

자동차용 타이어의 연구 (7)

李 源 澤*

이 자료는 1998년 4호 「타이어」지의 자동차용 타이어의 연구(6)에 이어 연재하는 내용임.
 (編輯者註)

3.3 타이어의 마모

3.3.1 마모

타이어 트레드 표면으로부터 고무가 이탈하는 것을 마모라고 한다면 이 마모에는

- ① 疲勞磨耗(반복변형으로 표면층이劣化되어 離脫)
- ② 어브레이시브(abrasive)磨耗(닳아 없어짐)
- ③ 凝着磨耗(고무 표면이 찢어져(粘着)이탈)
- ④ 고무의 異物化(비회전 고무표면의 분리이탈)

이 있다.(D. F. Moore의 분류기준을 토대로함. 이 밖에도 여러가지 說이 있음)

타이어 마모는 이와같은 因子가 시간의 흐름과 함께 변화하는 조건하에서 각 부분이 변화하면서 발전하여 왔다. 이 가운데 일반적으로 좁은 의미에서 마모라고 하는 것이 ②의 고무가 닳아 없어지는 마모(abrasive 마모)이다. 지우개 고무를 문지르면 고무와 종이가 모두 닳아 없어지는데, abrasive 마모는 지우개 고무의 마모와 같은 종류의 마모이며 타이어 트레드면의 고무도 노면도 모두 닳는다.

이 마모는 다른 말로 표현하면 “문지른다”고 하는 것이며, 문지르기 위해서는 문

지르는 방향으로 힘 F가 가해지고 Z 방향으로 닳는다(닳는 양 S). 문지르는 양은 F와 S의 積에 의한다(F·S를 마찰에너지 E라고 한다).

$E = F \cdot S$ 는 고무가 변형될 때 발생하는 熱量으로 바뀌기도 한다.

마모량 A는 E와 비례하고,

$$A = \gamma \cdot \rho \cdot E$$

γ : 단위마찰에너지당 고무의 마모량(주위온도 등 주위환경에 의존한다)

ρ : 彈性

로 나타낼 수 있다.

3.3.2 타이어 마모의 메커니즘

타이어가 차량에 장착되어 사용되는 상태는 <표 3-7>의 어느것으로든 된다.

<표 3-7> 차량사용상태

	直 進	코너링
自由轉動	①	②
驅動 또는 制動	③	④

위의 어느것도 정도의 차이는 있으나 마모(abrasive 마모)된다.

(1) 自由轉動時

自由轉動이란 타이어 회전속도와 차량진행속도에 차이가 없는 상태를 말한다. 타이어가 접지한채 회전하면 변형부분의 트레드

* 前 大韓타이어工業協會 會誌次長

가 접지면내에서 변형하는데 이 변형이 마모에 영향을 미친다. 그러나 自由轉動時의 마모는 다음의 코너링時의 마모에 비하면 매우 작다.

(2) 코너링時

자동차가 코너링할 때 타이어에는 원심력에 대항하는 코너링포스(cornering force)가 발생하여 타이어 접지부는 비틀리는 것처럼 橫方向變位를 한다. 이때 자동차의 진행방향과 타이어의 회전방향이 달라서(슬립각이 생김) 어긋난 橫力이 磨耗力보다 커지는 接地後端領域에서 미끄러진다.

옆으로 미끄러지는 타이어 접지면의 변형을 [그림 3-23]에서 나타냈다.

이와같이 미끄러짐으로써 타이어가 마모되는데, 마모량은 어긋난 힘과 슬립각의 크기에 비례한다. 타이어가 단위길이 회전간에 소비되는 미끄럼 에너지(마찰 에너지 E_c)는 슬립각이 작은 경우

$$E_c = F_c \times \alpha = F_c^2 / C_s$$

F_c : 코너링 포스(cornering force)

C_s : 코너링 스티프네스(cornering stiffness)

α : 슬립角

으로 나타내며, 마모량 A는 이 E_c 에 비례한다

(3) 直進(制動, 驅動時)

制動·驅動時에는 自由轉動狀態인 트레드면내의 剪斷力分布가 변화한다. 驅動時에는 차량과 타이어의 진행속도가 달라서(각각의 속도를 V_R, V_r 로 하여 슬립비 $S_D = (V_r - V_R)/V_r$ 이 발생) 트레드면내의 미끄러짐 영역이 自由轉動時에 비하여 더욱더 커지며 마모량은 驅動力과 그때의 미끄러진 양(슬립比)에 비례한다. 타이어가 단위길이를 진행할 때 소비되는 미끄럼 에너지 E_D (마찰 에너지)는 슬립比가 작은 경우

$$E_D = F_D \times S_D = F_D^2 / D_S$$

F_D : 驅動力

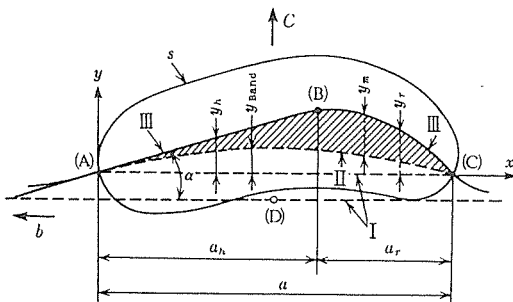
D_S : 드라이빙 스티프네스(driving stiffness)

S_D : 슬립比

로 나타내며 마모량 A는 E_D 에 비례한다. 制動時에도 마찬가지로 슬립比 $S_B = (V_R - V_r)/V_s$ 로 되기 때문에 $E_B = F_B \times S_B = F_B^2 / D_B$ (F_B : 制動力, D_B : braking stiffness)로 나타낸다. 制動時의 剪斷力分布狀態는 驅動時와 달리 타이어에 따라 다르지만 驅動時와 비교하면 미끄러짐량은 조금 많다.

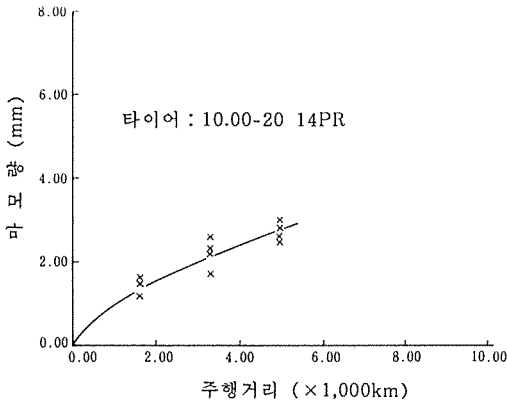
(4) 制動, 驅動 코너링

슬립比가 작고(制動·驅動時) 슬립角이 작은(코너링時) 경우는 마찰 에너지 E_c, E_D (E_B)는 각각 線型이 접칠 수 있다.

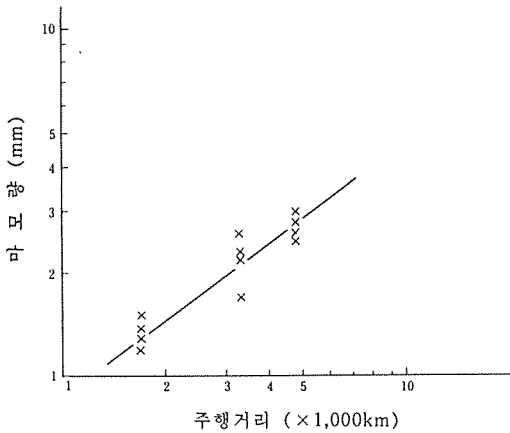


- a : 접지면의 길이
- s : 접지면
- x, y : 지면의 좌표
- I : 림 중심선의 위치 또는 Band d가 변형하지 않는 위치
- II : 변형한 Band의 중심선
- III : II에 본래 있어야 할 접지중심선의 곡선
- (A) (C) : 접지 시작 및 접지 끝의 점
- (B) : 粘着域에서 미끄러짐域으로 옮기는 점
- D : 操舵軸의 지면과의 交点
- a_h, a_r : 접지면의 粘着域 및 미끄러짐域의 길이
- y_h, y_r : 粘着域 및 미끄러짐域에서의 곡선 II와 I의 거리
- y_{Band} : 곡선 II와 I의 거리
- y_m : 접지점의 II로부터의 거리
- b : 轉動方向
- C : side force
- α : 옆미끄러짐角

[그림 3-23] 옆으로 미끄러지는 타이어의 접지면 변형



[그림 3-24] 4개의 타이어로 구한 주행거리와 마모의 관계



[그림 3-25] 주행거리와 마모

슬립角이 큰 경우 [(2)항도 포함] 마찰에 너지는 슬립角의 4~5제곱에 비례한다.

3.3.3 타이어의 마모특성과 각종 요인

타이어의 마모량 A와 주행거리 L의 관계에 대해서는 종래의 표시방법으로 J. G. Martindale의 $A = k_0 L^n$ (k_0 와 n 은 定數)이 있으며 [그림 3-24]와 같이 된다.

또한 두 변의 對數를 취하여 [그림 3-25]와 같이 나타내기도 한다.

磨耗要因效果를 고려한 관계식도 있으며, 이것은 아래와 같이 주행거리의 指數關係로서 나타낸다.

$$A = (H_0 + k_1) [1 - \exp(-k_2 L)]$$

H_0 : 처음의 홈깊이

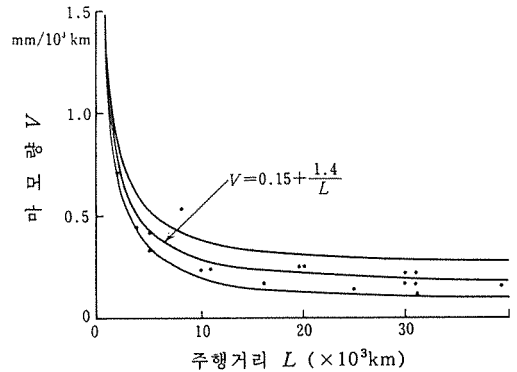
k_1, k_2 : 타이어의 종류나 주행거리로 결정하는 패러미터(parameter)

H. Rauch는 단위주행거리당 마모량 V를 $V = a + bL^{-1}$ 로 나타내어 마모수명을 구하고 있다(그림 3-26 참조).

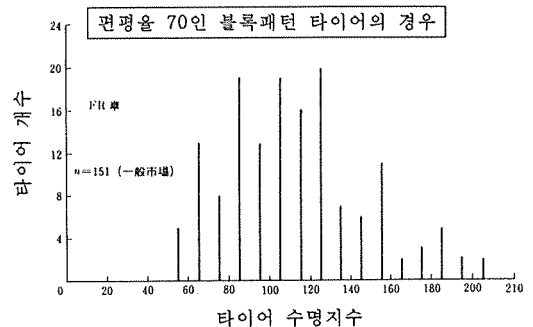
일반시장에서의 마모수명은 [그림 3-27]과 같이 그 범위가 넓다.

마모의 과정을 [그림 3-28]에 나타냈는데, 타이어 마모의 요인에는 ① 타이어에 걸리는 힘, ② 노면상태, ③ 주위온도(기후)가 있다.

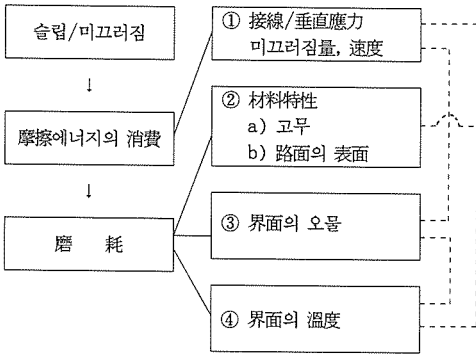
마모요인은 [그림 3-29]와 같은 것이 있



[그림 3-26] 거리(10³km)당 마모량과 주행거리

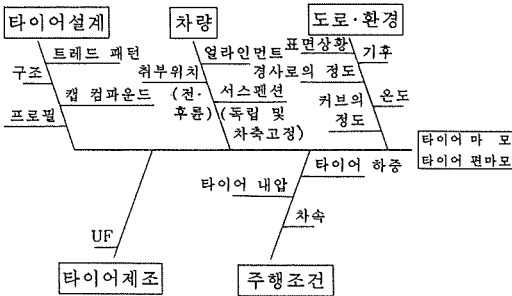


[그림 3-27] 타이어 수명의 막대그래프

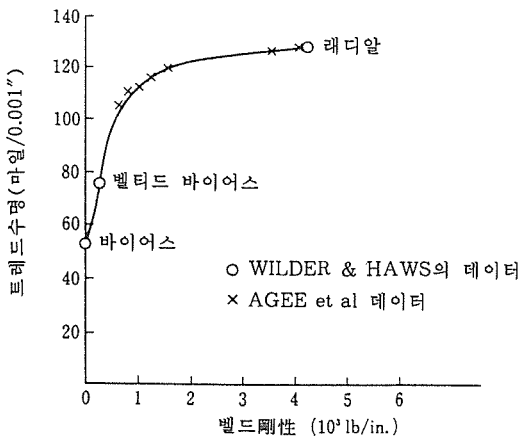


—— 영향이 강함
- - - - 2차적인 영향

[그림 3-28] 마모 과정 도표

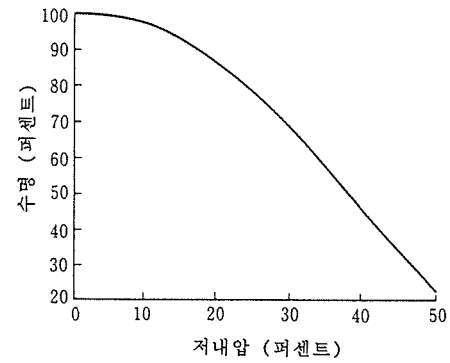


[그림 3-29] 타이어 마모·편마모에 영향을 미치는 각종 요인

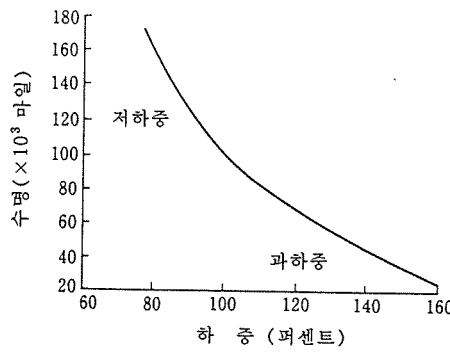


[그림 3-30] 벨트 剛性에 대한 트레드 수명

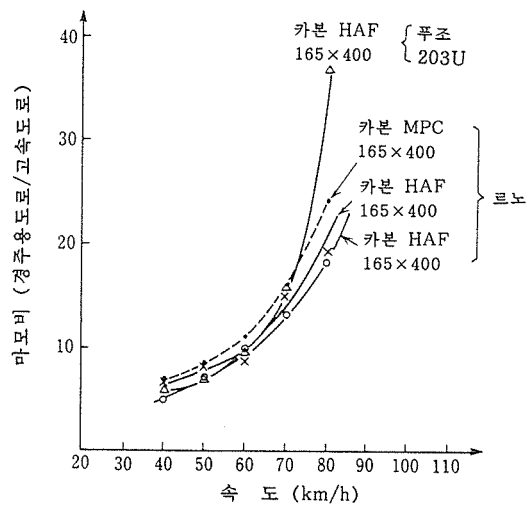
다. 그 중에서 타이어로 인한 요인으로서 트레드 고무 이외에 벨트剛性이 중요한 것을 나타내고 있다(그림 3-30 참조). 벨트



[그림 3-31] 타이어 수명에 대한 內壓의 효과

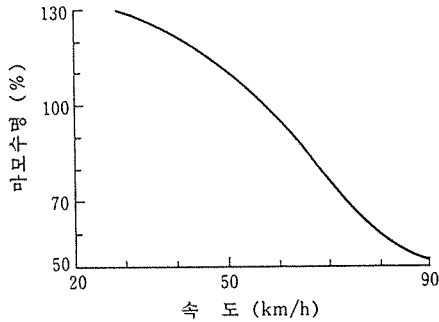


[그림 3-32] 타이어 수명에 대한 하중의 효과



[그림 3-33] 고속도로와 경주용 도로에서의 마모비율과 속도의 관계

강성은 벨트부를 빔으로 간주하였을 때의 剛性을 나타낸 것이다. 다른 요인중에서 타

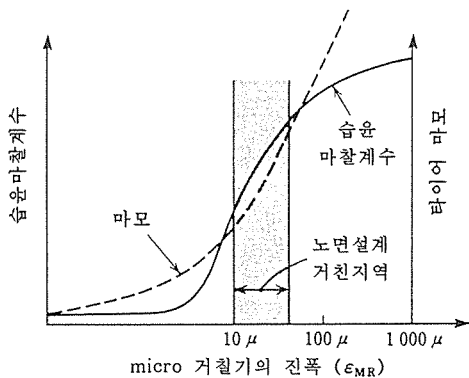


(그림 3-34) 속도와 마모

<표 3-8> 사용조건에 대한 마모비율

車輛使用條件	g-레벨	40mph時에 대한 相對磨耗比率*
제 동	0.38	150
코너링	0.38	1,000
加·速度	0.10	12
40 → 60mph		
60 → 40mph		

*40mph의 직진주행조건을 기준=1



(그림 3-35) 노면의 micro 거칠기의 關數로서의 타이어 마모

이어의 充塡空氣壓이 낮아짐에 따라 마모수명이 저하하는 것이 나타나 있다(그림 3-31 참조). 또한 하중이 증가하는데 따라서는 마모수명이 저하한다(그림 3-32 참조).

타이어의 마모는 주행속도에 따라서도 변한다. 그 예를 [그림 3-33] 및 [그림 3-34]에 나타냈다. 또한 주행중의 加速, 減

速, 코너링에서도 타이어의 마모비율이 다르다(표 3-8 참조)

그 밖에 자동차의 toe-in量, 기온, 노면상태 등에 따라서 마모비율이 변화한다. 노면에 대해서는 [그림 3-35], [그림 3-36]과 같이 노면의 거칠기에 따른 영향이 크다.

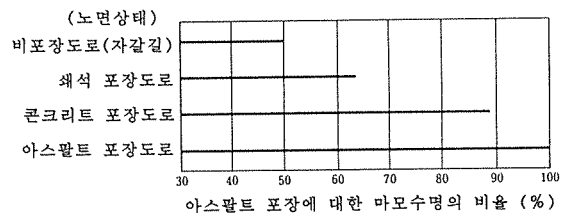
3.3.4 마모의 종류

타이어의 마모는 접지면에서 轉動, 制動, 驅動, 回轉할 때 발생하는 슬립에 의해 발생한다. 따라서 마모는 노면상태가 일정하면 그 미끄러지는 양과 접지면내의 剪斷力이 클수록 많이 된다. 보통 타이어는 트레드 패턴이 새겨져 있으며, 이와같은 트레드면은 계속해서 접지하였다. 떨어지는 것을 반복하는 고무덩어리이다. 접지면내에서는 각 블록이 타이어의 수직하중이나 橫力을 받기 때문에 타이어 전체 또는 局部的인 움직임에 따라 움직이며 지면에 문질러진다.

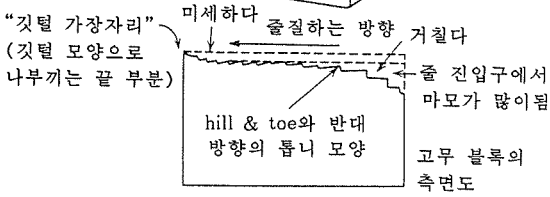
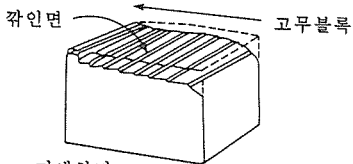
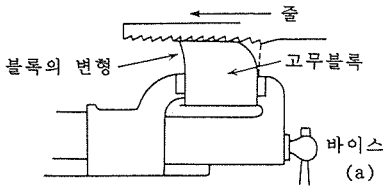
블록 패턴으로서 특징적인 것은 [그림 3-37]과 같은 斷差磨耗(hill & toe)이다. 이것은 트레드가 제동력으로 인하여 일정한 방향으로 반복하여 剪斷變形하기 때문이다. 그 예를 [그림 3-38]에 나타냈다.

또한 공기압이 지나치게 과다하거나 부족한 경우, 하중이 과다한 경우에 중앙마모, 숄더마모의 상태를 보이기도 한다(그림 3-39, 40 참조).

캠버角, 토인량의 불균형(토인량 과다) 때문에 타이어 바깥쪽에만 미끄러짐이 발



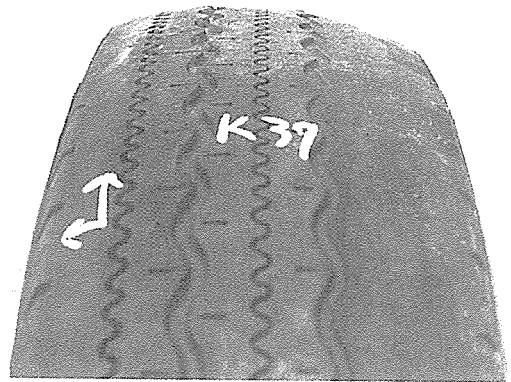
(그림 3-36) 노면의 종류와 마모와의 관계



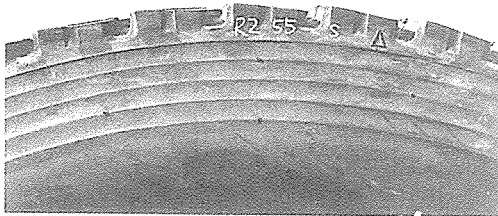
[그림 3-37] 고무 블록에 줄질하여 생기는 断着磨耗状态



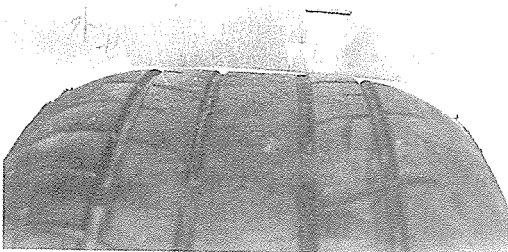
[그림 3-40] 숄더마모상태



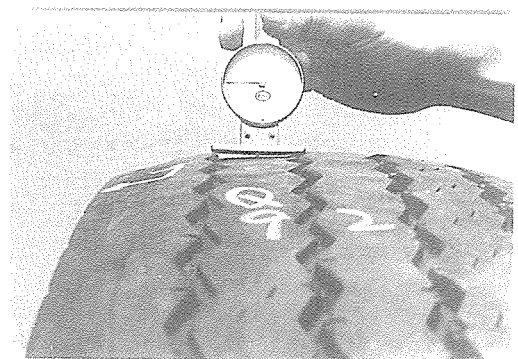
[그림 3-41] 片側磨耗状态



[그림 3-38] 단차마모상태



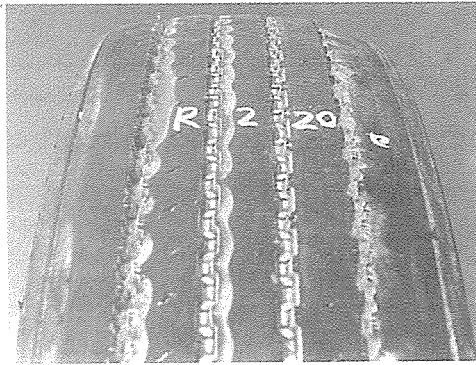
[그림 3-39] 중앙마모상태



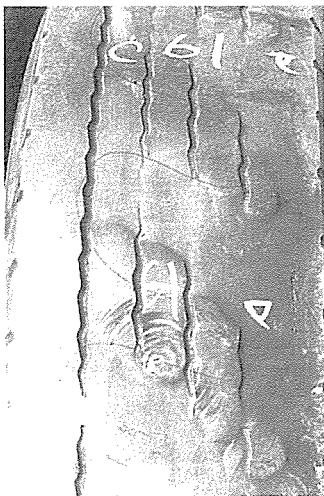
[그림 3-42] 리브 펀치(Lib punch) 마모상태

생하여 片側磨耗状态를 나타내는 경우도 있다. 코너링 빈도가 높은 경우에도 이러한 상태를 나타내는 일이 있다(그림 3-41 참조).

이상과 같은 마모는 정상적으로 마모되는 경우에 비하여 타이어의 수명을 단축시키고 타이어의 주행성능을 악화시키게 된다. 이



[그림 3-43] 레일(rail) 마모상태

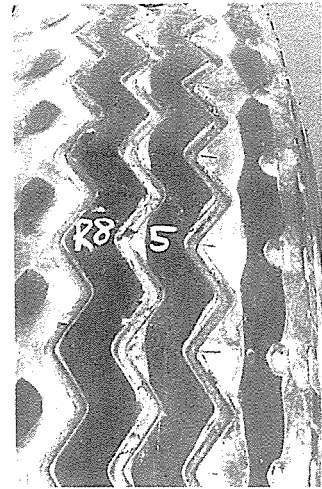


[그림 3-44] 대각선(diagonal) 마모상태

에 대한 대책으로는 타이어 內壓, 荷重의 체크, 차량 얼라인먼트 점검, 타이어 위치교환 등을 하고 있다. 특히 타이어 위치교환은 편마모 예방이라는 의미에서도 바람직하다.

타이어를 사용하는데 있어서는 일정한 조건으로 사용되는 일은 거의 없기 때문에 타이어에는 여러가지 마모상태가 발생한다. 여러가지 마모상태의 예를 다음에 나타냈다.

[그림 3-42)에는 중간의 리브부분만 마모량이 많은 상태를 보이고 있다. 또한 리



[그림 3-45] 섬(island) 마모 상태

브부분의 끝만 마모량의 많은 마모의 예는 [그림 3-43)에 나타냈다.

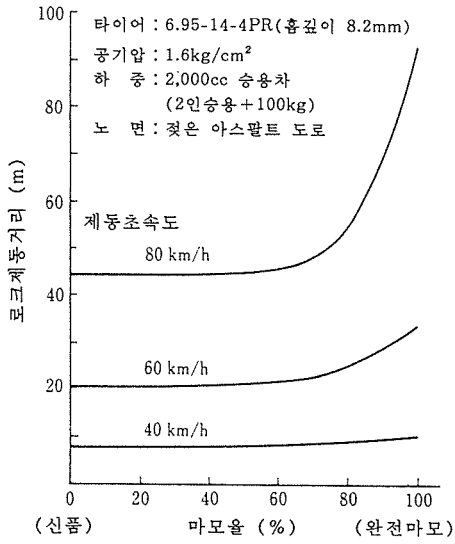
기타 트레드의 원주상에서 부분적으로 마모되거나(그림 3-44 참조), 부분적으로 남아 있거나 하는 마모의 예(그림 3-45 참조)도 있다.

3.3.5 마모에 의한 타이어 성능의 변화

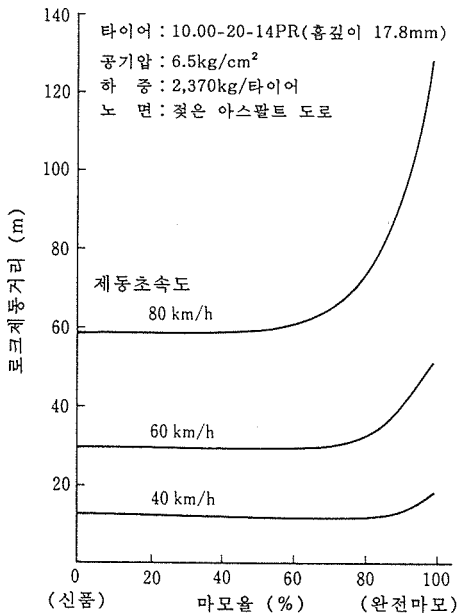
타이어가 마모되어 트레드 홈깊이가 얇아졌을 때 가장 주의해야 할 성능은 젖은 도로에서의 마찰계수의 변화이다. 즉, 홈깊이가 감소함에 따라 제동거리가 증가하여 어떤 한계까지 홈깊이가 얇아지면 제동거리가 급격히 증가하고 주행속도가 올라갈수록 제동거리가 더욱 증가한다(그림 3-46, 47 참조).

그렇기 때문에 미국연방의 자동차 안전기준(FMVSS 109)은 남은 홈이 1.6mm가 되면 그것을 나타내는 웨어 인디케이터(wear indicator)를 타이어에 표시하는 것을 의무화하고 있다. 물론 일본의 JIS(D4230)도 미국의 안전기준과 같게 되어 있다.

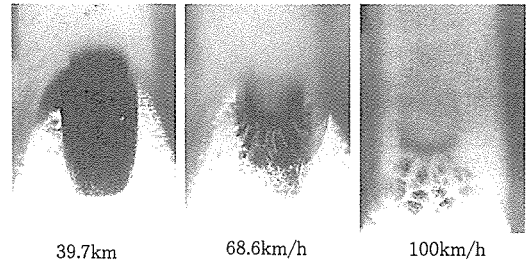
이것은 배수효과를 갖고 있는 홈이 마모



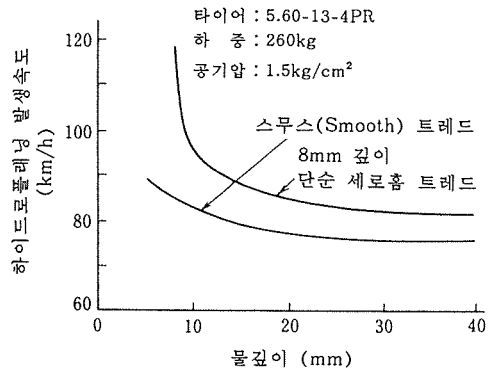
[그림 3-46] 마모율과 lock 제동거리와의 관계 (승용차용 타이어)



[그림 3-47] 마모율과 lock 제동거리와의 관계 (트럭·버스용 타이어)



[그림 3-48] 하이드로플레닝(hydroplaning) 현상



[그림 3-49] 물 깊이의 영향

되어 알아지면 배수성이 나빠지기 때문인데, 제동시가 아니라 정상적으로 주행하고 있을 때에도 노면에 물이 고여 있는 경우에는 고속으로 주행할 때 물의 저항에 의해(배수가 되지 않기 때문에) 타이어가 노면으로부터 떠올라 물위를 滑走하는 이른바 하이드로플레닝현상을 일으킨다(그림 3-48 참조). [그림 3-49]에서 홈이 없는 경우는 하이드로플레닝이 더욱 발생하기 쉬운 것을 알 수 있다. 하이드로플레닝이 발생하면 타이어의 마찰계수를 극단적으로 저하시키게 된다. 위에서 설명한 것 외에 마모에 의해 변화하는 성능으로서 코너링 성능, 회전저항, 소음 등을 들 수 있다.