

다차원 해석법을 이용한 편심 회전체의 전달 기여도 평가

The evaluation of vibration contribution about the eccentric rotor system by multiple dimensional spectral analysis

조문갑*·조용구*·김동원**·이정윤***·오재응****

Joe mun kahp, Joe yong gu, kim dong won, Lee jung youn, and Oh jae eung

Key Words : Multi-dimensional spectral analysis (다차원 해석), Coherence (기여도), Partial coherence function(부분 기여도 함수), Multiple coherence function (다중 기여도 함수), shielding effect(차단 효과)

ABSTRACT

The eccentric rotor system has various problems by vibration of unbalance mass. Specially, it is difficult to analyze vibration problem for the drum washing machine due to correlation of transmission paths. We analyze the mechanical structure by multi-dimensional spectral density to identify the maximum vibration magnitude at the frequency domain. It estimates the coherence function of the signals to pass the transmission paths. In case of the drum washing machine, because the transmission paths are correlated partially it needs to determinate the priority ranking. And the correlated parts are eliminated using conditioned spectral density function. Finally the shielding effect method confirms the reasonability of the modeling.

1. 서론

최근 산업 사회의 고도화와 복잡화로 인해 모든 시스템은 운영상 효율의 극대화 및 신뢰성의 향상을 요구하고 있다. 또한 소비자의 생활 수준의 향상으로 저소음, 저진동에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

드럼 세탁기의 경우 진동 문제는 크게 진동이 발생하는 진동원, 이를 전달해 주는 전달 경로, 소비자에게 가장 민감하게 영향을 미치는 응답원으로 분류 된다. 특히 전달 경로의 경우는 여러가지 부품으로 연결되어 있고 서로 상관관계가 존재하며, 진동 절연을 가장 크게 실현할 수 있는 이점이 있기 때문에 많은 연구가 수행되고 있다.

드럼 세탁기는 드럼의 세탁물의 고속 회전에 의해 발생된 진동이 스프링과 댐퍼 그리고 가스켓을 통과하여 캐비닛으로 전달되는 구조로 이루어져 있다. 그러나 이러한 시스템임에도 불구하고 드럼 세탁기는 드럼의 경우와 캐비닛의 경우가 다른 가진 주파수에서 공진 현상이 발생하는 특이한 현상을 내포하고 있다..

두 부위가 다른 주파수에서 공진 현상이 일어나는 원인은 두 가지 경우로 예측 할 수 있는데, 첫 번째는 캐비닛의 고유 진동수가 가진 주파수 내에 존재하고 있어 공진 현상이 발생하는 경우이고, 두 번째는 서로 상관관계가 있는 전달계에서 내부 공진이 발생하는 경우이다.

캐비닛의 경우에는 가진 주파수 내에 고유 주파수가 존재하고 있지 않기 때문에 그 원인은 내부 공진이 발생하는 것으로 생각된다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 세탁기 시스템을 선형으로 가정하고 탈수 시 진동에 대한 전달 경로의 특성을 규명할 수 있는 다 입력/단일 출력으로 구성된 세탁기 시스템에 대하여 다차원 스펙트럼을 적용한다. 불균형 질량의 회전에 의해 발생된 진동의 전달경로, 즉 스프링을 통과한 진동 신호, 댐퍼를 통과한 진동 신호, 터브(tub)의 앞면을 감싸고 있는 가스켓을 통과한 진동 신호를 입력 신호로 가정하고, 최대 변위량을 가지며 소비자에게 가장 민감하게 다가오는 캐비닛 측면의 진동 신호를 출력으로 하여 해석을 수행하였다.

실험을 통해 얻은 입출력 신호를 이용하여 일관 기여도 함수 및 부분 기여도 함수를 구하여 입력원으로 설정한 부품들의 기여도를 알아 보고, 다중 기여도 함수를 이용하여 입출력계 모델링의 타당성을 검증하였다. 이러한 절차는 탈수 시 캐비닛의 공진 현상이 발생한 주파수에 대해 해석을 실시 하였다. 또한 전달 경로 중 하나를 절연 함으로써 출력이 어느 정도 저감되는지를 확인해 볼 수 있는 차단 효과를 적용하여 모델링을 검증하였다

* 한양대학교 대학원 자동차공학과
E-mail : te800@hanmir.com
Tel : (02)2290-0452, Fax : (02)2299-3153

** LG 전자 디지털 어플라이언스 연구소

*** 경기대학교 기계공학과

**** 한양대학교 기계공학부

2. 이론

2.1 다차원 해석법

Fig.1 은 입력간의 상관관계가 없고, 상호 독립적인 경우의 입출력 모델이다. 실제의 진동계 혹은 음향계에 있어서는 Fig.2 와 같이 입력간의 상관관계가 존재하는 경우가 많기 때문에 입력간의 상관관계를 고려하여 이론적 고찰을 수행하였다. 입력간 상관관계가 존재한다고 가정하면 출력 스펙트럼은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$S_{yy} = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 H_{iy}^*(f) H_{iy}(f) S_{ij}(f) + S_{nn}(f) \quad (1)$$

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

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^3 |H_{iy}(f)|^2 S_{ii} + S_{nn}(f) \quad (2)$$

본 내용에서는 식(1), (2)를 FRF 법이라고 지칭한다.

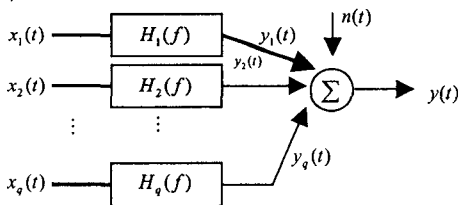


Fig. 1 Inputs are independent system

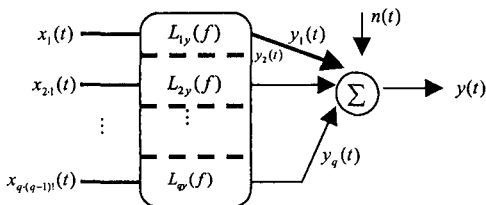


Fig. 2 Model of multi-input/single-output system

다차원 스펙트럼 해석을 이용하여 입력간 혹은 입출력간의 관계로부터 상관성분을 제거하기 위해서는 잔차 스펙트럼(residual spectrum)법을 이용하게 된다

예를 들어서, 1 차적인 잔차 스펙트럼은 식 (3)과 같이 얻어진다.

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

여기서 $L_{ii}(f)$ 는 입력간 및 출력간의 상관성분을 제거 시킨 경우의 입력간 및 출력간의 최적 전달함수이다. 마찬가지로 2 차적인 잔차 스펙트럼은 예를 들어 $x_3(t)$ 에 대하여 구하면 입력 $x_1(t)$ 와 $x_2(t)$ 의 선형적인 영향을 제거 함으로써 다음식과 같이 된다.

$$\begin{aligned} S_{33,2}(f) &= S_{33}(f) - |L_{23}(f)|^2 S_{22}(f) \\ S_{yy,1,2}(f) &= S_{yy}(f) - |L_{2y}(f)|^2 S_{22}(f) \\ S_{3y,1,2}(f) &= S_{i3y,1}(f) - L_{2y}(f) \cdot S_{32,1}(f) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 L_{2y} 는 입력 x_2 와 출력 사이의 최적 전달 함수이다. 한편 입력간 및 출력간의 기여관계를 나타내는 일반 기여도 함수(Ordinary Coherence Function ; OCF)는 식 (5)와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \gamma^2_{ij}(f) &= \frac{|S_{ij}(f)|^2}{S_{ii}(f)S_{jj}(f)} \\ \gamma^2_{iy}(f) &= \frac{|S_{iy}(f)|^2}{S_{ii}(f)S_{yy}(f)} \end{aligned} \quad (5)$$

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

이러한 관계식을 이용하여 다 입력계에 적용하면 잔차과정에 의하여 각 입력원의 순수 기여도를 나타낸 부분 기여도 함수(Partial Coherence Function ; PCF)를 $x_3(t)$ 에 대하여 구하면 식 (6)이 된다.

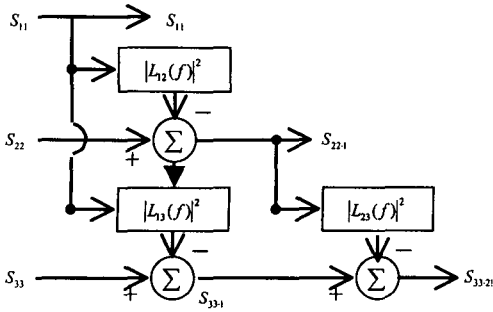


Fig. 3 2 Diagram showing how ordered conditioned auto-spectra are obtained from original auto-spectra

$$\gamma^2_{3y+1,2}(f) = \frac{|S_{3y+1,2}(f)|^2}{S_{33+1,2}(f)S_{yy+1,2}(f)} \quad (6)$$

이 식을 이용하여 입력간 및 출력간의 상관성분을 제거하여 계산된 다중 기여도 함수(Multiple Coherence Function ;MCF)는 식 (7)과 같이 된다.

$$\gamma^2_{yx}(f) = 1 - \{1 - \gamma^2_{1y}(f)\} \{1 - \gamma^2_{2y+1}(f)\} \{1 - \gamma^2_{3y+1,2}(f)\}$$

$$\gamma^2_{2y+1}(f) = \frac{|S_{2y+1}(f)|^2}{S_{22+1}(f)S_{yy+1}(f)} \quad (7)$$

실제로 진동원을 검출하려면 입력원의 출력에 대한 순수한 기여량을 계산할 필요가 있으므로 실측에 의한 출력 스펙트럼과 기여도 함수와의 곱인 기여출력 스펙트럼(coherent output spectrum)을 이용하게 된다. 예를 들어 3 입력 $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ 가 출력에 기여하는 순수한 기여량을 나타내는 기여출력 스펙트럼은 각각 다음식과 같이 된다.

$$\gamma^2_{1y+2,3}(f) \cdot S_{yy+2,3}(f)$$

$$\gamma^2_{2y+1,3}(f) \cdot S_{yy+1,3}(f)$$

$$\gamma^2_{3y+1,2}(f) \cdot S_{yy+1,2}(f) \quad (8)$$

2.2 전달 경로 차단 효과 (Shielding effect)

차단 효과란 어떤 입력이 전달되는 경로 중 하나를 차단해 봄으로써 출력이 어느 정도 저감되는가를 파악하기 위해 사용하는 방법이다. 이 방법은 입력간의 상관관계를 고려하지 않은 계에 대해 주파수 응답 함수법을 이용한 방법으로 일반적 으로 영향을 가장 크게 미치는 전달 경로를 차단했을 때의 출력에 대한 저감 결과가 가장 크게 나

타난다. 이러한 점을 통하여 출력에 전달하는 전달 경로를 파악할 수 있다. i 번 입력이 전달되는 전달함수를 H_i 라고 하면 출력에 대한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i^{th} \text{ Shielding effect} = S_{yy} - \sum H_i H_j S_{ij} \quad (9)$$

3. 실험

3.1 실험 장치 및 방법

본 실험은 7.5k급 드럼 세탁기를 대상으로 실험을 수행하였다. 세탁기는 평평한 바닥에 놓고 수평을 맞춘 후 고정하지 않았으며 세탁기의 강제 모드를 이용하여 600rpm까지 등 각가속도로 가진하였다. 그리고 600rpm에서 등 각가속도로 가진 하였다가 1560rpm까지 등 각가속도 가진을 수행하였다. 세탁물을 대신하기 위해서 350g의 고무판을 이용하여 편심 운동을 시켰으며, 실제 빨래를 할 때 사용되는 물의 질량은 고려하지 않았다.

다차원 스펙트럼 법을 이용하기 위해 전달 계에 해당하는 주요 부품에 3 축 가속도 픽업(Dytran type 3013A)을 부착하여 신호를 측정하였으며 세탁기 응답 진동에 해당하는 캐비닛 출력으로 측정하였다. 이 때는 출력 응답을 캐비닛 측면을 대상으로 삼았는데 이유는 이 부위가 진동의 전달 경로에 직접적으로 연결되어 있고, 또한 캐비닛 형상 자체가 전면 후면 부에 비해 복잡하지 않으며 소비자에게 가장 민감하게 느끼는 부위이기 때문이다.

4. 시뮬레이션 및 고찰

다차원 스펙트럼에서의 이론적인 가정에서 입력간의 상관과 출력과의 상관관계를 검토해야 할 필요가 있다. 특히 입력간의 일반 기여도 함수는 임의의 입력이 독립적인가 혹은 상호간의 상관관계가 존재하는 가를 판단하는 경우에 사용한다. 다입력계의 입력간 상관관계는 관심 주파수에서 Table 1 과 같이 일반 기여도 함수가 0.5 이상의 값을 나타내는 경우 입력간에

상관관계가 존재하고 있는 것으로 판단한다. 그 결과 다차원 스펙트럼 해석이 세탁기의 전달 경로 분석에 유용하다는 것을 알 수 있다.

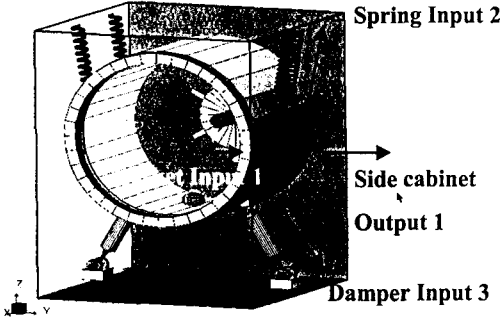


Fig. 4 The modeling of the drum washing machine

Fig.6 은 입력과 출력의 자기 스펙트럼을 도시한 것이다. 그림을 통해 19.84Hz 에서 전달 경로에서 공진 현상이 일어나고 있음을 확인할 수 있다.

Fig.7 은 각 전달계의 일반 기여도 함수를 도시한 그림이다. 이 결과는 입력들 사이의 상관관계를 포함하고 있는 성분이므로 순수한 기여 성분보다 큰 값을 가지고 있으나 전반적인 출력에 대한 입력들의 기여도를 구할 수 있고, 각 입력 성분들의 우선 순위를 구할 수 있는 장점을 가지고 있다.

입력간의 상관관계를 잔차 스펙트럼을 이용하여 제거하게 되면 Fig. 8 과 같이 부분 기여도 함수를 얻을 수 있다. 부분 기여도 함수는 입력간의 상관 관계를 제거하여 출력에 순수하게 기여하는 량을 도시한 것이다. 이것을 통해 세탁기 캐비닛에서의 공진 현상이 발생하게 되는 특정 주파수에서 진동 기여 우선 순위를 구할 수 있게 된다. 본 연구 결과를 통해 전달계 중 스프링과 가스켓의 파라미터 값이 공진 현상을 일으킨다는 것을 알 수 있다.

다차원 스펙트럼 해석을 수행하는 데 있어서 이론적 가정 및 결과를 검증하기 위해서는 출력과 주어진 입력과의 관계에서 다중 기여도 함수는 0.5 이상의 높은 값이 요구된다. 한편 다중 기여도

함수가 만약 0.5 이하의 낮은 값을 갖는 경우 다 입력계로 해석할 때에 계의 비선형적인 요소에 의한 영향이 크거나 혹은 실제로 존재하는 다른 입력원이 무시된 것으로 생각할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 Fig. 9 는 각 전달계의 총합을 다중 기여도 함수로 도시한 것이다. 출력 값의 피크치가 대부분의 주파수에서 높은 값을 가지고 있고, 관심 주파수(19.84Hz)에서의 값도 거의 1 과 같은 높은 값을 가지고 있는 것을 보아, 세탁기 진동의 전달 경로 모델링이 합당하는 것을 알 수 있다.

Table 2 는 각 전달계의 일부를 이론적으로 절연해 봄으로써 각 전달계의 기여도를 분석할 수 있는 차단 효과를 도표화 한 것이다. 이 결과 다차원 스펙트럼법에 의해서 얻은 결과와 마찬가지로 입력 1 과 입력 2 가 입력 3 에 비해 상대적으로 높은 진동 기여도를 차지하고 있음을 보여 준다.

Table 1 Coherence coefficient among the transmission paths

Part - part	Coherence coefficient
Damper - gasket	0.62
Spring - damper	0.73
Gasket - spring	0.51

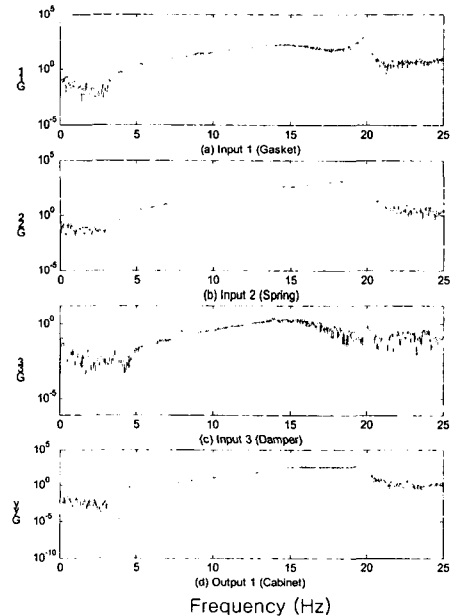


Fig. 5 Auto spectral density for input and output signal

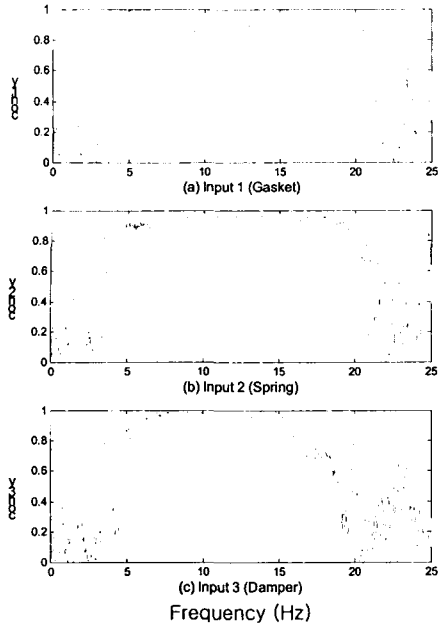


Fig. 6 Ordinary coherence function

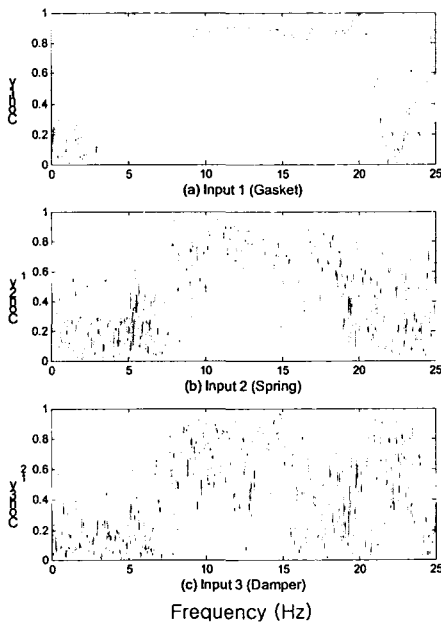


Fig. 7 Partial coherence function

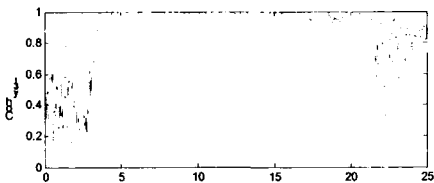


Fig. 8 Multiple coherence function

Table 2 Shielding effect for the transmission paths

Frequency response function	Conditioned measured output (mV^2 / Hz)	
	$\int A df$	
	$\int B(H_1 = 0) df$	3969
	$\int C(H_2 = 0) df$	4365
	$\int D(H_3 = 0) df$	4464
$A = H_1 H_1^* G_{11} + H_1 H_2^* G_{12} + H_1 H_3^* G_{13} + H_2 H_1^* G_{21}$ $+ H_2 H_2^* G_{22} + H_2 H_3^* G_{23} + H_3 H_1^* G_{31}$ $+ H_3 H_2^* G_{32} + H_3 H_3^* G_{33}$ (B,C,D 도 같은 방법으로 해석)		

5. 결론

세탁기 탈수 시 전달계 부품들의 기여도와 영향 관계를 파악하며 효과적인 진동 절달 경로를 규명할 수 있도록 다차원 스펙트럼 법을 개발하였다. 효과적인 기여도를 평가하기 위해 3 입력 1 출력 모델을 적용하였고 다중 기여도 함수 및 차단 효과법을 이용하여 모델을 검증하였다. 그 결과 세탁기의 드럼과 캐비닛에서 다른 가진 주파수에서 공진 현상일 발생하는 이유는 전달계의 가스켓과 스프링의 공진 현상에 의한 것으로 판단 되었다.

6. 참고 문헌

- (1) J.S. Bendat, a. G. Piersol, "Engineering Application of Correlation and Spectral Analysis", John Wiley & Sons, Inc. 2nd Edition, 1993
- (2) Bendat, J. S., and Piesol, A., G., "Random Data": Analysis and Measurement Procedures, 2nd Edition, Wiley-Interscience, New York, 1986
- (3) 오재웅, "기계구조물의 소음원규명을 위한 다차원스펙트럼 해석의 응용", 동경공대 박사학위 논문, 1983
- (4) 박준철, 오재웅, "다차원스펙트럼 해석법에 의한 프린터의 소음원 검출연구", 한양대학교 석사학위 논문, 1985
- (5) 서상현, 오재웅, "가솔린 엔진의 소음원 검출에 대한 다차원스펙트럼 해석의 응용", 한양대학교 석사학위 논문, 1986
- (6) 백문열, 오재웅, "다차원스펙트럼 해석법을

이용한 엔진-차실의 진동 및 음향전달계에 관한 연구" 한양대학교 석사학위 논문 1993

(7) 김태욱, "벡터합성법과 감도해석을 이용한 차실 소음 저감에 관한 연구", 한양대학교 석사학위논문, 1995

(8) 藤田節男, "車室こもり音現象の解析",
自動車技術會論文集, No. 4, pp.32-37, 1972

(9) 조준호, "구조물의 진동-음향 전달해석을 위한 벡터합성법의 응용", 한양대학교 박사학위논문, 1996

(10) 강현석, "다차원 스펙트럼 해석법을 이용한 자동차 현가 장치의 진동 전달 경로 규명에 관한 연구", 한양대학교 석사학위논문, 2001