

다차원 스펙트럼 해석법을 이용한 자동차 공조시스템의 기여도분석

Coherent Analysis of HVAC Using the Multi-Dimensional Spectral Analysis

황동건* 오재응 ** 이정윤*** 김성수****

DongKun Hwang, Jae-Eung Oh, Jung-Youn Lee, SungSoo Kim

Key Words : Multiple Dimensional Spectral Analysis(다차원 스펙트럼 해석법), HVAC(공조시스템), Coherent-Analysis(기여도 분석)

ABSTRACT

In this study, we identify contribution of structure-borne-noise of vehicle HVAC system using Multi-Dimensional spectral analysis (MDSA) method. Firstly, to identify the applicability of MDSA method, the case of HVAC system was modeled with four input / single output system. The four inputs which is given vibration data is composed of blower, evaporator, heater and duct. The single output is noise data from driver's seat. When the blower motor is operating, we analyze the contributions of four input / single output. As a result of experiment, we identify efficiency of systems modeled with four input / single output through ordinary coherence function (OCF) and multiple coherence function (MCF).

1. 서 론

최근 삶의 질 향상과 기술의 발달로 인해 자동차의 고급화 / 성능향상이 이루어지고 있다. 그에 따라 소비자들의 자동차에 대한 관심도 출력, 연비 등에서 차량의 진동, 소음, 승차감 개선 등으로 옮겨가고 있다. 파워트레인 분야에서는 회사가 노하우를 바탕으로 설계 단계부터 실험을 통해 엔진/노면 소음의 비중을 크게 축소시켜가고 있으며, 이로 인해 상대적으로 덜 민감하게 반응했던 실내 각팻 모듈에서의 공조 소음 비중이 커지게 되었다. 히터와 에어컨의 사용시기는 날씨와 관련되어 있어, 사람들의 감성적인 측면과 연계되어 그 소음 특성이 고급차일수록 더욱 민감하게 반응한다.

공조시스템은 공기출입구, 필터, 블로워 모터를 포함하는 블로워(Blower), 증발기(Evaporator), 히터(Heater), 덕트(Duct)로 크게 4 부분으로 구성되어 있다. 공조 모듈은 서로 연결되어 진동이 전달되는 현상을 가지고 있어 해석하기에 복잡할 뿐만 아니라 규명이 용이하지 않다.

위와 같이 전달 경로가 여러 개이며 응답이 운전자 위치에서의 소음인 경우, 이에 대한 전달계의 해석으로 종래에는 주파수 응답 함수법이 많이

사용되었다. 하지만 위의 방법은 각각의 전달계가 독립적으로 서로간에 영향을 미치지 않는 경우에만 쓸 수 있는 단점이 있어 정확한 진동 전달 기여도를 파악하기에는 미흡한 면이 없지 않았다. 전달 계의 상관관계가 존재하는 경우 그들의 상관 성분을 제거하여 각 부분들의 순수한 기여량을 알아보고 해석하는 방법인 다차원 해석 방법을 이용할 수 있다. 다차원 해석 방법은 부분기여도함수, 잔차 스펙트럼, 기여출력스펙트럼 및 다중기여도함수 등을 통해 올바른 기여량을 추출할 수 있게 되었다.

본 연구에서는 차량공조시스템의 전면에서의 소음을 측정하여 시스템의 특성을 파악한 후, 블로워, 증발기, 히터, 덕트의 4 개의 부분을 입력원으로 하는 4 입력 1 출력의 시스템에 대하여 다차원 스펙트럼 해석법을 적용하였다. DC 컨버터를 이용하여 블로워 모터를 구동한 실험을 통해 얻은 입출력 신호를 이용하여 일반기여도함수, 잔차 스펙트럼, 부분기여도함수를 구하여 부품들의 기여도를 알아보고, 다중기여도함수를 이용하여 입출력계의 모델링의 타당성을 알아본다. 부분기여도함수와 잔차 스펙트럼을 이용하여 각 부품별로 발생하는 기여출력 스펙트럼을 구하여 정량적으로 소음을 평가하였다.

* 한양대학교 대학원 자동차공학과

** 한양대학교 기계공학부

E-mail jeoh@ihanyang.ac.kr

Tel : (02) 2290-0452, Fax : (02) 2299-3153

*** 경기대학교 기계시스템디자인공학과

**** 현대모비스 응용기술연구부

2. 이론

2.1 다차원 스펙트럼 해석법

Fig.1 은 입력간의 상관관계가 없고, 상호 독립적인 경우의 입출력 모델이다. 실제의 진동계 혹은 음향계에 있어서는 Fig.2 와 같이 입력간의 상관관계가 존재하는 경우가 많기 때문에 입력간의 상관관계를 고려하여 이론적 고찰을 수행하였다. 입력간 상관관계가 존재한다고 가정하면 출력 스펙트럼은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_{yy} = \sum_{j=1}^4 \sum_{i=1}^4 H_{iy}^*(f) H_{iy}(f) S_{ij}(f) + S_{mm}(f) \quad (1)$$

여기서 $H_{iy}(f)$ 는 i 번째 입력이 출력에 기여하는 전달함수를 나타내며, S_{ij} 는 입력 x_i 와 x_j 간의 상호 파워 스펙트럼을 나타낸다. 또한 $H_{iy}^*(f)$ 는 전달함수 $H_{iy}(f)$ 의 공액 복소수를 나타내며 $S_{mm}(f)$ 는 잡음 $n(t)$ 의 파워 스펙트럼을 나타내고 있다. 한편 식(1)에서 입력간 상관관계가 없는 경우의 출력 스펙트럼은 식 (2)와 같다.

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^4 |H_{iy}(f)|^2 S_{ii} + S_{mm}(f) \quad (2)$$

식(1), (2)를 FRF 법이라고 지칭한다.

다차원 스펙트럼 해석을 이용하여 입력간, 입출력간의 관계로부터 상관성분을 제거하기 위해서는 잔차 스펙트럼(residual spectrum)법을 이용하게 된다. 예를 들어, 1 차적인 잔차 스펙트럼은 식(3)

$$\begin{aligned} S_{ii-1}(f) &= S_{ii}(f) - |L_{1i}(f)|^2 S_{ii}(f) \quad (i = 2, 3, y) \\ S_{ij-1}(f) &= S_{ij}(f) - L_{1j}(f)^2 S_{ii}(f) \quad (i = 2, 3; j = y) \end{aligned} \quad (3)$$

과 같이 얻어진다.

여기서 $L_{1i}(f)$ 는 입력간 및 출력간의 상관성분을 제거 시킨 경우의 입력간 및 출력간의 최적 전달함수이다. 마찬가지로 2 차적인 잔차 스펙트럼 예를 들어 $x_4(t)$ 에 대하여 구하면 입력 $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ 선형적인 영향을 제거 함으로써 다

음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} S_{44-3!} &= S_{44-2!} - |L_{34}|^2 S_{33-2!} \\ S_{yy-3!} &= S_{yy-2!} - |L_{3y}|^2 S_{33-2!} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 L_{2y} 는 입력 x_2 와 출력 사이의 최적 전달 함수이다. 입력간 및 출력간의 기여관계를 나타내는 일반기여도함수(Ordinary Coherence Function ; OCF)는 식 (5)와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \gamma_{ij}^2(f) &= \frac{|S_{ij}(f)|^2}{S_{ii}(f)S_{jj}(f)} \\ \gamma_{iy}^2(f) &= \frac{|S_{iy}(f)|^2}{S_{ii}(f)S_{yy}(f)} \end{aligned} \quad (5)$$

$(i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, 3, 4; i \neq j)$

이러한 관계식을 이용하여 다 입력계에 적용하면 잔차과정에 의하여 각 입력원의 순수 기여도를 나타낸 부분 기여도 함수(Partial Coherence-Function ; PCF)를 $x_4(t)$ 에 대하여 구하면 식 (6)이 된다.

$$\gamma_{4y-3!}^2(f) = \frac{|S_{4y-3!}(f)|^2}{S_{44-3!}(f)S_{yy-3!}(f)} \quad (6)$$

이 식을 이용하여 입력간 상관성분을 제거하여 계산된 다중 기여도 함수(Multiple Coherence Function ; MCF)는 식(7)과 같이 된다.

$$\gamma_{yx}^2 = 1 - (1 - \gamma_{1y}^2)(1 - \gamma_{2y-1}^2)(1 - \gamma_{3y-2!}^2)(1 - \gamma_{4y-3!}^2) \quad (7)$$

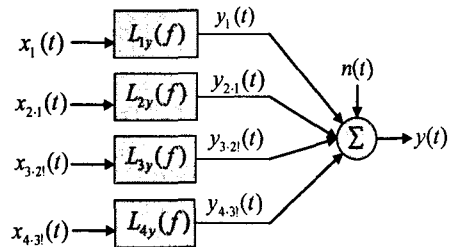


Fig. 1 Inputs are independent system

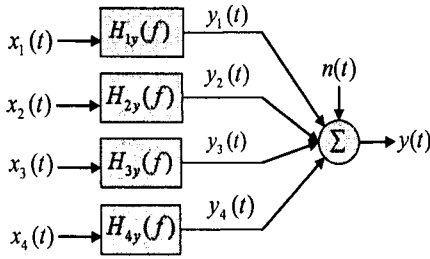


Fig. 2 Model of multi-input/single-output system

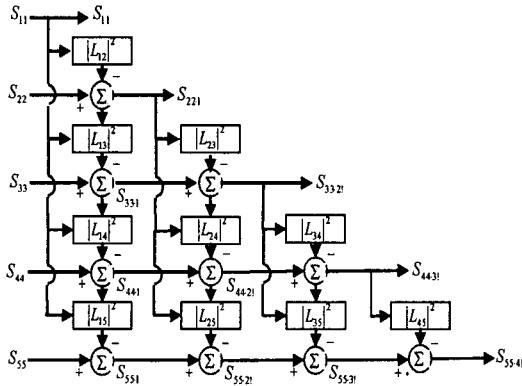


Fig. 3 2 Diagram showing how ordered conditioned auto-spectra are obtained from original auto-spectra

실제로 진동원을 검출하려면 입력원의 출력에 대한 순수한 기여량을 계산할 필요가 있으므로 실측에 의한 출력 스펙트럼과 기여도 함수와의 곱인 기여출력 스펙트럼(coherent output spectrum)을 이용하게 된다. 예를 들어 4 입력 $x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)$ 가 출력에 기여하는 순수한 기여량을 나타내는 기여출력 스펙트럼은 각각 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 & \gamma^2_{1y}(f) S_{yy}(f) \\
 & \gamma^2_{2y:1}(f) \cdot S_{yy:1}(f) \\
 & \gamma^2_{3y:2}(f) \cdot S_{yy:2}(f) \\
 & \gamma^2_{4y:3}(f) \cdot S_{yy:3}(f)
 \end{aligned} \tag{8}$$

3. 실험

3.1 실험 장치 및 방법

본 실험은 HVAC(공조시스템)를 대상으로 수행하였다. HVAC 작동상태는 step 2,3,4 에 대해 실험하였으며, 운전조건은 fresh 와 recycle 의 2

가지 모드에 대해 실시하였다.

다차원 스펙트럼 해석법을 적용하기 위해 전달계에 해당하는 주요 부품에 3 축 가속도 핏업(Dytran type 3013A)을 블로워, 증발기, 히터, 덕트 4 곳에 부착하여 입력 신호를 측정하였으며, 운전자 수음 위치인 지상으로부터 1.2m, 전면 1m 에서 마이크로폰을 통해 출력 신호 음압을 측정하였다.

가속도계로부터 받은 진동 신호는 증폭기를 통해 음압 신호와 함께 저장된 후 FFT Analyzer(dp 440)를 통해 시간 데이터를 얻어낸 후 다차원 해석법 프로그램을 이용하여 신호처리를 수행하였다.

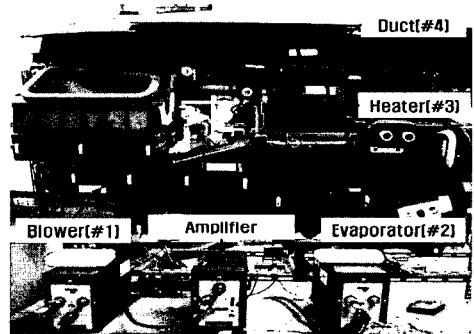


Fig. 4 The experiment setup for measurement of MDSA problem from HVAC system

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 기여도 분석

입력간의 일반기여도함수는 $\gamma^2_{12}, \gamma^2_{34}$ 는 0.5 이상의 값을 가진다. 이외의 일반기여도함수는 0.5 이하의 값을 가져 상관관계가 미비하다. 이는 이들 사이에 비선형적인 요소에 의한 영향이 존재하는 것으로 판단할 수 있다. 입출력간의 일반기여도함수는 $\gamma^2_{1y}, \gamma^2_{2y}$ 는 높은 값을 가진다. 또한 입력 성분들의 우선 순위를 구할 수 있다. 모드별 단수별 차이는 있으나 우선 순위는 대략 블로워, 증발기, 히터, 덕트 순이다. (Table1 참조)

다중기여도함수는 Table 2 에서 확인할 수 있듯이 0.5 이상의 높은 값을 나타내는 것으로 보아 입력이 충분히 고려된 입출력계임을 알 수 있다.

입력간의 상관관계를 잔차 스펙트럼을 이용하

여 제거하면 Fig.5 와 같이 부분기여도함수를 얻을 수 있다. 부분기여도함수는 입력간의 상관 관계를 제거하여 순수하게 기여하는 량을 나타낸다. 이것을 통해 공조시스템에서의 피크 주파수에서 블로워, 증발기, 히터, 덕트 순의 소음기여 우선순위를 확인할 수 있다. 블로워에서 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다

Fig.6 은 피크 주파수에서의 기여출력스펙트럼과 각 입력 부품별에 대한 소음에 기여하는 진동량을 백분율로 표시한 것이다. 가장 큰 진동 기여량을 가지는 것은 블로워로서 62%~84%까지의 기여를 한다.

Table 1 The ordinary coherence function

(a) Cool fresh mode

O.C.F	Step 2	Step 3	Step 4
γ_{12}^2	0.9858	0.8847	0.5622
γ_{13}^2	0.051	0.2998	0.4866
γ_{14}^2	0.2378	0.285	0.4916
γ_{23}^2	0.041	0.2579	0.4377
γ_{24}^2	0.2112	0.6636	0.2833
γ_{34}^2	0.7124	0.8894	0.5277
γ_{1y}^2	0.9745	0.9438	0.7781
γ_{2y}^2	0.9487	0.7726	0.5597
γ_{3y}^2	0.1849	0.2519	0.2677
γ_{4y}^2	0.1095	0.0981	0.2175

(b) Cool recycle mode

O.C.F	Step 2	Step 3	Step 4
γ_{12}^2	0.989	0.913	0.6847
γ_{13}^2	0.1506	0.406	0.0597
γ_{14}^2	0.1525	0.117	0.1425
γ_{23}^2	0.1577	0.28	0.4137
γ_{24}^2	0.1182	0.1455	0.1301
γ_{34}^2	0.9596	0.9428	0.788
γ_{1y}^2	0.9351	0.8079	0.6517
γ_{2y}^2	0.9094	0.8566	0.5969
γ_{3y}^2	0.2352	0.3165	0.279
γ_{4y}^2	0.2009	0.3442	0.1649

Table 2 Multiple coherence function for HVAC system

M.C.F	Step 2	Step 3	Step 4
Cool fresh	0.9925	0.9725	0.8858
Cool recycle	0.95	0.9389	0.8844

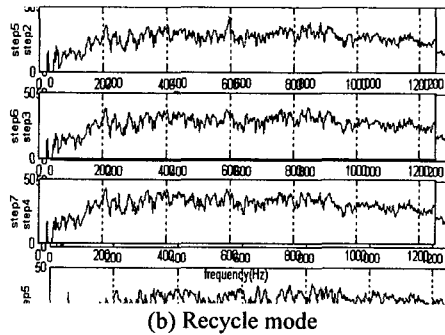
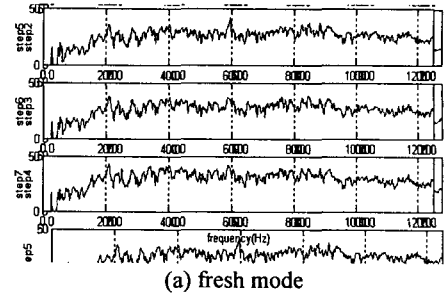
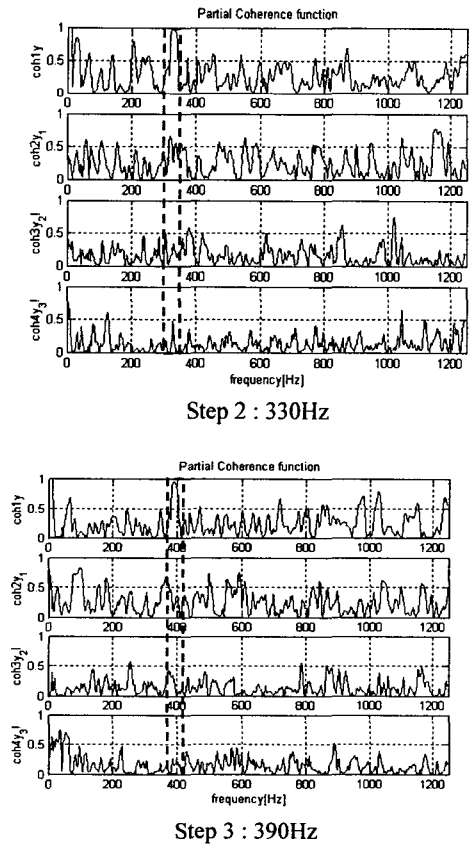
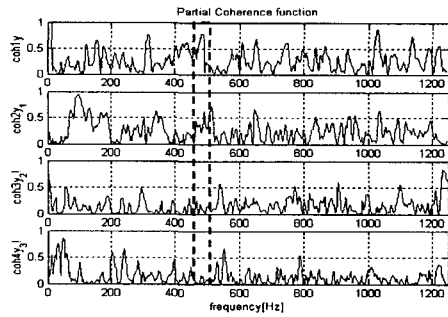
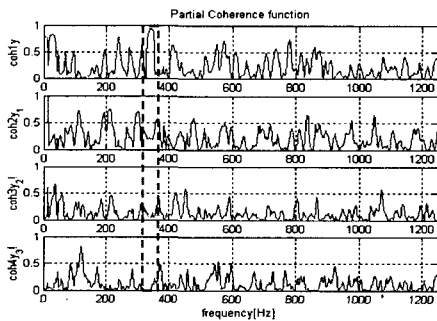


Fig. 5 SPL(A) at driver's seat by step 2 ~4

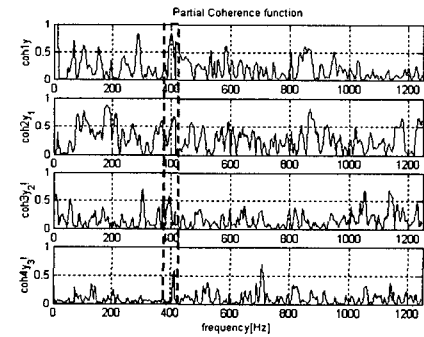




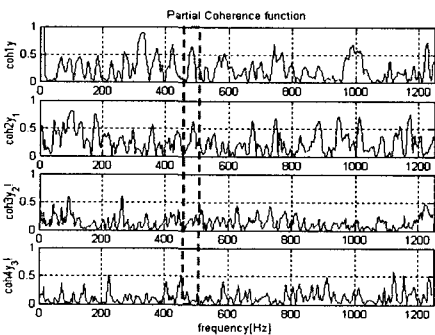
Step 4 : 475Hz
(a) Cool fresh mode



Step 2 : 335Hz

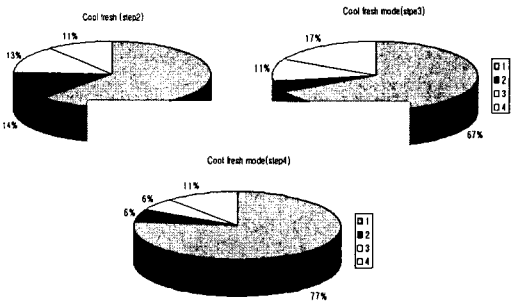
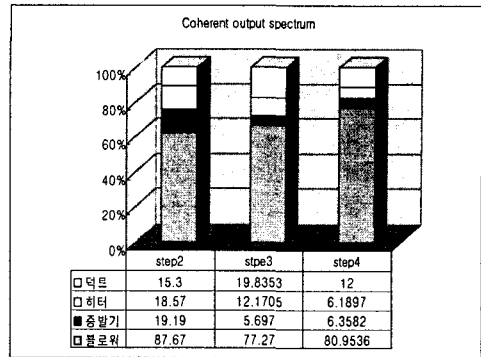


Step 3 : 395Hz

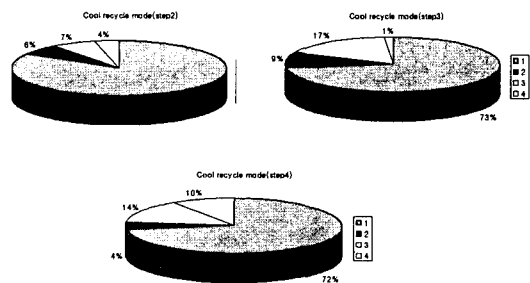
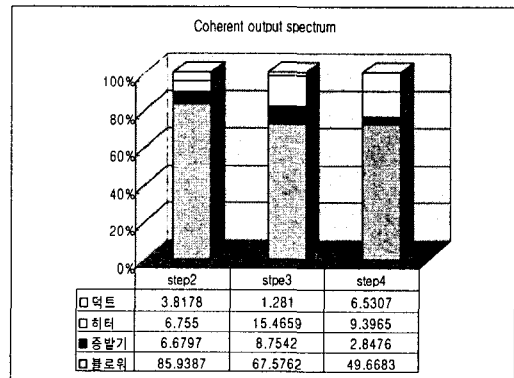


(b) Cool recycle mode

Fig.5 Partial coherence function



(a) cool fresh mode



(b) cool recycle mode

Fig.6 Quantity and percentage of Coherent output spectrum

5. 결 론

본 연구에서는 차량 공조시스템을 4 입력 1 출력 시스템으로 구성하여 입력성분들의 진동량과 소음간의 기여도를 다차원 스펙트럼 해석법을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시스템을 규명하는데 입력간/입출력간에 상관 관계가 존재할 경우에 다차원 스펙트럼 해석법을 이용하는 것이 효과적이다. 본 연구에서도 다중기여도함수가 0.5 이상으로 적용 가능하다.

(2) 기여출력스펙트럼을 통해 각 모드별, 단수별 기여순위 및 기여도를 결정할 수 있고, 모드, 단수에 상관없이 소음에 기여하는 진동 기여도는 블로워가 62~84%로 가장 높다.

후 기

본 연구는 현대모비스 연구비 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) J.S. Bendat, a. G. Piersol, 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, New York

(3) 오재용, 1983, "기계구조물의 소음원규명을 위한 다차원스펙트럼 해석의 응용", 동경공대 박사학위 논문,

(4) 강현석, "다차원 스펙트럼 해석을 이용한 자동차 현가장치의 진동전달경로 규명에 관한 연구", 한양대학교 석사학위 논문, 2001

(5) 조문갑 등, 2003, "다차원 해석법을 이용한 편심 회전체의 전달 기여도 평가", 추계학술대회논문집, 한국소음진동공학회, pp298~303