

타이어工學(4)

—타이어의 動的特性—

白 南 哲*

3. Cornering特性

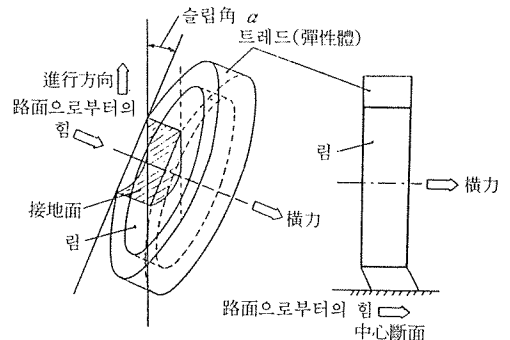
(1) Cornering Force의 發生機構

① 솔리드 타이어 모델에 의한 說明

타이어의 가장 簡略化된 模型으로서는 [그림 1]과 같이 림의 外周部가 彈性體(트레드 고무)로 된 솔리드(Solid) 模型이 있다. 이 타이어가 進行方向에 대하여, 타이어의 中心面이 α 의 角度를 維持한 채 옆으로 미끄러지면서 굴러가는 상태를 생각해 보자. 이 옆미끄러짐角 α 는 슬립角이라고도 불리어지고 있다.

이러한 轉動狀態의 솔리드 타이어에 注目하여, 타이어에 固定된 座標系에서 接地部를 보면 路面이 後方으로 移動하고 있으며, 트레드 表面은 接地部의 前端에서 路面과 接觸하고, 時間의 經過와 함께 路面과의 接觸(粘着)을 維持하면서 그림의 아래쪽으로 移動한다.

이와 같은 상태에 있는 타이어의 垂直斷面形狀은 [그림 1]의 오른쪽에 나타나 있는 바와 같이 트레드 表面이 路面에 의하여 橫方向으로 눌러 트레드部가 剪斷變形을 일으키고 그로 인하여 橫力이 發生한다. 또한 剪斷變形量은



[그림 1] 솔리드 타이어 模型

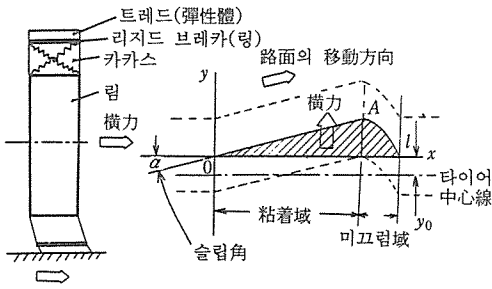
트레드가 뒷 부분으로 移動함에 따라 커지며, 變形力과 트레드·路面間의 摩擦力이 같게 되는 點에서 미끄러지기 시작하여 그 點보다 뒷 부분에서는 트레드가 옆으로 미끄러지게 되어 미끄러짐 摩擦力이 發生한다. 그리고, 트레드는 接地部의 後端에서 원래의 상태로 되돌아간다. 여기에서 타이어에 發生하고 있는 橫力은 다음의 式과 같이 된다.

$$\text{橫力} = [\text{트레드의 單位길이當 橫方向橫彈性定數}] \times [\text{트레드部가 變形된 面積}]$$

② rigid belt(rigid ring)로 된 타이어 模型

스틸 래디알 타이어는 橫曲剛性이 매우 큰 스틸 벨트로 되어 있으며, 이 模型은 [그림 2]에 나타나 있는 바와 같이 카카스部의 外周에 링狀의 벨트가 있고, 이 링은 단단하여

*慶熙大學校 工科大學 教授



〔그림 2〕 리지드 브레카(링) 타이어 모델

橫方向으로는 구부러지지 않으나, 半徑方向으로는 잘 구부러져서 타이어의 屈撓性を 發生시키게 된다.

링은 카카스부의 彈性體에 의하여 떠받쳐져 있기 때문에 링 全體가 垂直軸 둘레의 비틀림變形이나 平行移動變형을 일으키는데, 여기에서 비틀림變形에 대해서는 省略한다.

이와 같은 타이어 모델이 슬립角 α를 갖고 옆으로 미끄러지면서 굴러가고 있는 경우를 생각하여 보자. 接地部에 注目하면 링 中心線이 發生하는 橫力에 의하여 y₀만큼 平行移動하고 있는 點이 前述한 솔리드 타이어 모델과는 다르나 其他는 거의 同一하며, 트레드 表面이 接地前端에서 路面과 接觸한 이후 路面에 粘着하여 0~A 사이를 移動하고 變形力이 摩擦력과 같아지는 點에서 미끄러지기 시작하여 接地後端에서 원래의 狀態로 되돌아간다. 타이어에 發生하는 橫力은,

$$\text{橫力} = [\text{트레드 單位길이當 橫方向橫彈性定數}] \times [\text{트레드部가 變形된 面積}]$$

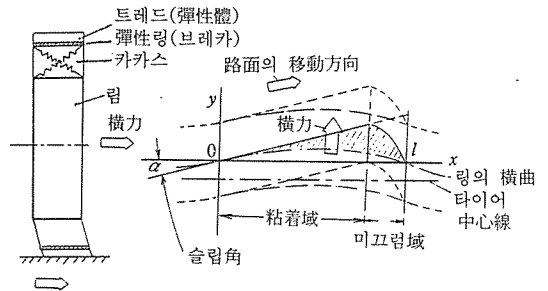
과 같이 되고, 前半部에 粘着域이, 後半部에 미끄럼域이 존재한다.

③ FIALA의 타이어 모델(彈性 링 모델)

前述한 rigid belt로 되어 있는 타이어 모델은 벨트部가 橫方向으로는 구부러지지 않는다고

하였지만, 실제로는 약간 구부러지기 때문에 FIALA 타이어 모델은 [그림 3]과 같이 彈性 링狀의 벨트로 되어 있으며, 그 링이 橫力에 의하여 구부러지는 것을 考慮한 모델이다.

이와 같은 타이어가 슬립角 α를 維持하고 옆으로 미끄러지면서 轉動하는 경우, 接地部에 있어서의 트레드의 變形面積은 [그림 3]에서와 같이 벨트가 구부러진 정도만큼 적어지며 이 정도만큼 發生되는 橫力도 작아진다.

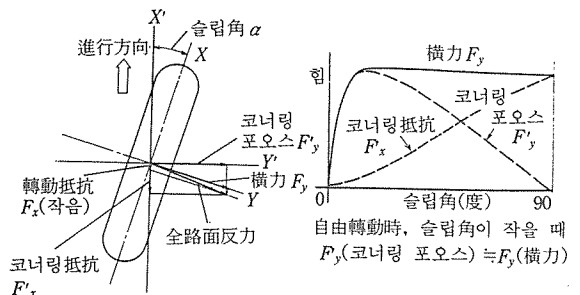


〔그림 3〕 FIALA의 타이어 모델 (彈性 링 타이어 모델)

(2) 코너링 포오스 및 셀프 어라이닝 토오 크

① Cornering Force 및 Self Aligning Torque

[그림 4]의 왼쪽에 나타나 있는 바와 같이 슬립角 α를 維持한 채 옆으로 미끄러지면서 自由轉動하고 있는 타이어에 發生하고 있는



〔그림 4〕 橫力과 Cornering Force

힘은, 轉動抵抗이 작은 것으로서 省略하면 타이어의 橫變形에 의하여 發生하는 힘은 타이어軸方向의 橫力만 남게 된다.

이 橫力은 進行方向에 直角인 成分(이것을 Cornering Force라 부름)과 進行方向의 成分(이것을 Cornering抵抗 또는 Cornering Drag라고도 함)으로 나눌 수가 있다. 이 경우 橫力 F_y 와 Cornering Force F'_y , Cornering抵抗 F'_x 의 관계는 다음과 같이 된다.

$$F'_y = F_y \cos \alpha$$

$$F'_x = F_y \sin \alpha \dots\dots\dots(3.1)$$

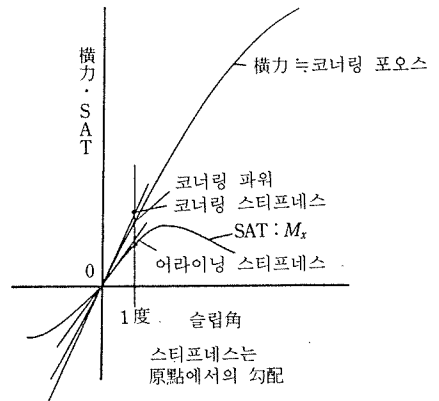
여기에서 슬립角이 작은 경우에는 橫力과 Cornering Force는 거의 같은 값으로 보아도 좋다. 때문에 兩者를 明確히 分類하지 않는 경우도 있으나, 슬립角이 크다거나 驅動·制動力이 作用하고 있는 경우에는 兩者는 相異하다는 데 주의하여야 한다.

[그림 4]의 오른쪽에서 橫力을 Cornering Force와 Cornering抵抗으로 나눈 分力과 슬립角과의 관계가 나타나 있다. 슬립角이 작은 곳에서의 Cornering Force는 거의 滑輪角에 比例하여 增加하고 이 上昇勾配인 Cornering Stiffness는 車輛의 操縱安定性에서 큰 役割을 하는 것으로서 重要な 要素이다. 따라서 여기에서는 주로 Cornering Stiffness에 대하여 記述하고자 한다.

이에 대하여 Cornering Force의 最大値는 주로 타이어와 路面間의 摩擦係數에 관계하고 自動車의 限界特性을 支配하는 重要な 特性이다. 이 特性은 모든 走行條件, 예컨대 乾燥路面, 젖은 路面, 물이 끼어 있는 路面, 모래가 쌓여 있는 路面, 자갈길 등에서의 摩擦係數, 磨耗, 溫度, 車輛의 用途 등 모든 條件을 考慮하여 檢討하여야 하는 복잡한 要因을 포함한 特性이다.

Self Aligning Torque(SAT)는 [그림 3]에 나타나 있는 트레드부의 變形에서 알 수 있듯이 接地部後半의 트레드의 變形이 前半보다 크게 되므로 橫力의 分布는 接地面의 後半에 치우쳐 있으며, 이 때문에 타이어에는 垂直軸 둘레에 滑輪角을 작게 하는 方向(원래대로 되돌리려고 하는)의 Self Aligning Torque가 發生한다. 이 Torque는 [그림 5]에 나타나 있는 바와 같이 滑輪角이 작은 곳에서는 直線的으로 增加하고, 滑輪角이 2~4°에서 最大値에 달하며, 그 이후에는 減少한다. Self Aligning Torque의 最大値는 타이어와 路面間의 摩擦係數에 따라 크게 變化한다.

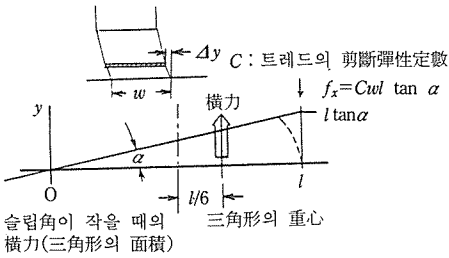
또한 Self Aligning Torque의 上昇勾配는 Aligning Stiffness라고도 불리우는데 이 Self Aligning Torque는 핸들의 무게, 異常振動(Shimmy) 등에도 관계하는 重要な 要素이다.



[그림 5] 橫力과 SAT, Cornering Stiffness와 Cornering Power의 관계

② Cornering Stiffness와 Aligning Stiffness

微小한 滑輪角으로 轉動하고 있는 타이어 트레드부의 變形은 [그림 6]과 같이 後部로 移動함에 따라서 커지며, 벨트가 구부러지지 않으면 滑輪角 α 에 比例하여 增加한다. 여기에서 滑輪角이 微小한 경우를 생각하면 미끄럼域은 대단히 작기 때문에 省略할 수가 있고,



[그림 6] Cornering Stiffness와 Aligning Stiffness의 관계

接地部後端에서의 트레드의 변형량은 $\Delta y = l \tan \alpha$ (l 은接地길이)가 되며, 트레드의 단위 길이당 剪斷彈性定數를 C 라 하면 接地後端에 發生하는 橫應力은 $f_x = Cwl \tan \alpha$ 가 된다. 여기에서 트레드部の 단위面積當 剪斷彈性定數를 C 라고 하면 $C = Cw$ (w 는接地幅)의 관계가 있고, 後端部에서의 橫應力은 $f_x = Cwl \tan \alpha$ 가 되어 橫應力의 分布는 3角形으로 나타나며 全橫力은 3角形의 面積이 되어 다음 式과 같이 된다.

$$F_y = Cwl^2 \tan \alpha / 2 \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

여기에서 橫力의 上昇勾配, 즉 Cornering Stiffness K_y 는 다음과 같이 된다.

$$K_y = Cwl^2 / 2 \quad \dots\dots\dots(3.3)$$

다음으로 橫力은 3角形의 重心, 즉 原點(中心)으로부터 $l/6$ 만큼 後方의 位置에 作用하게 된다.

여기에서 微小角일 때의 Self Aligning Torque는 다음과 같이 된다.

$$M_s = Cwl^3 \tan \alpha / 12 \quad \dots\dots\dots(3.4)$$

Self Aligning Torque의 上昇勾配, 즉 Alig-

ning Stiffness A_s 는 다음과 같이 된다.

$$A_s = Cwl^3 / 12 \quad \dots\dots\dots(3.5)$$

여기에서 Cornering Stiffness와 Aligning Stiffness의 關係는,

$$A_s = K_y \frac{l}{6} \quad \dots\dots\dots(3.6)$$

타이어의 接地中心으로부터 橫力이 作用하고 있는 點까지의 距離 e 는 'Pneumatic trail' 이라고 불리우며,

$$e = l/6 \quad \dots\dots\dots(3.7)$$

이 되며, 接地길이가 12cm인 경우 약 2cm가 된다.

또한 이 Pneumatic Trail은 타이어 模型의 接地形狀이 네모꼴이 된다고 하는 假定下에서 求한 것이며, 보통 타이어에서는 橢圓形으로 되기 때문에 약간 다른 값이 되며, 正確하게는 兩 Stiffness의 測定値로부터 다음 式을 써서 求할 수 있다.

$$e = A_s / K_y \quad \dots\dots\dots(3.8)$$

(3) Cornering Stiffness에 미치는 主因子の 영향

① 벨트의 구부러짐의 影響

FIALA의 理論에 의하면 벨트의 橫曲變形을 考慮한 경우의 兩 Stiffness는 다음의 式과 같이 된다.

$$\begin{aligned} &\text{Cornering Stiffness} \\ &K_y = Cwl^2 / 2 (1 + \delta l / 6) \quad \dots\dots\dots(3.9) \end{aligned}$$

Aligning Stiffness

$$A_s = Cwl^3/12 \dots\dots\dots(3.10)$$

여기에서 $\delta = Cl^2(k_s/4EI_s)^{3/4}/2k_s$ 로, E 는 벨트를 빔(Beam)으로 한 경우의 탄성定數, I_s 는 빔의 타이어 半徑軸 둘레의 斷面 2次 Moment, EI_s 는 빔의 橫曲剛性, k_s 는 카카스부의 單位길이當 剪斷彈性定數이다.

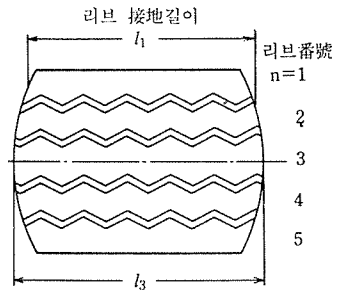
스틸 벨트로 되어 있는 래디알 타이어에서는 벨트의 橫曲剛性が 매우 크기 때문에 δ 가 작아지지만, 바이어스 타이어의 경우에는 $\delta/6$ 의 값이 0.5 前後가 되어 EI_s , k_s 의 영향이 나타나며, 벨트의 橫曲剛性이나 카카스의 剪斷彈性定數를 크게 하면 Cornering Stiffness가 커진다. 때문에 바이어스 타이어 時代에 通用된 橫剛性が 큰 타이어는 Cornering Stiffness가 크다고 하는 常識은 래디알 타이어에서는 通用되고 있지 않다. 바꿔 말하면 래디알 타이어의 Cornering Stiffness와 橫剛性과의 관계는 작아지고 있다고 말할 수 있다.

② 接地길이의 영향

前述한 간단한 타이어 模型에서 求한 (3.3) 및 (3.5)式에서 밝혀진 바와 같이 兩 Stiffness에 가장 크게 관계하는 要素는 接地길이이며, Cornering Stiffness는 거의 接地길이의 제곱, Aligning Stiffness는 세제곱에 比例하여 커진다.

各社가 所有하고 있는 타이어 試驗機는 드럼曲率이 서로 다르기 때문에 接地길이에 차이가 있으며, 타이어의 Stiffness 測定値가 차이가 나는 原因의 하나로 되어 있다.

좀더 詳述하면 實際 타이어의 경우 接地面形狀은 (그림 7)과 같이 橢圓에 가까운 모양으로 되어 있으며, n번째의 리브의 接地길이를 l_n , 剪斷彈性定數를 C_n 로 하여 (3.3)式 및 (3.5)式의 兩 Stiffness를 5個의 리브를 갖고 있는 타이어에 대해서 求해 보면 다음과 같이 된다.



(그림 7) 일반 타이어의 接地形狀

Cornering Stiffness

$$K_y = \frac{1}{2} \sum_1^5 C_n l_n^2 \dots\dots\dots(3.11)$$

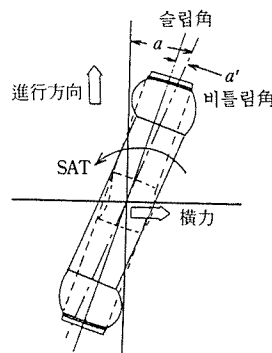
Aligning Stiffness

$$A_s = \frac{1}{12} \sum_1^5 C_n l_n^3 \dots\dots\dots(3.12)$$

여기에서 簡略化하여, 어떤 리브도 같은 剪斷彈性定數를 갖는 것으로 하면 Cornering Stiffness는 모든 리브의 接地길이의 제곱平均에, 또 Aligning Stiffness는 모든 리브의 接地길이의 세제곱平均에 比例하게 된다.

③ 타이어의 垂直軸 둘레의 비틀림變形에 의한 補正

前述한 타이어 模型에서는 벨트가 垂直軸 둘레에서 비틀린다는 사실을 省略하였으나, 實際로는 (그림 8)에 나타나 있는 바와 같이



(그림 8) 타이어 body (벨트部)의 비틀림剛性(垂直軸 둘레)에 의한 補正...래디알 타이어

작은 슬립角 α (휠面)를 유지하면서 타이어가 轉動하고 있는 경우, 트레드部에 橫力 F_y 와 Self Aligning Torque M_z 가 發生하고, 이 Self Aligning Torque에 의하여 벨트 전체가 타이어面에 대하여 角 α' 만큼 비틀어진다.

이때 벨트의 中心面이 갖는 슬립角은 $\alpha - \alpha'$ 로 된다. 때문에 이와 같은 타이어에 發生하는 橫力과 Self Aligning Torque는

$$F_y = \frac{Cwl^2}{2} (\alpha - \alpha') \dots\dots\dots(3.13)$$

$$M_z = \frac{Cwl^3}{12} (\alpha - \alpha') \dots\dots\dots(3.14)$$

타이어 body, 즉 벨트의 垂直軸 둘레의 비틀림剛性을 G_{mz} 라고 하면, 비틀림角 α' 는 다음 式과 같이 된다.

$$\alpha' = M_z / G_{mz} \dots\dots\dots(3.15)$$

이 式을 사용하여 兩 Stiffness를 補正하면 다음과 같이 된다.

Cornering Stiffness K'_y

$$K'_y = \frac{Cwl^2}{2(1 + A_s/G_{mz})} \dots\dots\dots(3.16)$$

Aligning Stiffness A'_s

$$A'_s = \frac{Cwl^3}{12(1 + A_s/G_{mz})} \dots\dots\dots(3.17)$$

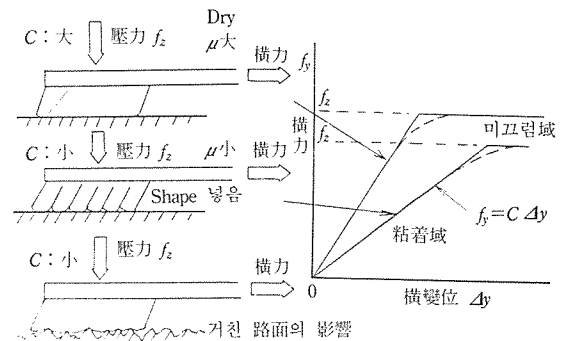
일반적인 래디알 타이어의 경우 上記한 補正은 10% 이하이며, 타이어 body의 비틀림剛性을 크게 하면 兩 Stiffness가 모두 커진다. 또한 타이어 body의 비틀림剛性은 타이어 카카스의 橫剛性에 比例하기 때문에 결국 타이어의 橫剛性을 크게 하면 兩 Stiffness가 모두 커진다는 사실을 보여주고 있으나 그 寄與度는 그리 크지 않다.

④ 타이어 패턴의 영향

(3.16) 및 (3.17) 式과 같이 兩 Stiffness는 트레드의 剪斷彈性定數 C 에 比例한다. 타이어 트레드의 고무 블럭을 생각하면 [그림 9]와 같이 되고, 고무 블럭에 Shaping을 넣으면 고무 블럭의 剪斷彈性定數 C 가 低下하여 兩 Stiffness도 低下한다.

트레드 고무가 딱딱한 경우, 트레드 고무가 얇은 경우 또는 트레드 고무가 磨耗된 경우에는 剪斷彈性定數가 커져서 兩 Stiffness도 모두 커진다.

平滑 드림面上에 비하여 [그림 9]에 나타나 있는 바와 같이 路面表面이 거칠 때 路面과 트레드 고무와의 接觸이 限定된 個數의 點 接觸이 되어 接觸部에서의 고무의 變形이 커지며, 剪斷彈性定數가 低下하여 兩 Stiffness가 모두 작아진다.



[그림 9] 트레드 패턴의 영향...트레드의 剪斷彈性定數의 영향

注意하여야 할 것은 Shaping을 너무 많이 넣으면 接地壓力(內壓)에 의하여 고무 블럭이 挫屈하여 橫變位에 대한 橫力의 上昇이 나빠지며, 微小角일 때 兩 Stiffness가 低下하고 車輛의 直進安定性을 惡化시키는 危險性이 있다. 때문에 타이어의 Wet Skid 對策으로서 Shaping에 의하기보다도 고무質의 改良에 의한 對策이 바람직하다.

(4) Cornering Power

① Cornering Power

Cornering Stiffness는 [그림 5]에서와 같이 슬립角 0(原點)에서의 Cornering Force의 上昇勾配이며, (3.16)式으로서도 알 수 있듯이 摩擦係數와는 관계가 없다.

그러나, 일반적으로 Cornering Stiffness를 求하는 것은 슬립角 1°에서의 Cornering Force를 求할 때가 많다. 따라서 여기에서는 兩者를 구별하여 슬립角 1°에서의 Cornering Force를 Cornering Power라고 부르기로 한다.

Cornering Power C_p 는 FIALA式의 2項까지를 取하여 나타내면 다음과 같이 된다.

$$C_p = K(1 - 0.0166 \frac{K}{\mu L}) \dots \dots \dots (3.18)$$

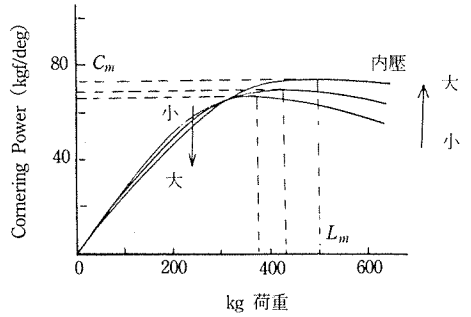
- K : Cornering Stiffness
- μ : 路面과 고무의 摩擦係數
- L : 荷重

여기에서 路面과 고무의 摩擦係數가 작아지면 그 영향이 커져서 Cornering Power가 작아짐을 알 수 있다.

② Cornering Power에 미치는 荷重, 内壓의 영향

Cornering Power의 荷重과 内壓에 의한 變化를 [그림 10]에 나타냈다. 여기에서 Cornering Power는 荷重이 작은 곳에서는 대체로 荷重에 比例하여 增加한다. 이는 荷重이 작은 곳에서는 接地길이의 제공과 荷重이 거의 比例하여 變化하는 데 따른 것으로 생각되어진다.

그러나, 荷重이 커지면 上記의 關係가 成立하지 않게 된다. 그것은 슬립角이 1°인 경우에도 接地길이가 커지면 미끄럼域이 增



實驗式: 스틸 래디알 타이어
 70%시리즈, flat路面上
 $C_p = 0.31293C_m L^{1.188} (2.7876L_m - L^2)$
 $C_m = 6.2924P^{0.8151}S^{1.2598}R^{0.6672}$
 $L_m = 0.21435P^{0.4884}S^{1.9768}R^{0.02752}$
 C_p : Cornering Power L : 荷重kg
 P : 内壓 kgf/cm² S : 타이어幅 (cm)
 R : 림徑 (cm)

[그림 10] Cornering Power에 미치는 内壓, 荷重의 영향

大된다는 것, 또 變形이 커지면 카카스의 橫彈力定數가 低下하고, 벨트의 구부림變形, 垂直軸 둘레의 비틀림變形 등이 커지게 됨에 따라 Cornering Power는 一定한 荷重에서 最大値로 되며, 그 이상의 荷重領域에서는 천천히 減少한다.

[그림 10]은 標準인 70시리즈 타이어의 flat面上에서의 Cornering Power의 内壓, 荷重에 의한 變化를 나타낸 것이다. 여기에서 Cornering Power가 最大로 되는 荷重 L_m 및 Cornering Power의 最大値 C_m 은 内壓이 增加함에 따라 커지지만 上昇勾配 A 는 内壓이 增加함에 따라 減少하는 것을 알 수 있다.

여기에서 중요한 점은 Cornering Power의 荷重에 의한 變化曲線이 内壓을 變化시켰을 경우에 交叉點이 存在한다고 하는 사실이다. 또 과거에는 바이어스 타이어가 荷重이 큰 곳에서 사용되는 일이 많았고, 内壓을 높이면 Cornering Power가 커지는 領域에서 사용되

는 일이 많았었다. 때문에 타이어 内壓의 前後 밸런스에 따라 自動車의 操縱安定性의 調整이 비교적 容易하였던 것으로 생각된다.

그러나, 最近의 傾向으로서는 조금 큰 래디알 타이어가 가벼운 荷重에서 사용되기 때문에 特性曲線이 交叉하는 荷重 가까이에서 사용되는 傾向이 있다. 이 경우 交叉하는 荷重의 어느쪽에 있는가, 즉 内壓에 의하여

Cornering Power가 增加하는가 또는 減少하는가를 잘 알아 둘 필요가 있다.

한편, 前述한 바와 같이 Cornering Power에는 接地길이가 가장 크게 關係되어 있기 때문에 flat 路面上인 경우 드럼상에서보다 接地길이가 길어지며, 曲線이 交叉하는 點이 荷重이 작은 쪽으로 기울어지므로 注意하지 않으면 안된다. 〈다음호에 계속〉

原 稿 募 集

「타이어·고무」지에 게재할
여러분의 원고를 기다립니다.
타이어공업 분야에 관련되는 내용의 원고를
다음의 요령에 의거 투고하여
주시기 바랍니다.

- 내 용 : 1. 경영, 경제, 무역, 기술에 관한 논문 및 리포트
2. 타이어 안전사용에 관한 체험기, 시·수필 등
- 원고매수 : 제한없음.
- 마 감 : 매월 5일을 원칙으로 하나 수시로 접수.
- 고 료 : 채택된 원고는 소정의 고료를 드립니다.
- 보 낼 곳 : 서울시 강남구 삼성동 159(무역회관 1910호)
대한타이어공업협회 회지과
- 문 의 처 : TEL 551-1904