

# 고무의 마찰 및 마모특성

## 강 신 영

### 1. 서 론

고무제품은 일상생활에서 흔히 접촉하는 제품들이고 그 종류나 용도가 다양하다. 이는 금속이나 무기재료로 대체할 수 없는 독특한 점탄성적 성질 때문에 고무의 사용범위는 보편적이면서도 특수하다는데 그 양면성이 있다. 고무를 주로 사용하여 만든 타이어, V-벨트, 신발류, 그리고 자동차 외이퍼 등과 같은 제품들은 비교적 가혹한 동적조건에서 연속적으로 사용되는 특성을 가지고 있다. 이와같은 사용조건에서 요구되는 성능을 발휘하고 만족스러운 수명을 유지하기 위해서는 이에 맞는 물리적 특성을 가져야 하며 그 중에서도 중요한 특성의 하나가 마찰과 마모특성이다. 특히 반복변형을 계속하는 이들 제품에 있어 실제 사용 중에 발생하는 대부분의 사고는 그 특성상 구성재료의 구조적 파괴로부터 연유되는 경우가 많으며 이는 고무의 마모 및 마찰성능과 무관하지 않다.

고무재료가 단단한 표면위를 미끄러질 때 두 표면사이에서 발생하는 마찰력은 다음의 두 메카니즘에 기인한다고 설명된다. 그 중 하나는 한 물체가 다른 물체의 표면위를 이동하는데 공급되는 에너지는 접촉계면

에서 형성된 분자간 결합을 파괴하는데 소모된 에너지라고 설명되는 접촉 메카니즘이고, 다른 하나는 물체가 이동할 때 접촉계면에서의 물리적 결합으로 재료표면이 변형하게 되는 마찰력은 이 변형에 소요되는 에너지라고 설명되는 변형 메카니즘이다.

접착에 의존하는 마찰은 두 물체의 접촉면적에 큰 영향을 받는다.<sup>1)</sup> 특히 고무의 경우 가해진 하중으로 변형정도가 커서 접촉면적은 고무고체의 경도 및 난성류에 영향을 받는다.<sup>2-4)</sup> 정적마찰뿐 아니라 동적 마찰에서도 접촉하고 있는 두 표면에서의 접촉결합이 이루어지고 미끄러짐 과정에서 그 결합을 분리하는데 소모된 힘이 곧 마찰력이다. 접촉력은 결보기 접촉면적이 아닌 참 접촉면적에 크게 의존한다. 마찰 과정에서 점탄성적 변형을 수반하면 공급된 에너지는 고무분자의 완화과정에서 에너지 소산과정을 거쳐 일부 에너지는 회복되나 원래의 공급 에너지와 같지 않다. 이 에너지 차이가 마찰의 히스테리시스 요소를 극복하는데 소모된 일을 나타낸다.<sup>5,6)</sup> 고무재료에 있어 적절한 마찰력을 유지코자 한다면 접촉면적의 확보와 이에 맞는 점탄성적 특성이 요구된다고 할 수 있다.

고무재료의 마찰력 증가는 필연적으로 내마모성의 저하를 초래하기 때문에 마찰특성과 더불어 마모특성이 동시에 검토되어야 한다. 마모현상은 공급된 에너

---

이학박사/부교수, 전남대학교 공과대학 정밀화학과

지의 히스테리시스 손실과정이어서 마찰력이 올라가면 마모속도는 급격히 상승한다. 고무재료가 반복변형의 연속으로 피로하게 되고 그 결과 재료일부가 표면으로부터 분리되는 피로마모도 마모현상을 해석하는데 유효한 이론이다.<sup>7,8)</sup> 또한 마모 부스러기(debris)는 고무조각이 파괴된 결과라고 보는 관점에서 마모현상을 응집인열의 파괴에너지로 취급하여 설명하는 것도 설득력이 있다.<sup>9)</sup>

본 고찰에서는 고무의 마찰특성을 중심으로 그 메카니즘을 설명하고, 마찰이 있는 곳에 필연적으로 수반되는 고무의 마모현상을 그 원인별로 구분하여 살피고자 한다.

## 2. 고무의 마찰특성

### 2.1 고무고체의 접촉거동

고체와 고체의 접촉은 단지 표면력에 의해서만 결정되는 것이 아니고 재료의 변형을 제거하는 물리적 성질에 의해서도 지배된다.<sup>10)</sup> 평형상태에 있는 두 표면의 접촉윤곽은 그 변형이 탄성적이냐 또는 소성적이냐에 의존하게 된다. 소성적 접촉은 주로 고분자 재료가 접촉압력을 크게 받았을 때 항복하는 특성을 갖는 경우에 해당된다. 그러나 대부분의 고무재료에 있어서는 그러한 항복특성을 무시할 수 있기 때문에 탄성적 접촉을 전제한다. 탄성적 접촉에 있어 한쪽의 표면이 평평하고 단단하면 재료가 접촉하고 있는 원의 반지름을  $a$ 라고 할 때 탄성고체의 변형거리( $\delta$ )는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\delta = a^2/R \quad (1)$$

여기서 접촉원의 반지름  $a$ 는 탄성고체의 물리적 특성으로부터 영향을 받으며 그 관계는 다음과 같다.

$$a^3 = 3/4(1 - \nu^2)RP/E \quad (2)$$

여기서  $\nu$ 는 Poisson비이며  $R$ 은 구의 반지름, 그리고  $E$ 는 탄성고체의 영율(Young modulus)이다.  $P$ 는 접촉면에 가해진 힘이다. Fig. 1에는 접촉원의 직경( $d$ )과  $P$ 와의 관계를 경도가 다른 3가지 천연고무를 비교하여 나타내었다.<sup>11)</sup>

고무는 그 경도에 따라 눌러 들어가는 정도가 달라진다. 고무의 경도는 고무의 탄성율을 측정하는 척도가 되기 때문에 경도의 차이에 따라 하중을 가했을 때 변형되는 정도가 달라져 접촉면적이 영향을 받게 된다.<sup>4)</sup> Fig. 1에 따르면 평평한 고무재료위에 단단한 구체를 이용하여 하중을 가했을 때 접촉원의 지름은 식(2)와 같이  $P^{1/3}$ 에 비례하였다. 여기서 각 직선의 기울기 차이는 각 고무의 경도에 의존한다.

위의 이론들은 표면력을 고려하지 않은 상태에서 결정된 접촉면적이다. 그러나 실제로 낮은 영율을 갖는 고무재료의 표면력은 무시할 수 없을 만큼 접촉면적의 증가를 유발한다. 그리고 접착력은 이같은 접촉면적 증가로부터 결정된다. Johnson 등은 부드러운 두개의 고무구에 하중을 가하여 접촉면적을 측정하였고 그 결과를 하중의 함수로 나타내었다.<sup>2)</sup> 이 실험은 건조한 표면, 물에 적신 표면, 그리고 세제를 희석시킨 용액에 적신 표면에 대해 각각 수행하였다. 그 결과를 Fig. 2에 비교하여 나타내었다.

그림으로부터 일정하중 조건에서 건조한 표면에서의 접촉면적과 접촉계면에 용제를 적용했을 때의 접촉면적이 크게 차이가 있음을 알 수 있다. 이와같은 접촉면적의 차이는 접촉계면에서의 표면장력과 계면장력의 상대적 크기에 기인한다. 고무의 표면장력은 고무와 물의 접촉계면에서의 장력에 비해 상대적으로 대단히 높다. 더욱이 비누용액과 고무의 접촉계면에서의 장력은 무시할 정도로 낮아 접촉면적의 실제 측정치는 이론으로부터 예측된 접촉면적과 일치하고 있다.

### 2.2 마찰의 접촉이론

고체재료가 서로 접촉된 상태에서 한쪽 재료가 다른 한쪽의 재료위를 미끄러져 갈려고 할 때 마찰력은 관

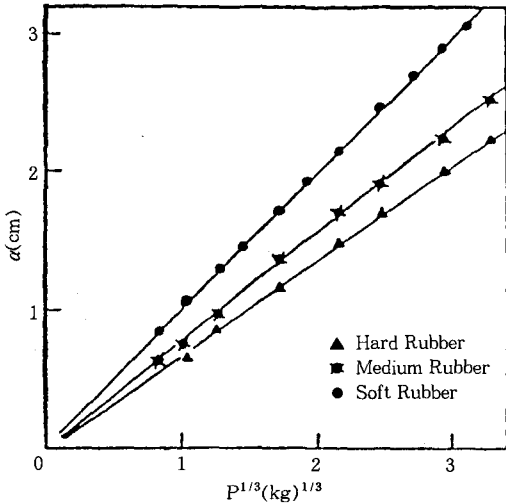


Fig 1. 접촉원주의 직경(d)과 하중( $P^{1/3}$ )과의 관계

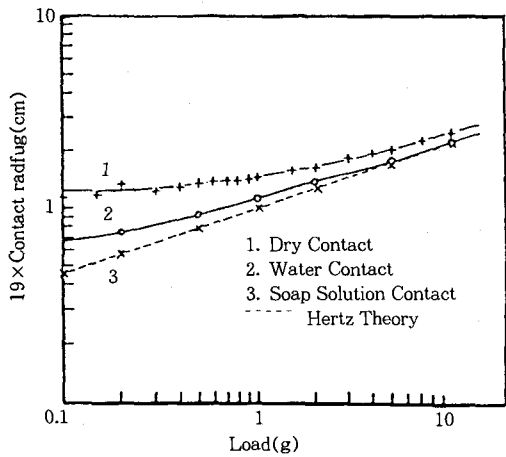


Fig 2. 건조접촉과 윤활접촉에 있어 고무구( $R_1=R_2=2.2\text{cm}$ )의 접촉면적의 변화: +; 건조 접촉, ○; 순수물 접촉, ×; 비누물 접촉, ...; Hertz 이론

찰된다. Amontons법칙으로 알려져 있는 마찰의 기본 법칙은 두 물체 사이의 마찰력은 접촉면적에 무관하고 접촉계면에 수직으로 가해진 하중에 정비례한다는 사실이다. Bowden과 Tabor가 지적한대로 미시적 관점에서 보면 매끄러운 고체는 실제로 거의 없으며 거친 두 표면이 접촉할 때 결과적으로 참 접촉 면적은 겉보기 접촉면적의 비교적 작은 부분에 국한된다.<sup>12,13</sup> 접촉계면에 인접한 재료가 전단되었을 때 표면이동이

능하고 마찰력은 접촉계면의 전단강도와 두 표면의 참 접촉면적에 비례하게 된다. 이 때 마찰력의 변화는 접촉계면에 가한 수직하중이나 미끄러짐 속도, 온도 등이 이들 전단강도나 참 접촉면적에 어떤 영향을 미쳤느냐에 따라 결정된다. 따라서 마찰력은 다음의 식으로 정의한다.<sup>14</sup>

$$F = \mu P \quad (3)$$

여기서 F는 마찰력, P는 시편에 가해진 하중이며  $\mu$ 는 마찰계수이다.

마찰계수  $\mu$ 는 점탄성체의 다른 물리적 특성처럼 속도나 온도변화에 민감한 영향을 받는다. 수직력의 상승은 참 접촉면적의 증가를 가져오고 결과적으로 전단력에도 영향을 미치기 때문에 고무재료의 물리적 성질에 따라 마찰특성을 해석하는 것은 간단치 않다. 특히 수직력 상승과 더불어 참 접촉면적의 변화는 접촉이 탄성적이거나 또는 항복특성을 수반하는 소성적이거나 따라 크게 달라지게 된다. Pascoe와 Tabor는 일찍이 고분자가 점탄성적으로 변형된다는 견지에서 접촉면적(Q)과 수직력(P)과의 관계를 다음과 같이 제안하였다.<sup>15</sup>

$$Q \propto P^{2/m} \quad (4)$$

여기서 m은  $2 < m < 3$ 의 범위에 있으며 순수 소성 접촉의 경우 m은 2, 순수 탄성접촉의 경우 m은 3의 값을 갖는다. 따라서 마찰계수가 수직적 하중의 증가로 감소하는 이유는 표면의 소성적 변형보다는 탄성적 변형의 견지에서 그 이유를 설명할 수 있다.

정적마찰과 마찬가지로 두 접촉표면에서의 미끄러짐 과정, 즉 동적마찰에서도 접촉결합은 형성되고 그 결합을 분리하는데 필요한 힘으로부터 마찰은 발생한다. 미끄러짐 마찰의 접촉요인을 조사하기 위해 Grosch는 판유리 위를 미끄러지는 고무의 마찰계수를 조사하였다.<sup>16</sup> 판유리를 사용함으로써 접촉하고 있는

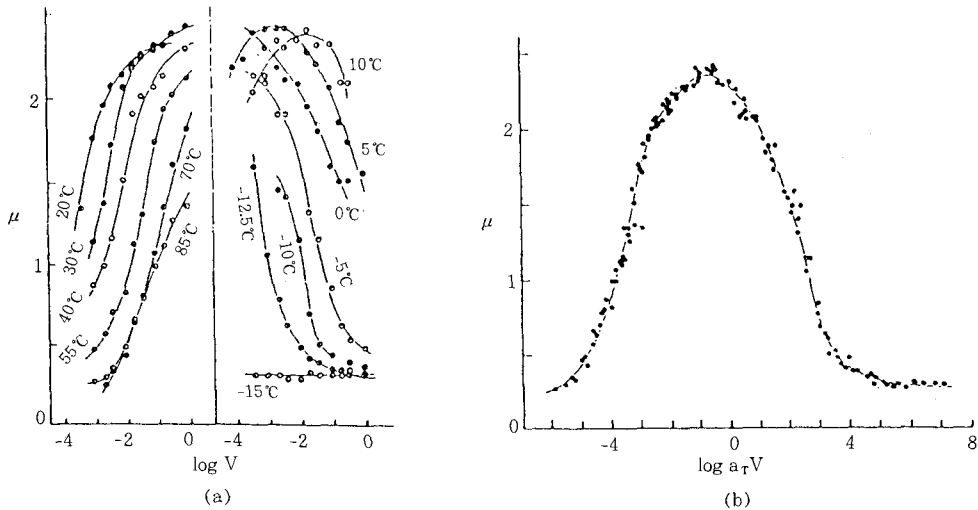


Fig 3. (a) 단단한 표면위를 미끄러지고 있는 acrylonitrile-butadiene고무의 속도에 대한 마찰 변화, (b) 마찰 데이터에 대한 마스터 곡선

두 표면사이의 물리적 결합을 배제한 순수 접촉요인을 분리할 수 있었다. Fig. 3은 실험결과를 보여주고 있다.

Fig. 3(a)에는 미끄러짐 속도의 변화에 대해 다양한 온도에서 측정된 마찰계수를 나타내었고, Fig. 3 (b)는 WLF식으로부터 얻은 이동인자( $a_T$ )를 이용하여<sup>17)</sup> 각각의 곡선을 중첩한 마스터 곡선을 나타낸 것이다. 이론적으로 이동인자를 고무의 유리전이온도( $T_g$ )를 이용하여 결정한다.<sup>18)</sup> 실험적으로 결정한 이동인자는 이론적으로 결정한 이동인자와 일치하였으며 따라서 고무의 마찰특성은 다른 물리적 특성을 평가할 때 적용되는 동일한 점탄성적 과정에 의해 지배받는 것으로 볼 수 있다. 속도변화에 따른 마찰계수의 변화에서 최고의 마찰계수를 보이는 속도가 나타나는 것은 손실 탄성을 곡선에서 최대치를 보이는 진동수에 상응하며 분자분절의 이완거동과 관련이 있다. 가능한 설명의 하나로는 접촉계면에서 분자간 결합이 형성되어 표면이동의 진행방향으로 분자분절들이 가능한 한 멀리 뛰어 오르고 더 이상 이동할 수 없을 때 그 분자결합은 분리되어 표면의 평형위치로 되돌아오는 현상이다. 이론적으로는 미끄러짐 속도가 증가하면 분자결합

을 분쇄하는데 필요한 힘이 증가하나 유효결합의 수는 감소한다. 따라서 분자분절의 이동을 위한 이완시간에 상응한 미끄러짐 속도에서 최고 마찰력이 있게 된다. 마찰력에 있어 최고치의 높이는 접촉계면에서의 접촉력 크기로부터 연유된다.

Ludema와 Tabor의 설명에 의하면<sup>19)</sup> 접촉면적은 탄성율에 반비례하고 결과적으로 접촉면적은 분절이 완에 적당한 속도보다 높은 미끄러짐 속도에서 급격히 감소한다. 전단력은 변형속도와 더불어 증가하나 높은 변형속도에서는 더 이상 증가하지 않고 평형상태를 유지한다. 변형속도에 따른 접촉면적과 전단력의 변화가 결합되어 결과적으로 마찰력은 특성 미끄러짐 속도에서 최대치를 보이게 된다.

### 2.3 마찰의 변형이론

모든 마찰에는 표면변형을 수반한다. 접촉면에 수직력이 작용하면 표면변형을 수반할 뿐 아니라 비록 수직력이 무시된다 할지라도 접촉면에 평행한 마찰력은 접촉면에 평행한 변형을 초래하게 된다. 계면에서의 접촉작용이 무시된다 할지라도 거친 두표면의 기계적 결합은 마찰을 유발시킨다. 실제로 접촉계면을 운할함

으로써 접착력을 최소화시킬 수 있다. 마찰의 변형요소는 결국 표면들의 기계적 상호작용과 연관되어 마찰 효과에 적용된다.<sup>20)</sup> 일반적으로 마찰의 변형 메카니즘을 말할 때 표면의 변형이 1mm를 초과하는 경우로 분류하고 있다. 그러나 이 기준은 마찰의 변형기구와 접착기구를 분리하기 위해 임의로 설정한 것에 불과하다.

마찰력을 극복하기 위해 공급된 일은 표면의 소성적 또는 점탄성적 변형을 위해 소비된다. 두 가지의 변형 특성은 마찰의 변형요소에 있어 두 가지의 서로 다른 형태를 구분짓는 기준이 된다. 만일 공급된 에너지가 접촉표면의 소성적 영구변형을 가져오는데 소모되었다면 이것은 “플로우잉 마찰(ploughing friction)”이라 하고 표면의 기계적 결합이 점탄성적 변형을 유발하고 에너지가 분자완화과정을 수반한다면 이때의 마찰은 “히스테리시스 마찰(hysteresis friction)”로 부르고 있다. 후자의 경우 흔히 “변형마찰(deformation friction)”로 잘못 명명되고 있다. 이는 점탄성 고체의 모든 변형이 거시적으로 히스테리시스 기구에 의해 에너지를 소산하기 때문이다. 그러나 히스테리시스 마찰은 고분자의 거시적 점탄성 변형에 의해 에너지가 소산된 경우에만 사용되어야 한다. Fig. 4는 변형마찰의 두 경우를 비교하여 나타낸 그림이다.<sup>20)</sup>

윗 그림 경우 단단한 구가 고무고체위를 이동하고 있는 히스테리시스 마찰을 나타낸다. 구 전면에 있는 재료는 압축되고 이 압축에 대한 저항을 극복하기 위해 일을 공급해야 한다. 구 뒷면에서는 점탄성적 복원이 이루어지고 이 복원력이 구가 앞으로 이동하도록 돕는다. 그러나 물질의 변형주기에서 점탄성적 에너지 손실 때문에 공급 에너지의 일부는 소산되어 복원 에너지의 크기는 공급 에너지의 총량과 결코 같지 않다. 이 완화과정에서 공급된 일과 복원된 일의 차이는 마찰의 히스테리시스 요소를 극복하는데 쓰여진 일을 나타낸다. 고무와 같은 탄성체의 마찰에 있어서는 주로 마찰의 히스테리시스 메카니즘을 따르는 것으로 본다. 아래 그림은 플로우잉 마찰을 나타낸 그림이다. 단단

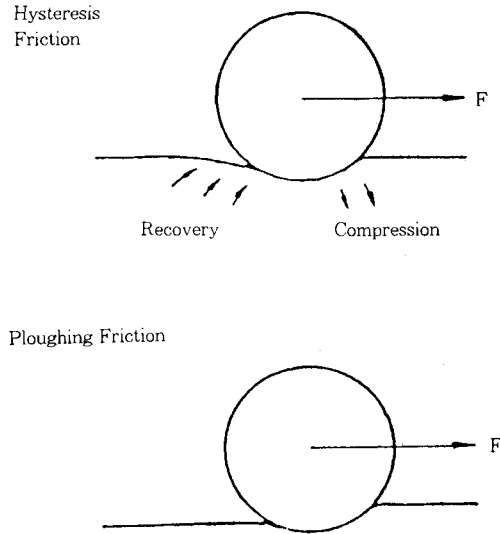


Fig 4. 변형마찰 : 히스테리시스 마찰(위)와 플로우잉 마찰(아래)

한 구가 플라스틱 표면위를 이동할 때 구 뒷면에서는 홈자국이 남는다. 이 경우에 마찰력은 단순히 홈의 단면적과 플라스틱의 항복압력의 적으로 나타낼 수 있다.

경우에 따라서는 마찰의 접착요소에 비해 변형요소가 무시할 정도로 작은 경우도 있지만 히스테리시스 손실이 크고 특히 접촉계면에 윤활이 잘된 탄성체에서는 히스테리시스 요소가 지배적 요인이 된다. Fig. 5는 acrylonitrile-butadiene 고무가 산화마그네슘 분말로 처리한 실리콘 카바이드(입자크기 : 180, 거칠음간의 평균간격 : 0.14mm) 표면위를 미끄러졌을 때 측정된 마찰력을 나타낸 그림이다.<sup>16)</sup>

순수 실리콘 카바이드 표면위를 미끄러졌을 때 접촉요인에 의한 마찰로 첫번째 피이크(peak)가 나타나고 보다 높은 속도에서 두번째 피이크가 나타난다. 이 두번째 피이크가 마찰의 변형 메카니즘에 기인한 것으로 설명된다. 이를 증명키 위해 동일 표면위에 산화마그네슘 분말로 처리하여 같은 마찰실험을 수행한 결과 첫번째 피이크가 사라졌다. 마찰표면에 분말의 존재는 계면에서의 결합형성을 저지한다. 따라서 마찰의 접착

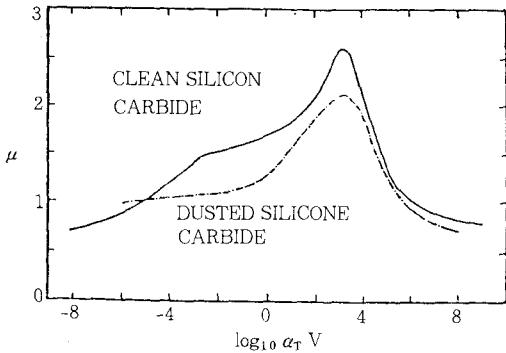


Fig 5. 순수 실리콘 카바이드 표면과 분말처리한 실리콘 카바이드 표면위에서 측정된 acrylonitrile-butadiene 고무의 마찰계수 마스터곡선

요인에 의한 피이크는 사라지고 오직 변형요인으로부터 얻어지는 두번째 피이크만 관찰되었다. 단단한 구가 고무판위를 이동할 때 발생하는 히스테리시스 마찰의 마찰계수는 다음식에 의존한다.<sup>21)</sup>

$$\mu = [(1 - \nu^2)P/R^2E]^{1/3} f(\tan \delta) \quad (5)$$

식 (5)로부터 마찰의 변형요인은 탄성체의 동적 실험에서 에너지 손실특성인  $\tan \delta$ 가 속도변화에 대해 최고치를 보이는 거동으로부터 연유한다고 할 수 있다.

### 3. 고무의 마모특성

#### 3.1 마찰과 마모의 관계

고무마모의 기본원리나 그 메카니즘의 이해는 고무제품의 수명을 연장하는데 필수적이다. 그러나 마모의 실질적인 중요성에도 불구하고 이에 대한 이해는 아직 충분치 않다. 고무 배합물의 여러가지 첨가제에 따른 마모형태의 변화나 주위 환경에 따른 영향을 분석적으로 접근하기 어려울 뿐 아니라 실험을 통해 실제의 마모거동을 재현하는데 어려움이 따르기 때문이다. 따라서 마모는 마찰보다 더 복잡한 현상이고 이것은 고무 표면에서 발생하는 물리-화학적 과정의 결합으로 나타난 결과이다. 고무의 마모는 외부의 마찰과정에서

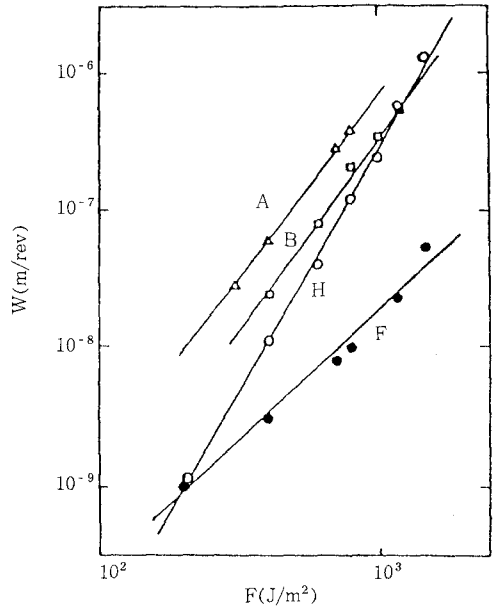


Fig 6. 마찰일 (F)과 마모속도 (W)의 관계 : (A) NR, (B) SBR, (H) PB, (F) 카본블랙으로 충전된 PB

관찰 되어 진다. 고무의 마모와 마찰은 불가분의 관계에 있고 마찰이 있는 곳에 필수적으로 마모가 수반된다. Fig. 6는 마찰과 마모의 상관관계를 나타내는 실험결과를 보여준다.<sup>22)</sup>

그림에서와 같이 마모속도는 마찰 일에 크게 의존하였다. 마찰 일과 마모속도를 log-log scale로 도해하였을 경우 모든 고무재료가 선형관계를 유지하였다. 따라서 실험적으로 결정된 마모속도와 마찰일의 관계식은 다음과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$W = kF^n \quad (6)$$

여기서  $k$ 와  $n$ 은 고무재료의 특성을 나타내는 값들이다. 마모표면을 조사해 보면 낮은 마찰 일의 수준에서는 마모량이 적고 마모표면이 비교적 매끄러웠으며 높은 마찰일에서는 빠른 마모와 더불어 거친 마모표면이 관찰되었다.

마모의 여러가지 형태를 분류하는 시도는 마모를 유

발하는 주요 원인을 확인하는 과정에 근거를 두고 있다. 고무의 응용분야를 고려하면서 고무의 마모는 물리적 요인과 화학적 요인으로 크게 분류하여 구분한다.

### 3.2 물리적 메카니즘

물리적 요인에 의해 마모되는 현상에 대해 다시 세 가지의 형태로 구분한다.<sup>23)</sup> 첫째로 표면의 단단한 입자나 거칠음에 의해서 유발되는 마멸마모(abrasive wear), 두번째로 국부적으로 주기적 응력을 받은 결과 재료의 일부가 떨어져 나가는 현상인 피로마모(fatigue wear), 끝으로 두 표면사이의 접촉력의 결과 한 표면에서 다른 표면으로의 재료이동을 나타내는 접착마모(adhesive wear)가 있다.

마멸마모에 대한 가장 간단한 이론으로는 단단하고도 불규칙한 돌출부가 상대적으로 연한 재료속으로 파고들어 전단이나 절단으로 연한 재료를 떼어 내는 것을 말한다. 이와같은 마모는 프라우잉 마찰의 결과로 발생하는 경우이며, 마모로 인해 제거된 재료의 부피(V)와 단위 이동거리에 대해 마모된 재료의 부피를 나타내는 마모속도( $K_v$ )는 다음과 같이 나타낸다.<sup>20)</sup>

$$V = 2LP \tan \theta / \pi h \quad (7)$$

$$K_v = kP \tan \theta / \pi h \quad (8)$$

여기서 L은 이동거리,  $\theta$ 는 돌출부의 경사각, h는 마모재료의 경도, 그리고 k는 상수이다.

고무가 마모될 때 돌출부의 이동방향에 수직으로 용기패턴이 형성되고 이같은 패턴의 형성은 마모와 관련이 있다.<sup>24)</sup> 소성변형은 고무에서 발생하지 않기 때문에 고무의 마모 메카니즘은 매우 다르다. 고무로부터 마모 부스러기의 제거는 표면으로부터 조각의 파괴과정임에 틀림없다. 따라서 고무의 마멸마모는 고무의 응집인열에 대한 파괴표면 에너지로 취급하기도 한다. Champ, Southern과 Thomas는 마모패턴의 변형모델을 다음의 Fig. 7처럼 제안하였다.<sup>25)</sup>

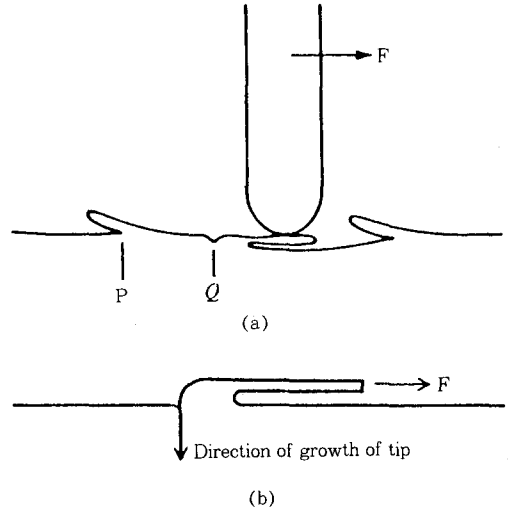


Fig 7. 마멸마모의 결과로 생성되는 패턴마모의 도식적 표현 : (a) 마모패턴과 칼날에 의한 패턴변형에 대한 도해, (b) 마모력하에서 균열성장의 모델

이 경우에 부피마모속도( $K_v$ )는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.<sup>8)</sup>

$$K_v = Bb\alpha^{-1} F^{\alpha} \quad (9)$$

여기서 상수  $\alpha$ 와 B는 고무의 절단성장실험으로부터 결정할 수 있고 마찰력 F는 마찰실험으로부터 결정할 수 있다. 상수  $\alpha$ 는 천연고무에 있어서 2, SBR과 같은 비결정성 고무의 경우 4 또는 그 이상까지의 범위로 변하기 때문에 부피마모속도는 고무와 거친 상대표면 사이의 마찰력에 크게 의존하는 것을 알 수 있다.

단단하고도 거친 표면이 고무재료의 표면위를 이동할 때 고무표면은 연속적인 변형주기를 겪게 된다. 피로마모는 이와 같은 과정이 반복될 때 피로파괴가 일어나고 그 결과 고무의 일부가 표면으로부터 분리되는 현상을 말한다. 이 피로마모는 마모의 가장 부드러운 형태이다. 그러나 두 표면이 접촉한 상태로 상대적인 이동을 계속하는 한 피로마모는 고무표면의 주요 마모가 된다. 고무표면의 피로에 대한 단순한 설명을

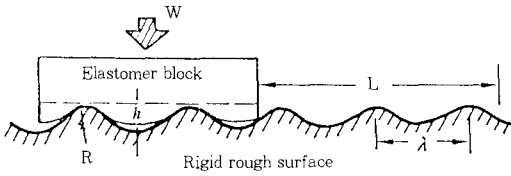


Fig 8. 피로마모에 대한 도식적 표현

위해 Fig. 8처럼 고무블록이 규칙적으로 돌출부가 정렬된 표면위를 이동하고 있다고 가정한다.

피로마모로 제거되는 고무층의 평균두께를  $h$ , 표면위를 미끄러져 이동한 거리를  $L$ , 그리고 면적이  $A$ 인  $N$ 개 고무층이 제거된다면 손실된 고무의 부피( $V$ )는 다음과 같다.<sup>26,27)</sup>

$$V = NAh \quad (10)$$

고무에 가해진 하중이  $W$ 일 때 마찰력에 의해 수행한 일은  $L\mu W$ 로 나타내며 이 때 단위 일에 대한 마모속도( $K_e$ )는 다음 식으로 표현된다.

$$\mu K_e = K\sigma_0^{-b}(W/A)^{(b-1)/3}(R/\lambda)^{(5-2b)/3}E^{(2b-2)/3} \quad (11)$$

여기서  $K$ 는 상수,  $\sigma_0$ 는 인장강도이며,  $\lambda$ 는 각 돌출부의 파장이다. 고무재료의 마찰은 대부분 (11)식을 따르며 지수  $b$ 는 천연고무의 경우 1.75, SBR의 경우 1.9를 갖는다. 이것은 짐을 가득 싣은 화물차 타이어의 빠른 마모 뿐 아니라 높은 온도와 영율이 증가하는 경우에도 이론적으로 정당화된다.

접착마모의 경우 피로마모보다 분류하거나 분리하기가 대단히 어렵다. 고체고분자의 접착으로 인해 한 표면에서 다른 표면으로의 이동된다. 접착 상호작용은 금속표면위를 고분자가 미끄러지는 동안에 가장 중요한 역할을 하며 특히 표면이 비교적 매끄럽고 금속표면의 동일한 마모자국을 반복적으로 미끄러졌을 때 접착마모가 중요한 메카니즘이 된다.<sup>23)</sup> 금속표면에 미끄러짐이 반복되는 동안에 금속표면위에 고분자의 이

동층이 형성된다. 이와같은 이동층의 형성은 접촉의 형태가 고분자/금속에서 고분자/고분자로 바뀌면서 표면형태도 달라지게 된다. 이와같은 요인들이 국부적인 응력의 크기에 영향을 주게 되어 피로의 결과로써 나타나는 마모의 영향을 미친다. 접착요인에 근거한 간단한 마모이론은 마모속도와 하중 사이의 직접적인 비례관계를 예측하고 있다. 물론 이와같은 비례관계는 하중의 변화가 표면온도나 형성된 이동층의 형태에 변화를 유발하지 않을 때를 가정한다. 이 밖에도 온도와 속도도 마찰특성에서 논의한 것처럼 접착요인에 영향을 미쳐 결국 마모형태에 변화를 초래하게 된다.

### 3.3 화학적 메카니즘

고무제품의 사용조건에 있어 분위기의 온도가 높은 경우 산소나 오존 또는 UV에 의해 고무자체가 화학적으로 열화되는 가능성이 높아지게 된다. 열화된 고무는 그 강도가 약화되어 내마모성이 크게 저하된다. 특히 가혹한 마찰이 있는 곳에서는 두 표면의 접촉계면에서 발생하는 열에 의해 국부적으로 열화가 가속화된다. 이러한 화학적 반응은 결국 마모속도나 마모표면의 형태에 영향을 미치게 된다.<sup>28)</sup>

천연고무나 SBR과 같은 합성고무의 경우 마모시험 과정에서 접촉계면에 끈적거리는 스미어링(smearing, 기름 등으로 더럽혀짐) 현상이 관찰된다. 이는 배합고무에 포함되어 있는 가스제나 오일 등 저분자 첨가제의 이동으로 인해 발생하는 현상으로 보는 견해도 있지만,<sup>29)</sup> 고무표면의 열화로 분자쇄가 절단되어 저분자로 변하면서 마모과정에서 표면을 오염시킨 결과로 보는 견해도 있다.<sup>22,30)</sup>

화학적 요인에 의한 마모를 물리적 요인에 의한 마모로부터 분리하는 것은 쉽지 않다. 그러나 마모시험의 분위기를 조절하여 진공 또는 질소분위기 상태에서 실험한 경우와 공기중의 산소분위기에서 실험한 경우를 비교하여 볼 때 산소분위기에서 마모속도가 더 빠르다는 것이 관찰된다.<sup>31)</sup> 또한 고무배합물에 산화방지제를 함유하고 있는 경우에는 비록 산소분위기 조건



이라 할지라도 마모속도는 감소되었다. 질소분위기에서는 마모속도에 대해 산화방지제 함유여부에 다른 영향이 거의 없었다.<sup>32)</sup> 이와 같은 실험결과는 고무의 산화작용이 마모에 크게 영향을 미치고 있다는 것을 증명하고 있다.

Gent와 Pulford는 칼날형 마모시험기를 이용하여 마모 메카니즘을 해석하였다.<sup>22)</sup> 고무마모는 국부적인 기계적 과열과 가교된 고무망상의 분해가 상호 경쟁적으로 일어나는 과정으로 해석하는 기계화학적 메카니즘이라고 결론지었다. 카본 블랙과 섞은 천연고무나 SBR, EPR과 같은 합성고무의 경우 산소분위기에서의 마모실험 결과 끈끈한 마모 부스러기가 관찰되었다. 그러나 카본 블랙을 함유한 PB나 TPPR 배합고무는 이와같은 마모현상이 발견되지 않았다. 따라서 스미어링 마모는 화학반응을 유발할 수 있는 고무의 분자 구조적 특성에 기인한다고 할 수 있다. 천연고무나 SBR, EPR 경우에도 질소분위기에서는 스미어링 마모에서 건조한 마모로 그 현상이 바뀌었다. 결과적으로 마모의 기계화학적 메카니즘은 고무의 표면은 기계적 응력으로 마모가 시작되고 대기중의 산소나 오존 등에 의해 열화되면서 마모가 가속화되는 현상을 설명하고 있다.

#### 4. 결 론

지금까지 고무의 마모와 마찰특성을 중심으로 고찰하였다. 마모와 마찰거동은 각각 별개가 아닌 상호 복합적 현상이라고 할 수 있다. 마모와 마찰특성을 원인별로 그 메카니즘을 구분하여 설명하였지만 이를 실험적으로 완벽하게 분리한다는 것은 대단히 어려운 과제라고 생각한다. 실제로 여러 메카니즘들이 동시에 영향을 미치기 때문에 원인별로 상대적 크기를 비교한다는 것은 더욱 어렵다.

마모와 마찰실험은 실제 사용상의 동일조건을 설계하기가 대단히 어려워 실험결과가 실지거동을 예측하는데 한계가 있다. 뿐만 아니라 반복실험에 있어서도

그 재현성이 다른 물성실험에 비해 상대적으로 크지 않다. 이것은 마모와 마찰특성이 분위기의 조건에 민감할 뿐 아니라 상대표면의 거칠음이나 그 날카로움 정도가 실험 중에 일정하게 유지되느냐의 여부에 크게 의존하기 때문이다. 그럼에도 불구하고 ASTM에 기술된 표준방법에 따라 마모특성을 측정하는 몇가지 실험방법, 즉 Pico 마모시험, NBS 마모시험, 그리고 Du Pont 마모시험 등은 고무업계에서 널리 이용되고 있다. 그러나 한가지 실험결과를 절대적으로 의존한다고 보다는 다양한 실험을 통해 검증이 필요하며 배합고무의 설계에 따른 마찰 및 마모특성을 결론내리는 신중을 기해야 한다고 사료된다.

고무의 마찰 및 마모특성에 대한 이론적 접근은 현실과 거리가 있을지도 모른다. 실제 배합고무는 단일고무보다도 성질이 다른 여러 고무를 혼합하여 사용하는 등 용도에 따라 다양하게 설계되고 있기 때문에 경우에 따라서는 예기치 않은 결과를 얻을 수 있다. 여기서는 다만 고무재료의 마모 및 마찰특성을 기초적으로 이해하는데 참고가 되었으면 하는 희망이다. 본 글에서 충분히 많은 설명은 뒤에 소개한 참고문헌을 통해 보다 깊은 지식을 습득할 수 있으리라 생각한다.

#### 참 고 문 헌

1. M Barquins, *Mat. Sci. Eng.*, **73**, 45(1985).
2. K. L. Johnson, K. Kendall, and A. D. Roberts, *Proc. Roy. Soc.*, **A324**, 301(1971).
3. P. J. Aird and B. W. Cherry, *Wear*, **47**, 231 (1978).
4. A. N. Gent, *Trans. Inst. Rubber Ind.*, **34**, 46 (1958).
5. D. F. Moore and W. Geyer, *Wear*, **22**, 113 (1972).
6. V. G. Zankin and W. O. Yandell, *Wear*, **72**, 157 (1981).
7. I. V. Kraghelskii and E. F. Nepomyaschchii,

- Wear*, **8**, 303(1965).
8. A. G. Thomas, *J. Polym. Sci.*, **31**, 467(1958).
  9. D. H. Champ, E. Southern, and A. G. Thomas, *Am. Chem. Soc., Coatings Plast. Div. Prep.*, **34** (1), 237(1974).
  10. S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, "*Theory of Elasticity*", 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 1970, p. 403.
  11. A. Schallamach, *Proc. Phy. Soc.(London)*, **65** (Sec.B), 657(1951).
  12. F. P. Bowden and D. Tabor, "The Friction and Lubrication of Solids", part 1, Oxford University Press, London, 1950.
  13. F. P. Bowden and D. Tabor, "*The Friction and Lubrication of Solids*", part 2, Oxford University Press, London, 1964.
  14. J. K. Lancaster, "Friction and Wear" in *Polymer Science*, vol. 2(A. D. Jenkins, ed.), North-Holland, Amsterdam, 1972. pp. 960-1046.
  15. M. W. Pascoe and D. Tabor, *Proc. Roy. Soc.*, **A235**, 210(1956).
  16. K. A. Grosch, *Proc. Roy. Soc.*, **A274**, 21(1963).
  17. J. D. Ferry, "Viscoelastic Properties of Polymers", 3rd ed., John Wiley and Sons, New York, 1980.
  18. P. F. Green and E. J. Kramer, *Macromolecules*, **19**, 1108(1986).
  19. K. C. Ludema and D. Tabor, *Wear*, **9**, 329 (1966).
  20. B. W. Cherry, "*Polymer Surfaces*", Cambridge University Press, London, 1981, chap. 7.
  21. J. A. Greenwood, H. Minshall, and D. Tabor, *Proc. Roy. Soc.*, **A259**, 480(1961).
  22. A. N. Gent and C. T. R. Pulford, *J. Appl. Polym. Sci.*, **28**, 943(1983).
  23. J. K. Lancaster, *Plast. Polym.*, **41**, 297(1973).
  24. A. Schallamach, *Wear*, **1**, 384(1958).
  25. D. H. Champ, E. Southern, and A. G. Thomas, "Fracture Mechanics Applied to Rubber Abrasion", in *Advances in Polymer Friction and Wear* (L. H. Lee, ed.), Plenum Press, New York, 1974, pp. 133-142.
  26. M. M. Reznikovskii, *sov. Rubber Technol.*, **19** (9), 32(1960).
  27. D. F. Moore, "The Friction and Lubrication of Elastomers", Pergamon Press, Oxford, 1972.
  28. 고진환·나창운, *고분자 과학과 기술*, **6**(4), 348 (1955).
  29. A. Schallamach, *Proc. Phy. Soc.*, **67**(Sec.B), 883(1954).
  30. V. A. Garten, k, Eppinger, and D. E. Weiss, *Rubber Chem. Technol.*, **29**(4), 1434(1956).
  31. A, Schallamach, *J. Appl. Polym. scl*, **12**, 281 (1968).
  32. G. I. Brodskii, N. L. Sakhnovskii, M. M. Reznikovskii, and V. F. Evstratov, *Sov. Rubber Technol.*, **19**(8), 22(1960).