

〈논 문〉 SAE NO. 97370081

엔진 가진력의 감도해석을 이용한 차실 소음 저감에 관한 연구

A Study on the Noise Reduction of Compartment of Vehicle Using Sensitivity Analysis of Engine Exciting Force

오 재 응*, 김 태 욱**, 송 재 은***, 이 해 승****
J. E. Oh, T. U. Kim, J. E. Song, H. S. Lee

ABSTRACT

Vehicle interior noise has become increasingly important in this recent years. The noise of a vehicle is one of the important problems in a vehicle design. The interior noise is caused by various vibration sources of vehicle compartment. The booming noise of a vehicle can be significantly affected by vibrations transmitted from engine excitation forces to the vehicle body. Specially, we are interested in the state of trasmission paths such as engine mounts to reduce noise in a vehicle compartment.

In this paper, we have been calculated the contribution of each transmission path such as engine mounts to interior noise. To identify contribution of each input sources and transmission paths to output, the effectiveness of each input component to output is calculated. Sensitivity analysis is carried out for investigation of contribution to output due to input variations. With the simulation of magnitude and phase change of inputs using vector synthesis diagram, the trends of synthesized output vector are obtained. As a result, we suggested sensitivity analysis of vector synthesis as a technique of prediction and control for noise in a vehicle compartment.

주요기술용어 : Vector Synthesis Method(벡터 합성법), Effectiveness(영향도), Sensitivity(감도), Engine Mount(엔진 마운트), Booming Noise(부밍음), Magnitude and Phase(크기와 위상)

* 정희원, 한양대학교 자동차공학과 교수

** 정희원, 대우자동차 연구원

*** 한양대학교 대학원 정밀기계학과

**** 한양대학교 대학원 자동차공학과

1. 서 론

최근 승용차에 있어서 엔진의 고출력화 및 에너지 절약 차원에서 차량의 경량화는 필연적

으로 차체의 진동 및 실내 소음을 증가시키는 원인이 되고 있다. 실내 소음의 저감을 위해서는 진동 및 소음원의 특성 해석과 함께 전달경로에 대한 해석이 동시에 요구된다. 여러가지 형태로 이루어지는 복잡한 진동전달 기구를 해석하기 위해서는 진동입력과 전달계통을 다양한 방법으로 모델화하고 입력성분들의 출력에 대한 기여를 평가하여 전달과정에서 발생하는 물리적 특성을 파악하는 것이 필요하다.¹⁻³⁾ 이를 위해서 적용이 간단하고 기계구조물이 구동계로부터 받는 강제력과 그 결과에 의해 발생하는 진동 및 소음 출력의 정량적 설명이 가능한 방법으로써 벡터합성법이 사용되고 있다.⁴⁻⁸⁾

본 논문에서는 실차의 소음·진동 현상을 고려한 엔진 진동-차실 소음 사이의 입출력 모형을 다입력-다출력계로 모델링하여 이를 바탕으로 승용차 실험을 실시하고, 이로부터 얻은 결과를 벡터 합성법에 적용하므로써 실험차량의 가진력과 차실내 소음의 전달특성을 해석하였다.

차량의 엔진 가진력에 대한 차실 음압의 기여정도를 파악하기 위해서 영향도라는 개념을 도입하고⁴⁾ 이 개념으로 차량의 문제시되는 가진 입력을 파악하였다. 또한 실내소음의 저감을 위한 가진 입력의 크기 및 위상변경이 효과적으로 수행될 수 있도록 실내음압에 대한 가진 입력의 감도해석을 수행하였으며, 입력변경 시물레이션을 통하여 입력성분벡터의 크기와 위상을 변경시켰을 때 나타나는 합성 출력벡터의 변화경향을 가시화함으로써 전달계의 물리적 수정에 의하여 발생하는 입력신호의 변화에 의한 합성출력의 변화 및 출력 제어효과를 예측하는 기법을 제시하였다.

2. 이 론

2.1 차실 소음의 모델링

물리계의 전체소음은 가진력의 전달요소를 통하여 발생하는 고체 전달음과 소음 전파공간을 통하여 전달되는 공기음이 합쳐진 상태로 방사하게 된다. 이것을 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$P_r = \sum_n \sum_i P_{ni} + P_m \quad (2.1)$$

P_r : Sound pressure vector at point r in the vehicle compartment

P_{ni} : Sound pressure vector caused by the exciting force acting direction i at point n

P_m : Sound pressure vector caused by airborne sound at point m

또한 엔진마운트계를 고려하면 식 (2.1)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_r = \sum_n \sum_i H_{nir} F_{ni} + P_e H_{er} \quad (2.2)$$

H_{nir} : Frequency response function between force acting direction i at mount point n and sound pressure at point r.

F_{ni} : Force acting i direction at point n

P_e : Sound pressure vector in the engine room

H_{er} : Acoustic frequency response function between the engine room and point r.

Fig.1은 위 식 (2.2)의 개념도를 나타낸 그림이다.

식 (2.2)의 모든 변수들은 크기와 위상을 갖고 위상은 기준 신호에 대한 시간지연을 나타낸다. 그러나 차실의 부밍음은 고체음의 영향이 공기음보다 주요인으로 작용하므로 위 식 (2.2)는 다음과 같이 근사화하였다.

$$P_r = \sum_n \sum_i H_{nir} + F_{ni} \quad (2.3)$$

2.2 가진 입력의 추정

가진력을 추정하기 위해서 구동계의 변위를 x_1 , 구조계의 변위를 x_2 로하여 Fig.2와 같이 단순한 차체 모형을 구성하였다.

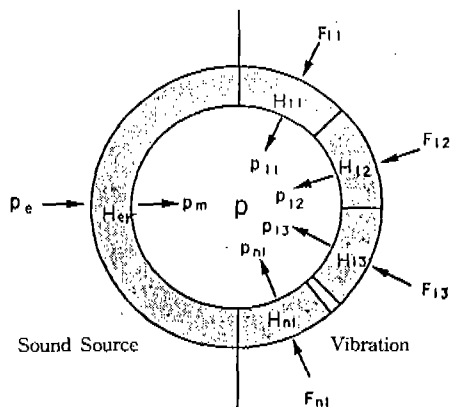


Fig.1 Conceptual Diagram of Interior Booming Nois

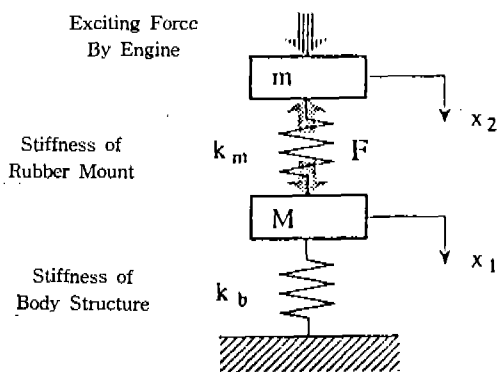


Fig.2 Two D.O.F. Model of a Vehicle System

자동차 차체에 전달되는 힘 F 는 구동계와 구조계 사이의 강성을 통해 전달되는 힘과 같기 때문에 스프링 요소 사이의 전달력 F 는 다음과 같다.

$$F = k_m(x_2 - x_1) \quad (2.4)$$

- k_m : Stiffness of elastic element
- x_2 : Displacement of before mount
- x_1 : Displacement of after mount

윗 식(2.4)은 자동차 마운트의 동강성계수와 구동계의 상대 가속도를 사용하여 다음과 같이

일반적인 식으로 나타낼 수 있다.

$$\{F_n\} = -\frac{1}{\omega^2} [K_{ni}] \cdot [\{A_{ni}\}_a - \{A_{ni}\}_b] \quad (2.5)$$

- ω : Angular frequency
- $[K_{ni}]$: Dynamic stiffness in direction i at point n
- $\{A_{ni}\}_a$: Acc. of before-mount in direction i at point n
- $\{A_{ni}\}_b$: Acc. of before-mount in direction i at point n

2.3 벡터합성법을 이용한 차실 소음의 영향도 해석

각각의 입력성분에 의해서 발생하는 출력성분이 전체 계의 출력에 있어서 어느 정도 영향을 미치고 있는가를 정량적으로 평가하기 위하여 다음과 같은 식으로 정의되는 영향도를 사용하였다.

$$\begin{aligned} \text{영향도}(x_i) &= \frac{|Y_{x_i}(f)| \cos \theta_{x_i}(f)}{|\sum Y_{x_i}(f)|} \\ &= \frac{|Y_{x_i}(f)| \cos \theta_{x_i}(f)}{|Y_{syn}(f)|} \quad (i=1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (2.6)$$

여기서, $|Y_i(f)|$ 는 i 번째 입력성분이 전달계를 통과한 후 나타나는 출력 y 의 벡터성분의 크기이며, $|Y_{syn}(f)|$ 는 각 입력성분이 동시에 작용할 때 발생하는 합성출력의 크기이다. 그리고, θ_{x_i} 는 i 번째 입력성분과 합성출력과의 상대위상을 의미한다. 이러한 관계를 Fig.3에 나타내었다.

2.4 입력성분의 감도해석

각 입력성분 변화에 대한 출력성분의 변화를 수식적으로 전개하였다.

차실 내 임의의 점에 대한 음압을 나타내는

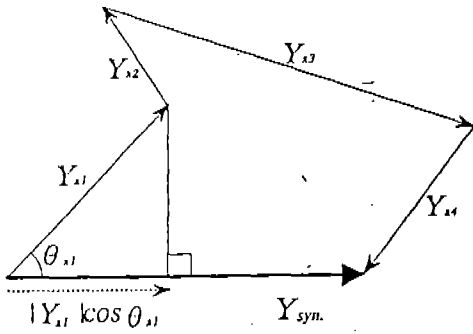


Fig.3 Conceptual Diagram of Effectiveness

식 (2.3)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\langle P_r \rangle}{\langle 2 \sum_{i=1}^n |H_{ir}| |F_i| |H_{ir}| |F_i| \cos[(\phi_i + \psi_{ij}) + \psi_j + \theta] - \sum_{i=1}^n |H_{ir}|^2 |F_i|^2 \rangle} \quad (2.7)$$

ϕ_i : Phase angle of H_{ir}

ψ_j : Phase angle of F_j

θ : Phase of synthesized sound pressure vector

이로부터 각 입력성분벡터의 크기와 위상에 대한 편미분을 하면 다음과 같이 전달력의 크기 및 위상에 대한 감도값을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial |P_r|}{\partial |F_i|} = \frac{|H_{ir}|}{|P_r|} \sum_{j=1}^n |H_{ir}| |F_j| \cos[(\phi_i + \psi_{ij}) - (\phi_j + \psi_j)] \cos \theta \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial |P_r|}{\partial \phi_i} = \frac{|H_{ir}| |F_i|}{|P_r|} \sum_{j=1}^n |H_{ir}| |F_j| \sin[(\phi_j + \psi_j) - (\phi_i + \psi_{ij})] \cos \theta \quad (2.9)$$

3. 실차실험

본 실험은 3점지지 엔진마운트 방식의 2000cc

가솔린엔진을 장착한 승용차를 대상으로 수행하였다. 공회전 상태에서 진동의 주된 경로로 알려져 있는 마운트시스템의 3개 지점, 즉 좌측 엔진 마운트(Left engine mount), 우측 엔진 마운트(Right engine mount), 트랜스미션 마운트(Transmission mount)에서 각각 3축 방향으로 작용하는 가진 입력 9개를 입력신호로 하고, 차실내 전석과 후석의 소음을 출력신호로 하여 실험모형을 구성하였다. 또한, 가진력 추정을 위하여 마운트를 지나기 전 위치에서 엔진의 진동을 측정하고 마운트를 지난 후의 위치에서 고무 마운트에 의해 진동 절연된 차체측 진동을 측정하였다. 또한 차체의 구조-음향 전달함수를 측정하기 위하여 엔진을 탈거한 상태에서 가진기를 이용하여 차체 가진점에서 3방향의 전달함수를 측정하였다. Fig.4는 진동변위 실험의 실험장치 구성도를, Fig.5는 차체 전달함수 측정 실험의 실험장치 구성도를 나타낸다.

진동변위 측정실험은 엔진 회전수 2025rpm으로 고정시킨 상태에서 수행되었으며 2025rpm에 주목한 이유는 실험대상차량의 주 부밍소음 영역이 2025rpm 근처이었기 때문이다. 이와 같이 엔진 회전상태를 유지하며 3축 가속도계를 이용하여 진동가속도를 측정하였다. 입·출력신호들은 증폭기(2635, B&K)에 의해 증폭한 후 아날로그 형태의 신호로써 신호기록기(TEAC XR-7000)에 저장하고, FFT변환기(SA-390)를 이용하여 디지털화한 데이터를 개인용 컴퓨터에 입력시킨 후 벡터합성법 적용을 위하여 데이터베이스화 하였다. 또한 마이크로폰은 A-weighting 상태로 놓아 사람의 감각과 유사한 상태로 음압을 측정하여 전달함수를 구하였다.

진동변위 측정실험의 경우 차실음에 대한 벡터합성법의 적용이 위상에 대한 정보가 중요하므로 동기화하여 측정되었다. 각 마운트 가진 입력의 상대위상은 전석음을 기준으로 구하였다. 얻어진 진동변위 데이터를 가진 입력으로 바꾸기 위해서 마운트제조업체의 실험에 의하여 구하여진 동강성 계수를 이용하였다. Fig.6은 실험방법에 대한 흐름도이다.

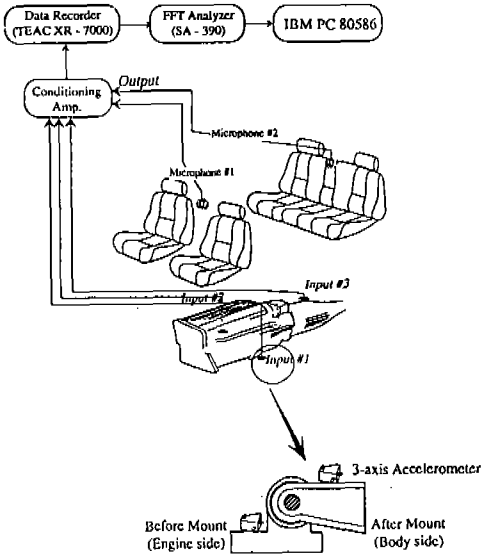


Fig.4 Experimental Setup

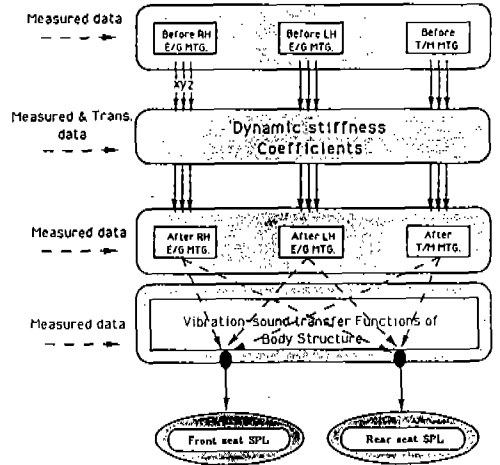


Fig.6 Flow and Concept of Analysis

4. 벡터합성법과 감도해석을 이용한 진동-소음 전달특성 규명

4.1 벡터합성법을 이용한 전달계의 성능평가

차체의 구조-음향 전달함수와 마운트의 동강성계수 그리고 마운트전후에서 측정된 상대변위 및 상대위상으로 계산한 성분음압벡터의 크기와 위상을 입력의 위치에 대해서 서로 비교함으로써 전달계의 전달특성을 평가하였다. Fig.7은 전석과 후석에 대하여 67.5Hz에서 추출한 성분음압벡터와 각각의 음압벡터량을 합성하여 결과적으로 얻어진 합성음압선도를 나타내었다. 벡터선도에서 두 개의 원은 상대적 크기의 비교를 위한 것이며, 벡터의 크기는 표현상의 편의를 위하여 최대벡터를 기준으로 정규화하여 나타내었다. 그림에서 좌측엔진마운트의 상하방향과 우측엔진 마운트의 상하방향을 통하는 가진입력이 전석과 후석 모두에서 큰 성분음압벡터를 만들고 있다.

Table 1은 벡터합성법을 적용하여 예측된 차실음압과 실측음의 크기를 나타낸다.

보다 구체적인 입력에 대한 차실 소음의 영향을 파악하기 위하여 벡터합성법 적용 결과에 성분 음압벡터들의 크기요소와 위상요소를 동시에 고려하여 합성음압벡터에 대한 영향도를

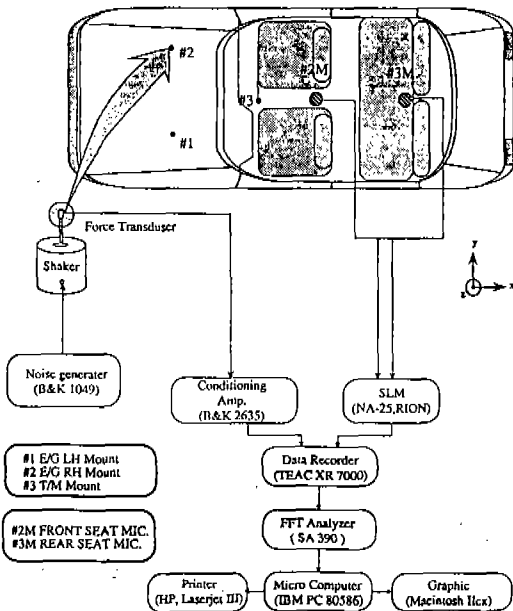


Fig.5 Flow-chart of Experiment and Data Analysis

계산하였다. Table 2는 전석과 후석에서의 가진입력에 의하여 발생한 성분음압벡터의 크기 및 합성음압 벡터에 대한 영향도를 나타내었다. 전석에서 각 입력성분의 영향도를 고려해보면 좌측 엔진마운트(LH E/G MTG.)의 상하 및 우측 엔진마운트(RH E/G MTG.)의 상하방

향 성분이 큰 (+)의 영향도를 가짐으로써 전석 차실소음의 크기에 가장 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있으며, 후석에서도 우측 엔진 마운트(RH E/G MTG.)의 상하 방향이 가장 큰 (+)의 영향도를 가짐으로써 후석 차실 소음의 크기에 가장 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

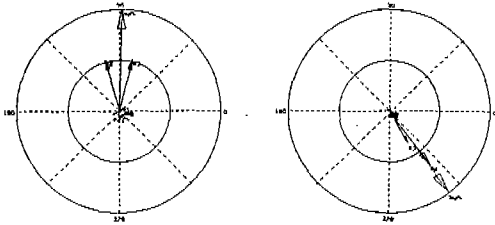


Fig.7 Vector Synthesis Diagram of SPL at Front & Rear Seat(2025 rpm)

Table 1 Comparison of Estimated SPL & Measured SPL

Driving rpm	Output Position	Measured SPL (dBA)	Estimated Syn. SPL (dBA)	Difference (dBA)
2025	Front seat	40.779	41.058	+0.279
	Rear seat	57.275	56.192	-1.083

Table 2 SPL and Effectiveness of Each Component Vector(Front seat, Rear seat)

Input position	Front seat		Rear seat		
	SPL (dBA)	Effectiveness	SPL (dBA)	Effectiveness	
LH E/G MTG.	X(#1)	14.315	-0.0458	25.749	-0.0180
	Y(#2)	1.164	-0.0098	22.380	-0.0073
	Z(#3)	35.917	0.5082	46.189	0.3726
RH E/G MTG.	X(#4)	17.272	0.0614	19.067	-0.0126
	Y(#5)	5.197	-0.0087	17.281	-0.0099
	Z(#6)	35.502	0.4949	52.873	0.6678
T/M MTG.	X(#7)	17.542	-0.0375	15.491	-0.0084
	Y(#8)	17.599	0.0108	22.334	0.0088
	Z(#9)	14.577	0.0265	16.325	0.0070

4.2 차실 소음에 대한 입력의 감도해석

각 마운트로 전달되는 힘의 크기 및 위상의 합성음압벡터에 대한 감도를 Table 3에 나타내었다. 입력의 감도해석은 영향도 해석으로 판별될 수 없는 차실내 소음 저감에 민감한 입력 성분을 판별하기 위해서 도입하였다. 영향도 해석이 출력에 기여한 입력의 크기를 결정한다면 입력성분의 감도해석은 입력변경으로 나타나는 출력의 변화를 나타낸다.

Table 3의 전석의 경우를 보면 현 가진상태에서 트랜스미션 마운트(TM MTG.)의 상하방향으로 전달되는 힘의 크기를 저감시키거나, 좌측 엔진마운트(LH E/G MTG.)의 상하방향으로 전달되는 힘에 시간지연효과를 통한 위상변경이 출력저감에 가장 효과적인 것을 알 수 있다.

Table 3 Sensitivity of Each Input for Front Seat & Rear Seat SPL

Input position		Sensitivity of Mag. (Pas/N)	Sensitivity of Phase (Pas/rad)	Sensitivity of Mag. (Pas/N)	Sensitivity of Phase (Pas/rad)
		Front seat		Rear seat	
		LH E/G MTG.	X(#1)	-1.340e-3	-2.993e-5
LH E/G MTG.	Y(#2)	-2.237e-4	-5.430e-6	-9.562e-4	2.538e-4
	Z(#3)	1.319e-3	2.568e-4	5.523e-3	5.391e-4
	RH E/G MTG.	X(#4)	1.774e-3	4.326e-5	-2.088e-3
RH E/G MTG.	Y(#5)	-2.412e-4	-3.049e-5	-1.568e-3	7.743e-5
	Z(#6)	1.023e-3	-3.477e-4	7.890e-3	-1.403e-4
	T/M MTG.	X(#7)	-2.472e-3	-1.290e-4	-3.161e-3
Y(#8)		1.576e-4	1.525e-4	7.377e-4	-2.285e-4
Z(#9)		4.819e-3	9.001e-5	7.353e-3	-1.045e-4

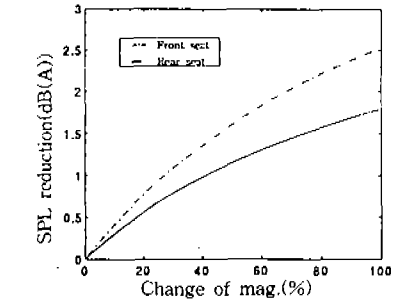
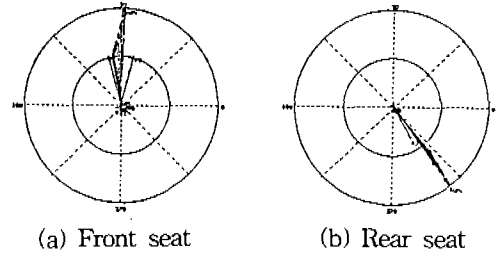
또한 후석의 경우를 보면 현 가진상태에서 우측 엔진마운트(RH E/G MTG.)의 상하방향으로 전달되는 힘의 크기를 저감시키거나, 좌측 엔진마운트로 전달되는 힘의 위상변경이 후석 소음저감에 가장 효과적인 것을 알 수 있다.

5. 입력변경에 따른 차실음압 예측

물리계로부터 측정되는 입력과 출력 신호들은 전달계의 물리적 특성이 변함으로써 시간역 신호의 크기 및 상대 위상이 변하며, 그에 따라 성분음압벡터의 크기 및 위상도 바뀌게 된다. 여기서, 입력의 크기와 위상이 변경하는 것은 엔진의 가진력이 전달경로의 변경 즉 마운트의 강성값, 감쇠값 및 부착조건 등을 변경시킬 때 발생하는 것을 의미하며 마운트를 통하여 가진력의 변화 효과로 생각할 수 있다. 일반적으로 마운트의 강성값이 커지면 마운트를 통과하는 가진력이 커지고 위상의 변화는 거의 없고 감쇠값이 커지면 마운트를 통과하는 가진력이 다소 작아지면서 시간의 지연효과가 나타난다.

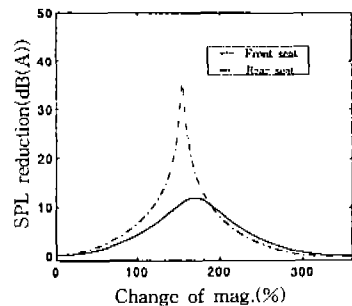
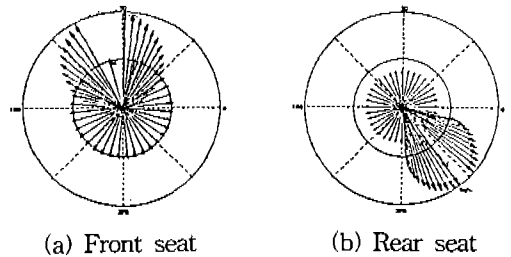
가진입력의 크기를 독립적으로 감소시키면서 각 성분음압벡터와 합성음압벡터의 궤적을 구하여 합성음압벡터의 크기를 입력의 크기변경 전과 비교함으로써, 입력의 크기 변경에 의한 합성 출력의 저감효과가 나타나는 범위를 알아 보았다. 전석과 후석 경우에 대해서 가진입력(좌측 엔진 마운트 상하방향 입력)의 크기를 감소시키면서 얻어지는 합성음압벡터 궤적 가운데 대표적인 경향을 보이는 결과를 Fig.8에 나타내었다. 그림을 통해서 가진입력의 크기가 감소할수록 출력이 감소하는 것을 알 수 있고 입력의 크기저감은 후석보다는 전석의 소음크기를 효과적으로 줄어줄 수 있다.

두 번째로는 가진입력의 크기는 그대로 유지한 상태에서 시간지연을 주어 입력간의 상대 위상각을 증대시켜 입력신호의 위상변경에 따르는 성분음압벡터와 출력음압벡터의 궤적을 예측하는 시뮬레이션을 수행하였다. 다른 가진입력은 고정되어 있다고 가정한 상태에서 특정



(c) SPL reduction of Front & Rear seat

Fig.8 Synthesized Vector Loci of Front & Rear Seat Corresponding to Change of Magnitude of LH E/G MTG.(Z) #3



(c) SPL reduction of Front & Rear seat

Fig.9 Synthesized Vector Loci of Front & Rear Seat Corresponding to Change of Magnitude of LH E/G MTG.(Z) #3

가진입력(좌측 엔진 마운트 상하방향 입력)의 위상각을 독립적으로 변경시키면서 합성벡터의 궤적을 구성하고, 합성음압벡터의 크기를 변경 전과 비교하여 가진입력의 위상변경에 의해서 합성출력의 저감효과가 나타나는 영역을 파악하였다. 전석과 후석 경우에 대해서 가진입력의 시간지연을 주어 얻어지는 합성음압벡터 궤적 가운데 대표적인 경향을 보이는 결과를 Fig.9에 나타내었다. 그래프를 통해서 전, 후석 모두 합성출력의 저감영역이 넓고 저감량이 큰 것을 볼 수 있다. 전석의 경우 144°에서 후석의 경우 176°에서 소음이 가장 크게 저감되는 것으로 보아 전석과후석의 차실 소음 저감은 대체적으로 144°와 176° 사이에서 소음저감이 이루어지는 것을 알 수 있다.

6. 결 론

차실 소음 저감을 위한 차실음 해석에 벡터 해석법 및 감도해석을 도입한 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다입력-다출력으로 모델링된 자동차 실내 소음을 벡터합성법으로 예측한 결과 실험 소음과의 오차가 작았고 각 전석·후석 소음에 대한 입력의 기여정도를 정량적으로 평가할 수 있었다.
- 2) 각 전달입력이 출력소음에 끼치는 영향을 나타내는 영향도 해석과 더불어 각 전달입력의 단위변화에 대한 출력소음의 변화량을 정량적으로 제시하는 감도해석을 통해 효과적인 차실소음 저감 대책을 제시할 수 있었다.
- 3) 엔진마운트로부터 전달되는 입력의 크기 및 위상변경 시물레이션을 통하여 전석과 후석의 소음레벨 변화를 관찰하였고, 좌측 및 우측 엔진마운트의 상하방향으로 전달되는 힘의 저감이 소음저감에 가장 효과적인것을 알았다.

향후 연구에서는 입력의 크기와 위상의 변화를 동시에 수행하는 크기와 위상의 동시변경 감도해석을 연구하고 입력을 가진력 뿐 아니라

입력의 차체측과 엔진측 가속도의 크기와 위상을 변화시켰을 때의 경우를 연구할 예정이다.

후 기

본 연구는 G7 차세대 자동차 안전도 공통기반기술 과제에 의해 수행되었으며 이에 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Wolf Jr., J., A., Joachin, C. A. and Nefske, D. J., 1981, "Application of Structural-Acoustic Diagnostic Technique to Reduce Boom Noise in A Passenger Vehicle", SAE 810398, pp. 1~11.
2. 石兵正男, 左藤茂樹, 青水弘文, 土井三浩, 1992, "流體封入エンジンアウントの振動傳達位相制御による車體振動低減手法", 日本機械學會論文集(C編), 58卷 551號, pp. 45~50.
3. 藤田節男, 1972, "車室こより音現象の解析", 自動車技術會論文集, No. 4, pp. 32~37.
4. 近森順, 1981, "ベクトル合成法にもり音の實驗分析", 三菱重工技報, Vol. 18, No. 3, pp. 128~133.
5. Sakamoto, H., Yazaki, K., Fukushima, M., 1981, "Reduction of Automobile Booming Noise Using Engine Mountings That have an Auxiliary Vibration System", Japan Society of Automotive Engineering Paper, 810399, pp. 1~8.
6. 이정권, 민형선, 심상준, 1991, "벡터 해석법에 의한 차실 소음의 저감", 한국소음진동공학회지, 제1권, 제1호, pp. 141~147.
7. 김진동, 1994, "벡터합성법을 이용한 승용차의 진동-소음 전달특성 규명에 관한 연구" 한양대학교 석사학위논문
8. 桶本貞志, 1992, "パネル振動寄與率解析法のアイドルこもり音への適用", マツダ技報, No. 10, pp. 168~176.