

# 다차원 스펙트럼 해석법을 이용한 탈수 시 드럼세탁기의 소음 기여도 분석

## The Analysis of Noise Contribution about Drum Washer under Dehydrating Condition Using Multi-dimensional Spectral Analysis

김 호 산\* · 박 상 길\* · 강 귀 현\*\* · 이 정 윤\*\*\* · 오 재 응†

Ho-San Kim, Sang-Gil Park, Kwi-Hyun Kang, Jung-Yoon Lee  
and Jae-Eung Oh

(2007년 7월 27일 접수 ; 2007년 10월 12일 심사완료)

**Key Words** : Multi-dimensional Spectrum Analysis(다차원 스펙트럼 해석법), Ordinary Coherence Function(일반기여도 함수), Partial Coherence Function(부분 기여도 함수), Multiple Coherence Function(다중 기여도 함수), Residual Spectrum(잔여 스펙트럼), Partial Coherent Output Spectrum(부분기여 출력스펙트럼)

### ABSTRACT

Recently, there has been a growing consumer interest in the amount of noise produced by household electrical appliances. The designer of the product must identify the source of the noise, in order to reduce the noise. In the case of a household electric appliance such as the washing machine, there is consumer's complaint about the noise that is generated during the dehydrating condition. Because of several noise sources combined each other. It is difficult to identify the noise sources that contribute to the noise output. Multi-Dimensional Spectral Analysis (MDSA) is a method that can remove the correlation between different noise sources, and it expresses the key contributing factor as a unique output. This study utilized MDSA to analyze the contribution of each input in the noise output during the dehydrating condition.

### 1. 서 론

최근 삶의 질 향상과 기술의 발달로 인해 소비자들의 가전제품에 대한 관심과 요구가 날로 증가하고 있으며 제품의 구매에 있어서 소음의 문제는 제품의 성능과 함께 하나의 커다란 구매기준이 되고 있다. 사용자들의 저소음화에 대한 요구가 날로 까다로워

짐에 따라 각종 가전제품 설계자들은 소음 문제에 많은 관심을 가지게 되었다.

가전제품 중에서도 드럼세탁기의 경우에는 탈수 시의 소음이 가장 큰 문제가 되고 있으며 탈수 시 소음을 저감시키기 위해서 많은 연구가 진행되고 있다. 특히, 자주 문제가 되는 드럼, 터브, 모터, 캐비닛에서 실제 구동 시 관심이 있는 위치에서 여러 소음원이 어떤 경로로 얼마나 전달되는 것인가를 정량적으로 구하는 방법을 체계화하여 현장에서 보다 효율적인 방법으로 세탁기 소음을 저감할 수 있도록 해야 할 필요가 있다. 드럼세탁기의 구동 시 여러 개의 소음원이 존재하고 이들의 데이터 취득 시 소음원 사이의 상관관계가 존재할 때가 많으므로 시스

† 교신저자 : 정희원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : jeoh@hanyang.ac.kr

Tel : (02)2220-0452, Fax : (02)2299-3153

\* 정희원, 한양대학교 대학원 기계공학과

\*\* 한양대학교 대학원 기계공학과

\*\*\* 정희원, 경기대학교 기계시스템 디자인 공학부

템의 해석이 복잡해진다. 소음원이 여러 개인 경우에 대한 해석으로 종래에는 주파수 응답 함수 법(FRF)이 많이 사용되었다. 하지만 이 방법은 각각의 소음원이 독립적으로 서로의 소음원에 영향을 미치지 않는 경우에만 사용할 수 있는 단점이 있어서 소음원간의 상관성분을 제거하여 각각의 소음원의 순수한 기여 정도를 알 수 있는 다차원 스펙트럼 해석법(multiple dimensional spectral analysis)을 적용하는 것이 좋다. 다차원 스펙트럼 해석법은 부분 기여도 함수(partial coherence function), 다중 기여도 함수(multiple coherence function), 잔여 스펙트럼(residual spectrum), 부분기여 출력스펙트럼(partial coherent output spectrum)을 통해 각각의 소음원이 전체 소음에 미치는 올바른 기여량을 정량적으로 알아 낼 수 있는 방법이다.

이 연구에서는 세탁기의 소음을 측정하는 국내규정(KS 9603)에 따라, 드럼세탁기의 1m 전방에서 탈수 시 소음을 측정하여 소음특성을 파악한 후 먼저 드럼, 터브, 모터를 주 소음원으로 하는 3입력 1출력의 시스템으로 다차원 스펙트럼 해석법을 적용한 뒤 각 입력 원의 소음에 대한 기여량을 정량적으로 분석하였다. 그리고 3입력 1출력으로 다차원 스펙트럼 해석법을 적용한 후의 다중기여도 함수 값을 가지고 입·출력계의 모델링의 타당성을 알아보았고, 세 가지 입력 원 외에 캐비닛 소음을 하나의 입력 원으로 추가해서 4입력 1출력시스템으로 모델링 한 후 입력 원이 세 개일 경우와 네 개일 경우의 해석결과를 서로 비교하여 모델링의 적합성을 알아보았다.

## 2. 다차원 스펙트럼 해석법<sup>(1,2,3)</sup>

Fig. 1은 입력간 상관관계가 없고, 상호 독립적인 경우의 입·출력 모델이다. 하지만 실제의 음향계에 있어서 입력간의 상관관계가 존재하는 경우가 많기 때문에 입력간의 상관관계가 존재한다고 가정하면 출력 스펙트럼은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

여기서  $H_{iy}(f)$ 는  $i$ 번째 입력이 출력에 기여하는 전달함수를 나타내며,  $S_{ij}$ 는 입력  $x_i$ 와  $x_j$ 간의 상호파

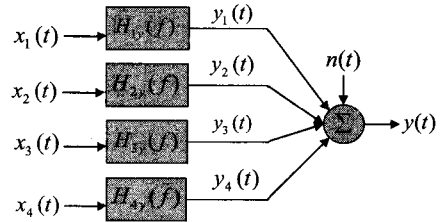


Fig. 1 4-inputs/1-output model for arbitrary system

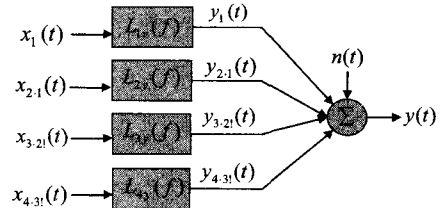


Fig. 2 4-input/1-output model for conditioned inputs

워 스펙트럼을 나타낸다. 또한  $H_{iy}^*(f)$ 는 전달함수  $H_{iy}(f)$ 의 공액복소수를 나타내며  $S_m(f)$ 는 잡음  $n(t)$ 의 파워스펙트럼을 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 주파수 응답함수법이라 한다. 입력들 사이의 상관관계가 무시할만한 경우에는 주파수 응답함수를 이용해서 다 입력 단일출력시스템의 해석에 적절하게 사용할 수 있다. 그러나 실제 기계 시스템의 경우 입력 원들 사이에는 상관성이 존재하기 때문에 입력 원들의 상관성분을 제거하여 각각의 입력 원들의 순수하게 출력에 기여하는 기여 정도를 정량적으로 알 수 있게 해주는 다차원 스펙트럼 해석법을 이용해야만 한다. 각각의 입력에서 상관성분이 제거된 후의 스펙트럼을 잔여 스펙트럼이라고 하며 식(3)과 같다.

$$S_{jj-rj} = S_{jj-(r-1)} - |L_{rj}|^2 S_{rr-(r-1)} \quad (j > r) \quad (3)$$

여기서  $L_{rj}(f)$ 는 입력간 및 출력간의 상관성분을 제거시킨 경우의 최적 전달함수이다. Fig. 2는 최적 전달함수를 통한 다 입력 단일출력 시스템의 모델링이

다. Fig. 3은 최적 전달함수를 이용하여 잔류 스펙트럼을 표현한 것이다. 여기서  $L_{2y}$ 는 입력  $x_2$ 와 출력 사이의 최적 전달함수이다.

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

$$\gamma^2_{ij}(f) = \frac{|S_{ij}(f)|^2}{S_{ii}(f)S_{jj}(f)} \quad (4)$$

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

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

잔차 과정에 의하여 각 입력 원의 순수 기여도를 나타낸 부분기여도함수는 식 (6)과 같다.

$$\gamma^2_{iy^{(i-1)}} = \frac{|S_{iy^{(i-1)}}|^2}{S_{ii^{(i-1)}}S_{yy^{(i-1)}}} \quad (6)$$

이 식을 이용하여 입력간 상관성분을 제거하여 계산된 다중기여도 함수는 식 (7)과 같이 된다.

$$\gamma^2_{y,q!} = 1 - (1 - \gamma^2_{1y})(1 - \gamma^2_{2y,1}) \cdots (1 - \gamma^2_{qy^{(q-1)}}) \quad (7)$$

상관 성분이 제거된 후 입력 원들의 출력에 대한 기여량을 부분기여출력 스펙트럼을 이용해 나타내며 식 (8)과 같다.

$$S_{y,r}(f) = \gamma^2_{y,r}(f)S_{yy}(f) \quad (j > r) \quad (8)$$

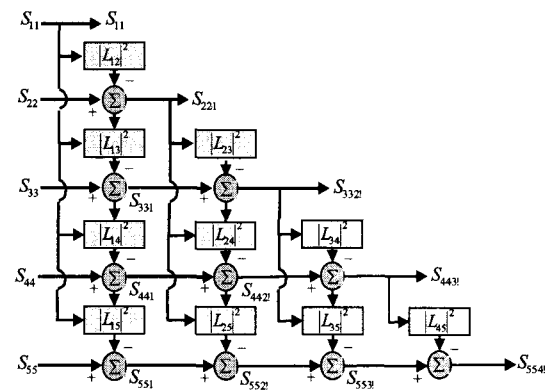


Fig. 3 Diagram showing how ordered conditioned auto-spectra are obtained from original auto-spectral

### 3. 실험

#### 3.1 실험 장치 및 방법

이 실험은 10 kg급 드럼 세탁기를 대상으로 실험을 수행하였고 실험 개략 도는 Fig. 4와 같다. 실험 모드는 세탁기의 600 rpm과 1,200 rpm의 탈수상태이며, 세탁기 전방 1m 앞 지상 1m 위에서의 소음을 출력 소음으로 선정하였다. Fig. 5와 같이 드럼, 터브 그리고 모터에 대해서 다차원 스펙트럼 해석법을 실시하였으며 결과로 나온 다중 기여도함수 값을 근거로 선정된 입력 원이 출력에 반영된 정도를 파악하였다. 그 다음으로 입력 원(캐비닛 소음)을 하나

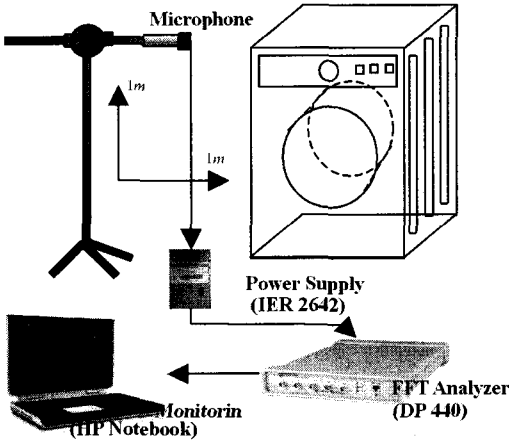


Fig. 4 The experiment setup to measure the noise characteristic for the washing machine

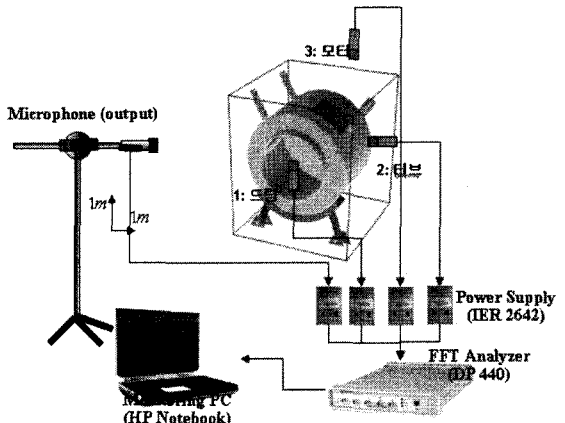


Fig. 5 The experiment setup to get signal of component of washing machine

더 추가시켰을 경우에 대해서 다차원 스펙트럼 해석법을 실시하였으며, 입력 원이 세 개인 경우와 비교해서 모델링의 타당성을 알아보았다. 마이크로폰으로부터 받은 신호는 증폭기를 거쳐, FFT Analyzer (DP440)을 통해 시간 데이터로 저장되었으며, 다차원 스펙트럼 해석을 적용하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

드럼 세탁기의 탈수모드(600 rpm과 1,200 rpm)에서 측정된 출력소음의 자기스펙트럼 값은 Fig. 6과 같으며, 이 값을 근거로 탈수 시 관심주파수를 선정하였고 Table 2에 부분 기여도 함수 값과 함께 나타내었다. 다차원 스펙트럼해석의 이론적 가정에 있어서 가장 중요한 입력간의 상관관계( $\gamma_{ij}^2$ ) 및 입출력간의 상관관계( $\gamma_{iy}^2$ )를 알아볼 필요가 있다. 특히 입력간의 일반기여도 함수 값은 입력들끼리 서로 독립적인가 혹은 상호간에 상관관계가 존재하는가를 판단하는데 매우 중요하다<sup>(4)</sup>.

3입력(#1:드럼, #2:터브, #3:모터) 계의 입력간의 일반 기여도 함수 값은 Table 1에 나타낸 바와 같이 0.5 이상의 큰 값을 나타내고 있다. 이것은 측정방법에 따른 이유와 실제 입력 원들의 상관성분에 의한 결과이다. 따라서 다차원 스펙트럼 해석법에 의한 입력성분들 사이의 상관성분을 제거해주는 것이 필요함을 의미한다.

각 입력 원의 출력에 대한 부분 기여도 함수 값을 각각의 탈수 모드 별 관심주파수에서의 레벨 값의

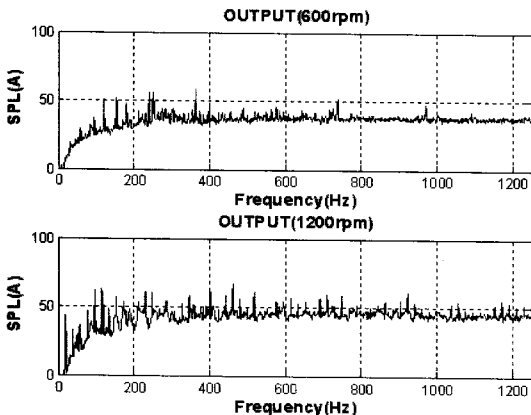
크기순서로 나타내었고, 그 값은 Table 2에 표시하였다. 전체 출력 소음에 미치는 소음원별 부분 기여

**Table 1** Values of total mean ordinary coherence function

Function		$\gamma_{12}^2$	$\gamma_{13}^2$	$\gamma_{23}^2$
Mean value	600	0.55	0.50	0.69
	1,200	0.61	0.54	0.61
Function		$\gamma_{1y}^2$	$\gamma_{2y}^2$	$\gamma_{3y}^2$
Mean value	600	0.19	0.56	0.62
	1,200	0.25	0.67	0.74

**Table 2** Values of partial coherence function at target frequency

Function (600 rpm)		$\gamma_{1y}^2$	$\gamma_{2y1}^2$	$\gamma_{3y12}^2$
1	240.9	0.1201	0.7455	0.6937
2	252.4	0.2013	0.5457	0.5441
3	363.7	0.0737	0.9876	0.9614
4	737.5	0.0644	0.6541	0.5132
5	155.1	0.2065	0.5724	0.6362
6	120.2	0.1542	0.5684	0.9824
Function (1,200 rpm)		$\gamma_{1y}^2$	$\gamma_{2y1}^2$	$\gamma_{3y12}^2$
1	462.2	0.1482	0.6274	0.0993
2	249.9	0.1002	0.0893	0.4960
3	921.8	0.2353	0.2404	0.4270
4	231.2	0.3607	0.8604	0.4199
5	403.1	0.1934	0.8411	0.7260
6	518.8	0.1824	0.3820	0.4442
7	115.6	0.1331	0.9609	0.3527
8	96	0.3675	0.8426	0.6228



**Fig. 6** A-weighted sound pressure level of output under 600 rpm and 1,200 rpm

**Table 3** Values of multiple coherence function at target frequency

		$\gamma_{y \dots x}^2$			
		600 rpm	1,200 rpm		
1	240.9	0.8774	1	462.2	0.6807
2	252.4	0.6375	2	249.9	0.5413
3	363.7	0.9317	3	921.8	0.6185
4	737.5	0.7190	4	231.2	0.9321
5	155.1	0.7428	5	403.1	0.9605
6	120.2	0.9882	6	518.8	0.6572
Mean value		0.5817	7	115.6	0.9756
			8	96	0.9447
			Mean value		0.5972

도 값의 순서는 터브, 모터, 드럼 순서임을 알 수 있다. 하지만 부분 기여도 함수 값이 전체 출력에 대한 입력 성분의 기여 정도를 의미하는 것은 아니므로 결과의 해석에 주의하여야 한다.

그리고 선정된 입력 원들이 탈수상태에서의 소음에 대한 기여도가 어느 정도인지를 정량적으로 알아보고 모델링의 적합성을 판단하기 위해서 다중기여도 함수 값을 Table 3에 표시하였다.

Table 3에서 각각의 탈수모드에서의 관심주파수에서의 값이 600 rpm에서는 252.4 Hz와 1,200 rpm에서는 249.9 Hz, 921.8 Hz를 제외한 관심주파수에서 0.7 이상의 높은 값을 가지고 있는 것으로 보아 관심주파수에서는 선정된 입력 원들이 출력에 반영하는 정도가 높은 것으로 보인다. 하지만 252.4 Hz,

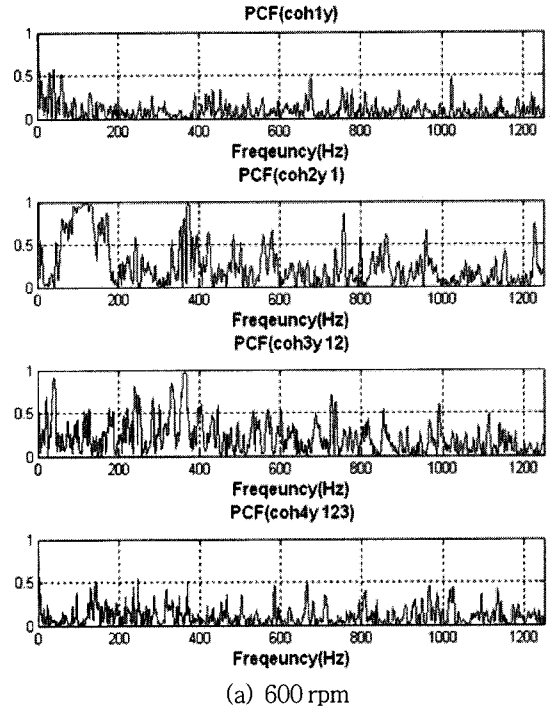
249.9 Hz, 921.8 Hz에서의 다중기여도 함수 값과 overall level의 다중기여도 함수 값은 0.6을 전후한 값을 가지고 있는 것으로 보아 다른 주요 소음원이

**Table 4** Values of total mean ordinary coherence function

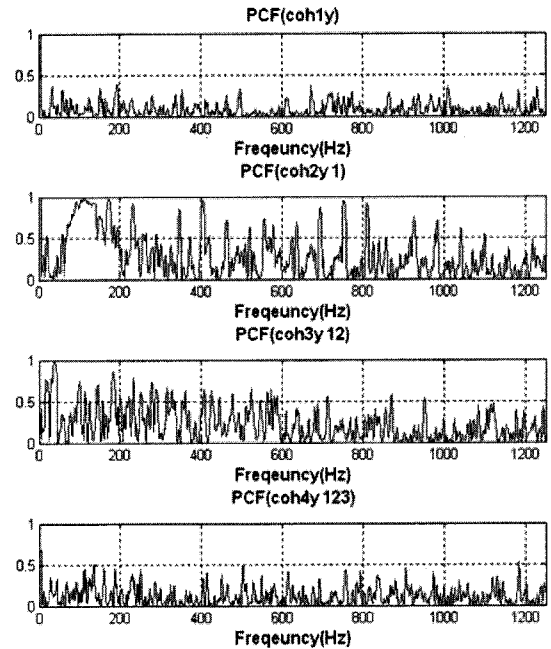
Function		$\gamma_{12}^2$	$\gamma_{13}^2$	$\gamma_{14}^2$	$\gamma_{23}^2$	$\gamma_{24}^2$
Mean value	600	0.55	0.50	0.32	0.69	0.35
	1200	0.61	0.54	0.37	0.61	0.39
Function		$\gamma_{34}^2$	$\gamma_{1y}^2$	$\gamma_{2y}^2$	$\gamma_{3y}^2$	$\gamma_{4y}^2$
Mean value	600	0.45	0.19	0.85	0.62	0.58
	1200	0.42	0.25	0.75	0.74	0.78

**Table 5** Values of partial coherence function at target frequency

Function (600 rpm)		$\gamma_{1y}^2$	$\gamma_{2y,1}^2$	$\gamma_{3y,12}^2$	$\gamma_{4y,123}^2$
1	240.9	0.1201	0.7455	0.6937	0.2704
2	252.4	0.2013	0.5457	0.5441	0.5398
3	363.7	0.0737	0.9876	0.9614	0.5387
4	737.5	0.0644	0.6541	0.5132	0.4956
5	155.1	0.2065	0.5724	0.6362	0.2326
6	120.2	0.1542	0.5684	0.9824	0.2704
Function (1,200 rpm)		$\gamma_{1y}^2$	$\gamma_{2y,1}^2$	$\gamma_{3y,12}^2$	$\gamma_{4y,123}^2$
1	462.2	0.1482	0.6274	0.0993	0.2676
2	249.9	0.1002	0.0893	0.4960	0.4507
3	921.8	0.2353	0.2404	0.4270	0.3949
4	231.2	0.3607	0.8604	0.4199	0.3887
5	403.1	0.1934	0.8411	0.7260	0.3296
6	518.8	0.1824	0.3820	0.4442	0.2695
7	115.6	0.1331	0.9609	0.3527	0.4481
8	96	0.3675	0.8426	0.6228	0.3971



(a) 600 rpm



(b) 1,200 rpm

**Fig. 7** Partial coherence function at 600&1,200 rpm

존재하는 것으로 판단되었다. 그래서 세탁기의 주요 소음원으로 생각되는 캐비닛 소음을 측정하여 4입력 1출력으로 다차원 스펙트럼 해석을 실시하였다. 4입력(#1:드럼, #2:터브, #3:모터, #4:캐비닛)에 대한 각 입력원사이의 과입출력간의 일반 기여도 함수값은 Table 4와 같다. 일반 기여도 함수값들이 대부분 0.5 이상의 값을 가지는 것으로 볼 때 측정방법에 의한 것과 입력성분의 상관성분에 의한 결과이며 다차원 스펙트럼 해석법에 의해서 입력성분의 상관성분을 서로 제거한 후 기여량을 분석할 필요가 있음을 나타낸다.

다차원 스펙트럼 해석을 적용한 4입력(#1:드럼, #2:터브, #3:모터, #4:캐비닛) 1출력 시스템의 부분 기여도 함수 값을 Table 5와 Fig. 7에 나타내었다.

기존의 3입력(#1:드럼, #2:터브, #3:모터)에 캐비

닛 소음을 추가시켰을 경우 고려한 전체 입력원들의 소음에 대한 부분 기여도 함수 값의 크기의 경향을 보면, 터브, 모터의 부분 기여도 함수 값이 큰 것을 볼 수 있다. 특히 저 주파수 대역인 200 Hz 미만에서는 터브의 부분 기여도 값이 크게 나옴을 알 수 있는데 이것은 터브의 구조소음에 의한 소음 특성 때문으로 볼 수 있다.

특히 3입력(#1:드럼, #2:터브, #3:모터) 1출력의 시스템의 경우에 다중 기여도 함수 값이 작았던 252.4 Hz, 249.9 Hz, 921.8 Hz에서는 캐비닛의 부분 기여도 함수 값이 세 개의 입력 원으로 모델링 한 경우에 비해서 큰 값을 가지는 것을 알 수 있다. 4입력(#1:드럼, #2:터브, #3:모터, #4:캐비닛)이 출력에 대한 기여량을 알아보고 모델링의 적합성을 판단하기 위해서 다중 기여도 함수 값을 알아보았으며 Table 6과 Fig. 8에 나타내었다.

3입력(#1:드럼, #2:터브, #3:모터) 1출력의 다중 기여도 함수 값과 비교했을 때 4입력1출력의 다중 기여도 함수 값이 전체 관심주파수에서 0.7이상의 큰 값을 가지며, 다중 기여도 함수 값의 평균값 역시 3입력(#1:드럼, #2:터브, #3:모터) 1출력의 경우에는 0.6미만의 값을 가지고 있었지만 4입력(#1:드럼, #2:터브, #3:모터 #4:캐비닛)을 고려했을 경우 0.7 이상의 높은 값을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과로 인해 세탁기의 탈수 시 나오는 소음의 주된 소음원으로는 터브, 모터, 드럼, 그리고 캐비닛이 주된 소음원으로 작용하고 있음을 확인하였다. 각 입력성분의 출력에 대한 기여량을 정량적으로 알아보기 위해서 전체 주파수 영역에서 적분한 부분 기여출력 스펙트럼의 레벨 값을 Table 7과 Fig. 9에 나타내었다.

실제 실험에 의해서 측정된 소음의 출력스펙트럼의 값과 기여도함수에 의해서 나온 출력스펙트럼의 차이는 실험시의 노이즈에 의한 영향과 세탁기의 구동 시 방사되는 다른 부품의 소음이 입력 원으로 고려되지 않았기 때문이다. 하지만 그 값의 차이로 보아서 고려한 입력 원이 출력에 대부분의 영향을 차지하고 있음을 알 수 있다. 그리고 부분기여 출력스펙트럼의 값으로 보아서 각 소음원의 기여순위는 터브(#2), 모터(#3), 캐비닛(#4), 드럼(#1)의 순으로 되어 있음을 알 수 있다. 각 입력 원 사이의 상관성을 고려하여 계산한 기여출력 스펙트럼을 전 주파수

Table 6 Values of multiple coherence function

$\gamma_{y,x}^2$				
600 rpm			1,200 rpm	
1	240.9	0.9125	1	462.2 0.7960
2	252.4	0.7460	2	249.9 0.7284
3	363.7	0.9897	3	921.8 0.7682
4	737.5	0.6945	4	231.2 0.9512
5	155.1	0.7986	5	403.1 0.9660
6	120.2	0.9903	6	518.8 0.7472
Mean value		0.7475	7	115.6 0.9801
			8	96 0.9656
			Mean value 0.7542	

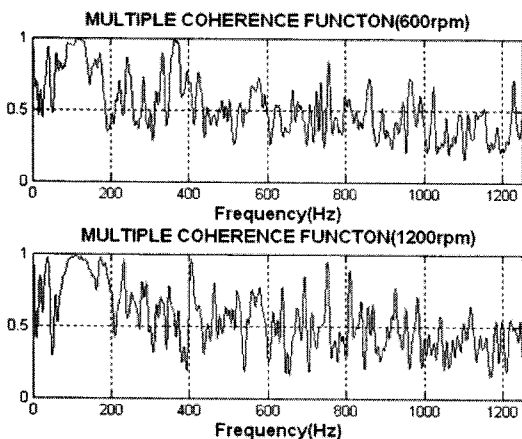
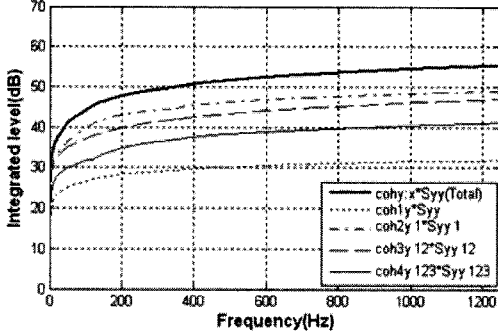


Fig. 8 Multiple coherence function

Comparisons of integrated coherence output power spectrum(600)



Comparisons of integrated coherence output power spectrum(1200)

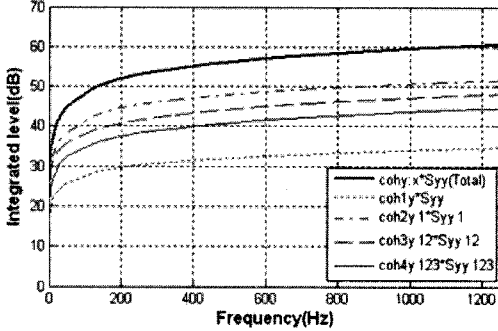


Fig. 9 Comparison of integrated partial coherent output power spectrum

Table 7 Overall level contributions estimated by coherence function

600 rpm		
Overall level		Output(dB)
Measured level		56.8
Coherence function	$\int \gamma_{yx}^2 S_{yy} df$	55.4
	$\int \gamma_{1y}^2 S_{yy} df$	32.1
	$\int \gamma_{2y,1}^2 S_{yy,1} df$	48.0
	$\int \gamma_{3y,12}^2 S_{yy,12} df$	45.5
	$\int \gamma_{4y,123}^2 S_{yy,123} df$	40.7
1,200 rpm		
Overall level		Output(dB)
Measured level		62.7
Coherence function	$\int \gamma_{yx}^2 S_{yy} df$	60.7
	$\int \gamma_{1y}^2 S_{yy} df$	35.5
	$\int \gamma_{2y,1}^2 S_{yy,1} df$	52.1
	$\int \gamma_{3y,12}^2 S_{yy,12} df$	48.2
	$\int \gamma_{4y,123}^2 S_{yy,123} df$	43.3

에 걸쳐 적분함으로써 각 소음원의 기여순위를 보다 쉽게 결정할 수 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

드럼세탁기의 효과적인 소음 방지 대책을 세우는데 있어서 우선적으로 알아야 할 것은 실제 구동 시에 나오는 소음원들의 전달경로를 파악하고 소음원의 기여 정도를 검출하는 것이다. 이 연구에서는 드럼 세탁기의 탈수 시 발생하는 소음원에 대해서 다차원 스펙트럼 해석법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Multi input single output(MISO)시스템에서 입력들간의 상관관계가 존재하고 있을 때 입력 원의 출력에 대한 기여 정도를 알아보기에 다차원 스펙트럼 해석법이 유효함을 검증하였다.

(2) 이 실험에 사용된 드럼 세탁기의 탈수 시 나오는 소음에 대한 전달경로상의 부품들의 기여량을 정량적으로 분석하였다.

(3) 다중 기여도 함수 값을 통해서 탈수 시 드럼 세탁기의 주된 소음원으로 터브, 모터, 캐비닛, 드럼으로 모델링 할 수 있음을 확인 하였다.

## 참고 문헌

- (1) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 1980, "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) Oh, J. E., Cho, J. H., Song, J. E. and Lee, H. S., 1997, "The Identification of Generation Mechanism of Noise and Vibration and Transmission Characteristics for Engine System", Transactions of the KSME, Vol. 21, No. 7, pp. 1127~1140.
- (4) Oh, J.E., Suh, S.H. and Kang, M.S., 1986, "Application of Multi-dimensional Spectral Analysis for Noise Source Identification on Gasoline Engine", Transactions of the KSME, Vol. 10, No. 4, pp. 442~449.
- (5) Oh, J.E., 1983 "Application of Multi-dimensional Spectral Analysis for Noise Identifi-

cation on Mechanical Structures”, Thesis of Doctor Eng. Tokyo Institute of Technology.

(6) Wang, M. E. and Crocker, M. J., 1983, “On the Application of Coherence Techniques for Source Identification in a Multi Noise Source Environment”, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 74, No. 3, pp. 861~872.

(7) Hwang, D. G., et. al, 2004, “Coherent Analysis of Vehivle HVAC Using Multi-dimensional Spectral Analysis”, Proceedings of the KSNVE Annual

Autumn Conference, pp. 999~1004.

(8) Song, C. G., et. al, 1990, “Performance Improvement of a Vehicle Suspension by Sensitivity Analysis”, Transactions of the KSME, Vol. 14, No. 6, pp. 1474~1486.

(9) Kim, Y. K., et. al, 1997, “Transfer Pass Identification of Road Noise; Using Multiple Coherence Function and Relative Acceleration”, Transactions of the KSAE, Vol. 5, No. 4, pp. 84~82.