단순화된 타이어 진동전달 모델의 전달경로분석법을 이용한 로드노이즈 예측기술 개발

Road Noise Estimation Based on Transfer Path Analysis Using a Simplified Tire Vibration Transfer Model

신 태 진*·박 종 호*·이 상 권†·신 광 수*·황 성 욱*

Taejin Shin, Jongho Park, Sangkwon Lee, Gwangsoo Shin and Sungwook Hwang

(Received October 31, 2012 ; Revised December 4, 2012 ; Accepted January 24, 2013)

Key Words : Vibro-acoustic Reciprocity(음향진동 상반원리), Road Noise(도로 소음), TPA(transfer path analysis : 전달경로 분석), Matrix Inversion Method(역행렬법)

ABSTRACT

Quantification of road noise is a challenging issue in the development of tire noise since its transfer paths are complicated. In this paper, a simplified model to estimate the road noise is developed. Transfer path of the model is from wheel to interior. The method uses the wheel excitation force estimated throughout inverse method. In inversion procedure, the Tikhonov regularization method is used to reduce the inversion error. To estimate the wheel excitation force, the vibration of knuckle is measured and transfer function between knuckle and wheel center is also measured. The wheel excitation force is estimated by using the measured knuckle vibration and the inversed transfer function. Finally interior noise due to wheel force is estimated by multiplying wheel excitation force in the vibro-acoustic transfer function. This vibro-acoustic transfer function is obtained throughout measurement. The proposed method is validated by using cleat excitation method. Finally, it is applied to the estimation of interior noise of the vehicle with different types of tires during driving test.

1. 서 론

자동차 소음원의 명확한 규명은 저소음 자동차 개발의 출발점인 동시에 지름길이다. 주행 중 자동차 내부 소음에 기여하는 주요 소음 발생원은 크게 동력 전달계, 흡·배기계, 풍절음, 그리고 타이어 소음에 기여하는 타이어 및 현가 장치계로 나눌 수 있

다. 이 가운데 동력 전달계 소음 및 흡·배기계 소음에 비해서 타이어 소음은 광대한 주파수 영역에서 자동차 내부 소음 발생에 기여한다^(1,2). 최근에 자동차의 동력계 소음 및 기타 부품소음의 개선으로 타이어 소음이 상대적으로 차량 내부의 주요 소음원으로 잔존하고 있다⁽³⁾. 일반적으로 자동차 타이어의 주요 소음은 두 가지로 분류되는데, 구조기인 전달음인 로드 노이즈와 공기기인 전달음인 패턴 노이즈

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University
E-mail : sangkwon@inha.ac.kr
Tel : +82-32-860-7305, Fax : +82-32-868-1716

* Member, Department of Mechanical Engineering, Inha University

‡ Recommended by Editor Jin Oh Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

로 분류된다⁽³⁾. 패턴 노이즈는 타이어-노면의 접촉에 의해 발생한 소음이 공기를 거쳐 차량 내부로 전달되는 타이어 자체의 문제이며 500 Hz 이상에서 발생하나, 로드 노이즈는 노면과 타이어 및 차체와 타이어와의 연관된 문제로서 분석과 개선이 어려우며, 500 Hz이하의 주파수 대역에서 발생한다. 로드 노이즈는 일반적으로 1 kHz이상의 주파수 대역에서는 소음 레벨이 300 Hz의 소음 레벨에 비해 15 dBA 이상 낮기 때문에 차량 실내에 미치는 소음원으로서 영향력이 현저하게 낮아진다⁽⁴⁾. 타이어 소음은 주로 다양한 타이어의 특성에 의해서 결정되므로 타이어 특성에 따른 타이어 소음의 정량적 예측은 타이어 개발에 주요한 연구과정이다. 타이어 소음의 예측에는 전달경로분석법(transfer path analysis)이 사용되고 있다. 전달경로분석법을 적용하기 위해서 타이어와 도로의 접촉에 의한 가진력 측정이 필요하다. 타이어와 도로의 접촉면에서 가진력을 측정하는 것은 실험적으로 불가능하다. 그러나 최근에 크리트(cleat)를 이용하여 타이어 가진력 대신 너클 부의 가진력을 직접 측정하여 타이어 특성에 따른 소음 예측 기술이 소개되었다⁽⁵⁾. 크리트 가진의 경우 너클 부 가진력의 측정에 대한 실험이 추가된다. 이 경우 도로주행에 대하여 적용이 어렵다. 이 연구에서는 역변환 기술을 이용하여 휠 부의 가진력을 예측하고, 휠 가진력과 구조전달함수를 이용한 전달경로분석법을 적용하여 타이어의 특성에 따른 로드 노이즈를 예측하고자 한다.

2. 전달경로분석법

타이어 소음은 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 타이어와 도로의 접촉에 의해서 발생하는 선단 가진력(f_r, f_t)이 타이어, 현가장치, 차체를 가진하여 실내의 소음을 유발하는 과정이다. 따라서 타이어 기인 차량 실내소음을 예측하기 위해서는 차량의 선단 가진력과 타이어 전달함수, 현가장치 및 차량의 전달함수 측정이 필요하다.

이 연구에서는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 4개의 타이어 중에 한 개의 타이어와 도로가 접촉하는 경우에 대해서 먼저 실내 음압을 예측하고자 한다. 한 개의 타이어에 의한 가진력은 타이어의 휠을 통하여 차체를 가진하여 실내 음압을 발생시킨다.

Fig. 1 Transfer path of road noise caused by the contact force between tire and road

이 경우 다른 3개의 타이어에 대한 영향은 상대적으로 매우 작다고 가정하여 무시한다. 차량의 실내 음압은 전달경로분석법에 의하면 단입력(single input)/단출력(single output)으로 단순화 모델링이 되어 식 (1)을 사용하여 예측할 수 있다.

$$p = \mathbf{h}_{p/t}^T \times \mathbf{f}_t \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{h}_{p/t}$ 는 타이어 선단 가진력 $\mathbf{f}_t$ 와 실내 음압 p 사이의 구조-음향 전달함수(vibro-acoustic transfer function)이다. 가진력 $\mathbf{f}_t$ 는 접선방향 방향 가진력 f_u 과 법선방향 가진력 f_w 으로 이루어진 힘벡터 $\mathbf{f}_t = \{f_u, f_w\}^T$ 이며 이 위치는 타이어와 노면이 닿아 있는 매우 협소한 공간으로 실험적인 측정이 어려우며 역변환 기술을 적용하는 데에 있어서는 전체 전달경로 수식의 성립에 제한이 생긴다. 따라서 식 (1)을 이용하여 실내 음압을 예측하기는 불가능하다. 선단 가진력 대신 Fig. 1(b)에서 보여주는 바와 같이 전달경로상에 있는 휠 가진력을 이용하여 음압을 예측한다. 휠 가진력 $\mathbf{f}_w$ 을 이용하는 실내 음압의 예측은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$p = \mathbf{h}_{p/w}^T \times \mathbf{f}_w = \{p/f_{wx} \quad p/f_{wz}\}_i \begin{Bmatrix} f_{wx} \\ f_{wz} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{h}_{p/w}$ 는 타이어 휠 가진력 $\mathbf{f}_w$ 와 실내 음압 p 사이의 구조-음향 전달함수 (vibro-acoustic transfer function) 이다. 휠 가진력 $\mathbf{f}_w$ 의 직접 측정은 휠의 회전으로 인해 불가능하나 전달경로에 역변환 기술을 적용하면 휠 가진력 측정이 가능하다. 휠 가진력은 차체 경로를 통하여 실내음을 유발시키는 한편 진동을 경로를 통하여 너클의 진동을 유발시킨다. 따라서 휠 가진력에 의한 너클 진동은 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\ddot{\mathbf{x}}_k = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{kx} \\ \ddot{x}_{kz} \end{Bmatrix} = \mathbf{H}_{k/w} \times \mathbf{f}_w \quad (3)$$

여기서 $\ddot{x}_{kx}$ 는 너클의 x 방향 가속도, $\ddot{x}_{kz}$ 너클의 z 방향 가속도 이다. 휠과 너클 사이의 전달함수행렬 $\mathbf{H}_{k/w}$ 은 식 (4)와 같다.

$$\mathbf{H}_{k/w} = \begin{bmatrix} \frac{\ddot{x}_{kx}}{f_{wx}} & \frac{\ddot{x}_{kx}}{f_{wz}} \\ \frac{\ddot{x}_{kz}}{f_{wx}} & \frac{\ddot{x}_{kz}}{f_{wz}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

휠 가진력은 식 (3)의 전달함수를 역변환하여 식 (5)와 같이 구할 수가 있다.

$$\mathbf{f}_w = \mathbf{H}_{k/w}^{-1} \times \ddot{\mathbf{x}}_k \quad (5)$$

즉, 휠 가진력은 타이어가 정지된 상태에서 전달 함수를 측정하고, 운전 중에 너클 진동을 측정하여 구할 수 있다. 식 (5)에서 행렬을 역변환 하는 경우 불량 조건(ill-condition) 문제가 발생하므로 직접적으로 역행렬을 구하는 데 제한이 있다. 이 연구에서는 이러한 불량 조건을 해결하기 위해 티코노프 정규화 (Tikhonov regularization)⁽⁶⁾를 사용하였다. 식 (5)에 티코노프 정규화를 적용하면 식 (6)과 같다

$$\mathbf{f}_\lambda = \|\mathbf{H} \mathbf{f}_w - \ddot{\mathbf{x}}_k\|^2 + \lambda^2 \|\mathbf{f}_w\|^2 \quad (6)$$

Fig. 2 Experimental set up for tire modal test

$\mathbf{f}_\lambda$ 는 정규화된 휠 가진력이다. λ 는 티코노프 정규화에 사용되는 정규화 변수로 식 (7)의 GCV (generalized cross validation) 방법⁽⁷⁾을 통해 결정된다.

$$G = \frac{\|\mathbf{H} \mathbf{f}_w - \ddot{\mathbf{x}}_k\|_2}{\text{trace}(\mathbf{I}_m - \mathbf{H}\mathbf{H}^{-1})} \quad (7)$$

식 (7)에서 $\mathbf{I}_m$ 은 랭크가 m 인 단위행렬이며 정규화 변수 G 가 최소화되는 방향으로 결정된다.

여기서 최종적으로 식 (5)를 식 (2)에 대입하면 식 (8)과 같이 되어 실내 음압을 예측하는 수식을 얻을 수 있다.

$$p = \mathbf{h}_{p/w}^T \times \mathbf{H}_{w/k}^{-1} \times \ddot{\mathbf{x}}_k \quad (8)$$

3. 타이어 및 차량 특성 측정

3.1 타이어 진동 특성 측정

타이어를 통해 발생하는 로드 노이즈의 전달경로 분석을 위해서 타이어의 진동 특성에 대한 분석이 선행되어야 한다. 주행 시 타이어에 대한 진동 특성을 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 유압 가진기를 이용하여 타이어 면에 차량 하중의 1/4인 4000 N을 가하고 가진하여 모드 해석에 필요한 주파수 응답함수(frequency response function)를 측정하였다. 측정 시 주파수 분해능(resolution)은 1 Hz이고 샘플링 주파수(sampling frequency)는 1024 Hz이다. Fig. 3은 모드 측정 실험을 통하여 얻어진 대표적 주파수 응답함수이며 Fig. 4는 타이어의 고유진동수에 다른 고유진동 모드 형상(natural mode shape)들을 나타

Fig. 3 Frequency response function for a tire

Fig. 4 Mode shapes for a tire.

Fig. 5 Illustration for duct cavity

낸다. 이들은 타이어소음에 영향을 주는 1~4차에 대한 모드 형상으로 하단 부분이 하중 부가로 인해 고정되어 있으며 일반적인 원형 물체의 모드 형상과 유사하다.

3.2 타이어 공명 특성 측정

타이어와 림이 결합되었을 때 타이어와 림 사이에 공간이 발생하는 데, 이 공간에 의한 공명이 로드 노이즈에 큰 영향을 끼친다. 공간에 의한 공명 (cavity) 주파수를 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 공간으로 모델링하여 공명 모드를 계산하면 식 (9)와 같다.

$$f_n = \frac{c_0}{2\pi} k_n = \frac{c_0}{2\pi} \left(\frac{n\pi}{2\pi R} \right)^2 = \frac{c_0}{8\pi} \left(\frac{n}{R} \right)^2 \quad (9)$$

여기서 R은 타이어의 반지름이다. 식 (9)는 타이어의 반경에 대한 공명 주파수의 계산식이며 이를 통해 계산된 주파수는 210 Hz로 타이어 반경 방향의 7차 모드와 일치하며 Fig. 3에서도 확인할 수 있다.

3.3 휠-너클 사이에 대한 전달함수 측정

타이어에 기인하는 차량의 실내소음을 예측 위해서는 식 (7)에 사용되는 전달함수행렬 $\mathbf{H}_{k/w}$ 와 $\mathbf{h}_{p/w}$ 를 측정해야 한다. 타이어 휠 중앙부와 너클 사이의 주파수 응답함수 $\mathbf{H}_{k/w}$ 를 측정하기 위해 너클에 가속도 센서를 부착하고 휠 중앙부에서 가진 임팩트 해머로 가진하여 주파수 응답함수를 측정한다. Fig. 6은 전달함수를 측정하는 사진이다. 선형 시스템에 대한 상반원리에 의하면 $\mathbf{H}_{k/w} = \mathbf{H}_{w/k}$ 와 같이 표현됨으로 시험장비에 시험 타이어를 장착하고 실험 차 중 중량의 1/4, 약 4000N의 하중을 가한 상태에서 휠 중앙부에 가속도 센서를 부착하고 너클에서 임팩트 해머를 이용하여 가진하여 가진력에 대한 휠 중앙부에 가속도 응답을 나타내는 주파수 응답함수를 얻는다.

Fig. 7은 타이어 휠 중앙부와 너클 사이의 주파수 응답함수이다. 시험결과 100 Hz에서 400 Hz 사이에 특별한 공진없이 대부분의 신호를 통과 시키는 광대역 밴드 필터(band pass filter)와 같은 형상을 나타낸다.

3.4 차량 진동-음향 주파수 응답함수 측정

차량의 실내소음을 예측 위해서는 식 (8)에서 사용되는 차량의 전달함수 $h_{p/w}$ 를 측정해야 한다. 음향진동 상반정리에 의하여 $h_{p/w} = h_{w/p}$ 이므로 $h_{w/p}$ 를 측정

(a) Knuckle

(b) Wheel center

Fig. 6 Sensor attachment point for the measurement of transfer function between knuckle and wheel center

Fig. 7 Frequency response function for tire transfer

하기 위해서 Fig. 8과 같이 운전석에 음향 가진기를 설치하여 음향 에너지로 차량을 가진하고 차량의 전/후/좌/우에서 타이어를 탈거한 휠 중앙부의 3축 가속도센서로 가속도를 측정하여 진동-음향 전달함수를 측정한다.

진동-음향 전달함수 측정 시 음향 가진기는 무지향성(omni-directional) 음원을 사용해야 하며, 차체를 충분히 가진 할 수 있는 음향 파워(sound power)를 지녀야 한다. 이 실험에 사용된 음향 가진기는

Fig. 8 Experimental set up for car transfer function

Fig. 9 Vibro-acoustic transfer function for a test vehicle

20 Hz~800 Hz의 저/중 주파수 대역 가진기로서 LMS사에서 제작한 차량전용 LMS Q-Source이다. 이 실험을 통하여 측정된 차량의 진동-음향 전달함수는 Fig. 9와 같다.

3.5 차량 주행 데이터 측정

식 (8)을 이용하여 타이어에 기인하는 차량의 실내 소음을 예측하기 위해서, 실제 도로 주행 실험을 통하여 주행 중 너클에서의 가속도 $\ddot{x}_k$ 와 실내 음압 레벨 p 을 측정한다. 너클에서의 가속도는 식 (5)에 이용되어 휠 가진력을 예측하는데 사용된다. 그리고 측정된 음압은 식 (8)을 이용하여 예측된 실내 음압과 비교함으로써 이 연구에서 제안하는 방법을 검증하는데 사용된다. 너클 가속도를 측정하기 위하여 차량의 전/후/좌/우 너클에 가속도계를 설치하였다. 실내 음압은 운전석에 마이크로폰을 설치하여 측정된다. 실험 장비의 설치는 Fig. 10과 같다. 이 연구에서 개발된 방법의 검증을 위해서 먼저 크리트 실험을 통하여 실내 음압을 측정하였고, 이것을 도로 주행 중 차량에 적용하기 위해서 도로 주행 중에 차량의 실내 음압을 측정하여 방법의 유용성을 검토하였다.

(a)

(b)

Fig. 10 Experimental set up for driving test

4. 휠 가진력 및 실내 음압 레벨 분석

4.1 휠 가진력 계산

이 절에서는 먼저 차량의 실내 음압에 영향을 주는 휠 중앙부에서 가진력을 예측한다. 휠 가진력은 식 (5)를 이용하여 예측한다. Fig. 11은 식 (5)를 이용하여, 전달함수 $H_{k/w}$ 의 역변환을 통하여 계산된 휠 중앙부에서의 가진력을 나타낸다. 휠 중앙부의 주요 가진 주파수는 25 Hz, 50 Hz, 90 Hz, 210 Hz 등이다.

4.2 크리트 가진을 통한 실내 음압 예측

차량 실내의 음압을 예측하기 위해서는 앞 절에서 유도한 식 (8)을 이용한다. 먼저 Fig. 12와 같이 차량 무향실에 차량을 설치하고 크리트 가진을 통하여 출력되는 차량의 실내 음압을 예측하였다. 이 경우 한 개의 타이어만을 가진하여 로드 노이즈를 예측한다. 다른 3개의 반력은 가진력에 비해 적으므로 무시한다. 따라서 이 연구에서 제시한 방법의 검증에 유리하다.

Fig. 13은 크리트 가진 실험을 통해 측정된 음압 레벨과 식 (8)을 이용하여 예측된 음압 레벨을 비교한 결과이다. 100~200 Hz 부근을 제외하고는 비교적 잘 일치한다 특히 2차 고유진동 모드가 존재하는 90 Hz와 공명 모드가 존재하는 210 Hz 부근은 오차가 3 dB 이내로 양호하다. Fig. 3에서 보여주는 100~200 Hz에 존재하는 타이어의 3차 이상 고주파 공진 모드는 2차 공진 모드 보다 에너지의 부족으로 휠 가진력으로 나타나지 않아서 이 논문에서 제안

Fig. 11 Calculated force after regularizing processing

(a) Anechoic room

(b) Dynamometer

(c) Cleat

Fig. 12 Road noise test of test vehicle in an anechoic chamber **Fig. 13** Comparison between measured sound pressure and estimated sound pressure using cleat excitation **Fig. 14** Comparison of the estimated sound pressure level for three tires with different characteristics

하는 식 (8)의 방법으로 충분히 표현 되지 않는 오차가 발생한다. 이 부분에 대한 개선 연구는 향후에 추가로 진행할 연구과제이다.

Fig. 14는 3종류의 서로 다른 타이어에 대해 식 (8)을 이용하여 예측된 실내 음압을 표시한 결과이다. 이 결과에 의하면 90 Hz 부근에서 타이어 2차 진동 모드에 의한 음압의 증가와 210 Hz 부근의 타이어 공명 모드 영향도 확인할 수 있다.

4.3 도로 주행 시 실내 음압 예측

도로 주행시 타이어에 의한 로드노이즈의 영향을 예측하기 위해서 균일한 노면의 직진 도로에서 60 km/h로 등속 주행하여 운전자 위치에서 측정된 음압 레벨과 이 연구를 통하여 구한 식 (8)을 4개의 휠에 확장 적용한 식 (10)을 통해 예측된 음압 레벨을 비교하였다.

$$p = \sum_{i=1}^4 [(\mathbf{h}_{p/w}^T)_i \times (\mathbf{H}_{w/k}^{-1})_i \times (\ddot{\mathbf{x}}_k)_i] \quad (10)$$

이 식을 이용하기 위해서 도로 주행 중 너클 부의 진동과 각 전달 함수를 각 4군데에서 측정하여 식 (10)에 대입하여 실내소음을 예측하였다. 이 경우 전달함수 $(\mathbf{h}_{p/w}^T)_i$ 는 각 휠 중앙부에서 운전자 위치까지의 전달 함수로 각 휠 중앙부 간의 간섭(cross talk)이 생길 수 있다. 이 연구에서는 이 간섭에 의한 영향이 주 전달경로인 휠 중앙부에서 운전자 위치까지의 전달경로에 대하여 적다고 가정하여 2장에

Fig. 15 Comparison of the estimated sound pressure level and the measured sound pressure obtained throughout driving test

서의 단입력-단출력 모델을 바탕으로 모델을 구성하였으므로 이에 대한 영향은 무시한다. 이 영향의 감소를 위한 추가 연구가 진행 중에 있다.

Fig. 15는 주행 실험을 통해 측정된 실내 음압과 식 (10)을 이용하여 예측된 실내 음압을 비교 표시한 것이다.

Fig. 15의 결과를 보면 측정된 음압 레벨 대비 예측된 음압 레벨이 낮은 경향을 나타내고 있다. 이것은 타이어 소음 이외 주행 중 풍절음, 동력계음 등의 영향과 기타 타이어의 고주파 고유진동 모드에 의한 영향이다. 측정된 음압에서 나타나는 주요 피크의 영향을 분석하는데 이 연구에서 제시한 방법이 유용하게 사용될 수 있다. 90 Hz와 210 Hz 부근의 음압 레벨의 피크는 앞선 결과에서 90 Hz는 타이어의 2차 고유진동 모드 영향임을 알 수 있으며, 210 Hz의 피크는 타이어와 림 사이의 공명 모드 영향임을 알 수 있다. 각 피크의 오차는 3 dB 이내로 타이어의 특징을 잘 나타낸다고 볼 수 있다. 이 결과를 통하여 전체적인 음압 레벨은 차이가 있을 수 있으나 선행연구의 결과와 비교하여 타이어의 주요 진동특성 및 주파수에 따른 경향은 충분히 반영되었다고 할 수 있다.

이 연구를 통하여 개발된 예측 모델은 기본적인 타이어 및 차체 특성을 이용하여 로드 노이즈를 예측할 수 있다. 앞의 수식에서 로드 노이즈를 예측하기 위하여 필요한 데이터는, $\mathbf{h}_{p/w}$, $\mathbf{H}_{w/k}^{-1}$ 이며 이는 전달 특성 실험으로 얻을 수 있다. $\ddot{\mathbf{x}}_k$ 의 경우 이 실험에서는 도로 주행 실험을 통하여 측정

하였으나 실 적용시에는 다이내모를 이용하여 너클 부의 가속도를 측정할 수 있는 장비가 마련되어 있어 이를 이용하면 주행실험 없이 가속도를 측정할 수 있다. 즉 두 개의 전달함수와 너클 진동의 측정을 통하여 다양한 타이어의 로드 노이즈를 예측할 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 휠 가진력을 예측하여 타이어 가진에 기인하는 차량의 실내 음압을 예측하는 전달경로해석기법을 개발하였다. 이 방법은 주행 시의 각 타이어의 너클 진동과 너클과 휠 중앙부 사이의 전달함수를 측정하여 휠 중앙부 가진력을 예측하였다. 그리고 예측된 휠 중앙부 가진력을 실험 차량의 진동-음향 전달함수에 적용하여 실내 음압을 예측하였다. 이 연구에서 개발된 방법은 각기 다른 타이어의 특성에 따른 실내소음의 변화를 예측하는데 유용하게 사용 할 수 있다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2010-0014260). 이 연구를 지원한 (주)백센 타이어에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Sandberg, U. and Ejsmont, J. A., 2002, Tyre/road Noise Reference Book, Informex, pp. 43~154.
- (2) Kim, S. J. and Lee, S. K., 2007, The Analysis of Vehicle Interior Noise by the Powertrain and Measurement of Noise Transfer Function using Vibro-acoustic Reciprocity, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 501~506.
- (3) van Keulen, Ir. W. and Duskov, Dr. ir. M., 2005, Inventory Study on Basic Knowledge on Tyre/road Noise, IPG Project Report DWW-2005-022.,
- (4) Harrison, M., 2004, SAE International, Vehicle Refinement: Controlling Noise and Vibration in Road Vehicle, pp. 179~181.

(5) Park, J. H., Hwang, S. W. and Lee, S. K., 2012, Road Noise Prediction Based on Frequency Response Function of Tire Utilizing Cleat Excitation Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 8, pp. 720~728.

(6) Choi, H. G., Thite, A. N. and Thompson, D. J., 2007, Comparison of Methods for Parameter Selection in Tikhonov Regularization with Application to Inverse Force Determination, Journal of Sound and Vibration, Vol. 304, No. 3/5, pp. 561~917.

(7) Tikhonov, A. N., 1963, Solution of Incorrectly Formulated Problems and the Regularization Method, SSSR 151. Dokl. Akad. Nauk. Soviet Math. Dokl. 4, pp. 501~504, pp. 1035~1038.

Sang-Kwon Lee was born in Pusan, Korea, in 1959, He studied mechanical engineering at the Pusan National University, Pusan, Korea for a bachelor's degree In 1998 he received a Ph.D. degree in signal processing at the ISVR (Institute of Sound and Vibration Research) of the University of Southampton in U.K. He has 11 years experience in automotive noise control by working in Hyundai Motor co. and the Renault-Samsung Motor Company in Korea. In 1999, he moved to Inha University, Inchon, Korea. He has continued the sound and vibration research in the department of mechanical engineering at the Inha University.

Tae Jin shin is a graduate student in Department of Mechanical Engineering at Inha University. He has studied for transfer path analysis and dynamic motion.

Jong Ho Park is a graduate student in Department of Mechanical Engineering at Inha University. He has studied for transfer path analysis and vibration design.

Gwang Soo shin is a graduate student in Department of Mechanical Engineering at Inha University. He has studied for acoustic source quantification and human vibration.

Sung Uk Hwang is a graduate student in Department of Mechanical Engineering at Inha University. He has studied for development of road noise and pattern noise.