

타이어 마모에 영향을 미치는 가혹도 인자

이재우 · 정창복*[†] · 최인창

금호타이어 연구소, *전남대학교 응용화학공학부
(2004년 9월 10일 접수, 2004년 12월 29일 채택)

Severity Factors Affecting Tire Wear

Jae Woo Lee, Chang Bock Chung*[†], and In Chang Choi

R&D Center, Kumho tire Co., Inc.,

555 Sochon-dong, Kwangsan-gu, Gwangju 506-711, Korea

*Faculty of Chemical Engineering, Chonnam National University,

300 Yongbong-dong, Buk-gu, Gwangju 500-757, Korea

(Received September 10, 2004; accepted December 29, 2004)

초록 : 타이어 마모는 자동차 드라이버들의 주요 관심 사항 중의 하나일 뿐만 아니라 타이어의 수명과 밀접하게 관련되어 있다. 자동차 타이어의 사용 조건들은 여러 가지 요인들이 함께 작용하기 때문에 타이어 마모에 대해 명확하게 규명하는 것은 쉽지 않다. 따라서, 타이어 마모를 평가하기 위해서는 실제 사용 조건에서의 마모 평가가 필요하다. 타이어의 수명과 밀접한 관련이 있는 마모를 평가하기 위하여 정해진 가혹한 주행 조건을 갖는 dedicated test를 통하여 마모 성능 시험을 실시하였다. 타이어 마모에 영향을 미치는 많은 인자들을 단순화시키기 위하여 정해진 운전자의 가혹도로 시험함으로써 운전자의 운전 습관에 따른 영향을 최소화하였다. 마모와 관련이 있는 노선 가혹도의 영향을 확인하기 위하여 노선 별로 횡가속도를 측정하여 얻어진 driving severity number(DSN)을 이용하여 DSN에 따른 타이어의 마모율과 마모 양상에 대해 비교해 보았다. 이러한 dedicated treadwear test 결과를 제공함으로써 타이어 마모 성능을 만족시키기 위한 설계에 유용한 자료를 제공할 수 있다.

Abstract: Tire wear is one of the factors that most drivers have concerned and is closely related to the tire life. It is very difficult to predict tire wear because the factors affecting tire wear seem to be very complicated. Tire wear test should be performed at real conditions for the evaluation of tire wear. In this study, we analyze tire wear according to the severities of test courses by using the dedicated test method, more severe than real driving conditions. In order to simplify the factors affecting tire wear, we define roads' driving severities to be driving severity numbers, DSNs which are obtained by measuring the lateral accelerations of test courses. And we compared tire wear rates and profiles with DSNs. These test results can provide the tire design guide to meet tire wear performance.

Keywords: tire, wear, dedicated test, lateral acceleration, severity.

1. 서론

타이어의 마모는 타이어의 수명과 직접적인 관련이 있는 성능으로 운전자의 주요 관심 사항 중 하나이다. 타이어 마모에 영향을 주는 타이어 부위 중 트레드(tread) 배합물 층은 노면과 직접 접촉하는 부위로서 타이어 원주의 최외각에 위치하고 있을 뿐만 아니라 전체 부피의 70%를 점유하고 있기 때문에 타이어에서 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 이 타이어 트레드부와 노면 사이에 작용하는 마찰력이 트레드 고무의 강도보다 클 때 표면의 고무가 이탈하는 현상을 타이어 마모라 정의할 수 있다. 이런 타이어 마모의 발생 요인은 타이어의 구조, 공기압, 고무 성질 등의 내부적인 요인과 차량의 사양, 노면구조, 사용 조건 등의 외부적인 요인으로 나누어 진다.

타이어 마모 평가 방법으로는 simulation 예측 방법과 electronic measuring & evaluation dynamic pressure distribution(EMED), paintwear

method, dedicated test 등의 실험적인 방법으로 크게 나뉘는데, 본 연구에서는 이런 실험적인 방법 중 정하여진 코스를 정하여진 거리만큼 주행하는 방법인 dedicated test에 의한 마모 성능 평가를 실시하였다. 가혹도가 서로 다른 코스에서의 dedicated test를 통해서 마모 측정에 따른 mileage를 예측하였다.

2. 실험

2.1 마모 메커니즘

마모란 단단한 물질 또는 돌출물에 소제가 마찰하는 동안 닳아 없어지는 것을 말한다. 연필로 쓴 글씨를 지우기 위해 지우개로 문지르면 지우개의 부스러기가 생기는데, 이것이 바로 고무 마모의 원리이다. 이와 같이 문지른다는 것은 누르는 힘과 문지르는 힘에 의하여 미끄럼(slip)이 마찰력의 한계를 초과한 것을 의미하고 그 결과 마모가 발생한다.

타이어 마모를 아주 단순히 생각해 본다면 고무의 마모와 같이 노면으로부터 타이어 트레드 고무에 가해지는 마찰력에 의해

[†]To whom correspondence should be addressed. E-mail: chungcb@chonnam.ac.kr

서 트레드 고무의 일부가 떨어져 나가는 현상으로 나타낼 수가 있다. 하지만, 타이어의 마모는 Figure 1에서와 같이 트레드 고무의 성능뿐만 아니라 타이어의 구조나 형상, 트레드 패턴과 같은 내부적인 요인들과 차량의 특성, 운전자의 운전 방법, 공기압이나 하중 등의 인위적인 요인들과 노면이나 지형, 온도 등과 같은 비인위적인 요인들로 나뉘는 외부적인 요인들 등 다양한 요인들에 영향을 받는다. 실제 타이어의 사용 조건에서는 위와 같은 여러 요인들이 복합적으로 작용하기 때문에 아직 타이어 마모에 대한 명확한 규정은 이루어지지 않았다.¹³

타이어의 마모 성능을 순수한 기계적 마모에 의해 발생하는 고무의 물리적 특성으로 본 Schallamach의 이론식은⁴⁸ 다음과 같다.

$$A = \gamma \rho S F \tag{1}$$

- A : abrasion per unit distance traveled
- γ : abrasion per unit energy dissipation
- ρ : resilience of tire
- S : slip
- F : reaction force in area of contact

이 식에 의해서 타이어의 마모는 접지면에 걸리는 외력이 클수록 접지면에서 많이 미끄러질수록 마모가 많이 된다는 것을 알 수 있다. 그러나, 타이어의 마모는 단순히 기계적인 마모에 의해서만 발생하는 것이 아니라 위에서 언급했듯이 여러 가지 요인들의 복합적인 원인으로 인해 발생하는 것이다. 그러므로, 실차에 타이어를 취부하여 주행에 의한 타이어 마모 성능 예측이 필요하다.

2.2 Mileage 예측 방법

타이어의 마모는 타이어 수명과 가장 밀접한 관계가 있다. 실험적인 방법에 의한 mileage 예측 방법이 실제 사용자의 mileage와는 다소 차이가 있겠지만, 실험적인 방법이 실제 사용자들의 타이어 사용 조건보다 훨씬 가혹한 조건에서 실험이 실시되기 때문에 실제 사용자들의 타이어 수명은 실험적 방법에 의해 예측된 mileage보다 더 길다는 것을 알 수 있다. 여기서 mileage 예측을 위한 몇 가지 방법에 대해 소개하였다.

2.3 End Point Method

외삽법을 이용하는 방법으로 Figure 2에서와 같이 초기 anti-skid depth(ASD)와 주행후의 remaining tread depth(RTD)를 이용하여 마모량을 산출하고, 주행거리를 이 마모량으로 나누어 wear index를 산

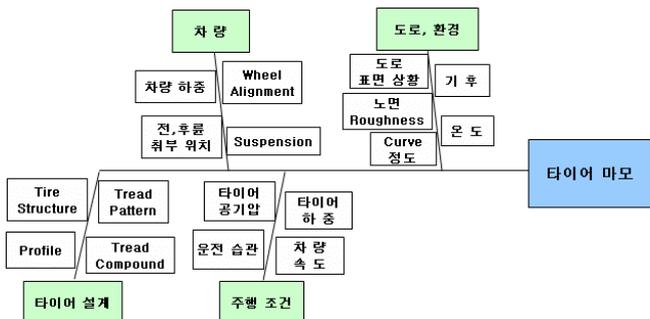


Figure 1. Effective factors of tire treadwear.

출하고 이 wear index에 마모 한계량(ASD-T.W.I)을 곱하여 예상 주행 거리를 산출한다. 일반적인 타이어 마모 시험기관에서 공통으로 사용하는 방법으로서 시험 중간의 데이터, 즉 마모 경향이 무시되는 단점이 있다.

2.4 8 Point Method

Uniform tire quality grading standards(UTQGS) tread wear 지수 산출 시 사용하는 방법으로 Figure 3에서와 같이 초기 ASD와 중간에 측정된 RTD들을 이용하여 8개의 point에 대해 선형 회귀를 실시하고 이 결과식으로부터 RTD가 T.W.I(tread wear indicator)에 도달할 경우의 주행 거리를 찾아내는 방법이다. End point method와는 달리 중간에 측정된 RTD data를 가지고 회귀분석을 통하여 마모 경향을 예측할 수 있다. 일반적으로 마모 속도가 빠르면 신뢰도가 높게 나타난다.

2.5 Log-Log Chart Method

마모량이 mileage와 지수 함수를 따른다는 경험적인 가정으로부터 출발한 예측 방법으로 일본 타이어 업계에서 주로 사용하는 방법이다. Figure 4에서와 같이 마모량과 주행 거리축을 log scale로 변형하여 도시하고 최대 마모량에서의 주행 거리를 chart에서 찾아내는 방법이다. 하지만 마모 속도가 느린 경우에는 신뢰도가 낮게 나타나는 단점이 있다.

2.6 실험 조건

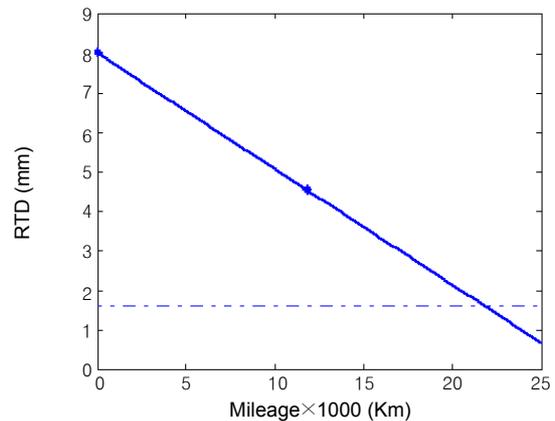


Figure 2. End point method.

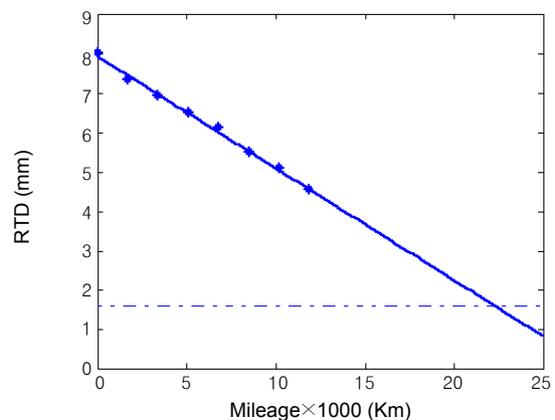


Figure 3. 8 point method.

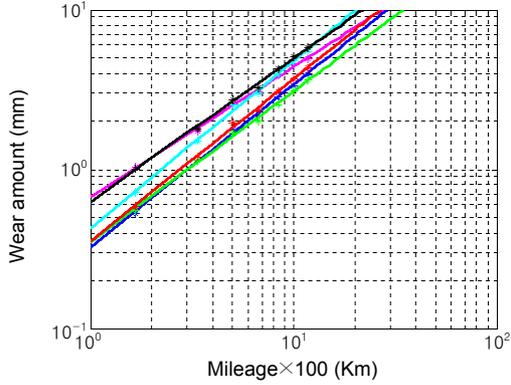


Figure 4. Log-log chart method.

Table 1. Approximate Relationship of Footprint Frictional Work to Tire Use Mode

Use mode	Relative frictional work
Free rolling	1.0
Driving	2.0
Braking	4.8
Cornering(lateral)	11.6

All at 800N (180 lbf) per tire by R. F. Miller (1961)

본 연구에서는 타이어 마모 성능 평가를 위해서 운전자의 운전 습관이나 방법에 의한 요인을 포함한 **dedicated test**를 실시하였다. 동일 조건에서 같은 종류의 타이어에 대한 마모 시험을 통하여 마모에 영향을 미치는 내,외적 요인에 의한 영향을 최소화하였다. 또한, 운전자 가속도를 측정하여 운전자의 운전 습관이나 방법에 의한 요인을 최소화하였으며, 시험 구간의 고정으로 횡가속도를 이용한 DSN을 사용하여 노선 가속도에 따른 타이어 마모 양상과 수명에 대해 조사하였다.

시험 구간으로는 1개의 고속도로와 2개의 국도를 선정하여 3개의 코스로 나누어 시험을 실시하였다. 노면의 굴곡을 제외한 타이어 마모를 유발하는 인자들에 의한 영향을 최소화하기 위해 타이어 규격과 공기압, 하중, 시험차량은 동일하게 고정하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 타이어 마모 평가

앞에서 설명한 바와 같이 타이어 마모를 유발시키는 인자들은 매우 다양하다. 그러나, 여러 연구자들은 타이어 마모의 가장 중요한 인자가 타이어에 걸리는 힘이라고 생각하고 있다. 차량의 속도나 방향의 변화가 있을 때 타이어에 걸리는 힘은 차량에 걸리는 관성에 근원을 두고 있다. 이는 주로 longitudinal force와 lateral force의 두 가지 힘의 영향을 받게 되는데, 마찰력과의 관계에 대해 정리한 Table 1에 의하면 lateral force는 longitudinal force에 비해 직진 주행시에는 약 6배, 제동시에는 2.4배가 됨을 알 수 있다.⁹ 그러므로 타이어의 마모는 주로 lateral force에 기인한다고 가정하였다.¹⁰⁻¹²

횡방향으로 작용하는 속도의 변화를 횡가속도(G)라고 하며 저항을 고려하지 않은 조건에서 어떤 물체를 자유 낙하시키면 이론

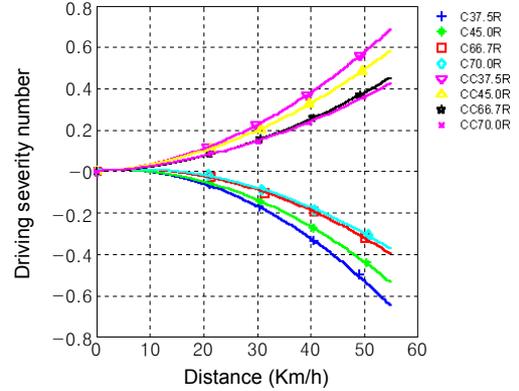


Figure 5. Lateral acceleration as a function of velocity for change of route.

적으로 약 9.8 m/s^2 (1 G)의 가속이 붙는다. 횡가속도를 무차원으로 표현하는 것이 편리하므로, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$G = V^2/Rg \tag{2}$$

- V : velocity
- R : cornering radius
- g : gravity acceleration constant

좌우 방향에서 좌우는 +, -로 구분되며, 이 횡가속도 값의 측정으로 DSN을 산출할 수 있는데, 이것은 식 (3)처럼 타이어 회전수당 횡가속도 값의 제곱의 합으로 표현된다. 일반적으로 일정 시간 간격당 횡가속도를 계속하여 이 횡가속도 제곱의 합을 전체 주행 거리로 나누는 값으로 표현한다.¹³

$$DSN = \sum(G_i)^2/d \tag{3}$$

- G : lateral acceleration
- d : selected distance interval

반경이 서로 다른 4개의 원을 따라 4가지의 속도로 차량을 주행하였을 때 각 반경에 대해 속도에 따른 횡가속도의 변화에 대해 알아 보았다. Figure 5에서 보는 바와 같이 실제 차량의 주행에서도 식 (2)와 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

3.2 운전자 가속도

문헌에 의하면 다른 타이어 마모 요인들을 무시하고, 오직 전문 운전자들과 일반 운전자들간의 운전 방법에 의한 wear index의 차이는 약 2~6배에 이르는 것으로 보고되었다.¹⁴ 하지만, 이러한 결과만 가지고 단순히 dedicated test 결과가 일반 운전자들의 마모 결과에 비해 타이어 수명이 길다고는 할 수 없다. 하지만, 동일한 조건에서 동일 노면, 동일한 차량에 같은 종류의 타이어에 대한 마모 시험을 실시할 경우 다른 환경적 요인에 대한 영향을 무시한다면 타이어 마모에 가장 중요한 요인은 바로 운전자의 운전 방법이 된다. 그러므로, 운전자의 운전 방법에 대한 운전자 가속도(driving severity)에 대한 분석이 필요하다.

동일 조건에서 같은 코스를 주행했을 경우 시계 방향과 반시계

방향의 주행을 통해서 코너링시 운전자의 운전 방법에 대한 가혹도를 조사하였다.

시험 결과의 신뢰성 향상을 위하여 같은 코스를 5회전 하였을 때 처음 시작과 마지막의 데이터는 무시하였다.

그 결과 Figure 6과 같이 시계 방향이나 반시계 방향의 속도 차이는 거의 나타나지 않지만 횡가속도의 차이는 심하게 나타남을 볼 수 있다. 이는 어느 특정 운전자의 운전 습관에서 비롯된 것이 라기 보다는 Table 2에 나타난 바와 같이 모든 운전자들 공통으로 시계 방향보다는 반시계 방향의 가혹도가 더 큰 값을 가짐을 볼 수

있다. 이는 운전석이 좌측에 있기 때문에 반시계 방향으로의 회전이 운전자 시계 방향의 회전보다 안전하다고 느끼는 심리적 요인에 기인한다고 할 수 있다. 이런 요인에 의해서 반시계 방향의 회전시 가혹도가 더 크기 때문에 좌우 타이어의 마모율이 서로 다르게 된다.

Table 2에서 나타난 바와 같이 여러명의 운전자들에 대해 같은 조건에서의 가혹도 조사 결과 각 운전자의 운전 특성에 따라 가혹도가 차이가 남을 알 수 있다. 본 연구에서는 각 운전자들의 가혹도가 서로 다르기 때문에 dedicated test에서 좀더 정확한 결과를 얻기 위해서 운전자를 고정하였다.

3.3 노선 가혹도

앞에서 살펴본 바와 같이 어느 한 운전자를 지정하여 시험을 실시하여 운전자의 가혹도까지 조정하고 다른 요인들의 변화를 무시할 수 있다면 노선의 가혹도에 따른 타이어 마모 시험의 신뢰성이 향상될 수 있다.

노선의 가혹도에 따른 코스별 조건을 Table 3에 정리하였다. 비록 시험 노선에 따라 아스팔트와 콘크리트의 비율과 노면의 거칠음 정도가 서로 다르지만, 노면의 거칠음에 따른 인자는 횡가속도에 의한 영향의 약 10% 정도로 작기 때문에 노선의 가혹도는 횡가속도에 의존하여 계산하였다.⁴

각 시험 구간들의 속도와 횡가속도를 측정된 결과 Figure 7에 나타난 바와 같이 고속도로는 속도는 높지만 국도에 비해 일직선의 도로이기 때문에 횡가속도 값의 분포가 작은 것을 알 수 있었고, 실제 주행 속도는 비슷하지만 국도 1이 국도 2에 비해 횡가속도 값의 분포차가 커 더 가혹하다는 것을 알 수 있다. 결국 선정된 코스별 가혹도를 비교해 보면 코스 1, 코스 2 그리고 코스 3의 순으로 가혹도가 증가한다.

3.4 Dedicated Test 결과

앞에서 설명한 방법들을 바탕으로 dedicated test를 실시하였다. End point method는 시험 중간의 data가 무시되는 단점과 시험 data의 미세한 차이에 의해서 예상 mileage가 크게 차이가 날 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 결과의 신뢰성 향상을 위하여 mileage 계산시 매 1600 Km 마다 RTD를 체크하여 총 7회 11200 Km에 걸쳐 시험을 실시하여 선형 회귀 분석을 하는 8 point method를 사용하였다.

현재 소수의 후륜구동 승용 차량을 제외하고 국내의 대부분의 승용 차량이 front engine front wheel drive(FF) 방식이다. 본 연구를 위해 2년여 간 실시한 dedicated test 결과 중 FF 방식의 차량에 대해 타이어 취부 위치에 따른 예상 mileage를 Figure 8에 정리하였다.

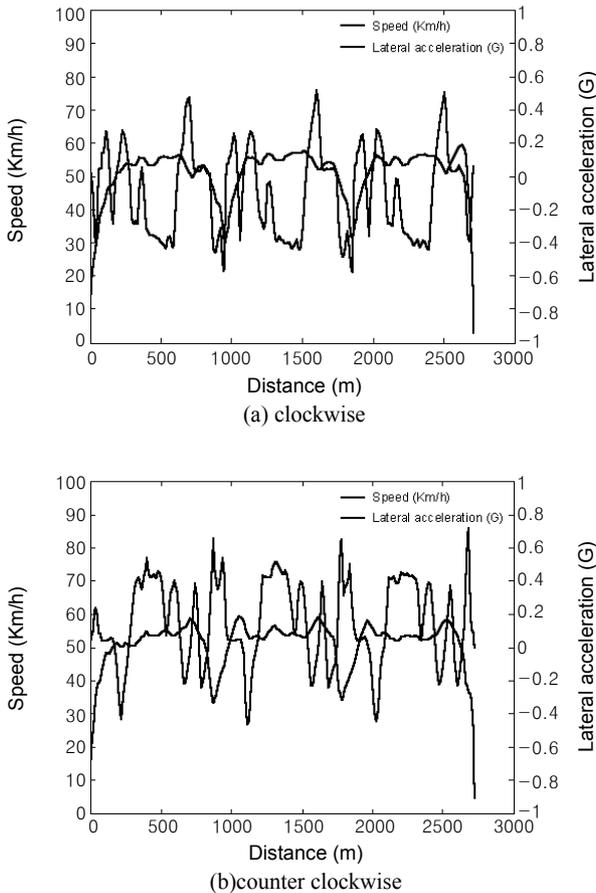


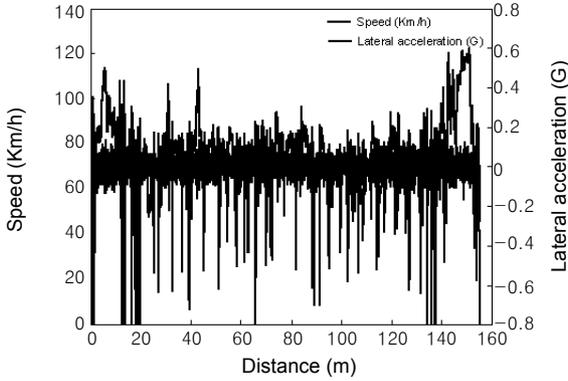
Figure 6. Driver severity as a function of rotation directions.

Table 2. Driver Severity

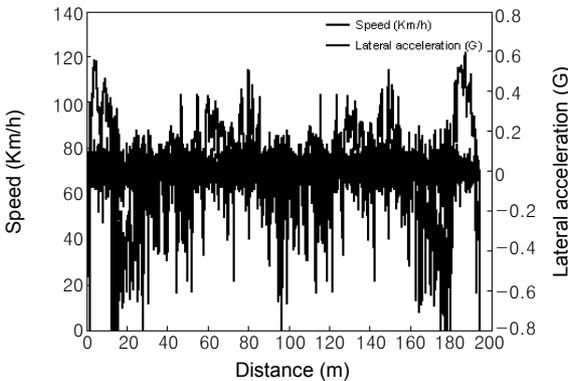
Driver	Clockwise				Counter clockwise				Com- parison
	Distance	Velocity	Time	Severity	Distance	Velocity	Time	Severity	
A	2.6831	53.5	0.0502	7.57	2.6914	54.6	0.0493	9.63	127.7%
B	2.6355	57.6	0.0457	7.66	2.7047	54.2	0.0499	10.03	134.4%
C	2.6630	60.4	0.0441	8.82	2.6533	57.0	0.0466	13.02	147.0%
D	2.6771	54.4	0.0492	8.57	2.7069	54.6	0.0496	10.13	119.5%
E	2.7265	53.1	0.0514	7.37	2.7037	54.4	0.0497	9.32	125.4%
F	2.7308	54.6	0.0500	7.25	2.7072	52.8	0.0513	8.40	114.9%
G	2.6733	55.8	0.0479	7.01	2.6944	54.7	0.0492	8.95	128.7%
Averag	2.6842	55.5	0.0484	7.75	2.6945	54.7	0.0494	9.92	128.5%

Table 3. Evaluation Conditions of the Dedicated Test

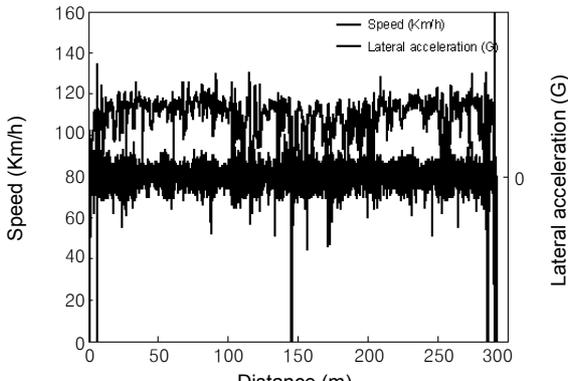
	Cours 1		Course 2		Course 3	
Size	195/60R15					
Pressure/Load	30 Psi / Vehicle G. V. W					
Test vheicle	Avante XD					
Test route	Highway	Rural	Highway	Rural	Highway	Rural
	100%	0%	80%	20%	75%	25%
	Asph.	Asph.	Asph.	Asph.	Asph.	Asph.
	40%	0%	40%	100%	40%	100%
	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.
	60%	0%	60%	0%	60%	0%
Severity	1.05		1.32		1.48	



(a) rural route 1



(b) rural route 2



(c) highway

Figure 7. Speed and lateral acceleration as a function of distance.

그 결과 FF방식의 모든 차량에 대하여 전륜(구동)축이 후륜축에 비해 마모가 빨라 예상 mileage가 낮게 나올 수 있었다. 모든 차량들은 차량 주행 특성상 제동시 차량 하중이 앞쪽으로 쏠리기 때문에 전륜쪽 타이어가 후륜쪽 타이어에 비해 많은 하중을 받게 된다. 또한, FF 방식의 차량은 엔진이 앞에 있어 전륜쪽 타이어가 후륜쪽 타이어에 비해 더 많은 하중을 받으며, 구동축이기 때문에 출발 시 먼저 노면과 마찰을 일으켜 후륜 타이어에 비해 마모가 빠르게 나타나게 된다.

본 시험에 사용된 차량은 FF 방식으로 구동축인 front axle의 타이어가 비구동축인 rear axle의 타이어에 비하여 마모도가 심하며,

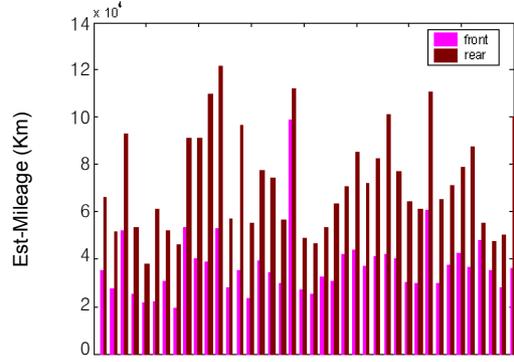


Figure 8. Wear index as a function of axle position ; For FF vehicles.

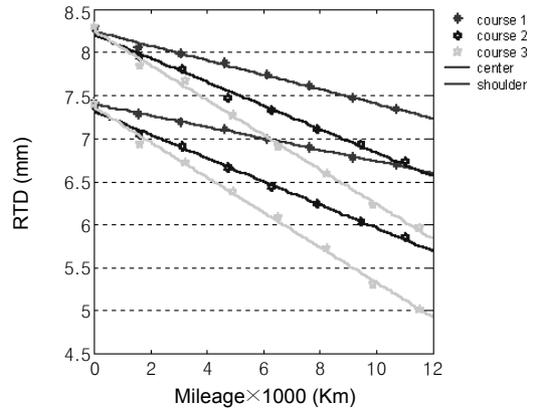


Figure 9. Distribution of RTD on front axle as a function of distance.

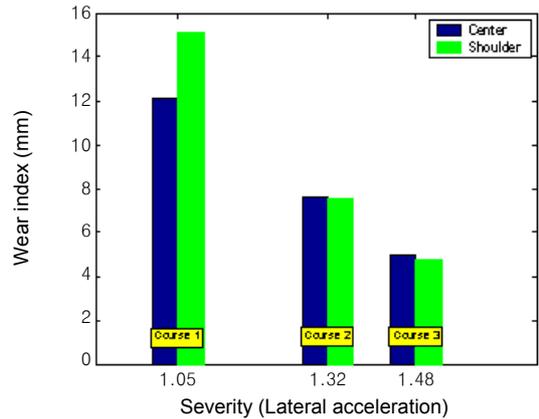


Figure 10. Wear index distribution as a function of route severity ; Comparison of center and shoulder.

앞에서 살펴본 바와 같이 운전자의 운전 방법에 의해 right front(RF)가 left front(LF)보다 가속도가 심하기 때문에 마모 정도가 가장 심한 RF에 대하여 mileage를 예상하여야 하며, ASD 값을 제외하고 총 7회에 걸친 dedicated test 시험 결과 데이터를 바탕으로 선형 회귀 분석을 하였다. Figure 9에서 보는 바와 같이 타이어의 center 부분과 shoulder 부분은 ASD 뿐만 아니라 마모 속도도 서로 다르기 때문에 mileage를 예상하기 위해서는 center 부분과 shoulder 부분의

Table 4. Evaluation Results of the Dedicated Test

	Course 1	Course 2	Course 3
Severity	1.05	1.32	1.48
Est-Mileage, CNT (Km)	82,110	54,888	37,065
Est-Mileage, S/H (Km)	89,027	46,968	30,826
Center W. I. (Km/mm)	12,149	7,580	4,932
S/H W. I. (Km/mm)	15,152	7,556	4,750
Uneven wear (S/H basis)	80.18%	100.32%	103.83%

마모도 또한 고려되어야 한다.

본 연구에서는 같은 종류의 패턴을 갖는 타이어를 가지고 시험을 실시하여 타이어의 마모 정도를 나타내기 위해 예상 mileage를 계산하였지만, 실제 타이어의 패턴별 그루브(groove)의 깊이가 서로 다르기 때문에 예상 mileage를 가지고 타이어의 마모 정도를 나타내기에는 무리가 있다. 이런 문제점을 없애기 위해서 wear index를 사용하여 각 코스별 마모 지수로 나타내었다.

Figure 10과 Table 4에서와 같이 노선 가혹도의 차이에 따라 타이어의 마모 양상이 다르게 된다. 특히, Figure 10에서 보는 바와 같이 가혹도가 커짐에 따라 center 부분보다는 shoulder 부분의 마모 속도가 더 빠르게 변화한다는 것을 알 수 있다. 이것은 노선 가혹도가 낮은 코스 1의 경우 노선 특성상 코너링 주행보다는 직진 주행을 주로 하며, 코스 1에서 코너링 시는 회전 반경이 커 횡가속도 값이 작기 때문에 노선과의 마찰이 주로 center 부분에서 이루어지기 때문이다. 하지만, 노선 가혹도가 큰 코스 3의 경우 횡가속도 값이 크기 때문에 주행시 코스 1에 비해 shoulder 부분의 노면과의 마찰이 상대적으로 많고, 코너링시 차량 하중의 쏠림으로 shoulder 부분의 마찰 에너지가 커지기 때문에 center 부분보다는 shoulder 부분의 마모가 심하며, 노선 가혹도가 커질수록 shoulder 부분의 마모가 더 심해질 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 타이어 마모 성능 평가에 있어 내, 외적 요인에 의한 영향을 최소화하기 위하여 운전자 가혹도를 측정하였으며, 서로 다른 3개의 코스를 통하여 노선 가혹도에 의한 타이어 마모 영향에 대해 조사하였다. 그 결과, 노선 가혹도가 낮은 경우 shoulder 부분보다는 center 부분의 마모량이 많았으며, 노선 가혹도가 커지면 shoulder 부분의 마모량이 급격히 많아진다는 것을 알 수 있었다.

타이어의 수명은 가혹도가 낮은 코스를 주로 주행하는 차량의 경우에는 center 부분이, 가혹도가 높은 코스를 주로 주행하는 차량의 경우에는 shoulder 부분의 마모에 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 하지만, 이러한 dedicated test 결과가 정확한 타이어의 수명을 예측할 수는 없다. 이는 타이어의 수명은 노선의 가혹도가 가장 큰 영향을 미치는 인자이긴 하지만 노선 가혹도 이외의 여러 요인들을 무시할 수는 없기 때문이다. 하지만, 이러한 dedicated test 결과는 타이어의 마모 성능에 적합한 설계를 위한 효율적인 자료로 제공될 수 있다.

참고문헌

1. A. G. Veith, *Tire Treadwear Symposium, Rubber Division of the American Chemical Society*, Toronto, Ontario, Canada, May, 22-23 (1991).
2. A. N. Gent and T. Y. P. Chang, *Eng. Fract. Mech.*, **44**, 843 (1993).
3. A. N. Gent, *Rubber Chem. Technol.*, **62**, 750 (1989).
4. A. Schallimach and D. M. Turner, *Wear*, **3**, 1 (1960).
5. A. Schallimach, *Wear*, **1**, 384 (1958).
6. Q. V. Bui and J. P. Ponthot, *Wear*, **252**, 150 (2002).
7. A. N. Gent and C. T. R. Pulford, *J. Appl. Polym. Sci.*, **28**, 943 (1968).
8. A. Schallimach, *Rubber Chem. Technol.*, **41**, 209 (1968).
9. R. F. Miller and R. Marlow, *Rubber and Plastic Age*, **42**, 968 (1961).
10. A. G. Veith, *Rubber Chem. and Technol.*, **46**, 801 (1973).
11. A. Chiesa and G. Ghilardi, SAE Paper 750459, Feb. (1975).
12. W. Bergman and W. B. Crum, SAE Paper 730615, May (1973).
13. A. G. Veith, *Tire Science and Technology*, **14**, 139 (1986).
14. O. L. Mattre and C. Zarak, *International Congress and Exposition*, Detroit, Michigan, February, 23 (1998).