랙의 함량[14]이 증가함에 따라 마모가 증가한다. 반면에, 매끄러운 면에서는 온도와 카본블랙의 함량이 증가함에 따라 일반적으로 마모가 감소하며, 하중에 대해서는 Power Law의 형태로 마모가 증가한다.[13]

4. 마모 시험

문헌상 나타나는 마모에 대한 연구는 Leonardo da Vinci가 처음이며 마모량이 하중에 비례하여 증가한다고 설명하였다. 그 이후 마모에 대한 연구는 1930년대에 독일에서 시작되었는데 마모 시험은 재료의 내마모성을 평가하는데 필요한 것으로 마모시험기는 다른 재료시험기와는 다르게 여러 가지 종류와 형태를 가지고 있다. 그 이유는 내마모성이라는 특성은 재료의 고유한 특성이 아니라 마모시험시 쓰이는 상대재료의

종류나 시험조건에 따라 바뀌는 상대적 특성이므로 많은 종류의 마모시험기가 필요하다.

4.1 마모시험에 영향을 미치는 요인

일반적으로 마모시험을 크게 구분하면 시험조건, 시험장치, 측정변수로 나눌 수 있다. 이때 마모시험에 영향을 미치는 요인은 경도, 열전도도, 탄성계수와 같은 재료의 특성, 시편의 모양, 하중, 표면거칠기, 진동과 같은 시험방법 및 시편, 그리고 온도, 습도, 청정도와 같은 분위기에 의해 결정된다.

이 중에서 온도는 마찰과 마모에 영향을 미치는 요인들 가운데 가장 중요하다고 할 수 있는데 그 이유는 온도가 상승함에 따라 재료가 연해지고 주변 분위기와 반응이 더 잘 일어나게 되며 윤활재가 있을 시에는 윤활재의 기능에 큰 영향을 미치게 된다. 하중 또한 큰 영향을 미치는 요인으로 하중이 상승함에 따라 표면온도에 직접적인 영향을 미치며 접촉면적을 증가시켜 마모량을 증가시키게 된다.

위에서 설명했듯이 마모시험은 상대재료의 종류나 시험조건에 따라 시험방법이 달라지므로 영향을 미치는 많은 요인들의 특성을 잘 숙지하고 있어야 원활한 시험을 진행할 수 있을 것이다.

4.2 마모시험기

마모시험기의 구동방법과 시험기 선정의 이해를 돕기 위해서 몇 가지 특성별 마모시험기를 설명하도록 한다.

먼저 Fig. 5의 미끄럼/구름 마모시험기 BRW140이다. BRW140 system은 두 재료간에 sliding wear 특성과 rolling wear 특성을 평가할 수 있는 장치로 개발되었다.

특히 윤활유, grease의 마찰계수 측정을 매우 정확하게 측정할 수 있도록 정밀하게 제작되었다.

Fig.6은 직선왕복마찰 마모시험기 RFW160이다. RFW160 System은 왕복운동에 의한 재료의 마찰, 마모 특성을 평가할 수 있는 장치로 저속과 고속에 의해 다양한 접촉조건을 수행할 수 있도록 개발되었다. 소프트웨어 사용시 PC기반의 제어

가 가능하고, 다량의 데이터를 취득할 수 있어 초기 마모시험 진행시 마찰면의 변화를 파악할 수 있게 하였다.

Fig. 7은 연삭 마모시험기 ABW180이다. 연삭마모 특성을 평가하는 장비로서 회전판에 측정용 시편을 고정하고 상대재료인 연삭숫돌에 의해 마모되는 마모량을 측정하는 장치로 요업재료, 플라스틱류, 의류 소재, 고무, 종이류 등 다양한 재료의 연삭마모 특성 평가가 가능하다.

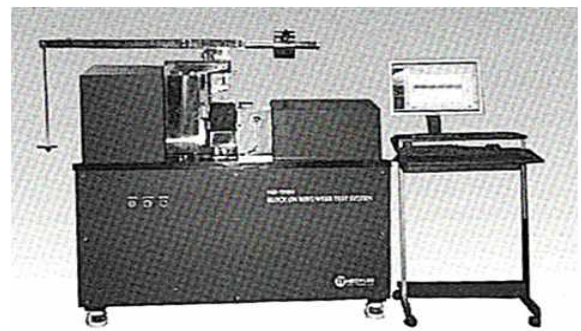


Fig. 5 BRW140

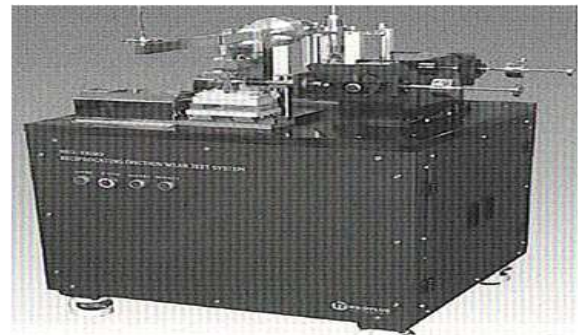


Fig. 6 RFW 160

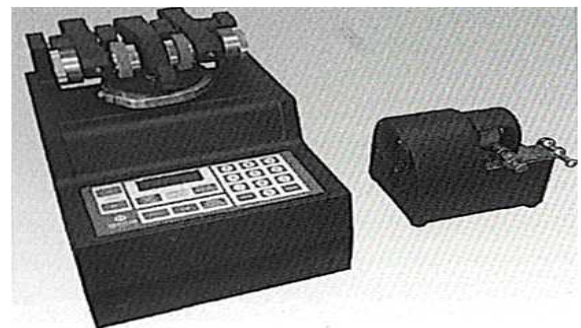


Fig. 7 ABW 180

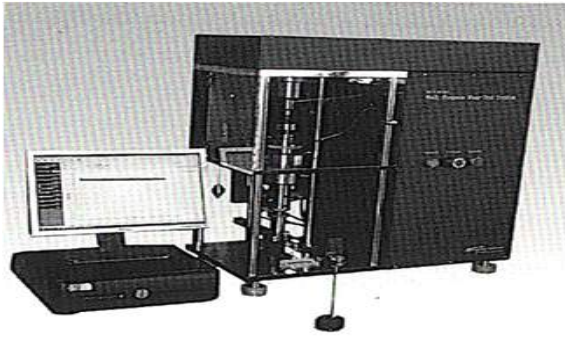


Fig. 8 NPBW 110

마지막으로 Fig.8은 회전형 마모시험기 NPW 110이다. 윤활유 특성에 따른 마모시험도 가능하며 금속재료, 세라믹, 비철재료, 복합재료 등 소재의 내마모성 비교평가에 유용하고, 시편의 형상에 따라 특수목적에 따른 지그의 고안으로 다양하게 실험이 가능한 장점이 있다.

5. 고무 마모의 정량화

5.1 마찰에너지와 마모

마모 과정은 다양한 인자들이 동시에 영향을 미치기 때문에 정량적인 수식화가 매우 힘들거나 마모를 정량화하기 위한 노력들이 꾸준히 수행되어 오고 있다.

마모를 고무에 가해지는 마찰에너지에 의해 고무를 일부가 떨어져나가는 현상이라는 관점으로 본다면, 고무와 노면 사이의 마찰에너지의 함수로 마모를 정량화 할 수 있다. 그러나 마찰에너지에 관여하는 인자들이 다항하고 또한 상황에 따라 일정하지 않기 때문에 각각의 상황에 모두 부합하는 정량화 식을 세우기엔 한계가 있다. 따라서 이것을 위한 총체적인 이론으로 마모가 마찰에너지의 지수승의 함수로 표현된다는 파워이론이 일반적으로 쓰이고 있다.

$$w = C W_{fr}^n \quad (8)$$

여기서 w 는 마모율(wear rate)를 나타내고 C 는 재료에 따른 상수이며, W_{fr} 은 마찰에너지이다.

5.2 마모식 정량화

본 고찰의 3.5절에서 언급했던 식(6)은 마모를 정량화 한 매우 간단한 예이다. K. A. Grosch는 이 식에 대한 여러 학자들의 실험 결과들을 비교하였다.[9] 면도날 같은 날카로운 표면에서의 실험결과는 재료 변화에 따른 power index 값의 변화에 있어 여러 명의 논문이 일치하는 경향을 보였다. 콘크리트 같은 mider 표면에서는 power index 값이 학자마다 다른 값을 보이고 있음을 관찰하였다. 그러나 재료에 따라서 power index 값 크기의 순서는 특징지어짐을 보였다. 예를 들어 NR이 SBR보다 작은 값을 가지며 BR은 이들 보다는 비교적으로 가장 큰 값을 가진다.

A. Schallamach와 D. M. Turner는 실차의 타이어 마모시험을 통해 다음의 식(9)와 같은 형태로 타이어의 마모율을 정량화 하였다.[15]

$$w = \frac{ARF^2}{c} \quad (9)$$

w : wear rate

A : abrasibility of tread rubber

R : tire resilience

F : distance averaged cornering force

c : overall tire cornering stiffness

$$w = \frac{1}{(n+1)} h_0 a b \left(\frac{ka}{bP_0} \right)^n \left(\frac{\delta}{\mu} \right)^n S^{n+1} \quad (10)$$

h : abrasion loss

P : contact pressure

n : power index

S : amount of slip

a, b, k, δ : dimensional parameter

또한 Schallamach는 톱니모양의 휠 마모시험기를 이용한 실험을 통해 슬립거리, 접촉압력, 고무를 마찰계수 등으로 마모율을 정량화한 식(10)을 제시하였다.[16]

식(10)에는 실험시간 동안 마찰계수가 일정하고 단위 압력에서 마모량이 일정하며 power index가 일정하다는 가정이 동반된다. 따라서

슬립량이 적어야 한다는 제한이 있다.

이러한 식들은 특정 실험 조건에 한해서만 잘 들어맞는다. 트레드 형상이나 환경조건이 변화함에 따라 정확도가 떨어지며, 실험의 가혹도 차이에 따라 반대의 경향이 발생되기도 한다. 가혹도(severity)란 노면의 거칠기, 하중, 온도 조건 등으로 인해 마모성능을 저하시키는 영향이 얼마나 심한가를 나타내며, 가혹도 차이에 따라 접촉면에서의 온도변화의 차이가 생기고 그에 따른 고무 물성의 변화 경향이 달라지기 때문에 이러한 마모성능 역전 현상이 발생한다.

6. 결론

고무의 마찰과 마모의 특성에 대하여 알아보았다. 고무의 마모는 여러 가지 메커니즘이 복합적으로 발생하는 현상이기 때문에 고무의 마모 현상을 정확하게 특정지어 설명하기는 어렵다. 또한 타이어의 마모와 같이 실제와 같은 실험조건을 설계하여 실험하는 데에는 어려움이 있기 때문에 실제의 거동을 예측하는데 한계가 있다. 더구나 온도나 습도 같은 실험환경이 결과에 민감하게 영향을 미치며 반복적인 실험에 있어 그 결과를 일정하게 얻기에는 어려움이 있다. 따라서 고무의 마모 거동을 예측하기 위해서 특정한 환경과 고무의 형태나 같은 조건이 변함에 따라 다양한 실험이 동반되어야 하며, 그것을 다양한 시각에서의 이해하여 고무의 거동을 평가하는데 적용하여야 할 것이다.

참고 문헌

- (1) J. J. Lazeration, 1987, "Determination of the coefficient of friction of rubber at realistic tire contact pressures", Rubber chemistry and technology, Vol. 60, No. 5, pp. 966~974
- (2) Desmond F. Moore, 1980, "Friction and wear in rubbers and tires", Wear, Vol. 61, No. 2, pp. 273~282
- (3) A. Schallamach, 1958, "Friction and abrasion of rubber wear", Wear, Vol. 1, No. 5, pp. 384~417
- (4) A. Schallamach, 1952, "Abrasion of rubber by a needle", J. Polymer Science, Vol. 9, No. 5, pp. 385~404
- (5) S. B. Ratner, V. E. Gool and G. S. Klitenick, 1959, "On the abrasion of vulcanized rubber against wire gauze", Wear, Vol. 2, No. 2, pp. 127~132
- (6) I. V. Kraghelsky and E. F. Nepomnyashchi, 1965, "Fatigue wear under elastic contact conditions", Wear, Vol. 8, No. 4, pp. 303~319
- (7) A. Schallamach, 1954, "On the abrasion of rubber", Proceedings of the Physics Society. section B, Vol. 67, No. 12, pp. 883~891
- (8) G. I. Brodskii, N. L. Sakhnovskii, M. M. Reznikovskii and V. F. Evstratov, 1960, Soviet rubber technology, Vol. 19, No. 8, pp. 22
- (9) K. A. Grosch, 1992, "Abrasion of rubber and its relation to tire wear", Rubber chemistry and technology, Vol. 65, No. 1, pp. 78~106
- (10) A. N. Gent and C. T. R. Pulford, 1978, "Wear of steel by rubber", Wear, Vol. 49, No. 1, pp. 135~139
- (11) C. Nah, May 1995, Ph.D Dissertation, The university of Akron. New York
- (12) A. Schallamach, 1961, "Tire wear at controlled slip", Wear, Vol. 4, No. 5, pp. 356~371
- (13) A. Schallamach, 1968, "Recent advances in knowledge of rubber friction and tire wear", Rubber chemistry and technology,

- Vol. 41, No. 1, pp. 209~244
- (14) K. A. Grosch and A. Schallamach, 1966, "Relation between abrasion and strength of rubber", Rubber chemistry and technology, Vol. 39, No. 2, pp. 287~305
- (15) A. Schallamach and D. M. Tunner, 1960, "The wear of slipping wheels", Wear, Vol. 3, No. 1, pp. 1~25
- (16) A. Schallamach, 1972, Gummi. asbest. kunstst., Vol. 25, pp. 442