

자동차 도로소음 저감과 샤시 설계를 위한 타이어 구조진동에 관한 연구

송 윤 섭*

A study on the tire structure vibration for road noise reduction and chassis design

Youn-Seob Song*

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 was 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 this studies it has been confirmed that the specific ranges of natural frequency of tire exciting the suspension and chassis system. And the tire, axle and chassis natural frequency of automobile govern the road noise. Results show that material properties of tire and experimental condition are major parameter for shifting of tire natural frequency.

These results would be utilized as basic materials for the design of chassis design with parametric study, which enables a designer of an automobile to foresee the influence of the various design factors or operating conditions.

Key words : Chassis(샤시), Natural frequency(고유진동수), Random rough surface(불규칙한 거친 노면), Road noise(도로소음), Tire(타이어)

기호설명

$2b$: 트레드 밴드의 폭

EI : 트레드 및 벨트의 굽힘강성

K_r : 단위길이당 반경방향의 강성

K_t : 단위길이당 접선방향의 강성

P_i : 타이어 내부 공기압

Q : 증폭인자

r : 타이어 반경

s : 타이어 진동 모드 수

T : 공기압에 의한 벨트의 장력

ρ_A : 트레드 및 벨트의 단위길이당 질량

* 부산수산대학교 공대 기계공학과(정회원)

Ω :타이어의 회전각속도

ω^2 :타이어의 고유진동수

1. 서 론

심각해지고 있는 환경공해 문제는 이제 국부적인 지역환경을 벗어나 지구환경적인 문제로 확산되고 있는 실정이다. 이와 관련하여 자동차와 관련된 환경문제는 매우 광범위하나, 발생범위 측면에서 구분하여 보면 크게 대도시 환경문제, 광역환경문제 그리고 지구환경문제가 있으며,⁽¹⁾ 이중 대도시 환경문제는 자동차 배출가스에 의한 대기오염, 소음, 진동 등 매우 다양하다. 특히 자동차 소음은 인간에게 정신적, 신체적, 생활상의 피해를 주는 실생활과 밀접한 연관을 가지는 복합적인 환경문제로써 문명의 이기으로써의 자동차의 기능과 쾌적환경의 추구라는 측면에서 매우 중요한 연구과제가 된다.

자동차의 소음은 자동차 주행 중에 발생하고 주행속도에 따라 발생원의 기여율이 달라지기 때문에 이를 단적으로 표현하기가 어렵다. 자동차 주행 중 타이어에 의한 소음은 타이어 트레드의 공기공명에 의한 소음과 구조진동에 의한 소음으로 구분된다. 이중 공기공명에 의한 소음은 타이어 트레드의 형태에 따른 소음으로 자동차 실내소음에 큰 영향을 미치지 않으나, 구조진동에 의한 소음은 노면의 요철이 타이어를 가진시켜 발생하는 소음으로 자동차 실내소음과 밀접한 관계를 가지며 자동차 실내소음 저감을 위한 샤시 설계의 기초자료가 되므로 이러한 문제에 대비를 하여야 한다.

타이어 구조진동소음에 관한 지금까지의 연구결과를 살펴보면 W. F. Reiter, A. C. Eberhardt⁽²⁾는 실험적인 방법으로 정적인 상태에서 타이어 진동음향기구와 타이어 소음발생에 영향을 미치는 진동에 대하여 연구를 수행하였다. W. F. Reiter⁽³⁾는 타이어를 장력을 받는 원환보로 모델링하여 음향파위에 관한 운동방정식을 유도하고, 트럭 타이어의 공진과 음장을 평가하였다. A. C. Eberhardt⁽⁴⁾는 여러가지 노면 상태에 대한 타이어 진동과 음향 응답을 조사하였고, J. Pope, W. C. Reynolds⁽⁵⁾는 타이어의 소음이 타이어 회전에 의한 소음과 테스트 드럼에 의한 소음으로 나누어지고 있음을 조사하였다. S. P. Landers⁽⁶⁾는 음압을 트레드의 설계 형태, 타이어의 동적응답, 타이어의 속도로 부터 구해진 힘 합수로 모델링하여 타이어의 음향기구를 트레드부의 원주방향 굽힘강성의 변화에 의한 힘합수의 진동기구로

보고하였다. K. J. Plotkin⁽⁷⁾은 타이어 카카스(car-cass)의 동적 거동을 기초로 한 소음모델을 공식화하였으며, N. A. Nilsson⁽⁸⁾은 노면에 의한 타이어 진동의 직접적인 방사에 기인한 타이어 소음은 1000Hz 이하의 주파수 대역에 분포하고 있음을 보고하였다. R. F. Keltie⁽⁹⁾는 타이어를 무한히 길고 완전하지 않은 원형셀로 가정한 모델을 제시하여, 진동과 음향방사 사이의 관계를 규명하고 실험 데이터와 일치하는 타이어 진동소음의 해석적인 모델을 개발 제시하였다. 최근에 M. Heckl⁽¹⁰⁾은 타이어를 링으로 가정하고 정적인 주행상태의 타이어에 가진력이 작용할 때의 소음발생과 음향 주파수 대역에서 타이어의 진동형태와 방사특성에 대하여 연구하였으며, D. P. Hong, B. S. Kim⁽¹¹⁾은 접지면에서 트레드 밴드의 가진을 조화이동하중을 받는 타이어로 가정하고 가진력을 받는 타이어의 음향파위를 예측하고자 하였다. M. Muthukrishnan⁽¹²⁾은 타이어의 재질변화가 타이어 소음에 미치는 영향을 파악하기 위하여 트레드와 사이드월 고무의 손실계수와 탄성계수의 변화에 대한 음압을 비교하였다. D. Tetlow⁽¹³⁾는 가속주행(Pass-by) 시험법을 통하여 차량의 하중과 속도, 노면 조건등이 타이어 진동소음에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, W. A. Leasure, E. K. Bender⁽¹⁴⁾는 타이어와 노면의 상호작용에 의한 소음에 대하여 연구하였다. D. Ronneberger⁽¹⁵⁾는 타이어/노면에 의한 소음 방사의 방향성은 타이어/노면 접지면에 위치한 음원의 기여도와 분포에 영향을 받고 있는 것으로 보고하고 있다. 이와같이 자동차 소음저감을 위한 타이어 구조진동소음에 관한 많은 연구가 계속되고 있으나, 샤시설계를 위한 기초자료에 관한 연구는 아직도 미흡한 실정으로 보다 많은 연구가 계속되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 타이어 구조진동소음이 자동차 도로소음(road noise)에 미치는 영향을 조사하여 자동차 도로소음을 개선하기 위한 지침을 제시하고, 자동차 샤시 및 차축 타이어의 고유진동수 분석과 도로소음 분석을 통하여 자동차 실내소음의 저감을 위한 샤시 설계를 위한 기초자료를 확보하고자 하였다.

2. 도로소음과 타이어

2-1. 도로소음의 정의

도로소음에는 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, 쇄석로(brick road) 형태와 같이 일정간격의 요철을 갖는 노면을 주행할 때 발생하는 소음, 콘크리트, 포장로의 이음새 등 단일 물기를 통과할 때의 발생하는 단일 충격음 등이 있다. 도로소음의 주파수 영역은 대략 100~300 Hz이나, 자동차나 타이어 등에 따라 다소 차이가 있다.

2-2. 도로소음 전달경로

Fig. 1은 도로소음의 전달경로를 나타낸 그림으로 도로소음은 노면에서의 외란이 타이어를 탄성 진동하고 현가계를 통해 자동차의 사시나 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 지배적이라 할 수 있고, 현가계를 통해 자동차의 사시나 차체에 전달되는 과정도 마찬가지이다. 따라서, 노면의 외란이 차체까지 전달되

는 진동은 타이어의 고유진동수 성분 중에서 특정주파수가 현가계, 사시 등의 진동특성을 고려하여 선택적으로 전달되므로 도로소음은 타이어, 현가계, 차체의 진동과 차체내의 음향특성이 상호관계하여 발생한다. 일반적으로 자동차의 각 구성요소는 고유진동 특성을 갖고 있기 때문에 도로소음에 대한 기여도는 개개의 자동차에 따라 다르다.

2-3. 도로소음과 타이어특성

도로소음의 저감에 기여하는 타이어의 특성으로는 타이어의 Envelope 특성과 진동전달을 그리고 고유진동수 등을 들 수 있다. 타이어의 Envelope 특성을 향상하면 노면으로부터 가진입력을 저감된다. 타이어의 진동전달을 작게하면 현가계의 가진입력이 작게되고 차체 진동의 진폭이 감소하여 자동차 도로소음이 저감되며, 타이어의 고유진동수는 자동차 각부의 공진진동수, 차체내 공동공명 주파수와 일치하지 않아야 한다.

3. 실험장치 및 방법

자동차 도로소음저감과 사시설계를 위한 타이어 구조 진동에 관한 자료를 획득하기 위하여 자동차와 타이어, 계측장비 등으로 실험장치를 구성하여, 주변의 압소음이 자동차 도로소음에 미치는 영향을 배제하기 위하여 실내에서 실험을 수행하였다. 주변의 압소음은 20 dB(A), 요철은 불규칙한 거친 노면으로 설치하였으며, 자동차 도로소음을 측정하기 위하여 자동차 전륜의 오른쪽 타이어를 불규칙한 거친 노면이 설치된 드럼위에 설치하였다. 불규칙한 노면으로부터 타이어와 현가계를 거쳐 자동차 사시에 전달된 가진력을 측정하기 위하여 전륜 오른쪽 차축과 사시에 3축 방향의 가속도를 측정할 수 있는 가속도계를 부착하였으며, 자동차 도로소음을 측정하기 위하여 자동차 실내에 마이크로폰과 소음계를 설치하였다. 가속도계와 마이크로폰으로부터 측정된 차축과 사시의 진동, 도로소음은 테이프 레코더에 기록되고 기록된 신호는 주파수 분석기를 사용하여 분석하였다.

본 연구에 사용된 자동차는 국내에서 생산되고 있는 소형 자동차를 대상으로 하였으며, 실험용 타이어는 시판되고 있는 레디얼 타이어로 타이어의 크기와 용도는 145SR13, 155SR13, 185/70R13 등의 사계절용을 대상으로 하였다. 일정한 실험조건과 정상적인 주행상태에서 실험을 실시하기 위하여 승용차를 80 km/h의 속

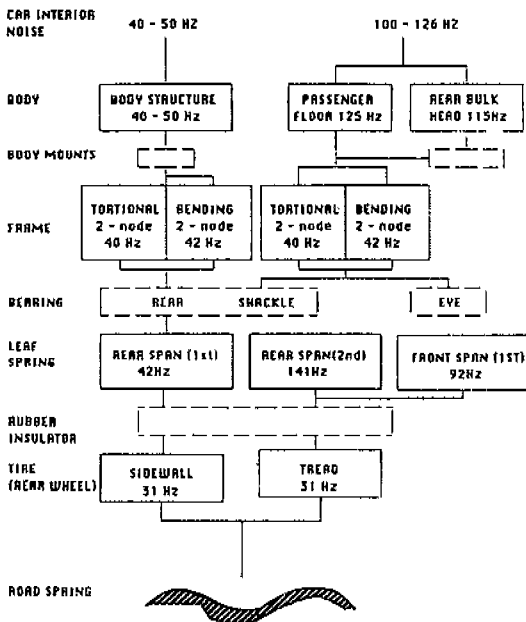


Fig. 1 Transfer path of road noise for tire/road interaction

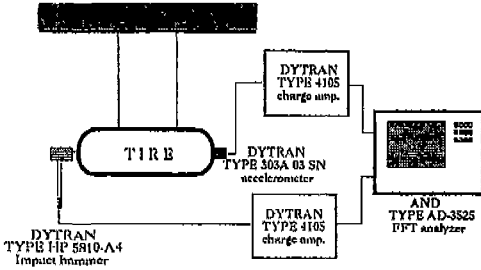


Fig. 2 Schematic diagram for a vibration test of tire by impact hammer under non-rotating and unloaded condition

도로 10분간의 예비주행을 실시하였다. 또한 자동차의 주행속도가 미치는 영향을 조사하기 위하여 주행속도를 40 km/h에서 80 km/h로 증가하였으며, 타이어의 내부 공기압을 1.5 kgf/cm²에서 3.0 kgf/cm²로 증가시켰다. 한편, 타이어의 고유진동수가 도로소음에 미치는 영향을 조사하기 위하여 타이어의 고유진동수를 측정하였다. 타이어의 고유진동수는 타이어가 주변에 구속되지 않는 자유로운 상태에서 측정하였으며, 실험장치의 개략도는 Fig. 2와 같다.

공기압이 타이어 고유진동수에 미치는 영향을 조사하기 위하여 타이어의 공기압을 변화시켰으며, 충격해머를 이용하여 타이어에 가해진 가진력과 그에 대한 응답신호를 증폭시킨 후 주파수 응답함수를 이용하여 타이어의 고유진동수를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 타이어 고유진동수

Fig. 3은 충격해머를 이용하여 타이어를 가진시킨 가진력과 그에 상응하는 응답에 대한 주파수 응답함수의 진폭과 기여도함수를 나타낸 그림이다. 충격해머를 이용하여 측정한 데이터의 타이어 고유진동수의 기여도함수가 0.85 이상의 값을 가지고 있어 측정한 데이터가 신뢰도를 가짐을 알 수 있었다.

타이어의 공기압을 증가시켜 고유진동수를 측정한 결과 Fig. 4에서 보는바와 같이 고유진동수가 선형적으로 고주파 대역으로 이동하였다. 이와같은 실험결과를 타이어 고유진동수에 대한 J. T. Tielking⁽¹⁶⁾이 제시한 이론식(1)과 비교해 볼 때, 타이어의 고유진동수는 공기압이나 강성과 밀접한 관계가 있으며, 회전 각속도에 거의 영향을 받지 않고 있음을 알 수 있다.

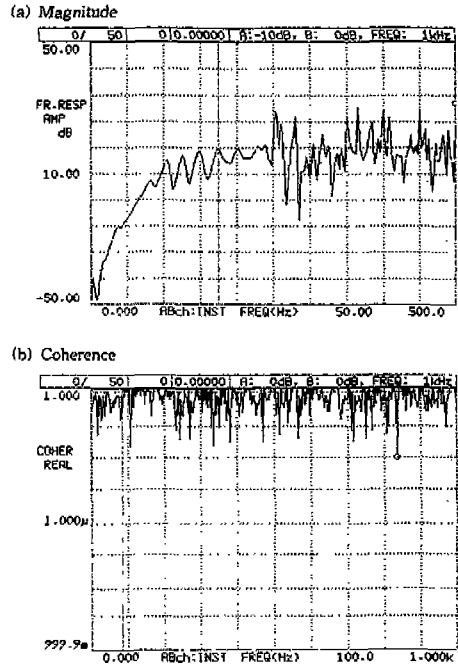


Fig. 3 Magnitude and coherence of frequency response function of tire system vibration test by impact hammer

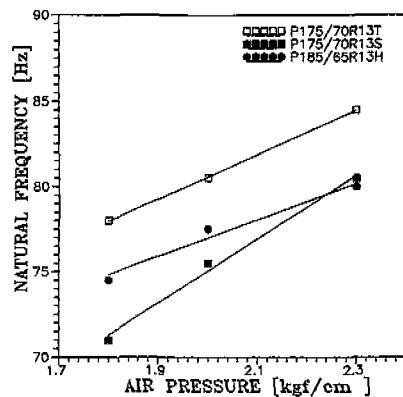


Fig. 4 Variation of natural frequency of tire with increasing air pressure

$$\bar{\omega}^2 = \left[\frac{4\Omega^2 s}{s^2 + 1} - \Omega^2 s^2 + \frac{EI}{\rho_s A r^4} s^2 (s^2 - 1)^2 + \frac{T}{\rho_s A r^4} s^4 + \frac{1}{\rho_s A} \left(K_r + 2Pi \frac{b}{r} \right) s^2 + \frac{1}{\rho_s A} K_t \right] \frac{1}{(s^2 + 1)} \quad (1)$$

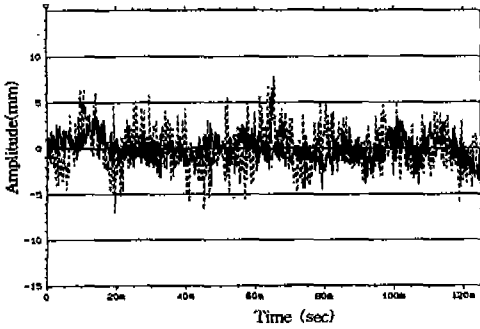


Fig. 5 Response of axle according to exciting tire road contact randomly

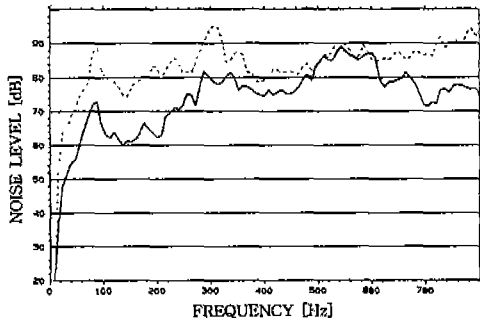


Fig. 6 Car axle vibration and chassis vibration spectrum
(car speed: — 120 km/h (axle vibration),
--- 120 km/h (chassis vibration)
air pressure: 2.4 kgf/cm²)

4-2. 도로소음과 구조 진동

Fig. 5는 자동차의 주행속도를 40 km/h에서 80 km/h로 증가 시켰을 때 불규칙한 노면으로 부터 가진 된 차축의 진동을 시간영역으로 나타낸 그림이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 차축은 불규칙한 노면의 영향으로 불규칙하게 진동하고 자동차의 주행속도가 증가하면 진폭이 현저하게 증가하였다.

Fig. 6은 타이어의 공기압이 2.4 kgf/cm²이고, 자동차의 주행속도가 120 km/h일때 불규칙 노면의 가진에 의한 자동차 차축과 샴시의 진동 스펙트럼을 나타낸 그림이다. Fig. 6에서 보는바와 같이 샴시의 진동 스펙트럼은 차축과 동일한 주파수 대역에서 피크치를 보이고 있어 샴시의 진동 스펙트럼은 차축에 영향을 받고 있다.

Fig. 7은 타이어의 공기압이 2.4 kgf/cm²이고, 자

동차의 주행속도가 120 km/h일때 불규칙 노면의 가진에 의한 샴시의 진동 스펙트럼과 자동차 조수석에서 측정 한 실내음의 스펙트럼이다. 그림에서 보는 바와 같이 샴시의 진동에 의한 차실음은 100 Hz와 300 Hz에서 큰 피크치를 보이고 있으며 샴시의 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 샴시를 가진한 것에 기인하는 것으로 생각된다.

Fig. 8은 타이어의 공기압이 2.4 kgf/cm²이고, 자동차의 주행속도가 120 km/h일때 불규칙한 노면의 가진에 의한 차축의 진동 스펙트럼과 자동차 조수석에서 측정 한 실내음의 스펙트럼이다. Fig. 8에서 보는바와

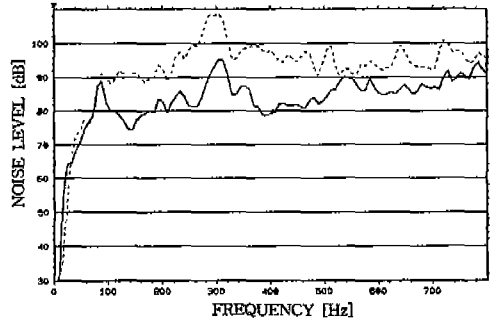


Fig. 7 Chassis vibration spectrum and car interior noise spectrum
(car speed: — 120 km/h (chassis vibration),
--- 120 km/h (car interior noise)
air pressure : 2.4 kgf/cm²)

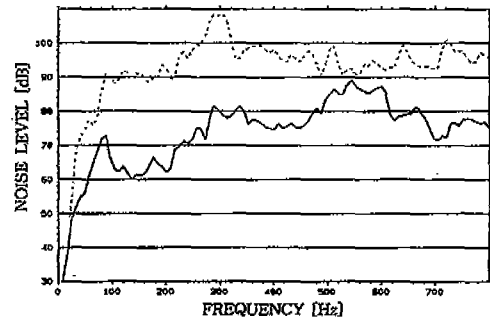


Fig. 8 Car axle vibration and car interior noise spectrum
(car speed: — 120 km/h (tire axle vibration),
--- 120 km/h (car interior noise)
air pressure : 2.4 kgf/cm²)

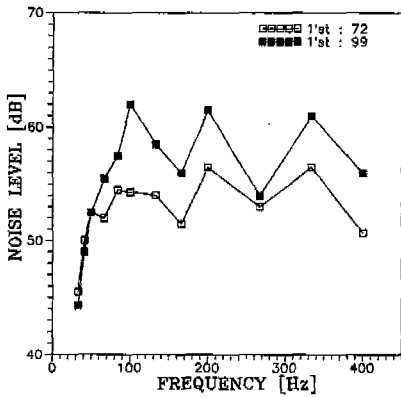


Fig. 9 Tire 1st natural frequency and road noise level
(car speed:50 km/h, air pressure:2.0 kgf/cm²)

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. 9는 타이어의 공기압이 2.0 kgf/cm²이고, 자동차의 주행속도가 50 km/h일때 타이어의 1차 고유진동수와 도로소음과의 관계이다. 그림에서 보는 바와 같이 타이어의 고유진동수가 저주파 대역보다 고주파 대역에 존재하면 도로소음의 레벨이 증가함을 알 수 있다. 그러므로 자동차 도로소음을 저감하기 위해서는 타이어의 고유진동수를 저주파 대역으로 이동시키야 하

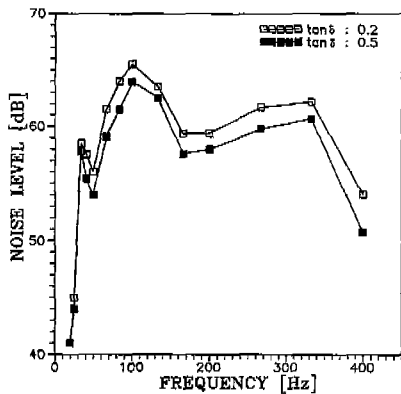


Fig. 10 Tire tread rubber loss factor and road noise level
(car speed:30 km/h, air pressure:2.0 kgf/cm²)

고, 고유진동수를 저주파 대역으로 이동하기 위해서는 타이어의 중량을 증가시키고 강성을 감소시켜야 한다. 또한, 도로소음은 타이어, 현가계, 차체 등이 상호작용하여 발생하고 개개의 자동차의 특성에 따라 다르기 때문에 자동차 도로소음이나 샤시 진동음 등을 저감하기 위해서는 개개의 자동차 특성을 고려하여 고유진동수 대역을 설정하여야 한다.

Fig. 10은 타이어의 공기압이 2.0 kgf/cm²이고, 자동차의 주행속도가 30 km/h일때 타이어 트레드 고무물성과 도로소음과의 관계를 나타낸 그림이다. 타이어 트레드의 고무물성은 타이어의 감쇠와 관련이 있으며 타이어의 감쇠가 증가하면 노면으로부터 차체에 전달하는 진동 전달율이 감소하기 때문에 자동차 도로소음이 감소한다. 타이어의 감쇠는 주파수 응답함수의 실수부에 Co-quad plot법⁽¹⁷⁾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 고유진동수이상에서 인너턴스(inertance)의 실수함수이며 극소치가 되는 주파수이고, f_b 는 고유진동수 이하에서 극대치가 되는 주파수이다. 증폭인자(Q)와 감쇠율(ζ)과의 관계는 $\zeta = 1/2Q$ 이다.

Fig. 11은 타이어의 공기압이 2.0 kgf/cm²이고, 자동차의 주행속도가 50 km/h일때 타이어 트레드 고무

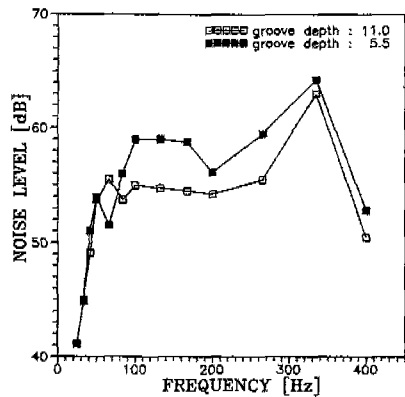


Fig. 11 Volume of Tire tread rubber and road noise level
(car speed:50 km/h, air pressure:2.0 kgf/cm²)

의 체적과 도로소음과의 관계를 나타낸 그림이다. 자동차가 일정한 거리를 주행하여 타이어 트레드 그루브의 깊이(groove depth)가 신제품의 1/2 정도로 마모되면 자동차 도로소음이 증가하였다. 이는 타이어가 마모되면 중량이 감소하고 타이어의 고유진동수가 고주파수 대역으로 이동하기 때문으로 생각된다.

Fig. 12, Fig. 13은 타이어의 공기압이 2.0 kgf/cm²이고, 자동차의 주행속도가 50 km/h일때 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 상부 트레드를 채택하는 것이 유리할 것으로 생각된다.

Fig. 14는 타이어의 공기압이 2.0 kgf/cm²이고, 자동차의 주행속도가 50 km/h일때 동일한 자동차에 접지폭이 다른 타이어를 장착하고 자동차 실내소음을 측정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 접지폭이 큰 타이어가 작은 타이어에 비해 자동차 실내소음레벨이 작게 나타났는데, 이는 타이어 접지폭이 큰 타이어가 접지폭이 작은 타이어에 비해 고유진동수가 저주파수 대역에 존재하는데 기인한 것으로 생각되며 자동차에 따라 달라질 수도 있다.

참고로 타이어의 공기전달음은 노면이 편평한 상태에서는 도로소음에 일정부분 기여할 수 있으나, 본 연구에서의 노면조건은 거칠은 표면(Rough surface)이었

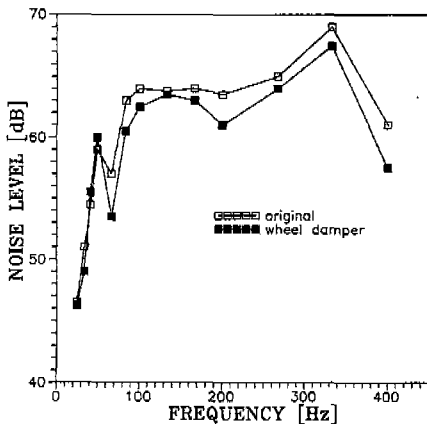


Fig. 12 Wheel damper and road noise level (car speed:50 km/h, air pressure:2.0 kgf/cm²)

기 때문에 공기전달음에 대한 영향이 없었으며, 공기전달음과 구조전달음의 주파수 대역이 달라 쉽게 공기전달음을 배제시킬 수 있었다.

5. 결 론

자동차 도로소음(road noise) 저감과 사시설계를 위한 타이어 구조진동에 관한 실험적 고찰을 통해 다음과 같은 결론은 얻었다.

- 1) 사시의 진동 스펙트럼은 차축에 영향을 받으며 차축의 고유진동수는 타이어의 고유진동수에 영향을 받고 있다. 즉, 타이어 고유 진동수 대역의 특정 주파수가

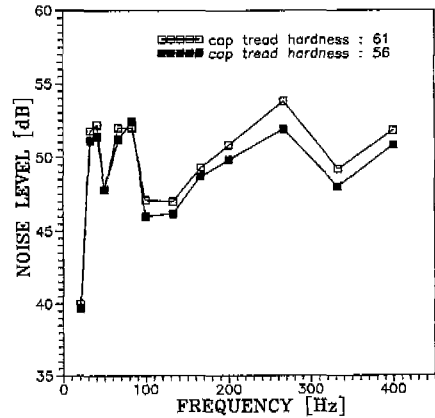


Fig. 13 Hardness of tire cap tread and road noise level(car speed:50 km/h, air pressure:2.0 kgf/cm²)

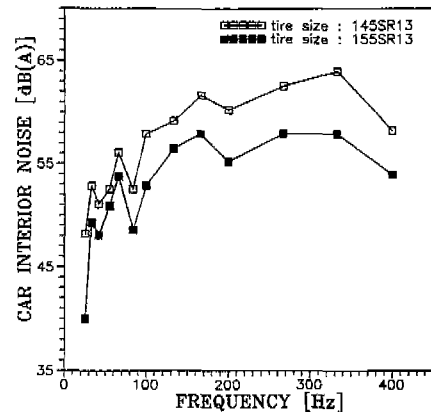


Fig. 14 Tire size and road noise level (car speed:50 km/h, air pressure:2.0 kgf/cm²)

현가계와 샤시를 가진하고 있음을 알 수 있다.

2) 타이어의 고유 진동수 대역을 저주파 대역으로 이동하면 타이어의 고유진동수에 영향을 받고 있는 샤시 진동음을 저감시킬 수 있다.

3) 현가계, 차축 타이어 등의 상호작용에 의해 발생하는 도로소음은 자동차의 특성에 따라 다르며, 샤시의 진동을 저감하기 위해서는 자동차 특성을 고려하여 현가계, 차축, 타이어 등의 고유진동수 대역을 설정하여야 한다.

참고문헌

1. 端山均, "자동차와 환경 자원에너지 문제", 자동차 기술, Vol.46, No.7, pp.16-21, 1992.
2. W. F. Reiter, A. C. Eberhardt, "Use of coherence and frequency response function to locate and define vibration noise sources in rolling tires", SAE Paper 770027, 1977.
3. W. F. Reiter, "Resonant sound and vibration characteristics of a truck tire", Tire science and technology, TSTCA, Vol.2, No.2, pp.130-141, 1974.
4. A. C. Eberhardt, "The truck tire vibration sound mechanism", PH. D. Dissertation, North carolina state university, Rayleigh, North carolina, Ann arbor, Michigan, 1977.
5. J. Pope, W. C. Reynolds, "Tire noise generation: The roles of tire and roll", SAE Paper 762023, 1976.
6. S. P. Lander, "A vibration sound mechanism of lug type tread designs", SAE Paper 762025, 1976.
7. K. J. Plotkin, "A unified set of models for tire/road noise generation", U. S. Environmental Protection Agency technical report data, WR 81-26, 1981.
8. N. A. Nilson, "On generation mechanisms for external tire noise", Proceedings of inter-noise conference, Florida, pp.245-252, 1980.
9. R. F. Keltie, "Analytical model of the truck tire vibration sound mechanism", J. Acoust. Soc. Am., 71(2), pp.359-367, Feb. 1982.
10. M. Heckl, "Tire noise generation", Wear, 113, pp.157-170, 1986.
11. D. P. Hong, B. S. Kim, "Prediction of sound radiation from tire treadband vibration", Proceedings of 1'st international conference on motion and vibration control, Yokohama, pp.1006-1013, 1992.
12. M. Muthukrishnan, "Effects of material properties on tire noise", SAE Paper 900762, 1990.
13. D. Tetlow, "Truck tire noise", J. Sound Vib., pp.17-23, Aug. 1971.
14. W. A. Leasure, E. K. Bender, "Tire-road interaction noise", J. Acoust. Soc. Am, Vol.58, No.1, pp.39-50, July, 1975.
15. D. Ronnerberger, "Directivity of tire/road radiation", Proceedings of inter-noise 85 conference, Munich, pp.275-278, 1985.
16. J. T. Tielking, "Plane vibration characteristics of a pneumatic tire model", SAE Paper 650492, 1965.
17. 한국과학기술원 산학협동공개강좌, 모우드해석:이론 측정기술 및 응용, pp.2-50~2-53, 1994.