

타이어와 노면의 마찰특성

이 창 식*

1. 서 언

자동차의 타이어는 자동차의 중량을 지지 하면서 주행하는 바퀴로서 제동성능, 현가성능, 조향성능 및 승차감에 영향을 미치는 가장 중요한 기능을 갖는다.

타이어의 구조와 노면마찰과의 관계는 타이어의 설계, 용도, 타이어 고무의 재질, 기후조건과 노면의 상태에 따라서 크게 달라진다. 같은 노면이라 해도 비나 눈이 내린 경우에는 마찰특성은 건조한 노면과 비교할 때 매우 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

그러므로 여기서 타이어의 발달과 내구성, 타이어의 마찰기구, 마찰계수, 노면상태와 마찰계수의 변화, 하이드로플레닝 현상과 마찰과의 관계 등 마찰현상에 대한 개요에 대하여 알아보기로 한다.

2. 타이어의 발달과 각부 구조

2.1 타이어의 발달과 내구성

공기타이어(Pneumatic tire)의 원형이 되는 것은 1845년 스코틀랜드의 톰슨(R. W. Thomson)에 의하여 발명되어 특허출원된 후 1888년 던롭(J. B. Dunlop, 스코틀랜드 사람)이 많은 개량을 하여 실용에 가까운 것을 제작하는 데 성공하였다⁽¹⁾. 따라서 실용에 가까운 타이어의 제작은 지금부터 약 100년전의 일이다. 그러나 그 당시 이것은 카카스에 사용한 코드재료의 마찰 접촉변형에 의하여

단기간에 손상되어 내구성이 나쁜 것이었다. 그 후 1915년에 내구성이 개선된 바이어스 구조의 것을 만들어 내구성이 크게 향상되기에 이르렀다.

한편 사용재료면에서도 지금까지 사용하던 목면을 약품처리하여 섬유화한 강력한 레용(인조견사)을 사용하여 내구성이 현저하게 개선되었다. 그 후 코드로서 나일론, 테트론, 스틸와이어 등을 사용하게 되었고 최근에는 내구성이 매우 향상된 재료의 것이 사용되기에 이르렀다. 또한 고무도 천연고무 대신 각종 합성고무가 개발되어 이용하게 되었고, 보강재나 고무의 성질을 개량하는 약품류의 개발, 생산기술의 향상에 힘입어 타이어의 내구성을 비롯한 안전성, 승차감 등 각종 성능의 향상에 많은 발전을 가져오게 되었다.

현재 보급되고 있는 래디알 구조의 타이어는 영국에서 1913년 특허출원되었으나 당시에는 실용화되지 못하였다.

그러나 1946년 프랑스의 미쉐린사가 스틸벨트(브레이커)가 있는 래디알 타이어의 특허를 출원하고 그 다음해에 실용화에 성공하여 1965년 프랑스시장의 70%를 차지하게 되었다.

1945년에는 이탈리아의 피렐리가 섬유브레이커를 갖는 래디알 타이어의 특허를 출원하여 실용화에 성공하였다. 그러나 그후 많은 개선을 거듭하여 현재에는 내마멸성이 좋은 스틸벨트를 갖는 래디알 타이어가 주류를 이루게 되었다.

* 한양대학교 기계공학부 교수

바이어스 타이어에서 래디알 타이어로 옮겨지는 과정은 유럽으로부터 미국, 일본 등을 거쳐 대부분의 경우 승용차의 80% 이상이 래디알화하고 있다.

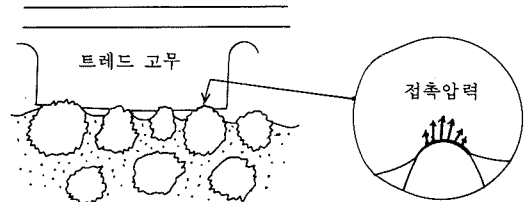
이러한 동향은 승차감을 제외한 다른 성능, 즉 내구성, 내마멸성, 내발열성, 조종성, 전동저항 등이 바이어스 타이어에 비하여 매우 우수하다. 그러나 최대의 결점은 승차감이 나쁜 점인데 이것은 서스펜션 개선에 의하여 충분히 커버될 수 있는 것으로 생각된다.

바이어스 타이어는 카카스 내의 각 코드각 주위에 국부적으로 있기 때문에 휨에 의한 변형도 국부적으로 일어난다. 따라서 노면에 돌기를 접할 경우 돌기에 의하여 하중이 증가하지 않는 특성이 래디알 타이어에 비하여 크고 승차감이 좋다. 그러나 반대로 하중에 의한 변형에 의하여 각 플라이 사이에 큰 마멸이 수반되어 발열 및 구름저항이 커진다. 또한 곡면상의 타이어 카카스의 일부가 노면과 접촉하면 접지면 내의 카카스에 수축이 일어나고 이것이 트레드면과 노면 사이 및 가로방향의 마찰력이 생긴다.

래디알 타이어는 장력이 큰 브레이크(벨트)가 있으므로 노면의 돌기를 접할 때의 특성이 바이어스 타이어보다 나쁘나 고속에서 스탠딩 웨이브(standing wave)의 발생이 적다. 또 벨트가 대단히 굳고 단단하여 내마멸성이 우수하고 수명을 길게 할 수 있다. 또한 브레이크 강성이 크고 강인하므로 못에 찔렸을 때의 평처(puncture) 발생이 적은 특징이 있다.

2.2 타이어와 노면마찰

도로표면에 [그림 1]과 같은 골재에 의한 요철이 있고, 이 요철을 확대하여 나타내면 곡률반지름이 매우 작은 100분의 수 μ 론의 마이크로 요철과 수 mm까지의 매크로적 요철이 있다. 이와 같이 노면이 고무에 접촉하



[그림 1] 노면의 골재와 트레드 고무의 접촉

고 있는 경우 고무는 극히 연하므로 미세 요철(마이크로 요철)은 노면과 접촉하는 실제 접촉면이 되며 이 부분에서 발생하는 마찰력은 점착마찰력 μ_a 와 미끄럼시 돌기에 의하여 일어나는 변형이 이동할 때 생기는 히스테리시스 로스(hysteresis loss)에 따른 변형손실 마찰력 μ_h 가 작용한다.

노면이 젖어 있으면 물의 막이 접촉부에 존재하여 접촉압력이 높은 곳에서는 물의 막(水膜)이 파손되어 참접촉면적이 유지되나 μ_a 는 감소한다.

교통량이 많은 도로와 같이 골재표면이 닳아서 미세한 요철이 없어지면 국부적인 접지면적이 커지지만 접지압이 감소하여 수막이 파괴되기 어려우므로 μ_a 는 작아진다.

이러한 관점에서 노면의 골재는 마멸되기 어려운 것을 사용하는 것이 이상적이다.

매크로적 요철은 강우량이 적은 경우 타이어에 접하는 노면돌출부가 물에 젖음을 적게 하여 마찰계수 저하를 적게 한다. 또한 노면 골재 위 2~3mm의 수막이 있는 경우 타이어 트레드 고무에 의하여 압축된 물이 배출되므로 마찰계수 저하는 적어진다. 이것은 트레드 패턴의 배수작용에 기인하는 것이다.

2.3 타이어의 슬립비와 미끄럼마찰계수

(1) 슬립비의 정의

타이어 트레드 베이스의 접지역내에서 평균속도를 V_B , 노면의 속도를 V_R 이라 할 때 슬립비는 다음 식으로 표시된다.

구동 슬립비 S_d

$$\text{제동시 } S_d = \frac{V_R - V_B \cos \alpha}{V_R} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{구동시 } S_d = \frac{V_R - V_B \cos \alpha}{V_B \cos \alpha} \dots\dots\dots (2)$$

표준 슬립비

$$\text{제동시 } S_d = \frac{V_R - V_B}{V_R} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{구동시 } S_d = \frac{V_R - V_B}{V_B} \dots\dots\dots (4)$$

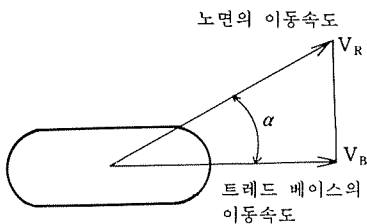
제동 슬립비

$$\text{제동시 } S_d = \frac{V_R \cos \alpha - V_B}{V_R \cos \alpha} \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{구동시 } S_d = \frac{V_R \cos \alpha - V_B}{V_B} \dots\dots\dots (6)$$

슬립비를 나타내는 위의 식을 설명하기 위하여 (그림 2)와 같은 노면과 트레드 베이스 속도에 대하여 알아보기로 한다.

타이어가 노면 위를 전동할 때 슬립이 없으면 $\alpha=0$ 이 되고, 슬립각 α 가 증가하면 타이어 회전속도는 저하하고, 유효전동반지름은 증가한다.



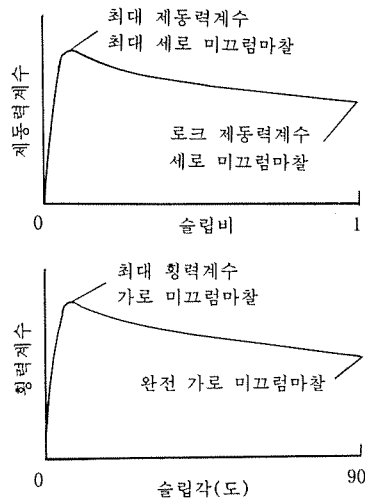
(그림 2) 노면과 타이어의 트레드 베이스 속도

(2) 미끄럼마찰계수

자동차의 제동력은 슬립비 10% 정도에서 최대로 되는데 이것은 최대 제동력이라 한다. 완전 로크시 슬립비 1일 때의 제동력은 최대 제동력보다 낮아진다. 이 때의 제동력을 로크 제동력이라 한다. 이 최대 제동력을 하중으로

나누는 것을 최대 제동력계수 또는 세로 미끄럼 최대 마찰계수라 하고, 로크 제동마찰력을 하중으로 나누는 것을 로크 제동력계수 혹은 단순히 세로 미끄럼계수 또는 간단히 미끄럼 마찰계수라 한다. 표준타이어를 사용하여 측정한 노면의 세로 미끄럼마찰계수(속도 64km/h)를 100배한 것을 스키드 레지스턴스 넘버라 한다.

또 코너링 특성을 보면 가로방향 힘은 슬립각이 10%일 때 최대가 되는데 이것을 최대 횡력이라고 한다.



(그림 3) 타이어의 마찰

2.4 도로의 표면의 마찰계수

마찰계수는 자동차의 주행성능, 타이어 마멸, 주행성능에 영향을 미치는 중요한 인자의 하나이다. <표 1>은 노면상태와 미끄럼마찰계수와의 관계를 나타낸 것이다.

일반적으로 타이어와 노면 사이의 마찰력은 다음의 세 가지로 나누어 생각할 수 있다.

- ① 점착마찰, 응착마찰;트레드 표면과 노면과의 직접 접촉에 의한 마찰력
- ② 히스테리시스 마찰;타이어의 미끄럼에 의하여 생기는 히스테리시스 마찰력

[표 1] 노면상태와 미끄럼마찰계수⁽²⁾

노면의 종류	마찰계수의 범위	
	건조노면	젖은노면
콘크리트 포장	1.0~0.5	0.9~0.4
아스팔트 포장	1.0~0.5	0.9~0.3
자갈길	0.6~0.4	-
강판	0.8~0.4	0.5~0.2
적설노면	-	0.5~0.2
얼음노면	-	0.2~0.1

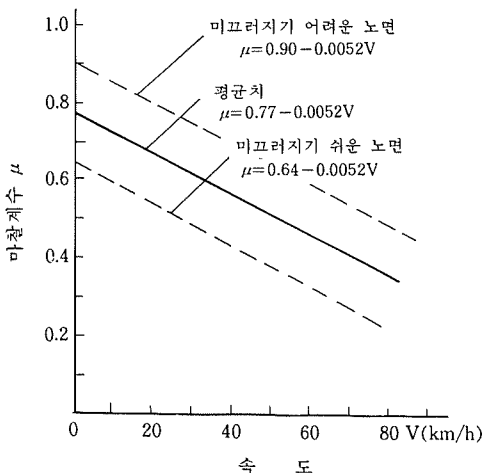
③ 타이어 패턴과 노면의 물림에 의한 마찰력

일반적으로 젖은노면의 마찰계수 μ 는 다음 식으로 표시된다.

$$\mu = \mu_0 - aV \dots\dots\dots (7)$$

여기서 a 는 정수로서 $a=0.0052$, V 는 속도(km/h), μ_0 의 값은 미끄러지기 쉬운 노면에서는 0.64이고, 미끄러지기 어려운 노면에서는 0.90, 평균적인 노면에서는 0.77정도이다. 한편 [그림 4]는 젖은 아스팔트 노면의 마찰계수의 속도에 따른 변화를 도시한 것이다.

또한 건조한 노면의 경우에는 속도변화가 적으므로 $a \approx 0.001$ 정도이고, 모래나 먼지 등의 영향에 따라 μ_0 의 값은 약 10% 정도 작아진다.



[그림 4] 젖은 아스팔트 노면의 마찰계수

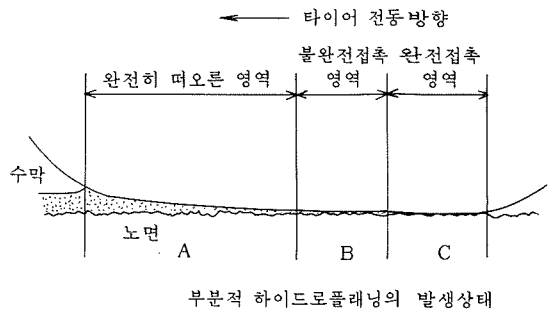
2.5 하이드로플래닝에 의한 미끄럼 현상

비가 와서 노면에 물의 막이 낀 노면 위를 타이어가 고속으로 질주하면 타이어는 유체역학적 압력에 의하여 떠오르게 되는데 이러한 현상을 하이드로플래닝이라고 한다.

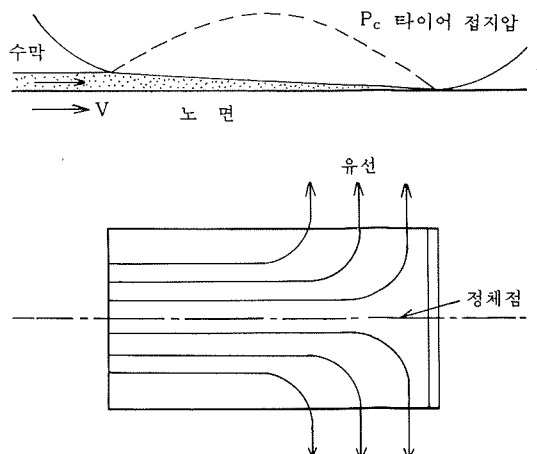
[그림 5]는 하이드로플래닝이 발생하기 직전의 상태를 나타낸 것이다.

[그림 5]의 제일 위의 그림은 하이드로플래닝이 일어나고 있는 상태를 나타낸 것이다. A구역은 노면의 앞부분으로 타이어가 완전히 떠오른 상태이고, B구역은 불완전 접촉된 상태이며, C구역은 완전히 접촉하고 있는 상태이다. [그림 5]의 가운데 그림은 하이드로플래닝이 발생하기 직전의 그림으로 후단 부분이 접촉하고 있는 상태를 나타낸 것이다.

타이어측에 고정된 좌표로부터 보면 노면



부분적 하이드로플래닝의 발생상태



[그림 5] 하이드로플래닝 발생 직전의 상태

과 수막이 오른쪽으로 고속도 V로 나가고, 수막이 썩기모양으로 되어 노면내로 침입하는 결과가 된다. 따라서 앞쪽으로부터 침입한 물이 그림과 같이 타이어의 옆쪽으로 유출하고 노면의 중심선상에 정체를 하는 점이 생긴다. 이와 같이 물이 머물러 있는 점의 동압 P_f 는 베르누이 정리에 의하여

$$P_f = \frac{1}{2} \rho V^2 \dots\dots\dots (8)$$

가 된다. 타이어 노면과 접지압분포는 포물선형이 되고, 중앙부가 가장 높고, 그 압력을 P_c 라 하면 이것은 타이어 내압의 1.55배 정도이다.

$$P_c = 1.55P_a \dots\dots\dots (9)$$

접지압력이 가장 높은 중심부의 압력보다도 유체압력(물의 압력)이 크게 되면 타이어는 완전히 물 위에 뜨게 되어 하이드로플레닝이 발생하게 된다. 따라서 완전 하이드로플레닝의 발생속도 $V_{km/h}$ 는 다음 식으로 표시된다.

$$\frac{1}{2} \rho V^2 \geq 1.55P_a \dots\dots\dots (10)$$

따라서

$$V \geq 63\sqrt{P_a} \text{ km/h} \dots\dots\dots (11)$$

여기서 P_a 는 kgf/cm^2 로서 물의 동압이다.

하이드로플레닝 발생속도에 영향을 미치는 주된 인자는 속도, 수막두께, 노면의 거칠기, 트레드의 깊이, 타이어 공기압, 접지압력분포, 트레드 패턴 등이다.

2.6 하이드로플레닝이 제동특성 및 코너링 특성에 미치는 영향

(1) 제동특성에 미치는 영향

노면에 수막이 형성되어 수막의 두께가 두꺼워지면 제동력성능, 마찰특성이 급격히 저하하여 제동불능의 상태로 되므로 매우 위험한 주행상태로 된다. 특히, 수막의 두께가 증가할수록 제동력계수는 현저하게 저하하며,

속도가 빨라질수록 제동력성능이 급격히 저하함을 알 수 있다.

이뿐만 아니라 타이어의 최대 제동력계수 및 로크 제동력계수는 타이어의 내압의 영향도 큰 것으로 지적되고 있다. 즉, 내압이 저하하면 제동력계수도 저하하는 특성을 갖는다.

(2) 코너링 특성에 미치는 영향

코너링 포스와 슬립각의 관계를 살펴보면 주행속도가 증가할수록 코너링 포스의 최대치는 저하하는 경향을 가지며, 가로 미끄럼마찰계수도 저하한다.

또한 수막의 두께가 두꺼울수록 코너링 포스는 급속히 저하하는 현상을 나타낸다.

하이드로플레닝의 발생속도는 식 (11)에서 살펴본 바와 같이 하이드로플레닝 발생속도는 $V = 63\sqrt{P_a}$ 로 표시되므로 타이어 내압의 1/2승에 비례한다.

3. 결 언

지금까지 주로 타이어의 내구성과 노면마찰특성, 하이드로플레닝과 마찰현상에 대하여 다루었다. 마찰력은 타이어와 노면 사이의 관계에 따라서 다르므로 타이어의 설계 및 노면 표면상태 등에 대한 충분한 지식을 갖추고 있어야 한다. 그러므로 좀더 자세한 마찰현상에 대하여 알아보기 위하여는 관련 문헌^{(3)~(5)}의 내용을 참고로 하는 것이 필요할 것으로 생각된다.

[참 고 문 헌]

1. 馬庭孝司：自動車用タイヤの知識と特性， PP. 17~18, 1979, 山海堂.
2. 京極正明·馬庭孝司：“高性能タイヤの研究”， P. 32 1983, 山海堂
3. 桑門主一 외 4인：“自動車”， PP. 201~202, 1990, 朝倉書店
4. 景山克三·景山一郎：“自動車の力學” PP. 2~62, 1991, 理工圖書
5. 酒井秀男：“タイヤ工學” PP. 263~276, 1990, グランプリ出版