

벡터합성법을 이용한 차량 실내소음의 입력원 영향도 평가

Evaluation of the Inputs Efficiency for the Interior Noise of the Vehicle using Vector Synthesis Method

양 인 형* · 정 재 은* · 오 재 응†

In-Hyung Yang, Jae-Eun Jeong and Jae-Eung Oh

(2010년 4월 13일 접수 ; 2010년 6월 7일 심사완료)

Key Words : Vector Synthesis Method(벡터합성법), Noise(소음), Vehicle(차량)

ABSTRACT

A passenger vehicle has various and complicated transmission paths of sound and vibration. In order to identify the mechanism of transfer path, estimation of excitation force and exact modeling of transfer path are required. In this paper vector synthesis technique is employed to identify the characteristics of road noise and its transmission to vehicle compartment through noise and vibration analysis. Vibration reduction efficiency of each transfer path is evaluated by comparing individual vector components obtained virtual simulation. The degree of effect is used to estimate the contribution of vibration input components to total output. And in this paper presents a new technique based on simulation studies using vector synthesis diagram and design of experiments, by which the effects of magnitude and phase change of input paths can be predicted.

기 호 설 명

- T : 시간 주기
- $x(t)$: 시간 영역의 입력 신호
- $y(t)$: 시간 영역의 출력 신호
- $X(\omega)$: 입력신호의 푸리에 변환
- $S_{xy}(\omega)$: $x(t)$ 와 $y(t)$ 의 상호스펙트럼
- $\theta_{xy}(\omega)$: $X(\omega)$ 와 $Y(\omega)$ 의 위상각

1. 서 론

최근 모든 기계류는 운영상 효율의 극대화 및 신뢰성 향상을 이루면서 진동과 소음을 엄격히 제한하는 상황에 직면하고 있다. 특히 승용차량에 있어

서 엔진의 고출력화 및 에너지 절약 차원에서 차량 경량화는 필연적으로 차체 진동 및 실내소음을 증가시키는 원인이 되고 있다.

차량의 소음 및 진동 현상은 운전 조건, 주행 상태 등에 따라 매우 복잡한 양상을 나타내고 있으며, 이는 가진조건 및 차체구조라는 극히 복잡한 진동계와 차실 음향계의 조합 특성에 의해 지배된다. 승용차에 있어서 구동계통의 운전에 의하여 발생하는 소음 및 진동의 전달특성을 파악하여 사용자에게 불쾌감을 주는 성분을 저감시키기 위한 연구가 최근 활발히 수행되고 있다⁽¹⁾.

구동계의 운전 특성 및 조건, 전달계의 성질 및 결합상태, 그리고 차체골격 및 차실 판넬 등의 구조적 특성에 따라 여러 가지 형태로 이루어지는 복잡한 소음·진동 전달기구를 해석하기 위해서는 진동 입력과 전달계통을 다양한 방법으로 모형화하고 각 가진 입력성분들에 의하여 발생하는 소음 출력에 대한 기여를 평가하여 전달과정에서 발생하는 물리

† 교신저자; 정희원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : jeoh@hanyang.ac.kr

Tel : (02)2220-0452, Fax : (02)2299-3153

* 정희원, 한양대학교 대학원 기계공학과

적 특성을 파악하는 것이 필요하다.

물리계의 해석에 있어서 적용이 간단하고 기계 구조물이 구동계로부터 받는 강제력과 그 결과에 의해 발생하는 소음 및 진동 출력의 정량적 설명이 가능한 방법으로써 벡터합성법이 사용되고 있다. 벡터합성법은 주로 자동차의 부밍소음에 대한 해석법으로 제시되었고, 여러 가지 소음 및 진동 현상의 해석에 적용되어 다각도의 저감 대책을 제공하였다⁽²⁾. 따라서 이 연구에서는 선행연구를 통해 파악한 차량 주행 소음의 전달경로 해석 결과⁽³⁾를 바탕으로 각 입력원들에 의한 차실내 소음 발생의 정량적 평가 기법으로 벡터합성법을 적용하고자 한다. 목적주파수에 따른 입력원의 크기 및 위상변경으로 실내 소음의 저감량을 예측하고, 효과적인 대책 방법에 대해 고찰하기로 한다.

2. 벡터합성법 이론

2.1 상호 스펙트럼의 벡터적 표현

T 의 주기를 가지는 시간기록 $x(t)$ 는 일반적으로 삼각함수의 무한급수로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x(t) &= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \\ &= c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(\omega_n t + \varphi_n) \end{aligned} \quad (1)$$

또는, 극좌표 형식으로 다음과 같이 표현된다.

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_n e^{j\omega_n t} \quad (2)$$

일반적인 비주기 신호 $x(f)$ 의 경우에는 주기가 무한히 크다는 가정과 다음의 수렴 조건을 만족할때,

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (3)$$

Fourier적분에 의해서 표현할 수 있으며, 이것을 복소형으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} [A(\omega) \cos \omega t + B(\omega) \sin \omega t] d\omega \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \end{aligned} \quad (4)$$

또한, 2개의 시간 변동량 $x(t)$ 및 $y(t)$ 를 Fourier 성분으로 변환한 뒤 얻어진 복소함수를 극좌표 형식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt = |X(\omega)| e^{j\theta_x(\omega)} \\ Y(\omega) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} y(t) e^{-j\omega t} dt = |Y(\omega)| e^{j\theta_y(\omega)} \end{aligned} \quad (5)$$

일반적으로 정상 불규칙 신호 $x(t)$ 는 벡터 $X(\omega) e^{j\omega t}$ 의 실측 성분을 나타내는 것으로 생각할 수 있다.

$$\begin{aligned} x(t) &= \text{Re} \left[\int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \right] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} |X(\omega)| \cos[\omega t + \theta_x(\omega)] d\omega \\ y(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} |Y(\omega)| \cos[\omega t + \theta_y(\omega)] d\omega \end{aligned} \quad (6)$$

또한, 시간영역 신호와 관련하여 상호 스펙트럼의 의미를 이해하기 위해서 복소 푸리에 성분 $X(\omega)$, $Y(\omega)$ 를 벡터로써 표시하는 방법이 유효하다. 즉, 시간영역 신호 $x(t)$, $y(t)$ 는 2개의 벡터 $X(\omega)$ 와 $Y(\omega)$ 가 일정한 편각차 $\theta_{xy}(\omega)$ 를 이루며 주기 $2\pi/\omega$ 로 원점의 주위를 회전하는 것으로 볼 수 있다.

결국, 이러한 2개의 벡터의 관계는 $X(\omega)$ 의 공액 벡터 $X^*(\omega)$ 와 $Y(\omega)$ 의 곱으로 표현하는 것이 가능하다.

$$X^*(\omega) Y(\omega) = |X(\omega)| |Y(\omega)| e^{-j\theta_{xy}(\omega)} \quad (7)$$

여기서 $\theta_{xy}(\omega)$ 는 $\theta_x(\omega)$ 와 $\theta_y(\omega)$ 의 위상각차를 나타낸다.

식 (7)의 계산에 의해서 얻어진 복소함수의 기대치를 취하고 $(1/T)$ 을 곱하여 주면 상호 스펙트럼의 식을 얻을 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} S_{xy}(\omega) &= \frac{2\pi}{T} E[X^*(\omega) Y(\omega)] \\ &= \frac{2\pi}{T} E[|X(\omega)| |Y(\omega)| e^{-j\theta_{xy}(\omega)}] \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $X(\omega)$ 와 $Y(\omega)$ 의 상대위상은 다음과 같이

상호 스펙트럼의 실수부와 허수부의 관계로 표현할 수 있다.

$$\theta_{xy}(\omega) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im}(S_{xy})}{\text{Re}(S_{xy})} \right] \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)로부터 얻어지는 상호 스펙트럼의 크기와 위상정보를 이용하여 신호들이 가지는 물리적 특성을 파악하고, 입력과 출력으로써의 관계를 벡터적으로 해석하는 것이 가능함을 알 수 있다.

2.1 입력 성분의 영향도 해석

벡터합성법을 이용한 해석에 있어서 입력성분의 출력에 대한 영향 정도를 파악하기 위해서 다음과 같은 식으로 영향도를 사용한다.

$$\begin{aligned} \text{영향도} &= \frac{|S_{xy}(\omega)| \cos \theta_{xy}(\omega)}{\sum |S_{xy}(\omega)|} \\ &= \frac{|S_{xy}(\omega)| \cos \theta_{xy}(\omega)}{|S_{syn}(\omega)|} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $|S_{xy}(\omega)|$ 는 i 번째 입력성분이 전달계를 통과한 후 나타나는 출력 성분의 벡터성분의 크기이며, $|S_{syn}(\omega)|$ 는 각 입력성분이 동시에 작용할 때 발생하는 합성출력의 크기이다. 그리고 $\theta_{xy}(\omega)$ 는 $\overrightarrow{S_{xy}(\omega)}$ 와 $\overrightarrow{S_{syn}(\omega)}$ 의 상대위상을 의미한다. 이러한 관계를 Fig. 1에 나타내었다.

영향도는 (+)와 (-)부호의 값을 가질 수 있으며, 1이상이 되기도 한다. (+)의 영향도는 전체출력을 증가시키는 입력성분의 성분으로 작용하며, (-)의 영향도를 가지는 벡터성분은 다른 성분과 상쇄되어 전체출력을 감소시키는 역할을 하는 것을 의미한다. 식 (10)에서 알 수 있듯이 벡터합성법에서의 영향도는

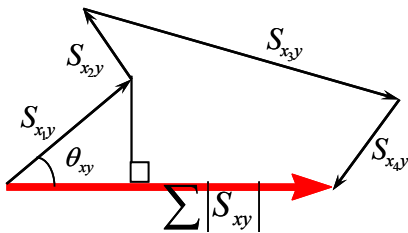


Fig. 1 The definition of conventional effectiveness

그 크기에 의해서 뿐만 아니라 전체 출력의 크기를 줄이기 위해서 전달계의 특성을 바꾸는 경우에 있어서 단순한 입력성분의 절대적인 크기를 감소시키는 방법보다는 위상을 함께 고려하는 것이 효과적인 것을 알 수 있다.

3. 실험

3.1 주행 중 실내소음의 목적 주파수 선정

목적 주파수 선정을 위하여 실차 주행 중에서 차실 내 소음 및 차량 주요 부품에 대한 진동과 소음을 측정하였다. 실내소음 측정 기준은 KS 5128 규격에 따라 실험 준비를 하였고, 80 kph의 등속 운전으로 실험을 수행하였다. 이 실험에 사용된 측정기기는 20 Hz~20 kHz의 주파수 범위를 다룰 수 있는 것으로 사람의 가청 주파수 영역을 표현할 수 있는

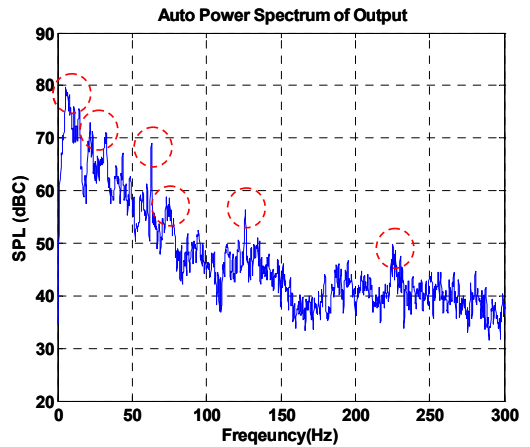


Fig. 2 C-Weighted sound pressure level of output under 80 kph

Table 1 The interior noise characteristics under 80 kph

Overall level dB(C)	86.4
Target frequencies(Hz)	15.3
	22.1
	33.0
	63.0
	76.1
	126.2
	232.3

장비이다. 단, 이 연구에서는 차량 로드노이즈 분석을 위한 것으로 관심 주파수 대역을 0~300 Hz로 설정하였다. 소음 참조 신호는 20×10^{-6} Pa이며, 음압 레벨 단위는 dB(C)로 측정하였다. Fig. 2는 80 kph로 등속 주행 시 운전석 수음자 위치에서 출력 성분의 자기 스펙트럼을 도시한 것이다. 수음자 위치에서의 피크를 이루는 주파수와 전 음압 레벨(overall level)과 목적 주파수를 Table 1에 정리하였다. 전 음압 레벨은 0~1000 Hz까지 주파수 범위의 레벨 값이다.

3.2 주행 중 실내소음의 기여도 평가

입력간의 상관관계를 잔차 스펙트럼을 이용하여 제거하면 Fig. 3에 정리한 것과 같이 부분기여도 함수를 얻을 수 있다. 부분기여도 함수는 입력간의 상관 관계를 제거하여 순수하게 기여하는 량을 나타내며, 각 목적 주파수에서 4개의 너클 부분(FL, FR, RL, RR)의 진동 가속도 입력원이 실내소음으로 영향을 미치는 기여 우선순위를 확인할 수 있다.

특히, 입출력간의 일반기여도 함수 값으로 기여 순위 판단이 모호했던 목적 주파수 중 22.1 Hz는 front left, 76.1 Hz는 rear right로 기여도가 명확하게 구분되었다. 232.3 Hz는 front right와 rear left에서 기여도가 나타났는데, 입력간 상관관계가 존재하지 않았으므로 부분기여도 함수의 잔차 스펙트럼에 영향을 미치지 않아 기여 순위가 동일하게 나타났다. 주파수 별 전체 기여도 평가 결과 rear right의 너클 진동이 실내 음압에 크게 기여한다는 것을 알 수 있다.

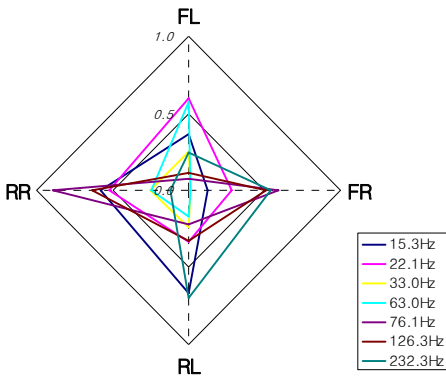


Fig. 3 Partial coherence function among input and output signals

4. 입력원의 영향도 분석 및 평가

앞 절에서 설정한 목적 주파수와 각 진동 입력 성분에서 발생하는 출력 소음의 성분벡터가 합성출력에 대하여 어느 정도 영향을 미치고 있는가를 정량적으로 평가하기 위해 벡터 합성법을 적용하였다. 상호스펙트럼에서 추출한 성분벡터의 크기와 위상을 목적 주파수에 따라 비교함으로써 전달계의 전달 특성 및 각 성분벡터들의 합성출력에 대한 영향도를 계산하였다.

Fig. 4는 15.3 Hz에 해당되는 입력성분과 출력성분의 벡터 선도이다. 3번과 4번의 입력벡터는 출력 벡터와 동일 위상에 위치해 있으므로 크기 저감만으로도 출력 소음을 저감할 수 있으리라 판단된다. 두 입력원의 크기를 동시에 저감시킨다면 출력 소음이 최대로 저감되었지만, 보통의 경우에는 출력 벡터에 가장 영향을 미치는 입력원을 선정하여 저감 대책을 세우곤 한다. 즉, 출력에 대한 입력원의 영향도 분석을 수행하여 가장 영향이 큰 입력원을 추출한다. Fig. 5는 15.3 Hz의 출력 소음에 대하여 각 입력원들의 영향도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것과 같이 4번 입력성분(rear right)이 합성출력에 가장 큰 영향을 미치고 있다. 따라서 15.3 Hz에 대해 소음 저감 대책을 세운다면 입력원의 영향도가 가장 큰 rear right에 대한 대책이 수립되어야 할 것이다.

Fig. 6은 76.1 Hz에 해당되는 입력성분과 출력성

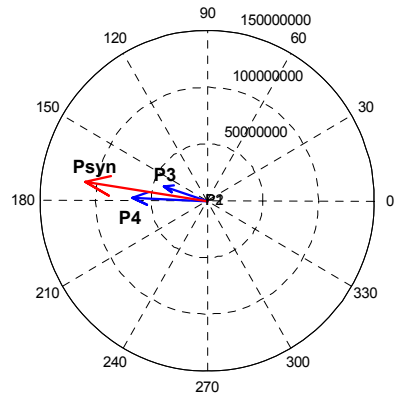


Fig. 4 Vector synthesis diagram of the interior noise at 15.3 Hz

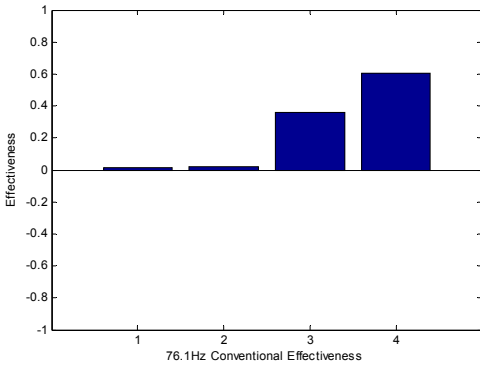


Fig. 5 Effectiveness analysis of inputs at 15.3 Hz

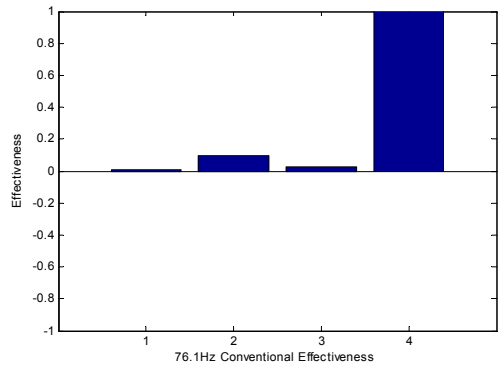


Fig. 7 Effectiveness analysis of inputs at 76.1 Hz

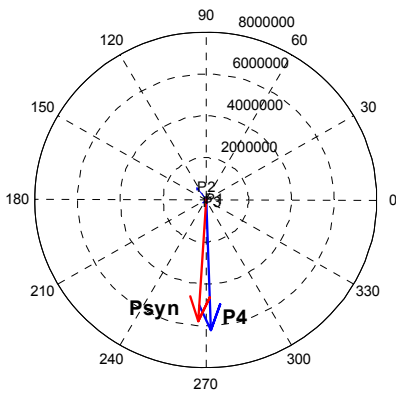


Fig. 6 Vector synthesis diagram of the interior noise at 76.1 Hz

분의 벡터 선도이다. 76.1 Hz의 경우에는 그림에서 보는 것과 같이 출력성분에 대한 입력성분의 영향도가 벡터 선도에서 확연하게 드러났다. 4번 입력원의 크기 저감만으로도 출력 소음을 저감할 수 있으리라 판단된다. Fig. 7의 영향도 그래프에서도 4번 입력성분(rear right)이 합성출력에 절대적으로 큰 영향을 미치고 있다. 따라서 76.1 Hz에 대해 소음 저감 대책을 세운다면 입력원의 영향도가 가장 큰 rear right에 대한 대책이 수립되어야 할 것이다.

이상 15.3 Hz와 76.1 Hz에 대한 벡터 합성법 적용 결과를 설명하였다. 이와 동일한 방법으로 모든 목적 주파수에 대해 너클 진동 4입력계의 영향도 분석을 한 결과를 Table 2와 같이 정리하였다.

각 주파수 별 영향도의 크기를 정규화하여 나타냈으며, 그 결과 대부분의 영향도가 rear right에 집중되었다. 이것은 앞 절의 전달경로 해석과 기여출력

Table 2 The Effectiveness of each inputs(dimensionless)

Frequencies (Hz)	FL	FR	RL	RR
15.3	0.0	0.0	0.4	0.6
22.1	0.6	0.0	0.2	0.2
33.0	0.2	0.1	0.2	1.0
63.0	0.8	0.0	0.1	0.1
76.1	0.0	0.1	0.0	1.0
126.2	0.1	0.2	0.1	0.7
232.3	0.0	0.3	0.6	0.1

스펙트럼 경향과 같은 결과를 보여주고 있다. 단, 63.0 Hz의 영향도는 front left의 성분이 크게 나타났는데, 앞 절에서 규명한 전달경로 해석 결과 흡기계와 엔진의 영향으로 front left의 입력성분에도 영향을 미친것으로 판단된다.

5. 결 론

(1) 벡터 합성법을 이용한 로드노이즈의 전달 특성을 해석한 결과 rear right의 너클 진동이 차실내 소음 출력에 주된 영향을 미치는 것을 정량적으로 규명하였다.

(2) 입력의 크기변경 시뮬레이션을 통해 로드노이즈 개선을 위한 주요 입력원 및 주파수 대역을 선정하였다.

참 고 문 헌

- (1) Blommer, M., Eden, A. and Amman, S.,

2005, "Sound Quality Metric Development and Application for Impulsive Engine Noise," SAE 2005 Noise and Vibration Conference and Exhibition, 2005-01-2482.

(2) Cho, C. H., Kim, T. W. and Oh, J. E., 1995, "A Study on the Characteristics Analysis of Transmission Path for Vibration/noise of Automobile," Annual Autumn Conference of the

KSAE, pp. 365~371.

(3) Park, S. G. and Oh, J. E., 2007, "Transfer Path Analysis and Interior Noise Estimation of the Road Noise Using Multi-dimensional Spectral Analysis Method," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 11, p. 1206.