

〈논 문〉

# 엔진의 소음·진동발생기구 및 전달특성 규명 - 다차원해석법과 벡터합성법에 의한 차실소음원 규명 및 소음저감 -

오재응\* · 조준호\*\* · 송재은\*\* · 이해승\*\*\*

(1996년 11월 9일 접수)

## The Identification of Generation Mechanism of Noise and Vibration and Transmission Characteristics for Engine System - The Source Identification and Noise Reduction of Compartment by Multidimensional Spectral Analysis and Vector Synthesis Method -

Jae Eung Oh, Jun Ho Cho, Jae Eun Song and Hae Seung Lee

**Key Words :** Multi-dimensional Spectral Analysis(다차원 스펙트럼해석법), Vector Synthesis Method(벡터합성법), Partial Coherence Function(부분기여도 함수), Partial Coherent Output Spectrum(부분기여 출력스펙트럼), Residual Spectrum(잔류스펙트럼), Effectiveness(영향도)

### Abstract

With the study for identifying the transmission characteristics of vibration and noise generated by operating engine system of a vehicle, recently many engineers have studied actively the reduction of vibration and noise inducing uncomfartableness to the passenger. In this study, output noise was analyzed by multi-dimensional spectral analysis and vector synthesis method. The multi-dimensional analysis method is very effective in case of identification of primary source, but this method has little effect on suggestion for interior noised reduction. For compensation of this, vector synthesis method was used to obtain effective method for interior noise reduction, after identifying primary source for output noise. In this paper, partial coherence function of each input was calculated to know which input was most coherent to output noise, then with simulation of changes for input magnitude and phase by vector synthesis diagram, the trends of synthesized output vector was obtained. As a result, the change of synthesized output vector could be estimated.

### 1. 서 론

최근 자동차 산업은 운영상 효율의 극대화와 차

량의 신뢰성 향상 및 진동과 소음에 대한 엄격한 요구를 만족시키지 않으면 안되는 상황에 직면하고 있다. 특히, 승용차에 있어서 엔진의 고출력화 및 에너지 절약 차원에서 차량의 경량화를 필수로 하는 경향이 보편화되어 차체의 진동 및 실내 소음을 증가시키는 원인이 되고 있다.

이러한 차체의 진동 및 실내 소음의 저감을 위해

\*회원, 한양대학교 기계공학부

\*\*한양대학교 대학원 정밀기계공학과

\*\*\*한양대학교 대학원 자동차공학과

서는 진동 및 소음원의 특성과 함께 전달경로에 대한 해석이 동시에 요구되며,<sup>(1,2)</sup> 이를 위해 입력간의 상관성분을 제거하여 출력에 대한 순수한 기여관계를 알 수 있는 다차원 스펙트럼해석법<sup>(3,4)</sup>과 적용이 간단하고 기계구조물이 구동계로부터 받는 강제력과 그 결과에 의해 발생하는 진동 및 소음 출력의 정량적인 설명이 가능한 방법으로써 벡터합성법<sup>(5,6)</sup>이 사용되고 있다. 본 연구에서는 자동차의 엔진 구동에 의해 발생하는 다양한 위치 및 방향의 입력원별로 차질소음 출력에 대한 순수한 기여관계를 파악하여 효과적으로 소음 및 진동 발생원을 규명할 수 있도록 하고, 이를 통해 규명된 소음 및 진동 발생원이 차실소음에 어떠한 성질을 가지고 있으며, 차실소음저감을 위해서는 이들 소음 및 진동 발생원을 각각 어떻게 조절하여야 하는가를 파악하는 것을 목적으로 한다. 특히, 자동차의 소음 및 진동현상의 주요원인 엔진 가진력이 차실로 전달되는 주경로로 알려진 마운트 시스템의 총 6개 지점에서 각 3축 방향으로 작용하는 가진력을 입력신호로 하고, 차실중석에서의 소음을 출력신호로 하는 18입력 1출력계를 구성하여 실차에 적용할 수 있는 자동차의 진동-소음 모형화기법을 제시한다. 이를 위해 본 연구에서는 엔진의 진동전달에 의한 차실소음발생의 정량적 평가기법인 다차원 스펙트럼해석법에 의해 규명된 차실소음에 큰 기여를 하는 입력에 대하여 각각 입력벡터의 크기와 위상을 변경시키는 시뮬레이션을 수행하여 입력의 수정에 따르는 출력의 변화경향의 예측기법을 개발하여 출력저감을 위한 대책을 제시하려 함으로써 원인 규명을 위한 다차원 스펙트럼해석법에 효과적인 출력저감대책을 마련하기 위한 벡터합성법의 기법을 도입하는 방법을 제안하려 한다.

2. 다차원해석법<sup>(3,4)</sup>과 벡터합성법의 이론<sup>(5,6)</sup>

자동차의 소음은 구동부의 기관폭발, 회전불균형 등의 가진력에 의해서 생성된 에너지가 마운트계, 시스펜션계 등을 거쳐서 구조계에 전달되어 음으로 되는 고체전달음(structure borne sound)과 기관소음, 배기토출음, 마찰음 등이 밀폐계의 판넬을 투과하여 음으로 되는 공기음(air-borne sound)에 의해서 형성된다. 이것은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$P_r = \sum_n \sum_i H_{nir} F_{ni} + P_e H_{er} \tag{1}$$

여기서,

$H_{nir}$  : 진동제어요소  $n$ 점에 작용하는  $i$ 방향, 단위 힘에 대한  $r$ 지점의 음압레벨, 구조-음향 전달함수 [Pa/N]

$F_{ni}$  : 진동제어요소  $n$ 점의  $i$ 방향으로 전달되는 힘 [N]

$H_{er}$  : 엔진룸과 차실내부의 음향-음향전달함수 [dimensionless]

$P_e$  : 엔진룸의 음압 [Pa]

식 (2)의 모든 변수들은 크기와 위상을 갖고 위상은 기준신호에 대한 시간지연을 나타낸다. 실제 자동차에서 차실의 부밍음은 고체음이 주요인<sup>(1)</sup>이므로, 위의 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$P_r = \sum_n \sum_i H_{nir} F_{ni} \tag{2}$$

여러 개의 입력이 전달경로간의 상호 간섭작용에 의해 출력으로 나타내는 경우를 Fig. 1과 같이 다입력/단일출력 모델로 구성할 수 있다.

이러한 계의 출력의 파워스펙트럼을 구하면 다음과 같이 나타낸다.

$$S_{yy}(f) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m H_j^*(f) H_i(f) S_{ji}(f) + S_{nn}(f) \tag{3}$$

또한, 식 (3)에서 입력간의 상호작용이 없는 경우로 가정할 수 있다면, 이 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{yy}(f) = \sum_{i=1}^m |H_i(f)|^2 S_{ii}(f) + S_{nn}(f) \tag{4}$$

이러한, 경우에는 출력에 대한 어떤 입력의 기여를  $|H_i(f)|^2 S_{ii}(f)$ 에 의해 계산할 수 있다. Fig. 1과 같은 계의 경우 상호간의 상관에 의한 항에 의해 원래의 출력스펙트럼 항보다 크게 나타나게 된다. 주파수응답함수법으로 계산을 할 경우에는 상호간의 상관에 의한 항이 중복되어 나타나기 때문에 각각의 입력과 출력사이의 기여 출력스펙트럼만

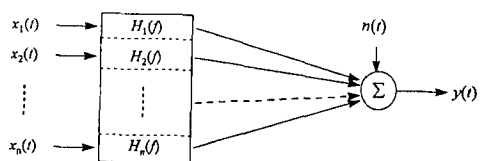


Fig. 1 Multiple inputs and single output system

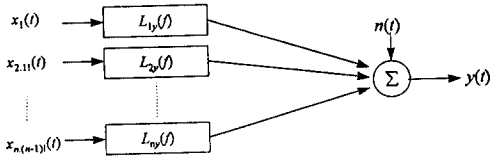


Fig. 2 Multiple inputs/single output model for conditioned inputs

으로는 출력에 더 많은 영향을 미치는 입력을 파악하기 어렵게 된다.

따라서, 입력들 사이에 상호상관이 존재하는 다입력/단일출력계의 경우에는 입력들 사이의 상관성분들을 제거한 Fig. 2와 같은 조건 다입력/단일출력계로 모델화한다.<sup>(2,3,7-9)</sup>

조건 다입력/단일출력계의 모델링은  $x_1(t)$ 가  $x_2(t)$ 에 영향을 주며,  $x_1(t)$ 와  $x_2(t)$ 가  $x_3(t)$ 에, 같은 방법으로  $x_1(t)$ 부터  $x_{(i-1)}(t)$ 까지가  $x_i(t)$ 에 영향을 준다는 가정하의 모델링이다.  $x_{(i-1)}(t)$ 는  $x_1(t)$ 부터  $x_{(i-1)}(t)$ 까지의 선형효과가  $x_i(t)$ 로부터 제거된 신호를 나타낸다. 다입력 선형 시불변 시스템에 대해 잔류스펙트럼(residual spectrum)은 다른 입력들이 출력에 기여하는 선형적인 효과를 제거한 스펙트럼을 나타내며,  $r$ 차의 잔류스펙트럼은 식 (5)과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_{ii \cdot r1}(f) = S_{ii \cdot (r-1)} - |L_{ri}(f)|^2 S_{rr \cdot (r-1)}(f) \quad (i=2,3,\dots, y \ i > r)$$

$$S_{ij \cdot r1}(f) = S_{ij \cdot (r-1)} - L_{ri}(f) S_{ir \cdot (r-1)}(f) \quad (i, j=2,3,\dots, y \ i, j > r) \quad (5)$$

여기서,  $L_{ij}(f)$ 는 입력간 및 입출력간의 상관성분을 제거시킨 경우의 입력간 및 입출력간의 최적 전달함수이며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$L_{ij}(f) = \frac{S_{ij \cdot (r-1)}(f)}{S_{rr \cdot (r-1)}(f)} \quad (6)$$

다입력/단일출력에서 입력간 상관성분의 존재로 최적전달함수를 사용한 조건 다입력/단일출력계로 모델링한 경우,  $i$ 번째 입력이 출력에 기여한 정도를 부분기여도 함수로 나타낸다.

$$r_{ij \cdot r1}^2(f) = \frac{|S_{ij \cdot r1}(f)|^2}{S_{ii \cdot r1}(f) S_{jj \cdot r1}(f)} \quad (i=2,3,\dots, n \ i > r) \quad (7)$$

이 함수는 입력간의 상관관계를 해석적으로 없애 뒤에 구할 수 있는 일반기여도 함수로 생각할 수

있다. 다중기여도 함수는 식 (8)과 같이 정의되며, 구성된 입출력계에서 사용된 입력들이 적절히 고려되었는지를 나타내는 함수로 보통 0.8~0.9 이상의 값을 가질 때 타당하게 적용된다.<sup>(3,4)</sup>

$$\gamma_{yx}^2 = 1 - \frac{S_{nn}}{S_{yy}} \quad (8)$$

한편, 조건 다입력/단일출력 모델에서 입력들이 출력에 차지하는 파워량을 산출하여 다른 모든 입력이 야기하는 선형적인 효과를 제거할 때, 특별한 입력의 순수한 영향에 의해 생기는 출력에서의 파워량을 알기 위해 식 (9)와 같은 부분기여 출력스펙트럼(Partial Coherent Output spectrum; 이하 P.C.O라 부른다.)을 사용한다. 이것은 다입력/단일출력 모델에서 특정입력의 출력에 대한 순수한 기여량을 나타낸다.

$$P.C.O = \gamma_{iy \cdot (n-1)}^2(f) S_{yy \cdot (n-1)}(f) \quad (9)$$

한편, 물리계에 각각의 입력성분에 의해서 발생하는 출력성분이 전체 계의 출력에 있어서 어느 정도 영향을 미치고 있는가를 정량적으로 평가하는 것이 필요하며, 입력과 출력 신호를 벡터적으로 고려하는 해석방법에 의하여 근사적으로 예측할 수 있다. 벡터합성법을 이용한 해석에 있어서 입력성분의 출력에 대한 영향정도를 파악하기 위해서 다음과 같은 식으로 영향도를 사용한다.<sup>(1,6)</sup>

$$\text{영향도}(x_i) = \frac{|Y_{xi}(f)| \cos \theta_{xi}(f)}{|Y_{syn}(f)|} \quad (i=1,2,\dots) \quad (10)$$

여기서,  $|Y_{xi}(f)|$ 는  $i$ 번째 입력성분이 전달계를 통과한 후 나타나는 출력의 벡터성분의 크기이며,  $|Y_{syn}(f)|$ 는 각 입력성분이 동시에 작용할 때 발생하는 합성출력의 크기이다. 그리고,  $\theta_{xi}$ 는  $Y_{xi}$ 와  $Y_{syn}$ 의 상대위상을 의미한다. 이러한 관계를 Fig. 3에 나타내었다.

영향도는 (+)와 (-)부호의 값을 가질 수 있으며, 1이상이 되기도 한다. (+)의 영향도는 전체 출력을 증가시키는 입력벡터의 성분으로 작용하며, (-)의 영향도를 가지는 벡터성분은 다른 성분과 상쇄되어 전체출력을 감소시키는 역할을 하는 것을 의미한다. 식 (10)에서 알 수 있듯이 벡터합성법에서의 영향도는 그 크기에 의해서 뿐만 아니라 전체 출력벡터와의 상대위상에 따라 평가한다. 그러므로, 출력의 크기를 줄이기 위해서 전달계의 특성을

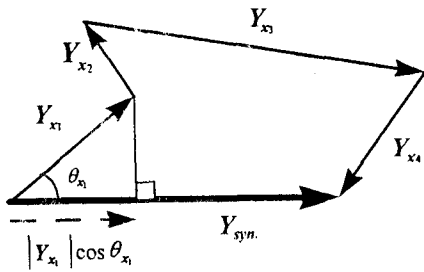


Fig. 3 The definition of effectiveness

바꾸는 경우에 있어서 단순한 입력성분의 절대적인 크기를 감소시키는 방법보다는 위상을 함께 고려하는 것이 효과적인 것을 알 수 있다.

### 3. 차실소음의 해석 및 저감을 위한 실차실험

본 연구에서는 엔진 좌우마운트, 트랜스미션 마운트, 배기계행어 좌우 고무부쉬, 배기계찌리관행어 고무부쉬 등 총 6점에서 구동계 및 배기계의 진동이 차례로 전달되는 15인승 승합차에 대하여 마운트 전후의 진동 및 차실중석 음압측정 그리고 진

동-음향 전달계수 측정실험을 수행하였다. 마운트 전후의 진동과 차실내 음압을 측정하는 실험장치도를 블록선도로 Fig. 4에 나타내었다. 자동차의 공회전상태에서 소음 및 진동 특성을 규명하는 동시에 4실린더 엔진을 장착한 자동차의 고속 주행시 승차감을 저해하는 차실내 구조 연성공진현상인 부밍소음의 해석을 수행하였다. 먼저, 공회전상태에서 실험을 수행하기 위해 엔진회전수가 실험 대상 차량이 부밍소음을 일으키는 엔진회전수가 3200 rpm인 것을 고려하여 사시 다이노모상에서 엔진회전수를 3200 rpm으로 고정된 상태에서 진동가속도와 차실음압을 최대 주파수 200 Hz로 측정하였다. 이와 같이 최대 주파수를 200 Hz까지 고려한 이유는 관심 엔진회전수 3200 rpm의 2차 조화성분이 107 Hz이고, 뒤에 설명할 벡터합성법은 특정주파수에 대한 해석이므로 최대 주파수를 더 높은 주파수까지 확장할 필요가 없었기 때문이다. 엔진으로부터 발생한 가진입력이 마운트 시스템을 통하여 전달되면서 차실소음에 미치는 영향을 규명하기 위하여 실험을 통하여 얻은 진동 및 소음 신호의 스펙트럼을 각각 구하였다. 마운트 시스템을 지나가기 전의 엔진측과 마운트를 지나면서 가진력이 절

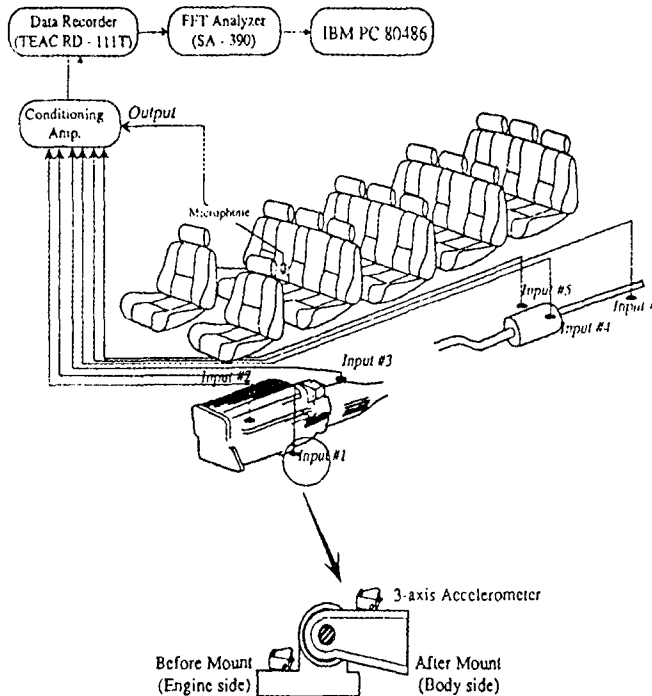


Fig. 4 Experimental setup

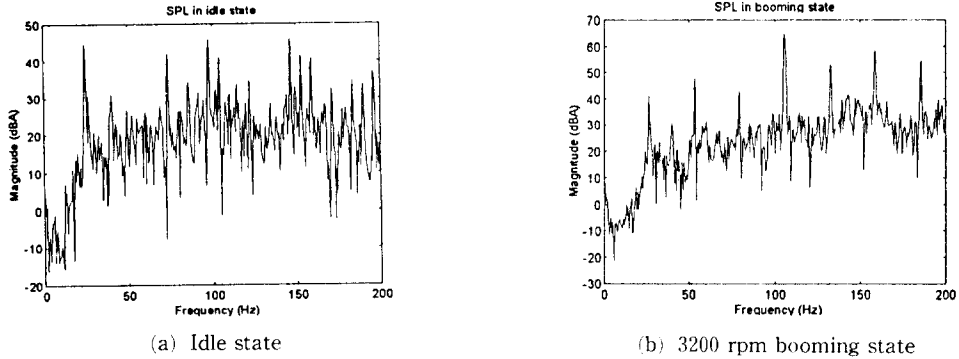


Fig. 5 Spectrum of sound pressure at middle seat

연되어 나타나는 차체측 위치에서 마운트 브라켓 위치 6곳의 3방향 진동가속도 신호를 입력으로 하고, 가진입력으로 발생하는 차실내 중석에서 측정 한 음압신호를 출력으로 하여 데이터를 수집하였다. Fig. 5를 보면 실험에 사용된 차량의 경우 엔진의 폭발에 의한 가진입력이 크랭크축을 통하여 마운트 전후로 전달되어 마운트 전후에서 25 Hz와 그 조화성분이 주요 피크를 이루며, 부밍소음 주파수 대역에 있는 엔진회전 3200 rpm의 경우 엔진회전수에 대한 2차 조화성분인 107 Hz 근처에서 큰 피크를 이루는 것을 볼 수 있다.

4. 다차원해석법에 의한 문제 입력의 규명

다차원 스펙트럼해석법을 적용하기 위해서는 입력간의 상관( $\gamma_{ij}^2$ )과 입출력간의 상관( $\gamma_{io}^2$ ) 관계를 검토해야 할 필요가 있다. 특히, 입력간의 일반기여도 함수( $\gamma_{io}^2$ )는 임의의 입력  $x_i(t)$ 와  $x_j(t)$ 가 독립적인가 혹은 상호간의 상관관계가 존재하는가를 판단하는데에 중요하다. 일반적으로 가솔린기관 등과 같은 계에 다차원 스펙트럼해석법을 적용하기 위해서는 입력간의 일반기여도 함수가 0.5 이상의 값을

Table 1 The classification of reordered number of inputs in 3-inputs and single-output system at 25 Hz in idle state

Reordered No.	#1	#2	#3
Input	Left engine mount in up & down direction	Left support mount of exhaust system in front & rear direction	Transmission mount in left & right direction

Table 2 Values of partial coherence function and multiple coherence function at 25Hz in idle state

Coherence function	Input position		
	At body side	At engine side	Relative acc.
$\gamma_{1y}^2$	0.999	0.988	0.996
$\gamma_{2y-1}^2$	0.843	0.458	0.845
$\gamma_{1y-2,3}^2$	0.618	0.704	0.966
$\gamma_{2y-1,3}^2$	0.518	0.043	0.092
$\gamma_{3y-1,2}^2$	0.063	0.883	0.616
$\gamma_{y-x}^2$	0.826	0.967	0.988

가져야 하고, 입출력간의 일반기여도 함수가 0.7 이상의 높은 값이 요구된다.<sup>(3)</sup> 공회전시에는 이러한 조건과 입력간의 일반기여도 함수가 1에 가까운 입력들을 묶어서 하나의 입력으로 보면 좌우측엔진 마운트, 트랜스미션 마운트, 배기계 좌측지지 행어의 크게 3개의 입력군으로 생각할 수 있었다. 입력군을 대표할 수 있는 입력을 상대적으로 일반기여

도가 높은 입력으로 선정하여 차체측, 엔진측 및 두 가속도의 차로 구한 상대가속도에 대하여 대표 입력을 선정하면 Table 1과 같다.

한편, 부밍시에는 입력 및 입출력간의 일반기여도 함수의 크기가 모두 1에 가까운 값을 가지므로 단일입력/단일출력계로 볼 수 있다. 공회전시의 3 입력 1출력계로 모델링한 계에 대해 공회전시 25

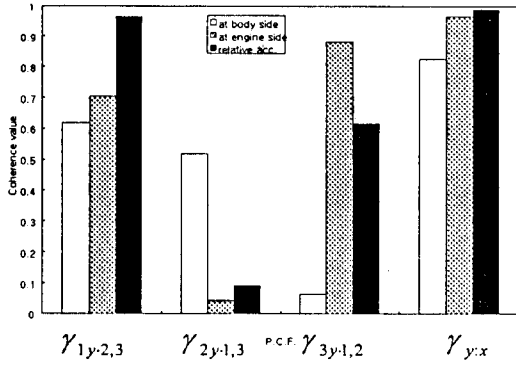


Fig. 6 Values of partial coherence function and multiple coherence function at 25Hz in idle state

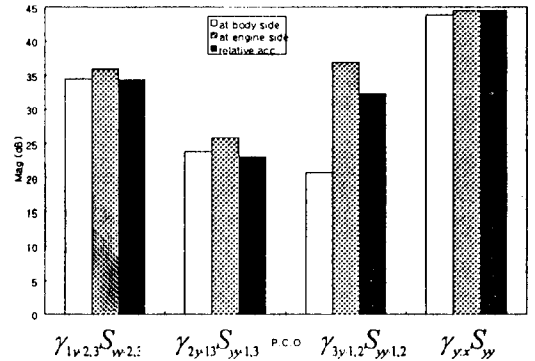


Fig. 7 Comparison of partial coherent output spectrum and measured data at 25 Hz in idle state

Table 3 Comparison of partial coherent output spectrum and measured data at 25 Hz in idle state (dB)

Partial coherent spectrum output	Input position		
	At body side	At engine side	Relative acceleration
$\gamma_{1y-2,3}^2 S_{yy-2,3}$	34.4	35.9	34.3
$\gamma_{2y-1,3}^2 S_{yy-1,3}$	23.8	25.8	23.1
$\gamma_{3y-1,2}^2 S_{yy-1,2}$	20.8	36.9	32.3
$\gamma_{y,x}^2 S_{yy}$	43.8	44.5	44.6
Measured data	44.7		

Table 4 Shield effect at 25 Hz in idle state

Shielded path	Shielded transfer function	Magnitude of reduction (dB)		
		At body side	At engine side	Relative acc.
Left engine mount in up & down direction	A	5.3	4.4	5.1
Left support mount of exhaust system in	B	4.9	1.8	3.2
Transmission mount	C	2.4	4.8	4.7

A =  $S_{yy}(f) - S_{yy}(H_1=0)$ , B =  $S_{yy}(f) - S_{yy}(H_2=0)$ , C =  $S_{yy}(f) - S_{yy}(H_3=0)$

Hz에 대한 부분기여도 함수의 값을 구하여 나타내면 Table 2와 Fig. 6과 같다. 공회전시의 운전주파수인 25Hz에서 차체측은 좌측엔진 마운트의 상하방향의 진동성분이 가장 큰 부분기여도의 값을 나타내고 있음을 알 수 있고, 엔진측은 트랜스미션

마운트의 좌우방향의 진동성분의 부분기여도가 가장 크게 나타났다.

3개의 입력들에 대한 부분기여 출력스펙트럼의 크기를 나타내면 Table 3과 Fig. 7와 같으며, 차체측은 좌측엔진 마운트의 상하방향의 진동성분이,

**Table 5** Sound pressure level by structural vibration of each input at 25 Hz in idle state

Inputs	Equation of calculation	Magnitude of SPL (dB)
Left engine mount in up & down directin	A	44.53
Left support mount of exhaust system in front & rear direction	B	44.68
Transmission mount in left & right direction	C	43.93
Measured data	-	44.74

$$A = S_{yy} - \{(\gamma_{1y,2,3}^2 \cdot S_{yy,2,3})_{\text{Eng}} - (\gamma_{1y,2,3}^2 \cdot S_{yy,2,3})_{\text{Body}}\}$$

$$B = S_{yy} - \{(\gamma_{2y,1,3}^2 \cdot S_{yy,2,3})_{\text{Eng}} - (\gamma_{2y,2,3}^2 \cdot S_{yy,1,3})_{\text{Body}}\}$$

$$C = S_{yy} - \{(\gamma_{3y,1,2}^2 \cdot S_{yy,1,2})_{\text{Eng}} - (\gamma_{3y,1,2}^2 \cdot S_{yy,1,2})_{\text{Body}}\}$$

**Table 6** Sound pressure level by structural vibration of each input at 107 Hz in booming state

Inputs	Equation of calculation	Magnitude of SPL (dB)
Transmission mount in pu & down direction	D	64.67
Measured data	-	64.73

$$D = S_{yy} - \{(\gamma_{1y}^2 \cdot S_{yy})_{\text{Eng}} - (\gamma_{1y}^2 \cdot S_{yy})_{\text{Body}}\}$$

**Table 7** The magnitude of frequency response function ( $H_r^* H_j S_{ij}$ )

No. input	Magnitude (dB)			No. input	Magnitude (dB)		
	Body	Engine	Relative		Body	Engine	Relative
1	64.41	64.44	62.52	10	64.41	64.44	62.52
2	64.40	64.39	62.51	11	64.11	64.39	62.36
3	64.40	64.35	62.49	12	64.34	64.42	62.40
4	64.32	64.46	62.50	13	64.23	64.45	62.45
5	64.41	64.46	62.48	14	64.28	64.48	62.44
6	64.37	64.46	62.46	15	64.21	64.43	62.42
7	64.44	64.46	62.52	16	64.25	64.45	62.45
8	64.44	64.44	62.52	17	64.27	64.40	62.37
9	64.42	64.42	62.52	18	64.29	64.46	62.48

엔진측은 트랜스미션 마운트의 좌우방향의 진동성분이 가장 크게 나타났다. 한편, 구성된 입출력계에서 각각의 전달함수를 차단시킴으로써 전달특성을 일 수 있는 차단효과를 구하여 나타내면 Table 4와 같으며, 차체측은 좌측엔진 마운트의 전달경로를 차단( $H_1=0$ )시켰을 때에, 엔진측은 트랜스미션 마운트의 전달경로를 차단( $H_3=0$ )시켰을 때 가장 큰 저감효과를 보이고 있어서 이 부분에 저감대책을 세우는 것이 유리하다. 또한, 진동의 음향전달 특성에 대한 평가를 위해서 출력이 측정된 일정한 값으로 되어 있고, 차실에서의 음향모드는 일정한 값을 갖는다고 할 때, 출력소음레벨에서 엔진측과 차체측 입력의 기여스펙트럼의 차를 뺀 값을 구하여 Table 5에 나타내었다. 여기서, 배기계 좌측 지지 마운트의 진동이 음향으로 전달되는 효율이 가장 높으며, 트랜스미션 마운트의 절연이 상대적으로 잘 되어 있음을 알 수 있다. Table 6은 부밍시 진동이 음향으로 변환되는 양을 나타낸 것인데 음

향으로의 변환효율이 높음을 알 수 있다.

부밍시 각각 단일입력 단일출력계를 구성했을 경우의 주파수응답함수를 구하여 크기를 구하여 보면 Table 7과 같다. 이 때, 부밍시에는 전반적으로 모든 입력의 부밍시 주파수응답함수의 크기는 거의 비슷함을 알 수 있다.

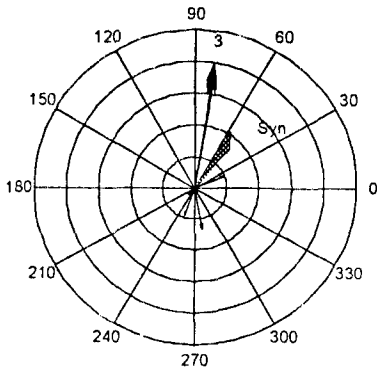
### 5. 벡터합성법에 의한 입력변경 시뮬레이션 및 영향도 해석

본 절에서는 다차원 스펙트럼해석법을 통하여 가장 문제가 되고 있는 입력에 대하여 저감대책을 제시하기 위하여 문제입력에 대한 크기 및 위상을 변경시킴으로써 변화하는 차실소음의 저감경향을 파악하고자 한다.

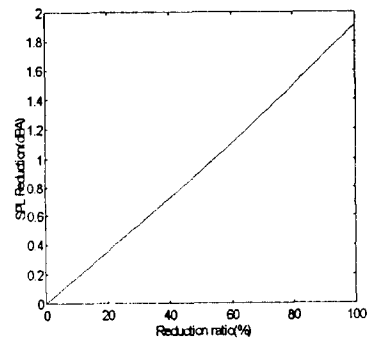
Table 8은 다차원해석법에 의해 문제가 된 공회전시의 3개 입력의 영향도와 부밍시 대표입력에 대한 영향도를 구하여 나타내었다. 공회전시에는 좌

Table 8 The magnitude of effectiveness of each input

State	Input	Effectiveness
Idle	Left engine mount in up & down direction at body side	0.497
	Transmission mount in left & right direction at engine side	-0.128
	Left engine mount in up & down direction of relative acceleration	0.851
Booming	Transmission mount in up & down direction at body side	-0.225
	Transmission mount in up & down direction at engine side	0.262
	Transmission mount in up & down direction of relative acceleration	-0.050



(a) SPL change of middle seat



(b) SPL reduction of middle seat

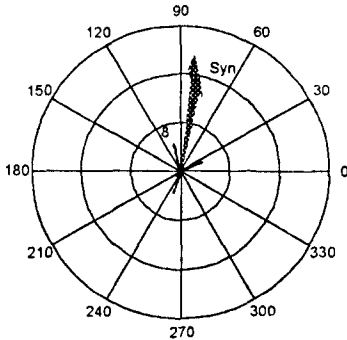
Fig. 8 Syn. Vector loci of middle seat corresponding to change form mag. of LH E/G MTG. (Up/Down direction) at body side in idle state



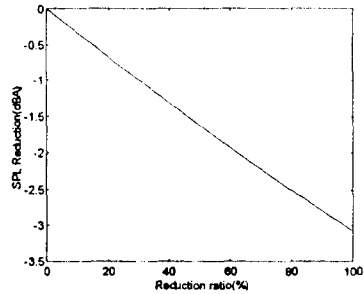
측엔진마운트 차체측과 상대가속도 상하방향의 영향도가 가장 큰 양의 값을 가지는 것으로 나타났다. 엔진측의 진동입력에 대한 영향도의 크기는 음의 영향도를 가지는 것으로 나타났다.

이로부터 공회전시의 차실소음을 줄이기 위해서

는 좌측엔진마운트의 상하방향의 진동전달을 줄이고, 트랜스미션 마운트의 좌우방향의 진동전달을 다시 늘여 차실내부 음압을 줄이도록 하는 방향으로 저감대책을 세워야 하며, 부밍시의 차실소음저감을 위해서는 트랜스미션 마운트의 상하방향 입력

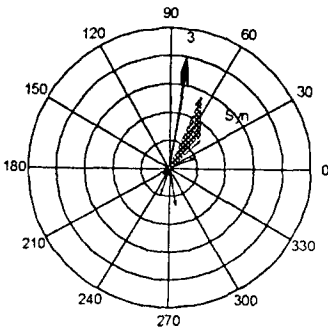


(a) SPL change of middle seat

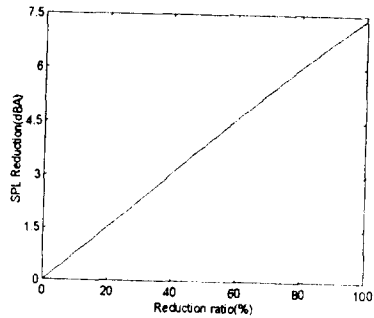


(b) SPL reduction of middle seat

**Fig. 9** Syn. Vector loci of middle seat corresponding to change for mag. of TM MTG. (Left/Right direction) at engine side in idle state

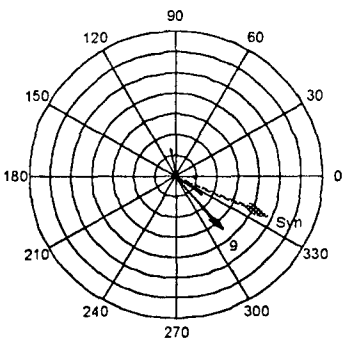


(a) SPL change of middle seat

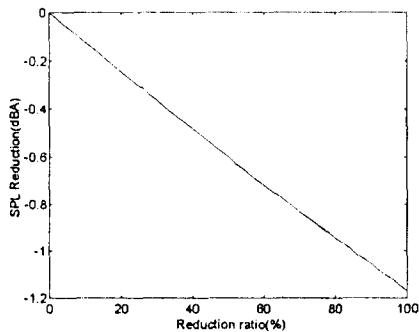


(b) SPL reduction of middle seat

**Fig. 10** Syn. Vector loci of middle seat corresponding to change for mag. of LH E/G MTG. (Up/Down direction) of relative acceleration in idle state



(a) SPL change of middle seat

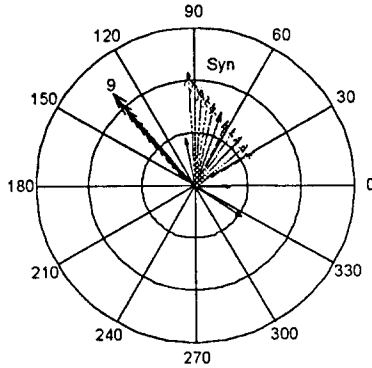


(b) SPL reduction of middle seat

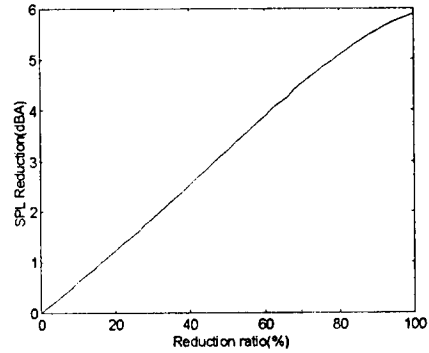
**Fig. 11** Syn. Vector loci of middle seat corresponding to change for mag. of LH E/G MTG. (Up/Down direction) at body side in booming state

의 차체측과 상대가속도는 진동전달량을 늘여 차실 내부 음압을 줄여야 하며, 이는 엔진측의 진동 전달량을 감소시켜야 함을 의미한다.

각 가진입력의 크기를 독립적으로 감소시키면서 각 입력성분벡터와 합성된 음압벡터의 궤적을 구하여 합성음압벡터의 크기를 입력의 크기변경전과 비

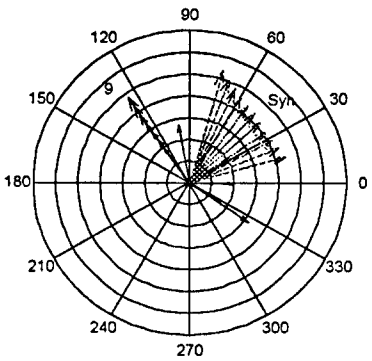


(a) SPL change of middle seat

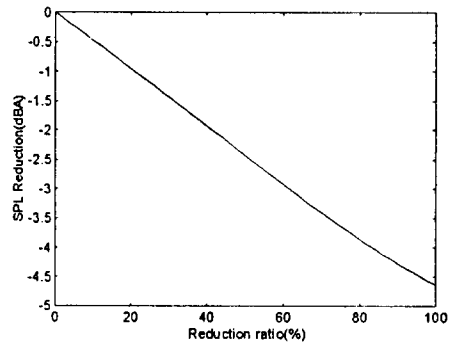


(b) SPL reduction of middle seat

**Fig. 12** Syn. Vector loci of middle seat corresponding to change for mag. of LH E/G MTG. (Up/Down direction) at engine side in booming state

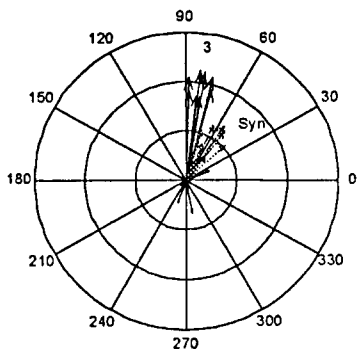


(a) SPL change of middle seat

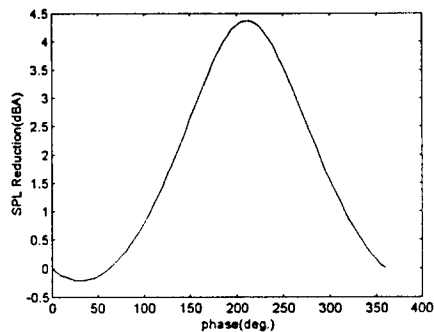


(b) SPL reduction of middle seat

**Fig. 13** Syn. Vector loci of middle seat corresponding to change for mag. of LH E/G MTG. (Up/Down direction) of relative acceleration in booming state



(a) SPL change of middle seat



(b) SPL reduction of middle seat

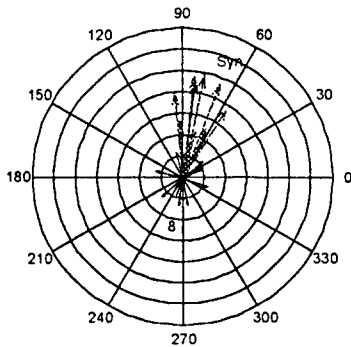
**Fig. 14** Syn. Vector loci of middle seat corresponding to change for phase of LH E/G MTG. (Up/Down direction) at body side in idle state

교함으로써, 입력의 크기변경에 대한 합성출력의 저감효과가 나타나는 범위를 알아보았다.

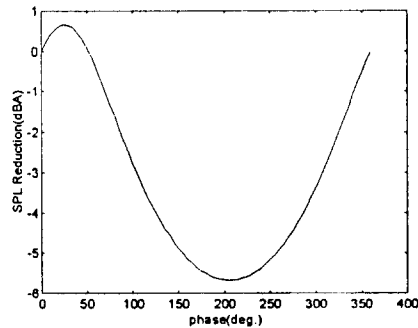
차체측의 좌측엔진 마운트의 상하 방향의 진동성분에 대해 크기변경 시뮬레이션을 실시한 결과를 나타내면 Fig. 8과 같다. Fig. 8(a)는 공회전시의 좌측엔진 마운트의 상하방향으로 전달되는 차체측의 진동성분의 크기가 작을수록 중석에서의 음압이 저감되는 것을 보여주고 있으며, 이를 원래의 소음출력과 비교하여 그래프로 나타내면 Fig. 8(b)와 같다. 엔진측 트랜스미션 마운트의 좌우방향으로 전달되는 진동성분의 크기를 저감시킬 때의 음압변화를 Fig. 9(a)에 나타내었으며, 이를 원래의 소음출력과 비교하여 그래프로 나타내면 Fig. 9(b)와 같다. 이 때 트랜스미션 마운트의 좌우방향성분의 크기를 저감시킬수록 오히려 출력소음이 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 10(a)에는 상대가속도 성분의 크기를 감소시킬수록 출력소음의 크기가

저감되어 Fig. 10(b)로부터 최대 7.3 dB까지 저감되는 것을 알 수 있다.

한편, 부밍상태에서는 대표적인 입력 하나를 정하여 입력변경 시뮬레이션을 실시하였다. 차체측, 엔진측, 상대가속도 성분의 트랜스미션 마운트의 상하방향의 진동성분에 대하여 입력의 크기를 변경시켜 출력음압의 변화를 나타내면 다음과 같다. Fig. 11(a), Fig. 13(a)에서 보는 바와 같이 차체측과 상대가속도 성분의 진동성분의 크기가 작아질수록 출력소음의 크기가 증가하는 것을 나타내고 있고, 이를 Fig. 11(b), Fig. 13(b)에서 확인할 수 있다. Fig. 12(a)에서 보는 바와 같이 엔진측의 성분을 저감시킬 경우에는 출력소음이 저감되며, 저감경향은 Fig. 12(b)와 같이 나타나는 것을 알 수 있다. 따라서, 공회전시에는 좌측엔진마운트의 상하방향의 차체측과 상대가속도의 크기를, 부밍시에는 트랜스미션 마운트의 상하방향의 엔진측 진동성분

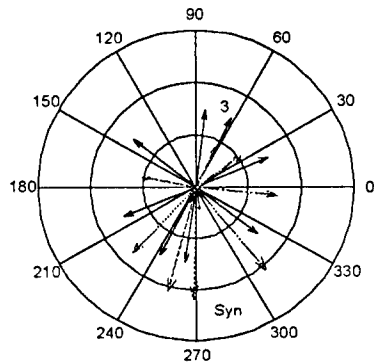


(a) SPL change of middle seat

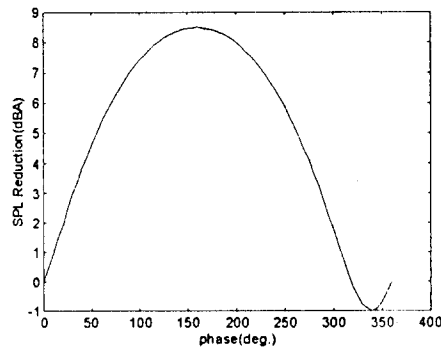


(b) SPL reduction of middle seat

Fig. 15 Syn. Vector loci of middle seat corresponding to change for phase of TM MTG. (Left/Right direction) at engine side in idle state



(a) SPL change of middle seat



(b) SPL reduction of middle seat

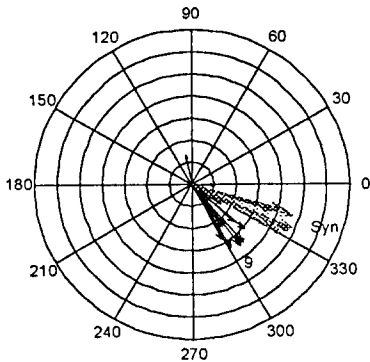
Fig. 16 Syn. Vector loci of middle seat corresponding to change for phase of LH E/G MTG. (Up/Down direction) of relative acceleration in idle state

의 크기를 줄이는 것이 출력소음저감에 효과적임을 보여주고 있다.

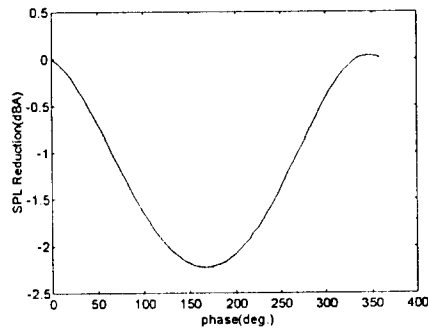
각 가진 입력의 크기는 그대로 유지한 상태에서 시간지연을 주어 입력간의 상대위상각을 증대시켜 입력신호의 위상변경에 따르는 입력성분벡터와 출력음압벡터의 궤적을 예측하는 시뮬레이션을 수행하였다. 다른 가진입력은 고정되어 있다고 가정한 상태에서 특정 가진입력의 위상각을 독립적으로 변경시키면서 합성벡터의 궤적을 구성하고, 합성음압벡터의 크기를 변경전과 비교하여 가진입력의 위상변경에 의해서 합성출력의 저감효과 나타나는 영역을 파악하였다. 공회전시 차체측의 좌측엔진 마운트의 상하방향의 진동성분에 대해 위상변경 시뮬레이션을 실시한 결과를 나타내면 Fig. 14(a)와 같다. 이 입력에서의 저감효과는 대부분의 위상변경 영역에서 나타나고 있으며, 특히 210°일 때 최대의

저감효과를 갖는다는 것을 Fig. 14(b)에서 알 수 있다. 엔진측의 트랜스미션 마운트의 좌우방향의 위상을 변경할 경우 Fig. 15(a)와 같이 대부분의 영역에서 출력소음의 크기가 증대되며 그 경향은 Fig. 15(b)와 같다. 한편, 좌측엔진 마운트의 상하방향의 상대가속도에 대한 위상변경시에 Fig. 16(a)에서 보는 바와 같이 저감되며 최대 8.3dB까지 저감됨을 Fig. 16(b)를 통해 알 수 있다.

부밍상태에서는 트랜스미션 마운트의 상하방향의 진동성분에 대하여 입력 위상변경 시뮬레이션을 실시하였고, 위상변경에 따른 출력음압의 변화를 알아보면 다음과 같다. Fig. 17(a), Fig. 19(a)와 같이 입력의 위상변경 결과 차체측과 상대가속도의 변경시 대부분의 위상변경 영역에 대하여 저감효과를 보이지 못하고 있으며, 그 변화경향은 Fig. 17(b), Fig. 19(b)와 같다. 엔진측의 위상변경시의

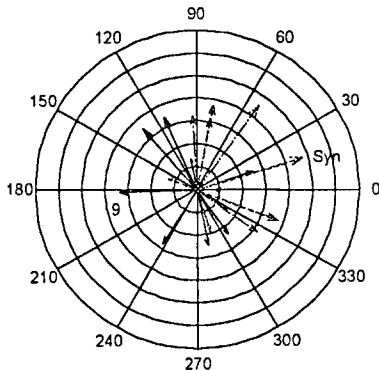


(a) SPL change of middle seat

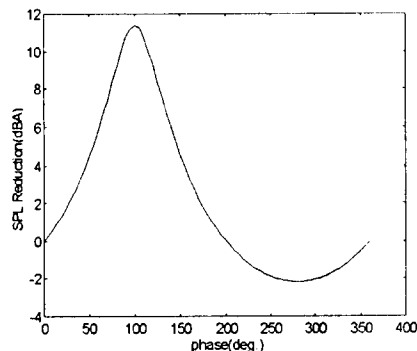


(b) SPL reduction of middle seat

Fig. 17 Syn. Vector loci of middle seat corresponding to change for phase of TM MTG. (Up/Down direction) at body side in booming state



(a) SPL change of middle seat

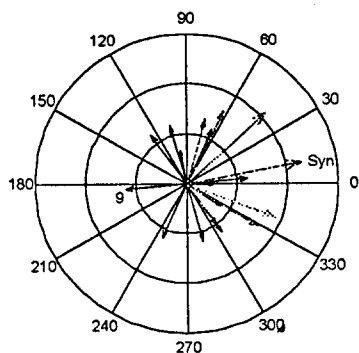


(b) SPL reduction of middle seat

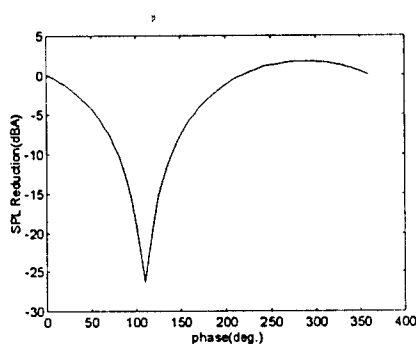
Fig. 18 Syn. Vector loci of middle seat corresponding to change for phase of TM MTG. (Up/Down direction) at engine side in booming state

**Table 9** Comparison of measured pressure between before and after attaching dynamic absorber at transmission mount position [Unit : dBA]

Before attaching dynamic absorber	82.0
After attaching dynamic absorber	78.0
Noise reduction level	4.0

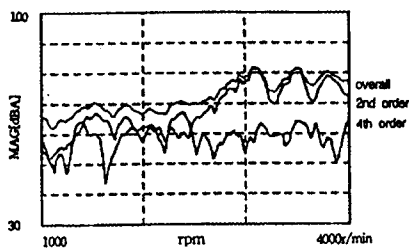


(a) SPL change of middle seat

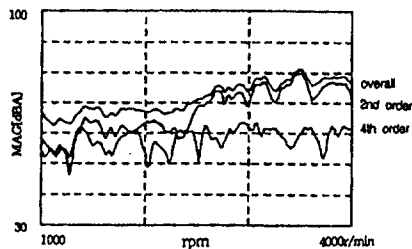


(b) SPL reduction of middle seat

**Fig. 19** Syn. Vector loci of middle seat corresponding to change for phase of TM MTG. (Up/Down direction) of relative acceleration in booming state



(a) Before attaching dynamic absorber



(b) After attaching dynamic absorber

**Fig. 20** Noise at the ear position of middle seat

출력음압성분의 변화는 Fig. 18(a)와 같고, 105°에서 최대 약 11 dB 정도까지 저감되는 것을 Fig. 8 (b)를 통해 알 수 있다. 다만 향후 위에서 입력의 크기와 위상을 개별적으로 변경하는 대신 동시에 최적화시키는 연구가 더욱 필요하다.

성능개선을 위해 지금까지 수행한 차실소음저감안을 도출하여서, 그 중 부밍상태의 경우에 대해 실차에 적용하여 그 결과를 나타내었다. 진동입력을 감소시키기 위해 동흡진기를 이용하는 것은 우리가 관심을 가지는 특정주파수의 진동량을 줄이기 위한 방법으로 적합하여 널리 이용되고 있는 방법인데, 이 때, 마운트의 전후의 위상이 동위상이고

영향도가 양인 경우에는 동흡진기를 엔진측에 부착해야 하고, 음인 경우에는 차체측에 부착하여야 한다.<sup>(5)</sup> 실험 대상차의 경우 트랜스미션 마운트에 문체의 부밍소음(3200 rpm)에 해당하는 107.0 Hz의 동흡진기를 부착하여 소음저감을 수행하였다. Table 9에는 107 Hz영역의 부밍소음 저감량을 나타내었고 대책 전후에 소음 전체 레벨을 Fig. 20에 나타내었다. 실차에 동흡진기를 부착한 장면을 Photo 1에 나타내었다. 이와 같이 트랜스미션 지지마운트에 동흡진기를 부착함으로써 대상차량의 차실소음을 증석의 경우 4.0 dB 정도 저감시킬 수 있었다.



Photo 1 Scene of dynamic absorber attachment at T/M mount

## 6. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 차실중석소음에 영향을 미치는 주된 진동원을 규명하기 위하여 18입력 1출력계의 모델을 사용하였으며, 구동계로부터의 구조 전달소음을 분석하기 위하여 다입력/단일출력계로 모형화하는 기법을 제시하였다.

(2) 공회전시와 3200 rpm의 부밍상태에 대하여 각각 기여도 해석을 실시하여 다차원 스펙트럼해석법을 적용할 수 있는 다입력/단일출력계를 구성한 후, 현 마운트계에서 문제가 되는 입력원을 규명하였다.

(3) 다차원 스펙트럼해석을 통하여 규명된 문제 입력원에 대하여 해당 진동 입력원의 크기 및 위상을 변경시켜 합성출력에 나타나는 효과를 예측할 수 있는 시뮬레이션기법을 제시함으로써 다차원 스펙트럼 해석시 저감대책도 함께 세울 수 있는 방안을 제시하였다.

(4) 다차원 스펙트럼해석 결과 공회전시에는 좌측엔진 마운트의 상하방향성분이 가장 문제가 되고 있었으며, 차체측과 상대가속도의 성분은 크기는 줄이고, 위상을 최적인 각도로 변경시키는 것이 출력소음을 줄이는 데 효과적임을 알았다.

(5) 부밍시에는 소음에 대해 단일입력계로 볼 수 있어, 트랜스미션 마운트의 상하방향성분을 대표로 입력변경을 한 결과 차체측과 상대가속도 성분의

크기를 저감시키면 출력소음이 늘어나게 됨을 알았다. 실제로 차체측에 트랜스미션 마운트 상하방향에 동흡진기를 부착한 경우 출력소음을 4 dB 정도 저감할 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 1996년도 과학재단의 특정연구 연구비 지원(과제번호: 94-0200-08-03-3)에 의해 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 김태욱, 1995, "벡터합성법과 감도해석을 이용한 차실소음저감에 관한 연구," 석사학위논문, 한양대학교, 서울.
- (2) 藤田節男, 1972, "車室こもり音現象の解析," 自動車技術會論文集, No. 4, pp. 32~37.
- (3) 吳在應, 森 敏, 松井昌幸, 安田博之, 山下恭弘, 1983, "多次元スペクトルによる開空間モデルを利用した衝撃騒音源の検出," 日本機械學會論文集(C編), 第49卷, 제447號, pp. 1971~1981.
- (4) 강명순, 오재응, 서상현, 1986, "다차원 스펙트럼 해석에 의한 가솔린 엔진의 진동원 검출에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제9권, 제6호, pp. 691~698.
- (5) 조준호, 1996, "구조물의 진동-음향 전달해석을 위한 벡터합성법의 응용," 박사학위논문, 한양대학교, 서울.
- (6) 오재응, 조준호, 김진동, 1995, "벡터합성법에 의한 냉장고 압축기의 진동전달 해석," 대한기계학회논문집, 제19권, 제1호, pp. 14~21.
- (7) Bendat, J. S., 1980, "Modern Analysis Procedures for Multiple Input/Output Problems," *J. Acoust. Soc. Am.*, 68(2), pp. 861~872.
- (8) Bendat, J.S. and Piesol, A. G., 1980, *Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis*, John Wiley & Sons.
- (9) Bendat, J. S. and Piesol, A. G., 1991, *Random Data*, John Wiley & Sons.