

타이어의 摩擦과 磨耗

協會 李 光 宰

[序言] 타이어 및 고무의 摩擦과 磨耗에 관해서는 많은 文獻들이 있으나, 摩擦 및 磨耗特性的 研究를 接近側面에서 分類한다면,

- (1) 타이어의 工學論的 接近
- (2) 고무의 物性論的 接近
- (3) 고무의 分子論的 接近
- (4) 表面의 形態學論的 接近
- (5) 고무의 分析論的 接近

등에 의해서 研究되고 있는 것 같다. 이것을 타이어의 設計面에서 타이어 構造 및 市場에서의 타이어에 對한 要求條件을 考慮해서 살펴보면, 타이어의 摩擦과 磨耗에 관해서는 아직 充分한 理論的 體系化는 되어 있지 않은 것 같다.

本稿는 타이어의 摩擦과 磨耗에 관해서, 타이어에 대한 要求條件을 考慮하면서 現在 發表되어 있는 資料들을 整理한 것이다. 內容의으로는 說明이 不充分한 點이 많을 것으로 생각되지만 詳細한 것 에 관해서는 個個의 資料를 參照해 주기 바라며, 그리고 여기서는 특히 乘用車用 타이어를 中心으로 說明하고자 한다.

1. 乘用車用 타이어 磨耗의 變遷

타이어의 機能은 大別하면 다음의 4가지로 나누어지는데 특히 摩擦과 磨耗는 타이어에 있어서 基本的인 것이다.

- (1) 荷重을 지탱하며 달린다. (高速·高荷重에서의 耐久性·耐磨耗性)
- (2) 路面의 凹凸에 의한 衝擊을 緩和한다.
- (3) 驅動力, 制動力을 路面에 傳達한다. (摩擦特

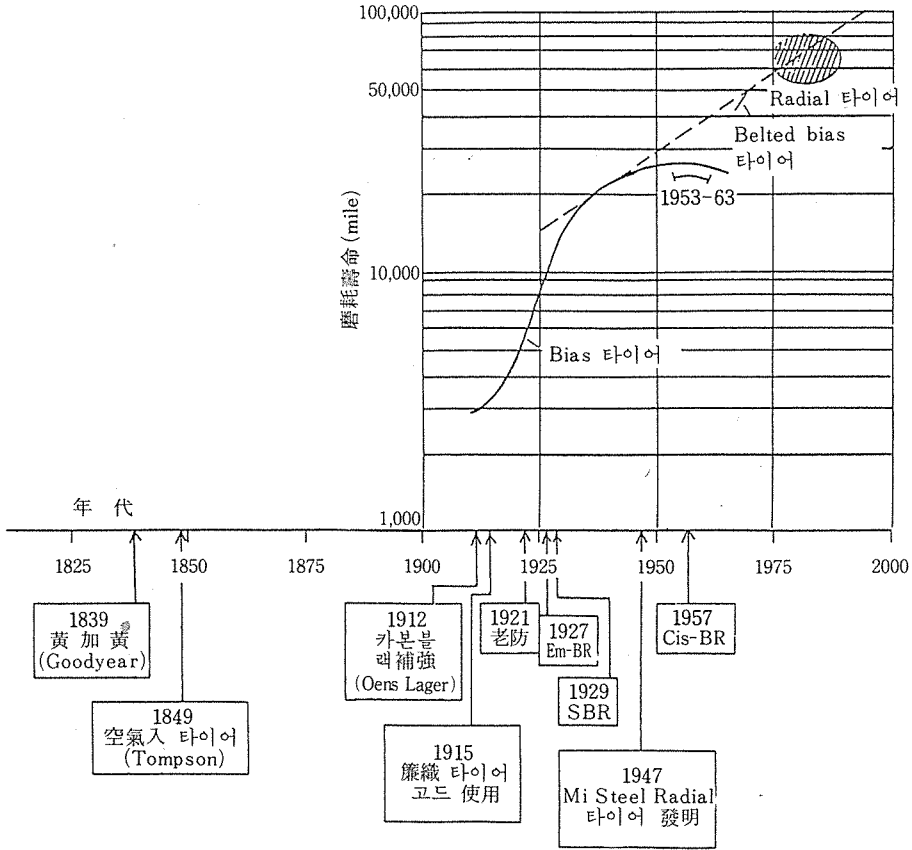
性)

(4) 方向操縱에 따라 Cornering force가 發生하며 路面에 傳達한다. (摩擦特性)

이들의 機能을 滿足시키기 위해서 타이어는 많은 複合材料로 構成되어 있으며, 특히 耐磨耗性能은 현저하게 向上되었다. 예컨대 Wilder는 同一한 トレ드고무質로 耐磨耗를 檢討한 結果 Bias 타이어에서 Belted bias 타이어로 構造가 變更되면서 耐磨耗性能이 50% 向上되었고, 다시 Radial 타이어로 變更되면서 150% 向上되었다고 報告하고 있다. 이와같은 構造變更과 함께 材料面에서도 많이 改善되어 現在는 타이어 壽命이 크게 늘어나서 10만km 走行可能한 타이어도 나타나기에 이르렀다. 參考로 Goodyear의 Kovac의 그림을 타이어 磨耗의 推移 및 材料와 對比시켜 그림 1에 나타냈지만, 더 한층 飛躍하기 위해서는 摩擦 및 磨耗의 理論的 體系化가 進行되는 동시에 新材料·新構造가 開發되어 갈 必要가 있다고 생각한다.

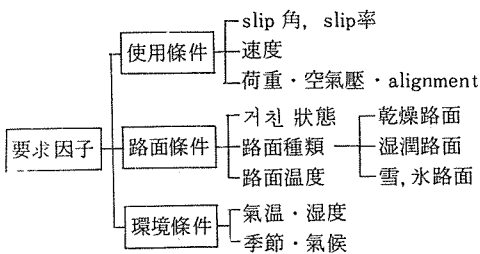
2. 타이어의 要求特性

타이어의 摩擦과 磨耗를 目的으로 配合設計를 할 경우, 특히 注意하지 않으면 안 될 점은 市場에서의 타이어에 대한 要求條件을 考慮하여 設計하고 있는지의 與否이다. 그러기 위해서는 어떻게 要求因子를 把握하여 그것을 定量化해 가느냐가 問題이다. 이 要求因子는 Veith의 分類에 따르면 表 1과 같다. 타이어의 경우, 이들의 要求條件이 複雜하게 얽히고 설켜서, 摩擦係數는 0.01~1.0, 磨耗壽命은 $10^2 \sim 10^5$ km로 2~3 자리의 數으로

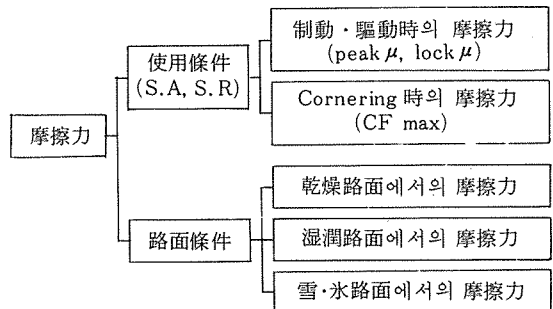


[그림 1] 磨耗壽命의 推移와 構造 및 材料의 變遷

〈表 1〉 타이어의 要求因子의 分類



〈表 2〉 타이어의 摩擦力的 分類



分布되어 있다. 이 領域에서의 고무質의 要求條件의 依存性은 크기 때문에 文獻 등에 보고되어 있는 實驗結果와 要求條件이 다르기 때문인지 반드시 一致하지 않는다는 것은 종종 經驗하는 바이다.

되는데, 摩擦力的 形態는 表 2 와 같이 使用條件에 의한 摩擦力的 形態와 路面條件에 의한 摩擦力的 形態로 크게 分類된다.

3. 타이어의 摩擦特性

타이어의 摩擦力은 타이어 條件(構造, 形狀, 패턴 및 트레드 고무)과 表 1의 要求條件으로 決定

(1) 타이어의 摩擦機構

① 使用條件에 의한 摩擦力的 分類

이 條件에 의한 摩擦力的 形態는 制動 · 驅動時

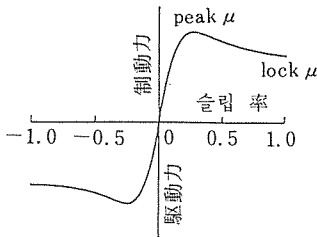
의 摩擦力과 Cornering 時의 摩擦力이다. 이들의 特性値는 슬립率(S.R) 및 슬립 角(S.A)의 函數로 서 그림 2, 그림 3과 같이 나타난다. 여기에서 슬립率(S)은 타이어가 制動·驅動力을 받고 있는 경우, 車의 進行速度를 V , 타이어의 周速을 v 라고 하면 V 와 v 와의 差가 相對的인 미끄러짐이 되기 때문에 이것을 다음과 같이 定義한 것이다.

$$\text{驅動時 } S = (V - v) / v \quad (1)$$

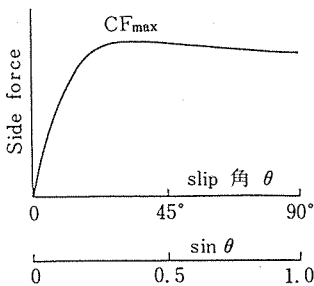
$$\text{制動時 } S = (V - v) / V \quad (2)$$

타이어가 전혀 미끄러지지 않고 굴러가고 있을 때는 $S=0$, 로크 상태로 滑走하고 있을 때는 $S=1$, 逆으로 타이어가 같은 지점에서 驅動되어 空轉하고 있을 때는 $S=-1$ 이 된다.

制動時의 摩擦力은 슬립率이 10% 前後에서 最大摩擦力을 나타내고 完全 로크時에는 最大摩擦力보다 낮아진다. 이들의 값(值)을 荷重으로 나눈 것을 最大摩擦係數(peak μ) 및 미끄럼 摩擦係數(lock μ)라고 한다. 코너링時는 슬립 角 10° 前後에서 最大摩擦力(CF_{max})을 나타낸다. 이 값을 荷重으로 나눈 것을 最大橫슬립 摩擦係數라고 한다. 스텝 角



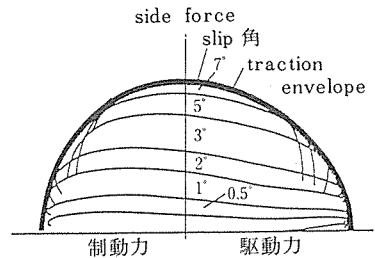
[그림 2] 슬립率과 制動力, 驅動力



[그림 3] Slip 角과 Side force

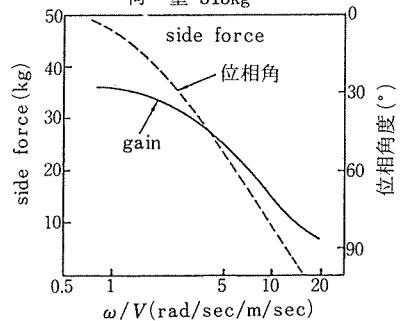
90° 前後의 摩擦力은 測定上 어려움 때문에 그다 지 쓰여지지 않고 있다. 最大摩擦力과 미끄럼 摩擦力과의 사이에는 스틱슬립이라고 하는 不連續的인 슬립이 發生하는 경우가 많다.

制動·驅動力과 cornering force를 합성하면 그림 4와 같은 Traction envelope가 그려지는데 이것이 이 要求條件下에서 發生하는 最大의 摩擦力이다. 이들 摩擦力은, 金屬 등의 마찰에서 알려져 있는 “摩擦은 荷重에 比例하고 速度에 依存하지 않는다.”라고 한 Amontons-Coulomb의 法則은 成立되지 않으며, 荷重 및 速度에 크게 依存한다고 하는 特徵이 있다. 最近에는 이들의 測定에서 要求條件의 時間的 要因을 重要視해서 過渡應答特性으로서 研究되고 있다. 예컨대 슬립 角의 時間的 變化가 周期的인 sine 波狀인 것에 대한 特性, 이른바 周波數特性的 測定結果를 보면 그림 5와 같다. 여기에서 ω 는 슬립 角의 角速度이고 V 는 타이어가 굴러가는 速度이다.



[그림 4] Traction envelope (타이어 6.00-15 DRY)

타이어 5.60-13.4PR
 内 庄 1.7kg/cm²
 荷 重 315kg



[그림 5] 周波數 特性

a. Fiala 모델에 의한 力學的 解析 : Cornering force의 特性에 대해서 Fiala는 타이어를 모델化하여 이 힘의 發生機構를 理論的으로 解明하였다. 자세한 說明은 省略하나, 橫力(S_F)이 發生하고 있을 때의 타이어 接地部全體의 橫變形를 그림 6에 表示하였다. 여기서 β 는 橫 슬립角, O와 C는 接地가 시작되는 점과 接地가 끝나는 점, B는 粘着域에서 슬립域으로 移行하는 점, S_h 와 S_r 는 粘着域 및 슬립域의 길이, y_m 은 트레드의 橫變位, l 은 接地幅이다. Cornering force는 粘着力과 슬립域에서 發生하는 橫力の 合으로 表示하면 式 (3)과 같다.

$$S_F = F_h + F_s = \int_0^{S_h} C_0 y_m \cdot dx + \int_{S_h}^S \mu l P \cdot dx \quad (3)$$

여기서 C_0 는 트레드의 橫彈性定數, μ 는 트레드의 摩擦係數, P 는 接地壓이다. 이런 結果로 最大 摩擦領域에서는 粘着領域과 슬립 領域이 共存하고 있으므로 最大 摩擦力은 트레드 고무의 剛性과 摩擦係數가 크게 영향을 미치고 있다는 것을 알

路面的 種類別 미끄럼 摩擦係數의 範圍 (表 3)

路面的 種類	摩擦係數의 範圍	
	乾 燥	湿 潤
콘크리트 鋪裝	1.0~0.5	0.9~0.4
아스팔트 鋪裝	1.0~0.5	0.9~0.3
非 鋪裝 路	0.6~0.4	—
鋼 板 등	0.8~0.4	0.5~0.2
積 雪 路 面	—	0.5~0.2
氷 路 面	—	0.2~0.1

수 있다.

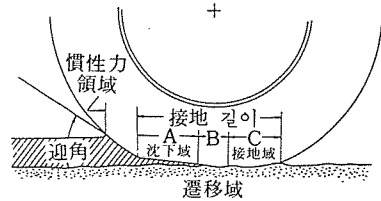
制動·驅動時의 特性에 대해서는 酒井가 Fiala의 理論을 應用하여 고무 블록의 摩擦 모델로 解析하고 있다.

② 路面條件에 의한 摩擦力

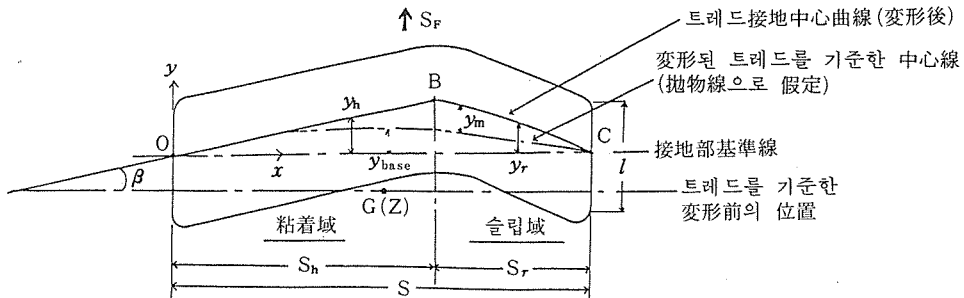
摩擦力은 路面의 條件에 따라 乾燥路面(以下 DRY 路面이라 함)의 摩擦力和 濕潤路面(以下 WET 路面이라 함)의 摩擦力 및 雪氷路面의 摩擦力 등으로 크게 分類된다. 이들 路面에서는 摩擦力의 發生機構가 달라지므로 摩擦係數도 表 3과 같이 크게 變하게 된다. 특히 WET 路面과 雪氷路面의 摩擦力的 發生機構는 DRY 路面의 摩擦과는 달리 특수한 摩擦力도 나타나게 된다.

a. WET 路面에서의 摩擦力 : 물에 젖은 路面에서는 타이어와 路面間에 水膜이 介在되어 타이어와 路面이 직접 닿지 못하고 있으므로 摩擦係數가 乾燥路面의 約 1/2 정도로 低下된다. 이러한 特性은 水深과 速度의 效果가 대단히 크며, 또 Moore에 의해 그림 7과 같은 3가지 特性의 다른 領域이 나타난다는 것을 알게 되었다.

A 領域 : 沈下域(Squeeze-film zone)



[그림 7] 3 領域의 定義



[그림 6] 타이어 全體의 橫變形

B 領域 : 遷移域 (Transition zone)

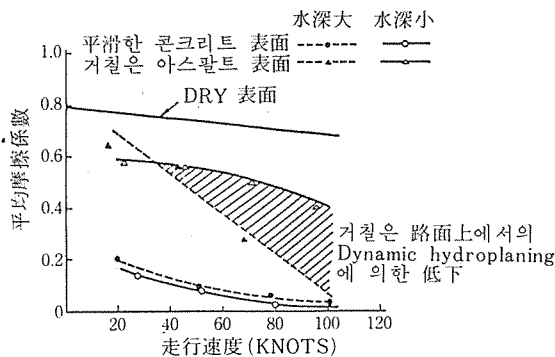
C 領域 : 接地域 (Traction zone)

A 領域에서는 接地面に 물이 完全히 들어와 있는 한편, C 領域에서는 아직도 水膜이 進入하지 않고 타이어는 路面에 完全히 接地되어 있다. 이들 두 領域 A↔C로 移行하는 部分이 B 領域으로 定義되어 있다. 한편, 타이어 接地面의 外側前方에서는 트레드가 一定한 角度로 물을 들어오게 하며 이른바 流體力學的 慣性力을 받게 된다. 따라서 이 部分은 接地面의 3 領域과는 別도로 慣性力 또는 揚力領域이라고 부르고 있다. 또 水深이 깊어지고 速度가 빠르게 되면 타이어가 물 위로 뜨게 되는 Hydroplaning 이 發生하여 그림 8과 같이 摩擦係數가 0에 가까워진다. 이러한 現象은 慣性力(F)에 의한 것으로, 타이어 接地前方에서 流體力學的 揚力 ρV^2 과 그것이 作用하는 面積(A)에 의해 다음과 같이 表示된다.

$$F = C_L \cdot A \cdot \frac{\rho V^2}{2} \quad (4)$$

여기서 C_L 은 揚力係數이다. Hydroplaning 發生의 浮上條件은 荷重을 W라 하면 揚力이 荷重을 上廻할 때이며, $F \geq W$ 로 表示된다. 이 現象은 타이어의 摩擦 중에서도 매우 重要한 事項으로서, 패턴 및 構造的要因이 크며, 고무質의 效果는 작다.

b. 雪氷路面에서의 摩擦係數 : 積雪 및 凍結된 路面에서는 摩擦係數가 대단히 작아지며, 미끄러지기 쉬우나 雪質이나 溫度에 따라 그림 9와 같이 크게 變化한다. 雪路面의 摩擦係數는 고무의 摩擦係數, 雪柱剪斷力, 패턴의 edge 摩擦係數가 合해진 것



(32×8.8 規格限度에 達한 타이어, 荷重 12000lb, 空氣圧 140psi)

[그림 8] 制動試驗에서의 路表面水深의 比較

이지만, 水路面에서는 雪柱剪斷力의 摩擦係數가 없기 때문에 摩擦係數가 일반적으로 雪路面보다 낮다. 最近에는 環境條件의 變化 등으로 Spike 타이어와 Snow 타이어의 中間性能을 가진 Studless 타이어가 普及되고 있으나 패턴 및 고무質面에서 많이 向上되어 있다. 또 새로운 發泡고무로 된 Studless 타이어도 發表되고 있지만, 고무의 摩擦機構가 다소 다른 것으로 알려지고 있으며, 앞으로의 研究에 期待되고 있다.

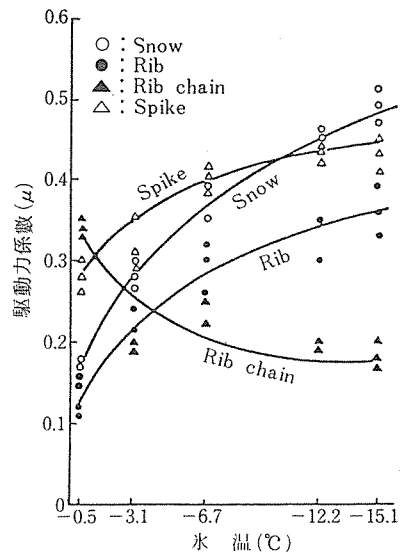
(2) 트레드 고무의 摩擦機構

① 摩擦係數의 分類

고무의 摩擦係數는 現在 다음 3가지의 摩擦係數로 이루어져 있다.

- Hysteresis 摩擦係數
- Adhesion 摩擦係數
- 파이는 摩擦係數

이 중 트레드 고무의 摩擦係數에 있어서 重要한 特性은 要求條件으로 보아 WET 및 DRY 路面에서 가장 큰 Hysteresis 摩擦係數와 雪氷路面에서 가장 큰 Adhesion 摩擦係數이다. 그리고 파이는 摩擦係數는 고무에 관해서는 아직 別로 研究 發表된 것이 없다. 이들을 綜合해보면 그림 9과 같다.



[그림 9] 氷雪路에서 타이어의 發進時摩擦特性 (輪重 200kg)

② 摩擦力的 發生機構

a. 接觸面에서의 解析

(i) Veneer 效果 : French 는 트레드 고무의 摩擦現象은 路面 凹凸의 크기에도 관계되는데, 表層 0.2mm 以下の 表層現象임을 實驗的으로 說明하고 있다.

(ii) 多重接觸論 (Multiple contact theory) : Archard 는 Hertz 의 接觸理論에 따라 球와 平面의 接觸 모델에서 眞實接觸面 A_r 는 式 (5)와 같이 된다고 하였다.

$$A_r = K' W^n \quad (5)$$

여기서 K' 는 表面上의 球狀突起의 分布와 彈性 定數에 의해 定해지는 定數이며, n 은 突起의 分布이다. 多重接觸에서는 n 은 1에 가까와지나 實路面은 매우 複雜하므로 실제로는 實驗으로 決定하여야 한다.

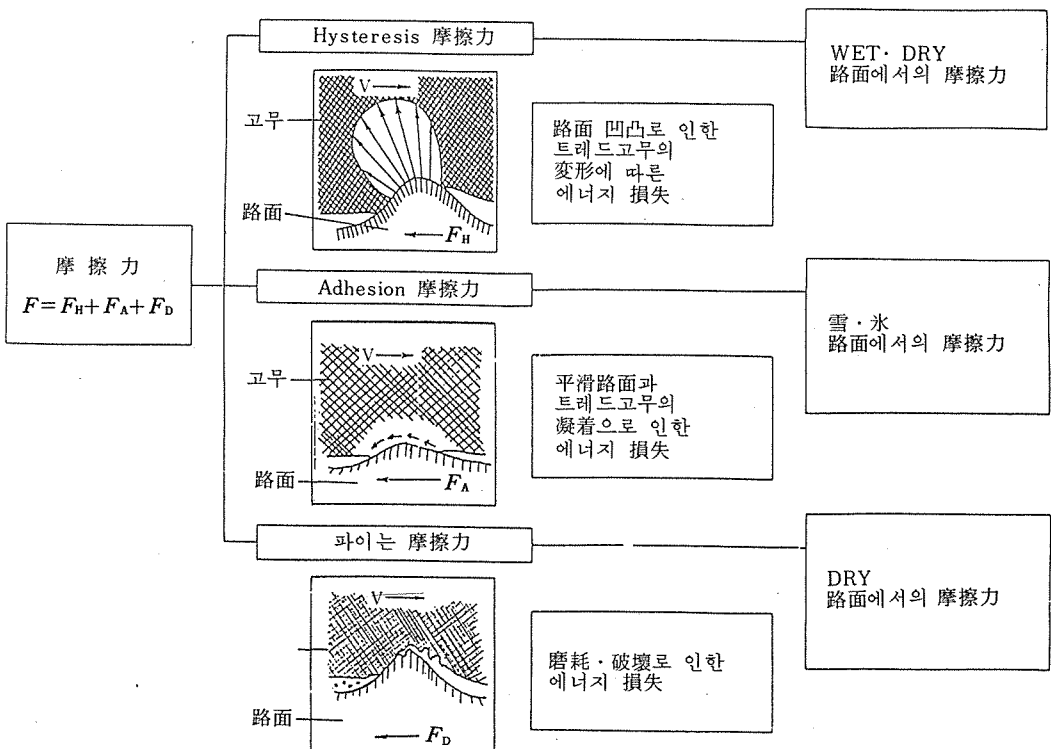
(iii) Schallamach Waves : Schallamach 는 고무를 平滑路面에서 미끄러지게 하면 미끄러지는

方向과 直角方向으로 주름이 생긴다는 것을 發表하였다. 그리고 이 주름은 接觸部를 앞쪽에서 뒤쪽으로 高速度로 移動한다. 이 주름을 Schallamach Waves 라고 한다. Schallamach Waves 는 그 凝着部의 剝離~再凝着의 過程에서 발생하게 되며 여기에는 臨界條件이 있다. 氷路面에서 觀測된 報告는 있으나, 一般路面에서 觀測된 例는 없다.

b. 分子論的 解析 : 이 分野에서 研究된 事例는 적으나, Robbert, Briggs 등이 Schallamach Waves 가 移動할 때의 摩擦力和 表面 에너지의 關係를 研究하고 있다.

c. 物性面에서의 解析 : Grosch 는 고무의 摩擦을 溫度와 速度에 관해서 광범위하게 研究하여, 고무의 摩擦特性은 그림 11, 12와 같이 WLF 速度-溫度等價則이 적용되므로 粘彈性特性임을 證明하였다. 移動係數 a_T 는 다음과 같이 表示된다.

$$\log a_T = -8.86 \frac{T - T_s}{101.5 + T - T_s} \quad (6)$$



(그림 10) 摩擦機構에 의한 分類

여기서 T_s 는 基準溫度에서 유리 轉移點 T_g 보다 約 50°C 높다. 또 路面이 種類와 速度에 관한 研究에서는 平滑路面에서는 對稱性을 가진 摩擦特性이 나타나나, 거칠은 路面에서는 摩擦力의 最大値는 高速度쪽으로 치우치며, 또 左側에 Shoulder peak를 가진 그림 13과 같은 摩擦特性이 된다는 것을 發表하였다. 結果的으로 平滑한 路面에서는 路面 凹凸이 없으므로 Adhesion 摩擦力이 主體이며, 그 現象은 低速度領域에서 最大摩擦力을 나타내고 있고, 또 거칠은 路面에서는 路面 凹凸로 고무가 變形되므로 Hysteresis 摩擦力이 主體가 되며,

그 現象은 高速度領域에서 最大摩擦力이 나타난다는 것이다.

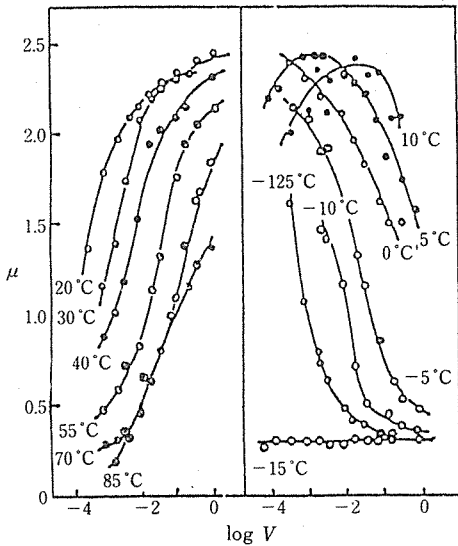
Moore는 Grosch의 結果로부터 고무의 粘彈性特性에 의한 展開을 시도하여 다음과 같은 式 (7), (8)를 提示하고 있다.

$$F_A = k_1 S (E'/P') \tan \delta \quad (7)$$

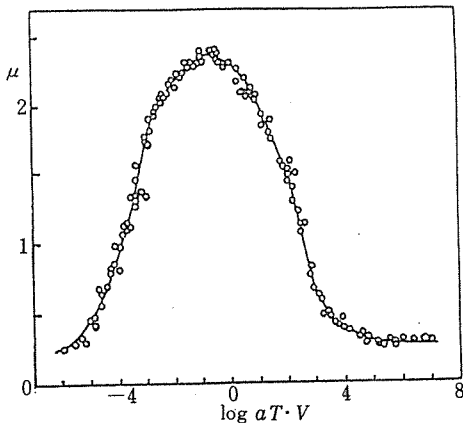
$$F_H = k_2 (P/E')^n \tan \delta \quad (8)$$

여기서 P 는 垂直壓力, S 는 고무의 剪斷壓力 k_1, k_2 는 定數, r 는 1次 以下, n 은 1次 以上의 定數, $\tan \delta$ 는 損失彈性率 E'' 와 貯藏彈性率 E' 의 比, 즉 $\tan \delta = E''/E'$ 이다. 이의 特性値는 그림 14와 같이 加振周波數 ω 에 依存되므로 摩擦領域에서의 要求振動數로 評價할 必要가 있으나, 실제로는 WLF 式에 의한 速度-溫度等價則을 적용하여 低溫 쪽에서 粘彈性特性을 評價하고 있다.

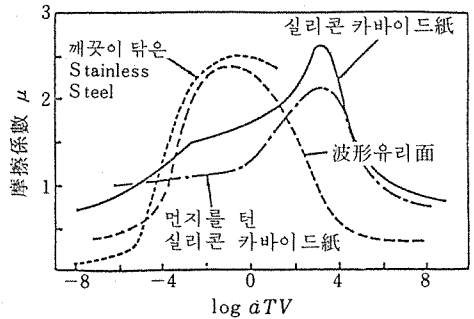
最近에는 摩擦力에 對應하는 이들의 物理特性을 사용하여 Polymer의 分子設計가 이루어지고 있다. Nordsiek는 타이어의 各種 摩擦特性에 대해 그림



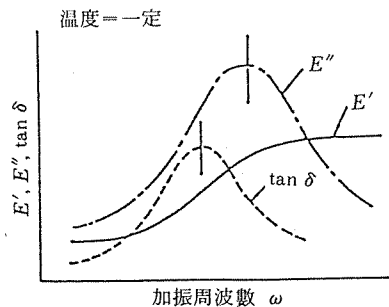
[그림 11] 波形 유리面에서의 NBR의 미끄럼 摩擦係數의 슬립 速度·溫度依存性



[그림 12] NBR의 20°C 로 換算한 미끄럼 摩擦係數의 마스터 커브



[그림 13] 摩擦面에 따른 NBR의 摩擦係數의 마스터 커브 (20°C 로 換算)



[그림 14] 加振周波數에 의한 $E', E'', \tan \delta$ 의 變化

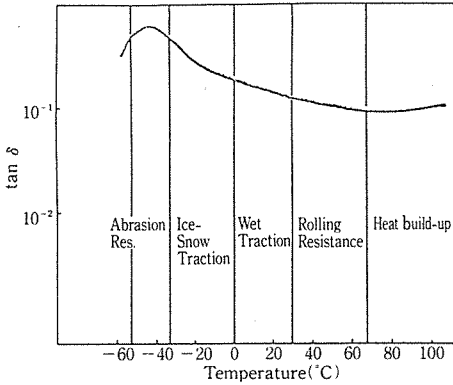
15와 같은 粘彈性特性和의 對應을 提示하여 理想의인 Polymer 設計에 대한 報告를 하였다.

4. 타이어의 磨耗特性

磨耗는 摩擦力에 의해 고무가 닳는 現象이나, 이것을 Holm의 式으로 表示하면 다음과 같다.

$$A = A_0 \cdot F \cdot L \tag{9}$$

여기서 A는 磨耗量, A₀는 單位 에너지 當 磨耗量, F는 剪斷力, L은 미끄러진 距離이다. 磨耗量



[그림 15] 粘彈性特性和 各種性能의 對應

은 대략 이 摩擦 에너지(F·L)의 크기에 따라 정해지는 것으로 생각되나, 타이어의 磨耗는 타이어 條件 및 使用條件에 따라 磨耗機構가 크게 달라지므로 단순히 摩擦 에너지 만으로는 整理될 수 없는 복잡한 現象이다.

(1) 타이어의 磨耗機構

① 磨耗形態의 分類

磨耗機構는 주로 트레드 고무의 磨耗狀態에서부터 分類되고 있으나, 이것을 要求條件까지 考慮하여 分類한다면, 表4와 같이 分類된다. 이 중 乘用車用 타이어의 경우, 중요한 磨耗形態는 摩擦磨耗와 偏磨耗의 問題이다. Abrasive 磨耗, 疲勞磨耗, 腐蝕磨耗는 道路條件이 좋아지고 있으므로 乘用車用 타이어의 특별한 磨耗形態를 나타내고 있는 것이다. 한편 偏磨耗는 패턴·構造를 考慮하지 않으면 說明이 不可能하므로 여기서는 摩擦磨耗를 中心으로 한다.

a. 타이어의 摩擦力으로 解析 : Schallamach는 타이어의 磨耗量式으로 式(10)을 提示하였다.

$$A = \nu \rho F^2 / C \tag{10}$$

여기서 A는 單位走行距離當의 磨耗量, ν는 磨耗度, ρ는 Resilience, F는 摩擦力, C는 縱力 또는

摩擦形態에 의한 分類

<表 4>

摩擦形態	機 構	摩 擦 狀 態	路 面 形 態
摩 擦 磨 耗	眞實接地部의 破斷으로 發生하는 磨耗	摩擦方向과 直角으로 ridge 形成	比較的 平滑한 路面
Abrasive 磨耗	단단한 路面의 突起部에 의한 切削의 磨耗	摩擦方向과 平行한 ridge 形成	比較的 날카로운 凹凸이 있는 路面
疲 勞 磨 耗 (Chipping)	磨耗時 應力의 反復으로 일어나는 表面의 疲勞에 의한 磨耗	表面의 層狀剝離	比較的 凹凸이 큰 路面
偏 磨 耗	타이어의 構造 패턴 등, 車輛의 alignment 등에 의해 發生하는 不規則한 磨耗	不規則인 磨耗	各種 路面
腐 蝕 磨 耗	環境(霧靄氣) 또는 潤滑劑 등의 介在物로 인한 腐蝕作用에 의한 磨耗	表面의 膨潤으로 인한 軟化 등	汚染된 路面

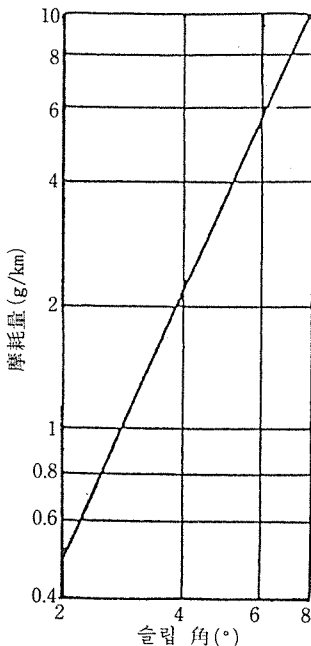
橫力에 대한 타이어의 剛性(예컨대, Cornering Power)이다. 이식 (10)에서 磨耗는 타이어의 摩擦力의 供給에 比例하게 되나, ν 와 ρ 특히 ν 가 摩擦力에 依存된 物質定數라는 것에 注視하여야 한다. 또한 摩擦力과 磨耗를 試驗의으로 對比시켜보면 다음과 같은 關係가 있다는 것을 알 수 있다.

$$A = ae^{bF}, \text{ 또는 } \ln A = bF + \ln a \quad (11)$$

여기서 a, b 는 要求條件以外의 要因을 包含하는 定數이고, F 는 슬립率 數% 以內의 타이어의 常用範圍의 回轉抵抗을 包含하지 않는 摩擦力이다. 이 摩擦力에 의한 依存性을 表示한 것이 그림 16이다.

b. 摩擦 에너지로서 解析: 要求條件에 의해 發生하는 制動·驅動力 및 Cornering fore 등의 힘은 Fiala의 解析結果로부터 粘着域에서의 힘과 滑溜域에서의 摩擦力으로 이루어진 것이다.

摩擦現象은 이 滑溜域에서의 摩擦力에 의해 發生하는 現象이므로 磨耗機構를 研究하기 위해서는 이들 힘을 分離할 필요가 있다. Veith는 이 接地面內의 滑溜域에 있어서의 磨耗는 다음과 같은 摩擦 에너지(또는 磨耗 에너지)로 檢討하고 있다.



(그림 16) 슬립角과 磨耗量

$$\text{Wear} = A \cdot E_F \quad (12)$$

여기서 A 는 磨耗度(單位 摩擦 에너지 當 磨耗量) E_F 는 摩擦 에너지로서 摩擦力 F_t 와 미끄러진 量 dl 의 곱하기(積)로 表示된다.

$$E_F = \int F_t \cdot dl \quad (13)$$

$$F = \mu \cdot P \quad P(\text{垂直压力}) \quad (14)$$

$$E_F = \int \mu \cdot P \cdot dl \quad (15)$$

$$\text{Wear} = f(A, \mu, P, l) \quad (16)$$

최근에는 이들의 物理量을 測定한 摩擦 에너지의 研究에 의해 타이어의 磨耗 및 偏磨耗는 상당히 理論的으로 解析되고 있다.

C. 苛酷度(Severity)의 特性에 의한 解析: 實走 타이어에 있어서는 要求條件이 複雜하게 分布되어 있으므로 物理的解析이 困難하다. 그래서 Biard와 Svetlik은 이들의 要求條件의 크기를 磨耗速度로 代用하여 檢討하고 있다. 일반적으로는 이것을 苛酷度(Severity)라고 부르고 있으나, 表現方法으로는 單位時間當 磨耗量, 單位走行距離當 磨耗量, 單位 滑溜當 磨耗量, 單位摩擦 에너지當 磨耗量 등 여러가지가 있다. 이 苛酷도를 사용하여 研究하는 예는 많으며, 예컨대, Davision은 그림 17, 18과 같이 NR, SBR, BR, 트레드를 使用하여 室內評價(Schell Abrader)와 實地評價의 對應을 시도하고 있다. 또 日本 고무 工業技術員會에서는 그림 19와 같이 各種試驗機評價와 實走評價의 對應을 시도하고 있는 例도 있다.

(2) 트레드 고무의 磨耗機構

고무는 그림 17에서 알 수 있는 바와 같이 큰 苛酷度依存性이 있다. 특히 SBR와 BR을 比較해보면 低苛酷度領域에서는 SBR 쪽이 耐磨耗性이 좋으나, 高苛酷度領域에서는 BR 쪽이 耐磨耗性이 좋은 것으로 나타났다. 이러한 現象은 摩擦 에너지만으로는 說明되지 않으며, 따라서 低苛酷度領域과 高苛酷度領域에서는 磨耗機構에 差가 있다는 것은 충분히 豫想할 수 있는 것이다. Schallmach가 磨耗 A 는 本質磨耗(A_i ; Intrinsic Abrasion)

와 패턴 磨耗(A_P ; Pattern Abrasion)로 이루어진다고 하여 다음과 같은 式을 提示하였다

$$A = aA_I + bA_P \quad (17)$$

이러한 點으로 생각해보면 摩擦磨耗는 表 5와 같은 磨耗機構로 分類할 수 있을 것이다.

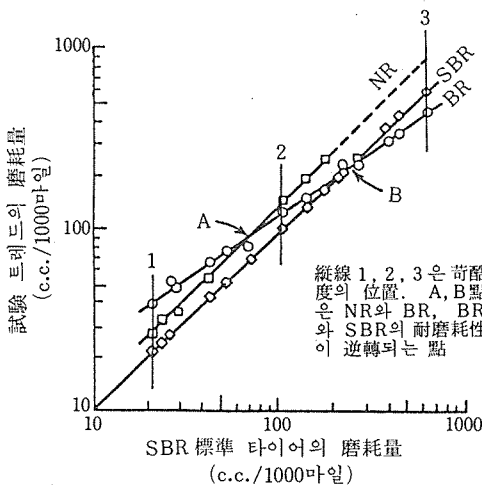
① 고무의 破壞機構

a. 破壞面에서의 形態學의 解析: 磨耗現象에 있어서의 破壞機構는 여러가지 提案된 바 있으나, 대부분은 Abrasion 패턴이 發生하고 있는 高苛酷度領域에서의 研究가 많다. Ratner는 이 Abrasion 패턴에 대해 다음과 같은 式을 提示하고 있다.

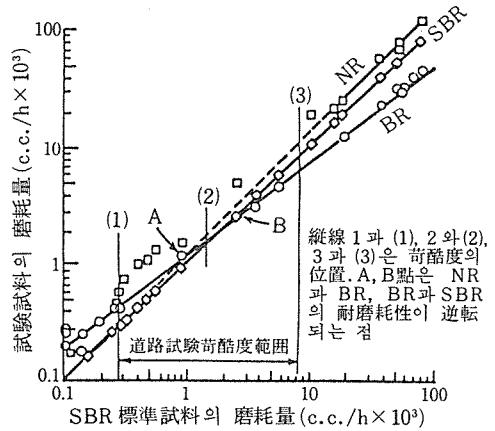
$$A = a \cdot S^{\alpha/\beta} \quad (18)$$

여기서 S 는 패턴 間隔, a 는 定數, α 는 고무 材質 및 磨耗機構에 의한 定數, β 는 고무 材質에 의한 定數이다. 그리고 α/β 는 定數로서 3.2인데, Schallmach는 3.0으로 하고 있다. 이 Abrasion 패턴은 그림 20과 같이 磨耗量 및 摩擦力과 對應하고 있으므로 要求特性을 알기 위해서도 중요한 特性值이다.

이 Abrasion 패턴의 發生機構에 대해서는 여러 가지로 論議되고 있다. Schallmach는 路面突起(凸)에 의해 고무가 파이는 摩擦方向에 直角으로 前進하면서 同時に 橫方向으로 파이는 部分과 連



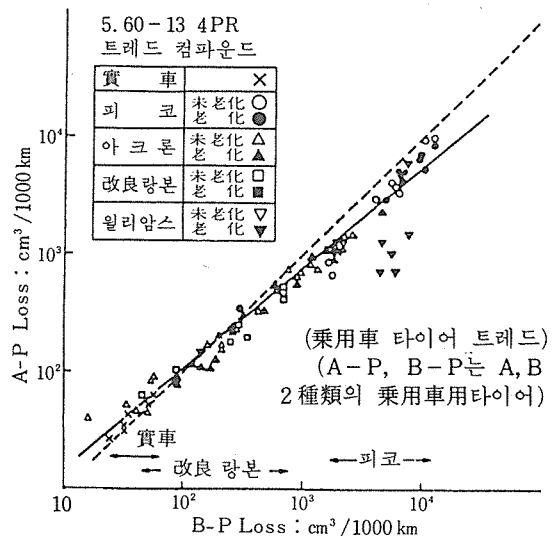
[그림 17] 캘리포니아에서의 道路試驗結果 (HAF 50 phr 配合)



[그림 18] 試驗機結果 (그림 17과 같은 配合)

〈表 5〉 磨耗機構에 의한 分類

磨耗機構		本質磨耗	패턴 磨耗
苛酷度		低Severity側	高Severity側
要因	磨耗 에너지	小	大
	發熱	小	大
	疲勞	小 → 長時間	大 → 短時間
磨耗面 (Abrasion pattern)		無~小	小~大
破壞機構		疲勞·劣化後의 磨耗 에너지에 의한 破壞	大要因의 磨耗 에너지에 의한 破壞

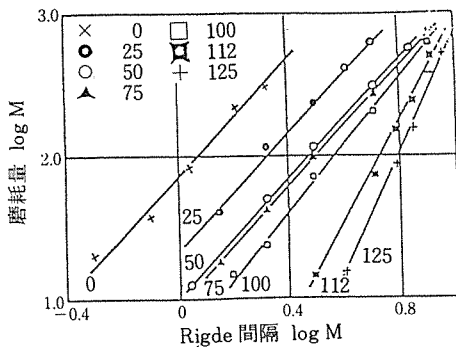


[그림 19] 磨耗와 苛酷度の 關係

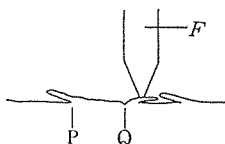
結되어 破壞된다고 하나, Reznikovskii 는 고무와 路面의 凝着으로 나타나게 되는 Roll formation mechanism 을 提案하고 있다. 한편, Southern 은 그림 21 과 같이 摩擽力 F 에 의해 P나 Q位置의 Crack 이 成長하여 破壞된다고 하였다. 이에 대해 Zhang 은 파인 先端部分(tongue tip)이 破壞된다고 하였다.

한편 磨耗되어 離脫된 고무조각(片)으로 解析되기도 한다. Dannis 는 實走磨耗에서의 磨耗片을 解析하여, 形狀은 Sausage roll 모양이고, 크기는 使用條件에 따라 다르기도 하나 幾何學的平均으로 8~23 μ 이라 하였는데, Zhang 은 0.5~5 μ 이라 하였다. 이들을 測定하는데는 고무조각끼리 凝着하게 되므로 상당한 研究가 必要하다. 最近에는 電子顯微鏡 등에 의해 磨耗의 初期段階에서부터 解析되고 있으며, 앞으로의 研究에 크게 期待되고 있다.

b. 磨耗表面 근방의 分析結果로 解析 : 카본 블랙의 構造破壞나 카본블랙~고무間의 構造破壞는 10⁻²cm 정도, 軟化層은 10⁻⁴cm 정도, 酸化劣化나 熱劣化도 상당한 前進이 있다고 하나, 苛酷度條件과의 對應이 확실하지 않으므로 이러한 點은 檢討할 必要가 있다.



[그림 20] Ridge 間隔과 磨耗量 (數字는 카본 블랙의 配合)



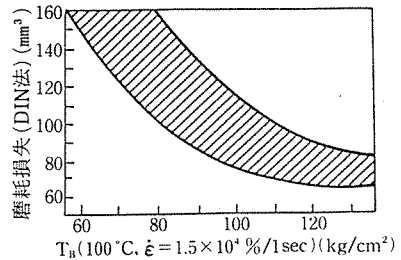
[그림 21] 破壞 모델

c. 破壞物性으로 解析 : 破壞現象에 대해 物性論의 展開를 해나가자면 速度 및 溫度의 特性이 主要한 問題이나 變形速度에 대해 Grosch는 1cm/sec 의 미끄름 速度인 경우는 10⁴%/sec까지 달한다고도 하므로 타이어의 경우 10⁶~10⁷%/sec 정도의 變形速度를 생각할 수 있다. 또 溫度에 대해서는 實車走行中인 타이어 트레드의 表面溫度는 순간적으로 상당히 高溫인 것으로 豫想되나, 測定하기가 곤란하므로, 여러가지의 計算結果를 보면, Ecker은 200℃ 以上, Amerongen은 200~300℃, Hegman은 常溫+140℃로 推定하고 있다.

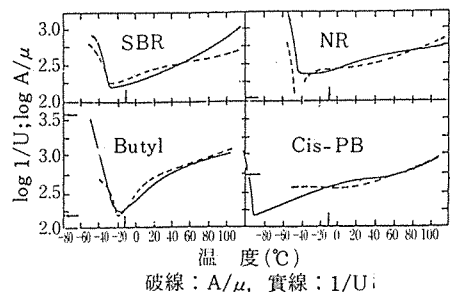
이러한 結果는 상당히 高苛酷度에서의 溫度로 생각되므로 要求條件과의 對應이 必要하다. 이와 같은 要求條件을 考慮한 破壞特性과 磨耗의 關係를 檢討한 例는 많으나, Ecker가 100℃에서 1.5 × 10⁴%/sec의 變形速度에서 얻은 T_b와 DIN法에 의한 磨耗評價를 對應시킨 데이터를 보면 그림 22와 같다.

Grosch 는 單位摩擽 에너지當 磨耗量(A/μ)은 破壞 에너지 密度(U)의 逆數에 比例한다고 하여 다음과 같은 式으로 表示하였다.

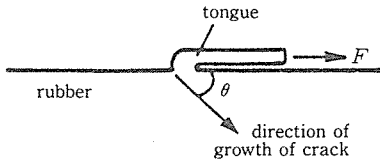
$$\frac{A}{\mu} = C \cdot \frac{1}{U} \quad (19)$$



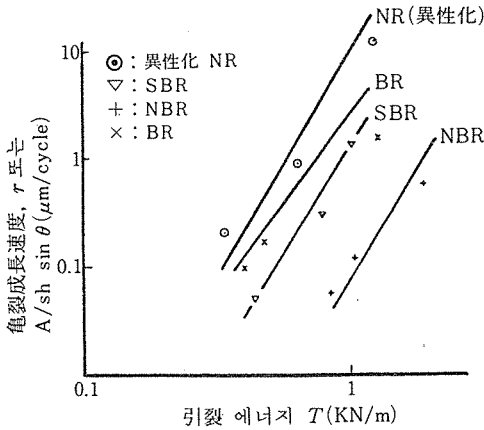
[그림 22] 高速, 高溫에서의 引張強度와 磨耗



[그림 23] 카본 補強(HAF 50PHR) 各種 고무의 磨耗와 破壞 에너지



[그림 24] 摩擦力 (F) 에 의한 龜裂成長의 모델



[그림 25] 磨耗試驗結果 (plot) 와 引裂試驗結果 (實線) 의 比較

여기서 C는 定數이고, 그 結果는 그림 23 과 같다.

d. 疲勞破壞物性으로 解析 : Kragelskii는 式(20)의 고무의 破壞壽命의 式으로부터 磨耗速度와 疲勞壽命의 關係를 式 (21) 과 같이 表示하였다.

$$n = \left(\frac{\sigma_B}{\sigma} \right)^\beta \quad (20)$$

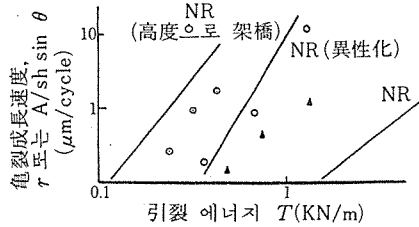
여기서 n은 疲勞破壞壽命, σ_B 는 破斷應力, σ 는 動的應力振幅, β 는 疲勞壽命係數이다.

$$A = C \left(\frac{\mu \cdot E}{\sigma_B} \right)^\beta \cdot \left(\frac{P}{E} \right)^{1+\beta} \quad (21)$$

여기서 P는 垂直壓力, μ 는 摩擦係數, E는 고무의 Modulus, δ 는 路面의 形狀因子이다.

Southern 등은 그림 24 와 같은 破壞機構에서 龜裂成長性과의 對應을 시도하고 있으며 引裂 에너지 T는 다음과 같이 表示하였다.

$$T = F / [h / (1 + \cos \theta)] \quad (22)$$



Δ : NR, \circ : 異性化 NR, \odot : 高度로 架橋된 NR

[그림 26] 磨耗試驗 (plot) 과 引裂試驗 (實線) 의 對應

여기서 F는 摩擦力, θ 는 Crack의 成長方向, h는 샘플 幅이다. 한편, 1회轉當 磨耗量은 Crack의 깊이 成分에 對應되므로 다음과 같다.

$$A = r \cdot s \cdot h \sin \theta \quad (23)$$

여기서 S는 샘플의 둘래길이, r는 1회轉當 Crack 成長(龜裂成長速度)이다. 또 Thomas 등은 r를 다음과 같이 表示하고 있다.

$$r = B \cdot T^\alpha \quad (24)$$

여기서 B, α 는 材料定數로서 NR에서는 $\alpha=2$, SBR에서는 $\alpha=4$ 로 報告되어 있다. 以上の 式을 整理하면 다음 式 (25)와 같다.

$$\begin{aligned} \log r &= \log (A/s \cdot h \cdot \sin \theta) \\ &= \alpha \log [F / \{ h (1 + \cos \theta) \}] + \log B \end{aligned} \quad (25)$$

各種 Polymer에 대해 圖示해 보면 그림 25, 26 과 같다. 異性化 NR, BR, SBR, NBR은 龜裂成長速度에서 豫想되는 磨耗量과 磨耗試驗에서의 磨耗量이 잘 一致하고 있다. 結晶性 NR은 龜裂成長性에서 豫想되는 磨耗量에 비해 磨耗되기 쉬운 結果로 되어 있다. Southern은 그 理由를 NR의 伸張結晶化에 의한 補強性的 차이라고 하였다.

[結 言] 摩擦은 理論的으로는 상당히 깊이 解析되고 있는 한편, 配合面에서는 粘彈性特性에 의한 展開로 分子設計可能한 水準까지 向上되고 있다. 그러나 磨耗은 破壞特性이 다르기 때문에 매우 複雜한 現象으로 되어 있다. 앞으로는 破壞의 研究가 進展되고 配合面에서는 分子設計可能한 水準까지 向上될 것으로 期待된다.