DOI : 10.5050/KSNVE.2010.20.10.940

다차원 스펙트럼 해석법을 이용한 진공청소기 출력소음의 전달경로 해석

Transfer Path Analysis of Output Noise Using Multi-dimensional Spectral Analysis Method for Vacuum Cleaner

정 재 은*·이 정 환*·정 창 욱**·황 근 배**·오 재 응†

Jae-Eun Jeong, Jung-Hwan Lee, Chang-Ook Chung, Geun-Bae Hwang and Jae-Eung Oh

(2010년 8월 6일 접수 ; 2010년 10월 11일 심사완료)

Key Words : Vacuum Cleaner(진공청소기), Multi-dimensional Spectral Analysis(다차원 스펙트럼 해석)

ABSTRACT

Noise reduction of vacuum cleaner is important, according as get into standard that estimate quality of product. To reduce noise of vacuum cleaner, we need analysis of correct noise source and contribution grasping about Identified noise sources' output noise. Because noise sources' correlation exists in vacuum cleaner that is small and complicated system, analysis is not easy. In this case, we need to apply Multi-dimensional spectral analysis(MDSA) method that can remove correlation between noise sources and grasp pure contribution degree of noise sources. In this study, we take transfer path analysis between output noise and noise that measured in inside/outside of vacuum cleaner.

기 호 설 명

$S_{ii}(f)$: i신호의 자기스펙트럼
$S_{ij}(f)$: i신호와 j신호의 상호스펙트럼
$S_{ii\cdot r!}(f)$: 잔류스펙트럼
$L_{iy}(f)$: 최적 전달함수
$\gamma^2_{iy\cdot r!}(f)$: 부분기여도함수

1. 서 론

최근 산업사회의 고도화와 복합화로 인해 모든 시스템이 운영상 효율의 극대화 및 신뢰성의 향상을 요구하는 추세이고, 저소음화에 대한 사용자들의 요구가 날로 까다로워짐에 따라 각종 가전제품에서 발생하는 소음 문제에 관하여 많은 관심이 집중되고 있다. 특히 많은 가전제품 중 생활필수품인 진공청소기는 수요가 급증함에 따라 제품의 질적 고급화 현상이 두드러지고 있다. 이에 따라 에너지 효율 문제와 더불어 진공청소기의 저소음화가 제품의 품질을 판단하는 척도가 되고 있다.

종래에는 진공청소기의 소음 저감을 위해서 공진점 회피 및 휀모터의 유동해석 위주의 연구가 주로 행해져 왔다. 하지만 정확한 소음원의 분석이 선행적으로 연구되어야 하며, 파악된 소음원들이 어떤 경로로 전달되어 출력소음에 영향을 미치는지 기여도 분석이 필요하다.

진공청소기 작동 시 휀모터의 고회전으로 인해

† 교신저자; 정회원, 한양대학교 기계공학부
E-mail : jeoh@hanyang.ac.kr
Tel : (02)2294-8294, Fax : (02)2299-3153
* 한양대학교 대학원 기계공학과
** 정회원, LG전자 HA연구소

큰 소음이 유발되며 진공청소기 내부는 진공상태가 되어 유동장이 형성되어 공기 마찰음이 발생한다. 이와 같은 소음원들이 방사되어 출력소음으로 나타나게 된다. 진공청소기와 같이 작고 복잡한 시스템의 경우에는 소음원들의 상관관계가 존재하여 해석이 복잡해진다. 이와 같은 복잡한 해석의 경우에는 종래에 주파수 응답 함수법(frequency response function; FRF)이 많이 사용되었지만 이 방법은 소음원들 간의 상호 작용이 존재하지 않는 독립성을 나타내는 경우에만 사용되는 단점이 있다. 따라서, 소음원들간의 상관성분을 제거하여 출력소음에 대한 소음원의 순수한 기여 정도를 파악할 수 있는 다차원 스펙트럼 해석법(multi-dimensional spectral analysis; MDSA)을 적용할 필요가 있다.

이 연구에서는 다차원 스펙트럼 해석법을 이용하여 출력소음 측정점까지의 소음에 영향을 주는 입력원을 선정하고 다입력 단일 출력계로 모델링을 통해 입력원과 출력원 사이의 기여 관계를 파악한다.

2. 다차원 스펙트럼 해석법

다중입력 문제에 대한 입력과 출력 사이의 기본적인 관계를 파악하기 위한 모델을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1의 입출력을 푸리에 변환하여 그 관계를 나타내면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Y(f)=\sum_{i=1}^{q}H_i(f)X_i(f)+N(f) \tag{1}$$

이러한 계의 출력 스펙트럼을 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_{yy}(f)=\sum_{j=1}^{q}H_j^*(f)S_{yj}(f)+S_{nn}(f) \tag{2}$$

다중입력/단일출력 모형에서 입력들 사이의 상호상관이 존재할 경우 일반적인 기여도 함수에 의해서는 각각의 입력들이 출력에서 차지하는 파워의 양을 파악하는 것은 어렵다. 그러나 상호상관이 존재하더라도 입력들 사이의 인과 관계를 알 수 있으면 그에 따라 새로운 모형을 도입한 뒤 다차원 스펙트럼 해석법을 적용하여 입력원의 규명이 가능하게 된다.

입력간의 상관관계를 제거하여 순수한 입력에 대한 출력의 비를 나타내는 최적 전달 함수 $L_{qy}(f)$를 이용하여 Fig. 1의 다중입력/단일출력 모형에서 입력들 사이의 상관성분을 제거한 상태의 모형으로 바꾸어 표현할 수 있다.

$$Y(f)=\sum_{i=1}^{q}L_{iy}(f)X_{i\cdot(i-1)!}(f)+N(f) \tag{3}$$

Fig. 2는 최적 전달 함수 $L_{qy}(f)$를 사용하여 간단한 형태로 다시 구성한 모형이다.

입력간 및 출력간의 기여관계를 나타내는 일반기여도함수는 식 (4), (5)과 같이 정의한다.

$$\gamma_{ij}^2(f)=\frac{|S_{ij}(f)|^2}{S_{ii}(f)S_{jj}(f)} \tag{4}$$

$$\gamma_{iy}^2(f)=\frac{|S_{iy}(f)|^2}{S_{ii}(f)S_{yy}(f)} \tag{5}$$
$$(i=1,2,\cdots,j=1,2,\cdots,i\neq j)$$

입력간의 상관관계를 제거하는 과정에 의하여 각 입력원의 순수한 기여도를 나타낸 부분기여도함수(partial coherence function ; PCF)라고 하며, 다음과 같이 나타낸다.

$$\gamma_{iy\cdot q!}^2(f)=\frac{|S_{1y\cdot q!}(f)|^2}{S_{ii\cdot q!}(f)S_{yy\cdot q!}(f)} \tag{6}$$
$$(q<i,\ i=1,2,\cdots,q)$$

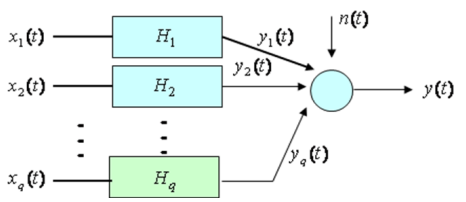

Fig. 1 Multiple input/single output model

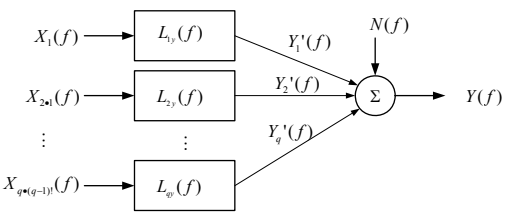

Fig. 2 Conditioned multiple input/single output model

식 (6)을 이용하여 출력의 파워 가운데서 고려된 입력으로부터 전달되는 파워의 비율을 나타내는 다중기여도함수(multiple coherence function ; MCF)를 구하면 다음과 같이 된다.

$$\gamma^2_{y:q!} = 1-(1-\gamma^2_{1y})(1-\gamma^2_{2y\cdot 1})\cdots(1-\gamma^2_{qy\cdot(q-1)!}) \tag{7}$$

실제로 입력원을 검출하려면 입력들의 출력에 대한 순수한 기여량을 계산할 필요가 있으므로 실측으로부터 얻어진 출력 스펙트럼과 기여도 함수와의 잔차 기여스펙트럼을 이용하게 된다. 잔차 기여스펙트럼은 다른 모든 입력들에 의해서 나타나는 선형적 효과를 제거했을 때 특정입력의 순수한 영향에 의해서 생기는 출력에서의 파워 양을 의미한다.

q개의 입력을 가지는 다중입력/단일출력 모형에서 출력에 대한 순수한 기여량을 나타내는 잔차 기여스펙트럼은 다음 식에 의해 계산된다.

$$S_{y:i\cdot(n-1)!}(f) = \gamma^2_{iy\cdot(n-1)!}(f) S_{yy\cdot(n-1)!}(f) \tag{8}$$

식 (8)로부터 각 입력원의 전주파수 영역에 해당하는 기여량을 파악하기 위하여 기여출력 스펙트럼의 적분한 레벨을 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\phi_i = (0 \sim f) = \int_0^f \gamma^2_{iy\cdot(n-1)!}(f) S_{yy\cdot(n-1)!}(f) df \tag{9}$$

식 (9)의 대수합을 구하면 총레벨(overall level)이 된다.

3. 실 험

실험에 사용된 진공청소기는 국내 제품으로 흡입일률이 500 W, 소비전력이 1100 W가 되는 제품이다.

KSC 9101의 규격에 따라 진공청소기의 상면 1 m에서 작동모드를 강으로 했을 경우의 출력소음을 측정하였다. 또한 입력원 부분의 소음 측정은 진공청소기 내부와 외부로 나누어 실시하였다. 실험 개략도는 Fig. 3과 Fig. 4와 같다.

실험장비는 B&K 1/2" Microphone, B&K surface microphone, B&K Pulse FFT Analyzer를 사용하여 진공청소기 내부와 외부 소음을 각각 측정하였다.

외부의 소음 전달경로 해석을 위해서 입력원을

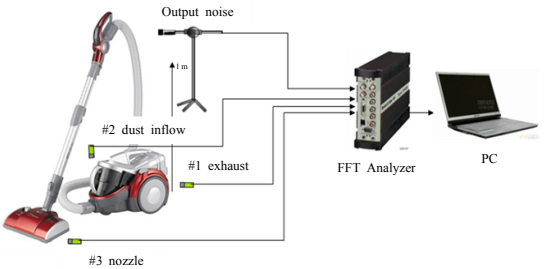

Fig. 3 The experiment set up for transfer path analysis (output noise)

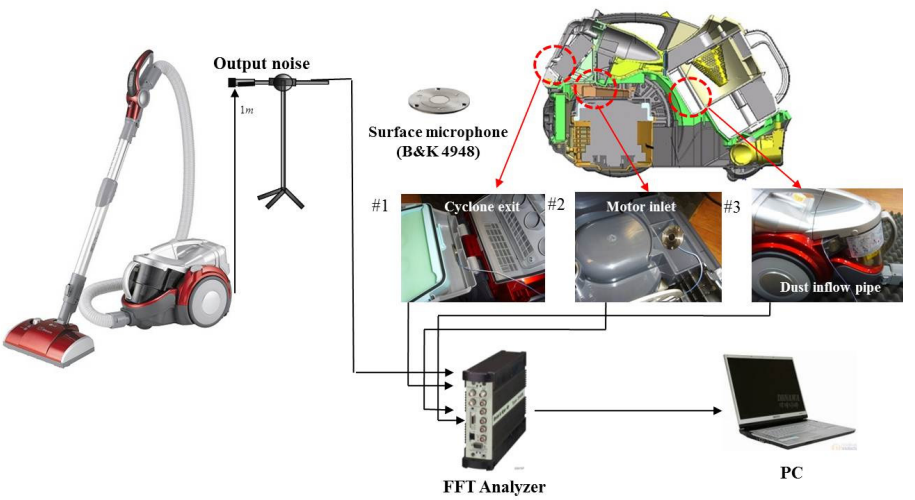

Fig. 4 The experiment set up for transfer path analysis(interior noise)

진공청소기의 배기구, 먼지 유입구, 흡입 노즐로 선정하였으며, 내부의 소음 전달경로 해석을 위해서 입력원을 진공청소기의 사이클론 출구, 모터 입구, 먼지 유입구로 선정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 목적주파수 선정 및 일반기여도 함수

KS 청소기 소음 측정 규정에 의거하여 진공청소기 상방 1 m 소음의 스펙트럼은 Fig. 5와 같으며, 이를 분석하여 외부소음의 입력간 상관관계를 Table 1에, 내부소음의 입력간 상관관계를 Table 2에 나타내었다. 또한 외부소음의 입출력간 상관관계를 Table 3에, 내부소음의 입출력간 상관관계를 Table 4에 나타내었다.

다차원 스펙트럼 해석의 이론적 가정에 있어서 입력들끼리 서로 독립성을 나타내는지 혹은 상관관계가 존재하는지를 판단하는데 있어서 입력간의 상관관계 및 입출력간의 상관관계를 알아볼 필요가 있다.

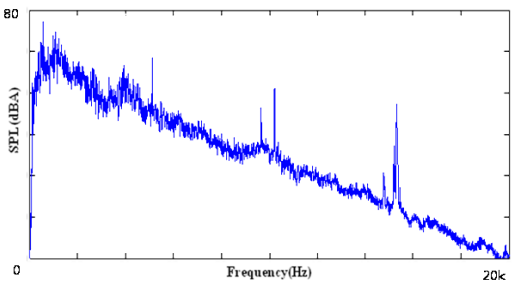

Fig. 5 A-weighted sound pressure level of output(up 1m)

Table 1 The ordinary coherence function among the 3 input signals(outside noise)

Frequency	γ^2_{12}	γ^2_{13}	γ^2_{23}
Operating Freq.	0.789	0.7263	0.7441
1st BPF	0.8534	0.7954	0.7705

Table 2 The ordinary coherence function among the 3 input signals(inside noise)

Frequency	γ^2_{12}	γ^2_{13}	γ^2_{23}
Operating Freq.	0.7987	0.742	0.6652
1st BPF	0.9355	0.8904	0.7631

이는 일반기여도 함수값을 통해 확인할 수 있다.

출력소음의 스펙트럼을 통해 목적주파수를 operating frequency(모터 가진 주파수)와 1st BPF(blade passing frequency, blade : 9개)로 선정하였다.

Table 1과 Table 2에서 보는 바와 같이 외부소음 및 내부소음의 입력들간의 상관관계가 0.5 이상의 높은 상관도를 나타내고 있다. 또한 Table 3과 Table 4에서 보는 바와 같이 외부소음 및 내부소음의 입출력간의 상관관계가 0.5 이상의 높은 상관도를 나타내고 있다.

이처럼 입력간 및 입출력간 상관이 존재하고 있으므로 외부소음 및 내부소음에 대한 다차원 스펙트럼 해석의 적용이 가능하다는 것을 알 수 있다.

4.2 각 소음원과 출력소음의 기여관계

각 소음원(입력원)의 출력소음에 대한 부분기여도 함수값을 Table 5와 Table 6에 나타내었다.

Table 3 The ordinary coherence function among input and output signals(outside noise)

Frequency	γ^2_{1y}	γ^2_{2y}	γ^2_{3y}
Operating Freq.	0.6784	0.9379	0.8151
1st BPF	0.9616	0.3515	0.7127

Table 4 The ordinary coherence function among input and output signals(inside noise)

Frequency	γ^2_{1y}	γ^2_{2y}	γ^2_{3y}
Operating Freq.	0.7796	0.6026	0.6474
1st BPF	0.8975	0.7919	0.8531

Table 5 The partial coherence function among input and output signals(outside noise)

Frequency	$\gamma^2_{1y_23}$	$\gamma^2_{2y_13}$	$\gamma^2_{3y_12}$
Operating Freq.	0.4677	0.6486	0.3006
1st BPF	0.3577	0.63	0.1616

Table 6 The partial coherence function among input and output signals(inside noise)

Frequency	$\gamma^2_{1y_23}$	$\gamma^2_{2y_13}$	$\gamma^2_{3y_12}$
Operating Freq.	0.4297	0.7201	0.4099
1st BPF	0.3268	0.3515	0.7127

Table 7 The multiple coherence function at the target frequencies(outside noise)

Frequency	$\gamma^2_{y:x}$
Operating Freq.	0.8991
1st BPF	0.9373

Table 8 The multiple coherence function at the target frequencies (inside noise)

Frequency	$\gamma^2_{y:x}$
Operating Freq.	0.9088
1st BPF	0.8251

외부소음에 대한 전달경로 해석의 경우는 Table 5에서 보는 바와 같이 부분기여도 함수값을 통해 전체 출력 소음에 미치는 각 소음원별 기여 순위를 파악할 수 있다. Operating frequency와 1st BPF에서 동일하게 먼지유입구>배기구>흡입노즐의 순서로 기여도 순위가 나타났다.

그리고 고려된 입력원들의 출력에 표현되는 정도를 통해 모델링의 적합성에 대해 판단하기 위하여 다중기여도 함수값을 확인해야 한다.

Table 7에서 보는 바와 같이 외부소음에 대한 전달경로 해석의 경우는 0.5이상의 높은 값을 나타내기 때문에 모델링이 적합하다는 것을 알 수 있다.

내부소음에 대한 전달경로 해석의 경우는 Table 6에서 보는 바와 같이 부분기여도 함수값을 통해 operating frequency에서는 모터입구>사이클론 출구>먼지유입구의 순서로 기여도 순위가 나타났으며, 1st BPF에서는 먼지유입구>모터입구>사이클론 출구의 순서로 기여도 순위가 나타났다. Table 8에서 보는 바와 같이 다중기여도 함수값이 0.5 이상의 높은 값을 나타내기 때문에 모델링이 적합하다는 것을 알 수 있다.

4.3 기여 출력 스펙트럼에 의한 기여 순서 결정

입력원의 출력에 대한 순수한 기여량을 나타내는 기여 출력 스펙트럼을 전주파수에 걸쳐 적분한 결과를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타냈다.

또한, 이 결과에 대해 대수합을 계산한 총레벨은 Table 9와 Table 10에 나타내었다.

전주파수 영역에 대해 적분한 결과 각 입력원의

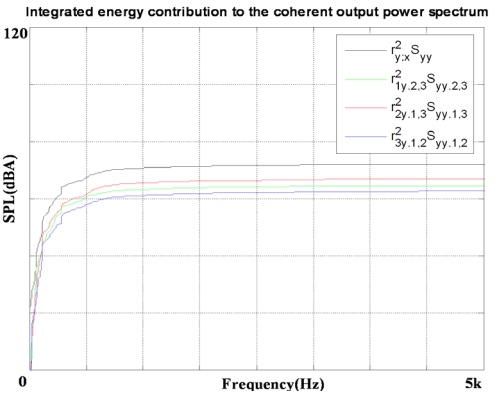

Fig. 6 Coherent output spectrum(outside noise)

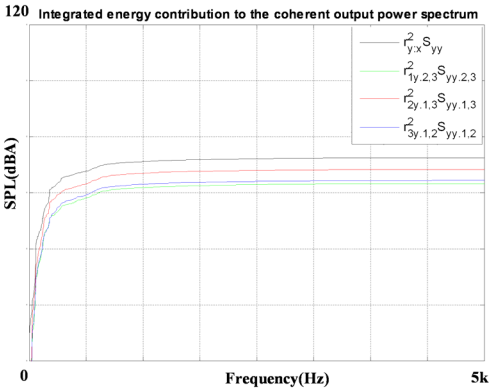

Fig. 7 Coherent output spectrum(inside noise)

Table 9 Overall level contributions estimated by coherence functions(outside noise)

Overall level		Output(dB)
Measured level		74.5
Coherence Function	Total level	72.9
	$\int \gamma^2_{1y\cdot2,3}S_{yy\cdot2,3}df$	65.5
	$\int \gamma^2_{2y\cdot1,3}S_{yy\cdot1,3}df$	67.8
	$\int \gamma^2_{3y\cdot1,2}S_{yy\cdot1,2}df$	63.4

기여순위는 외부소음의 경우는 먼지유입구>배기구>흡입노즐의 순서로 나타났고, 내부소음에 대해서는 모터입구>먼지유입구>사이클론 출구의 순서로 나타났다. 이를 통해 모터입구 및 먼지유입구 부분에 대한 대책수립이 필요함을 알 수 있다.

Table 10 Overall level contributions estimated by coherence functions(inside noise)

Overall level		Output(dB)
Measured level		74.5
Coherence Function	Total level	72.2
	$\int \gamma^2_{1y\cdot 2,3} S_{yy\cdot 2,3} df$	64.3
	$\int \gamma^2_{2y\cdot 1,3} S_{yy\cdot 1,3} df$	69.4
	$\int \gamma^2_{3y\cdot 1,2} S_{yy\cdot 1,2} df$	65.4

그리고, 측정된 값과 다차원 스펙트럼 해석에서 나온 출력스펙트럼의 차이를 통해 고려한 입력원 외에 다른 입력원의 존재 가능성이 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

이 연구에서는 진공청소기를 3입력 1출력 모델로 구성하여 외부소음 및 내부소음의 입력간의 상관관계 및 전달 특성을 규명하였다. 또한, 다차원 스펙트럼 해석법을 이용하여 입력원과 출력의 기여 관계를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 다입력 단일출력 시스템에서 입력들간의 상관관계가 존재하고 있을 때 입력원의 출력에 대한 기여 정도를 알아보기에 다차원 스펙트럼 해석법이 유효함을 검증하였다.

(2) 이 실험에서 사용된 진공청소기의 작동 중 발생되는 출력소음에 대한 전달경로상의 부품들의 기여 순위는 외부소음의 경우는 먼지유입구>배기구>흡입노즐과 같고, 내부소음의 경우는 모터입구>먼지유입구>사이클론 출구의 순서로 되어 있음을 알았다.

(3) 고려한 입력원들이 출력에 충분히 반영이 되었음을 알았다.

후 기

이 연구는 LG 디지털 어플라이언스 청소기 연구소의 연구비 지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분의 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) Bendat, J. S. and Piesol, A. G., 1986, “Random Data,” Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, Wiley-Interscience, New York, pp. 204~227.

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

(3) Oh, J. E., Suh, S. H. and Kang, M. S., 1986, “Application of Multi-dimensional Spectral Analysis for Noise Source Identification on Gasoline Engine,” Trans. of the KSME, Vol. 10, No. 4, pp. 442~449.

(4) 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.

(5) Oh, J. E., 1983 “Application of Multi-dimensional Spectral Analysis for Noise Identification on Mechanical Structures,” Thesis of Doctor Eng. Tokyo Institute of Technology.