

# 다차원 해석법을 이용한 자동차 공조시스템의 기여도분석

오재응<sup>#</sup> 황동건\* 아미누딘\* 이정윤\*\* 김성수\*\*\*

## Coherent Analysis of Vehicle HVAC Using the MDSA Method

Jae-Eung Oh<sup>#</sup>, DongKun Hwang\*, Aminudin bin Abu\*, Jung-Youn Lee\*\* and SungSoo Kim\*\*\*

### ABSTRACT

To verify applicability of multi-dimensional spectral analysis (MDSA) for noise source identification two different approaches which are frequency response and coherent function have been investigated. The coherence function approach appears able to separate the correlated system when the noise sources were coherent. In this study, we identify contribution of structure-borne-noise of vehicle HVAC system using MDSA method. Firstly, to identify the applicability of MDSA method, 4-inputs of vehicle HVAC system were the signals measured by accelerometers attached on the selected noise sources which were composed of blower, evaporator, heater and duct. While 1-output which was driver's position sound was the SPL signals measured by a remote microphone, when the blower motor was operating. We identify efficiency of systems modeled with four inputs/single output through ordinary coherence function (OCF) and partial coherence function (PCF). As a result of experiment, the blower accounted for 62-88% of the overall level of sound energy density. Also, according to the analysis of acoustic signal and vibration signals measurement, an investigation of the noise source identification in the vehicle HVAC is presented. With the sound intensity method, the major sources of the vehicle HVAC radiation are verified. Also the method of improving the noise reduction is proposed by attaching damping patch access to blower motor and noise reduction is verified.

**Key Words** : Multi-dimensional spectrum analysis(다차원 해석법), HVAC(공조시스템), Partial coherence function (부분기여도함수), Multiple coherence function(다중기여도함수), Coherent-analysis(기여도분석)

### 1. 서론

최근 삶의 질 향상과 기술의 발달로 인해 자동차의 고급화와 성능향상이 이루어지고 있다. 그에 따라 소비자들의 자동차에 대한 관심도 출력, 연비 등에서 진동, 소음, 쾌적함 등으로 옮겨 가고 있다.

자동차 회사는 설계 단계부터 실험을 통해 엔진, 노면 소음의 비중을 크게 축소시켜가고 있으며, 이로 인해 상대적으로 덜 민감하게 반응했던 차실 내에서의 공조 소음 비중이 커지게 되었다. 히터와 에어컨의 사용시기는 날씨와 관련되어 있어, 사람들의 감성적인 측면과 연계되어 소음에 민감

... 접수일: 2005년 3월 8일; 게재승인일: 2005년 6월 29일

# 교신저자: 한양대학교 기계공학부

E-mail jeoh@hanyang.ac.kr Tel. (02) 2220-0452

\* 한양대학교 자동차공학과

\*\* 경기대학교 기계시스템디자인공학부

\*\*\* 현대모비스 응용기술연구부

하게 반응한다.

공조시스템(HVAC)은 블로워(blower), 증발기(evaporator), 히터(heater), 덕트(duct)로 크게 4 부분으로 구성되어 있다. HVAC 모듈은 서로 연결되어 있어 진동이 전달되는 현상을 가지고 있어 해석하기에 복잡할 뿐만 아니라 전달 경로 규명이 용이하지 않다. 이와 같이 진동 전달 경로가 여러 개인 경우 이에 대한 전달계의 해석으로 종래에는 주파수 응답 함수법(FRF)이 많이 사용되었다.

하지만 위의 방법은 각각의 전달계가 독립적으로 서로간에 영향을 미치지 않는 경우에만 쓸 수 있는 단점이 있어 진동 전달 기여도를 파악하기에는 미흡한 면이 있다. 전달계의 상관관계가 존재하는 경우 상관 성분을 제거하여 각 부분들의 순수한 기여량을 알아보고 해석하는 방법인 다차원 해석법(MDSA)을 이용할 수 있다. MDSA 은 부분기여도함수(PCF), 잔차 스펙트럼(residual spectrum), 기여출력스펙트럼(coherent output spectrum) 및 다중기여도함수(MCF)등을 통해 올바른 기여량을 추출할 수 있다.

본 연구에서는 HVAC 전면에서의 소음을 측정하여 시스템의 특성을 파악한 후, 블로워, 증발기, 히터, 덕트의 4 개의 부품을 입력원으로 하는 4 입력 1 출력의 시스템에 대하여 MDSA 을 적용하였다. 음향 인텐시티법을 통해 선정된 소음원에 대해 검증하였다. DC 컨버터를 이용하여 블로워 모터를 구동한 실험을 통해 얻은 입출력 신호를 이용하여 OCF, 잔차 스펙트럼, PCF 를 통하여 부품들의 기여도를 알아보고, MCF 를 이용하여 입출력계의 모델링의 타당성을 알아본다.

또한 PCF 와 잔차 스펙트럼을 이용하여 각 부품별로 발생하는 기여출력 스펙트럼을 구하여 정량적으로 소음을 평가하였다. 진동기여도가 가장 큰 블로워 모터와 입구에 제진재를 부착하여 소음 저감 여부를 검증하였다.

## 2. 다차원 해석법

HVAC 의 주요 부품인 블로워, 증발기, 덕트, 히터는 상관관계가 존재하며, MDSA 을 이용하여 부품간의 상관 성분을 제거하여 각 부분들의 순수한 기여량을 알아볼 수 있다. Fig. 1 은 입력간 상관관계가 없고, 상호 독립적인 경우의 입출력 모델이다. 실제의 진동계 혹은 음향계에 있어서 Fig. 2 와 같

이 입력간의 상관관계가 존재하는 경우가 많기 때문에 입력간의 상관관계를 고려하여 이론적 고찰을 수행하였다. 입력간 상관관계가 존재한다고 가정하면 출력 스펙트럼은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

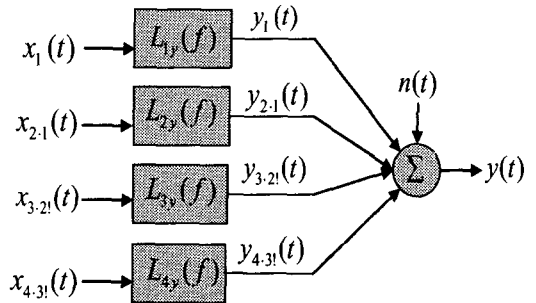


Fig. 1 4-input/1-output model for conditioned inputs

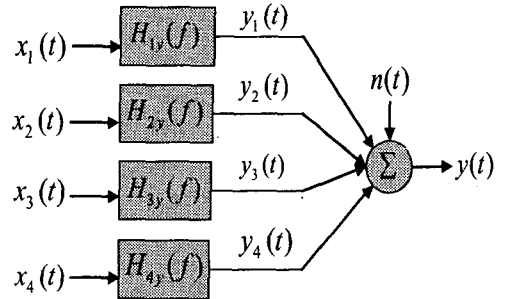


Fig. 2 4-inputs/1-output model for arbitrary system

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

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

식 (1), (2)를 FRF 법이라 한다. MDSA 을 이용하여 입력간, 입출력간의 관계로부터 상관성분을 제

거하기 위해서는 잔차 스펙트럼법을 이용하게 된다. 1 차 잔차 스펙트럼은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} S_{ii-1}(f) &= S_{ii}(f) - |L_{ii}(f)|^2 S_{11}(f) \quad (i = 2, 3, y) \\ S_{yy-1}(f) &= S_{yy}(f) - L_{1j}(f)^2 S_{11}(f) \quad (i = 2, 3, y = y) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $L_{ii}(f)$ 는 입력간 및 출력간의 상관성분을 제거시킨 경우의 입력간 및 출력간의 최적전달함수이다. Fig. 3 은 최적 전달함수를 이용하여 잔차 스펙트럼을 표현한 것이다. 마찬가지로 2 차적인 잔차 스펙트럼은  $x_4(t)$ 에 대해 구하면 입력  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$  선형적인 영향을 제거함으로써 다음 식과 같다.

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

여기서  $L_{2y}$ 는 입력  $x_2$ 와 출력 사이의 최적 전달 함수이다.

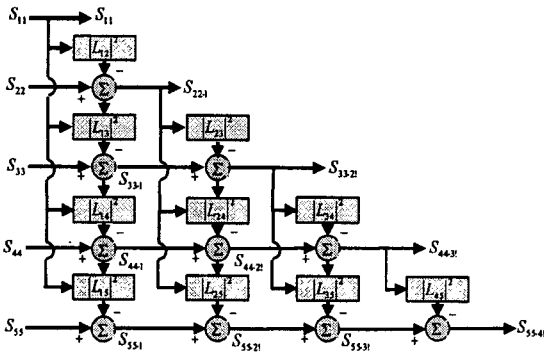


Fig. 3 Diagram showing how ordered conditioned auto-spectra are obtained from original auto-spectra

입력간 및 출력간의 기여관계를 나타내는 OCF는 식 (5), (6)과 같이 정의한다. 실제 구조물에서의 측정이라면 OCF가 0.5 정도 이상이면 기여도가 높다고 판단할 수 있다.

$$\gamma^2_{ij}(f) = \frac{|S_{ij}(f)|^2}{S_{ii}(f)S_{jj}(f)} \quad (5)$$

$$\gamma^2_{iy}(f) = \frac{|S_{iy}(f)|^2}{S_{ii}(f)S_{yy}(f)} \quad (6)$$

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

다 입력계에 적용하면 잔차 과정에 의하여 각 입력원의 순수 기여도를 나타낸 PCF를  $x_4(t)$ 에 대하여 구하면 식 (7)이 된다.

$$\gamma^2_{4y-3!}(f) = \frac{|S_{4y-3!}(f)|^2}{S_{44-3!}(f)S_{yy-3!}(f)} \quad (7)$$

이 식을 이용하여 입력간 상관성분을 제거하여 계산된 MCF는 식 (8)과 같이 된다.

$$\gamma^2_{yx} = 1 - (1 - \gamma^2_{1y})(1 - \gamma^2_{2y})(1 - \gamma^2_{3y})(1 - \gamma^2_{4y}) \quad (8)$$

실제로 진동원을 검출하려면 입력원의 출력에 대한 순수한 기여량을 계산할 필요가 있으므로 출력 스펙트럼과 PCF와의 곱인 기여출력 스펙트럼을 이용하게 된다. 4 입력  $x_1(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $x_3(t)$ ,  $x_4(t)$ 가 출력에 기여하는 순수한 기여량을 나타내는 기여출력 스펙트럼은 다음 식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} S_{y-1}(f) &= \gamma^2_{1y}(f)S_{yy}(f) \\ S_{y-2!}(f) &= \gamma^2_{2y!}(f) \cdot S_{yy-1!}(f) \\ S_{y-3!}(f) &= \gamma^2_{3y-2!}(f) \cdot S_{yy-2!}(f) \\ S_{y-4!}(f) &= \gamma^2_{4y-3!}(f) \cdot S_{yy-3!}(f) \end{aligned} \quad (9)$$

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 다차원 해석법

본 실험 HVAC 운전조건은 step 2,3,4에 대해 fresh와 recycle의 2가지 모드에 대해 실시하였다.

MDSA를 적용하기 위해 전달계에 해당하는 블로워, 증발기, 히터, 덕트 4곳에 Fig. 4와 같이 3축 가속도계(Dytran type 3013A)를 부착하여 입력 신호를 측정하였다. 운전자 수음 위치인 지상으로부터 1.2m, 전면 1m에서 마이크로폰을 통해 출력 신호 음압을 측정하였다. 가속도계로부터 받은 진동 신호는 증폭기를 통해 저장된 후 FFT Analyzer

(dp440)를 통해 시간 데이터를 얻어낸 후 MDSA 프로그램을 이용하여 신호처리를 수행하였다.

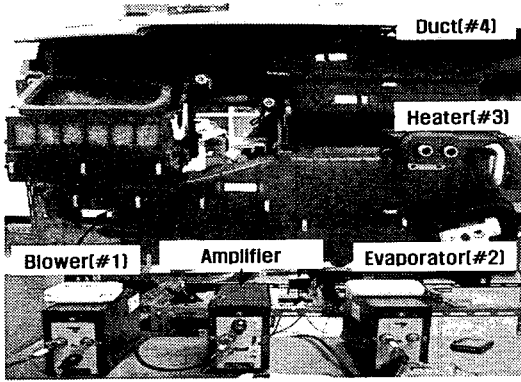


Fig. 4 The experiment setup for measurement of MDSA problem from HVAC system

### 3.2 음향 인텐시티

소음원 검증을 위한 음향 인텐시티 측정 실험은 Fig. 5 와 같이 HVAC 을 10cm 간격으로 54 개(9 × 6)의 격자로 구성하였으며, 인텐시티 probe 는 B&K 사의 Type 3548 probe(p-p 형 face-to-face 형)을 이용하였다.  $f_{max}$  는 1250Hz 이며, spacer 크기는 50mm, 측정점과의 거리는 10cm, 50 번 이상 평균을 취하였다.

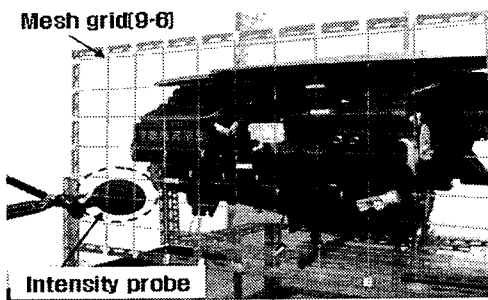
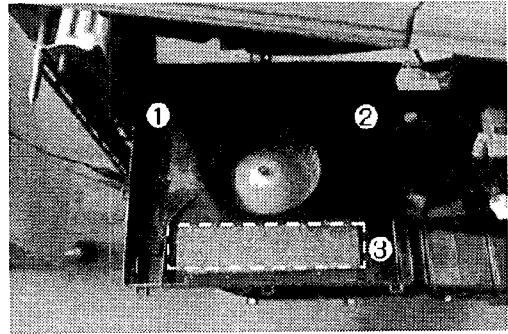


Fig. 5 The experiment setup for measurement of sound intensity for HVAC system

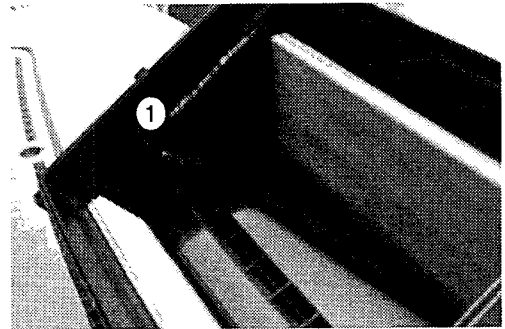
### 3.3 소음 저감

소음 저감을 위한 실험은 Fig. 4 에서와 같은 방법으로 음압 레벨을 측정하였다. 음압 레벨 측정은 cool fresh/recycle 모드의 2 단부터 4 단까지 6 회이다. 실험은 3 가지의 경우로 (1)은 제진재(damping

patch)를 부착하지 않은 원래의 HVAC, (2)는 블로워 모터 (3)은 블로워 입구 필터 벽면에 부착하는 경우로 총 18 회 실험을 하였다.



(a) Attachment of blower motor



(b) Attachment of blower enter

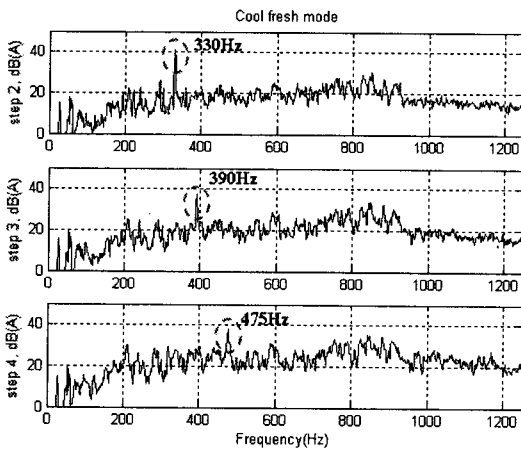
Fig. 6 The location of damping patch which are attached (a) blower motor and (b) blower enter

## 4. 실험 결과 및 고찰

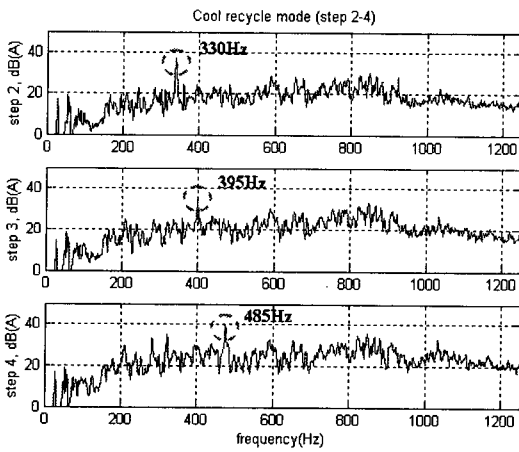
### 4.1 다차원 스펙트럼 해석법

Fig. 7 은 음압 레벨을 주파수 스펙트럼으로 나타낸 것이다. fresh 와 recycle 모드의 단계별 관심 주파수는 5~10Hz 이내에 있다.

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



(a) Fresh mode



(b) Recycle mode

Fig. 7 SPL(A) at driver's position by step 2 ~4

Table 1 Ordinary coherence function for HVAC system

(a) Cool fresh mode

O.C.F	Step 2	Step 3	Step 4
$\gamma_{12}^2$	0.9858	0.8847	0.5622
$\gamma_{13}^2$	0.0510	0.2998	0.4866
$\gamma_{14}^2$	0.2378	0.2850	0.4916
$\gamma_{23}^2$	0.0410	0.2679	0.4377
$\gamma_{24}^2$	0.2112	0.6636	0.2888

$\gamma_{34}^2$	0.7124	0.8894	0.5277
$\gamma_{1y}^2$	0.9745	0.9488	0.7781
$\gamma_{2y}^2$	0.9487	0.7726	0.5597
$\gamma_{3y}^2$	0.1849	0.2519	0.2677
$\gamma_{4y}^2$	0.1095	0.0981	0.2175

(b) Cool recycle mode

O.C.F	Step 2	Step 3	Step 4
$\gamma_{12}^2$	0.9890	0.9130	0.6847
$\gamma_{13}^2$	0.1506	0.4060	0.0597
$\gamma_{14}^2$	0.1525	0.1170	0.1425
$\gamma_{23}^2$	0.1577	0.2800	0.4137
$\gamma_{24}^2$	0.1182	0.1455	0.1301
$\gamma_{34}^2$	0.9596	0.9428	0.7880
$\gamma_{1y}^2$	0.9351	0.8566	0.6517
$\gamma_{2y}^2$	0.9094	0.8079	0.5969
$\gamma_{3y}^2$	0.2352	0.3165	0.2790
$\gamma_{4y}^2$	0.2009	0.3422	0.1649

입력간의 상관관계를 잔차 스펙트럼을 이용하여 제거하면 Table 2 과 같이 PCF를 얻을 수 있다.

PCF는 입력간의 상관 관계를 제거하여 순수하게 기여하는 량을 나타낸다. 이것을 통해 HVAC의 피크 주파수에서 블로워, 증발기, 히터, 덕트 순의 소음기여 우선순위를 확인할 수 있다. 블로워에서 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다

MCF는 Table 3에서 확인할 수 있듯이 0.5 이상의 높은 값을 나타내는 것으로 보아 입력이 충분히 고려된 입출력계임을 알 수 있다.

Table 2 Partial coherence function for HVAC system

(a) Cool fresh mode

O.C.F	Step 2	Step 3	Step 4
$\gamma_{1y}^2$	0.9745	0.9488	0.7781
$\gamma_{2y_{-1!}}^2$	0.9041	0.8089	0.5597
$\gamma_{3y_{-2!}}^2$	0.3223	0.3704	0.2241
$\gamma_{4y_{-3!}}^2$	0.3079	0.2509	0.0766

(b) Cool recycle mode

O.C.F	Step 2	Step 3	Step 4
$\gamma_{1y}^2$	0.9351	0.8566	0.6517
$\gamma_{2y_{-1!}}^2$	0.9094	0.5445	0.5969
$\gamma_{3y_{-2!}}^2$	0.1417	0.4312	0.3099
$\gamma_{4y_{-3!}}^2$	0.0745	0.0613	0.0908

Table 3 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	0.9500	0.9389	0.8844

Table 4 Coherent output spectrum for HVAC system

(a) Cool fresh mode(unit : dB(A))

	Step 2	Step 3	Step 4
Blower	87.67	77.27	80.95
Evaporator	19.19	5.70	6.36
Heater	18.57	12.17	6.19
Duct	15.30	19.84	12.00

(b) Cool recycle mode(unit : dB(A))

	Step 2	Step 3	Step 4
Blower	49.67	67.58	85.94
Evaporator	2.85	8.75	6.68
Heater	9.40	15.47	6.76
Duct	6.58	1.28	8.82

Table 4 는 각 모드 및 단계에서 관심주파수에서의 기여출력 스펙트럼을 나타낸 것이다. 각 관심주파수에서의 기여출력스펙트럼은 어떤 경향을 가지는가를 알 수 있다. 각 모드 및 단계에서 모두 블로워의 영향이 지배적이다. Fig. 8 은 기여출력 스펙트럼을 각 입력 부품별에 대한 소음에 기여하는 진동량을 백분율로 표시한 것이다. 가장 큰 진동 기여량을 가지는 것은 블로워로서 전체의 62~84%까지 기여를 한다.

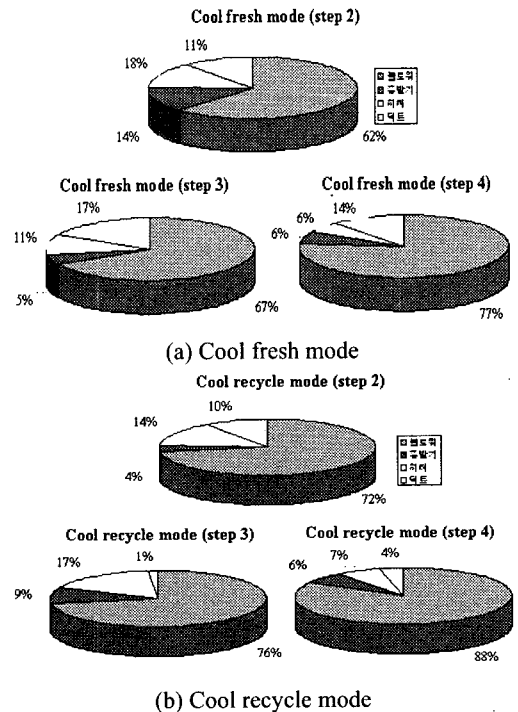
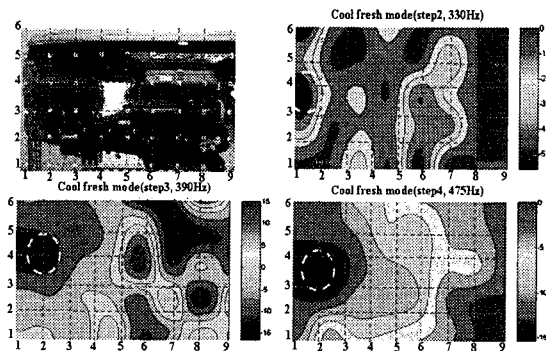


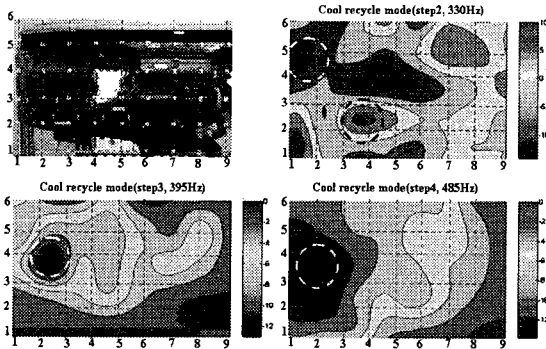
Fig. 8 Percentage of coherent output spectrum

### 4.2 음향 인텐시티

MDSA 를 통해 부품별 기여도 및 우선 순위를 확인하였다. 음향 인텐시티를 측정을 통해 HVAC 의 부품에 대해 소음원을 검증하고, MDSA 의 결과와 비교하였다. Positive intensity 는 방사음(source)이라 정의 하고 Negative intensity 는 흡음(sink)으로 정의한다. HVAC 의 인텐시티 측정 결과 Fig. 9 와 같이 모드별, 단계별에서 블로워 입구를 포함한 블로워(3× 3)에서 소음원이 존재하며, MDSA 의 결과와 같이 블로워의 영향이 크다.



(a) Cool fresh mode



(b) Cool recycle mode

Fig. 9 Sound intensity at HVAC system

### 4.3 소음 저감

MDSA 와 음향 인텐시티를 통해 블로워가 소음 발생에 주원인이라는 것을 알 수 있었다. 따라서 Fig. 6 과 같이 블로워 모터 부근에 제진재를 부착하여 소음저감여부를 확인하였다. Table 5 는 제진재를 부착하지 않은 경우의 overall 값과 블로워모터 부근에 부착한 경우의 값이다. fresh 모드의 경우

1.92~2.47dB(A)만큼 감소하였고, recycle 모드의 경우 2.14~2.6dB(A)만큼 감소하였다.

그러나 블로워 입구에 부착한 경우는 fresh 모드의 경우 1.31~1.74dB(A)만큼, recycle 모드의 경우 0.66~5.71 dB(A)만큼 증가하였다. HVAC 시스템의 경우 블로워 모터 주위에 제진재를 부착한 경우에 소음저감의 효과가 있다.

Table 5 Overall value of the HVAC which are attaching damping patch at none and blower motor

(a) Cool fresh mode (unit: dB(A))

Damping patch	Step 2	Step 3	Step 4
None	40.16	40.87	41.21
Blower motor	38.18	38.40	39.29
Blower enter	41.90	42.26	42.52

(b) Cool recycle mode (unit: dB(A))

Damping patch	Step 2	Step 3	Step 4
None	40.37	40.34	41.25
Blower motor	37.77	38.02	39.11
Blower enter	41.03	45.02	46.96

## 5. 결론

본 연구에서는 HVAC 를 4 입력 1 출력 시스템으로 구성하여 입력성분들의 진동량과 소음간의 기여도를 MDSA 를 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 입력간/입출력간에 상관 관계가 존재할 경우에 MDSA 를 이용하는 것이 효과적이다. HVAC 시스템은 MCF 가 0.5 이상으로 적용 가능하다.

(2) 기여출력 스펙트럼을 통해 각 모드별, 단수별 기여순위 및 기여도를 결정할 수 있고, 모드, 단수에 상관없이 소음에 기여하는 진동 기여도는 블로워가 62~88%로 가장 높다. HVAC 부품에 대한 주요 소음원이 인텐시티 측정을 통해 블로워임을 검증했다.

(3) MDSA 와 인텐시티 측정을 통해 HVAC 의 소음을 저감하기 위한 효과적인 방법은 블로워 부분을 개선하는 것이며, 제진재를 블로워 모드 부근에 부착하여 측정된 결과 1.92~2.6dB(A)만큼 소음 저감효과가 있다.

## 후 기

본 연구는 현대모비스 연구비 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Bendat, J. S. and Piesol, A. G., "Random Data" Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, Wiley-Interscience, New York, pp. 204~227, 1986.
2. Bendat, J. S. and Piersol, A. G., "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis," John Wiley & Sons, Inc. 2nd Edition, 1993.
3. Chung, J. Y., "Measurement of Frequency Responses and Multiple Coherence Function of the Noise Generation System of a Diesel Engine," JASA, Vol. 58, No. 3, 1975.
4. Jacobsen, F., "A note on instantaneous and time-averaged active and reactive sound intensity," Journal of Sound and Vibration, 147(3), pp. 489-496, 1991.
5. Fahy, F. J., "Measurement of acoustic intensity using the cross-spectral density of two microphone signals," JASA Vol.62(4), pp. 1057~1059, 1976.
6. Hwang, D. K., Oh, J. E., Lee, J. Y. and Kim, S. S., "Coherent Analysis of HVAC Using the Multi-Dimensional Spectral Analysis," KSNVE Fall Annual Conference, 2004.