한국소음진동공학회 '94춘계학술대회논문집 pp. 179-184

소음원간의 우선순위 결정을 이용한 차량의 실내 소음원 규명

김 광 준* 0배 병 국**

(Source Identification of Interior Noise of Passenger Car Using the Priority Determination among the Sources)

(Kwang-Joon Kim , Byeng-Kuk Bae)

1. 서론

소음/진동의 감소 및 제어를 위해서는 먼저 소음/진동원 및 전달경로에 대한 정보를 파악할 필요가 있으며 이로부터 소음/진동에 대한 대책을 수립해야 한다. 디젤엔진, 펀치 프레스, 단조기 등 기계구조물에서 소음/진동원의 특성과 출력에 기여하는 정도를 규명하기 위해서 다입력/단일출력(Multiple Input /Single Output) 모형이 주로 적용되어 왔다[1-3]. 구조물의 여러 지점에서 측정된 진동/소음 신호를 입력으로, 관측자 혹은 운전자의 위치에서 측정한 신호를 출력으로 간주하여 모형을 세우게 되며, 여기서 출력에 기여하는 각 입력들의 영향을 정량적으로 파악하게 된다.

다입력/단일출력 모형을 이용한 소음/진동원 규명법은 모형에 사용된 입력들 사이의 상관(correlation)정도에 따라 주파수 응답함수(Frequency Response Function)를 이용하는 방법과 부분 기여도함수(Partial Coherence Function)를 이용하는 방법으로 각각 나뉘어 적용된다[4,5]. 주파수 응답함수를 이용한 방법은 입력들간의 상관관계가 없거나 적은 경우에 적용하며, 입력들간의 상관관계가 무시될 수 없을만큼 크게 존재할 경우에는 입력 신호들 간의 선형성분을 고려하여 이들의 우선순위(priority)에 따라 부분 기여도함수 기법으로 각 입력들의 출력에 대한 기여정도를 파악한다.

운전중인 기계구조물에 대해 다입력/단일출력 모형을 적용하여 소음/진동원을 규명하고자 할 경우, 입력으로 사용되는 신호들은 서로 상관관계를 갖는 경우가 많다. 본 연구에서는 공회전 중인 차량의 실내 소음을 규명하기 위한 실험을 수행 하였는데, 이때 소음/진동원으로 측정된 입력 신호들(엔진, 배전기, 발전기, 배기구등) 사이에 상관관계가 존재하고 있으므로, 부분 기여도함수 기법을 적용하여 소음/진동원을 규명하였다. 우선, 입력들 사이에 인과관계(causality)가 성립하는지를 판단하여 주파수 영역별로 입력들간의 우선순위를 부여하였다. 입력들 사이의 우선순위는 두 신호 사이에 구성되는 선형계의 충격응답함수와 힐버트 관계를

* 한국과학기술원 기계공학과 (정회원)
** 한국과학기술원 기계공학과

이용하여 파악 할 수 있다[6, 7]. 이를 다입력/단일출력 모형에 적용하여 차량의 소음/진동원을 규명하였다.

2. 소음/진동원 규명의 적용 이론

소음/진동원 규명을 위한 모형은 다입력/단일출력계로서 q개의 상변수 선형계 $H_i(f)$로 구성된다. q개의 입력 x(t)와 출력 y(t)는 측정 가능한 정상 불규칙(stationary random)신호이며, 외부잡음 n(t)는 모형에 고려되지 않은 다른 입력들의 영향과 계의 비선형성(nonlinearity), 신호들의 비정상(nonstationary) 과정, 측정잡음의 영향 등을 포함한다. 이때 다입력/단일출력 모형의 출력 스펙트럼은 다음과 같다.

$$S_{yy}(f)=\sum_{i=1}^{q}\sum_{j=1}^{q}H_i^{*}(f)H_j(f)S_{ij}(f)+S_{nn}(f) \qquad (1)$$

식 (1)로부터 입력들의 상관관계 여부에 따라 서로 다른 소음/진동원 규명법이 적용된다.

2.1. 주파수 응답함수(FRF) 기법

입력들이 서로 독립된 신호라면, 즉 $S_{ij}(f)=0,(i\neq j)$라면 식 (1)의 출력 스펙트럼은 식 (2)와 같이 단순히 독립적인 q개의 단일입력/단일출력 모형의 합으로 표시된다.

$$S_{yy}(f)=\sum_{i=1}^{q}|H_i(f)|^2S_{ii}(f)+S_{nn}(f) \qquad (2)$$

여기서, $H_i(f)=\dfrac{S_{iy}(f)}{S_{yy}(f)}$

이때 $|H_i(f)|^2S_{ii}(f)$는 i번째 입력에 의해 나타나는 출력성분으로 기여 출력 스펙트럼 $S_{y_i}(f)$라 한다.

2.2. 부분 기여도함수(PCF) 기법

입력들 사이에 서로 상관관계가 존재하는 경우, 출력에 대한 각 입력들의 기여 정도는 입력들간의 인과관계에따라 우선순위를 고려한 잔여(residual)성분에의해 부분 기여도함수로 표현 할 수 있다.

$$S_{y\cdot j,i}(f)=\gamma^2_{jy,i}(f)S_{yy\cdot i}(f) \qquad (3)$$

여기서, $\gamma^2_{jy,i}(f)=\dfrac{|S_{jy,i}(f)|^2}{S_{jj,i}(f)S_{yy\cdot i}(f)}$, $j>i$

즉, 부분 기여 출력 스펙트럼 $S_{y\cdot ji}(f)$는 우선순위에 의해 j번째 입력에서 i번째 입력 신호의 선형성분을 제거한 잔여성분이 출력에 기여하는 양을 나타낸다.

3. 입력들의 우선순위의 결정

입력간의 상관관계의 존재로 부분 기여도함수를 이용하고자 할 경우, 입력들 사이의 우선순위를 어떻게 부여하느냐에따라 전혀 다른 해석결과를 얻게된다. 선형계에서 입력 x(t)와 출력 y(t)사이의 전달함수 $H_{xy}(f)$가 물리적으로 실현 가능한 계라면, $H_{xy}(f)$로부터 얻어지는 충격응답함수 $h_{xy}(t)$는 입력이 발생한 이후에서만 의미가 있게되며 그 이전의 시간에서는 '0'이 된다[8]. 즉,

$$y(t)=\int_{-\infty}^{\infty}h(\tau)x(t-\tau)d\tau=\int_{0}^{\infty}h(\tau)x(t-\tau)d\tau \qquad (4)$$

$$\text{causal system}: h(\tau)=0 \quad \text{for} \quad \tau<0$$

그러나 입,출력 관계를 잘못 파악하여 y(t)를 입력으로 x(t)를 출력으로 구성한 선형계 $H_{yx}(f)$는 물리적으로 실현 불가능하며, $H_{yx}(f)$로부터 얻어지는 충격응답함수 $h_{yx}(t)$는 음의 시간영역에서 더이상 '0'이 아닌 어떤값을 갖게된다

[6].

또한 이를 주파수 영역에서 살펴보면 $H_{xy}(f)$의 실수부와 허수부는 서로 독립이 아닌 힐버트 관계를 갖는다[5, 8].

$$\begin{aligned} \mathbf{Im}[\mathbf{H_{xy}(f)}] &= \frac{\mathbf{1}}{\pi \mathbf{f}} * \mathbf{Re}[\mathbf{H_{xy}(f)}] \\ &= \boldsymbol{H.T.}[\mathbf{Re}[\mathbf{H_{xy}(f)}]] \end{aligned} \qquad (5)$$

물리적으로 실현 가능한 계인 $H_{xy}(f)$의 경우는 실수부와 허수부의 힐버트 관계가 성립하나 입. 출력 관계가 잘못 정의된 $H_{yx}(f)$에서는 더이상 힐버트 관계가 성립하지 않는다. 따라서 두 신호 사이의 입, 출력 관계에 대한 우선순위는 두 신호 사이에 구성되는 선형계의 특성인 충격응답함수와 힐버트 관계로부터 파악될 수 있다.

4. 승용차의 실내 소음원 규명

4.1. 실험 방법

다입력/단일출력 모형을 적용하여 공회전시 승용차의 실내 소음을 발생시키는 소음원을 규명하고자 한다. 실험용 차량은 3기통 소형 승용차로써 공회전(900~1000 RPM) 상태에서 발생되는 운전석 위치에서의 음압신호를 출력으로 하고 흡, 배기구, 엔진 블럭등 소음 및 진동을 유발할 수 있는 여러 요소들로부터 측정되는 음압 혹은 진동 신호를 입력으로 하여 모형을 구성하였다. 16채널 테이프 레코더를 사용하여 측정된 신호를 기록하였고, 신호 분석은 LMS및 PC를 사용하였다.

4.2. 입력, 출력의 선정

공회전시 발생하는 실내소음은 주로 500Hz 이하에 존재므로(그림 1) 이 영역에서 다입력/단일출력 모형을 통한 소음/진동원 및 전달경로를 규명하였다. 여기서는 공회전수와 관련하여 입력들간에 상관관계가 크게 존재하는 저주파 영역(35-65Hz)에 대해 살펴 보기로 한다.

몇가지 신호분석을 통하여 표1과 같이 운전석 위치에서의 음압신호에 영향을 줄것으로 예상되는 7개의 입력신호를 선정하였다. 이들 입력 신호로부터 얻어진 출력 신호에 대한 다중기여도함수는 그림 2와 같이 0.7이상으로 크게 나타나므로 이로부터 공회전시 실내 소음의 원인이 되는 입력들의 선정이 적절하다고 판단하였다.

4.3. 입력들의 우선순위의 결정

입력신호들은 공회전 수와 관련된 주파수 이외에도 관심 주파수 영역에서 상호상관에 의해 상당히 큰 기여도 함수 값을 갖는다. 따라서 이러한 입, 출력계에 다입력/단일출력 모형을 적용하기 위해서는 먼저 입력들에 적절한 우선순위를 부여하여야 한다. 이를 위해서 주파수 응답함수의 힐버트 관계와 충격응답함를 살펴 보았다. 제한된 주파수 범위에서 충격응답함수의 이용은 대역 통과 휠터(Band Pass Filter)의 사용에 따른 오차를 유발하게 된다[6]. 본 연구에서는 입력들 사이의 전달함수에 대해 힐버트 관계를 파악하여 인과관계를 결정하였으며 부가적으로 충격응답함수를 사용하였다. 엔진 헤드와 소음기의 경우, 그림 3.a에서와 같이 두 신호 사이의 상관관계는 무시할 수 없을 정도로 존재하며, 이러한 상관관계는 $h_{xy}(t)$와 $h_{yx}(t)$의 특성(그림 3.b)과 힐버트 관계(그림 3.c)를 살펴봄으로써 엔진 헤드의 진동 신호가 소음기의 진동 신호에 대해 입력으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 마찬가지로 배전기와 대시 판넬의 경우에는 그림 4로부터 대시 판넬의 진동신호에 대해 배전기의 진동 신호에 우선순위를 둘 수 있다. 그러나 엔진 헤드와 발전기의 경우, 두

신호 사이의 위상을 살펴 보면 35 ~ 65Hz사이에서 거의 일정함을 볼 수 있다(그림 5). 이 경우 두 신호 사이의 관계는 인과관계가 아니라 엔진 블럭의 강체 운동에 의해 나타난 것으로 판단되었다.

4.4 부분 기여도함수에 의한 소음원 규명

앞 절로부터 소음/진동원과 전달경로에 대한 신호의 흐름은 엔진 헤드, 발전기등 엔진블럭의 진동 신호들이 공기 정화기, 소음기등을 통하여 대시 판넬에 영향을 준다고 판단할 수 있었다. 따라서 입력간의 우선순위와 이에 따른 부분 기여도함수의 적용이 가능하며 이 때 얻어지는 각 입력들의 부분 기여 출력 스펙트럼을 표2와 같이 구할 수 있다. 인과관계에 따른 우선순위를 부여하지 않고 주파수 응답함수를 이용하여 구한 기여 출력 스펙트럼과 부분 기여도함수 기법을 적용한 부분 기여출력 스펙트럼을 비교해 보면, 소음/진동원의 출력에 대한 기여정도가 전혀 다르게 나타남을 알 수있다. 주파수 응답함수 기법을 적용한 경우 각 입력들의 출력에 대한 기여 정도는 2~3 dB정도의 차이만 존재하며 그 중 에서도 대시 판넬의 기여가 가장 크게 나타난다. 또한 기여출력 스펙트럼의 합이 출력측의 소음 레벨보다 훨씬 크게 과대평가 되고 있음을 알 수 있다. 그러나 입력간의 우선순위를 고려하게 되면, 대시 판넬의 경우 다른 소음원들의 영향이 제거되어 출력에 대한 기여정도가 적어지고, 반면 전체적으로 엔진 블

표1. 다입력/단일출력 모형의 입,출력 신호

	측정위치	35-65[Hz]	0-500[Hz]
입력	엔진 헤드(VAL)	78.8[dB]	107.8[dB]
	배전기(")	76.8 ["]	106.2 ["]
	대시판넬(")	65.1 ["]	93.6 ["]
	발전기(")	74.5 ["]	103.6 ["]
	공기 정화기(")	83.9 ["]	102.2 ["]
	소음기(")	76.7 ["]	100.8 ["]
	배기구(SPL)	68.3 ["]	86.7 ["]
출력	운전석(SPL)	26.2[dB(A)]	52.9[dB(A)]

표2. 각 입력들의 기여 출력 스펙트럼과 부분 기여 출력 스펙트럼의 비교

	기여출력스펙트럼[dB(A)]		부분기여출력스펙트럼[dB(A)]	
	35-65[Hz]	0-500[Hz]	35-65[Hz]	0-500[Hz]
엔진 헤드	23.8	51.7	23.8	51.7
배전기	23.6	51.6	14.6	40.0
대시판넬	25.4	51.6	18.5	37.1
발전기	23.0	51.0	9.3	36.4
공기 정화기	24.3	51.8	17.5	40.6
소음기	24.6	51.9	18.2	39.5
배기구	24.5	52.0	13.5	39.4
합계	32.7	60.1	26.9	52.9
운전석	26.2	52.9	26.2	52.9

력의 진동이 가장 중요한 소음원으로 나타난다. 그리고 60~65Hz 사이에서는 소음기와 대시 판넬에 의한 진동이, 38~42Hz 사이에서는 공기 정화기에 의한 진동이 주요 소음원으로 작용함을 알 수 있다(그림 6). 또한 신호들의 인과관계로부터 대시 판넬등은 소음/진동의 전달 경로의 역할을하는 것으로 이해될 수 있으며 이로부터 소음/진동원과 전달 경로에 대한 적절한 대책을 세울 수 있겠다.

5. 결론 및 고찰

다입력/단일출력 모형을 이용하여 소음/진동원을 규명할 때 입력들간의 상관관계가 존재하면 이들 사이의 우선순위 결정은 매우 중요한 문제가 된다. 본 실험에서는, 이러한 상관관계를 입력들간에 구성되는 선형계 $H_{xy}(f)$로부터 힐버트 관계와 충격응답함수의 특성을 살핌으로써 우선순위를 결정하였으며, 부분 기여도함수 기법을 적용하여 차량의 실내 소음원과 전달경로에 대한 정보를 얻을 수 있었다. 그러나 충격응답함수와 전달함수의 힐버트 관계를 이용한 우선순위 결정법의 상대적인 차이점, 오차등에 대해서는 앞으로 더 연구 되어야 할 과제이다.

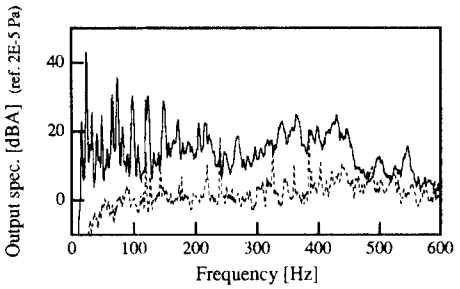


그림 1. 운전석의 소음 레벨 ;—— 공회전시 소음 레벨, ····· 암소음 레벨

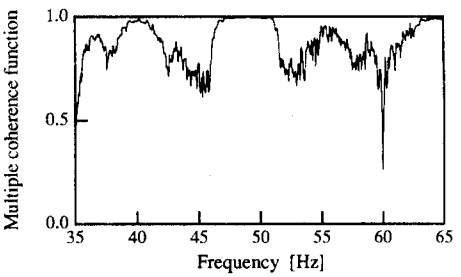
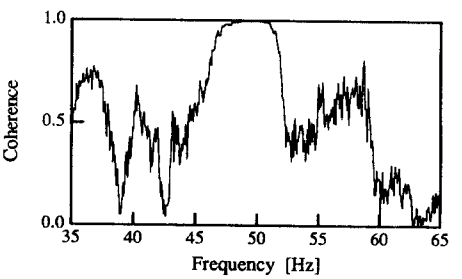


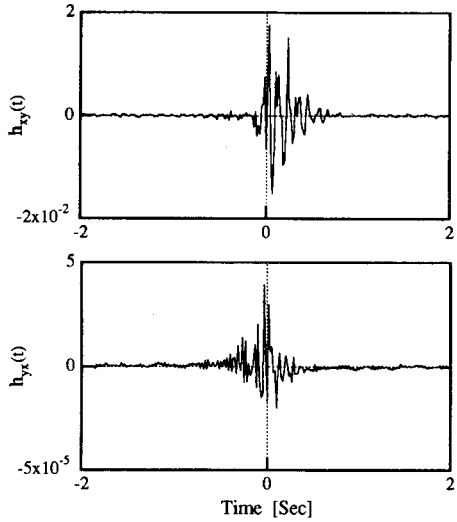
그림 2. 7입력/1출력 모형의 다중 기여도 함수

참고문헌

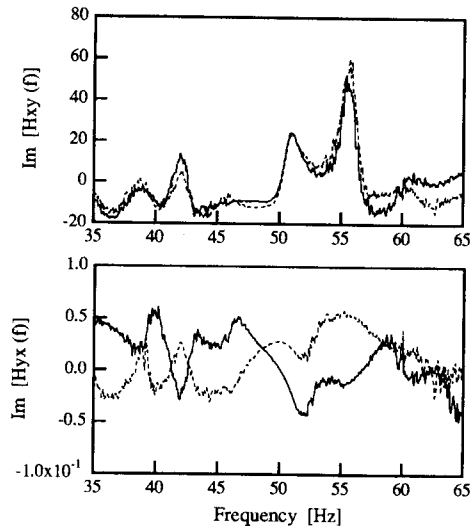
1. A.F. Seybert et al., Transactions of ASME, J. Engineering for Industry, Nove., 1227-1233, 1975.
2. R.J. Alfredson, J. Sound and Vibration 55(4), 487-494, 1977.
3. M.W. Trethewey, et al., J. Noise Control Engineering, Nov. - Dec., 89-102, 1983.
4. J.S. Bendat, J. Acoust. Soc. Am. 68(2), 498-503, 1980.
5. J.S. Bendat and A.G. Piersol, RANDOM DATA:Analysis and Measurement Procedures. (New York : Wiley - Interscience, 1986.)
6. 박정석, 박사학위논문, 한국과학기술원, 1992.
7. J.S. Park and K.J. Kim, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.6, No.6, pp491-502, 1992.
8. A Papoulis, The Fourier Integral and Its Applications, (McGraw - Hill, 1962).



a. 엔진 헤드와 소음기 신호 사이의 기여도 함수



b. 충격응답함수
위 : $h_{xy}(t)$아래 : $h_{yx}(t)$



c. 전달함수의 힐버트 관계 ;——
Im[H(f)] , ····· *H.T.*[Re[H(f)]]
위 : $H_{xy}(f)$ 아래 : $H_{yx}(f)$

그림 3. 입력간의 우선순위 결정
(X : 엔진 헤드, Y : 소음기)

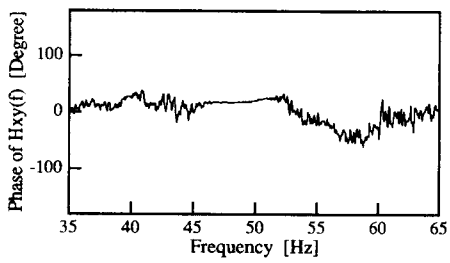


그림 5. 전달함수 $H_{xy}(f)$의 위상
(X : 엔진 헤드, Y : 발전기)

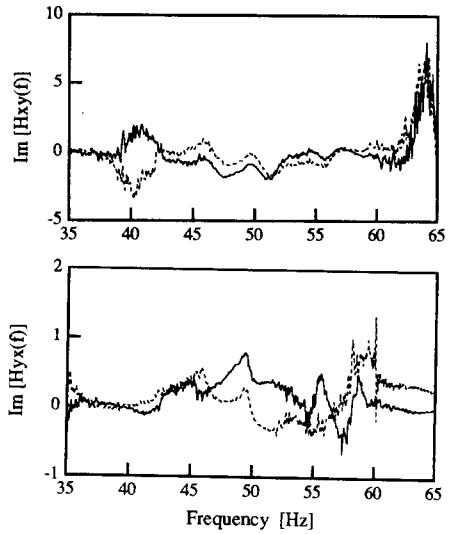


그림 4. 전달함수의 힐버트 관계 ;——
Im[H(f)] , ····· *H.T.*[Re[H(f)]]
(X : 배전기, Y :대시 판넬)
위 : $H_{xy}(f)$ 아래 : $H_{yx}(f)$

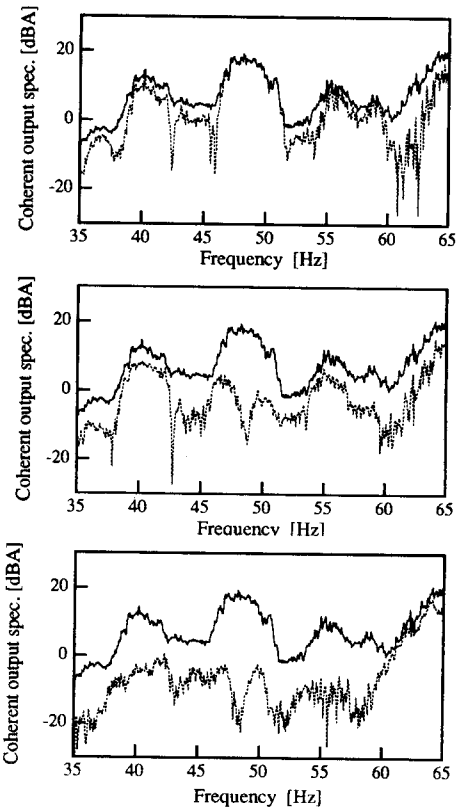


그림 6. 각 입력들에 의한 부분 기여출력 스펙트럼;—— 운전석 소음, ····· 부분 기여출력 스펙트럼

위:엔진헤드, 중간:공기정화기, 아래:대시판넬