

## 진동-음향 전달특성을 이용한 진동 및 소음원의 규명

오재웅\*, °김동섭\*\*, 김우택\*\*, 강현석\*\*

### The source identification of noise & vibration using characteristics of vibro-acoustic transmission

Jae-Eung Oh, Dong-Sup Kim, Wootae Kim, Hyun-Seok Kang

#### ABSTRACT

The booming noise of a vehicle is usually caused by the vibration of the vehicle's body transmitted from the engine through the mounting system. Thus the engine mounting system must be cautiously designed to reduce the noise. 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 effectively use the method, the concept of 'effectiveness' is introduced to identify the contributions of each vibration sources and transmission paths to interior noise. When the magnitudes and phases of the forces due to the engine vibration are changed, the synthesized interior booming noise level is predicted by the vector synthesis diagram. Thus, the optimum characteristics of the forces are obtained through the simulations of the vector synthesis analysis. 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. 서론

현대 기계구조물의 소음 및 진동의 발생원인 및 발생기구는 대단히 복잡할 뿐 아니라 이의 규명도 용이하지 않다. 따라서 소음원 및 진동원, 전달경로를 정확하게 해석하여 보다 효과적인 소음 및 진동 저감 대책을 세울 필요가 있다. 복잡한 구조물일 경우 상관성분을 고려하지 않는 주파수 응답 함수보다는 입력간의 상관성분을 제거하여 각 부품들의 순수한 기여량을 알 수 있는 다차원 스펙트럼 해석법<sup>[1,2]</sup>으로 실제계를 해석하는 것이 필요하다.

이 해석법은 1970년대에 J. S. Bendat에 의해 제창된 이후 여러 학자들에 의해서 연구되어 여러 가지 실제 계에 적용되어 왔다. 본 논문에서는 차량 엔진마운트의 진동으로부터 발생하는 운전석 위치의 소음에 대한 부품별 영향관계<sup>[4,5,6]</sup>를 알아내기 위한 시뮬레이션으로 유의한 입력인자를 선정하여 3입력 1출력계로 입출력계를 구성하였다. 다차원 스펙트럼 해석법의 잔차스펙트럼을 적용하여 입출력간 상호작용을 고려한 잔차영향도를 통해 각각의 입력과 출력간의 순수 영향도를 평가해왔고, 기존의 입출력간의 상호작용이 없는 시스템에만 적용해 왔던 일반영향도 평가를 한 층 더 발전시켜서 진동-음향 전달특성을 이용한 진동 및 소음원의 규명에 보다 유효함을 보였다.

\* 한양대학교 기계공학부

\*\* 한양대학교 대학원 자동차공학과

## 2. 이론

### 2.1 차실 소음의 다입력/단일출력 모델링

일반적으로 기계구조물은 엔진, 압축기 등의 구동계와 전체구조물의 형태를 구성하는 구조계로 이루어 졌다. 자동차의 소음은 구동부의 기관폭발, 회전불균형 등의 가진력에 의해서 생성된 에너지가 마운트계, 서스펜션계등을 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.

$$P_{sym} = \sum H_i X + PH_r \quad (1)$$

$P_{sym}$  : 운전석 위치 음압

$H_i$  : 구조-음향전달함수

$H_r$  : 음향-음향전달함수

$X$  : 진동에의해 전달되는 힘

$P$  : 엔진룸 음압

그러나 진동입력의 가능한 전달경로를 해석하여 방사소음을 생성하는 주된 요인을 예측하는 것이 가능하고, 실제 자동차 차실의 부밍음은 고체음이 주요인이므로 다음과 같이 표현된다.

$$P_{sym} = \sum H_i X \quad (2)$$

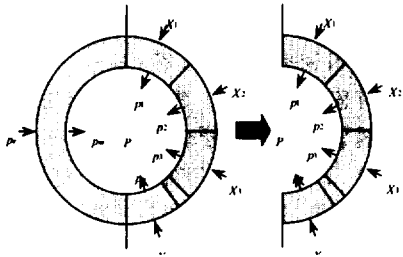


Fig.1 Conceptual diagram of interior booming noise

출력음압은 힘과 전달함수의 벡터적인 결합으로 나타난다. 이는 2.3절의 벡터합성법의 영향도 계산에 있어 타당한 근거 갖게된다.

### 2.2 가진입력의 추정

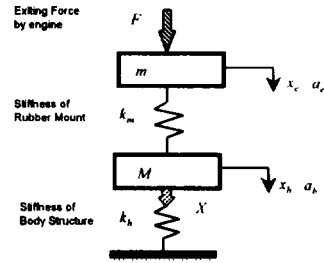


Fig.2 Two degree of freedom model for exciting force by relative displacement

진동입력이 전달계를 통하여 구조계로 전달되는 가진력을 추정하는 방법중 유용한 것으로 마운트계의 강성계수 이용법과 구조계의 전달함수 이용법이 있다. 실제계의 운전상태에서 마운트계 전/후의 변위 차이를 계측하여 얻은 값과 마운트계의 강성계수를 곱하여 가진입력(진동)  $X$ 가 얻어진다.

$$X = -\frac{1}{\omega^2} [K] \cdot [A_1 - A_2] \quad (3)$$

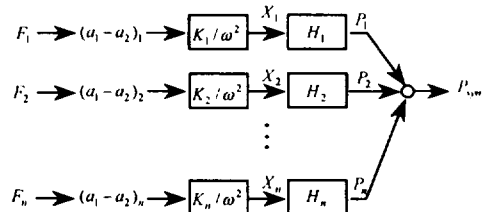
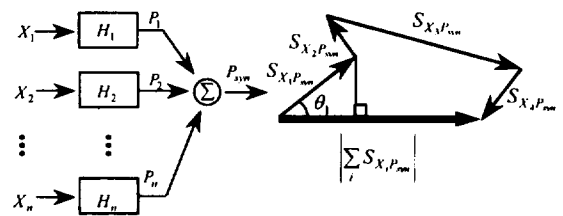


Fig.3 The diagram for force transmission mechanism of mount system

### 2.3 벡터합성법



$$Effectiveness = \frac{|S_{X_i, P_{sym}}| \cos \theta_i}{\left| \sum_i S_{X_i, P_{sym}} \right|} \quad (4)$$

Fig.4 Conceptual diagram of effectiveness

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

## 2.4 다차원 해석법과 잔차영향도

구조물의 동적 특성을 규명하기 위하여 주파수 분석에 대한 연구는 지금까지 활발히 진행되고 있다. 하나의 구조물 내에 작용하는 여러 개의 입력들 사이에 상호상관이 있는 신호성분을 모델링하여 주파수 분석의 응용으로 다차원 스펙트럼이 적용된다.

### (1) 다입력 / 단일출력계

다중입력 문제에 대한 기본적인 관계를 파악하기 위해서 Fig.3 같은 모형에 대해 고려해 볼 수 있다. Fig. 3의 입출력 모형은 입력간의 상호작용이 없는 시스템에 적용 가능하다. 영향도 계산을 위한 3개의 입력이 있다.

$$S_{X_1 P_{syn}} \quad S_{X_2 P_{syn}} \quad S_{X_3 P_{syn}} \quad (5)$$

$S_{X_1 P_{syn}}$  는 입력  $X_1$  과 출력  $P_{syn}$  의 상호스펙트럼을 적용한 것이다.  $S_{X_2 P_{syn}}$  와  $S_{X_3 P_{syn}}$  의 경우도 동일한 방법을 적용한다.

### (2) 조건 다입력 / 단일출력계

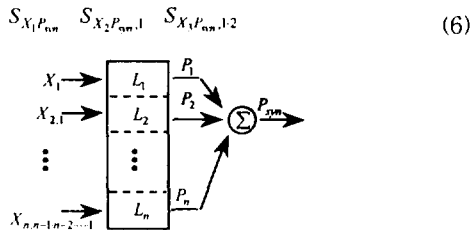


Fig.5 Multiple input / single output model for conditioned inputs

$S_{X_2 P_{syn}, 1}$  은  $S_{X_2 P_{syn}}$  에서 입력  $X_1$  의 성분을 제거한 값으로 출력  $P_{syn}$  에  $X_2$  의 순수 기여량을 나타낸다.

$$S_{X_2 P_{syn}, 1} = S_{X_2 P_{syn}} - (S_{X_1 P_{syn}} / S_{X_1 X_1}) S_{X_2 X_1} \quad (7)$$

$S_{X_2 P_{syn}, 1 \cdot 2}$  은  $S_{X_2 P_{syn}}$  에서 입력  $X_1$  와  $X_2$  의 성분을 제거한 값으로 출력  $P_{syn}$  에  $X_3$  의 순수 기여량을 나타낸다.

$$S_{X_1 P_{syn}, 1, 2} = S_{X_1 P_{syn}, 1} - (S_{X_2 P_{syn}, 1} / S_{X_2 X_2}) S_{X_1 X_2} \\ = \left\{ S_{X_1 P_{syn}} - (S_{X_1 P_{syn}} / S_{X_1 X_1}) S_{X_1 X_1} \right\} \\ - \left\{ \frac{S_{X_2 P_{syn}} - (S_{X_2 P_{syn}} / S_{X_2 X_2}) S_{X_2 X_1}}{S_{X_2 X_2} \left( 1 - \frac{|S_{X_1 X_2}|^2}{S_{X_1 X_1} S_{X_2 X_2}} \right)} \right\} (S_{X_1 X_2} - (S_{X_1 X_2} / S_{X_1 X_1}) S_{X_2 X_1}) \quad (8)$$

$$Residual\ Effectiveness = \frac{|S_{X_{n,n-1} P} \cos \theta_r|}{\sum_i |S_{X_i P_{syn}}|} \quad (9)$$

## 3. 적용사례

### 3.1 실험 장치

Fig.6은 본 연구에서 특정 주파수로 실제계를 가진하였을 경우에 나타나는 진동과 음압을 알아보기 위한 실험장치도 이다.

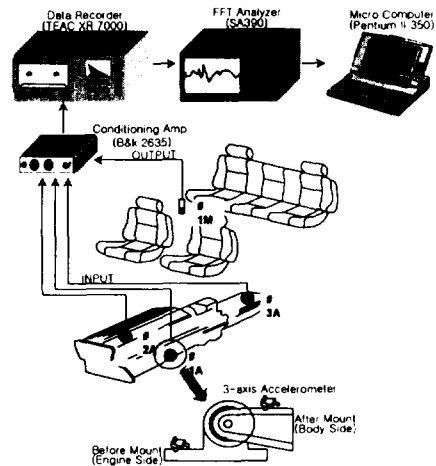


Fig.6 Experimental setup for measurement of Vibration & sound pressure

### 3.2 결과

본 논문에서 실제계에서 얻어진 데이터를 이용하지 않고 다차원 해석법의 이해를 돕기 위하여 임의의 3입력과 3입력을 합한 출력을 가지고 기존의 벡터합성법의 단점인 입력간의 상호 영향을 갖는 경우의 해석상의 어려움을 해결하고자 잔차 스펙트럼을 이용하여 잔차 영향도를 구해보고 이에 관한 고찰해 보았다.

Fig.7은 입력과 출력의 시간 데이터를 나타내는 그림이다.

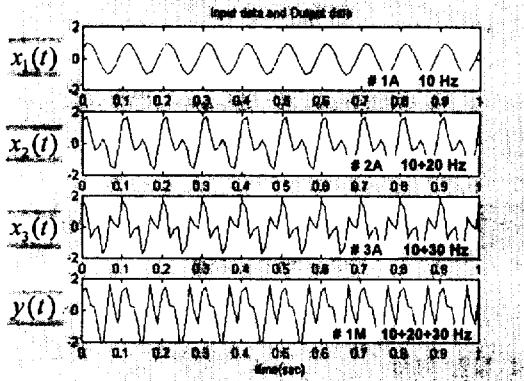


Fig.7 Input data and output data

Fig.8 은 입출력간의 상호 스펙트럼의 결과를 보여주는 그림이다.

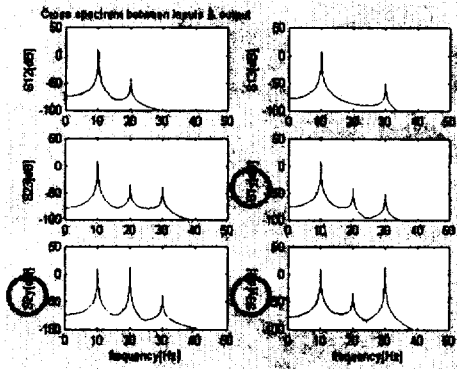


Fig.8 Cross power spectrum.

Fig.9와 Fig.10은 입력간의 상호작용을 고려하여 각 입력의 순수량을 보여주는 그림이다.

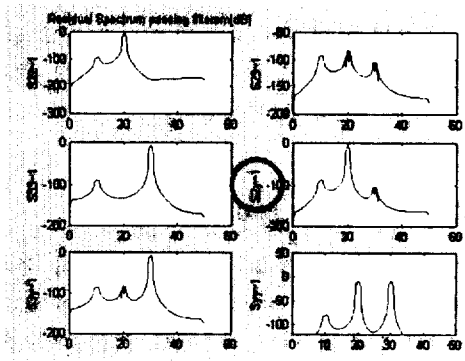


Fig.9 Residual spectrum (removed  $X_1$ )

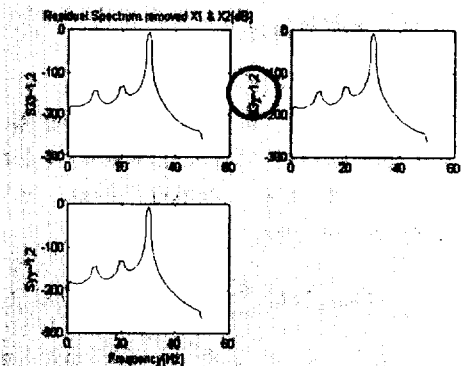


Fig.10 Residual spectrum (removed  $X_1$  &  $X_2$ )

Fig.11는 일반영향도 해석의 결과를 보여준다.

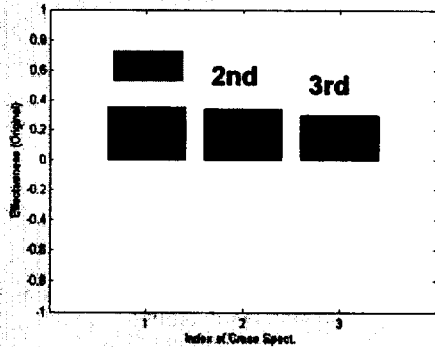


Fig.11 Normal effectiveness

Fig.12는 각 입력과 출력의 상호스펙트럼을 보여주고 있고 마지막 그림은 각 성분들의 벡터적인 합성의 결과를 보여주게 된다.

Fig.13에서는 다차원 해석법의 결과로 잔차영향도

를 보여 주고있다.

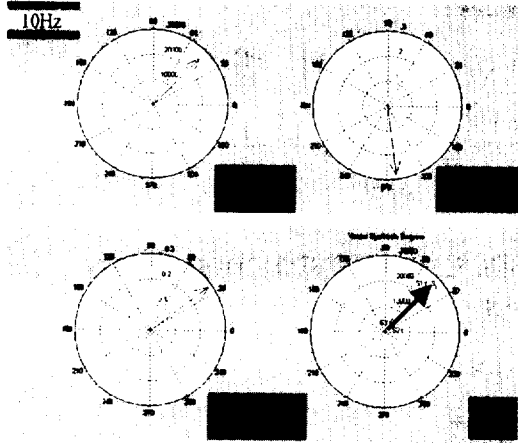


Fig.12 Residual vector diagram

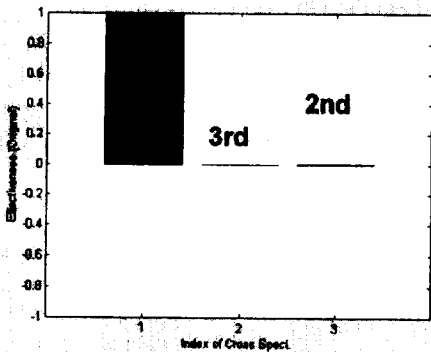


Fig.13 Residual effectiveness

### 3.3 고찰

3입력 1출력 시스템에서 3입력간의 상호관계가 존재하지 않는다는 가정하에 일반영향도를 적용한 결과는 Fig. 12에 나타나있다. 입력1,입력2,입력3은 출력에 고루 영향을 미쳤다. 그러나 입력간의 상호작용이 있다는 가정하에 다차원해석법을 적용하여 잔차스펙트럼을 통해서 잔차영향도로 입출력간 영향을 고려했을 경우에는 입력1의 10Hz성분만이 큰 영향을 미쳤음을 알수가 있다.

## 4. 결론

본 연구를 통하여 구조물의 진동에 의해 발생한

차실내 소음 모델링으로부터 진동-음향 전달특성을 이용한다면 진동 및 소음원 규명이 유효하다는 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유의 입력성분을 고려하여 다입력 단일출력을 갖는 승용차의 내부소음 모델링 하였다.
2. 벡터합성법을 실시하였고 일반영향도 해석으로 입력간 상호작용을 고려치 않은 입력과 출력간의 기여관계를 평가하였다.
3. 다차원 해석법을 이용하여 잔차벡터선도를 그려보았으며 잔차영향도 해석으로 입력간의 상호작용을 고려하여 입출력 사이의 기여관계를 평가하였다.

향후, 실험계획법과 다차원 해석법을 적용한 벡터합성법과의 연계된 연구가 기대된다.

## 참고문헌

- [1] J.S. Bendat, a. G. Piersol, Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis, John Wiley & Sons, Inc. pp223-263, 1980
- [2] J. S. Bendat, System Identification from Multiple Input/Output Data, JASA, Vol. 49, No.3, pp293, 1976
- [3] Bendat, J. S., and Piesol, A., G., Random Data : Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, Wiley-Interscience, New York, 1986
- [4] 오재웅, Applications of Multi-Dimensional Spectral Analysis For Noise Source Identification on Mechanical Structure, 동경공대 박사학위 논문, 1983
- [5] 박준철, 오재웅, 다차원스펙트럼 해석법에 의한 프린터의 소음원 검출연구, 한양대학교 석사학위 논문, 1985
- [6] 서상현, 오재웅, 가솔린 엔진의 소음원 검출에 대한 다차원스펙트럼 해석의 응용, 한양대학교 석사학위 논문, 1986
- [7] 백문열, 오재웅, 다차원스펙트럼 해석법을 이용한 엔진-차실의 진동 및 음향전달계에 관한 연구, 한양대학교 석사학위 논문, 1993
- [8] 김태욱, "벡터합성법과 감도해석을 이용한 차실소음 저감에 관한 연구", 한양대학교 석사학위 논문, 1995
- [9] 藤田節男, "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, 1972
- [10] 조준호, "구조물의 진동-음향 전달해석을 위한 벡터합성법의 응용", 한양대학교 박사학위 논문, 1996