

# 음향진동 상반 정리를 이용한 차량 전달 특성 분석 기법 구축 A Analysis on Road Noise Based on Vibro-Acoustic Reciprocity Theory for Automotive Tire

박종호\* · 이상권† · 황성욱\*\*

Jongho Park, Sangkwon Lee, Sungwook Hwang

## 1. 서 론

자동차의 소음의 원인 규명은 저 소음 자동차의 개발에 대한 기본 요구이며 원인의 명확한 규명은 소음 개선의 지름길이 된다. 일반적으로 자동차 타이어의 주요소음은 두 가지로 분류되는데 고체 전달음인 로드노이즈(Road-noise)와 공기전달음인 타이어 패턴노이즈(Pattern-noise)로 분류된다. 패턴소음은 주로 500Hz 이상에서 발생하며 로드노이즈는 그 이하에서 주로 발생한다. 패턴소음은 타이어 자체 문제이지만 로드노이즈는 타이어 및 차체와 타이어의 연관된 문제로서 분석과 개선이 난해하다. 본 연구에서는 로드노이즈에 대한 타이어영향을 분석하기 위해서 음향 상반정리 (Vibro-Acoustic Reciprocity) 기술을 도입하여 차량 실내에서 로드노이즈의 기여도를 분석하고 향후 타이어 소음 개선에 대한 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 차량 전달 특성 분석 기본 이론

차량 전달 특성을 분석하기 위한 기본 적인 필요 조건으로써 타이어의 전달함수를 구해야 한다. Fig.1 과 같이 타이어의 선단부(Leading Edge)의 반지름방향(r) 및 접선방향(t)과 차축과 연결되는 부분의 휠 부근에 가속도센서를 부착하고 휠과 가장 가까운 차축부분을 임팩 해머로 가진하면 두 가지의 전달함수를 얻게 된다. 식(1)과 (2)의 전달함수에 Fig.1 의 아래의 그림과 같이 상반성이론 (Reciprocity Theory)을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} a_r \\ a_t \end{pmatrix}_{Tire\ Leading\ Edge} = \begin{bmatrix} H_{rx} & H_{ry} \\ H_{tx} & H_{ty} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix}_{Axle} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix}_{Wheel\ Near\ Axle} = \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} \\ H_{yx} & H_{yy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix}_{Axle} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix}_{Axle} = \begin{bmatrix} H_{xr} & H_{xt} \\ H_{yr} & H_{yt} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_r \\ F_t \end{pmatrix}_{Tire\ Leading\ Edge} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} a_x \\ a_y \end{pmatrix}_{Axle} = \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} \\ H_{yx} & H_{yy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \end{pmatrix}_{Wheel\ Near\ Axle} \quad (4)$$

다음으로는 Fig.2와 같이 타이어를 탈거하고 차축과 휠이 연결되는 부위에 가속도 센서를 장착하고 음향가진기(Q-source)를 이용하여 차량 실내의 음압 측정위치에서 Monopole Source로 가진하면 다음과 같은 전달함수가 측정되며, 이를 음향진동상반 정리를 이용하여 정리하면 다음과 같다.

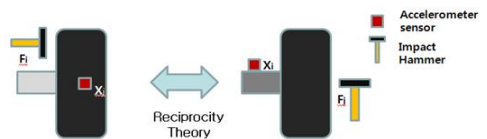


Fig. 1 Tire transfer function & Reciprocity Test

† 교신저자; 정회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : sangkwon@inha.ac.kr

Tel : 032-860-7305, Fax : 032-868-1716

\* 인하대학교 기계공학과

\*\* 넥센타이어

$$\begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}_{\text{Vibro-Acoustic Transfer Function}} = \begin{pmatrix} \ddot{x}_x \\ Q \\ \ddot{x}_y \\ Q \end{pmatrix}_{\text{Axle Near Wheel}} = - \begin{pmatrix} p \\ F_x \\ p \\ F_y \end{pmatrix}_{\text{Vehicle inside}} \quad (5)$$

이러한 방법을 통해 측정된 행렬 및 벡터 형태의 세가지의 전달함수를 수학적으로 계산하여 정리하면 타이어의 선단부에서 차량 내부의 음압측정지점까지의 경로를 가지는 단일의 전달함수를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} [H]_{\text{Transfer Function}}^{\text{Vehicle}} &= \begin{bmatrix} H_{xr} & H_{xt} \\ H_{yr} & H_{yt} \end{bmatrix}_{\text{Tire Leading Edge}} \\ &\times \begin{bmatrix} H_{xx} & H_{xy} \\ H_{yx} & H_{yy} \end{bmatrix}_{\text{Wheel Near Axle}}^{-1} \times \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}_{\text{Vibro-Acoustic Transfer Function}} \end{aligned} \quad (6)$$

다음 단계는 주행 중 타이어와 노면 형상을 측정하고 이를 타원체 요철화 한 후 타이어의 선단부에서의 상호작용에 의해 발생하는 힘을 계산하는 것이다. 이 힘을 구하기 위해 실제 주행 노면의 적용하는 이론은 Hertzian의 충격 모형이다. Hertzian의 충격 모형을 이용하여 충돌하는 구의 접촉면에서의 압력분포와 충격력을 구하기 위해서 탄성체 역학을 이용하여 유도된 방정식으로 충돌하는 두 탄성체의 충돌에 대한 역학적인 관계를 해석한다. 타이어와 노면의 요철이 충돌할 때 타이어의 선단부에서 충격 힘이 발생한다. 이러한 관계를 수식적으로 표현하면 식(7)과 같고, 이를 개략적으로 Fig.3으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F_r &= n^{\frac{2}{5}} \left( \frac{5V_a^2}{4n_1} \right) \cos \theta, \quad F_t = n^{\frac{2}{5}} \left( \frac{5V_a^2}{4n_1} \right) \sin \theta \\ n &= \sqrt{\frac{16R_1R_2}{9\pi^2(k_1+k_2)^2(R_1+R_2)}} \quad k_1 = \frac{1-v_1^2}{\pi E_1}, \\ k_2 &= \frac{1-v_2^2}{\pi E_2}, \quad n_1 = \frac{m_1+m_2}{m_1m_2}, \quad V_a = \sqrt{x_p^2+y_p^2} \times \omega, \\ \theta &= \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{y_p}{x_p} - \tan^{-1} \frac{R_e - y_p}{x_p} \end{aligned} \quad (7)$$

$k$  : Poisson's Ratio,  $E$  : Young's Modulus,  
 $m$  : Mass of Impactor

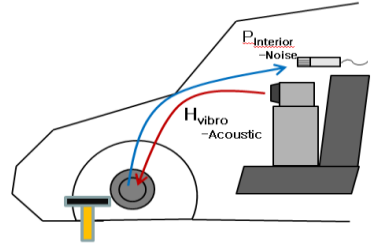


Fig. 2 Vibro-acoustic Transfer Function Test

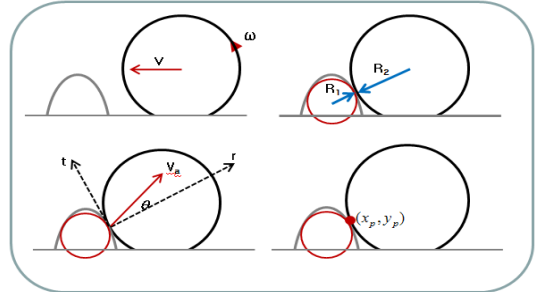


Fig. 3 Tire modeling for Hertzian impact model

이렇게 구한 차량 전달함수와 타이어 선단부의 가진력을 이용하면 다음과 같이 차량 내부의 소음을 예측 할 수 있다.

$$(p)_{\text{Vehicle Inside}} = [H]_{\text{Transfer Function}}^{\text{Vehicle}} \times (F)_{\text{Tire Leading Edge}} \quad (8)$$

### 3. 결 론

기존의 방법으로는 차량의 주행 중에 실내에서 발생하는 여러 가지의 소음원을 분석하는 방법 가운데 타이어와 노면과의 상호작용에 의한 소음을 예측하는 데는 많은 어려움이 있다. 본 연구에서 제시하는 방법은 실제 노면의 형상에 따른 타이어 로드 노이즈의 분석을 보다 이론적인 근거에 의해 접근하는 것이다. 이러한 연구를 통해 로드노이즈의 분석기법을 확대하고 차량의 소음 개선에 대한 방향을 제시할 수 있을 것이다. 본 연구는 실제 측정 및 실험 Data를 통해 실 차량에서 발생하는 로드노이즈 분석에 대해 진행 중에 있다.

### 후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었으며, 넥센타이어(주)의 많은 지원에 감사드립니다.