

# 자동차 새시 설계를 위한 자동차 타이어 도로소음에 관한 실험적 연구

## An Experimental Study on Automobile Tire Road Noise for Design of Automobile Chassis

김 병 삼†

Kim Byoung-sam

(2004년 9월 6일 접수 : 2005년 4월 8일 심사완료)

**Key Words** : Chassis(새시), Natural Frequency(고유진동수), Random Rough Surface(불규칙한 거친 노면), Tire(타이어), Road Noise(도로소음)

### ABSTRACT

The purpose of this study is to obtain a foundation data for chassis design and road noise reduction of automobiles. Using the combination of the automobile, radial tires and instrumentation equipment, experimental investigation were carried out to examine the characteristics of the structural vibration of tire as the key to obtaining the effective parameters for reducing road noise. From the results of experimental studies it has been confirmed that the existence of important frequency ranges, which were attributable to the suspension and chassis system. The tire, axle and chassis natural frequency of automobile govern the road noise. Results that material property of tire and experimental condition are parameter for shifting of tire natural frequency, which enables a designer of an automobile to foresee the influence of the various design factors on the road noise.

### 1. 서 론

최근 자동차가 급속한 속도로 증가하고 있고, 그에 따른 환경오염 문제가 심각하게 대두되고 있는 실정이다. 자동차의 증가는 여러가지 환경오염 문제를 가져오는데, 그 중 하나가 자동차의 소음에 의한 것이다. 자동차의 소음은 자동차 주행 중에 발생하고 주행속도에 따라 발생원의 기여율이 달라지기 때문에 단적으로 표현하기 어렵다. 자동차 주행 중 타이어에 의한 소음은 타이어 트레드의 공기공명에 의한 소음과 구조진동에 의한 소음으로 구분되는데, 공기공명에 의한 소음은 타이어 트레드의 형태에 따른 소음으로 자동차 실내소음에 큰 영향을 미치지 않고 있으

나, 구조진동에 의한 소음은 노면의 요철이 타이어를 가진시켜 발생하는 소음으로 자동차 실내소음과 밀접한 관계가 있고 자동차 실내소음 저감을 위한 새시 설계의 기초자료이다.

타이어 구조진동소음에 관한 종래의 연구는 다음과 같다. W. F. Reiter, A. C. Eberhardt<sup>(1)</sup>는 정적인 상태에서 타이어 진동음향기구와 타이어 소음발생에 영향을 미치는 진동에 대하여 실험적인 방법으로 연구하였다. W. F. Reiter<sup>(2)</sup>는 타이어를 장력을 받는 원 환보로 모델링하여 음향파위에 관한 운동방정식을 유도하고, 트럭 타이어의 공진과 음장을 평가하였다. R. F. Keltie<sup>(3)</sup>는 타이어를 무한히 길고 완전하지 않은 원형셀로 가정한 모델을 제시하여, 진동과 음향방사 사이의 관계를 규명하고 실험 데이터와 일치하는 타이어 진동소음의 해석적인 모델을 개발하였다. M. Heckl<sup>(4)</sup>은 타이어를 링으로 가정하고 정적인 주행상태의 타이어에 가진력이 작용할 때의 소음발생과 음

† 책임저자 : 정희원, 순천제일대학 자동차기계학부  
E-mail : anvkbs@suncheon.ac.kr  
Tel : (061)740-1309, Fax : (061) 742-3027

향 주파수 대역에서 타이어의 진동형태와 방사특성에 대하여 연구하였다. 한편, 이 논문에서는 타이어 구조 진동소음이 자동차 도로소음(road noise)에 미치는 영향을 조사하기 위하여 새시 다이너모미터(chassis dynamometer)를 이용한 실내 자동차 도로소음을 측정·분석하였다. 또한, 실내 자동차 도로소음 분석결과를 통하여 저소음 타이어 설계를 위한 기초 자료를 확보하는데 연구의 목적이 있다.

## 2. 도로소음과 타이어

### 2.1 도로소음의 정의

도로소음이란 노면의 요철로 인한 가진입력이 타이어를 가진시키고 가진주파수 중 특정주파수가 자동차의 현가장치 및 차체의 진동특성에 대하여 선택적으로 발생하는 자동차 실내소음으로 자갈로나 거친노면의 아스팔트와 같이 불규칙한 노면의 요철에 의해 연속적으로 발생하는 협의의 도로소음과 쇠석로(brick road) 형태와 같이 일정간격의 요철을 갖는 노면을 주행할 때에 발생하는 소음, 콘크리트, 포장로의 이음새 등 단일 돌기를 통과할 때의 발생하는 단일 충격음 등이 있다. 도로소음의 주파수 영역은 대략 100~

300 Hz 사이이고 자동차나 타이어 등에 따라 다소 차이가 있다.

### 2.2 도로소음 전달경로

Fig. 1은 도로소음의 전달경로이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 도로소음의 발생은 노면에서의 외란이 타이어를 탄성 진동하고 현가계를 통해 자동차의 새시나 차체에 전달되어 발생한다. 노면의 외란이 불규칙한 주파수 특성을 갖고 있다고 가정한다면 노면의 외란이 타이어를 거쳐 현가계에 전달되는 과정에서 타이어는 고유진동수를 갖고 있기 때문에 노면의 외란이 현가계에 전달되는 진동성분은 타이어의 고유진동수 성분이 지배적이라고 할 수 있고, 현가계를 통해 자동차의 새시나 차체에 전달되는 과정도 마찬가지이다. 따라서, 노면의 외란이 차체까지 전달되는 진동은 타이어의 고유진동수 성분 중에서 특정주파수가 현가계, 새시 등의 진동특성을 고려하여 선택적으로 전달된다. 따라서, 도로소음은 타이어, 현가계, 차체의 진동과 차실내의 음향특성이 상호관계하여 발생한다. 일반적으로 자동차의 각 구성요소는 각각의 고유진동 특성을 갖고 있기 때문에 도로소음에 대한 기여도는 개개의 자동차에 따라 다르다.

### 2.3 도로소음과 타이어특성

도로소음의 저감에 기여하는 타이어의 특성으로는 타이어의 envelope 특성과 진동전달률, 고유진동수 등이 있다. 타이어의 envelope 특성을 향상하면 노면으로부터 가진입력을 저감된다. 타이어의 진동전달률을 작게하면 현가계의 가진입력이 작게 되고 차체 진동의 진폭이 감소하여 자동차 도로소음이 저감되며, 타이어의 고유진동수는 자동차 각부의 공진진동수, 차실내 공동공명 주파수와 일치하지 않아야 한다.

## 3. 실험장치 및 방법

자동차 도로소음에 관한 실험장치를 자동차와 타이어 이외에 무향실, 새시 다이너모메타, 계측장비 등으로 구성하였다. 주변의 암소음이 자동차 도로소음에 미치는 영향을 배제하기 위하여 무향실내에서 실험을 실시하였다. 새시 다이너모메타를 이용하여 자동차 도로소음을 측정하기 위하여 자동차 전륜의 오른쪽 타이어를 불규칙한 거친 노면이 설치된 드럼위에 설치하였다. 불규칙한 노면으로부터 타이어와 현가계를

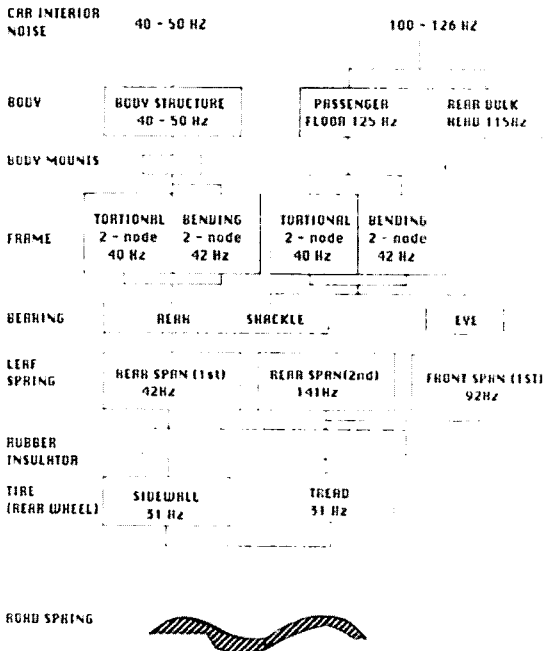


Fig. 1 Transfer paths of road noise for tire/road interaction

거쳐 자동차 새시에 전달된 가진력을 측정하기 위하여 전륜 오른쪽 차축과 새시에 3축 방향의 가속도를 측정할 수 있는 가속도계를 부착하였고, 자동차 도로소음을 측정하기 위해서는 자동차 실내에 마이크로폰과 소유계를 설치하였다. 가속도계와 마이크로폰으로부터 측정된 차축과 새시의 진동, 도로소음은 테이프 레코더에 기록되고 기록된 신호는 주파수 분석기를 이용하여 분석하였다.

이 연구에 이용된 자동차는 국내에서 생산하고 있는 소형 자동차를 대상으로 하였으며, 실험용 타이어는 실제 자동차 생산업체에 납품되어 쓰여지고 있는 현용 레디얼 타이어와 타이어 설계인자를 제조 공정상 무리 없는 범위내에서 변경한 타이어를 대상으로

하였다. 실험용 타이어의 크기와 용도는 145SR13, 155SR13, 185/70R13 등의 사계절용으로 변경된 설계 인자는 타이어 트레드 고무의 손실계수(loss factor,  $\tan \delta$ ), 경도 등이다. 또한, 일정한 실험조건과 정상적인 주행상태에서 실험을 실시하기 위하여 자동차를 80 km/h의 속도로 10분간 예비주행을 실시하였다. 자동차의 주행속도가 미치는 영향을 조사하기 위하여 주행속도를 40 km/h에서 80 km/h로 증가하였고, 타이어의 내부 공기압을 1.5 kgf/cm<sup>2</sup>에서 3.0 kgf/cm<sup>2</sup>로 증가시켰다. 한편, 타이어의 고유진동수가 도로소음에 미치는 영향을 조사하기 위하여 타이어의 고유진동수를 측정하였다. 타이어의 고유진동수는 타이어가 주변에 구속되지 않고 자유스러운 상태와 구속을 받고 타이어에 하중이 가해진 상태에서 측정하였다. 실험장치에 대한 개략도는 Fig. 2, 3과 같다.

공기압과 하중이 타이어 고유진동수에 미치는 영향을 조사하기 위하여 타이어의 공기압과 하중을 변화시켰고, 충격해머를 이용하여 타이어에 가해진 가진력과 그에 대한 응답신호를 증폭시킨 후 주파수 응답함수를 이용하여 타이어의 고유진동수를 측정하였다.

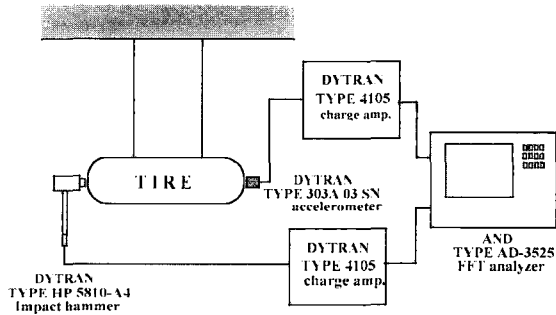


Fig.2 Schematic diagram for a tire vibration test by impact hammer under non-rotating and unloaded condition

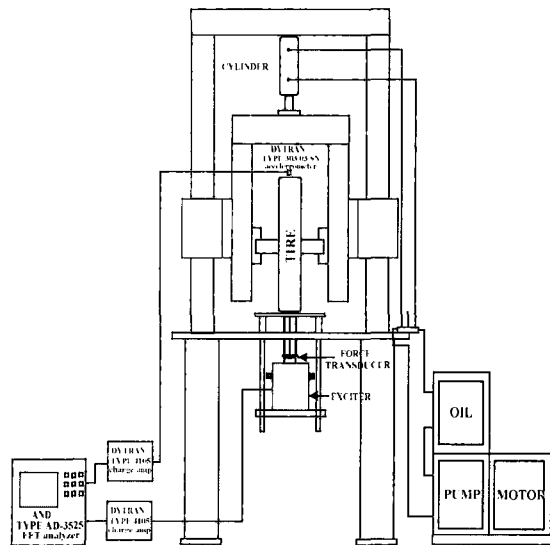


Fig.3 Schematic diagram for a vibration test of tire-wheel unit by impact hammer under non-rotating and loaded condition

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 타이어 고유진동수

타이어의 고유진동수는 충격해머를 이용한 타이어 가진력과 그에 상응하는 응답인 주파수 응답함수의 진폭으로부터 구하였다. 충격해머를 이용하여 측정된 데이터의 타이어 고유진동수의 기여도함수는 0.85 이

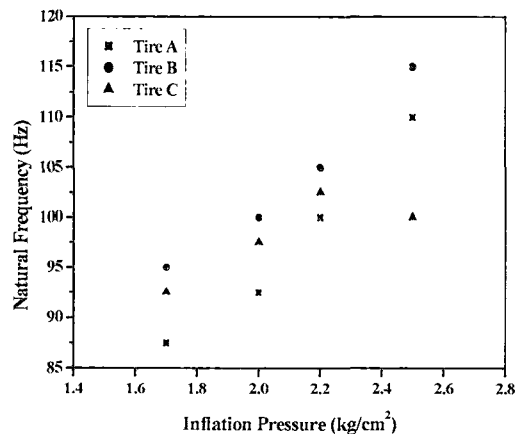


Fig.4 The variation of natural frequency of tire according to increasing inflation pressure

상의 값을 가지고 있어 측정된 데이터를 신뢰할 수 있었다.

타이어의 공기압과 하중을 증가시켜 고유진동수를 측정된 결과 Fig. 4, 5에서 보는바와 같이 선형적으로 고주파 대역으로 이동하였다. 이는, J. T. Tielking<sup>(5)</sup>이 타이어 고유진동수에 관해 제시한 이론식 (1)과 비교해 볼 때, 타이어의 고유진동수는 공기압과 하중이 강성과 밀접한 관계가 있고, 회전 각속도에 거의 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \overline{\omega}^2 = & \left[ \frac{4\Omega^2 s}{s^2+1} - \Omega^2 s^2 + \frac{EI}{\rho_s A r^4} s^2 (s^2-1)^2 \right. \\ & + \frac{T}{\rho_s A r^4} s^4 + \frac{1}{\rho_s A} (K_r + 2P_i \frac{b}{r}) s^2 \\ & \left. + \frac{1}{\rho_s A} K_t \right] \frac{1}{(s^2+1)} \end{aligned} \quad (1)$$

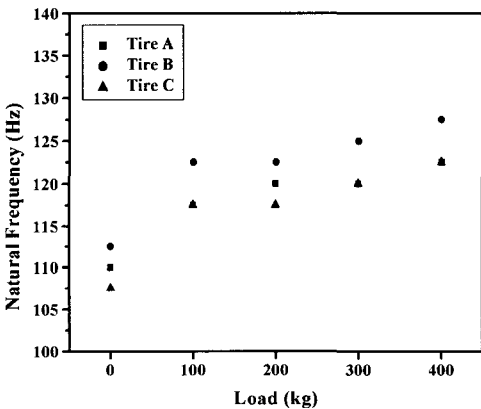


Fig. 5 The variation of natural frequency of tire according to increasing load (Inflation pressure : 2.5 kgf/cm<sup>2</sup>)

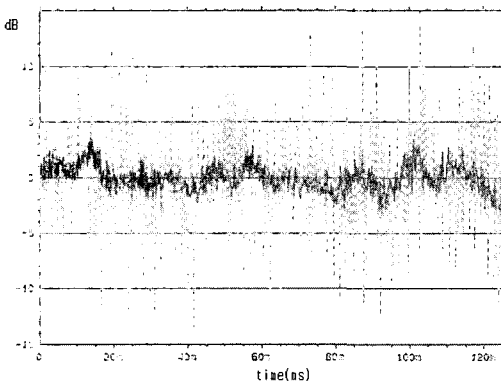


Fig. 6 Response of axle according to exciting tire road contact randomly (— 40 km/h, ---- 120 km/h)

식 (1)에서  $r$ 은 타이어 반경,  $b$ 는 트레드밴드의 폭,  $\Omega$ 는 회전각속도,  $E$ 는 트레드밴드의 탄성계수,  $I$ 는 관성모멘트,  $b_i$ 는 내부공기압,  $K_r, K_t$ 는 반경방향, 접선방향강성,  $s$ 는 진동 모우드,  $\overline{\omega}^2$ 은 고유진동수,  $\rho_s A$ 은 단위길이당 질량이다.

#### 4.2 도로소음

Fig. 6는 자동차의 주행속도를 40 km/h에서 120 km/h로 증가 시켰을 때 불규칙한 노면으로부터 가진된 차축의 진동을 시간영역에서 본 것이다. 차축은 불규칙한 노면의 영향으로 불규칙하게 진동하고 자동차의 주행속도가 증가하면 진폭이 현저하게 증가

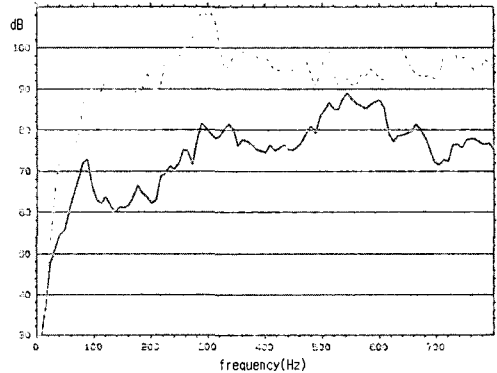


Fig. 7 Car axle vibration and chassis vibration spectrum (— 120 km/h (axle vibration), ---- 120 km/h (chassis vibration), air pressure : 2.4 kgf/cm<sup>2</sup>)

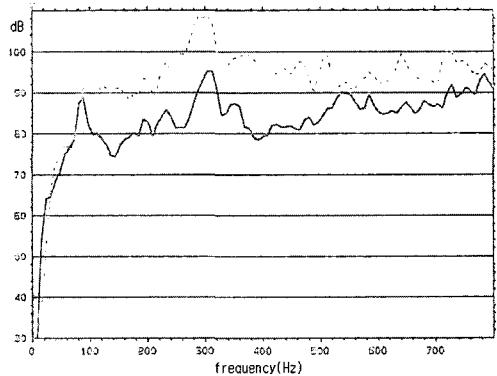


Fig. 8 Chassis vibration spectrum and automobile interior noise spectrum (— 120 km/h (chassis vibration), ---- 120 km/h (automobile interior noise), air pressure : 2.4 kgf/cm<sup>2</sup>)

하였다.

Fig. 7은 타이어의 공기압이 2.4 kgf/cm<sup>2</sup>이고, 자동차의 주행속도가 120 km/h일 때 불규칙 노면의 가진에 의한 자동차 차축과 새시의 진동 스펙트럼이다. Fig. 7에서 보는바와 같이 새시의 진동 스펙트럼은 차축과 동일한 주파수 대역에서 피크치를 보이고 있어 새시의 진동 스펙트럼은 차축에 영향을 받고 있다.

Fig. 8은 타이어의 공기압이 2.4 kgf/cm<sup>2</sup>이고, 자동차의 주행속도가 120 km/h일 때 불규칙 노면의 가진에 의한 새시의 진동 스펙트럼과 자동차 조수석에서 측정된 실내음의 스펙트럼이다. 새시의 진동에 의한 차실음은 100 Hz와 300 Hz에서 큰 피크치를 보이고 있으며 새시의 진동과 차실음의 피크치에 대한 주파수 대역이 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 불규칙한 노면의 가진 주파수가 타이어의 고유진동수에 영향을 받아 타이어 고유진동수 대역의 특정주파수로 현가계와 새시를 가진한 것에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 타이어의 공기압이 2.4 kgf/cm<sup>2</sup>이고, 자동차의 주행속도가 120 km/h 일때 불규칙한 노면의 가진에 의한 차축의 진동 스펙트럼과 자동차 조수석에서 측정된 실내음의 스펙트럼이다. Fig. 8에서 보는바와 같이 차실음은 차축의 진동스펙트럼에 큰영향을 받고 있음을 알 수 있으며, 차축의 진동 스펙트럼은 타이어의 고유진동수에 영향을 받고 있음을 고려해 볼 때 차실음은 타이어의 진동특성과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

Fig. 10은 타이어의 공기압이 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>이고, 자

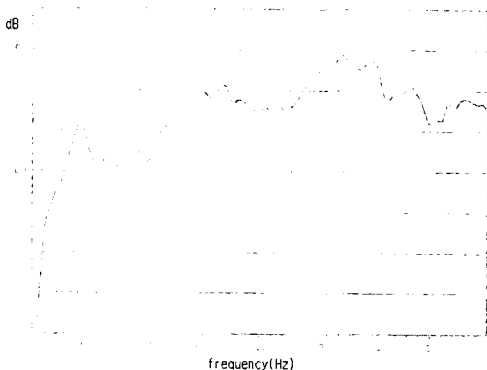


Fig. 9 Automobile axle vibration and interior noise spectrum(— 120 km/h(tire axle vibration), ---- 120 km/h(automobile interior noise) air pressure : 2.4 kgf/cm<sup>2</sup>)

동차의 주행속도가 50 km/h 일때 타이어의 1차 고유진동수와 도로소음과의 관계이다. 타이어의 고유진동수가 저주파수 대역보다 고주파 대역에 존재하면 도로소음의 레벨이 증가함을 알 수 있다. 따라서 자동차 도로소음을 저감하기 위해서는 타이어의 고유진동수를 적절하게 이동시켜야 할 것으로 판단된다. 타이어의 고유진동수를 저주파수 대역으로 이동하기 위해서는 타이어의 중량을 증가시키거나 강성을 감소시켜야 한다. 또한, 도로소음은 타이어, 현가계, 차체 등이 상호 작용하여 발생하고 개개의 자동차의 특성에 따라 다르기 때문에 자동차 도로소음이나 새시 진동음을 저감하기 위해서는 개개의 자동차 특성을 고려하여 타이어의 고유진동수 대역을 설정해야 할 것으로 판단된다.

Fig. 11은 타이어의 공기압이 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>이고, 자동차의 주행속도가 30 km/h 일때 타이어 트레드 고

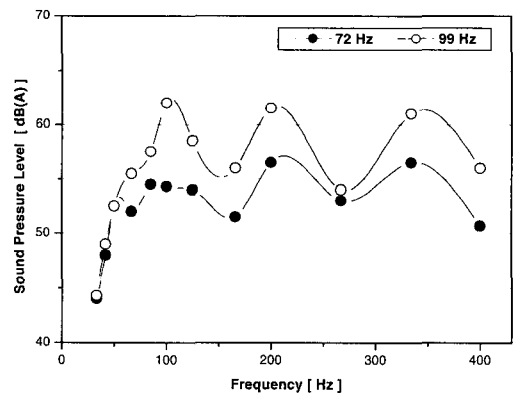


Fig. 10 Tire 1'st natural frequency and road noise(50 km/h, air pressure : 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>)

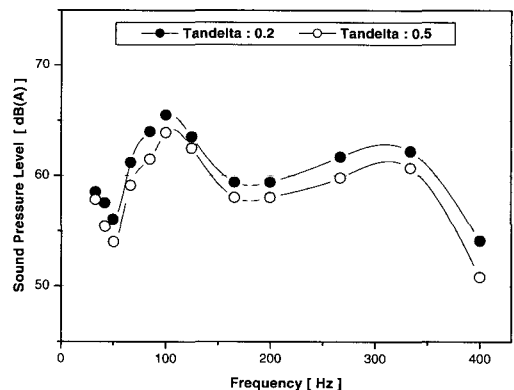


Fig. 11 Tire tread rubber loss factor and road noise(30 km/h, air pressure : 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>)

무물성과 도로소음과의 관계이다. 타이어 트레드의 고무물성은 타이어의 감쇠와 관련이 있으며 타이어의 감쇠가 증가하면 노면으로부터 차체에 전달하는 진동 전달률이 감소하기 때문에 자동차 도로소음이 감소한다. 타이어의 감쇠는 주파수 응답함수의 실수부에 Co-quad plot법<sup>(6)</sup>을 적용하여 식 (2)와 같은 관계로부터 구할 수 있다.

$$Q = \frac{\left(\frac{f_a}{f_b}\right)^2 + 1}{\left(\frac{f_a}{f_b}\right)^2 - 1} \quad (2)$$

식 (2)에서  $f_a$ 는 고유진동수 이상에서 인너턴스(inertance)가 극소치가 되는 주파수이고,  $f_b$ 는 고유진동수 이하에서 인너턴스가 극대치가 되는 주파수이다. 증폭인자(Q)와 감쇠율( $\zeta$ )과의 관계는  $\zeta = 1/2Q$ 이다.

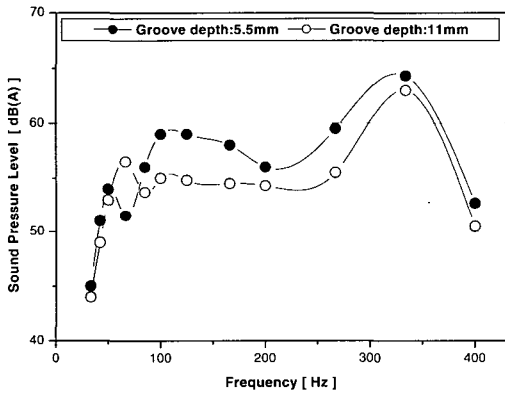


Fig. 12 Volume of Tire tread rubber and road noise(50 km/h, air pressure : 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>)

Fig. 12는 타이어의 공기압이 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>이고, 자동차의 주행속도가 50 km/h 일때 타이어 트레드 고무의 체적과 도로소음과의 관계이다. 자동차가 일정한 거리를 주행하여 타이어 트레드 그루브의 깊이(groove depth)가 신제품의 1/2 정도로 마모되며 자동차 도로소음이 증가하였는데, 이는 타이어가 마모되면 중량이 감소하고 타이어의 고유진동수가 고유파수 대역으로 이동하기 때문으로 판단된다.

Fig. 13, 14는 타이어의 공기압이 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>이고, 자동차의 주행속도가 50 km/h 일때 휠(wheel) 감쇠기와 타이어의 경도(hardness)가 도로소음에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 차축과 휠 사이에 노면으로부터의 가진력을 감소시키기 위하여 감쇠기를 삽입한 결과 도로소음이 감소하였다. 또한, 타이어 상부 트레드의 경도를 감소한 결과 도로소음이 감소하고 있어 자동차의 도로소음을 감소하기 위해서는 저경도의 상

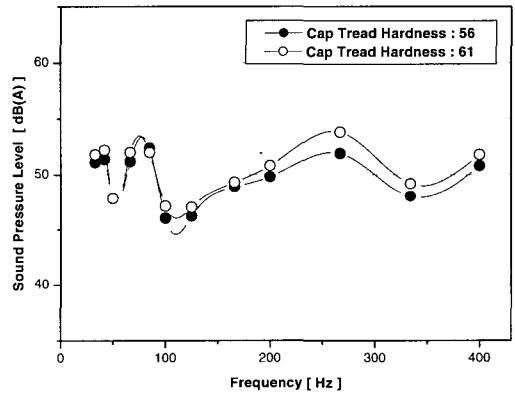


Fig. 14 Hardness of tire cap tread and road noise(50 km/h, air pressure : 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>)

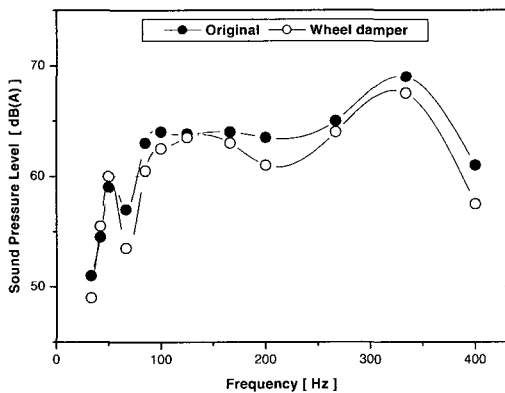


Fig. 13 Wheel damper and road noise (50 km/h, air pressure : 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>)

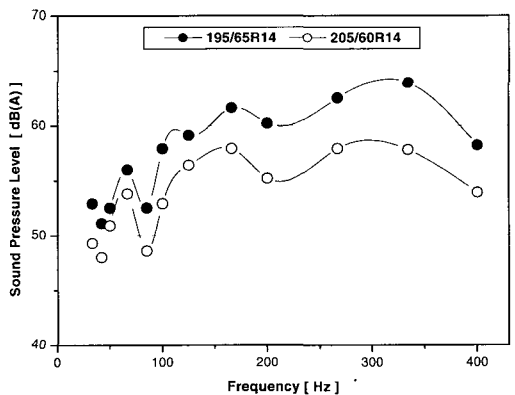


Fig. 15 Tire size and road noise(50 km/h, air pressure : 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>)

부 트레드를 채택하는 것이 유리할 것으로 생각된다.

Fig. 15는 타이어의 공기압이 2.0 kgf/cm<sup>2</sup>이고, 자동차의 주행속도가 50 km/h일 때 동일한 자동차에 접지폭이 다른 타이어를 장착하고 자동차 도로소음을 측정할 결과 접지폭이 큰 타이어가 작은 타이어에 비해 자동차 도로소음이 작게 나타났는데 이는 타이어 접지폭이 큰 타이어가 작은 타이어에 비해 고유진동수가 저주파수 대역에 존재하는데 기인한 것으로 생각되며 자동차에 따라 달라질 수도 있다.

## 5. 결 론

자동차 도로소음(road noise)의 저감과 새시설계를 위한 타이어 구조진동에 관한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 구하였다.

(1) 새시의 진동 스펙트럼은 차축에 영향을 받으며 차축의 고유진동수는 타이어의 고유진동수에 영향을 받는다. 즉, 타이어 고유진동 대역의 특정 주파수가 현가계와 새시를 가진하고 있음을 알 수 있다.

(2) 타이어의 고유진동수 대역을 이동하면 타이어의 고유진동수에 영향을 받고 있는 새시 진동음을 저감시킬 수 있다.

(3) 현가계, 차축 타이어 등의 상호작용에 의해 발생하는 도로소음은 자동차의 특성에 따라 다르며, 새시의 진동을 저감시키기 위해서는 자동차 특성을 고

려하여 현가계, 차축, 타이어 등의 고유진동수 대역을 설정하여야 한다.

## 참 고 문 헌

(1) Reiter, W. F. and Eberhardt, A. C., 1977, "Use of Coherence and Frequency Response Function to Locate and Define Vibration Noise Sources in Rolling Tires", SAE Paper 770027.

(2) Reiter, W. F., 1974, "Resonant Sound and Vibration Characteristics of a Truck Tire", Tire science and technology, TSTCA, Vol. 2, No. 2, pp. 130~141.

(3) Keltie, R. F., 1982, "Analytical Model of the Truck tire Vibration Sound Mechanism", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 71, No. 2, pp.359~367.

(4) Heckl, M., 1986, "Tire Noise Generation", Wear, 113, pp. 157~170.

(5) Tielking, J. T., 1965, "Plane Vibration Characteristics of a Pneumatic Tire Model," SAE Paper 650492.

(6) 김병삼, 이성철, 1995, "불규칙 이동하중을 받는 타이어의 구조 진동 소음 제어를 위한 음향방사 해석", 한국소음진동공학회논문집, 제 5 권, 제 2 호, pp. 169~181.