

전달특성을 이용한 소음원 규명과 입력요소 변경에 의한 실내소음 저감

The Source Identification of Noise Using Characteristics of Transmission and the Reduction of Interior Noise for Changing the Input Factor

이 유 엽†

You-Yub Lee

(2007년 11월 19일 접수 ; 2007년 12월 5일 심사완료)

Key Words : Multi-dimensional-analysis(다차원해석), Residual Spectrum(잔차스펙트럼), Vector Synthesis Method(벡터합성법), Advanced Effectiveness(개선영향도), Experimental Design(실험계획법)

ABSTRACT

The structure has several types of noise and booming noise of a vehicle is usually caused by the vibration of the vehicle's body transmitted from the engine through the mounting system. Vector synthesis analysis is performed to predict the booming noise when the characteristic of the engine mounting system is changed., i.e., when magnitudes and phases of vibratory forces after the mounts are altered. To use this method effectively, the concept of Multi-dimensional-analysis and Experimental Design are introduced to identify the contributions of each vibration sources and transmission paths to interior noise. It was used 3inputs/1output system and found the magnitudes and phases of the forces for minimizing the noise. Finally, the synthesized interior booming noise level is predicted by the vector synthesis diagram. It is shown that the vector synthesis method can be used to obtain the optimum design characteristic of the mounting system to control the interior booming noise of a vehicle.

1. 서 론

최근 기계구조물은 운전 효율의 극대화와 신뢰성 향상 및 진동과 소음에 대한 엄격한 요구를 만족해야 한다. 특히 자동차 산업에 있어서의 엔진 고효율화 및 에너지 절약 차원에서의 차량 경량화는 구조적으로 차체의 진동 및 실내 소음을 증가시키는 원인이 되었으며, 또한 환경에 대한 인식 그리고 생활 수준의 향상으로 진동에 대한 사용자들의 요구 수준

과 소음에 대한 법적규제가 국내·외적으로 강화되고 있어 자동차의 정숙성은 상품성측면에서 주요 조건이 되었다. 일반적으로 자동차 소음의 주요인은 엔진 소음이며 이는 승차감을 저해하는 요인으로 주 연구 대상이 되고 있는데 자동차의 소음·진동의 발생원인 및 기구는 대단히 복잡할 뿐 아니라 이에 대한 규명도 용이하지 않다. 따라서 소음원, 진동원 및 전달경로를 정확하게 해석하여 보다 효과적인 소음 및 진동 저감 대책을 세울 필요가 있다.

실제 구조물의 경우 진동, 소음현상이 매우 복잡할 뿐 아니라 여러 개의 진동원 및 소음원이 존재하고 이들의 상관관계가 존재함으로 계의 해석이 더욱 복잡하고 어려워진다. 이와 같이 복잡한 구조물일

† 교신저자: 정희원, 호원대학교 자동차기계공학부
E-mail : yylee@howon.ac.kr
Tel : (063)450-7219 Fax : (063)450-7210

경우 소음·진동을 유발시키는 가진력과 이를 전달시키는 구조물의 전달함수를 정확하게 파악하기 어려우므로 주파수영역에서 해석하는 방법을 사용하며 즉 주파수응답함수법을 많이 이용하는데 이 방법은 각 진동원과 소음원간의 상관관계가 존재하지 않는 경우에만 유효하다. 따라서 진동원 및 소음원간의 상관성분을 제거하여 각 부품들의 순수한 기여량을 알 수 있는 다차원 스펙트럼 해석법⁽¹⁻⁵⁾을 적용하는 것이 소음·진동 현상이 복잡하게 일어나는 실제해석에 적절한 한 방법이다.

이 연구에서는 엔진으로부터 발생하는 진동에 의한 차실내 소음에 관한 영향관계를 파악하고자 진동 3입력/소음1출력인 다입력/단일출력계를 구성하여 컴퓨터 시뮬레이션으로 다차원해석법과 벡터합성법⁽⁶⁾을 이용하였다. 이를 이용하여 소음 및 진동 발생원이 차실 소음에 어떠한 성질을 가지고 있으며 어떠한 경로를 통하여 전달되는 것인가를 파악한 뒤 다구짜 실험계획법⁽⁷⁻⁹⁾을 이용하여 소음 출력이 최소가 되는 입력의 크기와 위상을 결정하는 것을 목적으로 한다. 특히, 다양한 진동 입력원 중 영향이 가장 큰 입력을 객관적으로 알아내기 위하여 기존의 벡터합성법의 벡터선도와 영향도에 다차원해석법의 해석결과를 응용하여 다입력에 의한 단일출력 소음 기여도 평가방법에 있어 보다 유효한 방법임을 제안하려 한다.

2. 다차원 스펙트럼 해석법

다중입력 문제에 대한 기본적인 관계를 파악하기 위해서 Fig. 1과 같은 모형을 고려할 수 있다.

Fig. 1의 입·출력을 푸리에 변환하여 그 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$Y(f) = \sum_{i=1}^q H_i(f)X_i(f) + N(f) \quad (1)$$

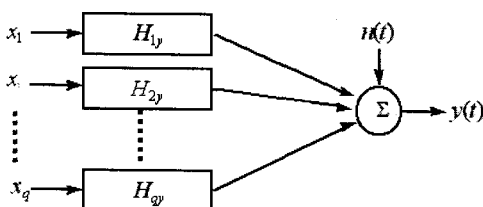


Fig. 1 Multiple input / single output model

식 (1)에 $Y^*(f)$ 를 곱하고 기댓값을 취해 T 로 나누면 출력의 자기스펙트럼을 구할 수 있다.

$$S_{yy}(f) = \sum_{j=1}^q \sum_{i=1}^q H_j^*(f)H_i^* S_{ji}(f) + S_{nn}(f) \quad (2)$$

마찬가지로 입력력간의 상호스펙트럼을 구하면

$$S_{ij}(f) = \sum_{i=1}^q H_i(f)S_{ji}(f) \quad (3)$$

과 같다. 식 (3)에서 입력간 상관이 없는 경우

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

로 나타낸다. 여기서 입력간 혹은 입·출력간 상관도는 일반기여도 함수인 식 (5)로 나타낸다.

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|S_{xy}(f)|^2}{S_{xx}(f)S_{yy}(f)} \quad (5)$$

Fig. 1과 같은 계의 경우 입력상호간의 상관에 의해 원래의 출력스펙트럼 항보다 크게 나타나게 되는데, 주파수응답함수법으로 계산할 경우에는 상호간의 상관에 의한 항이 중복되어 나타나기 때문에 각각의 입력과 출력 사이의 기여 출력스펙트럼만으로는 출력에 더 많은 영향을 미치는 입력을 파악하기 어렵게 된다. 따라서, 입력들 사이에 상호상관이 존재하는 다입력/단일출력계 경우로 생각하여 입력들 사이의 상관성분들을 제거한 Fig. 2와 같은 조건 다입력/단일출력계로 모델링 한다. 여기서, $x_{q(q-1)}(t)$ 는 $x_1(t)$ 에서 $x_{(q-1)}(t)$ 까지의 선형효과가 $x_q(t)$ 로부터 제거된 신호를 나타내며 $Y(f)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$Y(f) = \sum_{i=1}^q L_{iy}(f)X_{i,(i-1)}(f) + N(f) \quad (6)$$

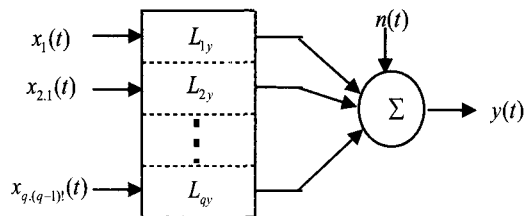


Fig. 2 Conditioned multiple input/single output model

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 $x_{(i-1)}(t)$ 까지 $x_i(t)$ 에 영향을 미친다는 가정에 의한 모델링이다. $x_{i(i-1)}(t)$ 는 $x_1(t)$ 부터 $x_{(i-1)}(t)$ 까지의 선형효과가 $x_i(t)$ 로부터 제거된 신호를 나타낸다. 따라서 잔차스펙트럼은 다른 입력들이 출력에 기여하는 선형적인 효과를 제거한 스펙트럼을 나타내며, r 차의 잔차스펙트럼은 식 (7)과 같이 표현된다.

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

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

3. 벡터합성법

벡터합성법을 이용한 해석에 있어서 입력 성분의 출력에 대한 영향도를 파악하기 위해서 다음과 같은 식으로 영향도를 사용한다.

$$Normal\ Effectiveness = \frac{|S_{X_i, P_{syn}}| \cos \theta_i}{\left| \sum_i S_{X_i, P_{syn}} \right|} \quad (8)$$

여기서 $|S_{X_i, P_{syn}}|$ 는 i 번째 입력성분이 전달계를 통과한 후 나타나는 출력 P_{syn} 의 벡터성분의 크기이며, $\left| \sum_i S_{X_i, P_{syn}} \right|$ 는 각 입력성분이 동시에 작용할 때 발생하는 합성출력의 크기이다. 그리고 θ_i 는 $|S_{X_i, P_{syn}}|$ 와 $\left| \sum_i S_{X_i, P_{syn}} \right|$ 의 상대위상을 의미하는데 이러한 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 앞서 설명한 것처럼 이는 입력 상호상관의 관계를 고려치 않은 것으로서 이를 고려

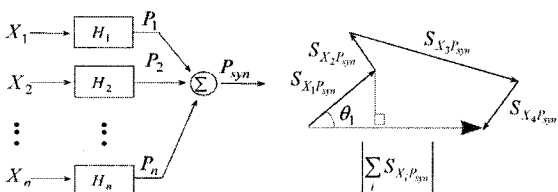


Fig. 3 The definition of effectiveness

했을 때 개선영향도는 식 (9)와 같이 잔차스펙트럼을 이용하여 다시 쓸 수 있다.

$$Advanced\ Effectiveness = \frac{|S'_{X_{n+(n-1)P}}| \cos \theta'_i}{\left| \sum_i S'_{X_i, P_{syn}} \right|} \quad (9)$$

여기서 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 (8), (9)에서 알 수 있듯이 벡터합성법에서의 영향도는 단순한 입력성분의 절대적인 크기를 감소시키는 방법보다는 위상을 함께 고려하는 것이 효과적인임을 알 수 있다.

4. 다구찌 실험계획법

실험계획법은 해결하고자 하는 문제에 대하여 실험을 어떻게 행하고, 데이터를 어떻게 취하며, 어떠한 통계적 방법으로 데이터를 분석하면 최소의 실험횟수에서 최대의 정보를 얻을 수 있는가를 계획하는 것으로 일반적 순서는 Fig. 4와 같은 순서로 진행된다.

다구찌 실험계획법은 품질관리 개념을 도입한 기법으로서 품질의 특성치에 대한 손실함수를 정의하고 이 손실함수에 근거하여 만들어진 SN비(signal

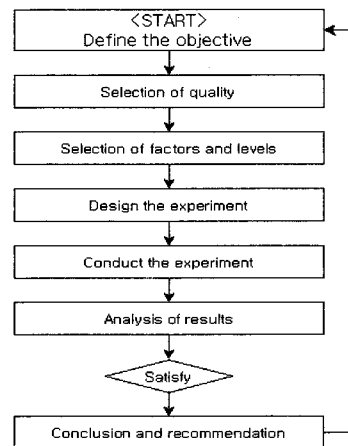


Fig. 4 Flow chart of experimental design

to noise ratio)를 특성치로 하여 인자들의 최적조건을 찾아주는 방법이 이용되는데 이 연구에서는 실내소음을 최소화시키는 엔진 마운트 최적조건을 찾는데 그 목적을 가지고 있다.

5. 적용사례

다차원해석법과 벡터합성법을 적용하기 위한 시뮬레이션 모델로써 Fig. 5와 같은 진동-음향 전달 특성을 살린 자동차 구조물을 예로 들 수가 있다. 이 예는 실내소음의 한 현상인 부밍음에 대해서 3점지지 엔진마운트의 진동 입력원이 차실내 승객 전석 위치의 음압출력으로 전해지는 과정과 실험장치 및 실험과정에 대한 이해를 돕기 위한 것이다.

다차원해석법과 벡터합성법은 자동차의 공회전 상태 또는 주행 시 승차감을 저해하는 차실내 부밍 소음의 해석에도 유효하다. 실제적인 부밍음 해석을 위해서는 실험대상차량의 부밍음을 일으키는 엔진회전수에 대한 고려가 필요하고 그 엔진 회전수 유지 상태에서 엔진마운트의 진동 가속도와 차실 음압 측정이 필요하다. 실제 실험에서는 공회전 및 부밍상태에 대해 가속도계 및 마이크로폰을 사용, 측정된 진동 및 음압신호는 각각 증폭되어 신호 기록기에 저장되고, 주파수 분석기를 거쳐 주파수분석을 수행하고 컴퓨터에 입력하여 다차원해석법 및 벡터합성법을 수행하게 된다. 한편 이 연구에서는 만들어진 입력 및 출력신호의 자기스펙트럼과 입력과 출력사이의 상호스펙트럼으로 입력과 출력사이의 상대위상을 추출하였으며, 얻어진 입력벡터를 이용하여 진동-음향 전달특성에 대한 해석 및 입력 변경에 대한 출력의 상태에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

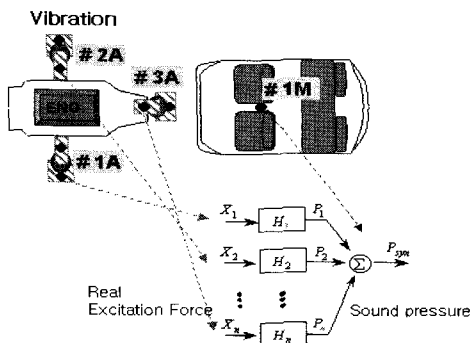


Fig. 5 Simulation model

Fig. 5에서 엔진마운트는 3점 지지이고 #1A, #2A, #3A에서 진동입력이 차체 구조물의 각 지점에 전해지고 이러한 진동원은 차실내부의 소음의 형태로 에너지가 전달되어 간다. 또한, 다차원해석법 적용을 위해서 입력원이 3지점 #1A, #2A, #3A이고, 출력이 차실내 승객석 위치의 음압 #1M 로 하였다.

이 시뮬레이션 모델에서는 다차원해석법의 물리적 의미와 특히 잔차스펙트럼에 대한 고찰을 위해서 각 입력간(x_1, x_2, x_3)의 강한 상관성을 갖는 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz 주파수성분이 있는 시간영역의 파형으로 감쇠가 없는 신호를 만들어 고찰하였다. 시뮬레이션 데이터는 다음 수식과 같으며, 입력 #1A에는 $x_1(t)$, 입력 #2A에는 $x_2(t)$, 입력 #3A에는 $x_3(t)$ 그리고 출력 #1M에는 3개입력의 주성분이 합쳐진 $y(t)$ 의 신호가 얻어진다. 식 (10)은 $x_1(t), x_2(t), x_3(t), y(t)$ 식의 형태를 보여준다.

$$\begin{aligned}
 x_1(t) &= 1.0 \times \sin(2\pi \cdot 10t + \frac{\pi}{1}) + 0.1 \\
 &\quad \times \sin(2\pi \cdot 20t + \frac{\pi}{2}) + 0.2 \times \sin(2\pi \cdot 30t + \frac{\pi}{3}) \\
 x_2(t) &= 0.4 \times \sin(2\pi \cdot 10t + \frac{\pi}{4}) + 1.0 \\
 &\quad \times (2\pi \cdot 20t + \frac{\pi}{5}) + 0.2 \times \sin(2\pi \cdot 30t + \frac{\pi}{6}) \\
 x_3(t) &= 0.3 \times \sin(2\pi \cdot 10t + \frac{\pi}{7}) + 0.6 \\
 &\quad \times \sin(2\pi \cdot 20t + \frac{\pi}{8}) + 1.0 \sin(2\pi \cdot 30t + \frac{\pi}{9}) \\
 y(t) &= 1.0 \times \sin(2\pi \cdot 10t + \frac{\pi}{10}) + 1.0 \\
 &\quad \times \sin(2\pi \cdot 20t + \frac{\pi}{11}) + 1.0 \times \sin(2\pi \cdot 30t + \frac{\pi}{12})
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

5.1 자기스펙트럼

자동차의 실내 부밍음 해석에 있어 관심주파수 선정은 출력에 대한 자기 스펙트럼을 이용하게 된다. Fig. 6은 앞서 만들어진 식 (10)에 의해 각각의 입·출력 자기스펙트럼을 나타낸 것이며 S_{yy} 의 주파수 성분 중 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz가 주요 실내 소음성분으로 작용하고 있으며 따라서 다차원해석법의 잔차스펙트럼 및 벡터합성법의 벡터선도 역시 10 Hz, 20 Hz, 30 Hz를 주요 관심주파수로 선정한다.

5.2 일반기여도

다차원해석에서는 입력간, 입·출력간의 상관 정도를 파악하는 것이 중요한데 즉 입력간의 상관 $r_{ij}^2(f)$

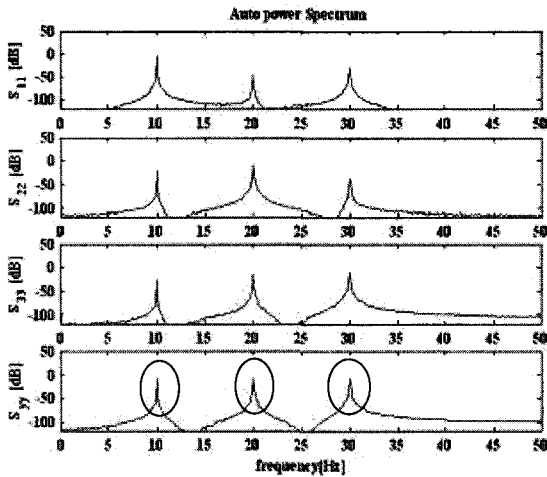


Fig. 6 Auto power spectrum

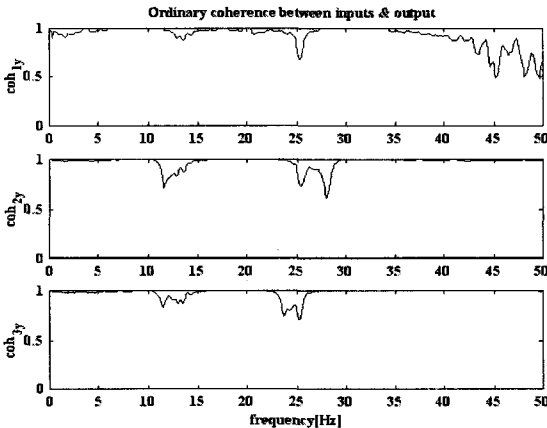


Fig. 7 Ordinary coherence

와 입·출력간의 상관 $\gamma_{ij}^2(f)$ 을 검토해야 할 필요가 있다. Fig. 7은 입·출력간 상관관계를 나타낸 그래프이고 Table 1은 입력간 상관관계를 포함해서 50 Hz이내 주파수 영역에서 평균한 값을 나타내고 있다. 여기서 입력간 일반기여도 함수 $\gamma_{ij}^2(f)$ 는 임의의 입력 $x_i(t)$, $x_j(t)$ 가 독립 혹은 상호간의 상관관계 정도를 나타내는데, Bendat 등에 의하면 $\gamma_{ij}^2(f)$ 가 0.5 이상일 때 입력간 상관이 존재한다고 보고되었다. 따라서, 이 연구에서는 입·출력간, 입력간 기여도가 0.9 이상이며 따라서 상관이 존재함으로 다차원해석을 적용할 필요가 있고 조건다입력/단일출력 계로 해석한다. 한편 4기통엔진을 장착한 실제 차량에서는 아이들 영역보다 주행 상 나타나기 쉬운 부

Table 1 Values of averaged ordinary coherence function

	$\gamma_{12}^2(f)$	$\gamma_{13}^2(f)$	$\gamma_{23}^2(f)$	$\gamma_{1y}^2(f)$	$\gamma_{2y}^2(f)$	$\gamma_{3y}^2(f)$
Sum	469	470	495	473	498	498
Mean	0.91608	0.91849	0.96686	.092339	0.97178	0.97330

30Hz Vector Synthesis Diagram

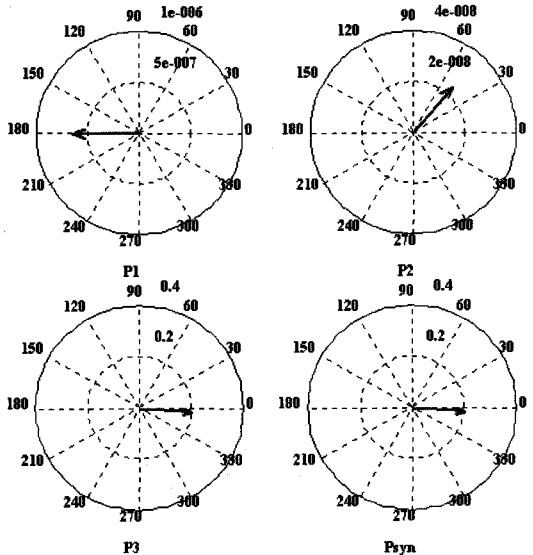


Fig. 8 30 Hz residual vector diagrams (P1= S_{1y} , P2= S_{2y} , P3= S_{3y} , Psyn.=P1+P2+ P3)

밍음에 대한 해석에 근접하고자 30 Hz, 즉 2차 성분인 900 rpm영역에 대해서만 시뮬레이션을 행하기로 한다.

5.3 잔차벡터선도와 개선영향도

Fig. 8, 9는 30 Hz에 대한 잔차벡터선도와 개선영향도를 나타내고 있다. 앞서 설명된 것처럼 잔차벡터선도와 개선영향도는 입력상호간의 영향을 고려한 잔차스펙트럼을 이용해서 즉 각 입력의 순수한 출력의 기여량을 의미하는데 그림에 나타나듯이 입력 3이 출력에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 한편 일반영향도를 Fig. 10에 나타냈는데 Fig. 9의 잔차영향도에 비해 입력 1, 2가 어느정도 출력에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 입력간 상호작용이 있음에도 불구하고 없음을 가정하여 해석된 결과로서 입력 1, 입력 2의 30 Hz성분이 나타나는 옳지 못한 결과를 얻게 되었다.

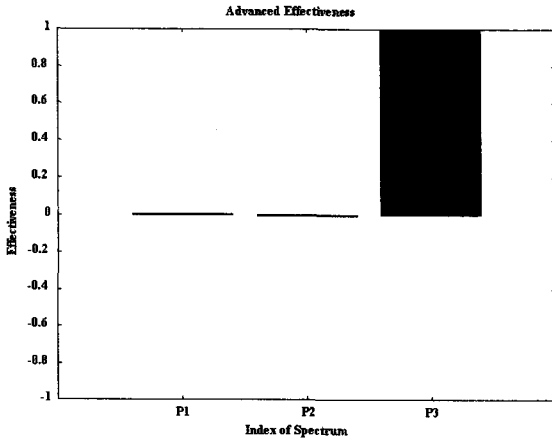


Fig. 9 30 Hz advanced effectiveness

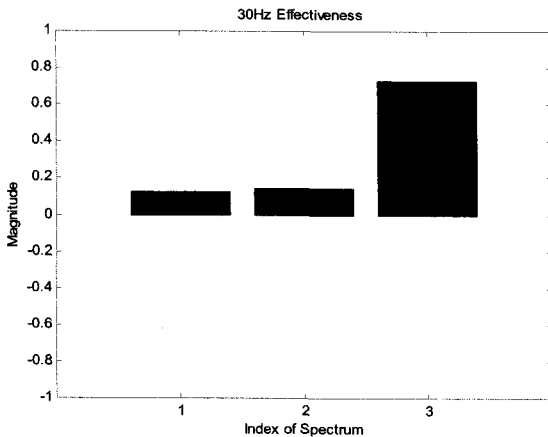


Fig. 10 30 Hz normal effectiveness

5.4 다구찌 실험계획법에 의한 출력저감

이 연구에서는 다구찌 실험계획법 적용을 위해 특성치로 30 Hz에 대한 출력을 선택하고, 인자선택에 있어서는 3개 입력에 대한 크기와 위상 정보를 이용하였고, 선택된 인자를 기반으로 출력저감 향상을 위한 인자들의 최적값을 찾아내었다. Table 2에 나타낸 바와 같이 설계에 사용된 인자가 6개이고, 설계조건을 감안하여 2수준 인자 1개, 3수준 인자가 5개이다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서 L_{18} 직교 배열표를 이용하여 입력값을 배치하고 실험을 수행하여 각각의 실험결과에 대한 특성치를 얻을 수 있었다.

실험결과를 Fig. 11의 요인효과도에 나타내었는데 출력저감을 위해 선택된 각 인자별 크기와 위상에 대한 조합은 $A_1B_2C_0D_2E_2F_2$ 이며 각 인자별 최

Table 2 Control factors and levels

Control factor	Level		
	0	1	2
A (Magnitude of P1)	0.2131e-6	0.4263e-6	-
B (Magnitude of P2)	0.0784e-7	0.1569e-7	0.2353e-7
C (Magnitude of P3)	0.0688	0.1377	0.2065
D (Phase of P1)	-1.0434 radian	-2.0868 radian	-3.1302 radian
E (Phase of P2)	0.2843 radian	0.5686 radian	0.8529 radian
F (Phase of P3)	-0.0291 radian	-0.0581 radian	-0.0872 radian

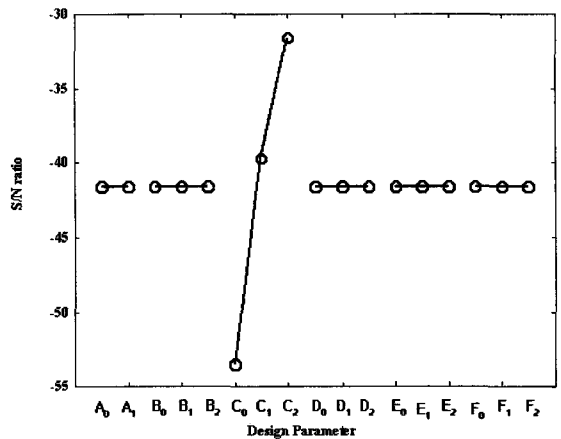


Fig. 11 Graph of factor effect

Table 3 Optimum specification of input components

	P1	P2	P3
Magnitude	0.4263e-6	0.2353e-7	0.0688
Phase	-3.1302 radian	0.8529 radian	-0.0872 radian

적값은 Table 3과 같다. 결과에 나타났듯이 30 Hz에 대한 출력저감은 입력 3의 변경이 가장 효과적임을 알 수 있으며 입력 3의 경우 위상보다는 크기 변경이 효과적임이 결과에 나타났다. 한편 구해진 인자별 최적값을 적용한 벡터선도 결과를 보면, Fig. 12는 입력성분을 최적화 하기전의 상태(Syn=0.2065)를 나타내고 Fig. 13은 최적화한 상태(Syn=0.0688)의 입력 상태를 나타내고 있는데 수치상으로 출력저감소 결과를 가져옴으로서 실내 부밍음 저감에 효과가 있으리라 본다.

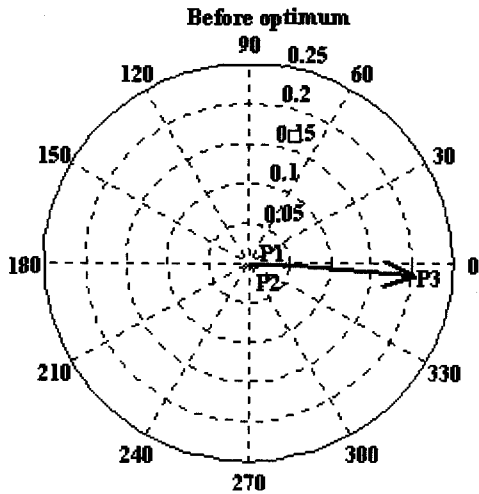


Fig. 12 30 Hz residual vector diagrams before optimum

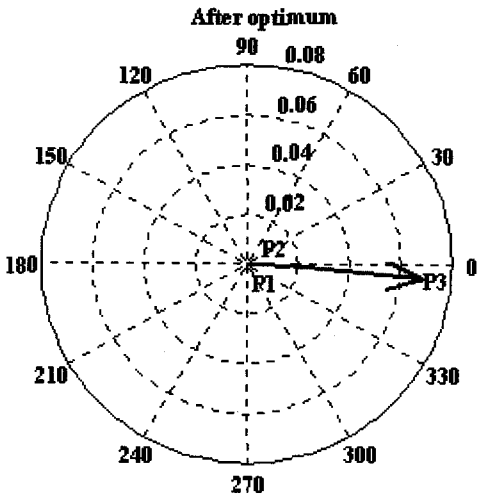


Fig. 13 30 Hz residual vector diagrams after optimum

6. 결 론

이 연구에서 수행된 일련의 시뮬레이션 과정을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 자동차 부밍음에 대한 시뮬레이션을 위해 유의한 입력성분을 고려한 3입력/단일출력계의 모델을 사용하였으며, 구조-음향 전달특성을 분석하기 위한 모형 기법을 제시하였다.

(2) 잔차벡터선도와 개선영향도 평가는 순수한 입력성분이 출력에 영향을 미치는 관심주파수 별 입력원 규명에 유효한 평가 방법으로 기존의 일반영향도

평가가 갖는 입력간 상호 작용에 대한 모순점을 개선하였다.

(3) 출력성분 저감 최적화를 위해 실험 계획법을 적용, 입력성분에 대한 설계변경 범위에서의 최적값을 도출하였으며 그 결과 실내 부밍음 현상 개선이 기대된다.

(4) 이 연구에서 제시된 일련의 과정이 차량소음·진동 개선에 대한 타부품 설계 및 개발 시 유용한 수단이 될 것이다.

후 기

이 연구는 호원대학교 교내학술연구비에 의해 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Bendat, J. S., Piersol, A. G., 1993, "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis", John Wiley & Sons, Inc. 2nd Edition.
- (2) Bendat, J. S. and Piesol, A. G., 1986, "Random Data", Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, Wiley-Interscience, NewYork.
- (3) Oh, J.-E., 1983, "Applications of Multi-dimensional Spectral Analysis for Noise Source Identification on Mechanical Structures", The Graduate School Tokyo Institute of Technology, Doctor Degree Thesis.
- (4) Suh, S. H., 1986, "Study on the Identification of Vibration and Noise Sources of a Gasoline Engine by Multi-dimensional Spectral Analysis", The Graduate School of Hanyang University, Master Degree Thesis.
- (5) Beck, M. Y., 1993, "Identification of Transmission Characteristics of Vibration and Acoustics for Engine-compartment by Multi-dimensional Spectral Analysis", The Graduate School of Hanyang University, Master Degree Thesis.
- (6) Cho, J. H., 1996, "Application of Vector Synthesis Method for Vibroacoustic Transmission of Structure", The Graduate School of Hanyang University, Doctor Degree Thesis.

(7) Lee, K. T., 2000, "Improvement of the Attenuation Performance for the Intake Noise in a Vehicle by Robust Design", The Graduate School of Hanyang University, Doctor Degree Thesis.

(8) Lee, Y. Y., 2004, "Optimum Design of Vehicle Intake System for Noise Reduction Using the Design of Experiments", The Graduate School of Hanyang

University, Doctor Degree Thesis.

(9) Joe, Y. G., Oh, J. E., Lee, Y. Y. and Kim, H., 2002, "The Robust Design of Low Noise Intake System with Experimental 4-poles", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 12, No. 6, pp. 405~412.