

특집

자동차 소음진동

# 타이어 연비 성능과 Trade off

이상주\*, 강현석  
(한국타이어)

## 1. 머리말

전세계적으로 환경 문제는 모든 산업에 화두가 되고 있다. 이러한 측면에서 화석 연료를 사용하는 자동차의 경우 그에 대한 국가 차원의 다양한 규제가 적용되어 왔다. 이중 자동차에서 중요한 부품 중에 하나인 타이어는 자동차 규제와 별도로 2012년부터 유럽에서 CO<sub>2</sub> 배출과 관련되는 타이어 성능인 회전 저항(rolling resistance, RR)에 대한 규제 또는 성능 등급을 판단하는 labeling을 의무화할 예정이다. 자동차 경우 엔진, 트랜스미션 등 다양한 부분에서 연비가 관여되어 있다. 특히 타이어 경우 비록 그 기여도는 10 ~ 15 % 정도로 크지 않으나 연료 절감과 CO<sub>2</sub> 개선 차원에서 그 중요성이 증대되고 있다. 또한 이와 병행하여 환경 소음과 관련된 소음에 대한 등급화가 시행될 계획이며, 특히 저 회전 저항에 따른 반대 성능인 wet에 대한 등급화도 병행하여 시행할 계획이다. 그러나 타이어 경우 성능 간에 trade off 특성이 커 다양한 성능을 동시에 만족시키는 것은 쉽지 않다. 따라서 모든 성능의 trade off를 최소화하여 성능을 최적화하는 것은 모든 타이어 기술자들의 과제이다. 이러한 측면에서 이 글에서는 차량 연비와 관련한 타이어 RR 성능에 대하여 알아보고 이로 인한 차량 성능에 있어 trade off 문제는 어떻

게 발생하는지, 또한 NVH 측면에서의 변화는 어떠한지를 알아 보고자 한다.

## 2. 타이어 연비

### 2.1 타이어 기본 성능

타이어는 전통적으로 하중지지, 제/구동력 전달, 노면 충격 완화 및 방향 전환 등 네 가지 기능을 가지고 있다. 그러나 최근에는 이것은 기본 성능이며, 이외에 안전(safety), 경제성(economy), 환경친화성(environment) 및 안락감(comfort), 외관(looking) 등이 주요한 기능으로 요구되고 있다. 이 중에서 연비와 친환경 기능은 그 중요성이 급격히 증가되고 있는 실정이다.

### 2.2 타이어 회전저항(RR)

#### (1) 정의

자동차에서 타이어의 경제성은 연비로 설명되며, 타이어 단품 측면에서 회전 저항으로 나타내고 있다. 이는 회전할 때 발생하는 저항을 의미하며 단위 거리를 주행할 때 소모되는 에너지로 정의한다.

$$F_{RR} [N] = \text{Energy Loss [Joule]} / \text{Distance [m]} \quad (1)$$

이때 회전 저항은 하중에 따라 선형적으로 증가

\* E-mail : sangju@hankooktire.com / (042) 865-0290

되어 통상 하중에 따라 normalized된 RR, 즉 RRC(rolling resistance coefficient)로 표현되며, 타이어 규제의 기준으로 적용되고 있다.

(2) 발생원인

주행 중 타이어는 노면과 접지되는 부분에서 부가되는 하중에 의하여 변형을 받게 된다. 이때 회전 운동에 의하여 타이어 각 부위는 복원과 변형을 반복하게 된다. 여기서 타이어 재료의 점탄성 특성에 따라 hysteresis loss가 발생되며, 이로 인하여 회전 운동에너지에 손실이 발생된다. 이때의 에너지 손실이 전체 회전 저항의 주 원인으로 약 90 %를 차지한다. 기타(10 %) 원인으로서는 공기저항, 타이어/노면의 미끄러짐에 의한 마찰 저항 및 노면의 변형 등이 있다.

2.3 회전저항 시험법

타이어의 회전저항은 일정 크기의 드럼에 타이어가 맞닿아 일정 속도로 회전할 때 발생하는 회전 저항을 측정함으로써 얻어진다. 이때 측정 값의 종류에 따라 force method, torque method와 energy

method 등으로 구분된다. Force method는 타이어 회전 축에 작용하는 reaction force를 측정하여 회전 저항 값을 측정하는 방법으로 미국을 중심으로 아시아권에서 선호하는 방법이다. 이에 반하여 torque method는 드럼에서 회전 시 저항에 해당하는 토크를 측정하여 사용하는 방법이며, energy method는 회전에 따른 모터의 전력 손실 등을 측정하여 타이어 저항으로 활용하는 방법이다. Torque method는 유럽지역에서 선호하는 방법이다.

이때 force method 경우 타이어 회전 저항은 그림 1에서와 같이 FR로 정의되며 moment equilibrium에

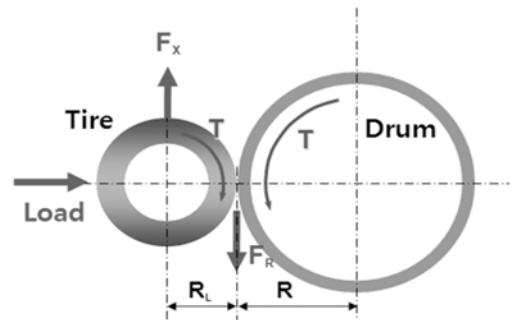


그림 1 Force method 시험 개요

표 1 ISO 28580 규제 세부 사항

EU 자동차용 타이어 회전저항 규제 기준값 (RRC 기준, ISO 28580)

Tire class	RRC Max. Value (kg/ton)	
	1st stage (2012년 11월~)	2nd stage (2016년 11월~)
C1 (Passenger car)	12.0	10.5
C2 (Light truck)	10.5	9.0
C3 (Truck & bus)	8.0	6.5

Test speed (in km/h) of ISO 28580

Tyre type	Passenger car		Truck & bus	
	Load index	LI 121 and below	LI 121 and Above	
Speed symbol	All	All	J [100kph] and lower	K [110kph] and higher
Speed	80	80	60	80

Test load (in kgf) and inflation pressures

Tyre type	Passenger car		Truck & bus
	Standard load	Reinforced or extra load	
Load-% of maximum load capacity	80	80	85 (% of single load)
Inflation pressure (kPa) capped condition	210 (2.14 kgf/cm <sup>2</sup> )	250 (2.55 kgf/cm <sup>2</sup> )	Corresponding to maximum Load capacity for single application

의거하여 다음과 같은 식을 통해 계산할 수 있다.

$$F_R = F_X \times \left(1 + \frac{R_L}{R}\right) \quad (2)$$

$F_X$  : spindle force(N)  
 $F_R$  : rolling resistance(N)  
 $R_L$  : dynamic loaded radius(m)  
 $R$  : test wheel radius(m)

회전저항을 측정하는 시험 조건은 크게 단일속도 시험법(ex. SAE J1269)과 다중속도 시험법(ex. SAE J2452)으로 나눌 수 있다. EU 규제 시험법은 2009년 개발된 ISO 28580 시험법으로 속도 60 kph 또는 80 kph로 타이어 주행속도를 제시하며 표준화된 방법으로 회전저항 측정 조건을 적용하려 하고 있다. 구체적인 내용은 표 1에서 확인할 수 있다.

### 2.4 사용 조건 영향

타이어 회전저항은 타이어 변형에 기초하기 때문에 하중, 공기압, 주행속도 등 사용 조건 등과 밀접한 관계가 있다. 이 때문에 올바른 사용 조건 및 운전 방법에 따라서도 많은 연료 절감 효과를 얻을 수 있다.

#### (1) 공기압 및 하중

그림 2와 같이 타이어에 주입된 공기압이 높을수록 RR 성능은 유리해진다. 이는 공기압 증가 시 타이어 전체 강성이 증가하게 되어 타이어 변형이 감소되기 때문이다. 공기압 증가는 타이어에 회전 저항을 줄일 수 있는 가장 효과적인 방법이다. 따라서 실제 차량의 기준 공기압이 점차 상향되고 있다. 또한 이러한 관점에서 타이어의 공기압을 규정에 따라 일정하게 유지하는 것도 필요하다. 실제 많은 타이어들이 규정보다 적은 공기압을 사용하고 있어 연비 차원에서 개선이 필요하다. 이와 반대로 하중은 높을수록 접지면적 증가로 인해 접지부의 트레드 변형이 증가하여 에너지 손실이 증가되며 이로 인해 RR 성능이 불리하게 된다. 따라서 불필요한 화물 적재는 삼가는 것이 좋다.

#### (2) 주행속도

주행속도가 증가할수록 RR 성능은 불리해진다. 특히 고속 주행 시 standing wave 현상에 의해 타이어 변형은 급격히 증가된다. 이에 따라 특히 110 kph 이상 고속 주행 시 회전 저항이 급격히 증가되어, 차량 연비가 불리해진다.

#### (3) 주행 조건의 영향

차량 연비는 주행 조건에 따라 크게 변화한다. 도심을 주행할 때는 구동과 제동의 반복이 심하여 일정한 속도로 주행하는 고속도로에 비하여 연비가 불리하게 된다. 그림 3에서 나타난 바와 같이 주행 조건이 상이한 국가 간 또는 도로 간에 큰 차이가 있음을 보여주고 있다.

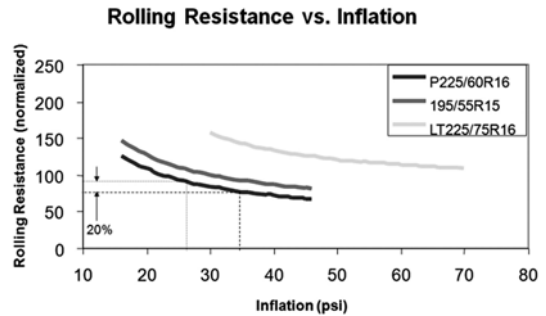


그림 2 공기압 vs RR 관계

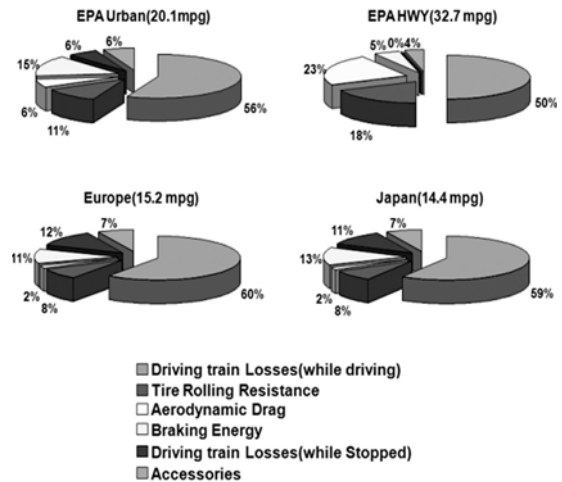


그림 3 주행 조건 별 타이어 RR 영향도

### 2.5 차량 연비와 타이어 영향

차량 연비는 엔진 효율 개선, 하이브리드, 전기 차 등의 발전으로 비약적으로 향상되어 왔다. 이에 따라 차량에서의 타이어 연비 기여도가 점차 증가되고 있다. 그림 4는 일반적인 차량 연비에 영향을 미치는 인자를 나타내고 있다. 차량 엔진에서 발생한 동력은 차량전달체계에 의해 타이어로 전달되어 노면과의 마찰력에 의해 자동차를 주행시키며, 차량 부품에 의한 내부저항, 공기저항, 관성력 및 타이어 회전저항 등의 다양한 힘을 받게 된다. 이 중 타이어 회전 저항은 그림 5와 같이 차량 연비와 높은 상관성을 보이고 있다.

이때 차량 연비에서의 타이어 기여도는 Schuring(1988)에 의해 다음과 같은 return factor (즉, energy ratio)가 제안되었다.

$$\text{Return factor} = \frac{\text{Reduction in fuel consumption}}{\text{Reduction in rolling resistance}} \quad (3)$$

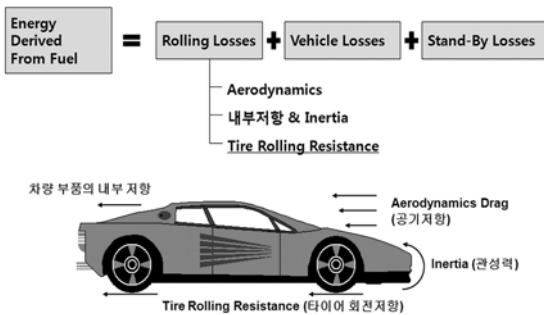


그림 4 차량 연비 영향 인자

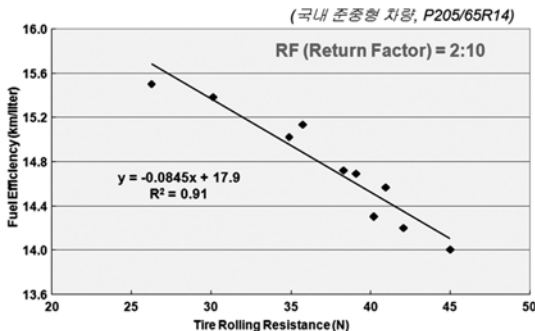


그림 5 타이어 회전저항 vs 차량 연비

승용차 또는 경 트럭의 경우 RF=1:10 또는 2:10 (타이어 회전저항 10% 개선에 의한 연비 개선은 1~2% 발생)가 일반적이며, 트럭의 경우에는 RF=1:10~3:10으로 보다 높게 나타나고 있다. 따라서 트럭의 경우 승용차보다 타이어 연비 영향이 크기 때문에 타이어 개선의 효과가 큰 것을 의미한다.

### 3. 타이어 RR 개선 기술

차량 연비에 큰 영향을 주는 타이어 회전 저항 성능을 개선하는 타이어 기술은 그림 6과 같이 크게 design, profile, compound, new material application의 4개의 카테고리로 나누어 볼 수 있다. 이 글에서는 이 중 타이어 각 구성 성분의 기여도를 알아보고 실제 회전 저항에 가장 큰 기여도를 보이는 컴파운드(compound)에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

#### 3.1 타이어 구성 요소 기여도

타이어는 다양한 재료들로 구성되어 있다, 이 각각은 부가된 하중 또는 주행에 따른 외력의 입력 특성에 따라 다른 형태의 스트레스와 스트레인을 받게 된다. 이에 따라 서로 다른 기여도로 타이어 회전 저항에 영향을 미치게 된다. 그림 7은 타이어 회전 저항에 미치는 타이어 각 부위의 기여도를 보여주고 있다. 이에 따르면 타이어 구성 요소 중 cap tread의 기여도가 50% 이상으로

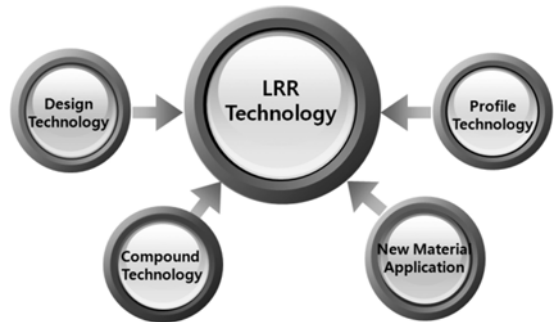


그림 6 타이어 RR 개선 기술 개요

가장 높게 나타남을 알 수 있다. 타이어 트레드는 점탄성 물질인 고무 혼합물로 압축, 변형 등에 의하여 hysteresis loss를 야기하여 회전 저항을 발생시키며, 타이어에서 가장 많은 부피를 차지하고 있는 부위이다.

이러한 재료 영향 외에 타이어는 공기 탱크의 역할을 하는 구조물이기 때문에 타이어의 뼈대를 구성하는 profile 형상도 중요한 요소 중에 하나이다. 실제 이 형상에 따라 타이어 각 부위의 응력 집중도가 달라져 회전 저항 큰 영향을 미칠 수 있다.

### 3.2 타이어 컴파운드 영향

연비에 있어서 타이어 고무, 특히 여러 가지 화학 성분을 혼합한 컴파운드는 가장 중요한 요소의 하나이다. 일반적으로 타이어 성능은 그 재료 특성에 의해 성능 간에 배반현상 즉, trade off 특성이 강하다. 특히 트레드에 사용되는 컴파운드는 이러한 성질이 강하다. 즉, 그림 8에서와 같이 연비가 향상되면 wet나 wear가 급격히 악화되는 경향을 보이고 있다. 이를 magic triangle이라 부

른다. 따라서 이러한 성능들의 밸런스를 맞추어 타이어를 개발하는 것이 중요한 화두가 되고 있다. 이러한 측면에서 현재 타이어 업체에서는 연비와 wet 성능을 동시에 만족시킬 수 있는 silica 컴파운드에 대한 기술 개발에 많은 지원을 하고 있다. Silica는 친수성(hydrophilic, 親水性) 물질로 기존의 컴파운드와 달리 연비와 wet를 동시에 만족시킬 수 있는 재료로 많이 사용되고 있다. cap tread부에 silica를 적용함에 따라 회전저항뿐만 아니라 traction 및 wear 성능을 동시에 향상시킬

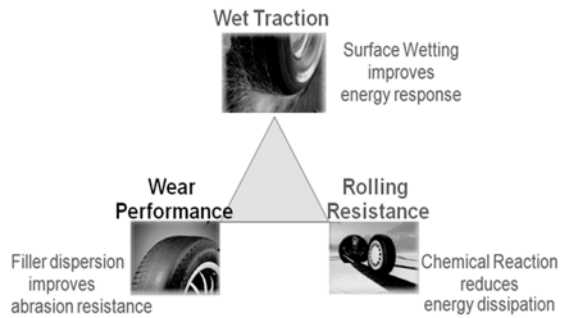


그림 8 Magic triangle in tire technology

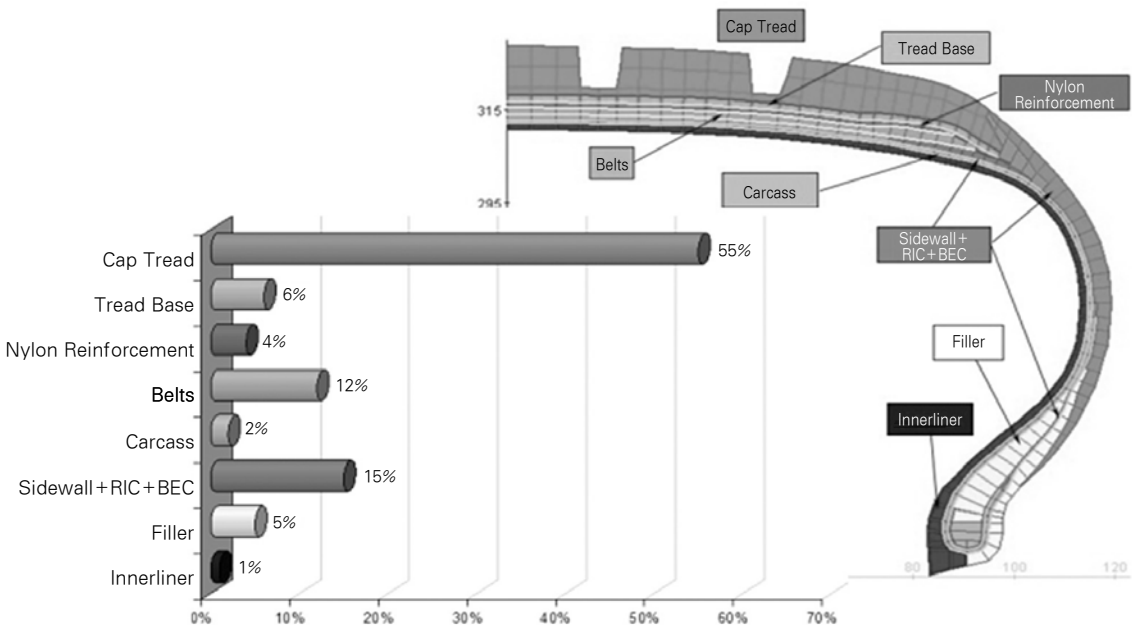
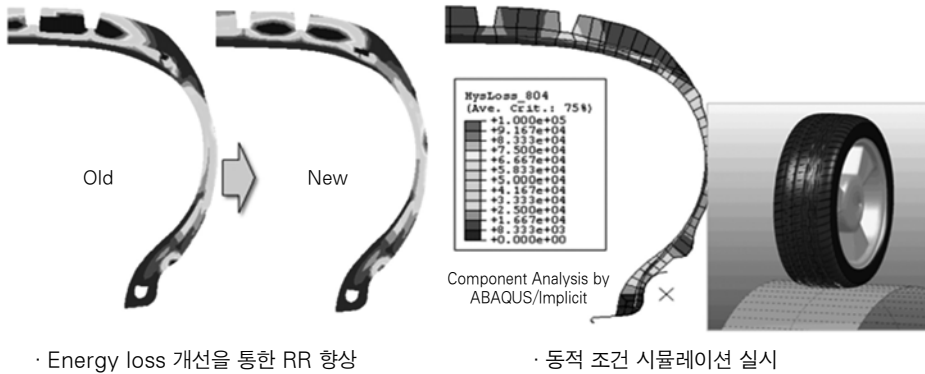


그림 7 타이어 설계 인자별 기여도



· Energy loss 개선을 통한 RR 향상

· 동적 조건 시뮬레이션 실시

그림 9 회전저항 시뮬레이션 기술

수 있게 되었다. 그러나 silica 재료는 그 특성상 여러 조건에 민감하여 배합 설계뿐 아니라 제조 가공성에 많은 어려움이 있으며 가격 또한 높아 앞으로 많은 기술 연구가 지속적으로 필요한 분야이다.

### 3.3 시뮬레이션 기술

타이어 회전저항 성능 개선을 위해서 실제 타이어 평가도 중요하나 시뮬레이션 등을 통한 최적화도 매우 중요하다. 특히 성능 간에 trade off 특성이 강한 타이어 연구에서는 필수적인 기술이다. 일반적으로 타이어 회전 저항을 예측하기 위하여 유한요소 해석 방법이 많이 사용되고 있다. 타이어 각 부에 발생하는 변형을 계산하여 에너지 손실을 추정하는 방법을 사용한다. 최근에는 실제 주행 조건과 동일한 상태에서 이러한 해석을 수행하여 여러 성능을 최적화 하는 기술들이 끊임없이 개발되고 있다.

## 4. 타이어 RR과 Trade off

### 4.1 개요

타이어 회전저항을 향상시키기 위해 타이어 설계 인자를 변경하는 경우 타이어의 타 성능과의 배반 현상이 발생한다. 일반적으로 알려져 있는 타이어 설계 특성 변경에 따른 trade off 성능을 표 2와 같이 제시하였다. 예를 들어 타이어 RR성능

표 2 타이어 RR 개선 특성과 배반성능

Solutions	Trade-off
1. LRR compound (C/T, U/T, S/W, R/C, B/F)	1.Wear, Traction, Durability, NVH
2. U/T gauge/Modulus Up	2.Wear, Chunking, NVH
3. Pattern → Groove/Kerf ratio Up	3.Wear, Dry Traction
4. Weight reduction(Skid depth, S/W, Bead)	4.Wear, Durability, NVH Traction
5. Belt rubber volume down	5. Durability, NVH

향상을 위해 cap tread compound를 변경하는 경우에는 wear, traction, durability(내구성) 및 NVH 성능과 상반 관계가 발생하게 된다. 따라서 타이어 회전저항 성능 저하를 최소화하며 이러한 배반 성능을 극복하는 것이 타이어 업체가 가지고 있는 숙제라 할 수 있다.

### 4.2 Trade off 사례

타이어 회전저항과 trade off가 명확히 발생하는 것으로는 wet braking, wear 및 durability가 있다. RR성능이 개선될수록 wet braking distance는 길어지고, 마모나 내구성능은 나빠지게 된다. 그림 10의 실제 결과 사례와 같이 타이어 RR 성능이 향상됨에 따라 dry traction, wet traction 및 wear가 나빠지는 것을 알 수 있다.

또한 RR 성능 향상을 위한 가장 기본적인 접근 방법인 타이어 중량을 감소시킬 경우, NV 성능이나 핸들링 성능 저하가 발생할 수 있다. 특히

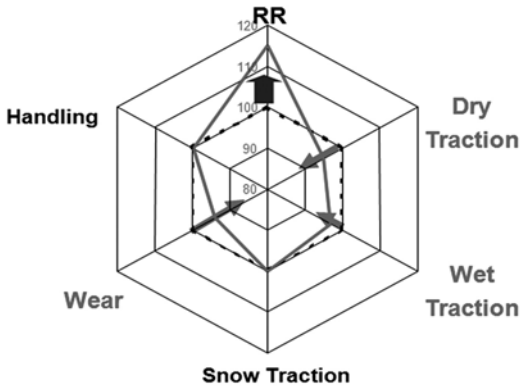


그림 10 Trade off 경향 사례

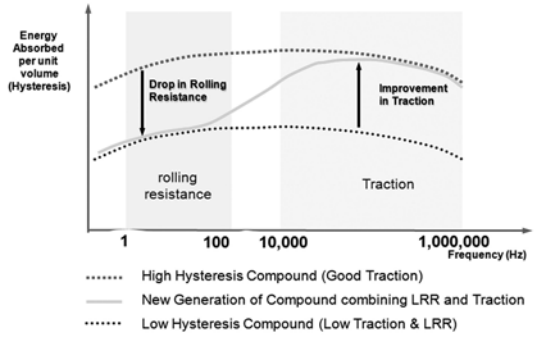


그림 12 Overcome of RR & wet trade off

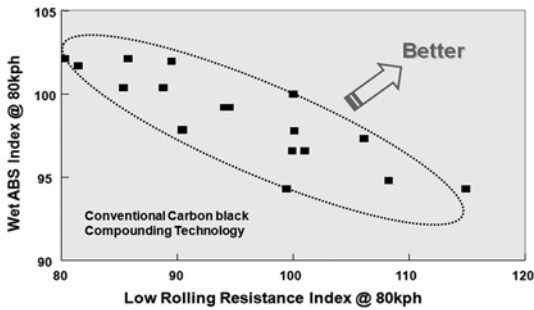


그림 11 타이어 회전저항 vs wet braking

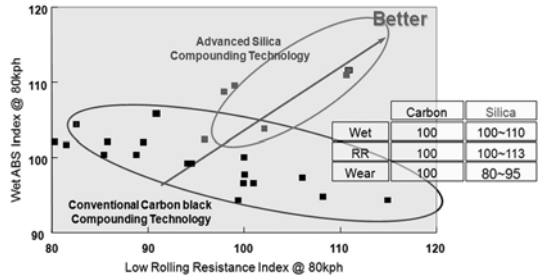


그림 13 Silica compound 효과

전술한 바와 같이 타이어 공기압은 연비에 중요한 인자이다. 따라서 최근 자동차 업체에서 연비 향상을 위해 타이어 사용 공기압 상향시키는 경향이 두드러지고 있다. 이 때 타이어/차량 성능 간 trade off 현상이 다양하게 발생하게 된다. 따라서 이 경우 자동차 회사와 타이어 회사 간에 공동 연구가 필요하다.

### 4.3 RR vs wet braking

그림 11과 같이 타이어 RR과 wet braking 성능은 반비례 관계를 나타낸다.

타이어에 부가되는 입력 특성은 타이어 각 성능에 따라 다르게 나타난다. 즉, 회전 저항은 타이어 회전 시 반복적인 변형, 복원과 관련되어 회전 주파수와 관련된 저주파 입력 특성을 가지고 있으며, wet 제동성은 노면과 마찰에 의한 고주파 입력 특성을 가지고 있다. 이에 따라 그림 12

와 같이 각 주파수 영역 별로 서로 다른 타이어 성능을 모두 만족할 수 있는 새로운 컴파운드가 설계될 수 있는 가능성이 있다. 따라서 주파수 별 맞춤형 배합 설계는 이 trade off를 극복하고 RR 성능을 향상시킬 수 있는 방법이 될 수 있다.

이를 위해 3.2에서도 언급한 바와 같이, 기존 carbon을 이용하는 경우 극복하기 힘든 RR 성능 개선을 silica compound 적용을 통해 그림 13과 같이 전혀 다른 경향으로 개선하여 RR 및 wet braking 성능 모두를 만족하게 되는 것이다.

### 4.4 RR vs NVH 성능

#### (1) 개요

RR 성능을 향상하기 위한 타이어 특성 변화에 의해 나타나는 NVH 성능 저하는 표 3과 같이 정리할 수 있다.

특히 환경 인증으로 규제 대상이 되고 있는 pass by noise 경우 타이어 회전 저항과 trade off 특성을 보이고 있다. 그림 14는 회전 저항과 상관성

표 3 RR 성능 향상 vs NVH 성능 저하 요인

RR 성능 향상	NVH 성능 저하 요인
타이어 공기압 상황	타이어 강성 증가로 입력 크기 증가
Size 변경 : OD 증가 & Sidewall 폭 감소	인치 증가 및 저 편평비로 인해 불리
타이어 설계 방향 1) LRR Compound 적용 → Rebound, Hardness 증가	타이어 Tread Damping 측면 불리 경향 → Pass By Noise 성능 저하
2) Profile 설계 경향 변화	고유 특성(중량/강성→고유진동수) 변화 : 성능 matching 어려움 발생 → Road Noise 등 Interior Noise 증가
3) 경량화 (차량 & 타이어)	

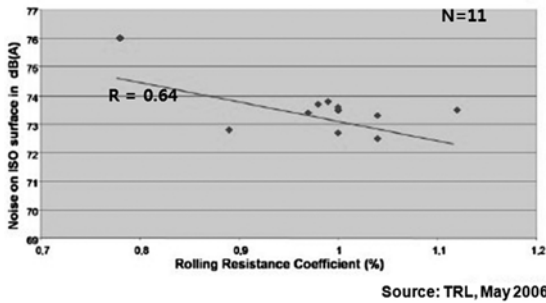


그림 14 RRC vs noise(PBN) (TRL, 2006)

을 보여주고 있다. 일반적으로 회전 저항은 타이어 변형과 관련이 되어 있다. 따라서 변형이 적을수록, 즉, 탄성이 높을수록 회전 저항은 유리해진다. 그러나 소음은 역으로 댐핑이 강할수록 유리해지는 경향이 있어 회전 저항과 반대적인 경향을 보이게 된다. 그러나 실험 결과 R-square가 0.64 수준으로, RRC 변화 대비 PBN 경향을 정확히 파악하기 위해서는 보다 많은 시험이나 연구 결과가 확보되어야 할 것으로 판단된다.

(2) 공기압 변화에 따른 관계

차량 업체에서 추진 중인 공기압 사항은 그림 15와 같이 RR 성능 향상에 있어 중요한 사용 조건 변화이다. 또한 공기압 사항은 그림 16과 같이 RR 성능 향상 이외에 dry handling 같은 성능도 개선되는 경향을 보인다. 다만, 공기압 사항의 경우에도 타 성능을 고려하여 적절한 수준을 파악하는 과정이 반드시 필요하다.

이러한 공기압 사항은 타이어 강성 증가로 인

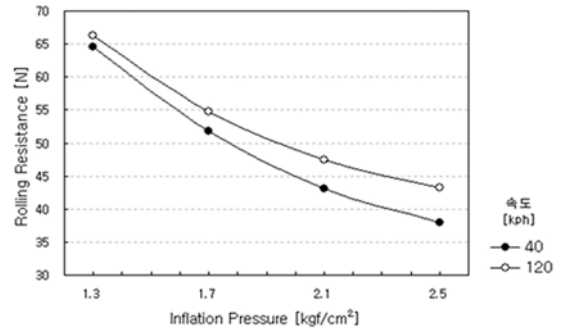


그림 15 공기압 vs RR 관계

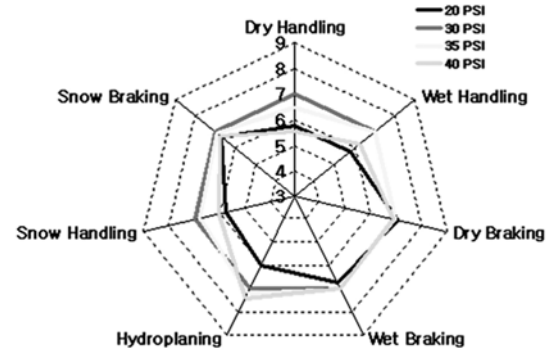


그림 16 공기압 vs 차량/타이어 주행 성능

해 타이어 입력 크기를 증가시킨다. 이러한 차량 입력 증가는 차량으로 전달되는 가진력 증가를 유발시켜 그림 17과 같이 차량 실내에 발생하는 로드노이즈를 저하시키는 요인 중 하나이다.

(3) 타이어 규격에 따른 영향

최근 OE 장착 타이어 규격의 변화로 RR성능은 향상되고 있지만, 이로 인해 NV 성능은 나빠지는 경향이 나타난다. 타이어 사용 규격 증가로 인한 tread width가 증가는 노면과의 충격 크기를 증가시키고, 그림 18과 같이 low series(저편평비) 적용으로 인한 타이어 flexible 대역 감소로 인해 노면에서의 충격이 차량에 전달되는 크기가 증가한다. 이로 인해 운전자에 느끼는 NV 성능은 저하되게 된다.

결국 타이어의 RR 성능과 NV 성능 간에는 타



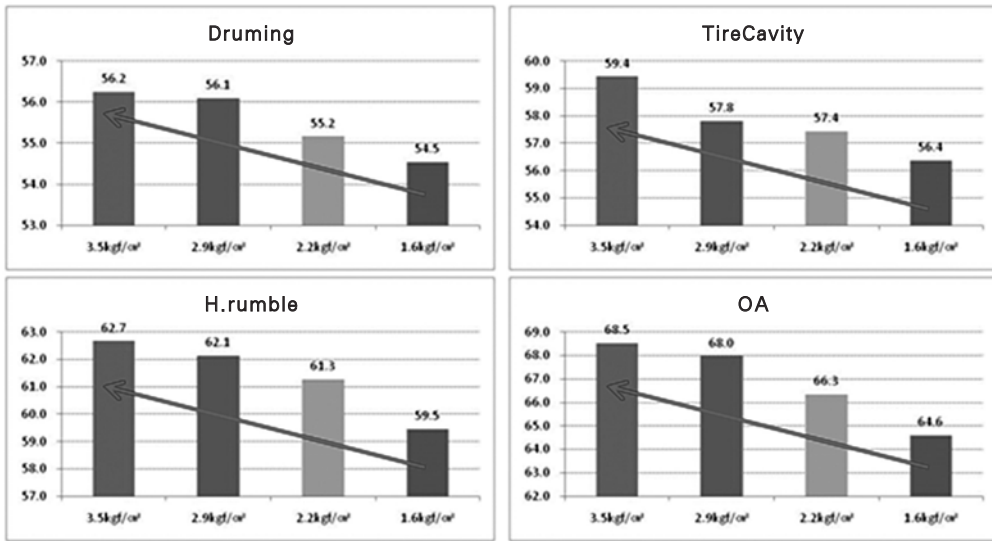


그림 17 공기압 vs 차량 로드노이즈 성능

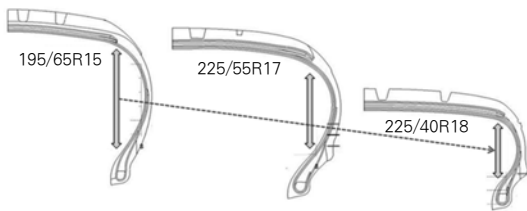


그림 18 타이어 규격 변화와 flexible 대역

이어 특성뿐만 아니라 사용 공기압이나 인치업 등과 같은 차량 사용 조건 등과도 밀접하게 관계되어 있다. 이로 인해 타이어만의 개선으로는 원하는 목표 성능에 효과적으로 도달하기에 어려움이 존재한다. 즉, 타이어 특성과 차량 특성에 대한 긴밀하게 연결된 연구가 지속적으로 추진되어야 효과적으로 차량 연비 성능을 개선할 수 있다고 판단된다.

## 5. 맺음말

차량 요구성능이 기존의 주행뿐만 아니라 친환경 측면 등 다양하게 변화되고 있다. 이러한 측면에서 차량 성능과 밀접한 관계를 갖고 있는 타이

어 경우 그 요구 성능도 다양하게 되고 기준 또한 강화되고 있다. 이미 EU에서는 2012년부터 본격적으로 RR 등 친환경과 관련된 규제를 실시할 예정이다. 따라서 다양한 요구에 대한 성능의 최적화는 타이어 업체에서 반드시 해결하고 극복해야 하는 중요한 과제이다. 특히 타이어 연비 성능은 다른 성능들과 trade off 성질이 강하여 개선이 쉽지 않다. 따라서 이러한 배반 성능을 극복하기 위해 타이어 개선 설계 기술 및 최적화 기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고 더욱 강화하여야 한다. 하지만 이로 인한 wear, wet 제동 및 NV 같은 trade off 성능을 극복하기에는 타이어 단독으로는 한계가 있기 때문에, 자동차와 연계된 연구활동이 지속적으로 필요하다. 이제 국제적으로 친환경 기술은 아무리 강조해도 지나치지 않는 것이 되었다. 국내/외 환경보호 차원에서 labeling 같은 규제는 적극 검토되어야 하며, 이와 더불어 정부 차원에서도 국가 수출 산업에서 중요한 비중을 차지하고 있는 자동차나 타이어에 대한 친환경 기술 개발 지원도 적극 추진되어야 할 것으로 사료된다. KSNVE