

# 부분 기여도 함수를 이용한 Heat Pump 건조기의 소음원 기여도 분석 Contribution Analysis of Heat Pump Dryer Noise Using Partial Coherence Function

탁 언 수\* · 안 세 진\*\* · 정 의 봉† · 장 진 만\*\*\* · 장 철 민\*\*\*  
Un-Su Tark\*, Se-Jin Ahn\*\*, Weui-Bong Jeong†, Jin-Man Jang\*\*\* and Cheol-Min Jang\*\*\*

(Received September 24, 2020 ; Revised February 17, 2021 ; Accepted March 5, 2021)

**Key Words :** Contribution Analysis(기여도 분석), Heat Pump Dryer(HP 건조기), Sound Quality(음질), Contribution Map(기여도 지도), Partial Coherence Function(부분 기여도 함수)

## ABSTRACT

To effectively reduce noise from heat pump (HP) dryers equipped with various components that are potential noise sources, a contribution analysis of the noise generated by each component is necessary. In this study, the main sources of noise in a HP dryer were assumed to be the compressor, drying fan, drum, lower box fan, and PCB fan. A contribution analysis was performed by evaluating the correlation between the vibration signal for each component and the noise radiated from the HP dryer. The contribution of 31 independent components created by combining the coupled relationships among the five main noise sources was calculated. In addition, a contribution map was created for each component to represent the contribution at each frequency of interest. The use of these contribution maps not only enabled the determination of the noise contribution by each component but also provided an understanding of the coupled relationship among the noise sources at the frequency of interest. These contribution maps are expected to be applicable not only to dryers but also to mechanical systems with multiple noise sources.

## 1. 서 론

최근 삶의 질 향상과 기술의 발달로 인해 소비자들의 가전제품에 대한 요구사항이 점점 까다로워지고 있다. 가전제품의 기능적 수행능력은 모든 브랜드들이

상향평준화를 이룬 상태이다. 그래서 최근에는 제품의 경쟁력을 강화하기 위해서 소음이나 진동을 저감하는 것뿐만 아니라 소음의 품질까지 고려하는 연구가 요구되고 있다. Jang, J. Y. et al.<sup>(1)</sup>은 냉장고 기계실의 고주파 소음 특성 분석을 통하여 음질을 개선하였고, Jeong, J. E. et al.<sup>(2)</sup>은 드럼 세탁기의 음질 평

† Corresponding Author ; Fellow Member, School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Professor  
E-mail : wbjeong@pusan.ac.kr

\* School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Student

\*\* Member, Division of Energy & Electrical Engineering, Uiduk University, Professor

\*\*\* LG Electronics, Researcher

‡ Recommended by Editor Cheol Ung Cheong

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

가를 위하여 음질 4대 지표에 근거하여 음질 인덱스를 구축하였다.

가전제품 중에서 냉장고나 세탁기와 같은 경우에는 오랜 연구를 통하여 제품의 소음 저감 및 음질에 대한 기술이 축적되었다. 반면에 최근에 환경 변화의 영향으로 사용량이 급속하게 증가한 HP 건조기의 경우에는 소음 저감 기술 고도화의 필요성과 음질 개선의 요구가 계속적으로 증가하고 있는 실정이다.

건조기는 건조방법에 따라 가스식 건조기와 전기식 건조기로 나뉜다. 가스식 건조기는 건조기용 가스 배관을 설치해야하는 번거로움이 있는 반면에, 전기식 건조기인 HP 건조기는 냉매를 압축하여 열교환하는 방식으로서 설치가 간편하고 에너지 효율이 좋다. 국내의 아파트 위주의 주거조건과 미세먼지 등의 환경문제로 인하여 최근에 급속하게 사용량이 증가하고 있다.

HP 건조기는 공기의 유동을 유도하는 각종 팬과 열 교환을 위한 냉매를 압축하는 압축기, 건조물을 회전하기 위한 드럼 모터와 벨트, 그리고 응축된 물을 외부로 배출하기 위한 배수펌프를 장착하고 있다. 이들 부품들은 각자가 독립된 소음원이 되기도 하지만 서로의 부품들이 연성되어 소음 발생 메커니즘을 복잡하게 만들기도 한다. HP 건조기의 소음을 효과적으로 저감하기 위해서는 각각의 부품이 전체 소음에 기여하는 정도와 서로의 부품이 연성되어 있는 정도를 분석하는 것이 필요하다.

어떤 제품에서 소음원의 기여도와 전달 경로를 추적하기 위한 대표적인 신호처리 방법에는 주파수응답 함수<sup>(3)</sup>(FRF, frequency response function)와 소음전달함수(NTF, noise transfer function)를 이용하는 TPA<sup>(4)</sup>(transfer path analysis)법과 임의의 소음원이 전체 소음에 기여하는 정도를 상관성 분석을 통하여 구하는 기여도 분석법(coherence analysis) 등이 있다. TPA법의 경우에는 대상물이 정지한 상태에서 측정된 FRF와 NTF들이 실제로 작동하는 상태에서는 차이가 발생함으로 인하여 분석결과의 정확도를 떨어뜨리는 단점이 있다. 그리고 많은 센서들을 동시에 부착하여 시험대상물의 동적 특성이 왜곡되어 TPA 최종결과의 정확도를 떨어뜨리는 원인이 되기도 한다. 이에 비해 소음원의 주파수 특성과 전체 소음의 주파수 특성 사이의 상관성을 분석하는 기여도 분석의 경우는 주요 소음원을 지정하여 입력으로 사용하기 때문에 전체 소음에 대한 입력 소음원의 기여도를 간편하게 얻을

수 있는 장점이 있다. 하지만 입력원 순서에 따라 잔차 스펙트럼이 달라지고, 그에 따라 부분 기여도 함수도 달라지기 때문에 입력원 순서를 정확하게 예측해야 하는 단점이 있다.

부분 기여도 함수를 이용하여 부품의 소음 기여도를 분석하는 방법은 다양한 가전제품에서 소음원의 특성을 예측하기 위하여 연구되었다. Kang, J. C. et al.<sup>(5)</sup>은 PDP TV소음의 전달 경로를 부분 기여도 함수를 이용하여 소음이 어떤 경로를 통하여 가장 많이 방사되고 있는지를 분석하였다. Kim, H. S. et al.<sup>(6)</sup>은 드럼 세탁기의 주요 소음원 근처에 설치한 마이크로폰의 신호가 세탁기 전방 1m에서 출력되는 소음 신호에 기여하는 정도를 부분 기여도 함수를 이용하여 구하였다. Jeong, J. E. et al.<sup>(7)</sup>은 진공청소기 내부와 외부에 설치한 마이크로폰의 신호에 대한 부분 기여도 함수를 적용하여 출력 소음에 대한 전달 경로를 해석하였다.

이 연구에서는 compressor(comp.)와 drying fan(d-fan), 드럼, lower box fan(l-fan), 그리고 PCB fan(p-fan) 다섯 가지 부품을 HP 건조기의 주요 소음원으로 가정하였다. HP 건조기에서 문제의 출력 소음이 발생하는 동일 순간에 다섯 가지 소음원의 부품에서 측정된 진동을 입력원으로 사용하였다. 즉 문제 소음의 음압을 출력으로 하고 각각의 소음원 부품의 진동을 입력으로 하여 이들 사이의 상관성을 분석하는 것이다. 그리고 여러 가지 관심 주파수에서 각각의 소음원이 전체 소음에 기여하는 정도를 하나의 도표로 나타내는 기여도 맵을 도출하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 부분 기여도 함수

다 입력, 단일 출력 시스템(MISO system, multi-input, single-output system)에서 입력의 개수가  $q$ 개이고, 입력들 사이에 상관관계가 없다면 Fig. 1과 같이 모델링할 수 있다. 외부 잡음과 기타 환경소음 등이 출력에 혼입되는 것을 고려한 출력 스펙트럼 식은 식(1)과 같다.

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

여기서,  $q$ 는 입력원의 개수를 나타내며,  $H_{iy}$ 는  $i$ 번째 입력이 출력에 기여하는 전달함수를 나타낸다. 또한

$G_{ij}$ 는 입력  $x_i$ 와  $x_j$  간의 상호과워 스펙트럼을 나타내며  $H^*_{iy}$ 는 전달함수의 공액 복소수를 나타낸다. 그리고  $G_{mm}$ 은 외부 잡음의 과워 스펙트럼을 나타낸다. 하지만 실제 기계시스템에서는 입력간의 상관관계가 존재하기 때문에 입력 원들 사이에 상관 성분을 제거하여 특정 입력 원의 순수한 영향을 알아보기 위해서는 부분 기여도 함수를 이용해야 한다<sup>(8)</sup>. 입력원들 간의 상관성분을 제거하여 다 입력, 단일 출력 시스템을 구성하면 Fig. 2와 같이 모델링 할 수 있다.  $i$ 번째 입력에서  $r$ 번째 입력까지의 상관 성분을 제거한 잔차 스펙트럼(conditioned spectrum)은 식 (2)와 같다.

$$G_{j,i,r}(f) = G_{j,i,(r-1)}(f) - |L_{ij}(f)|^2 G_{rr,(r-1)}(f) \quad (2)$$

Fig. 3은 최적 전달함수와 잔차 스펙트럼의 관계를 표시한 것이다. 여기서,  $L_{rr}(f)$ 는 상관성분이 제거된 입력간 및 입출력간의 최적 전달함수이다. 한편 입력간 상관관계가 없을 때 출력에 대한 각 입력이 기여하는 정도를 나타내는 일반 기여도 함수(ordinary coherence function)는 식 (3)과 같이 정의한다.

$$\gamma^2_{iy}(f) = \frac{|G_{iy}(f)|^2}{G_{ii}(f)G_{yy}(f)} \quad (3)$$

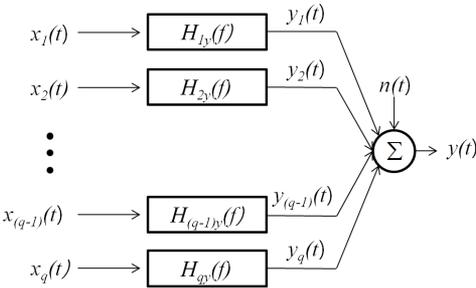


Fig. 1 Multi input single output model of independent system

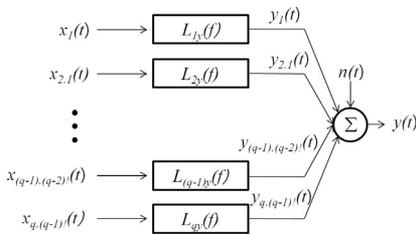


Fig. 2 Multi input single output model of dependent system

식 (3)에서 잔차 과정에 의하여 입-출력 간 상관 성분을 제거한 부분 기여도 함수는 식 (4)와 같이 유도된다.

$$\gamma^2_{iy,(i-1)}(f) = \frac{|G_{iy,(i-1)}(f)|^2}{G_{ii,(i-1)}(f)G_{yy,(i-1)}(f)} \quad (4)$$

입력 간 상관관계가 있고, 다중 입력, 단일 출력을 갖는 시스템에서 부분 기여도 함수를 이용하여 시스템의 기여도 평가가 가능하다. 하지만 입력원 순서에 따라 잔차 스펙트럼이 달라지고, 그에 따라 부분 기여도 함수도 달라지기 때문에 입력원 순서가 기여도 평가에 있어서 매우 중요하다. 한편 식 (3)과 식 (4)를 이용하여 다중 입력이 출력에 기여하는 정도를 나타내는 다중 기여도 함수(multiple coherence function)는 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\gamma^2_{y,q}(f) = 1 - (1 - \gamma^2_{1y})(1 - \gamma^2_{2y,1}) \dots (1 - \gamma^2_{qy,(q-1)}) \quad (5)$$

### 2.2 기여도 영역 세분화

2.1절에서 언급했던 것처럼 기여도 평가시 입력원 순서를 정하는 것이 중요하다. 이에 부분 기여도 함수

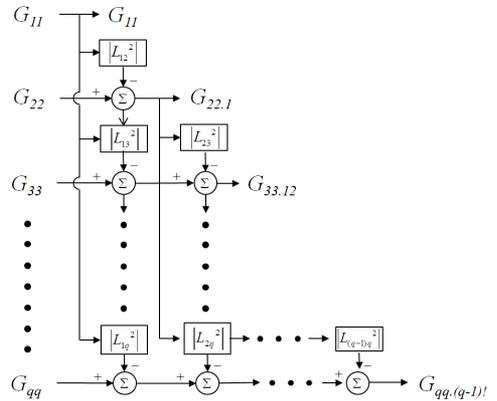


Fig. 3 Diagram of the compute on of the conditioned spectrum

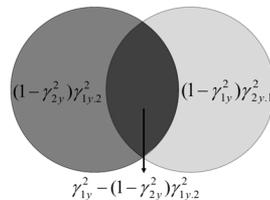


Fig. 4 Contribution area segmentation

를 이용할 때 입력원의 순서를 결정하는 연구<sup>(10)</sup>가 진행되었다. 하지만 시스템이 복잡하고 가진력이 많을 때는 입력원 순서를 결정하는 것은 어려운 문제이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Kim, T. H. et al.<sup>(9)</sup>은 Fig. 4와 같이 기여도 영역을 세분화하여 영역별 기여도 값을 구하는 계산 방법이 연구되었다. 입력원 개수가  $n$ 개일 때 기여도 영역의 개수를  $M$ 이라고 하면 식 (6)과 같이 표현 할 수 있다.

$$M=2^n-1 \tag{6}$$

식 (6)을 HP 건조기 시스템의 5개 주요 소음원 부품의 기여도 분석에 적용하면 Fig. 5와 같이 벤다이어그램으로 도시 할 수 있고, 각각의 영역에 대한 부분 기여도 함수 값을 구할 수 있다.

### 3. 시험 대상

#### 3.1 HP 건조기

이 연구의 기여도 분석 시험의 대상은 용량이 16 kg 인 HP 건조기이다. 건조기 소음은 내부 습도에 민감하기 때문에 부하조건을 일정하게 하기 위하여 약 13 kg 무게의 젖은 수건 100여 장을 드럼 내부에 투입하였다. 그리고 기본 모드로 약 30분 정도 측정 한 후 comp.가 일정한 RPM으로 작동하는 구간을 선정하여 기여도 분석을 실시한다. 이 때 주요 소음원으로 comp., d-fan, l-fan, p-fan, 드럼으로 크게 5가지로 선

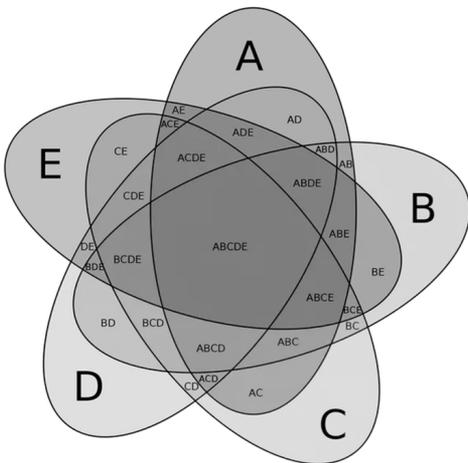
정하였다. 드럼은 드럼 모터와 벨트로 연결되어 있는 구조이고, 각종 팬들은 해당 모터에 의해 직접 부착되어 가동된다. HP 건조기에 냉매를 압축하는 comp.는 드럼 내부의 온도에 따라 작동 주파수가 가변되며 고주파음의 주된 원인이 된다. D-fan은 압축기를 통과한 더운 공기를 드럼 내부의 건조물에 붙여 넣고 습한 공기를 밀어내는 기능을 한다. D-fan만 가동시켜 소음을 확인해본 결과 넓은 주파수 대역에서 유동 소음이 발생함을 확인하였다. 건조물을 회전시키는 드럼은 저주파 변조 소음의 원인이 되며, 구동하는 과정에서 벨트 소음과 모터 소음을 유발한다. 그리고 HP 건조기를 제어하는 각종 전기전자 장치를 냉각하기 위하여 상시적으로 작동하는 각종 팬들은 고주파 순음의 원인이 된다. 또한 열교환기를 통과하여 덥고 습한 수증기가 액화된 물을 외부로 토출하는 배수 펌프 작동 소음도 HP 건조기 소음저감 요인에서 매우 중요하다. 이 연구에서는 간헐적으로 일어나는 배수 펌프 작동 소음은 이 연구의 소음원에서 제외하였다. 소음원들의 작동 주파수를 Table 1에 나타내었다.

#### 3.2 시험 조건 및 방법

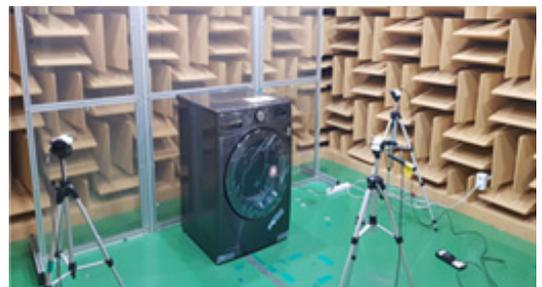
Fig. 6은 반무향실에 설치된 HP 건조기의 소음을 측정하는 실제 조건을 나타낸 것이다. 실제 상황과 유사하게 하기 위하여 두께 10 mm인 아크릴 벽을 건

**Table 1** Operating frequency by noise source

Noise source	Operating frequency [Hz]
Comp.	100
D-fan	65
Drum	52.5
L-fan	47.3
P-fan	80.8



**Fig. 5** Venndiagram for the 5 noise sources of HP dryer system (A: comp., B: d-fan, C: drum, D: l-fan, E: p-fan)



**Fig. 6** Placement of experimental apparatus

조기 후방 10 cm 간격을 두고 설치하였다. 기여도 분석에서 출력이 되는 소음은 건조기의 중앙에서 전방으로 1 m 거리를 두고, 높이 1 m 위치에서 측정하였다. 기여도 분석을 위한 건조기의 작동 모드는 일반 가동 모드로 하였으며, 작동 시작 후 드럼 내부가 일정 온도 이상이 되고 comp.작동이 안정화된 상태에서 기여도 분석을 하였다. 이때 배수 펌프의 작동은 없는 상태다. Fig. 6은 건조기 소음 측정을 위한 실험 장치의 배치를 실 사진으로 나타낸 것이며, Fig. 7은 HP 건조기 소음의 기여도 분석을 위하여 측정되는

입력원의 가속도 신호와 출력원의 소음신호를 측정하고 신호처리 하는 개략도를 나타낸 것이다. 각각의 입력원인 부품에 가속도계를 부착한 위치는 부품이 작동하는 동안에 소음원의 진동 특성이 가장 잘 나타나는 측정되는 곳으로 선정하였다. 기여도 분석에 있어서 입력원이 되는 진동신호와 출력원의 소음신호의 샘플링 주파수는 향후 수행할 음질 분석 등을 고려하여 고주파수까지 포함한 25 600 Hz로 하였다. 건조기의 작동이 정상상태라고 판단되는 구간에서 100초 길이의 신호를 획득하여 분석하였다. 기여도 분석에 사용한 스펙트럼은 주파수 간격이 1 Hz이며, 90 % 오버랩으로 990회 평균화하였다.

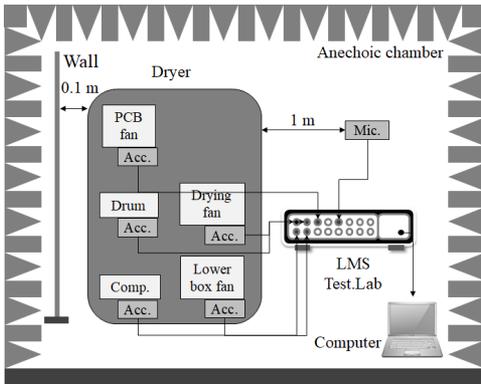
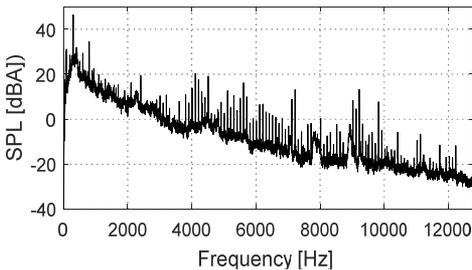
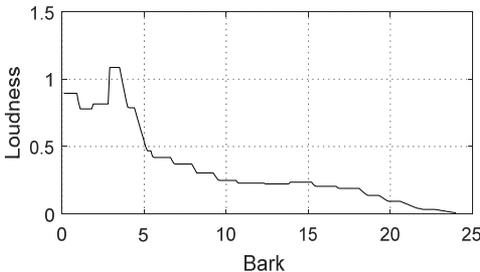


Fig. 7 Schematic diagram of experimental apparatus



(a) Spectrum



(b) Specific loudness

Fig. 8 Noise of HP dryer at normal operation mode

### 4. 시험 결과

#### 4.1 작동 소음 및 진동

이 연구에서는 HP 건조기 각각의 부품에 대한 소음의 기여도와 진동특성을 분석하기 위하여, 일반 작동모드와 부품별 작동모드에 대하여 시험을 실시하였다. 일반 작동모드는 사용자들이 가정에서 흔히 사용하는 건조기 작동모드이다. 이 연구의 기여도 분석은 일반 작동모드를 기준으로 실시되며, 이때 발생하는 각 부품의 진동신호가 입력원이 되고 건조기 전방에서의 소음신호는 출력원이 된다. Fig. 8은 일반 작동모드로 시작한 후 약 10분이 지나서 정상상태로 작동될 때 100초 동안 측정된 소음신호의 특성을 나타낸 것이다. Fig. 8의 (a)는 HP 건조기 소음의 스펙트럼을 나타내고, (b)는 음질의 4대 지표 중 시끄러운 정도를 나타내는 라우드니스(loudness)<sup>(10)</sup>를 바크(bark)에 따라 그린 것이다. 그리고 Table 2에 Hz와 bark와의 관계를 표로 정리하였다. 스펙트럼에서 4 kHz 이하의 소음은 드럼과 d-fan 등에 의한 것으로 보이며, 그 이상의 주파수

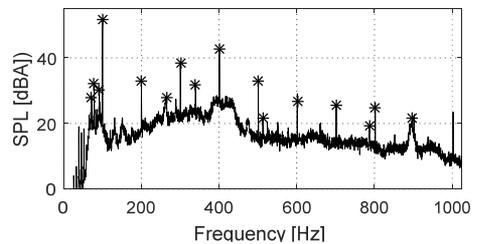


Fig. 9 Spectrum and target frequencies of dryer's noise at below 1 kHz(\*: target frequency for contribution map)

**Table 2** Bark scale critical band [Unit: Hz]

Bark	Center frequency	Cut off frequency	Band width
1	50	100	80
2	150	200	100
3	250	300	100
4	350	400	100
5	450	510	110
6	570	630	120
7	700	770	140
8	840	920	150
9	1000	1080	160
10	1170	1270	190
11	1370	1480	210
12	1600	1720	240
13	1850	2000	280
14	2150	2320	320
15	2500	2700	380
16	2900	3150	450
17	3400	3700	550
18	4000	4400	700
19	4800	5300	900
20	5800	6400	1100
21	7000	7700	1300
22	8400	9500	1800
23	10 500	12 000	2500
24	13 500	15 500	3500

에서는 comp.의 하모닉 성분의 소음이 지배적임을 보여준다. Bark별 라우드니스에서는 10 bark(1000 Hz) 이하의 성분이 지배적인 것으로 나타난다. 이 연구에서는 음질의 라우드니스가 크게 나타나는 1 bark ~ 10 bark(1000 Hz 이하)의 주파수에 대하여 기여도 분석을 수행하였다. Fig. 9는 1 kHz 이하의 HP 건조기 소음 스펙트럼에서 기여도 분석을 수행한 주요 주파수를 별(\*) 표시하였다. 450 Hz 이하에서는 넓은 범위의 주파수 대역에서 20 dBA 이상의 소음이 분포하고 있음을 알 수 있다. 그리고 100 Hz 기본 주파수로 작동하는 comp. 소음의 하모닉 주파수 성분이 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig. 10의 (a)는 기여도 분석의 입력으로 사용된 일반 작동모드에서 각 부품 진동신호의 스펙트럼을 나타내고 (b)는 5개의 부품을 독립적으로 작동하여 측정된 각 부품의 진동 스펙트럼을 나타낸 것이다. Fig. 10의 (a)와 (b)를 비교 관찰함으로써 소음원이 분명한 주파수와 다수의 부품이 연성되어 나타나는 주파수가 있음을 알 수 있다.

펙트럼을 나타낸 것이다. Fig. 10의 (a)와 (b)를 비교 관찰함으로써 소음원이 분명한 주파수와 다수의 부품이 연성되어 나타나는 주파수가 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 기여도 맵

이 연구의 시험 대상인 HP 건조기의 소음 출력원에 대한 5가지 부품의 진동 입력원을 이용하여 구한 기여도 맵을 Fig. 11에 나타내었다. 기여도 맵에는 관심 피크의 주파수별로 31가지 영역에 대한 기여도 값을 흑백 명암의 정도로 보이고 있으며, 다중 기여도 함수 값은 맵의 상단에 함께 나타내었다. 소음 출력원에 대해 2.2절의 기여도 영역 세분화의 과정을 거치면 31개의 독립된 영역이 나오고, 독립된 영역에서 기여도를 계산 할 수 있다. 가로축은 선정된 주파수 범위 내에서 주요한 피크 주파수이고 세로축은 독립된 31개의 기여도 영역을 나타낸다. 부품 하나씩 있는 영역은 소음원 하나만의 영역을 의미하고 두 개 이상 씩 있는 영역은 두 개 이상의 소음원들의 교집합 영역, 즉 다수의 부품이 연성되어 있는 영역을 의미한다. 압축기 작동 주파수인 100.3 Hz와 2차 성분인 200.5 Hz의 기여도 맵을 살펴보면 5개 소음원의 교집합 영역에서만 높은 기여도 값을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 이것은 comp. 진동이 4개의 부품과 연성되어 하나의 소음원으로 작용하는 것을 의미한다. 즉 어떤 하나의 부품을 comp. 진동으로부터 절연하면 comp.를 포함하는 4개의 교집합의 기여도는 여전히 높게 나타나겠지만 전체 소음의 크기는 줄어들 수 있다. 이에 비해 3차 하모닉 성분인 300.7 Hz의 기여도는 5개 소음원 교집합 영역에서 0.56이고 4개 소음원 교집합 영역에서 0.31의 값을 보인다. 이는 comp.의 진동이 4개의 부품과 연성된 정도가 0.56이고, p-fan을 제외한 3개의 부품과 연성된 정도가 0.31임을 의미한다. 만약 p-fan을 진동절연하게 되면 5개 교집합의 기여도는 급격하게 줄어들고 원래부터 p-fan이 빠진 4개의 교집합의 기여도가 크게 증가할 것이다. 이때 전체소음이 변화하는 상황을 분석함으로써 p-fan의 진동절연의 효과를 판단할 수 있을 것이다.

D-fan 부품 단독으로 높은 기여도를 나타내는 474 Hz는 Fig. 9의 일반가동상태에서 d-fan 진동의 피크가 보이지만 부품 단독가동 상태에서는 해당 주파수에 피크가 보이지 않는다. 이러한 현상에 대하여 두 가지 가정을 할 수 있다. 첫 번째는 474 Hz의 소음원은

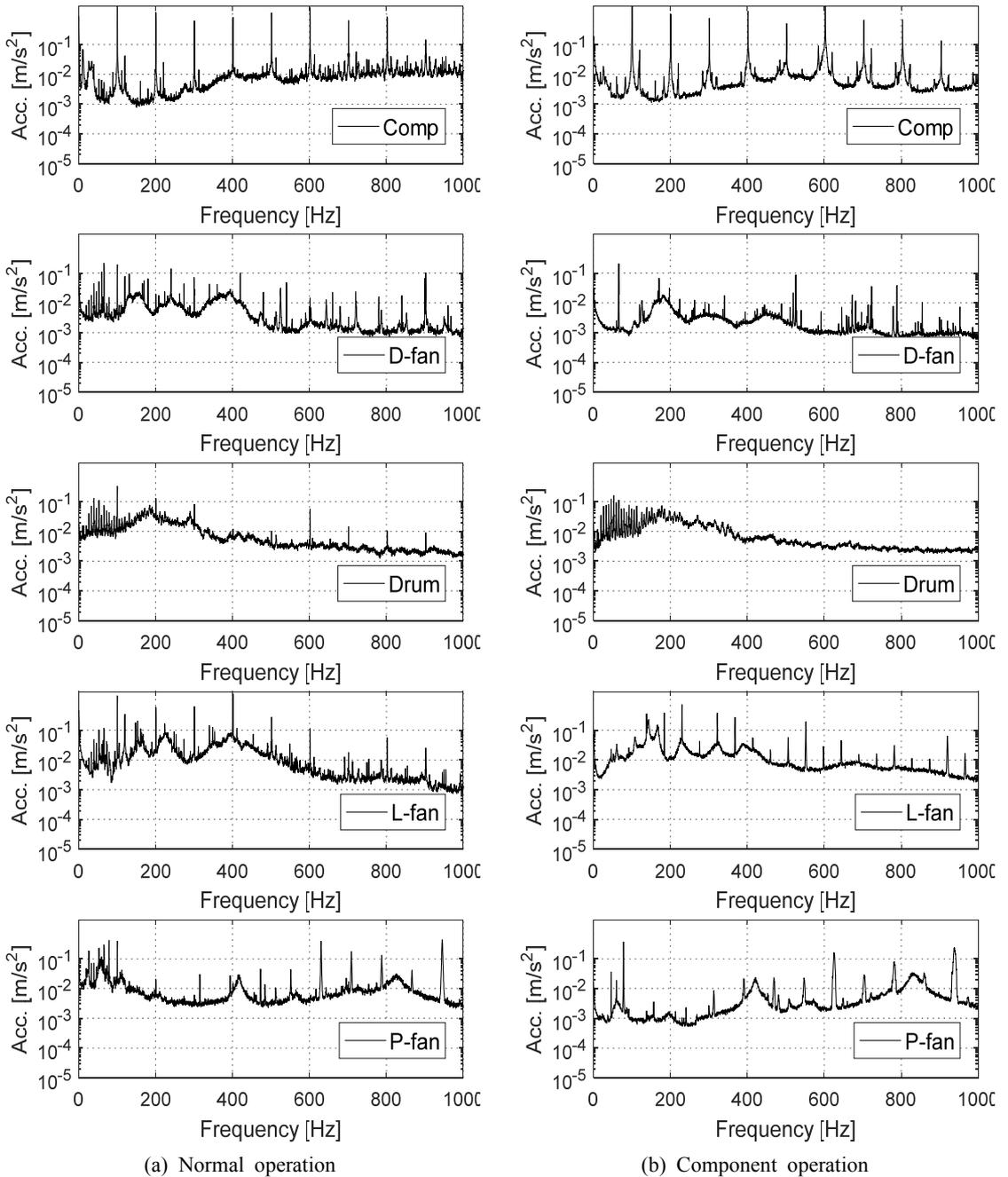


Fig. 10 Spectrum of acceleration on condition of normal and component operation

이 연구에서 선정된 5개 외의 부품에서 발생하여 d-fan을 가진한 경우로 가정할 수 있다. 두 번째는 부품단독 작동조건에서의 작동 부하가 일반작동 조건과 차이가 있음으로 인하여 발생한 경우로 가정할 수 있다. 위의 두 가지 가정 중에 옳은 것을 확인하기 위해

서는 5개 부품 외에 추가적인 측정과 분석이 필요하다. 한편 d-fan의 작동 주파수의 배수 성분인 513 Hz와 786 Hz에서는 d-fan과 관련된 영역에서 높은 기여도 값을 가진다. 513 Hz는 드럼진동과 연성되어 있고, 786 Hz은 다수의 부품들이 연성되어 있는 정도가

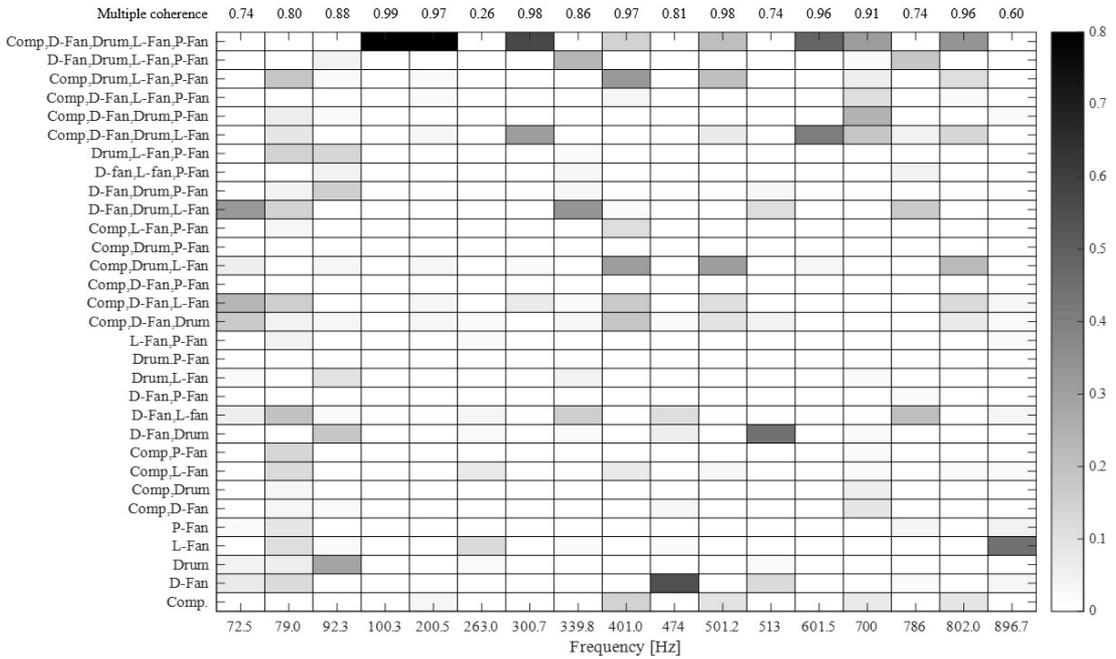


Fig. 11 Contribution map

다양하게 나타나는 것을 알 수 있다.

L-fan 단독으로 0.44의 기여도를 나타내는 896.7 Hz에 대해서는 앞에서 소개한 두 가지 가정을 고려할 수 있다. 이 연구에서는 논문에 포함하지 않았지만 896.7 Hz를 추적하기 위하여 추가적인 시험을 실시하였으며, 결과적으로 드럼을 구동하는 모터의 진동이 l-pan에 영향을 미친 경우로 확인되었다.

한편 100 Hz 이하의 주파수의 소음은 Fig. 10의 (b)의 부품 단독작동시의 진동을 보다시피 드럼의 진동이 주요한 원인으로 추정할 수 있다. 하지만 드럼 진동과 연성되는 정도와 부품이 주파수마다 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 다수의 독립된 영역에서 기여도가 분포되어 있음을 Fig. 11의 기여도 맵으로부터 알 수 있다. 이 경우에는 관련된 부품과 특정 부품의 절연효과를 분석함으로써 소음원 발견과 소음 저감을 위한 중요한 단서를 확보할 수 있을 것이다.

### 5. 결 론

이 연구에서는 HP 건조기의 소음원 기여도 분석을 위해 주요 소음원 5개를 선정하였다. 그리고 5개의 소음원이 건조기 전방 1 m 거리의 음압에 미

치는 기여도 맵을 작성하였다. 또한 이러한 기여도 맵을 효과적으로 해석하기 위해서 HP 건조기의 부품 단독 작동 상태와 일반 작동상태의 진동을 비교 및 분석하였다, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

Comp. 작동 주파수 배수 성분에서 다중 기여도 함수 값이 0.9 이상 값을 나타냈다. 따라서 comp. 작동 주파수 배수성분에서는 comp.의 구조진동이 소음에 지배적인 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

주파수 100.3 Hz, 200.5 Hz에서 기여도 맵을 보면 5개 소음원의 교집합 영역에서 0.99, 0.84의 기여도 값을 나타냈으며, comp. 진동이 4개의 부품과 연성되어 하나의 소음원으로 작용하는 것을 확인하였다. 주파수 300.7 Hz의 기여도 맵으로부터 4개의 부품과 연성된 정도가 0.56이고, p-fan을 제외한 3개의 부품과 연성된 정도가 0.31임을 확인하였다.

주파수 339.8 Hz, 474 Hz, 513 Hz에서는 다중 기여도 함수값은 0.86, 0.81, 0.74이고, d-fan이 포함된 영역에서 높은 기여도 값을 가짐을 확인하였고, d-fan의 구조 진동이 다른 소음원과 연성되어 소음에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

주파수 100 Hz 이하의 영역에서는 드럼이 주된 소

음원임을 확인하였다.

이 연구를 통하여 기여도 맵은 주요 주파수에서 소음원을 규명하고 소음원들끼리의 연성관계를 확인하는데 유용함을 확인하였다. 이러한 기여도 맵은 건조기뿐만 아니라 다수의 소음원이 존재하는 기계시스템에도 적용 가능할 것으로 기대된다.

## Reference

(1) Jang, J. Y., Kim, T. H., Tark, U. S., Jeong, W. B. and Ahn, S. J., 2019, Sound Quality Improvement of Refrigerator using the Analysis of High Frequency Noise Radiated from Compressor in the Machine Room, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 5, pp. 653-662.

(2) Jeong, J. E., Yang, I. H., Fawazi, N., Jeong, C., Lee, J. Y. and Oh, J. E., 2012, Sound Quality Evaluation for Laundry Noise by a Virtual Laundry Noise Considering the Effect of Various Noise Sources in a Drum Washing Machine, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 6, pp. 564-573.

(3) Maia, S., 1998, Theoretical and Experimental Modal Analysis, Research Studies Press, Ch. 1, pp. 22-23.

(4) Lee, J. W., Ahn, S. J., Oh, J. S., Kim, T. H. and Jeong, W. B., Contribution Analysis to Identify the Source of Ship Hull Vibration, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 26, No. 5, pp. 528-535.

(5) Kang, J. C., Yang, I. H., Lee, J. W., Lee, Y. Y. and Oh, J. E., 2009, Noise Reduction of PDP TV Using Multi-dimensional Spectral Analysis Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 1, pp. 81-88.

(6) Kim, H. S., Park, S. G., Kang, K. H., Lee, J. Y. 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.

(7) Jeong, J. E., Lee, J. H., Chung, C. O., Hwang, G. B. and Oh, J. E., 2010, Transfer Path Analysis of Output Noise Using Multi-dimensional Spectral Analysis

Method for Vacuum Cleaner, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 10, pp. 940-945.

(8) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1993, Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis, Ch. 8, pp. 204-225.

(9) Kim, T. H., Choi, J. Y., Oh, J. S. and Kim, S. Y., 2015, Contribution Analysis of Underwater Radiation Noise Source Using Partial Coherence Function, Transactions of the Acoustic Society of Korea, Vol. 35, No. 2, pp. 118-124.

(10) Zwicker, E. and Fastl, H., 2013, Psychoacoustics: Facts and Models, Springer Science & Business Media, Vol. 22.



**Un-Su Tark** received his B.S. degree in Mechanical Engineering from Busan National University in 2018. and he is currently majoring in noise and vibration in Busan National University.



**Se-Jin Ahn** is received B.S., M.S. and Ph.D. degrees from Busan National University in 1994, 1996, and 2003, respectively. Dr. Ahn is currently a professor at the department of energy & electricity in Uiduk University. His research interest is in human vibration.



**Weui-Bong Jeong** is received B.S. and M.S. degrees from Seoul National University in 1978 and from KAIST in 1980, respectively. he then received his Ph.D. degree from Tokyo Institute of Technology in 1990. Dr. Jeong is currently a

professor at the department of mechanical engineering at Busan National University. His research interests are in the area of the measurement and signal processing, finite/boundary element.