

자동차 타이어와 브레이크의 성능

이 창 식*

1. 머리말

타이어는 자동차의 하중을 지지하고, 구동력·제동력을 노면에 전달하며 노면으로부터 받는 충격의 완화와 조향방향을 바꾸어주는 주요부이다.

한편 브레이크는 물체의 운동을 정지시키거나 감소시키는 장치를 말한다. 자동차와 같이 움직이는 물체를 어느 위치에 멈추도록 하기 위해서는 차를 정지위치에 고정시켜 둘 수 있는 제동장치(制動裝置, brake system)가 필요하게 된다. 특히, 자동차는 승객이나 화물을 원하는 곳까지 수송하는 기계이므로 안전주행 측면에서 그 중요성은 우리가 잘 알고 있는 사실이다. 그러므로 여기서 자동차의 제동장치의 성능과 타이어의 마찰 특성을 관련시켜 그 기본적인 사항에 대하여 기술하기로 한다.

2. 타이어의 기본 성능과 브레이크

2.1 자동차의 전동저항

자동차의 주행저항에는 타이어의 전동저

항, 기관 및 구동계의 회전저항, 공기저항, 등판저항, 가속저항 등이 작용한다. 이들 가운데서 타이어에 직접 작용하는 것은 전동저항, 공기저항, 가속저항이다.

타이어가 회전하면서 주행할 때의 공기저항은 일반 주행에서는 작은 값이나 레이싱 주행 등에는 더욱 중요한 인자가 된다.

타이어의 전동저항에는 다음과 같이 3가지를 생각할 수 있다.

- ① 타이어의 변형저항
- ② 타이어와 노면 사이의 마찰저항
- ③ 노면저항

타이어의 변형을 작게 하기 위한 방법은 공기압을 높이는 것이 가장 간단한 방법이다.

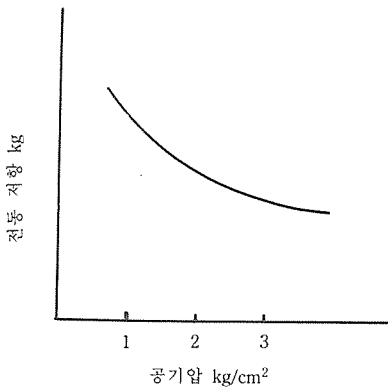
일반적으로 공기압을 1.7 kg/cm^2 에서 2.0 kg/cm^2 로 20% 증가시키면 전동저항은 약 10% 감소한다. 실제로 연료 소비에는 약 10~20%의 효과가 있다.

그러므로 공기압을 적정으로 유지하는 것은 조종성, 안정성뿐만 아니라 경제성 향상에도 매우 중요한 인자임을 알 수 있다.

[그림 1]은 타이어의 공기압과 전동저항과의 관계를 나타낸 것이다.

이와 같이 타이어의 변형의 신축이 되풀이

*한양대학교 공과대학 기계공학과 교수



(그림 1) 전동저항과 공기압

되면서 타이어와 지면이 접촉하므로 타이어는 발열(發熱)되어 타이어의 손상을 일으킨다.

타이어의 하중이 커질수록 또 공기압이 낮을수록 타이어의 변형은 커져서 열의 발생은 증가한다.

일반적으로 열의 발생은 타이어 변형의 제곱에 비례한다.

타이어의 온도는 주행 조건, 일기 등에 따라서 다르나 기온 20°C에서 시내 주행의 경우 40~60°C, 고속도로에서는 60~90°C 정도가 된다.

트레드 고무의 물성이 변하기 시작하는 온도는 대체로 130°C~150°C 정도이다.

2.2 마찰력

타이어 성능 특성중에서 타이어와 노면 사이의 마찰력 또한 매우 중요하다. 타이어와 노면 사이의 마찰력은

- ① 타이어 트레드면과 노면 사이의 마찰력 (점착마찰, 응착마찰)
 - ② 히스테리시스 마찰
 - ③ 타이어 패턴과 노면 사이의 물림에 의한 마찰
- 등으로 나눌 수 있다.

특히 차의 구동력·제동력은 주행속도와 접지면의 이동속도에 따라 다르며 슬립비 0.1~0.3의 범위에서 최대가 된다.

여기서 슬립비는 「(차의 속도-접지면의 이동속도)/접지면의 이동속도」로 표시된다.

2.3 브레이크 개요

일반적으로 물체의 운동을 정지시킬 때 브레이크는 그 물체의 운동 에너지를 흡수하여 다른 형태의 에너지로 변환하는 것으로서 이 때에는 제동력과 제동거리의 곱이 제동일이 된다.

제동시의 운동 에너지를 열에너지로 변환하는 브레이크에는 마찰 브레이크(friction brake), 액체(유압) 브레이크(hydraulic brake), 공기 브레이크, 와전류(渦電流) 브레이크 등이 있다.

브레이크 작용을 하기 위하여는 자동차 운동 부분의 중량, 속도, 필요한 정지시간 등을 고려하여 효과적인 제동력을 발생하도록 설계되어야 한다.

자동차가 달릴 때의 운동 에너지는 브레이크에 의하여 열에너지(heat energy)로 변환되므로 그 양은 브레이크의 열용량으로 나타나며, 이것은 브레이크 드럼(brake drum)이나 브레이크 디스크(brake disc)의 크기를 결정하는 요인이 된다.

브레이크 드럼이나 디스크의 크기는 직접 드럼 브레이크의 라이닝(lining)이나 디스크 브레이크의 패드(pad)의 크기와 관계가 있으므로 브레이크를 결정할 때에는 운동 에너지의 단위시간당 흡수 열량으로부터 라이닝이나 패드의 접촉면적(contact area)을 결정한다.

이 브레이크의 열용량(熱容量, heat capacity)이 작으면 브레이크 페이드(brake fade)

현상이 일어나서 제동효과가 저하하며 열로 인하여 마찰재(摩擦材, friction materials)가 소손되는 원인이 된다.

또 라이닝이나 패드의 마찰계수는 온도, 물, 표면거칠기, 마찰면 조성, 미끄럼 속도, 면압력(面壓力) 등의 영향을 받아서 변화한다.

브레이크가 제동기능을 충분히 발휘하기 위하여는 강한 제동력이 작용하여야 하고 브레이크 주요부는 제동력에 충분히 견딜 수 있는 강도로 제작되어야 한다.

짧은 거리에서 제동하기 위하여는 제동력이 커야 하며 장거리의 제동거리로 정지시킬 때에는 제동력이 작아도 된다.

이와 같이 자동차의 제동장치는 강도적인 면에서 다음의 두 가지 점을 고려하여야 한다. 그 하나는 최대 제동조건에 대한 충분한 안전율(安全率, safety factor)로 설계되어야 하고, 다른 하나는 되풀이되는 제동작용에 충분한 내용시간(耐用時間)과 내용회수(耐用回數)를 가져야 하는 것이다.

특히 내구강도(耐久強度)는 자동차와 같이 후진 제동의 빈도(頻度)가 작은 경우와 포크 리프트(fork lift)와 같이 전·후진 제동의 비율이 거의 비슷한 경우에 각각 그 평가기준이 다르다는 점을 생각하여야 한다.

자동차는 앞·뒤 차축의 바퀴에 각각 2개씩 4개의 브레이크를 가지고 있으며, 이 브레이크를 작동시키는 방식에 따라서 유압식 브레이크(hydraulic brake), 공기식 브레이크(air brake), 동력 브레이크(power brake) 등이 사용된다.

자동차의 제동은 바퀴의 회전을 멈추게 하는 것이므로 제동시 노면과 타이어가 미끄러지는 거리는 그 제동안정성에 중요한 영향을 미친다. 그러므로 브레이크는 항상

운전자의 제어에 의하여 그 기능을 다하도록 되어야 하며 미끄럼 없이 최대제동력을 얻을 수 있도록 조작하여야 한다. 그러나 제동시 미끄럼을 방지하도록 완벽하게 제어하는 것은 불가능하다.

이와 같이 브레이크의 기능을 충분히, 발휘하게 하려면 제동력, 마찰재료, 제동강도, 브레이크 구조, 열용량, 타이어 특성 등의 여러가지 조건을 고려하여 제작되어야 한다.

3. 타이어 마멸과 브레이크의 성능

3.1 타이어의 마멸

타이어는 타이어에 걸리는 가로 또는 세로 방향의 작용력에 의하여 마멸되며 다음 식으로 구한다.

$$V = \gamma\rho \frac{F^2}{E} \dots\dots\dots(1)$$

- 여기서 V : 마멸량
- γ : 트레드 고무의 마멸도
- ρ : 타이어의 반발 탄성
- F : 타이어 접지면에 작용하는 힘 (접지력)
- E : 타이어의 강성

식 (1)에서 알 수 있는 바와 같이 타이어의 마멸은 접지면에 걸리는 수평 접선 방향의 외력이 클수록 증가한다.

또한 접지면의 슬립량이 클수록 증가한다. 이것은 타이어의 제동 또는 가로 방향의 작용력, 도로조건 등에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

3.2 타이어의 이상마멸

타이어는 자동차의 주행장치, 휠 얼라인

먼트, 타이어의 종류, 노면조건 등에 따라서 편마멸, 물결 모양, 다각형마멸, 편심마멸, 국부마멸, 슐더마멸, 중앙마멸, 단붙이마멸, 조기마멸 등이 생기게 된다.

이와 같이 이상마멸이 생기는 원인에는

- ① 자동차의 기구, 정비 불량
- ② 타이어 사용 조건 및 관리 불량
- ③ 타이어 자체 특성 문제

등을 들 수 있다.

그러나 실제 요인은 이와 같은 문제점이 복합되어 발생하므로 타이어의 선정과 관리는 매우 중요한 인자로 된다.

3.3 브레이크와 타이어의 마멸

브레이크 작용이 타이어의 마멸에 미치는 영향은 제동조건, 노면의 상태, 주행속도, 브레이크의 재료와 구조 등에 따라 상이하다. 따라서 여기서는 몇가지 타이어의 마멸 특성자료⁽¹⁾를 참고로 하여 알아보기로 한다.

제동을 걸었을 때 차의 속도가 빠를수록 속도의 제곱에 비례하는 운동 에너지가 타이어에 가해지기 때문에 타이어의 접지부에 가해지는 힘과 슬립(slip)이 증가하기 때문에 타이어의 마멸량은 증가한다.

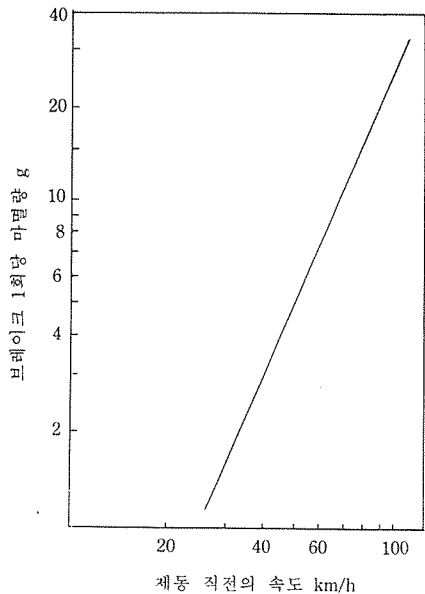
또한 브레이크를 거는 빈도도 크게 영향을 미친다. <표 1>은 자동차가 80km/h로 주행하다가 8km마다 브레이크를 밟아서 정차한 경우의 마멸수명과 연속주행시의 수명을 비

<표 1> 자동차의 발진·정지 회수와 타이어 마멸과의 관계

자동차 속도 (km/h)	주행 방법	내마멸 지 수
40	7km마다 정지·발진하는 경우	100
	150m마다 정지·발진하는 경우	15
80	8km마다 정지·발진하는 경우	51
	연속 주행하는 경우	100

교한 것이다. 이 표에서 보는 바와 같이 발진·정지가 빈번할수록 내마멸지수는 현저하게 저하하고 있음을 알 수 있다.

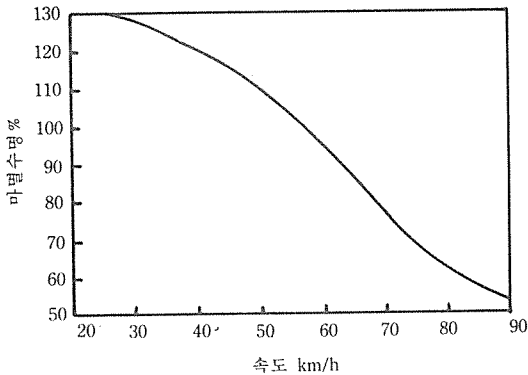
[그림 2]는 자동차의 제동 초속도와 타이어의 마멸과의 관계를 나타낸 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 브레이크를 걸기 직전의 속도가 클수록 마멸량은 현저하게 증가함을 알 수 있다.



[그림 2] 제동 초속도와 마멸량과의 관계

[그림 3]은 자동차의 속도가 마멸에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이 선도에서 보는 바와 같이 차의 속도가 증가할수록 마멸수명은 현저하게 저하함을 알 수 있다. 이것은 속도가 증가함에 따라 전동저항의 증가와 더불어 구동력, 제동력, 선회력 등이 속도의 2승에 비례하여 커지기 때문으로 생각할 수 있다.

또한 속도의 증가에 따라 타이어의 온도가 상승하고, 트레드 고무의 내마멸성이 떨어지는 것도 마멸이 증가하는 요인이 되고 있다.



(그림 3) 자동차 속도와 마멸 수명과의 관계

3.4 자동차 브레이크 기구와 타이어의 마멸

자동차와 타이어의 마멸 관계는 현가장치, 휠 얼라인먼트, 차체 형식 등에 따르나 여기서는 주로 브레이크, 허브 및 스피들의 이상과 타이어 마멸에 대하여 알아보기로 한다.

자동차의 앞·뒤 바퀴를 구동하는 회전 부분이 정상적으로 그 기능을 다하는 경우에는 바퀴에 정상적인 회전력이 전달되나 휠에 이상이 있는 경우에는 타이어의 마멸을 증대시키는 원인이 된다.

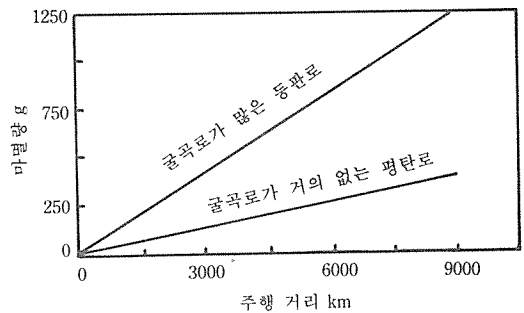
하나의 보기를 들면 허브 및 스피들의 편심이나 휨, 킹핀의 헐거움 등이 있는 경우에는 휠의 회전은 원활하지 못하게 되고 부분적인 마멸을 일으키게 된다. 이와 같이 허브나 스피들 등의 이상이 계속되면 타이어는 국부적인 편마멸이 성장하여 마침내는 다각형마멸, 심한 편마멸이 증가하여 그 기능을 다할 수 없게 된다.

또 브레이크 드럼의 편심과 같이 부분적인 힘이 작용하는 경우에는 타이어의 일부분만이 이상마멸하는 국부마멸이 생기게 된다.

한편 도로의 조건에 따라서도 제동성능과 타이어의 마멸은 상이하다.

자동차 타이어는 주로 구동력, 제동력 등이 작용할 때 타이어 트레드와 노면과의 마찰에 의하여 생기므로 도로조건에 따라서도 크게 영향을 받는다. 도로조건은 노면 상태에 따라서 여러가지로 나누어 생각할 수 있으나 여기서는 주로 포장 상태와 커브의 영향에 대하여만 다루기로 한다.

도로 포장 상태의 영향은 비포장, 콘크리트 포장, 아스팔트 포장 등에 따라 타이어 마멸수명은 달라지며 비포장일 때에는 양호한 아스팔트 포장 도로 수명(타이어)의 50% 정도이며, 콘크리트 포장도로는 아스팔트 도로의 마멸수명의 90% 정도이다.



(그림 4) 도로조건과 타이어 마멸량

한편 도로의 굴곡로가 많을 때에도 제동 작용이 빈번하게 되고 또 선회시의 슬립현상 등으로 인하여 수명은 현저하게 짧아진다.

이상에서 살펴본 바와 같이 제동성능은 자동차의 회전 운동부의 상태, 도로조건, 운전조작 특성에 따라서 달라진다.

3.5 제동력

중량 W 인 물체를 감속도 α 로서 제동하는 경우에 제동력 F_b 는

$$F_b = \frac{W}{g} \alpha \dots\dots\dots(2)$$

중량 G 인 회전체를 각속도 ϕ 로 제동할 때의 제동 토크 T 는

$$T = I\phi \quad \text{또는} \quad T = \frac{GD^2}{4g}\phi \quad \dots\dots\dots(3)$$

로 표시된다. 여기서 I 는 관성 모멘트, D 는 지름, g 는 중력 가속도이다.

3.6 자동차 타이어에 걸리는 하중

자동차용 타이어에 걸리는 하중은 다음과 같이 정하중과 동하중으로 나누어 생각할 수 있다.

(1) 자동차의 정적하중분포

[그림 5]에서 자동차의 중심(重心)에 작용하는 하중 W 는 앞·뒤 바퀴에 걸리는 하중 W_{sf} 와 W_{sr} 로부터

$$W = W_{sf} + W_{sr} \quad \dots\dots\dots(4)$$

점 B 둘레의 모멘트를 생각하면

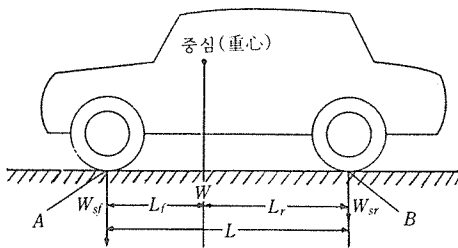
$$W_{sf} = \frac{L_r}{L} W \quad \dots\dots\dots(5)$$

가 된다. 점 A 둘레의 모멘트를 취하면

$$W_{sr} = \frac{L_f}{L} W \quad \dots\dots\dots(6)$$

앞바퀴의 하중배분을

$$i_{sr} = \frac{W_{sf}}{W} \times 100 = \frac{L_r}{L} \times 100(\%) \quad \dots(7)$$



[그림 5] 자동차의 정적하중분포

뒷바퀴의 하중배분을

$$i_{sr} = \frac{W_{sr}}{W} \times 100 = \frac{L_f}{L} \times 100(\%) \quad \dots(8)$$

(2) 타이어에 걸리는 동적하중분포

자동차가 감속도 α 로서 제동될 때 자동차 타이어에는 그 반작용력이 걸려서 관성으로 인한 α 인 가속도에 의한 힘이 작용한다. 이때의 차량의 동적 중량은 [그림 6]에서

$$W = W_{df} + W_{dr} \quad \dots\dots\dots(9)$$

점 B 둘레의 모멘트 평형으로부터

$$W_{dr} = W_{sf} + \frac{H}{L} \frac{\alpha}{g} W \quad \dots\dots\dots(10)$$

점 A 둘레의 모멘트 평형을 취하면

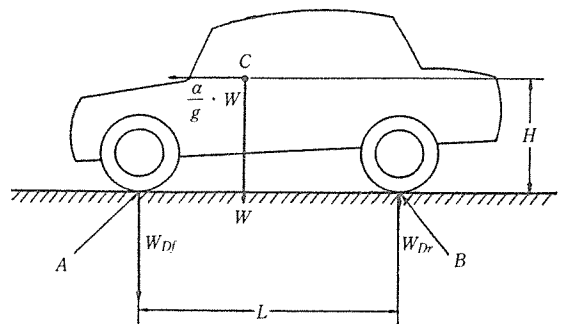
$$W_{dr} = \frac{L_f}{L} W - \frac{H}{L} \frac{W}{g} \alpha \quad \dots\dots\dots(11)$$

이 때 앞바퀴의 동적 하중배분을

$$i_{df} = \frac{W_{df}}{W} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(12)$$

뒷바퀴의 동적 하중배분을

$$\xi_{sr} = \frac{W_{dr}}{W} \times 100\% \quad \dots\dots\dots(13)$$



[그림 6] 자동차의 동적하중분포

식 (2)에서 $\alpha = 0.6g$ 로 하면

$$F_b = \frac{W}{g} \times 0.6g = 0.6W \dots \dots \dots (14)$$

가 되어 물체의 중량에 0.6배한 것이 브레이크 제동력이 된다.

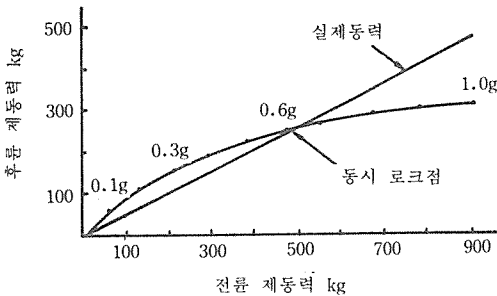
(3) 필요제동력

자동차를 감속도 α 로서 제동할 경우 앞바퀴, 뒷바퀴가 각각 필요로 하는 제동력은 각 감속도에서 동적하중을 제동하는 데 필요한 힘이므로

$$\text{앞바퀴에서는 } F_{bf} = \frac{W_{df}}{g} \alpha \dots \dots \dots (15)$$

$$\text{뒷바퀴에서는 } F_{br} = \frac{W_{dr}}{g} \alpha \dots \dots \dots (16)$$

로 된다. 후륜의 제동력을 세로축에, 전륜의 제동력을 가로축에 취하여 필요제동력과 실제제동력을 도시한 것이 [그림 7]이다.



[그림 7] 전·후륜의 필요제동력

[그림 7]에서 실제제동력과 필요제동력과의 교점을 동시 로크점이라 한다. 이 점의 값은 0.6g 정도이다.

(4) 실제 브레이크 제동력

자동차의 앞·뒤 바퀴가 각각 2개씩인 경우에 브레이크 1개에 발생하는 실제제동력은 전륜 1개에 대하여는

$$F_{bdf} = 2 B_{ef} P_f A_{wf} \frac{R_f}{r_f} \dots \dots \dots (17)$$

후륜 1개에 대하여는

$$F_{bdr} = 2 B_{er} P_r A_{wr} \frac{R_r}{r_r} \dots \dots \dots (18)$$

여기서 B_{ef} : 브레이크의 효력계수

P : 브레이크의 입력(액체압력) (kg/cm²)

A_w : 액압 실린더 면적(m²)

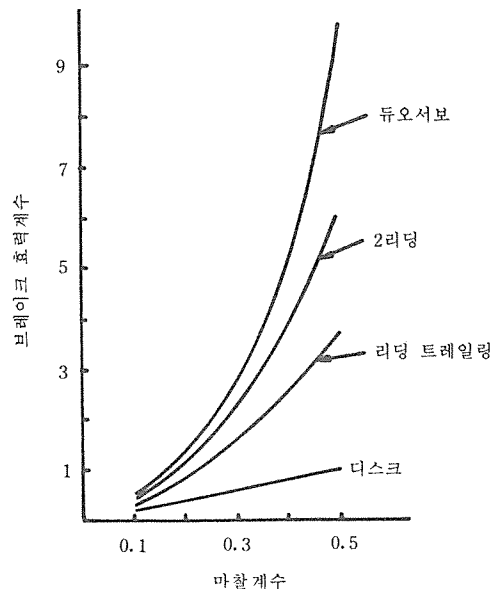
R : 바퀴의 브레이크 반경(m)

r : 타이어 정적부하 반경(m)

첨자 f, r : 앞·뒷바퀴

(5) 브레이크의 효력계수

브레이크의 효력계수(効力係數)는 브레이크 입력에 대한 출력의 비로 표시되는 계수로서 라이닝의 마찰계수와 브레이크의 작용력, 브레이크 치수로부터 구한다. 각 브레이크에 따른 브레이크 효력계수는 [그림 8]과 같다⁽²⁾.



[그림 8] 라이닝의 마찰계수와 효력계수

드럼 브레이크에서 슈에 발생하는 브레이크 토크는 각부의 치수비율, 마찰계수, 드럼반지름에 따라서 결정된다. 이들 가운데서 드럼면에서 마찰력의 합력과 슈 끝의 가압력과와의 비를 슈 계수(shoe factor)라 한다.

슈 계수 S_f 는

$$S_f = \frac{\text{드럼면에서의 마찰력의 합력}(F)}{\text{슈 선단의 가압력}(P)} \quad (19)$$

가 된다. 또한 브레이크 효력계수(brake effectiveness factor) B_{ef} 는 다음 식으로 표시된다.

$$B_{ef} = \frac{\text{브레이크 토크}}{(\text{휠 실린더 면적}) \times (\text{유압}) \times (\text{드럼 지름})} \quad (20)$$

B_{ef} 는 브레이크 형식에 따라서 다르며 같은 형식에서도 라이닝의 마찰계수, 휠 실린더 및 앵커 중심으로부터의 거리, 앵커 각도 등에 영향을 받는다. 또한 스프링의 세기

등에 따라서도 영향을 받는다.

〈표 2〉는 브레이크의 효력계수 B_{ef} 의 개략치를 나타낸 것이다.

4. 맺는 말

지금까지 주로 타이어의 기본 성능과 자동차 브레이크 성능, 타이어 마멸과 제동성능과의 관계 등에 관련된 사항에 대하여 살펴보았다.

자동차 타이어와 브레이크 부품은 안전주행에 관계되는 가장 중요한 부품이므로 이들의 성능 향상에 더욱 많은 연구 개발 노력을 기울여야 할 것으로 생각된다.

특히 더욱 안전하고, 타이어 특성과 제동 특성이 뛰어난 자동차를 만드는 것과 아울러 각부 기능이 충분히 발휘되도록 점검과 정비에 만전을 기할 수 있는 자동차 관리가 이루어져야 할 것으로 생각한다.

〈표 2〉 B_{ef} 의 개략치⁽²⁾

브레이크 형식	효력계수
듀오 서보 브레이크	5
2리딩 브레이크	4
리딩·트레일링 { 부동식(浮動式) 고정식	2.5 2
디스크 브레이크	0.75~0.8

〈참고문헌〉

1. 대한타이어공업협회 : “승용차용 타이어의 이상마모”, P. 30, 36., 1990.
2. 자동차기술회 : “신편자동차공학 핸드북”, P. 6-6., 1970.

〈國際고무技術會議 開催案内〉

■ IRC 92 北京(中國)

- 日 時 : 1992년 10월 13일~15일(3일간)
- 開催地 : 中國 北京
- 問議處 : Secretariat

CIESC Institute of Rubber
c/o Research and Design Institute of Rubber Industry
Beijing, China P.C. 100039