

차량 가진원 유무에 따른 실내소음의 전달경로 분석에 대한 연구

Transfer Path Analysis of the Vehicle Interior Noise according to Excitation Existence or not

박종호† · 이상권*

Park Jongho and Lee Sangkwon

Key Words : TPA(Transfer Path Analysis : 전달경로분석), Structure-Borne Noise(구조기인소음), Air-Borne Noise(공기기인소음), Matrix Inversion Method(역행렬 합성법)

ABSTRACT

Structure-bone noise is an important aspect to consider during the design and development of a vehicle. Reduction of structure-bone noise of the compartment in a vehicle is an important task in automotive engineering. Many methods which analyze transfer path of noise have been used for structure-bone noise. The existing method to measure of frequency response function of transfer path has been tested by removing a source. This Paper presents an experimental analysis about Transfer Path Analysis of the vehicle interior noise according to Excitation or not. To identify these points of difference, experiment were conducted through an experimental test using simulation vehicle.

1. 서 론

차량의 실내소음 예측을 위한 전달경로분석(Transfer Path Analysis)은 차량 NVH 개발 단계에서 매우 유용하게 이용되고 있다. 차량 실내소음의 기여도 분석을 위한 전형적인 TPA 는 일반적으로 500Hz 미만의 범위에서 적용되고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾ 차량 내부의 소음은 크게 구조 기인 소음(Structure-Borne Noise)과 공기 기인 소음(Air-Borne Noise)로 나뉘는데, 본 논문에서는 구조 기인 소음의 경우만을 다룬다. 엔진의 가진력은 엔진을 지지하고 있는 각 마운트(전달경로)를 거쳐 이들과 연결된 샤시 부품들로 전달되어 실내에 소음으로 야기된다. 일반적으로 각 마운트(전달경로)에서의 가진력을 직접적으로 측정하기에는 구조적인 한계가 있기 때문에, 동강성법(Dynamic Stiffness Method) 과 역행렬 합

성법(Matrix Inversion Method) 등을 적용하고 있다.⁽³⁾ 본 논문에서는 Matrix Inversion Method 를 사용한 소음전달경로분석을 이용한다. 마운트에서의 전달함수(Frequency Response Function)를 측정하기 위해서는 가진원(엔진, 서스펜션 등)을 제거한 후 각 마운트 사이의 전달함수를 측정하는 데, 본 논문에서는 이러한 가진원의 유무에 따른 전달경로 분석에 대하여 다룬다.

2. 이론적 배경

2.1 전달경로분석(Transfer Path Analysis)

차량의 실내소음에 영향을 주는 인자를 에너지의 전달의 측면에서 생각한다면, 차량 실내에서 운전자가 느끼는 소음은 음압의 형태로 받아 들어진다. 이에 따른 음압의 발생은 가진원으로부터 발생된 에너지가 여러 가지의 전달경로(Path)를 거쳐 최종적으로 운전자의 귀에 이르는 에너지 전달을 이용하여 구할 수 있다.⁽³⁾

차량의 실내로 유입되는 소음은 구조기인소음

† 박종호; 정회원, 인하대학교 기계공학과

E-mail : jongho0201@gmail.com

Tel : (032)860-8776,

* 이상권; 정회원, 인하대학교 기계공학과

(Structure-Borne Noise)과 공기기인소음(Air-Borne Noise)의 합으로 표현될 수 있다.

$$p = \sum_{i=1}^N (p_{structure})_i + \sum_{j=1}^M (p_{air})_j$$

구조기인 소음과 공기기인 소음은 가진원에 의해 발생하는 Operating force와 구조음향 전달함수의 곱에 의해 계산되어진다.

$$p = \sum_{i=1}^N F_i(\omega) \times (H_{structure})_i + \sum_{j=1}^M Q_j(\omega) \times (H_{air})_j$$

여기서의 전달함수(H : Transfer Function)를 다른 형태로 표현하면 아래와 같다.

$$p = \sum_{i=1}^N F_i(\omega) \times \left(\frac{p_{ear}}{F_i} \right) + \sum_{j=1}^M Q_j(\omega) \times \left(\frac{p_{ear}}{Q_j} \right)$$

본 논문에서는 공기기인 소음을 무시하고 구조기인 소음의 경우만을 고려하기 때문에 위의 식은 다음과 같이 크기와 위상을 갖는 복소함수의 형태를 띠게 된다.

$$p = \sum_{i=1}^N F_i(\omega) \times \left(\frac{p_{ear}}{F_i} \right)$$

여기서의 p_{ear} 는 운전자의 귀의 위치에서의 음압이고 F_i 는 가진원에 의해 발생하는 각각의 경로(Path)에서의 가진력(Operating Force)이다.

2.2 역행렬 합성법(Matrix Inversion Method)

역행렬 합성법은 전달경로에서 직접적으로 가진력을 예측하기 불가능한 경우와, 마운트의 강성(Stiffness)를 이용한 동강성법(Dynamic Stiffness Method)을 적용하기 어려운 경우 가진원을 예측하기 위한 방법으로 사용된다.

전달함수를 구하는 방법으로는 각 전달경로에서 임팩트해머로 가진하여 가속도 센서의 응답신호를 측정하여 구하는 방법과 음향가진기를 사용하여 마이크로폰의 응답신호를 측정하여 구하는 방법이 있

다. 일반적으로 사용하는 임팩트해머와 가속도 센서의 응답에 따른 전달함수는 다음과 같은 형태의 행렬구조의 형태를 띠게 되며, 이러한 행렬형태의 전달함수를 이용하여 역행렬(Inversion Matrix)를 계산하고, 각 전달경로에서 측정된 구동중의 가속도(Operating Acceleration)와의 곱의 형태를 취하게 되면 각 경로에서의 힘이 계산된다.

$$F_i(\omega) = [M_{\dot{x}/F}]^{-1} \cdot \{\ddot{x}_{operating}\}$$

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{x}_{11} & \cdots & \ddot{x}_{1n} \\ F_1 & \ddots & F_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{x}_{m1} & \cdots & \ddot{x}_{mn} \\ F_1 & \cdots & F_n \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{1operating} \\ \vdots \\ \ddot{x}_{noperating} \end{Bmatrix}$$

여기서 전달함수는 측정된 응답의 수 m 과 구하고자 하는 가진원 n 이 같을 경우 계산이 가능해진다. 보다 정확한 가진원을 계산하기 위하여 $m > n$ 이어야 III-Condition의 회피가 가능하다.⁽⁴⁾

상기 식의 전달함수는 가진원을 제거한 상태에서 측정하는 것이 일반적이나, 본 논문에서는 가진원의 유무에 따른 전달함수 측정의 주파수 별 특성을 알아보하고자 한다.

Fig.1과 같이 가진원을 제거한 상태에서 전달함수를 측정하는 것이 일반적이다. Fig.2와 같이 가진원이 제거되지 않은 상태에서 전달함수를 측정하게 되면 다음과 같은 관계가 성립되지 않을 경우 정확한 전달경로 분석이 어려운 것으로 알려져 있다. 이러한 경우 다음의 관계가 성립될 경우 가진원을 제거하지 않은 상태에서의 전달함수 측정이 가능하다.

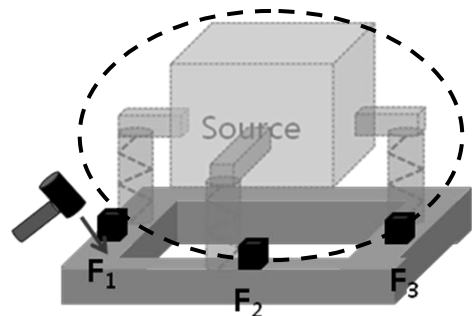


Fig. 1 FRF measurement without Source

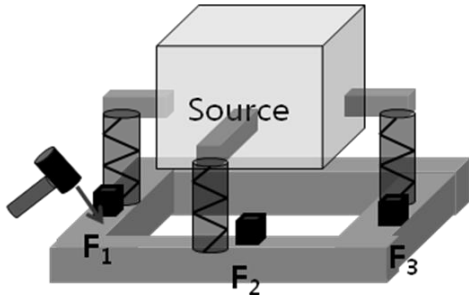


Fig. 2 FRF measurement with Source

$$F_2 \times FRF_2 \ll F_1 \times FRF_1$$

$$F_3 \times FRF_3 \ll F_1 \times FRF_1$$

3. 실험

3.1 실험의 구성

실제 상용차량에서의 주요 가진원을 엔진이라 가정하고 Fig.3과 같이 시뮬레이션 차량을 제작하였다. 주요 소음원인 엔진을 기어박스로 대체하여 전달경로분석을 수행하였다. 실제 차량의 마운트를 재현하기 기어박스를 지지하고 있는 평판의 네 부분의 모서리에 고무 재질의 마운트를 설치하였다.

실험 조건은 500rpm에서 1500rpm 까지 진동모터를 구동시킨 상태에서 Onosoki CT-6520 Digital Engine Tachometer를 이용하여 rpm을 측정하고 각 전달경로에 Indicator로써의 3축 가속도계와 Additional-Indicator로써의 1축 가속도계를 이용하여 진동 가속도 데이터를 측정하였다. 실내 소음은 시뮬레이션 차량 내부의 정 중앙에 설치하였으며,

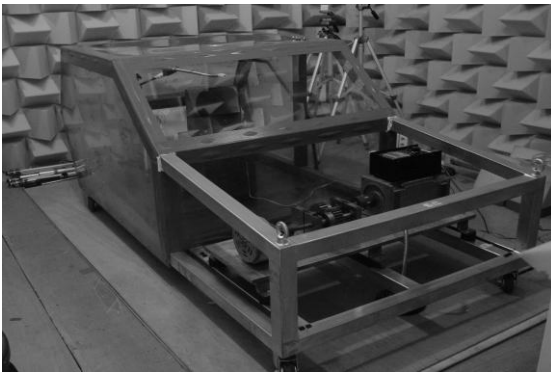


Fig. 3 Simulation Car

Table 1 Testing Devices

No.	Item	
1	FFT Analyzer	LMS TEST.LAB 9A LMS SCADAS MOBILE
2	Accelerometer	B&K 1-D, 4507, Endevco 3-D, 65-10
3	Microphone	B&K 4189
4	Exciter	LMS Q-SOURCE, Endevco Impact Hammer
5	Tachometer	Onosoki CT-6520, LG-930 OPT.Sensor

구조-음향 전달함수(NTF)의 측정을 위해 LMS Q-Source 장비를 사용하여 마이크와 같은 위치에서 White Noise로 가진하여 Reciprocity 이론을 적용, 구조-음향 전달함수를 측정하였다. 실험에 사용된 장비 및 프로그램은 Table.1 과 같다.

3.2 데이터 측정

3.2.1 진동 가속도 및 음압 데이터 측정

주요 소음원이 위치한 부분의 마운트를 Fig.4 에서 보인 바와 같이 각 전달경로로 설정하였다. 설정된 전달경로에 Endevco 3-Dimension Accelerometer와 B&K 1-Dimension Accelerometer를 설치하고 소음원이 구동 중 진동 가속도를 방향으로 측정한다. 또한 시뮬레이션 차량 내부의 정중앙의 위치에 마이크를 이용하여 음압을 측정한다.

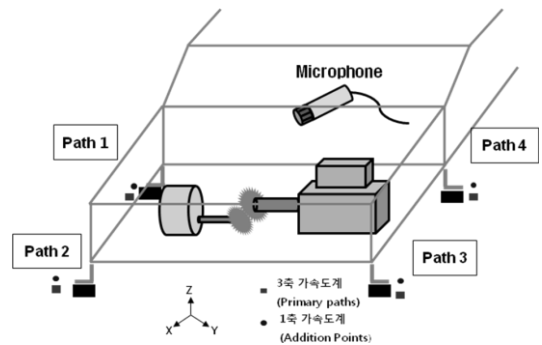


Fig. 4 Path of Simulation Car

3.2.2 전달함수(FRF) 측정

각 경로에서의 전달함수(FRF)의 측정 Fig.5 와 같은 형태에서 두 가지의 절차로 진행하였다. 첫 번째는 기어박스를 제거하지 않은 상태에서 전달함수를 측정하였고, 두 번째로는 기어박스를 제거한 상태에서 전달함수를 측정하였다. 이와 관련된 데이터의 비교는 다음에서 다룬다.

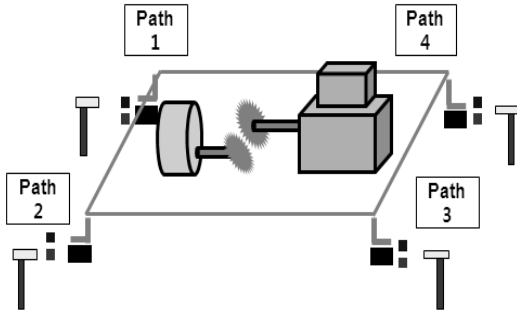


Fig. 5 FRF Test

3.2.3 구조-음향 전달함수(Vibro-Acoustic Transfer Function) 측정

구조-음향 전달함수(Vibro-Acoustic Transfer Function)을 측정하기 위하여 Fig.6와 같이 LMS Q-Source 가진기를 사용하였으며, 가진 위치는 마이크로폰의 위치와 동일하다. 각 전달경로에서 충격 망치로 가진하여 마이크로폰으로 측정된 전달함수와 마이크로폰과 같은 위치에서 가진하여 각 전달 경로에서 측정된 전달함수는 Reciprocity 이론에 의해 같은 값을 갖게 됨을 이용하였다. White Noise를 주사하였으며, 평균 30회 가진하여 신뢰성을 높였다.

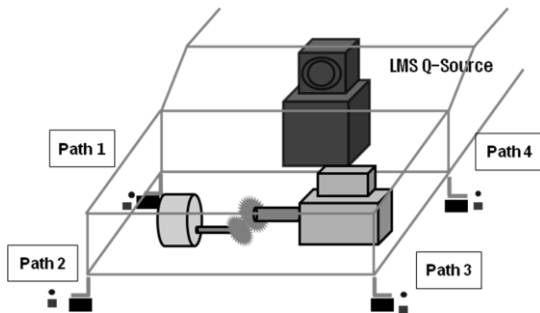


Fig. 6 Vibro-Acoustic Transfer Function Test

4. 실험 결과 및 기여도 분석

4.1 음압 데이터 분석

Fig. 7은 시뮬레이션 차량의 중앙에서 측정한 음압데이터를 워터폴(Waterfall) 및 컬러맵(Color map)형태로 도시한 결과이다. 20 Hz, 100 Hz, 400 Hz, 550 Hz에서 음압 레벨이 높은 것으로 나타났으며, 1, 2, 3오더 성분과 24오더 성분이 두드러지게 나타났다. 기여도 분석을 위해 3오더, 24오더 성분을 추출하여 해석에 이용하였다.

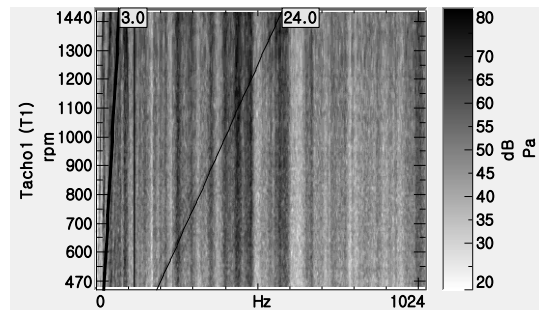
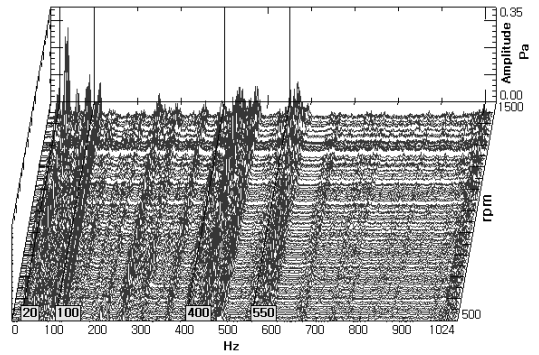


Fig. 7 Overall level of interior noise

4.2 음압레벨(SPL) 및 기여도 분석

Fig. 10, 11은 3, 24오더 성분의 음압 측정 데이터와 가진원을 제거한 상태에서 측정한 각 경로에서의 전달함수를 이용하여 예측한 음압 데이터이다.

3 오더의 경우, 20 Hz 부터 50 Hz 까지의 음압 데이터는 거의 일치하는 경향을 보이나, 50 Hz 이상의 경우에는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 24 오더의 경우에는 200 Hz 부터 600 Hz 사이에서 5 dB 이내의 오차를 보인다. 3 오더의 경우 각 전달 경로 별 기여도를 분석해 보면 3번 경로에서의 음

압 데이터가 가장 큰 기여도를 갖는 것을 알 수 있다. 24 오더의 경우에는 2번 경로의 기여도가 가장 크게 나타난다. Fig. 12와 13은 이러한 결과를 도시한 그래프이다.

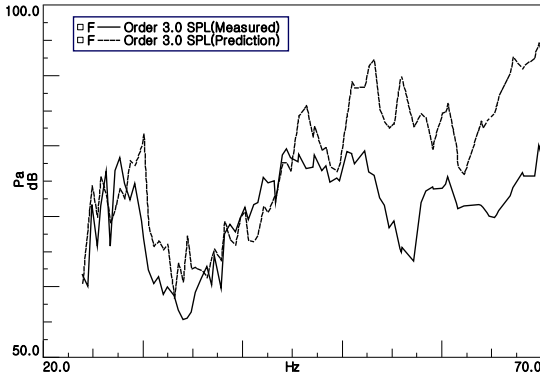


Fig. 10 Measured 3rd order SPL & Predicted 3rd order SPL without Source

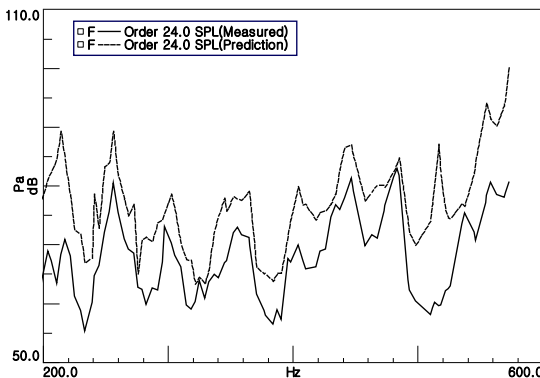


Fig. 11 Measured 24th order SPL & Predicted 24th order SPL without Source

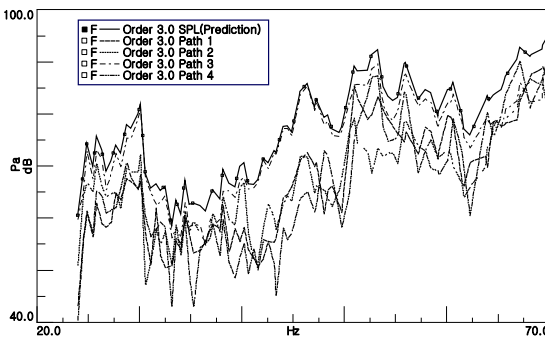


Fig. 12 Predicted 3rd order SPL of each path without Source

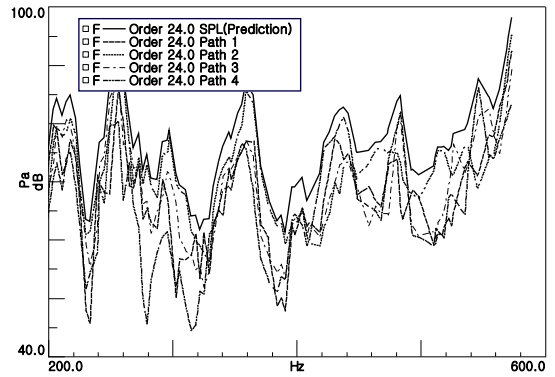


Fig. 13 Predicted 24th order SPL of each path without Source

Fig. 14, 15는 3, 24오더 성분의 음압 측정 데이터와 가진원을 제거하지 않은 상태에서 측정된 각 경로에서의 전달함수를 이용하여 예측한 음압 데이터이다. 3 오더의 경우, 20 Hz 부터 30 Hz 까지의 음압 데이터는 일치하는 경향을 보이나, 30 Hz 이상의 경우에는 크기는 30 dB 가량의 오차가 있음을 알 수 있다. 24 오더의 경우에는 300 Hz 부분과 400 Hz 에서 600 Hz 구간을 제외한 구간에서는 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 3 오더의 경우 각 전달 경로 별 기여도를 분석해 보면 가진원을 제거하지 않은 상태에서 분석한 데이터와 마찬가지로 3번 경로에서의 음압 데이터가 가장 큰 기여도를 갖는 것을 알 수 있다. 24 오더의 경우 또한 2번 경로의 기여도가 가장 크게 나타난다. Fig. 15와 16은 이러한 결과를 도시한 그래프이다. 음압 레벨에서는 다소 차이가 나지만 각 경로에 대한 기여도의 형태는 비슷한 경향을 보임을 알 수 있다.

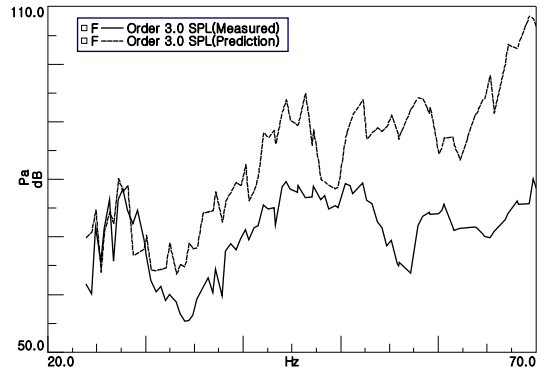


Fig. 14 Measured 3rd order SPL & Predicted 3rd order SPL with Source

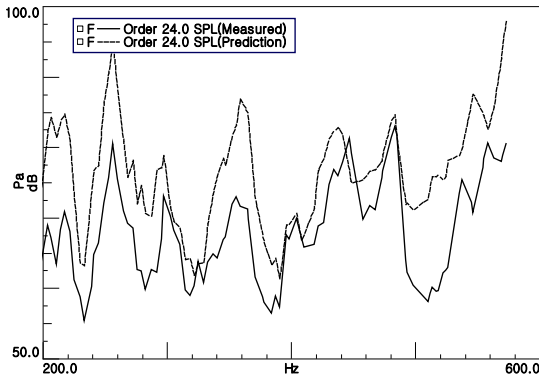


Fig. 15 Measured 24th order SPL & Predicted 24th order SPL with Source

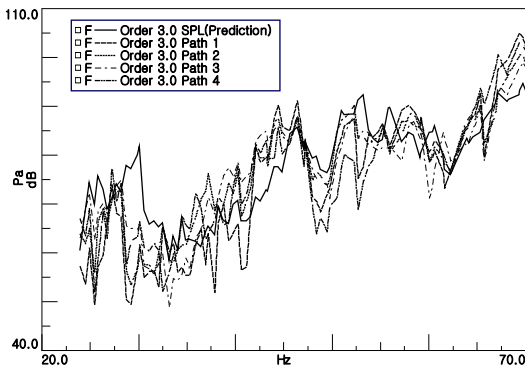


Fig. 16 Predicted 3rd order SPL of each path with Source

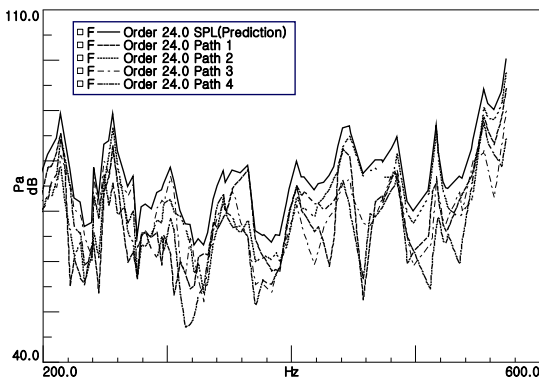


Fig. 17 Predicted 24th order SPL of each path with Source

5. 결 론

가진원을 제거한 상태에서 예측한 음압 레벨과 가

진원을 제거하지 않은 상태에서 예측한 음압레벨은 다소 차이가 있음을 알 수 있었다. 가진원을 제거한 상태에서 분석한 음압레벨은 특정 구간을 제외하고는 전 주파수 구간에서 비교적 작은 오차를 보이지만, 가진원을 제거하지 않은 상태에서 분석한 음압레벨은 낮은 주파수 대역을 제외하고는 전 주파수 대역에서 비교적 큰 오차가 발생하였다. 그러나 각 전달 경로 별 기여도에서는 일치하는 경향을 보였다. 현재는 500Hz 이상의 고 주파수 대역에서 가진원의 유무에 따른 전달경로분석법의 차이에 대하여 계속적으로 연구가 진행 중이다.

참 고 문 헌

- (1) Jeon, J. S., Heo, S. J., Kim, C. M., Kook, H. S., Ko, K. H., 2003, Measurement of Noise Sensitivity of panels and Improvement of Interior Noise of the vehicle using vibro-acoustic Reciprocity, The Korean Society of Automotive Engineerig. KSAE03-F0119, pp. 780~781
- (2) Lee, S. K., Choi, B. U., Yeo, S. D., 1993. A Study on Improvement of the Power Plant Vibration for the Noise Reduction and the Sound Quality Improvement in the Compartment, KSAE, Vol. 1, No. 2, pp. 77~83.
- (3) Jee, T. H., Choi, Y. B. 1999, Transfer Analysis on the Passenger Car Interior Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 97 ~ 102.
- (4) Roggenkamp T. and Marcella-O'Leary L.,1996, Case Study : Experimental Low Frequency Structure-borne Coarse Road Noise Model, 14th IMAC, pp. 320~325.