

부분기여도함수를 이용한 증발기의 소음원 분석

Noise-source Identification of Evaporator Using Partial Coherence Function

최기수* · 정의봉† · 한형석** · 김민성*

Kisoo Choi, Weibong Jeong, Hyungsuk Han and Minseong Kim

(2008년 10월 9일 접수 ; 2009년 1월 22일 심사완료)

Key Words : Source Identification(소음원 규명), MISO(다중입력 단일출력), Coherence(기여도), OCF(일반기여도 함수), PCF(부분기여도함수), LabVIEW(랩뷰)

ABSTRACT

Frequency analysis is one of the most useful way to analyze response signal for the purpose of grasping the dynamic characteristics of system through Fourier transformation. Although it is very effective way for frequency analysis, it is hard to analyze out a specific sound or vibration component which is correlated with others. In this thesis, source contribution analysis tool for NI-PXI equipment is developed with LabVIEW using coherences of MISO(multiple-input single-output) model. For the purpose of examining propriety of developed tool, simulation is performed with several correlated signals that have different frequency range. After checking the OCF(ordinary coherence function) and PCF(partial coherence function) of the each signal for concerned frequency domain, an experiment is conducted on an evaporator that cause the principal noise of a refrigerator. This developed tool will be expected to build up more convenient and serviceable measurement system.

1. 서 론

근래에 들어 세탁기나 냉장고 같은 가전제품을 비롯하여 자동차, 선박 등 산업전반에 걸쳐 시스템의 성능은 급격한 발전을 해왔다. 특히 가전제품의 경우 스펙상으로 드러나는 성능향상은 브랜드와는 상관없이 충분히 이루어진 상태이다. 그래서 최근에는 제품 경쟁력 강화를 위해 환경 및 감성적인 부분에 좀 더 치중하여 제품의 불필요한 소음이나 진동을 저감하여 보다 쾌적한 상태를 유지하려는 추세이다.

이러한 소음/진동은 제품의 어느 한 부분에서 독자적으로 발생하는 것이 아니라 대부분 서로 결합

된 형태로 존재하고 있어서 특정 소음원의 영향을 분석하거나 파악하고자 할 때는 구조물에 대한 실험 및 해석이 더욱 까다롭고 복잡해진다. 독립적인 신호의 경우 기존의 주파수응답함수(FRF)법을 적용하여 스펙트럼을 통한 주파수 분석이 가능하나, 상관성분이 있는 여러 신호들 사이에서 특정 성분을 검출하거나 각 소음/진동원이 전체에 대해 차지하는 비중을 알고자 할 때에는 제약이 따른다. 이런 경우에는 입력원과 출력 사이의 상관관계를 고려하여 각각의 영향을 분석하는 부분기여도함수를 이용해야 효과적이다. 이와 관련하여 Shu⁽¹⁾는 기여도함수를 이용하여 디젤엔진의 소음원을 규명하였고, Sim⁽²⁾은 다차원 스펙트럼 해석법을 적용하여 비정상 소음/진동 신호의 소음원을 추출하였으며, Kim⁽³⁾은 다차원 스펙트럼 해석법으로 탈수 시 드럼세탁기의 소음 기여도를 분석하였다.

이 논문에서는 부분기여도함수의 이론을 바탕으로 LabVIEW를 이용하여 소음원 기여도 분석을 위

† 교신저자; 정회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : wbjeong@pusan.ac.kr
Tel : (051)510-2337, Fax : (051)517-3805
* 부산대학교 대학원 기계공학부
** 정회원, 국방기술품질원

한 틀을 개발한다. 그리고 이를 이용하여 시뮬레이션 및 여러 소음원을 가지는 냉장고를 대상으로 실제 실험을 통해 소음원을 규명함으로써 개발한 틀의 신뢰성과 적용가능성을 검토하고자 한다.

2. 부분기여도함수

관심 대상물에서 발생하는 소음, 진동은 대개 마이크로폰과 가속도센서 등을 이용해 측정한다. 이때 각 센서에 전해지는 값은 우리가 원하는 신호 외에도 다른 곳에서 발생하여 중첩된 신호나 잡음, 기타 환경소음 등이 섞이게 되는데 이를 고려한 출력단에서의 스펙트럼은 식 (1)과 같다.

$$G_{yy}(f) = \sum_{i=1}^q \sum_{j=1}^q H_{iy}^*(f) H_{jy}(f) G_{ij}(f) + G_{nn}(f) \quad (1)$$

여기에서 $H_{iy}(f)$ 및 $H_{jy}(f)$ 는 각 입력신호가 출력에 기인하는 전달함수를 뜻하며 $G_{ij}(f)$ 는 서로 다

른 입력신호 x_i 와 x_j 사이의 상호 스펙트럼 밀도를 나타낸다. 잡음 $G_{nn}(f)$ 은 입력신호의 영향을 받지 않고 출력신호에 직접 더해진다고 가정한다. 신호 사이에 존재하는 상관성분을 제거하면 Fig. 1과 같이 특정 입력원의 순수한 영향만을 고려하여 표현할 수 있고, 스펙트럼 밀도는 Fig. 2의 관계도로 정리할 수 있다. 여기에서는 잔차 스펙트럼(conditioned spectrum)을 이용하는데 각각의 관계는 다음과 같다.

$$G_{ij,r!}(f) = G_{ij,(r-1)!}(f) - L_{rj}(f) G_{ir,(r-1)!}(f) \quad (2)$$

식 (2)에서 $L_{rj}(f)$ 는 상관성분이 제거된 다중입력/단일출력(MISO) 모델의 입출력 사이의 최적전달함수⁽⁴⁾이며, i 번째 입력신호에 대한 잔차 스펙트럼을 최적 전달함수를 사용하면 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$|L_{iy}(f)|^2 G_{ii,(i-1)!}(f) + G_{yy,i!}(f) = G_{yy,(i-1)!}(f) \quad (3)$$

한편 전체 출력에 대한 각 입력이 차지하는 비중은 자기 및 상호 스펙트럼을 이용하여 식 (4)에서 보는 것과 같이 기여도함수를 통해 알 수 있다.

$$\gamma_{iy}^2(f) = \frac{|G_{iy}(f)|^2}{G_{ii}(f) G_{yy}(f)} \quad i = 1, 2, \dots, q \quad (4)$$

이를 일반기여도함수(ordinary coherence function)라고 하며, 입력 x_i 와 다른 입력의 상호연관성을 고려하지 않기 때문에 관심 대상의 순수한 기여량을 파악하기가 힘들다. 이를 보완하여 Fig. 1의 상관성분이 제거된 다중 입력 시스템으로 확장하면 부분기여도함수(partial coherence function)⁽⁵⁾를 구할 수 있는데 유도방법은 다음과 같다. 먼저 두 개의 입력원에 대해 예를 들면 첫 번째 입력신호 x_1 은 출력 y 뿐만 아니라 두 번째 입력신호 x_2 에도 영향을 미치게 된다. 이로 인해 x_2 는 x_1 에 의한 $x_{2:1}$ 와 x_1 과 무관한 $x_{2:1}$ 로 나뉘며 이들의 관계는 식 (5)와 같다.

$$X_{2:1} = X_2 - X_{2:1} = X_2 - \frac{G_{12}}{G_{11}} X_1 \quad (5)$$

한편 x_1 의 영향을 제거한 입력 x_2 와 출력 y 사이의 잔차 상호 스펙트럼은 다음과 같다.

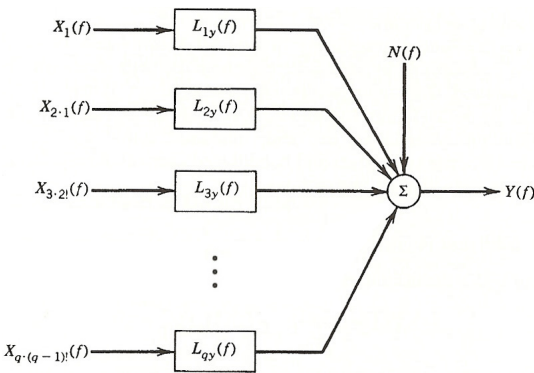


Fig. 1 MISO model for conditioned inputs

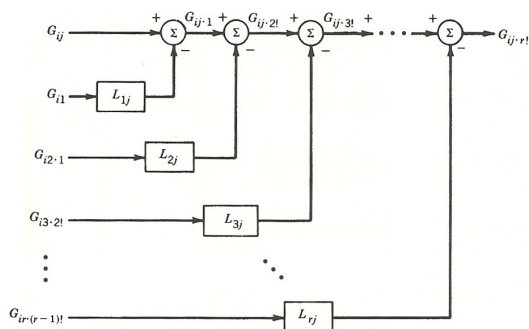


Fig. 2 Algorithm to compute conditioned spectral density functions

$$G_{2y \cdot 1} = E[X_{2 \cdot 1}^* Y] = G_{2y} - \frac{G_{12}^*}{G_{11}} G_{1y} \quad (6)$$

식(6)에서 구한 방법을 적용하여 x_2 와 y 의 잔차 자기 스펙트럼을 식(7), (8)과 같이 표현할 수 있다.

$$G_{22 \cdot 1} = E[X_{2 \cdot 1}^* X_{2 \cdot 1}] = G_{22} - \frac{G_{12}^* G_{12}}{G_{11}} = (1 - \gamma_{12}^2) G_{22} \quad (7)$$

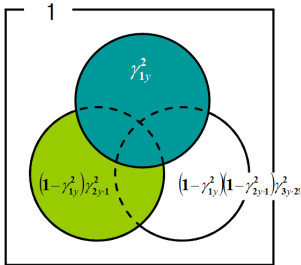
$$G_{yy \cdot 1} = (1 - \gamma_{1y}^2) G_{yy} \quad (8)$$

두 입력간의 상관성분을 제거한 x_2 의 부분기여도 함수는 위에서 구한 식(6)~(8)의 잔차 스펙트럼을 이용하여 얻을 수 있다.

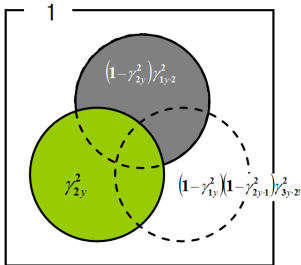
$$\gamma_{2y \cdot 1}^2 = \frac{|G_{2y \cdot 1}|^2}{G_{22 \cdot 1} G_{yy \cdot 1}} = \frac{|G_{2y} - G_{12}^* G_{1y} / G_{11}|^2}{(1 - \gamma_{12}^2)(1 - \gamma_{1y}^2) G_{22} G_{yy}} \quad (9)$$

식(9)를 다중 입력에 대해 일반화하면 식(10)으로 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{iy \cdot (i-1)!}^2(f) = \frac{|G_{iy \cdot (i-1)!}(f)|^2}{G_{ii \cdot (i-1)!}(f) G_{yy \cdot (i-1)!}(f)} \quad (10)$$



(a) $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3$



(b) $x_2 \rightarrow x_1 \rightarrow x_3$

Fig. 3 The diagrams by sequence of input signals

여기서 구한 부분기여도합수는 다른 입력의 영향을 모두 제거한 관심 신호만의 기여도를 보여주기에 때문에 출력이 입력신호의 단순한 합으로 이루어져 있다면 그 값은 항상 1이 된다. 일반적으로 서로 상관관계가 존재하는 q 개의 입력에 대해 기여도 전체의 합을 1로 본다면 그 중 i 번째 입력이 출력에 미치는 기여도를 이 연구에서는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \Omega_{iy \cdot (i-1)!}^2 &= (1 - \gamma_{iy}^2)(1 - \gamma_{iy \cdot 1}^2) \cdots (1 - \gamma_{iy \cdot (i-2)!}^2) \gamma_{iy \cdot (i-1)!}^2 \\ & \quad (11) \end{aligned}$$

동일한 입력원이라고 하더라도 각 신호의 입력 순서에 따라 부분기여도 값이 차이가 나게 되는데 이를 벤다이어그램으로 나타내면 Fig. 3과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 각 입력원이 전체 출력 y 에 미치는 기여도는 입력되는 순서에 따라 다름을 알 수 있다. 이들의 관계를 이용하여 기여도를 좀 더 세분화할 수 있다. 예를 들어 서로 상관관계를 갖는 3개의 입력 x_1, x_2, x_3 로 구성된 Fig. 3의 모델에서 (a)와 같이 $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3$ 순서로 기여도를 구한 γ_{1y}^2 값과 (b)와 같이 $x_2 \rightarrow x_1 \rightarrow x_3$ 순서로 기여도를 구한 $(1 - \gamma_{2y}^2) \gamma_{1y \cdot 2}^2$ 을 비교하면 x_1 및 x_2 단독에 의한 기여도뿐만 아니라 $x_1 \cap x_2$ 신호에 의한 기여도도 구할 수 있다. 마찬가지로 x_3 에 대해서도 적용하면 Fig. 4에 나타난 8개의 영역에 대한 기여도를 다음과 같이 구할 수 있다.

- ① $\Omega_{1y \cdot (2,3)}^2$ ② $\Omega_{2y \cdot (1,3)}^2$ ③ $\Omega_{3y \cdot (1,2)}^2$
- ④ $\Omega_{1y \cdot 3}^2 - \Omega_{1y \cdot (2,3)}^2$ ⑤ $\Omega_{2y \cdot 1}^2 - \Omega_{2y \cdot (1,3)}^2$ ⑥ $\Omega_{3y \cdot 2}^2 - \Omega_{3y \cdot (1,2)}^2$
- ⑦ $\gamma_{1y}^2 - \Omega_{1y \cdot 2}^2 - (\Omega_{1y \cdot 3}^2 - \Omega_{1y \cdot (2,3)}^2)$
- ⑧ $1 - (\gamma_{1y}^2 + \Omega_{2y \cdot 1}^2 + \Omega_{3y \cdot (1,2)}^2)$

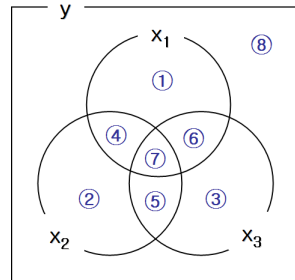


Fig. 4 The coherence diagram considered correlation of each inputs

3. 소음원 기여도 분석 툴

상관관계가 존재하는 특정 입력원의 규명을 위해 다음과 같이 LabVIEW를 이용하여 소음원 기여도 분석 툴을 개발하였다. Fig. 5는 개발된 툴을 이용하여 GUI 창을 통해 실제 구조물을 MISO로 가정하여 외부에서 발생하는 여러 소음, 진동을 측정, 분

석하는 모습이고, Fig. 6은 개발한 툴에서 수집한 전체 데이터의 흐름도로 볼 수 있다. 프로그램을 실행하면 시간 데이터를 수집하기 전 사용하고자 하는 n 개의 채널에 대한 설정이 이루어지는데, 이곳에서는 실험에 사용되는 각종 센서의 타입과 민감도, 단위체계 등을 정의한다. 그리고 실제 실험에서 계속되는 신호의 누설오차⁽⁶⁾를 저감시키기 위하여 hanning을 비롯하여 Kaiser-Bessel, flat-top 등의 윈도우 함수

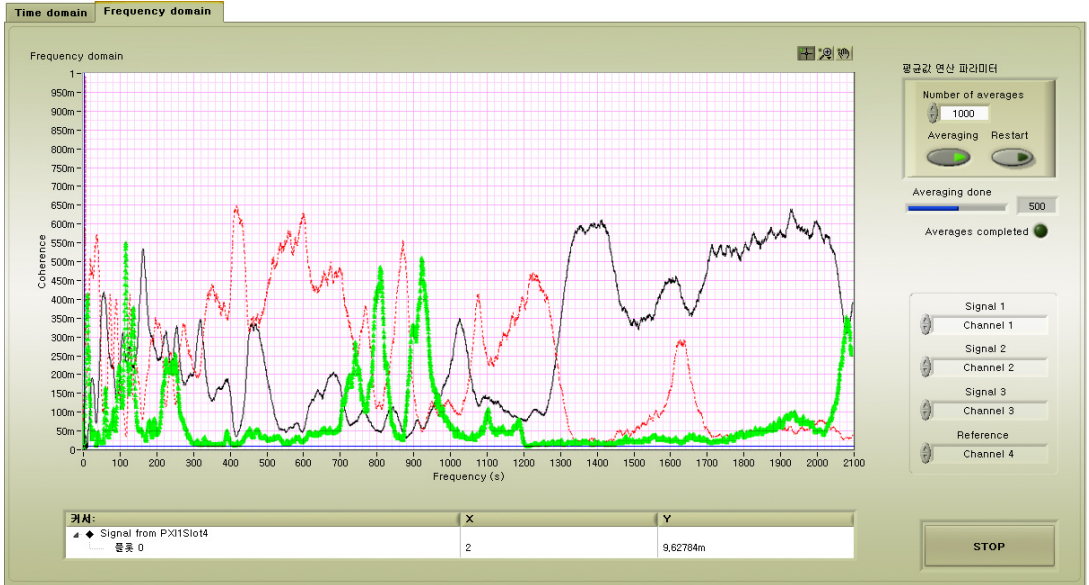


Fig. 5 Front panel of the source identification tool

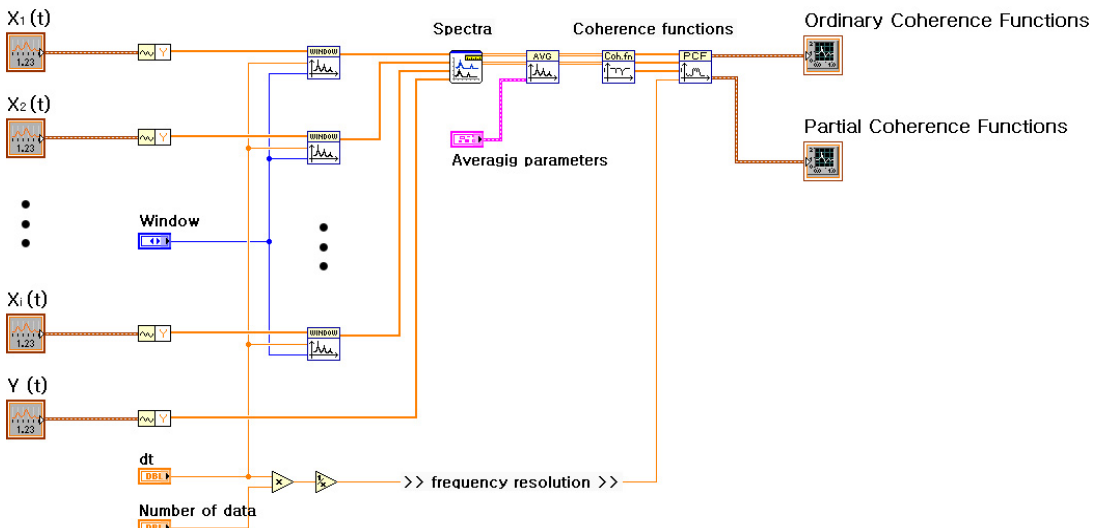


Fig. 6 Block diagram of the source identification tool

를 적용할 수 있도록 하였다. 수집할 신호의 주파수 대역과 연동하여 Nyquist 주파수를 기준으로 필터가 설정된다. 이상의 모든 설정이 끝나면 선택한 디바이스의 채널을 활성화시켜 계측 및 신호처리를 위한 프로세스를 진행한다. 모든 채널의 시간 신호는 상위 디바이스에 대해 각각의 그룹화되어 태스크를 생성한 후 동일한 샘플링 속도와 채널 당 샘플 개수로 AD 변환되며, 미리 지정된 기준 채널에 맞춰 트리거가 적용되므로 시간지연 없이 동시에 샘플링된다. 이렇게 수집한 데이터는 분석하기 전 임의적으로 버퍼에 쌓아 overlapping시켜 실시간 푸리에 변환을 하여 자기 스펙트럼(autospectrum)과 상호 스펙트럼(cross spectrum)을 구할 수 있다. 계측한 신호에 불가피하게 포함되는 잡음의 영향을 줄여 SN(signal to noise)비를 높이기 위하여 averaging 처리를 하였으며 일반기여도합수(OCF)와 부분기여도합수(PCF)를 계산할 수 있도록 툴을 개발하였다. 분석한 결과는 채널 수에 따라 화면에 도시화되며 사용자가 원하는 형식으로 변형하여 데이터를 저장할 수 있다.

4. 시뮬레이션

실제 실험에 앞서 제작한 툴의 신뢰성을 검증하기 위하여 여러 형태의 신호가 섞여 있는 MISO 모델에 대해 각 입력원의 신호를 검출할 수 있는지에 대해 알아보았다. 먼저 각 주파수 영역에서의 입력 신호의 영향을 알아보기 위해 시드(seed)를 달리하여 서로 상관관계가 존재하지 않고 균일한 가우스 분포를 가지는 백색 잡음을 1초 동안 세 개의 채널에서 발생시켰다. 그리고 대역통과 필터를 이용하여 $x_1(t)$ 이 0~1,000 Hz, $x_2(t)$ 가 300~1,300Hz, 그리고 $x_3(t)$ 가 600~1,600Hz의 서로 다른 주파수 영역을 가지도록 하였다. 그리고 출력 $y(t)$ 는 세 신호의 합으로 하여 잡음을 배제한 입력신호의 영향만을 고려하였다. 총 1,000번의 평균을 거쳐 여기서 얻은 각 입력원의 기여도는 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 $x_1(t)$ 과 $x_3(t)$ 는 다른 신호와 겹치지 않는 자기만의 고유 영역을 가지고 있는데 이 부분은 입력간의 상관성분이 없기 때문에 기여도가 1에 매우 근접하는 것을 볼 수 있다. 반면 $x_2(t)$ 의 경우 모든 구간을 함께 공유하고 있어 자

신만의 기여도가 떨어지는 것을 볼 수 있고, 모든 신호가 동시에 가지는 600~1,000 Hz 부분은 전체 출력에 대한 기여도가 각각 3등분됨을 볼 수 있다.

다음으로 입력간 약간의 상관관계가 존재하는 여러 형태의 신호가 섞여 있고 외부 노이즈의 영향을 받는 시스템에서 원하는 성분을 추출할 수 있는지에 대해 테스트를 해보았다. $x_1(t)$ 은 200~1,000 Hz의 주파수가 선형적으로 점점 증가하는 chirp 신호이고 $x_2(t)$ 는 충격해머를 이용하여 생성한 과도신호이다. $x_3(t)$ 는 고역통과 필터를 이용하여 1,400 Hz 이하의 성분이 제거된 백색 잡음이며 출력 $y(t)$ 에는 입력신호 외에 각 입력원과 독립적인 잡음을 추가하여 앞의 경우와 마찬가지로 각 스펙트럼에 대해 averaging을 1,000번 수행하여 해석하였다. Fig. 8에서 보는 것과 같이 $x_1(t)$ 은 자신이 가지는 주파수 대역에서만

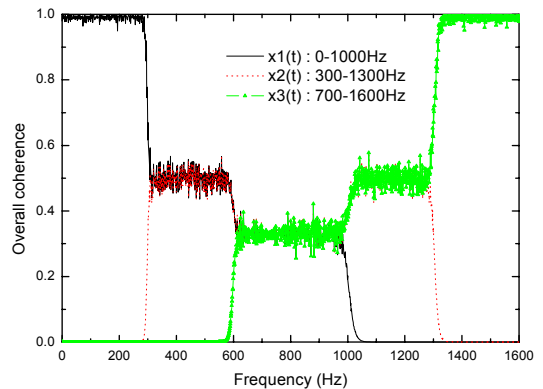


Fig. 7 Case I. Overall coherence of the uncorrelated white noise input signals

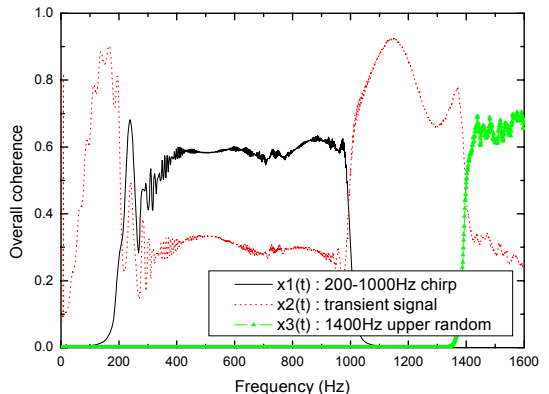


Fig. 8 Case II. Overall coherence of the correlated input signals(region ①, ②, ③ in Fig. 4)

기여하는 반면, 충격신호인 $x_2(t)$ 는 전 주파수에 걸쳐 영향을 미치지 때문에 다른 신호와 겹치지 않는

200 Hz 이하와 1,000~1,400 Hz 사이에서, $x_3(t)$ 는 나머지 1,400 Hz 이상에서 높은 기여도를 형성하는 것을 볼 수 있다.

Case II의 경우 입력신호 사이에 상관성분이 존재하고 있어서 앞에서 살펴본 Fig. 4의 기여도 다이어그램을 적용해 보았다. 전체 영역에서 두 개의 입력원거리 겹치는 영역인 ④, ⑤, ⑥에 해당하는 부분은 Fig. 9와 같다. 그림에서 $x_1(t)$ 과 $x_2(t)$ 두 신호가 서로에게 영향을 주는 영역④의 기여도는 주파수에 따라 정현파와 비슷한 모양으로 가장 큰 기여량을 가지고 있으며 $x_2(t)$ 와 $x_3(t)$ 에 의한 영역⑤의 기여도는 기여하는 바가 적지만 전체적으로 비슷한 형태의 값을 가짐을 보여준다. $x_1(t)$ 과 $x_3(t)$ 에 의한 영역⑥의 기여도는 1,000 Hz 이후 값이

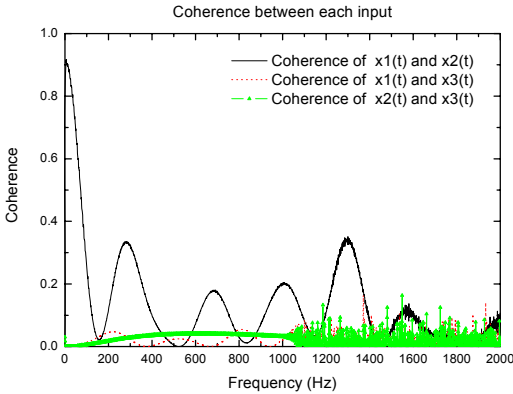


Fig. 9 Case II. Overall coherence of the correlated input signals(region ④, ⑤, ⑥ in Fig. 4)

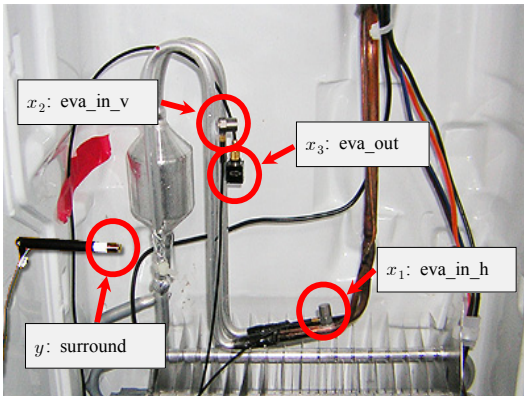


Fig. 10 The experimental points of a test for the evaporator

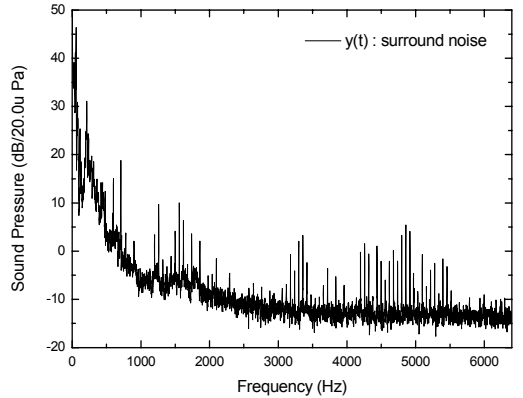


Fig. 12 Autospectrum of an inside noise of the refrigerator

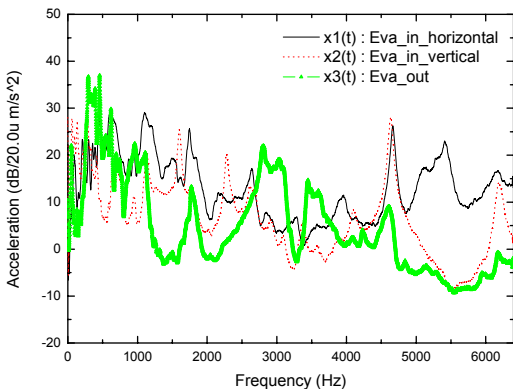


Fig. 11 Autospectra of the input signals at the evaporator

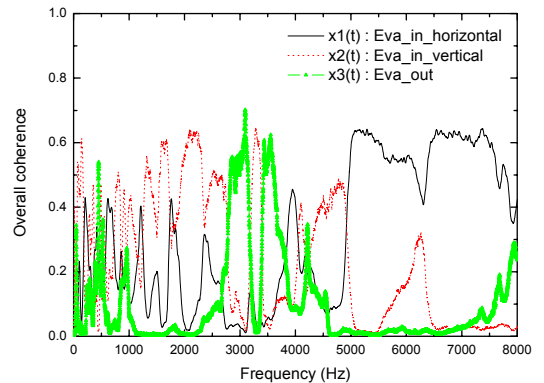


Fig. 13 Partial coherence functions at each part of evaporator(x_1 : horizontal inlet, x_2 : vertical inlet, x_3 : outlet)

급격히 떨어짐을 알 수 있다.

이상의 시뮬레이션을 통해 개발된 톨의 타당성을 확인하였고 각 입력원의 물리적 특성이 출력에 미치는 정도를 파악할 수 있었다.

5. 냉장고 증발기

앞의 시뮬레이션 과정과 결과를 토대로 실제 냉장고의 증발기를 대상으로 3입력/단일출력 모델로 구성하여 실험을 수행하였다. 일반적으로 증발기에서는 냉매가 액체와 기체의 2가지 상태(two phase flow)가 동시에 흐르기 때문에 가동 후 냉매가 끓기 시작하면서 이상소음이 발생하여 다른 부분보다 소음과 진동이 더 심한 편이다. 또한 수평관 또는 수직관을 흐르는 냉매의 유동양식(flow pattern)이 서로 다르므로 서로 다른 진동소음원 특성을 갖는다. 이러한 과도소음의 영향을 알아보기 위하여 Fig. 10과 같이 실험 장치를 구성하였다. 증발기에서 냉매가 2상으로 존재하는 입구단에서 수평방향 배관의 가속도신호를 $x_1(t)$, 수직방향 배관의 가속도신호를 $x_2(t)$ 로 지정하고, 열교환기를 거쳐 냉매가 빠져나가는 출구단의 가속도신호를 $x_3(t)$ 로 하여 각 부분에서 발생하는 진동을 가속도센서로 측정하였다. 그리고 냉장고 내부 증발기 근처의 음압을 출력 $y(t)$ 로 하여 마이크로폰으로 측정하였다. 입력원에서 발생한 가속도의 파워 스펙트럼은 Fig. 11에서 보는 것과 같이 배관의 각 지점에서 생성된 진동의 영향이 주파수에 따라 조금씩 다른 것을 알 수 있다. Fig. 12는 동일한 시간동안 측정한 냉장고 내부음압으로 전반적으로 저주파에서 지배적이고 고주파로 갈수록 소음의 정도가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 소음원 사이의 상관관계를 고려하여 입력과 출력의 관계를 나타낸 부분기여도는 Fig. 13에서 확인할 수 있다. 그림을 통하여 냉장고 내부의 전체 소음 중 증발기에서 발생한 소음이 60% 정도를 차지하는 것을 예측할 수 있다. 이 중 냉매가 수평방향으로 유입되는 $x_1(t)$ 에서는 다른 부분에 비해 5,000 Hz 이상에서 크게 영향을 미치고 있는데 반해 배관을 타고 수직으로 흘러가는 $x_2(t)$ 에서는 이와는 반대로 5,000 Hz 이하 및 6,000 Hz 부근에서 큰 기여도를 가지는 것을 볼 수 있다. 이러한 점을 미루어볼 때 동일한 상태의 냉매가 흐르는 배관이

라 할지라도 그 방향에 따라 지배적인 주파수가 서로 다를 수 있다. 한편 $x_3(t)$ 에서는 저주파 영역 및 3,000 Hz 근처에서 기여도가 큰 것으로 보아 열교환기를 거쳐 냉매가 밖으로 빠져나가면서 발생하는 진동이 이전과 달라지는 것을 확인할 수 있다. 이상의 실험을 통해 증발기 내에서 냉매가 흐를 때 각각의 상태에 따라 배관의 부분별로 발생하는 소음 및 진동의 영향이 조금씩 다를 수 있다.

6. 결 론

이 논문에서는 LabVIEW를 기반으로 부분기여도합수를 이용하여 입력원들이 출력에 미치는 기여도를 분석할 수 있는 톨을 개발하였다. 그리고 백색잡음, chirp, 충격신호 등 여러 신호를 입력원으로 하는 시뮬레이션을 통해 제작한 톨의 신뢰성을 검증하였다. 또한 냉장고의 증발기를 대상으로 실험을 수행하여 증발기 입구의 수평류, 수직류 그리고 증발기 출구의 수직류가 냉장고의 소음에 미치는 기여도를 분석하였다. 이로부터 입구의 수평류는 5,000 Hz 이상에서, 수직류는 5,000 Hz 이하의 영역과 6,000 Hz 부근에서, 그리고 출구의 수직류는 3,000 Hz 근처에서 지배적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 그리고 냉장고 내부 전체소음 중 증발기가 기여하는 비중은 약 60% 정도로 판단되었다.

향후 증발기 외에 냉장고 내부소음에 미치는 설계인자들을 보다 상세히 도출하여 개발된 톨로 기여도분석을 하면 냉장고 내부 소음원을 정확히 규명할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Shu, G. and Liang, X., 2007, "Identification of Complex Diesel Engine Noise Sources Based on Coherent Power Spectrum Analysis," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 21, Issue 1, pp. 405~416.

(2) Sim, H. J. and Oh, J. E., 2006, "Source Identification of Non-stationary Sound/Vibration Signals Using Multi-dimensional Spectral Analysis Method," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 30, No. 9, pp. 1154~1159.

(3) Kim, H. S. and Oh, J. E., 2007, "The Analysis of Noise Contribution about Drum Washer under Dehydrating Condition Using Multi-dimensional Spectral Analysis," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol.

17, No. 11, pp. 1056~1063.

(4) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1993, "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis," 2nd Ed., John Wiley& Sons, Inc.

(5) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 2000, "Random Data : Analysis and Measurement Procedures," 3rd Ed., John Wiley&Sons, Inc.

(6) Maia, N. M. M., 1998, "Theoretical & Experimental Modal Analysis, Research Studies Press LTD.