

# 타이어工學(6)

—타이어의 動的特性—

白 南 哲\*

## 4. 制動·驅動特性, 制動·驅動時的 Cornering特性

### (2) 制動·驅動時的 Cornering特性

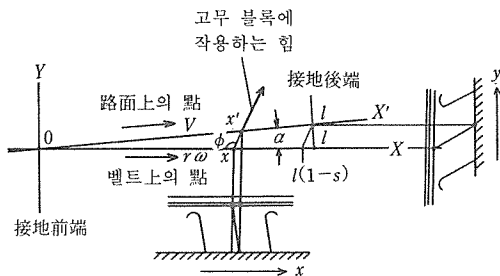
#### ③ 橫力에 미치는 制動·驅動力의 영향

橫力에 미치는 制動·驅動力의 영향으로서 슬립角 및 슬립比가 극히 작은 범위내에서 橫力에 미치는 制動力의 영향에 대하여 說明하고자 한다.

타이어로서는 벨트가 接地部内에서 줄어들지 않고, 橫曲變形 및 垂直軸 둘레의 비틀림變形이 발생하지 않게 된다. 이 타이어의 接地部를 타이어座標系에서 본 경우 [그림 21]에 나타난 바와 같이 路面이 速度  $V$ 로 이동하고, 벨트가 速度  $rw$ 로 이동하고 있어 兩者의 移動方向間의 角度가 슬립角  $\alpha$ 가 된다.

고무 블록이 接地面의 前端 0點에서 路面과 接觸하여  $t$ 時間後에 路面上的의 點이  $x'$ 만큼 움직이고 벨트上的의 點이  $x$ 만큼 進行하였다면 다음의 式이 성립된다.

$$\begin{cases} x' = Vt \\ x = rw t \end{cases} \dots\dots\dots (4.17)$$



(그림 21) 미끄럼時에 슬립比를 주어 制動力을 발생시킨 경우의 고무 블록의 變形과 발생하는 힘

여기에서 制動時에 대하여 고려하면  $V > rw$ 가 되며, 슬립比의 定義(4.4)式을 쓰면  $x$ 와  $x'$ 와의 관계는,

$$x/x' = 1-s \dots\dots\dots (4.18)$$

벨트上的의 點  $x$ 와 路面上的의 點  $x'$ 의 相對變位  $\Delta x$ 는 다음과 같이 된다.

$$\Delta x = \sqrt{x'^2 + x^2 - 2xx' \cos \alpha} \dots\dots (4.19)$$

이 式에 (4.18)式을 代入하면,

$$\Delta x = x' \sqrt{1 + (1+s)^2 - 2(1+s) \cos \alpha} \dots\dots (4.20)$$

相對變位의 方向, 즉 [그림 21]에서  $\phi$ 는,

$$\sin \phi = \frac{x'}{\Delta x} \sin \alpha \dots\dots\dots (4.21)$$

\*慶熙大學校 工科大學 教授

고무 블록과 路面과의 사이에 미끄럼이 발생하지 않는다면, 고무 블록의 變形量이 路面상의 點  $x'$ 와 벨트上的 點  $x$ 와의 相對變位에 同等하게 되는 데서 點  $x'$ 에 발생하는 橫應力  $f_y$ 와 周方向의 應力  $f_x$ 는 다음과 같이 된다. 다만 고무 블록의 橫彈性定數가 方向에 따라 變하지 않고 一定  $C$ 라고 한다.

$$\begin{cases} f_x = \Delta x C w \cos \phi \\ f_y = \Delta x C w \sin \phi \end{cases} \dots\dots\dots(4.22)$$

이 式에 (4.20), (4.21)式을 代入하면,

$$\begin{cases} f_x = C w x' (1+s-\cos \alpha) \\ f_y = C w x' \sin \alpha \end{cases} \dots\dots\dots(4.23)$$

미끄럼域은 없는 것으로 가정하고, 應力 分布를 3角形으로 하여 전체의 힘(面積)을 계산하면 다음과 같이 된다. 다만, 트레드가 接觸하고 있는 路面상의 길이  $l$ 은 변하지 않으나, 路面과 接觸하고 있는 트레드 블록의 間隔은 路面 移動에 따라 伸張되고 있으며, 고무 블록  $l$ 이  $s$ 에 있어서의 실제 接觸 길이는  $l(1-s)$ 가 되는 데서,

$$\begin{cases} F_x = \frac{Cwl^2}{2} (1-s)(1+s-\cos \alpha) \\ F_y = \frac{Cwl^2}{2} (1-s) \sin \alpha \end{cases} \dots\dots\dots(4.24)$$

여기에서  $\alpha$ 가 一定한 경우  $s=0$ 에서의 橫力의 制動力에 의한 變化率은,

$$\left(\frac{dF_y}{dF_x}\right)_{s=0} = -\tan \alpha \dots\dots\dots(4.25)$$

이와 같이 變化率은 슬립角에 비례하기 때문에 같은 橫力을 발생시킨 경우, Cornering Stiffness를 크게 하면 制動力에 의한 變化率을 작게 할 수 있다.

트레드 고무 블록의 單位面積當 橫彈性定

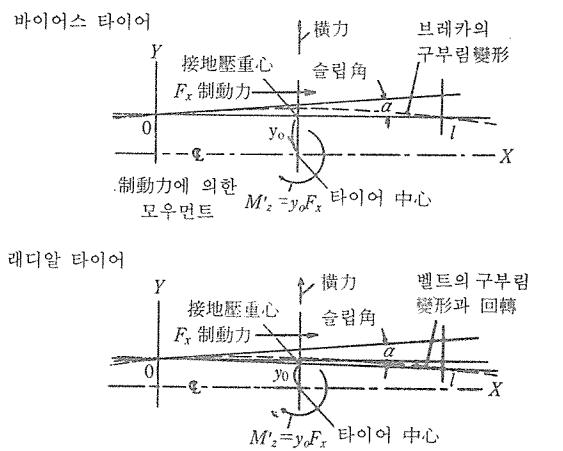
數가 方向에 따라 다른 경우 各各의 彈性定數를  $C_x, C_y$ 라고 하면 다음 式이 成立된다.

$$\begin{cases} F_x = \frac{C_x w l^2}{2} (1-s)(1+s-\cos \alpha) \\ F_y = \frac{C_y w l^2}{2} (1-s) \sin \alpha \end{cases} \dots\dots\dots(4.26)$$

이것으로부터 다음 式이 求하여지며, 比  $C_y/C_x$ 를 작게 하면 橫力에 미치는 制動力의 影響을 작게 할 수 있다.

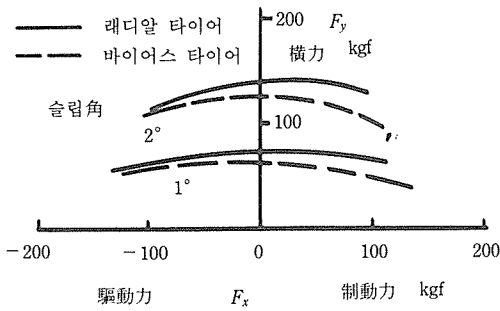
$$\left(\frac{dF_y}{dF_x}\right)_{s=0} = \frac{C_y}{C_x} \tan \alpha \dots\dots\dots(4.27)$$

이상의 타이어模型은 벨트의 橫曲變形이나 垂直軸 둘레의 비틀림變形을 무시한 경우인데, 바이어스 타이어의 경우에는 [그림 22]에 나타난 바와 같이 벨트의 橫曲變形이나, [그림 16]에 나타난 바와 같이 接地部內에서의 周方向의 收縮이 발생하고 있기 때문에



[그림 22] 타이어 接地部의 變形과 발생하는 모멘트

다소 다른 특성을 보인다. 그러나, [그림 23]에 나타난 바와 같이 制動力의 增加에 따라 橫力이 減少하는 主原因은 制動力에 의하여 接地域(粘着域)이 減少하는 데 따른 것으로 생각된다.

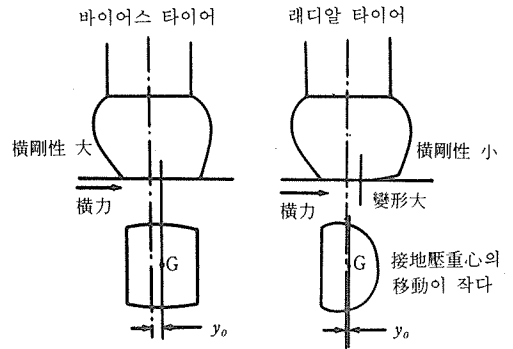


〔그림 23〕 横力の 制動・駆動力에 의한 變化

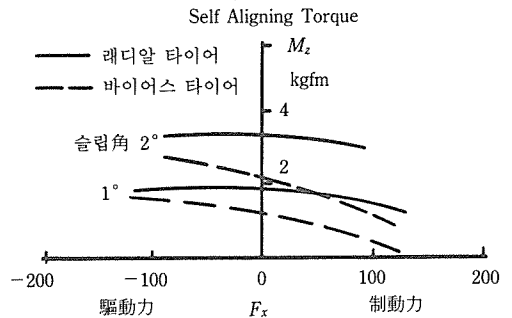
래디알 타이어의 경우에는 벨트의 横曲變形은 무시할 수 있을만큼 작는데, [그림 22]에 나타난 바와 같이 制動力이 加하여지면 [制動力]×[接地壓重心의 横移動量  $y_0$ ] 만큼의 垂直軸 둘레의 Torque, 즉 負의 Self Aligning Torque가 加算된다. 이 Torque에 의하여 벨트 전체가 垂直軸 둘레에 비틀려져 벨트部가 갖고 있는 슬립角을 증가시키고, 이것에 의하여 横力이 증가한다. 이 增加分이 (4.17) 式에 나타난 横力の 減少分(래디알 타이어에서는 값 그 자체가 작다)을 相殺하므로 全體로서 래디알 타이어의 경우에는 [그림 23]에 나타난 바와 같이 制動力에 의한 動力의 變化가 작아지는 것으로 생각된다.

또한 래디알 타이어에서는 일반적으로 바이어스 타이어에 비하여 横剛性이 작기 때문에 横力에 의한 벨트의 横移動量은 커진다. 그러나, 横力에 의하여 트레드의 片側이 浮上하기 때문에 [그림 24]에 나타나 있는 바와 같이 接地形狀이 變化하고 横力에 의한 接地壓重心의 横移動量  $y_0$ 는 작아진다. 그러므로, [그림 25]에 나타난 바와 같이 制動力에 의한 Self Aligning Torque의 變化率은 작아진다. 더우기 이 接地壓重心의 横移動量에는 다시 트레드의 斷面曲率半徑이 關係한다.

이와 같이 타이어의 制動・駆動時의 Cornering特性에는 여러가지 要因이 관련되어



〔그림 24〕 横力에 의한 接地面形狀의 變化

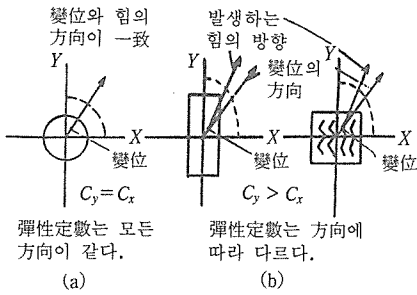


〔그림 25〕 Self Aligning Torque의 制動・駆動力에 의한 變化

있는 데다가 트레드 패턴을 형성하고 있는 고무 블록의 形狀의 영향도 크기 때문에 다음에 이들에 대하여 說明하려고 한다.

#### ④ 고무 블록形狀의 영향

트레드 고무 블록의 横彈性定數가 어느 方向에 대해서도 一定하다는 條件을 滿足하는 形狀의 하나로 [그림 26]의 (a)에 나타난 바와 같이 圓形의 블록이 있다. 이것에 대하여 [그림 26]의 (b)에 나타난 바와 같은 직사각형의 경우 블록의 中心을 單位길이만큼 變位시키는 데 要하는 힘, 즉 横彈性定數는 직사각형의 長軸方向에 대하여 커지고, 短軸方向에 대하여 작아지며, 長軸과 短軸 사이의 方向에 대해서는 [그림 26]의 (b)에 나타난 바와 같이 發生하는 힘의 方向이 變

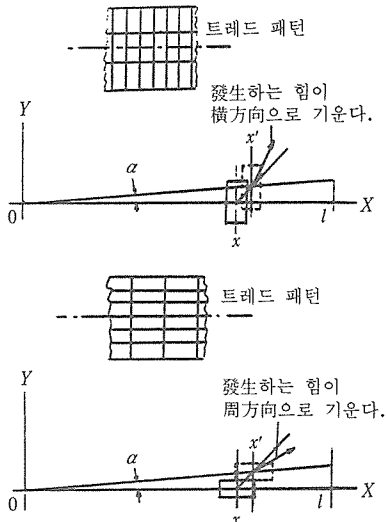


(그림 26) 고무 블록 形狀에 의한 變位와 힘의 方向의 關係

位의 方向과 일치하지 않고 長軸方向으로 기울어진다.

이들의 關係를  $C_x, C_y$ 를 써서 간단하게 나타내기는 곤란하기 때문에 여기에서는 省略하고 定性的인 것에 대하여 記述하기로 한다.

(그림 27)의 윗 부분에 나타난 바와 같이 가늘고 긴 블록이 橫方向으로 나란한 패턴의 경우 制動時에 대하여 생각하면 고무 블록의 中心이 點  $x$ 에서 點  $x'$ 까지 變形한다. 이때 路面에서 고무 블록에 작용하고 있는 힘은 變位方向과 일치하지 않고 橫方向으로 기울



(그림 27) Cornering 制動時에 고무 블록에 발생하는 힘의 形狀에 의한 變化

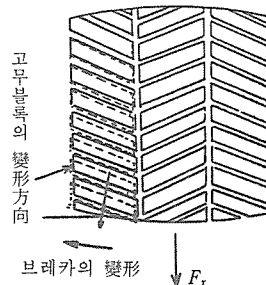
어진다. 이 영향은 制動力에 의하여 橫力이 增加하는 경우 그 경향을 增加시키는 方向으로, 또 橫力이 減少하는 경우에는 그 경향을 減少시키는 方向으로 작용한다.

(그림 27)의 아랫 부분에 나타난 바와 같이 가늘고 긴 고무 블록이 周方向으로 나란한 패턴의 경우 制動時에 대하여 생각하면 고무 블록의 中心이 點  $x$ 에서 點  $x'$ 까지 變形한다. 이때 路面에서 고무 블록에 작용하고 있는 힘은 變位方向과 일치하지 않고 周方向으로 기울어진다. 이 경우의 영향은 前述한 것과는 반대의 方向으로 작용한다.

⑤ 制動·驅動時에 패턴의 非對稱性에 의하여 발생하는 힘

패턴이 左右 非對稱인 타이어의 경우 슬립角  $\theta$ 에서 轉動하고 있을 때 制動·驅動力이 작용하면 橫力이나 Self Aligning Torque가 발생하기도 하므로 이것에 대하여 說明한다.

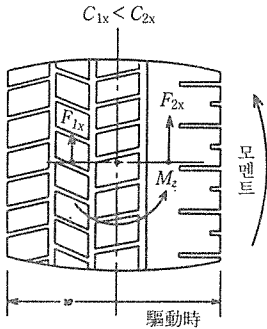
일반적으로 타이어의 트레드 패턴은 兩面 같은 金型을 써서 加黃시키기 때문에 左右가 點對稱인 것이 많고, 左右가 완전히 軸對稱인 것은 적다. 또 左右가 완전히 軸對稱일지라도 타이어에 캠버角이 붙으면 接地部內에서의 對稱性이 망가지는 경우가 있다. 따라서 (그림 28)에 나타난 바와 같이 가늘고 긴 블록이 경사지게 세 줄로 配列된 接地部에 대하여 생각하여 보자. 이 경우 左側과 中



(그림 28) 패턴의 非對稱性에 의한 驅動·制動時에 발생하는 모멘트

央의 2列은 서로 相殺하기로 하고 左側列에 注目하자. 타이어에 驅動力이 가해져 벨트가 그림의 아랫쪽으로 끌린다고 하면 고무 블록은 變形하기 쉬운 短軸方向으로 變形하고, 이로 인해 벨트 전체가 接地面前端을 中心으로 하여 왼쪽 방향으로 회전하며, 이에 따라 트레드가 오른쪽 방향으로 進行하여 橫力과 Aligning Torque를 발생시킨다.

다음에 (그림 29)에서와 같이 非對稱 패



(그림 29) 非對稱 패턴 타이어에 발생하는 驅動時的 모멘트

턴을 생각, 왼쪽 半分の 트레드의 周方向 橫彈性定數를  $C_{x1}$ , 오른쪽 半分の 橫彈性定數를  $C_{x2}$ 라고 하면 슬립  $s$ 에서 制動 또는 驅動하고 있을 때, 왼쪽 半分に 발생하는 힘  $F_{x1}$ 은 (4.9)式으로부터,

$$F_{x1} = C_{x1} w l^2 s / 4 \dots\dots\dots(4.28)$$

오른쪽 半分に 발생하는 힘  $F_{x2}$ 는

$$F_{x2} = C_{x2} w l^2 s / 4 \dots\dots\dots(4.29)$$

이것으로부터 타이어의 周方向의 橫彈性定數가 큰쪽이 빨리 進行하려고 하여 타이어의 中心을 지나는 垂直軸 둘레에 다음과 같은 모멘트를 발생시킨다.

$$M_z = \frac{w}{2} (F_{x1} - F_{x2}) \dots\dots\dots(4.30)$$

이에 따라 벨트가 垂直軸 둘레에서 비틀려 벨트에 슬립角이 붙음에 따라 橫力이 발생한다. 그러나, 이와 같은 單體에서는 非對稱性을 갖는 타이어일지라도 車輛의 左右에 對稱으로 붙여 사용하면 전체적으로는 相殺할 수 있기 때문에 별로 問題되지 않는다.

⑥ Cornering Force에 미치는 牽引力의 영향  
前述한 바와 같이 橫力  $F_y$ 에 미치는 制動·驅動力  $F_x$ 의 영향은 슬립角 및 슬립비가 작은 곳에서는 (4.25)式으로부터 일반적으로 다음式과 같이 나타내어진다.

$$F_y \approx K_y \alpha + a \alpha F_x \dots\dots\dots(4.31)$$

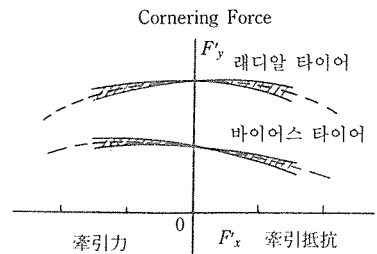
여기에서  $a$ 는 작은 定數이며, 바이어스 타이어의 경우  $a < 0$ , 래디알 타이어의 경우  $a > 0$ 로 되는 일이 많다.

이 式을 (4.15)式에 代入하면 Cornering Force  $F'_y$ 와 牽引力  $F'_x$ 의 關係式이 얻어진다.

$$F'_y \approx K_y \alpha + (a-1) \alpha F'_x \dots\dots\dots(4.32)$$

바이어스 타이어의 경우  $a < 0$ 이고  $(a-1) < 1$ 이 되므로 牽引力( $F'_x > 0$ )에 의하여 Cornering Force ( $F'_y > 0$ )가 증가한다. 이 增加比率은 (4.31)式에 나타난 驅動力( $F_x < 0$ )에 의한 橫力( $F_y > 0$ )의 增加比率보다도 커진다.

래디알 타이어의 경우  $a > 0$ 이며,  $(a-1)$ 의 값은 작고, 牽引力( $F'_x < 0$ ), 牽引抵抗( $F'_x >$

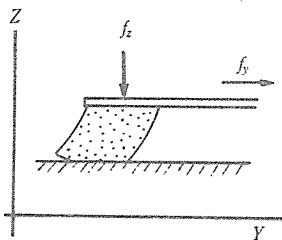


(그림 30) Cornering Force에 미치는 牽引力·牽引抵抗의 영향의 일반적 傾向

0)의 영향이 작으며, 前述한 原因에 따라 增減의 傾向이 미묘하게 變化하는 領域이 있다(그림 30 참조).

5. 고무 블록의 摩擦模型

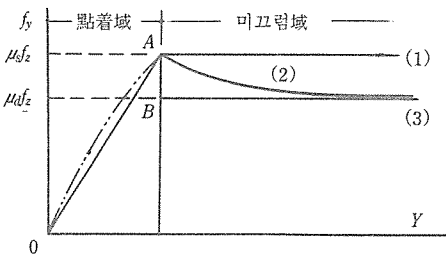
타이어 트레드부의 고무는 블록으로 나누어져 있으며, 벨트에 接着되어 있다. 그리하여 [그림 31]에 나타난 바와 같은 고무 블록을 생각했다. 고무 블록의 垂直力  $f_z$ 와 橫力  $f$ 가 작용한 경우 고무 블록은 橫力에 따라 變形한다. 이 고무 블록의 橫彈性定數를  $C$ 라고 한다.



(그림 31) 고무 블록의 變形

다음에 고무 블록의 最大摩擦係數를  $\mu_s$ , 미끄럼摩擦係數를  $\mu_d$ 라고 하고, 이들은 接地壓力과 미끄럼 速度에 따라 變化하지 않는다고 한다.

그리고 고무 블록의 베이스를 速度  $V$ 로 잡아당겼을 때 橫力  $f$ 의 變化는 [그림 32]에 나타난 바와 같이 最初, 直線  $OA$ 에 따라서 增加하고, 最大摩擦力  $\mu_s f_z$ 에 이르면 고무



(그림 32) 고무 블록의 摩擦模型

블록 表面이 미끄러지기 시작하여 摩擦力은 미끄럼摩擦係數  $\mu_d f_z$ 에 점차 접근한다. 이 變化를 다음의 數式模型으로 나타낸다.

粘着域  $0 \leq x \leq \mu_s f_z / C$ 에서는

$$f = Cx \dots\dots\dots(5.1)$$

미끄럼域  $x \geq \mu_s f_z / C$ 에서는

$$f_y = [\mu_d + (\mu_s - \mu_d) \exp \{ \varepsilon (\mu_s f_z / C - x) \}] f_z \dots\dots\dots(5.2)$$

이 摩擦模型은 다음의 세 가지 상태로 나누어진다.

- (1)  $\mu_s = \mu_d$  일 때
- (2)  $\varepsilon$ 이 有限일 때
- (3)  $\mu_s$ 에서  $\mu_d$ 로 急激히 變化하는 경우  $\varepsilon \rightarrow \infty$

더우기 고무 블록의 形狀에 따라서는 발생하는 應力이 [그림 32]에서 보듯이 2點破線과 같이 非線形的으로 增加하는 경우도 있으나, 이에 대해서는 별도로 檢討하기로 한다.

다음에 미끄럼摩擦係數에 대해서는 速度에 따라 變化하는 것으로 하여 다음의 近似式으로 나타낸다.

$$\mu_d = \mu_0 - a V' \dots\dots\dots(5.3)$$

또는

$$\mu_d = \mu_0 \exp(-a V') \dots\dots\dots(5.4)$$

$V'$ : 미끄럼速度  $a$ : 定數

이 模型의 特徵은 低速 미끄럼을 무시하고 있으며, 콘크리트나 아스팔트와 같은 거친 表面을 갖고 있는 路面上에서의 고무의 摩擦係數는 接地壓力에 따라 그다지 變化하지 않는다는 데서 摩擦係數가 接地壓力에 따르지 않고 일정하다고 假定하고 있는 것이다.

(다음 號에 계속)