

타이어용 고무의 마모 및 마찰 거동

김 학 주 · 전 일 환

1. 서 론

전세계 고무 생산량의 대부분은 타이어 산업에 응용되고 있기 때문에 타이어 성능 측면에 관련된 고무 거동을 해석하는 활동이 고무 산업의 주 관심사로 자리잡아 왔다. 즉 타이어의 주요성능에 해당하는 승차감, 조종안정성, 소음, 연비, 제동, 내구성(저 발열) 마모 성능 등이 그것이다. 특히 이들 성능 중 마모성능은 타이어의 수명을 좌우하는 가장 중요한 성능으로 타이어 소비자들에게 인식되어 있다.

타이어의 마모는 타이어 표면과 노면 사이에 작용하는 마찰력이 고무의 강도보다 클 때 표면의 고무가 떨어져 나가 생기는 현상으로 그림 1에서와 같이 고무의 성능과 타이어의 구조 등과 같은 타이어 내적 인자와 노면의 형상(거칠기), 기후, 노면온도 등의 외적 인자들이 복합적으로 작용하는 아주 복잡한 과정이다. 즉 타이어의 마모 현상을 이해하기 위해서는 고무 마모기구에 대한 이해는 물론 타이어 주행 중 노면과 타이어 트래드 고무(타이어의 부위 중 노면과 직접 접하는 부분) 사이의 상호작용 기구에 대한 폭넓은 이해가 필요하다. 실제로 실험실에서 고무 마모 성능을 측정된 결과와 타이어의 마모 성능 사이에 전혀 상반된 결과를 보이는 경우가 종종 발생하고 있으며 이는 아직도 고무의 마모 발생 기구에 대한 명확한 규명이 부족하고 또 실 타이어 주행상황에 대한 명확한 규명이 이루어지지 않았기 때문이다.

고무 마모 발생 기구에 관한 연구는 수많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다. 여기서는 그 동안 수행되어온 마모 발생 기구에 대한 연구 결과들을 간략

히 살펴보고, 타이어 마모 성능을 예측하기 위한 연구활동 등에 관해 기술하고자 한다.

2. 고무 마모 발생 기구

앞에서도 언급한 바와 같이 아직도 고무 마모 발생 기구에 관한 명확한 규명은 되어 있지 않지만 그동안의 마모 발생 기구에 대한 연구 결과를 종합해 보면 마모현상은 크게 기계적인 마모와 화학적인 마모로 나누어 볼 수 있다. 기계적인 마모라 함은 노



김학주

1987 연세대학교 화학공학과(학사)
1998 University of Akron, Polymer Science(Ph.D)
1987~ 한국타이어 중앙연구소
현재 선임연구원



전일환

1990 서울대학교 공업화학과(학사)
1992 서울대학교 공업화학과(석사)
1991~ 한국타이어 중앙연구소
현재 선임연구원

Wear and Frictional Behavior of Tire Rubber

한국타이어 중앙연구소(Hakjoo Kim and Ilhwan Jeon, Material Research Team, R&D Center, Hankook Tire Co., LTD., 23-1, Jang-dong, Yusung-gu, Taejeon 305-343, Korea)

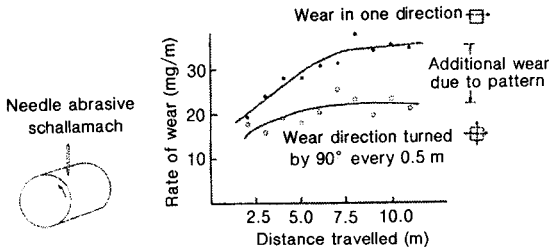


그림 3. Additional wear due to abrasion pattern : Experiments by A. Schallmach.³

Wear rate vs normal load for NR Bulgin & Walters '67
Crack growth per cycle in fatigue for NR Lindley 1962

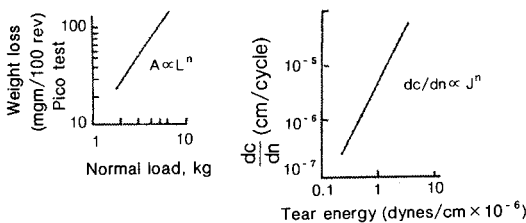


그림 4. Power relation of wear rate vs normal load in PICO abrasion test.⁶

E. Southern & A. G. Thomas는 Bulgin과 Walters의 연구결과에서 더 나아가 피로마모(또는 패턴마모)가 일어나는 과정을 모델링하여 고무의 부피 마모속도를 수식화하여 제시하였다.⁷ 피로마모가 일어나는 과정을 도식화하면 그림 5에서와 같고, 고무의 부피 마모속도는 마모패턴의 확장속도에 비례하며 마모패턴의 확장속도는 마찰력이 마모패턴의 크랙 팁에 직접적으로 가해진다는 가정 하에서 마찰력의 지수승과 비례하는 형태의 식 (4)가 그것이다. 그들은 이러한 이론을 바탕으로 고무 마모시험으로부터 크랙 성장속도를 계산하였고, 마모패턴 및 마찰력으로부터 추정 계산한 인열에너지를 시험에 가하여 크랙 성장속도를 구한 결과와 비교하였다.

$$A = w \cdot dc \cdot \sin \theta \quad (2)$$

A : volume wear rate per unit distance slide
 w : sample width
 dc : crack growth rate

$$dc = \beta \cdot J^a \quad (3)$$

식 (2), (3)에서

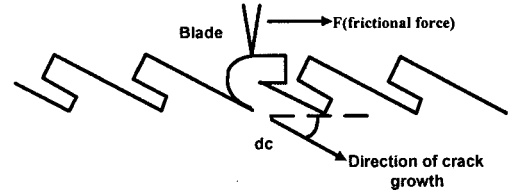


그림 5. Model for crack growth under abrading force, F , showing crack propagation at an angle, θ , to the surface.

$$A = w \cdot \beta \cdot J^a \cdot \sin \theta \quad (4)$$

J : tearing energy(마찰력으로부터 계산)

a, β : material constants

$$J = \frac{F(1 + \cos \theta)}{w} \quad (5)$$

F : frictional force

그림 6에서 보는 바와 같이 SBR, NBR과 같은 비결정성 고무의 경우는 마모시험으로부터 구해진 크랙 성장속도와 피로시험으로부터 구해진 크랙 성장속도가 잘 일치하고 있었지만 결정성 고무인 천연고무의 경우에는 상당한 차이를 보이고 있었다.

A. N. Gent와 C. T. R. Pulford는 갈날 마모 시험에서 마모손실은 마모시험 중 칼날과 고무 사이에 가해지는 마찰에너지의 지수 승에 비례하는 결과(Power relation)를 얻었고, 이 지수 값은 피로 크랙 성장시험에서 얻어지는 지수 값과 일치한다는 결과를 얻었다.¹ 즉 천연고무, SBR 및 BR 고무에 대해 마모시험 결과로부터 얻어지는 마찰에너지의 지수 값은 BR, SBR, NR의 순으로 나타났으며 이는 크랙 성장 시험에서 얻어지는 파워 이론(Power relation)의 지수 값과 일치하고 있었다.

그러나 A. N. Gent는 천연고무의 피로성능은 다른 고무에 비하여 월등히 우수하지만 마모성능은 그에 미치지 못하고 카본블랙 충전고무는 gum 고무에 비하여 피로 크랙 성장속도는 빠르지만 마모성능이 우수하다는 사실을 들어 이러한 마모를 고무의 크랙 성장속도만 가지고는 설명하기 힘들다고 주장하였다.⁴ 그는 마모 발생 기구에 대한 가설을 통해 마모 현상은 본질마모와 피로마모가 복합적으로 작용하는 과정이고 이중 본질마모는 고무마모에서 초기 크랙을 생성시키는 역할(crack initiation)을 하고 피로

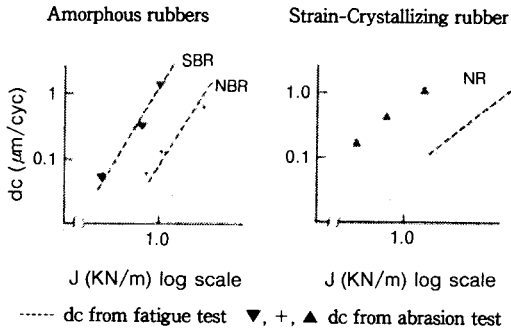


그림 6. Comparison of incremental crack growth from abrasion (point) and fatigue test (dashed line).

마모는 이러한 크랙을 성장시키는 역할을 한다고 주장하였다. 이는 Schallamach 마모 이론을 보다 구체적으로 설명한 내용으로 고무의 총체적 마모성능은 이러한 두 가지 마모 기구 모두에 의존한다고 하였다.³ 카본블랙이 충전되지 않은 gum 고무의 경우는 이러한 크랙이 빠르게 생성되기 때문에 마모성능을 결정하는 주 마모 발생 기구는 피로마모가 되어 고무의 피로성능과 잘 일치하고, 피로 크랙 성장성능과 마모성능 사이에 다른 경향을 보이는 고무의 경우는 이러한 크랙생성이 상당히 더디기 때문일 것이라고 제안하였다.

2.3 어브레이시브 마모 (Abrasive Wear)

어브레이시브 마모라 함은 고무가 닳아 없어지는 마모로 지우개 고무를 문지르면 고무와 종이가 모두 닳아 없어지는데, 마찰에 의해 타이어와 노면이 모두 닳는 형태의 마모를 말한다.

D. F. Moore는 고무에 가해지는 마찰력의 크기 (마찰계수)에 따라 가해지는 마찰에너지당 마모부피로 표현되는 마모에너지 지수가 급격히 변화하는 조건이 나타나고 이러한 극적인 조건을 기준으로 마모 발생 기구를 피로마모와 어브레이시브 마모로 나누어 설명하였다. 즉 마찰계수가 낮은 영역에서는 주로 피로마모 현상이 발생하고 마찰계수가 큰 영역 (1.3 이상)에서는 마모 패턴의 산(ridge)에 해당하는 부분이 떨어져 한꺼번에 떨어져나가는 어브레이시브 마모현상이 주로 발생한다고 하였다. 그래서 마찰력이 크게 작용하는 조건에서는 고무의 에너지 마모 지수가 피로마모에 비하여 훨씬 급격히 상승하는 그림 7과 같은 결과를 보여 주었다.⁸

이러한 주 마모 발생 기구의 전환은 주로 마모가 발생하는 환경 즉 노면의 형상, 마찰에너지의 크기, 노면의 온도, 타이어의 슬립량 등과 같은 가속도(se-

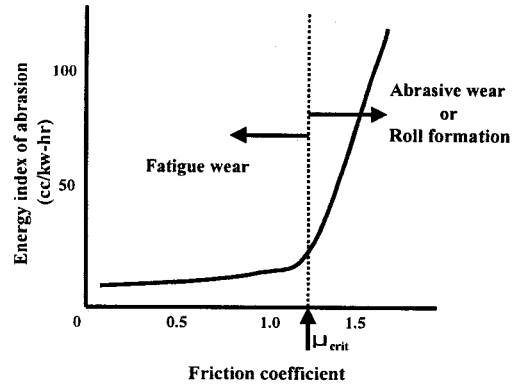


그림 7. A rough correlation of friction and wear.

verity)에 의해 좌우된다. 주 마모 발생 기구가 달라지면 마모성능을 지배하는 고무의 물리적 특성이 달라지므로 타이어 주행 조건이나 고무마모 시험 조건에 따른 주 마모 발생 기구의 파악이 중요하다. 특히 실험실 마모시험을 통한 실 타이어 마모성능의 비교 또는 예측하는데 있어서 이러한 주 마모 발생 기구의 파악은 필수적인 조건이 된다.

여러 연구자들이 노면의 형상이나 노면온도 등과 같은 사용 가속도에 따른 마모 발생 기구에 대한 이론적 모델을 제시하였다.⁹⁻¹¹

2.4 기계-화학적 마모 (Mechano-chemical Wear)

지금까지는 고무의 기계적(물리적) 마모에 관하여 살펴보았는데 또 다른 고무의 중요한 마모 기구는 고무의 화학적인 마모이다. 이 현상은 열이나 산소 등에 의하여 고무 분자가 화학적으로 파괴되는 현상이다. 앞서서도 언급하였지만 고무의 화학적 마모현상 자체보다는 고무의 화학적 노화에 의한 고무의 물성 저하로 기계적 마모성능이 저하되는 현상이 더 주요한 마모기구가기 때문에 이러한 고무의 화학적 마모를 기계-화학적 마모라고 한다.

마모 과정에서 화학적 마모가 발생한다는 증거는 상당히 많이 보고되고 있다. 천연고무와 SBR을 실험실 마모시켜 보면 마모시편의 표면에 끈적끈적한 마모 입자들이 생성되어 있는 현상이 종종 관찰되어진다. 이러한 끈적끈적한 마모 입자를 생성시키는 현상을 스미어링(smearing)이라 하는데 이 현상은 고무 내부에 존재하고 있던 저분자량 물질이 고무 표면으로 이동되어 이러한 물질을 형성하기도 하지만 열, 산소 등에 의해 고무 분자가 화학적으로 노화되어 저분자량 물질이 생성되고 이런 저분자량 물질이 마모 표면에 형성되어 나타나기도 한다.^{1,12,13}

후자의 발생 기구는 산소 존재 하에서 비교적 가혹하지 않은 마모 환경에서는 마모성능을 결정하는 주요한 마모 발생 기구가 될 수 있다. 실제 도로에서 온건한 조건으로 마모시험을 실시한 경우 타이어 표면에서도 끈적끈적한 물질들이 발견되었다는 보고도 있다.¹⁴ 이런 스미어링 현상은 고무의 화학적 마모의 중요한 증거로 스미어링 현상이 발생하면 마모 속도는 현저히 줄어들어 고무마모 성능의 해석에 오류를 일으키는 원인이 된다.

Schallamach는 아크론 마모시험기를 이용하여 천연고무와 SBR을 각각 동일한 조건하에서 공기 중 및 질소 분위기에서 마모시켜 마모속도를 비교하여 보았는데, 공기 중에 비해 질소 분위기에서의 마모 속도가 현저히 크게 나타났다는 사실을 들어 스미어링 현상은 산소 존재하에서 나타나는 현상이라 설명하였다.¹⁵ 실제 고무에 산화방지제(anti-oxidant)를 첨가하여 마모시험을 한 경우 공기 중 마모시험에서는 마모속도가 상당히 감소하였으나, 질소 분위기하에서의 큰 효과가 나타나지 않았다. 이러한 결과는 고무마모 과정에서 산화에 의한 고무 분자쇄 절단 현상(oxidative breakdown of molecular chain)이 상당히 주요한 역할을 한다는 것을 시사하고 있다.

그러나 Brodskii 등의 연구 결과를 보면 산화방지제 및 내피로제(anti-fatigue agent)가 천연고무의 마모성능을 상당히 향상시키는데 공기중에서 뿐 아니라 오히려 질소 분위기하에서 향상 정도가 더 높게 나타났다. 이들은 이러한 질소 분위기하에서 산화방지제 첨가로 인한 내마모 성능 향상은 첨가된 산화방지제가 마모 과정 중에 형성되는 라디칼을 제거시켜 주는 역할을 하였기 때문이라고 주장하였다.¹⁶

Gent와 Pulford는 칼날 마모시험을 통해 고무의 마모 과정은 국소 영역에서의 기계적인 파괴와 고무 분자쇄의 화학적 파괴의 경쟁적인 과정을 통해 발생한다고 하였으며, 천연고무, SBR, EPR 등에서는 스미어링 현상이 관찰되었지만 부타디엔 고무 등에서는 이러한 현상이 발견되지 않는 것으로 보아 고무의 특정구조와 관련이 있다고 주장하였다. 또 이들은 카본이 충전된 천연고무의 마모 과정에서 형성된 끈적이는 마모 입자들이 질소 분위기하에서 즉시 끈적이지 않는 분말 형태로 변화하였고, 라디칼을 트랩할 수 있는 thiophenol(free radical trapping substance)과 같은 물질이 존재하면 비활성 기체 분위기에서도 끈적이는 마모 입자를 발견할 수 있다는 결과를 발표하였다. 이들은 이 결과를 토대로 고무

의 기계-화학적 마모 과정은 기계적인 충격 혹은 변형에 의해 라디칼이 형성되는 과정을 통해 개시되고 산소에 의해 가속되는 과정이라 설명하였다.¹

이상과 같이 고무 마모 발생 기구에 관해 간략히 살펴보았다. 마모현상에 대한 가설이나 이론들이 수없이 발표되었지만 아직도 완벽히 마모현상을 설명하기는 부족한 면이 많다. 그리고 실 상황은 이러한 여러 형태의 마모 과정이 복합적으로 발생하므로 실험실의 마모성능을 예측하기란 정말 어려운 과제로 인식되어 있다. 다음은 타이어 마모성능 예측을 위한 실험실 마모시험 방법에 관해 살펴보고 이러한 실험실 마모와 타이어의 실차 마모 사이의 상관성 연구에 관한 내용을 간략히 살펴보았다.

3. 고무 마모시험 방법

고무가 마모되기 위해서는 반드시 미끄러짐 현상(slip)이 수반되어야 한다. 이러한 미끄러짐 현상은 타이어가 주행할 때 타이어 회전방향(원주방향) 속도와 차량 속도의 차이에 의해 발생하는 원주방향 슬립(circumferential slip)과 차량이 방향을 전환할 때 발생하는 횡방향 슬립(lateral slip)으로 나누어 볼 수 있다. 고무 마모시험 장치들은 현재까지 많은 종류들이 나와 있지만 이러한 미끄러짐의 형태에 따라 3가지 정도의 그룹으로 나누어 볼 수 있다. 즉 횡방향의 슬립이 가해지 시험기, 원주방향의 슬립이 작용하는 시험기, 원주방향 및 횡방향 슬립을 복합적으로 작용하는 시험기가 그것이다. 다음은 현재 고무 산업에서 대표적으로 사용하고 있는 마모시험기에 관해 간략히 정리해 보았다.

3.1 칼날 마모시험기(Blade Type Abrasion Test Machine)

고무 시편을 회전하는 칼날을 이용하여 시편 표면에 횡방향의 슬립을 가하여 마모를 일으키는 시험장치로 대표적인 시험기는 PICO 마모시험기를 들 수 있다(그림 8). 시편마모를 위한 칼날의 재질은 주로 텅스텐이 사용되고 칼날과 시편사이의 스미어링 현상을 방지하기 위하여 고무 표면에 산화 알루미늄(Al_2O_3) 분말을 뿌려준다. 시편에 가해지는 수직하중과 칼날의 회전속도를 변화시킬 수 있다.

3.2 휠 마모 시험기(Slipping Wheel Type Abrasion Test Machine)

고무 시편을 회전하는 휠(wheel type abrader)

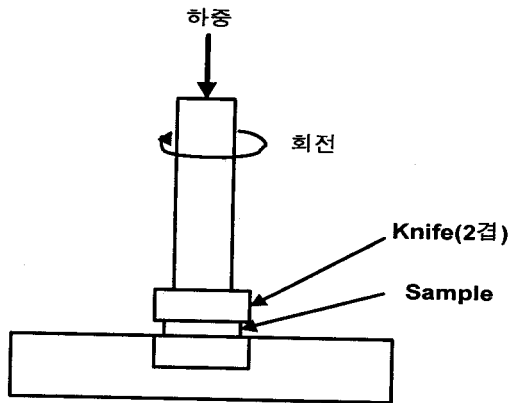


그림 8. Schematic diagram of PICO abrasion test machine.

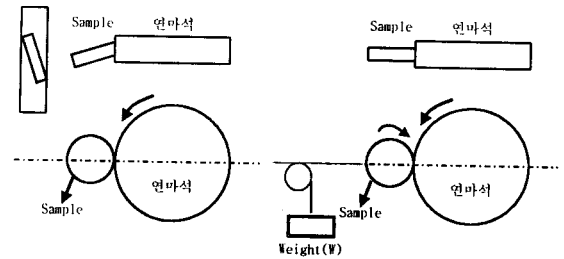
에 접촉시켜 휠과 시편 사이에 횡방향 혹은 원주방향의 슬립을 가하여 고무의 마모 정도를 비교하는 시험 방법이다. 대표적인 마모 시험기로는 램본(Lambourn) 마모시험기, 아크론(Akron) 마모시험기, DIN 마모시험기 등이 있다.

3.2.1 아크론 마모 시험기(Akron Abrasion Test Machine)

가장 오래된 시험기의 하나로 고무 산업에서 널리 쓰이고 있는 시험기이다. 시편과 연마석 사이에 일정한 수직하중을 가하고 시편을 연마석에 약 15도 정도 기울여 접촉시킨 상태에서 마모시험을 실시한다. 시편과 연마석 사이에 스미어링 현상을 방지하기 위하여 시편을 열도화시켜 사용하기도 한다. 이 시험기는 시편과 연마석 사이의 접촉각도(slip angle)를 변화시켜 시험할 수 있다는 장점이 있다.

3.2.2 램본 마모 시험기(Lambourn Abrasion Test Machine)

Dunlop Tire & Rubber사에서 개발한 시험기로 시편과 시편에 비하여 상당히 큰 연마석 휠을 접촉시킨 상태에서 시편과 연마석 사이에 하중을 가하고, 시편 축과 연마석 축을 동시에 회전시켜 두 축의 회전속도 차이에 의해 발생하는 슬립으로 마모를 유발시키는 장치이다. 아크론 마모시험기와는 달리 시편과 연마석 사이에 슬립각의 차이는 없으며 원주방향 슬립(circumferential slip)에 의해 시편의 마모가 발생한다. 시편의 회전속도를 조절할 수 있도록 설계되어 있어 시편과 연마석 사이의 슬립비(slip ratio)를 변화시킬 수 있고 시험기가 온도 조절이 가능한 챔버 안에 놓여 있어 다양한 온도 조건에서의 마모 경향을 파악할 수 있다. 마모시험 중 스미



(a) Akron abrasion test machine (b) Lambourn abrasion test machine

그림 9. Schematic diagram of slipping wheel type abrasion test machine.

어링 현상을 방지하기 위해 탄화규소(SiC) 분말을 시편과 연마석 사이에 뿌려준다.

3.2.3 DIN 마모 시험기(DIN Abrasion Test Machine)

DIN 마모시험기는 독일 시험 표준에 명시된 고무 마모시험방법을 기초로 제작된 시험기로 시험 소요 시간이 짧고 시험이 간단하여 합성고무 제조업체 등에서 품질관리용으로 주로 사용되고 있다. 시험기는 탄화규소(SiC)를 입힌 회전하는 드럼(drum) 위에 시편을 일정하중으로 누른 후 위에서 좌로 일정거리를 움직이는 동안의 마모량을 측정한다. 시편에 가해지는 수직하중을 변화시키며 시험할 수 있다.

3.3 기타 마모 시험기

이상과 같이 고무 산업에 가장 보편적으로 사용되고 있는 마모 시험기에 관하여 간략히 살펴보았다. 앞서서도 언급한 바와 같이 타이어의 마모는 타이어가 받는 횡방향 혹은 원주방향의 힘과 고무온도, 산소 등의 환경적 요인, 도로 면의 거칠기, 재질 등과 같은 여러 가지 변수에 의해 결정되는 특성이다. 하지만 지금까지 언급한 마모 시험기들의 경우는 이러한 다양한 실 타이어 주행 조건을 재현하기가 어렵고, 절대 마모량에 대한 재현성이 높지 않다. 또한, 고무시편이 받는 마찰가속도(frictional severity)를 정량적으로 알 수 없어 사용 가속도에 따른 마모 경향을 파악하기도 힘들다. 즉 기본적인 마모 발생 기구나 특성연구에 활용하기 위해서는 몇 가지 조건들이 만족되어야 한다. 그 첫 번째가 시험의 재현성이다. 칼날 마모시험기의 경우는 칼날의 날카로운 정도에 따라 마모량의 차이가 상당하므로 칼날의 재질이나, 시험 횟수에 따른 칼날의 상태를 정기적으로 관리하여야 하며, 휠 마모시험기의 경우에도 휠의 재질과 시험 횟수에 따른 휠의 마모 정도를 관리해야 한다.^{17,19} 두 번째는 마모시험 중 시편에 가해지는

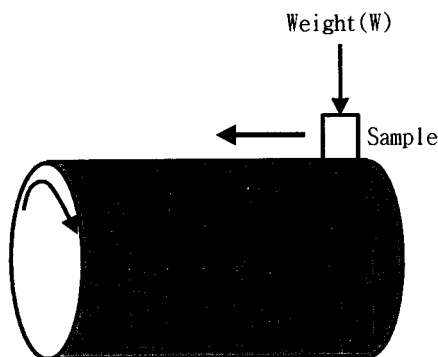


그림 10. Schematic diagram of DIN abrasion test machine.

마찰력을 측정할 수 있어야 한다. 고무에 가해지는 마찰력은 고무의 마찰계수, stiffness, 주변온도, 속도 등의 함수로 주어지므로 같은 양의 슬립 혹은 변형을 가하더라도 고무에 따라 그 값은 달라진다. 고무 마모시험 중에 고무 시편에 걸리는 정확한 마찰력을 측정할 수 있어야 한다. 마지막으로 기계화학적 마모를 모사하기 위해서는 온도와 산소 등의 조건을 조절할 수 있는 장치가 필요하다. 기존의 마모 시험기를 개선하여 이러한 조건들을 대체로 만족하는 시험기들이 몇몇 연구자들에 의해 개발되었다.¹⁷⁻¹⁹

3.3.1 개선된 칼날 마모 시험기(Modified Blade Type Abrasion Test Machine)

A. N. Gent 그룹에서는 칼날 마모 시험기를 이용 마모시험 중 고무 시편에 가해지는 마찰력을 측정할 수 있도록 개조하였다.¹⁷ 그림 11에서와 같이 칼날 축 및 그축에 수직인 면에 각각 스트레인 게이지(strain gauge)를 부착하여 시편이 회전함으로써 인하여 발생하는 마찰력 또는 마찰에너지를 계산할 수 있도록 고안 제작하였다. 이 시험기는 기존의 PICO 마모 시험기에서는 확인할 수 없었던 단위 마찰에너지 당의 마모속도를 측정할 수 있다.

3.3.2 개선된 Lambourn 마모 시험기(Modified Lambourn Abrasion Test Machine)

J. A. Donovan 등은 Lambourn 마모시험기를 개조하여 마모시험 중 시편에 작용하는 마찰력을 측정할 수 있도록 고안하였다. 즉 그림 12와 같이 휠 축의 회전 토크를 측정하여 이 값으로부터 시편과 휠 사이에 작용하는 마찰력을 계산할 수 있도록 시험기를 개조하였다.¹⁹

3.3.3 Grosch 마모 시험기(Grosch Abrader or Lang Abrader)

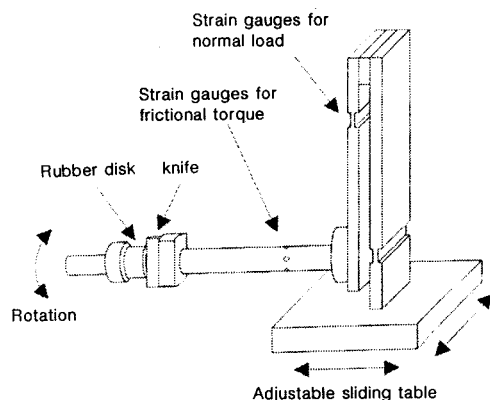


그림 11. Modified razor blade type abrasion test machine designed by A. N. Gent.¹⁷

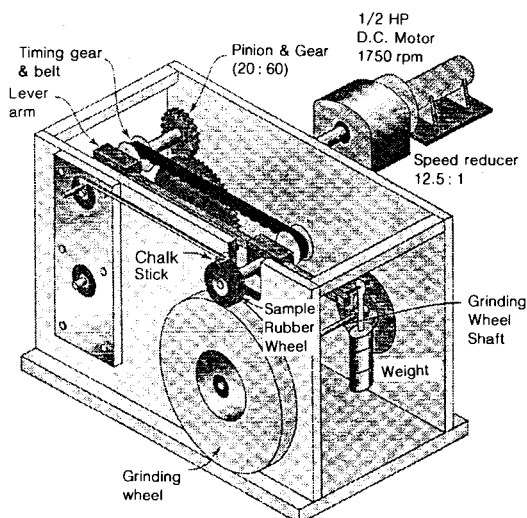


그림 12. Modified Lambourn abrasion test machine designed by J. A. Donovan.¹⁹

K. A. Grosch는 휠 마모 시험기를 개조하여 슬립 각과 수직하중을 제어함과 동시에 마모시험 도중 시편에 가해지는 횡력(side force)을 측정할 수 있도록 마모 시험기를 고안하였다.¹⁸ 이 마모 시험기는 Grosch 마모 시험기 또는 Lang 마모 시험기라고 불리는데 현재 타이어 산업 및 타이어 관련산업에 응용되고 있다.

이상과 같이 근래 개발된 마모 시험기들은 마모시험 중 시편에 직접적으로 가해지는 마찰력을 측정할 수 있도록 고안하여 마모량 또는 마모속도와 마찰에너지 사이의 관계를 수식화하는 연구에 적용되었다. 또 실 타이어 마모성능을 실험실에서 모사하기 위해 타이어를 직접 마모시키는 실내 마모 시험기들도 개

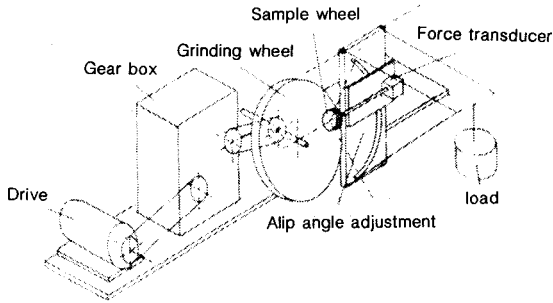


그림 13. Groesch abrader or Lang abrader designed by K. A. Groesch.¹⁸

발 보급되었다. 그러나 아직도 실제 타이어의 마모 성능을 이러한 실험실 마모시험 방법으로 완전히 예측하기에는 부족한 점이 많아 지속적인 연구 개발이 요구되고 있다.

4. 고무 마모의 정량적 해석

앞에서 고무의 마모는 크게 본질마모, 피로마모, 기계화학적 마모의 3가지의 발생 기구로 해석된다고 언급하였다. 이중 본질마모를 마모가 발생하기 위한 크랙의 생성과정 (initiation)이라면 피로마모는 주 마모의 진행과정 (propagation)이며 기계 화학적 마모는 이러한 마모를 가속시키는 과정 (acceleration)이라 볼 수 있다. 이러한 세 가지 마모 과정은 독립적으로 발생하지 않고 동시에 진행되기 때문에 정량적인 수식화가 불가능하다고 할 수 있다. 그러나 각 과정별로 주 인자를 파악하여 정량화한 연구 결과들이 많이 발표되었고, 특히 세 가지 과정 중 주 마모 발생 기구라고 할 수 있는 피로마모(또는 pattern wear)에 대한 정량적 해석들이 어느 정도 가닥을 잡아가고 있어 마모의 정량적 해석이 아주 불가능한 과제는 아니라 여겨진다.

4.1 고무 마모 vs 고무 물성

마모의 정량적 해석은 마모 발생 기구를 이해함은 물론 이고 이를 바탕으로 마모성능을 지배하는 고무의 물성을 파악하고 궁극적으로는 타이어 마모를 예측하게 하는 바탕이 된다. 내마모 성능을 지배하는 고무의 주요 물성은 고무의 강도(strength), stiffness, 마찰거동(마찰계수) 등으로 알려져 있는데 이들 중 어떤 인자가 가장 중요한 인자인지는 아직 불명확하다.

마모의 시발점이라고 여겨지는 본질마모 즉 크랙

의 생성과정에 관한 가장 설득력 있는 이론은 A. N. Gent에 의해 제안되었다. 가류 고무 내부에는 미세한 공간(void)이 존재하고 있는데 이러한 공간 변형 혹은 열에 의해 팽창되고 내부 압력이 한계 값을 넘어가면 공간이 파괴되어(이 과정을 blow-out이라 표현) 이러한 크랙을 만든다는 가설이다.^{4,20}

이러한 고무 내부 미세 공간을 파괴시킬 수 있는 한계 압력은 고무의 stiffness(또는 Young's modulus)에 비례하는 식 (6)으로 표현하였다.

$$P_c = \frac{5}{6} E \quad (6)$$

P_c : Critical internal pressure

E : Young's modulus

고무 내부의 미세 공간을 팽창시키는 원인으로 3가지 정도의 가설을 들고 있다.

- 고무가 미끄러질 때 접촉압력에 의해 고무내부로 녹아 들어간 공기가 파괴화 상태가 되어 고무 내부 미세 공간을 파괴하는 과정 (진공상태 하에서의 마모 설명 불가능)

- 고무가 미끄러질 때 발생하는 삼축 마찰 변형이 미세 공간을 파괴하는 과정

- 고무가 미끄러질 때 국부적으로 발생하는 높은 열에 의해 휘발성 물질이 기화하여 미세 공간내의 압력이 한계 값을 넘어 파괴되는 과정

휘발성 물질에 의한 미세 공간의 파괴는 고무가 지속적으로 변형을 받게 되면 고무 내부에 상당한 열이 축적되고 이렇게 축적된 열은 고무의 stiffness를 떨어뜨려 한계 압력이 낮아지고, 고무의 열분해로 인해 생성된 휘발성 물질이 기화하여 파괴를 유발한다고 설명하고 있다. 고무내부에 존재할 수 있는 휘발성 물질로는 고무첨가물(수분이나 oil 등), 가교 반응의 부산물, 고무의 열분해 생성물 등을 들고 있는데 아직 명확하게 밝혀지지는 않았다.²⁰

고무의 강도와 마모성능의 관련성은 A. Schallamach나 A. G. Thomas 등 많은 연구자들에 의해 제안되었다. 대표적인 예로 식 (1)에서와 같이 고무의 마모를 고무의 파괴기구로 설명하는 이론을 들 수 있다.

4.2 고무의 마찰거동

K. A. Groesch의 이론에 의하면 고무의 마찰거동은 WLF-거동을 따르는 점탄성 거동이다. 그는 온도와 속도에 따른 고무의 마찰계수를 측정하여 그림 14와

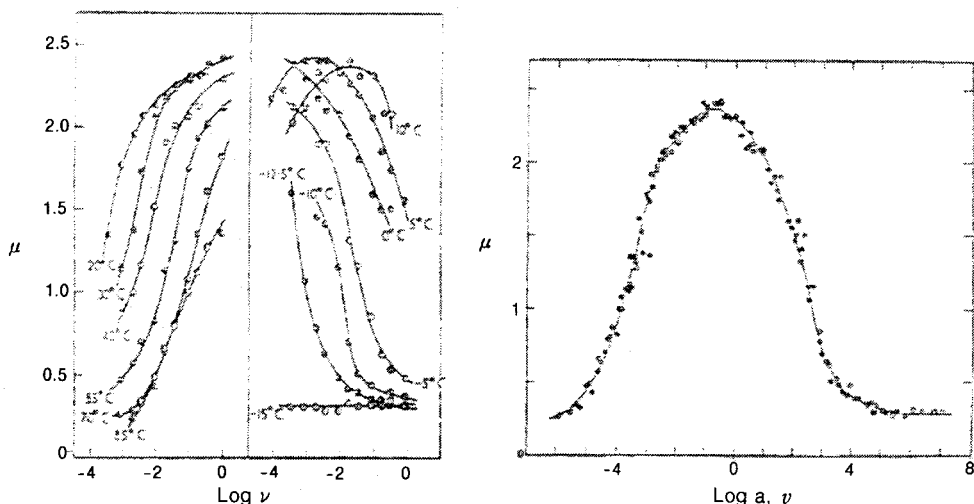


그림 14. Friction coefficient of unfilled NBR at various temperatures as a function of sliding velocity (ch/sec) and master curve at 20 °C by K. A. Grosch.²¹

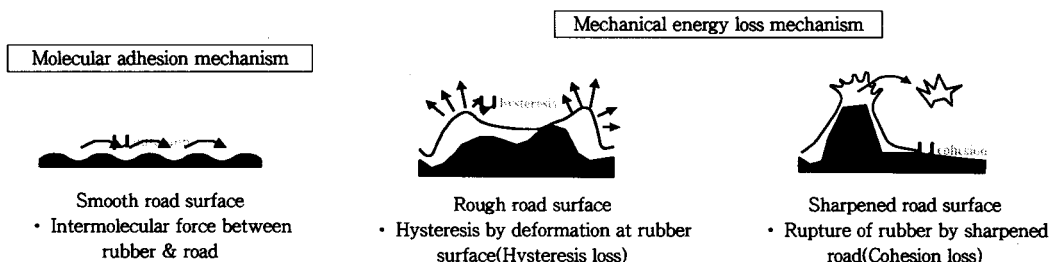


그림 15. Schematic diagram of rubber friction at different road surface.²²

같은 속도-온도 등가곡선을 완성하였다.²¹ 많은 연구자들이 Grosch의 마찰거동 시험 결과에 대한 이론적 해석을 시도하였다. 고무의 마찰거동은 그림 15와 같이 크게 두 가지 과정으로 나누어 설명한다. 하나는 Coulomb의 분자 접착 거동(molecular adhesion)이고 또 하나는 노면 요철에 의한 고무 변형 또는 파괴로 생기는 기계적 에너지 손실 과정(mechanical energy loss)이다.²²

분자 접착 거동은 고무분자가 노면과 접촉되어 미끄러짐에 저항하는 과정(stick-slip motion)으로 고무 분자가 트랙(track)에 접착하여 연신(elongation)되다가 한계 값을 넘어서면 분자 결합이 파괴되면서 원 상태로 돌아가는 과정이다. 기계적 에너지 손실 과정은 노면 요철에 의한 고무 변형으로 발생하는 히스테리시스 에너지 손실 과정과 아주 거친 노면에서 고무가 변형하지 못하고 파괴되어 생기는 에너지 손실과정을 일컫는다. 그래서 매끄러운 노면에서 마찰계수를 지배하는 거동은 분자 접착기구 이

고, 거친 노면에서의 마찰거동을 지배하는 기구는 기계적 에너지 손실 과정이 된다.

A. Schallamach는 미끄러짐 과정에서 고무와 노면의 접촉영역을 입체광학현미경(stereoscopic microscopy)으로 관찰해 본 결과 그림 16에서 보는 바와 같이 접촉 영역을 가로지르는 불규칙한 밴드가 형성되었다 사라지는 현상이 관찰되었는데 이를 이탈 파동(wave of detachment)이라 하였다.^{23,24} 이러한 이탈 파동으로 불리는 고무와 노면의 상대적인 움직임 즉 고무가 노면과의 접촉 영역에서 붙었다-떨어졌다(stick-slip)를 반복하는 과정(cycling of peeling & re-adhering)으로 고무의 마찰 거동은 이 이탈 파동에 기인한다. 이러한 접촉면에서의 이탈 파동 속도는 미끄럼 속도(imposed sliding velocity)에 비하여 훨씬 빠르게 진행되는데, 마찰거동에서의 에너지 손실은 이탈 파동의 앞부분(leading edge)에서 발생하고 다시 접착되는 파동 뒷부분(trailing edge)을 통해 일부가 회복되는 과정을 거

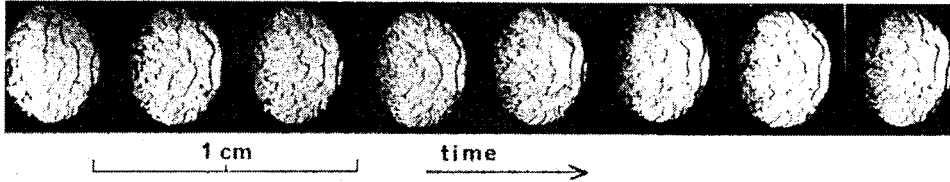


그림 16. Wave of detachment taken by A. Schallamach when rubber slides on the track.

치게 된다.

4.3 타이어 마모와 고무 마모

타이어의 마모를 아주 단순히 생각해 본다면 노면으로부터 타이어 트래드 고무에 가해지는 마찰에너지에 의해 트래드 고무의 일부가 떨어져나가는 현상이다. 이러한 관점에서 마모를 정량화 하고자 한다면 마모는 고무와 노면 사이의 마찰에너지(혹은 마찰력)의 함수로 나타낼 수 있을 것이다. 그리고 마찰 에너지를 타이어의 특성이나 주행조건과 관련된 변수의 함수로 나타내면 마모에 대한 정량화가 가능할 것이다.

$$w(\text{Wear rate}) = F(W_{fr}: \text{friction energy}) \quad (7)$$

$$W_{fr} = F(S, m_{tx}, T, v_s, P, A, \dots) \quad (8)$$

S : amount of slip T : temperature
 m_{tx} : road roughness v_s : sliding velocity
 P : contact pressure A : contact area

하지만 여러 연구자들에 의해 이러한 마모성능에 대한 정량화 시도가 있었지만 각각의 상황에서만 유용할 뿐 총체적 마모를 예측하기 위한 보편적인 이론 식은 제시하지 못하였다. 그 중 보편적으로 받아들여지는 모델이 고무의 마모속도는 고무에 가해지는 마찰에너지의 지수승에 비례한다는 파워 이론(Power relation)이다.

$$w = B \cdot W_{fr}^n \quad (9)$$

B : material constant n : power index

A. Schallamach와 D. M. Tunner는 타이어 실차 마모시험을 통해 타이어의 마모속도를 정량화한 아래 식을 제시하였고, 아크론 마모 시험기를 이용하여 측정된 고무 마모시험 결과를 이용 이러한 실차 마모성능 결과를 예측하려고 시도하였다.²⁵

$$w = \frac{V_o \cdot R \cdot F^2}{c} \quad (10)$$

w : wear rate
 γ : abrasibility of tread rubber
 R : tire resilience
 F : distance averaged cornering force
 c : overall tire cornering stiffness

여기서 고무의 abrasibility(γ)는 단위 마찰에너지당 고무의 마모속도로 아래 식 (11)과 같이 표현된다.²⁶

$$V_o = \frac{a}{\mu \cdot N} \quad (11)$$

a : wear rate μ : friction coefficient
 N : normal load

K. A. Grosch와 A. Schallamach는 미끄러짐 마모시험에서 마모노면을 변경하여 카본이 충전된 천연고무 및 SBR의 마모시험을 실시하였고 이 결과로부터 고무의 마모가 접촉압력의 지수승에 비례하고 이때 파워지수 n 값은 고무의 종류와 노면의 종류에 따라 결정된다고 하였다.²⁷

A. Schallamach는 또 톱니 모양의 휠 마모시험기를 이용한 마모시험 결과로부터 마모속도와 접촉압력, 슬립량 및 고무의 마찰계수 사이의 관계식을 다음의 식 (13)과 같이 도출하였다.²⁸

$$\frac{h}{h_0} = \left(\frac{P}{P_0} \right)^n \quad (12)$$

h, h_0 : abrasion loss
 P, P_0 : contact pressure
 n : power index

$$w = \frac{1}{(n+1)} \cdot h_0 a b \cdot \left(\frac{ka}{bp_0} \right)^n \cdot \left(\frac{\delta}{\mu} \right)^n \cdot S^{n+1} \quad (13)$$

S: amount of slip

k, b : dimensional parameter of abrader

a : contact length

하지만 이 모델에서도 타이어 트래드 고무의 마모 현상을 완벽하게 해석하지는 못하였다. 즉 A. Schallamach의 시험결과에서 뿐 아니라 여러 보고된 시험결과에서 타이어 트래드 고무를 변경한 경우 시험 조건에 따라 마모성능이 역전되는 현상이 나타나는데 이러한 역전 현상을 실험실 마모 결과와 Schallamach 모델로는 완벽히 묘사하지 못하였다.

이러한 마모성능의 역전현상은 시험의 가혹도 차이에 의해 발생한다고 일반적으로 알려져 있다. 시험 가혹도는 일반적으로 단위 주행 거리당의 마모량으로 표현하지만 좀더 정확히 표현하자면 하중, 슬립량, 노면의 거칠기 및 온도 등으로 표현할 수 있다.

K. A. Grosch는 시험 가혹도의 차이는 노면과 타이어 접촉면의 온도변화를 유발시킨다는 이론을 제시하였고, 접촉면의 온도 변화에 따라 고무 물성이 저하되는 경향이 틀리기 때문에 마모성능의 역전 현상이 발생한다고 설명하였다. 그는 이러한 이론 및 시험 결과를 바탕으로 A. Schallamach의 마모 모델식을 수정한 이론을 제안하였다.¹⁸

5. 맺 음 말

이상에서 고무 및 타이어 마모에 관한 이론들을 간략히 살펴보았다. 이외에도 마모에 관한 많은 연구자료들이 산재해 있지만 고무 마모 및 타이어 마모 거동을 기초적으로 이해하는데 참고가 되는 내용만을 소개하였다. 보다 깊이 있는 내용이나 충분치 못한 설명은 뒤에 소개한 참고문헌을 통해 자세한 정보를 얻을 수 있을 것으로 본다.

타이어의 마모는 실제 사용상의 동일조건을 설계하기가 상당히 어려워 실제 거동을 예측하는데는 한계가 있다. 뿐만 아니라 반복시험에 있어서도 재현성이 다른 특성에 비하여 상대적으로 낮고 시험분위기 조건에 민감할 뿐 아니라 그 조건이 일정하게 유지 여부에도 크게 의존한다. 따라서 타이어의 마모 거동을 이해하고 평가하는데는 한 가지 시험 결과에 절대적으로 의존하기보다는 다양한 시험을 통한 검증이 필요하며 배합고무의 설계나 타이어 구조 설계

에 따른 마모성능에 관한 결론을 내리는데 신중을 기해야 한다.

참 고 문 헌

1. A. N. Gent and C. T. R. Pulford, *J. Appl. Polym. Sci.*, **28**, 943 (1983).
2. A. Schallamach, *Wear*, **1**, 384 (1958).
3. A. Schallamach, *Rubber Chem. Technol.*, **41**, 209 (1968).
4. A. N. Gent, *Rubber Chem. Technol.*, **62**, 750 (1989).
5. A. Schallamach, *Trans. Inst. Rubber Ind.*, **28**, 256 (1952).
6. D. Bulgin and M. H. Walters, *Proc. Int. Rubber Conf. 5th*, 445 (1967).
7. A. G. Thomas and E. Southern, *Rubber Chem. Technol.*, **52**, 1008 (1979).
8. D. F. Moore, *Wear*, **61**, 273 (1980).
9. R. Ramakrishnan and J. A. Donovan, *Rubber Chem. Technol.*, **68**, 804 (1995).
10. A. G. Vieth, *Rubber Chem. Technol.*, **65**, 601 (1992).
11. 三橋健八, *日本ゴム協會誌*, **71**, 21 (1998).
12. A. Schallamach, *Proc. Phys. Soc.*, **B67**, 883 (1954).
13. V. A. Garten, K. Eppinger, and D. E. Weiss, *Rubber Chem. Technol.*, **29**, 1434 (1956).
14. F. R. Martin and P. H. Biddison, *Tire Sci. & Technol.*, **1**, 354 (1973).
15. A. Schallamach, *J. Appl. Polym. Sci.*, **12**, 281 (1968).
16. G. I. Brodskii, N. L. Sakhnovskii, M. Reznikovskii, and V. F. Evstratov, *Soviet Rubber Technol.*, **19**, 22 (1960).
17. C. W. Nah, *PhD dissertation of the University of Akron*, May, 1995.
18. K. A. Grosch, *Rubber Chem. Technol.*, **65**, 78 (1992).
19. R. Ramakrishnan and J. A. Donovan, *150th ACS Rubber Div.*, No. 66A (1996).
20. A. N. Genr and N. Hindi, *Rubber Chem. Technol.*, **61**, 892 (1988).
21. K. A. Grosch, *Proc. Roy. Soc.*, **A274**, 21 (1963).
22. H. Takino, N. Isobe, H. Tabori, and S. Kohjiya, *Tire Science & Technology, TSTCA*, **26**, 258 (1998).
23. A. Schallamach, *Wear*, **17**, 301 (1971).
24. A. Schallamach, *Rubber Chem. Technol.*, **39**, 230 (1966).
25. A. Schallamach and D. M. Tunner, *Wear*, **3**, 1 (1966).
26. K. A. Grosch and A. Schallamach, *Rubber Chem. Technol.*, **39**, 287 (1966).
27. K. A. Grosch and A. Schallamach, *Kautsch. Gummi, Kunstst.*, **20**, 288 (1969).
28. A. Schallamach, *Gummi Asbest Kunstst.*, **25**, 442 (1972).