

청음용 자동차 로드노이즈 추출 방법 연구

A Study on Road Noise Extraction Methods for Listening

국형석[†] · 김형건* · 조문환* · 이강덕*
Hyung-Seok Kook, Hyoung-Gun Kim, Munhwan Cho and Kang-Duck Ih

(Received September 2, 2016 ; Revised October 18, 2016 ; Accepted October 18, 2016)

Key Words : Road Noise Extraction(로드노이즈 추출), System Identification Method(시스템 식별기법), Subband Signal Processing(서브밴드 신호처리)

ABSTRACT

This study pertains to the extraction of the road noise component of signals from a vehicle's interior noise via the traditional frequency domain and time domain system identification methods. For road noise extraction based on the frequency domain system identification method, the appropriate matrix inversion strategy is investigated and causal and non-causal impulse response filters are compared. Furthermore, appropriate data lengths for the frequency domain system identification method are investigated. In addition to the traditional road noise extraction methods based on frequency domain system identification, a new approach to extract road noise via the time domain system identification method based on a parametric input-output model is proposed and investigated in the present study. In this approach, instead of constructing a higher order model for the full-band road noise, input and output signals are processed in the subband domain and lower order parametric models optimal to each subband are determined. These parametric models are used to extract road noises in each subband; the full band road noise is then reconstructed from the subband road noises. This study shows that both the methods in the frequency domain and the time domain successfully extract the road noise from the vehicle's interior noise.

기 호 설 명

a_k, b_{ik} : 모수모형의 모수
 $e(t)$: 모수모형의 오차 신호
 G_{ii} : 단측 자기스펙트럼 밀도함수
 G_{ij}, G_{ix} : 단측 교차스펙트럼 밀도함수
 G_{ux} : 단측 교차스펙트럼 밀도함수 행렬
 G_{uu} : 단측 스펙트럼 밀도함수 행렬
 $h_i(t)$: i 번째 채널의 단위충격 응답 함수
 H : 전달함수 행렬

$n(t)$: 노이즈 신호
 n_a, n_b : ARX 모수모형의 차수
 n_{ch} : ARX 모수모형 입력 신호의 수
 $u_i(t)$: i 번째 채널의 참고 신호, 또는 입력 신호
 $x(t)$: 실내소음 신호, 또는 모수모형의 출력 신호
 S : 특이값 행렬
 σ_i : 특이값

1. 서 론

로드노이즈는 차체·새시 및 파워트레인 NVH 개

[†] Corresponding Author; Member, Department of Automotive Engineering, Kookmin University
E-mail : kook@kookmin.ac.kr

* Member, Hyundai Motor Company

[‡] Recommended by Editor Gi-Woo Kim

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

발 관점에서 관심 사항이다^(1,2). 로드노이즈의 전달 경로, 로드노이즈 음질평가, 로드노이즈와 윈드노이즈의 상대적 기여도 분석을 위해서는 자동차 실내소음에서 로드노이즈를 분리하는 기술이 필요하다. 로드노이즈 성분의 분리 기능은 대부분의 NVH 측정/분석용 상용 프로그램에 구현되어 있는데, 주파수 영역의 시스템 식별기법(system identification methods)에 기반을 두고 있으나 상세한 방법은 공개하지 않고 있다. 이 연구에서는 주파수 영역 시스템 식별 방법을 이용하여 실내소음에서 청음용 로드노이즈를 추출하는 과정에서 필요한 세부적이고, 구체적인 방법을 검토하고 최적의 결과를 얻을 수 있는 방법이 무엇인지 찾고자 하였다.

또한 주파수 영역의 시스템 식별기법에 기반을 둔 종래의 방법이 가진 한계를 극복할 수 있는지 알아보기 위하여 새로운 방법을 검토하였다. 새로운 방법은 시간 영역의 모수모형(parametric model)에 기반한 로드노이즈 추출 방법이다. 모수모형은 비모수 모형에 비하여 작은 양의 데이터로도 시스템의 특성을 파악할 수 있는 장점이 있지만, 차량 NVH 시스템은 풀밴드(full band)의 시스템이기 때문에 모수모형을 한 번에 적용하기에는 너무 복잡하다. 이를 극복하기 위하여 서브밴드(subband) 신호처리 기법을 이용하여 비교적 작은 차수의 모수모형으로 서브밴드 별로 모델링이 가능하게 하였다. 2장에서는 주파수 영역 방법과 그 결과를 설명하고 3장에서는 시간 영역 방법과 그 결과를 설명하였다. 실내소음에서 로드노이즈 성분의 소음 신호를 추출하기 전 엔진노이즈의 하모닉 성분은 적절한 방법을 이용해서 제거한 상태였다.

2. 주파수 영역 시스템 식별기법을 이용한 로드노이즈 추출

이 방법은 Bendat의 다중 입력 단일 출력 시스템 식별기법에 근거한다⁽³⁾. 측정된 실내소음에서 로드노이즈 성분의 소음 신호를 추출하는 방법은 주파수 영역 시스템 식별기법에 바탕을 두고 있다. 즉, 실내소음 발생 메커니즘을 Fig. 1과 같이 참고 신호(reference signals)를 다중 입력으로 하고 실내소음 신호를 단일 출력 신호로 하는 다중 입력 단일 출력 시스템(MISO; multiple-input single-output system)

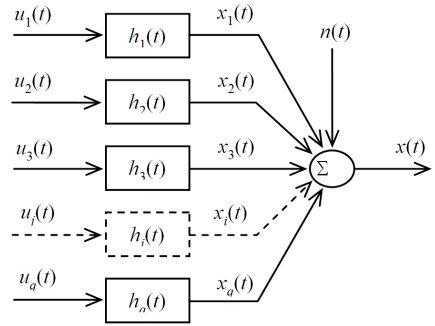


Fig. 1 Multiple-input model for arbitrary inputs

으로 간주한다. 측정된 다중 입력 신호와 출력 신호 관계에서 시스템 식별기법을 이용하여 최적의 주파수 응답함수(또는 전달함수)를 계산할 수 있으며, 측정된 실내소음에서 다중 입력 신호와 응답함수를 통하여 입력 신호와 상관성이 있는 출력 신호 성분만을 추출하여 로드노이즈 신호를 추정해 낼 수 있다. MISO 시스템 식별기법을 좌우 실내소음 출력 신호에 대하여 독립적으로 적용하면 좌우 양 귀의 로드노이즈를 추출할 수 있다.

2.1 정속주행시험

Fig. 1에 표시한 MISO 시스템의 식별기법을 이용해 로드노이즈를 추출하기 위해서는 정속주행 시험에서 로드노이즈와 연관성이 높은 참고 신호를 측정해야 한다. 정속주행시험은 이용 가능한 시험로 중에서 윈드노이즈 성분에 비하여 로드노이즈 성분이 지배적인 성분이 될 수 있도록, 상대적으로 거친 노면을 선택하여 세단형 차량을 이용해 수행하였으며, 참고 신호로 쓰기 위해 주행시험 중에 네 개의 휠에서 다음과 같은 신호를 동시에 측정하였다. 지면에서 전달되는 휠의 진동을 가장 가까워서 측정할 수 있고, 가속도계의 부착이 가능한 휠 너클에서 3축 방향의 진동 신호를 측정하였으며, 휠 하우스 뒤쪽에 마이크로폰을 매립하여 가속도계로 측정하기 힘든 고주파의 로드노이즈 입력 신호를 측정하였다. 또한, 엔진 룸에서 3축 가속도계로 엔진 블록의 진동 가속도 신호를 측정하였다. 결과적으로 참고 신호 채널 수는 19개이다. 데이터 샘플링 주파수는 32 768 Hz로 가청 주파수 범위를 거의 다 포함하였다.

차량의 여러 위치에서 측정한 참고 신호와 함께 운전자 좌측 귀 위치에서 마이크로폰으로 실내소음

을 측정하였다. 정속주행시험의 명목 주행속도는 110 km/h이었다.

2.2 특이값 분해와 역행렬 계산

실내소음 신호 $x(t)$ 는, 다중 참고 신호 $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$, ..., $u_q(t)$ 를 입력으로 하는, 다중 입력 단일 출력 시스템의 출력으로 간주할 수 있다. Fig. 1에서 $n(t)$ 는 참고 신호 $u_i(t)$ 와 상관성(correlation)이 없는 노이즈 신호이며 윈드노이즈 또는 기타 측정 오차 신호로 생각할 수 있다. Fig. 1에서 측정 가능한 신호는 출력 신호와 다중 참고 신호며, 이로부터 시스템의 주파수 응답함수를 추정할 수 있다. 즉,

$$\begin{bmatrix} G_{1x} \\ \vdots \\ G_{qx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & \dots & G_{1q} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{q1} & \dots & G_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 \\ \vdots \\ H_q \end{bmatrix} \tag{1}$$

여기서 G_{ii} , G_{ij} , G_{ix} 는 단측 자기스펙트럼 밀도함수와 단측 교차스펙트럼 밀도함수(one-sided autospectral and cross-spectral density functions)이며, 식 (1)은 $G_{ux} = G_{uu}H$ 으로도 표현 가능하며, 시스템의 전달함수 H 는 다음과 같이 구할 수 있음을 알 수 있다.

$$H = G_{uu}^{-1}G_{ux} \tag{2}$$

여기서 G_{uu}^{-1} 는 주파수 라인마다 계산해야 하는 역행렬이며, 역행렬을 계산하기 위해 특이값 분해(SVD: singular value decomposition)를 이용할 수 있다. 즉,

$$G_{uu} = U\Sigma V^H \tag{3}$$

G_{uu} 는 Hermitian 행렬이므로 $U = V$ 이고, Σ 는 $(q \times q)$ 정방행렬이다.

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & \\ & \sigma_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sigma_q \end{bmatrix} \tag{4}$$

만약, 행렬 G_{uu} 의 랭크가 $r(r < q)$ 이라면, 마지막 $q - r$ 개의 특이값은, $\sigma_{r+1} = \sigma_{r+2} = \dots = \sigma_q = 0$ 이다. 행렬의 랭크는 독립적인 정보를 갖는 행렬의 열(또는 행) 수를 의미한다. 흔히 특정 주파수를 지배하는

진동 모드의 개수가 측정 센서의 수보다 작은 경우 랭크의 부족을 초래하게 되고, 하위의 특이값은 영이 된다. 이때 영이 되어야 할 특이값들은 측정 오차 때문에 정확하게 영이 되지 않기 때문에 측정 오차의 조그만 변화에도 식 (4) Σ 의 역행렬 계산 과정에서 큰 오차를 만들게 된다. 이러한 행렬의 상태를 불량상태(ill-conditioned)라고 한다. 최소 특이값에 대한 최대 특이값의 비율, 즉, σ_1/σ_q 를 상태수(condition number)라고 하는데, 불량상태의 정도를 나타낸다⁽⁴⁾.

역행렬 계산의 오차를 줄일 수 있는 한 가지 방법은 적당한 크기의 역치(threshold)를 정하여 역치보다 작은 특이값은 유효하지 않은 측정 오차에 의한 허위 정보로 간주하여 영으로 만들고 역행렬을 구하는 것이다. 최적의 역치를 정하는 일반적인 방법은 알려진 바가 없다. 이 연구에서는 가장 간단한 방법의 하나를 사용해 보았다. 최소 특이값이 미리 정해진 상태수를 넘지 않을 때까지 작은 특이값을 버리는(즉, 영으로 간주하는) 방법이다.

2.3 데이터 길이가 특이값 계산에 미치는 영향

주파수 영역 시스템 식별기법은 단측 자기 스펙트럼 밀도 함수와 단측 교차 스펙트럼 밀도함수를 계산할 필요가 있음을 2.2절에서 설명하였다. 스펙트럼 밀도 함수는 Welch의 피리오도그램(periodogram) 방법을 이용하였다. FFT 크기는 샘플링 주파수와 같은 32 768개(즉, 주파수 해상도가 1 Hz)이며, 일반적으로 선택하는 바와 같이 Hanning 윈드우를 사용하였으며, 데이터의 중첩은 50%로 하였다. 데이터 길이에 따라 특이값이 어떻게 다르게 계산되는지를 관찰하기 위해서 주파수의 함수로 계산되는 특이값을 데이터의 길이가 5초, 10초, 15초, 20초 네 가지 경우에 대하여 관찰하였으며 그 중 데이터 길이가 5초와 20초인 경우의 특이값을 Fig. 2에 보였다.

데이터의 길이가 길어질수록 상태수(condition number)가 작아지는 경향이 있는 것을 알 수 있었다. 데이터 길이에 따른 상태수의 변화는 작은 특이값의 변화에 주로 원인이 있다. 즉, 큰 특이값은 데이터 길이의 선택에 따라 민감하게 바뀌지 않으나, 작은 특이값은 데이터 길이가 상대적으로 짧을수록 변동 폭이 커지고 값 자체도 작게 나오는 것을 관찰할 수 있었다. 특히 데이터의 길이를 5초로 제한 하

면 특이 값이 크게 두 그룹으로 나누어지고 작은 특이 값 그룹의 평균적 특이 값은 더 긴 길이의 데이터로 계산한 특이 값보다 현저히 작은 것을 볼 수 있다 (Fig. 2(a) 참조). 상태수가 작을수록 역행렬 계산 과정에서 측정 및 계산 오차의 영향을 덜 받으므로 데이터의 길이는 길수록 바람직하지만, 데이터 길이가 15초와 20초 일 때 특이 값에 큰 차이가 없었다. 따라서 데이터 길이는 최소 15초 정도가 바람직해 보인다.

한편, 데이터의 길이를 주파수 영역 시스템 식별 모형의 크기와 연관해서 다음과 같이 생각해볼 수 있다. 주파수 해상도가 1 Hz이고 샘플링 주파수는 32 768 Hz이므로 주파수 라인의 수는 $16\,385(=f_s/2+1)$ 이다. 주파수 응답함수는 각각의 입력에 대해서 필요하므로 19개의 입력 채널을 가지는 다중 입력 모형의 경우에는 모두 311 315개의($=19 \times 16\,385$) 번

수가 필요하다. 데이터 길이가 10초인 경우 샘플의 수는, $327\,680(=10 \times 32\,768)$ 이므로, 데이터의 길이가 10초가 될 때 데이터의 수와 변수의 수가 엇비슷한 정도이므로 모델링에 사용하는 데이터의 길이가 10초 이하이면 과적합(overfitting)이 일어날 수 있다.

2.4 특이 값 선택을 위한 역치 선정

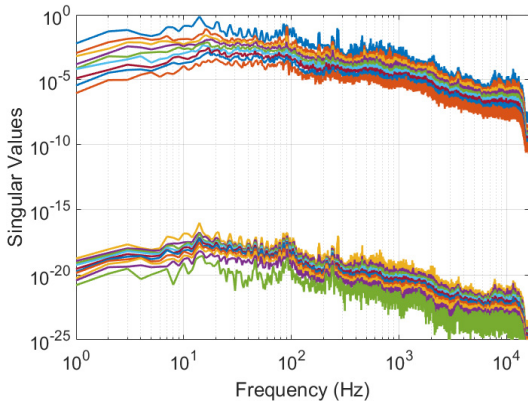
주파수 영역 시스템 식별기법을 이용한 로드노이즈 추출 방법은 주파수 응답함수를 계산하는 과정에서 단측 교차 스펙트럼 밀도함수 행렬의 역행렬을 계산해야 한다. 역행렬을 계산하는 과정에서 측정 오차 및 계산 오차에 따라서 주파수 응답 함수 및 로드노이즈 추출 결과가 민감하게 영향을 받을 수 있음을 2.2절에서 설명하였다. 행렬의 특이 값 분해를 통해 일정 값, 즉, 역치에 미달하는 특이 값들을 버리고 역행렬을 구함으로써 오차의 영향을 줄일 수 있다.

역치는 절대적 수치로 직접 설정할 수도 있으나, 상태수의 크기를 제한하는 방법으로 간접적으로 설정하는 방식도 있을 수 있다. 이 연구에서는 후자의 방법을 취하였다. 상태수의 크기는 5, 50, 500 세 가지 크기에 대하여 조사하였다. 즉, 상태수의 크기를 50으로 제한하기로 하였다면 가장 큰 특이 값인 첫 번째 특이 값의 1/50보다 작은 특이 값은 버리고 그 위의 특이 값은 취하므로 결국 역치는 $\sigma_1/50$ 이 된다.

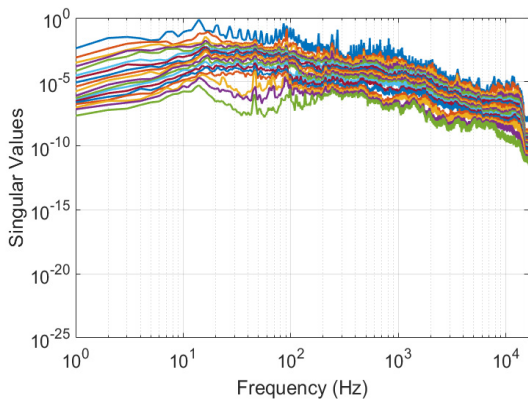
조사결과 작은 역치(즉, 상태수가 큰 경우)를 사용할 때 스펙트럼 상에서 많은 피크 노이즈가 발견되며, 일반적으로 과장되게 로드노이즈를 추출하는 경향이 있다. 반대로 역치가 큰 경우(즉, 상태수가 작은 경우), 많은 수의 특이 값이 역행렬 계산 과정에서 버려지고, 스펙트럼이 과소하게 계산되는 경향이 있었다. 상태수를 50 정도로 할 때 결과가 가장 양호한 편이었으나, 적절한 상태수는 데이터에 따라 변할 수 있다고 생각된다.

2.5 인과적 필터와 비인과적 필터

2.2절에 설명한 방식으로 G_{mm} 의 역행렬을 계산하고 식 (2)에 대입하여 각 채널의 주파수 응답함수(FRF; frequency response function)를 계산할 수 있다. 시간 영역의 단위충격 응답함수(IRF; unit impulse response function)는 주파수 응답함수를 푸리



(a) 5-second long data, 110 km/h



(b) 20-second long data, 110 km/h

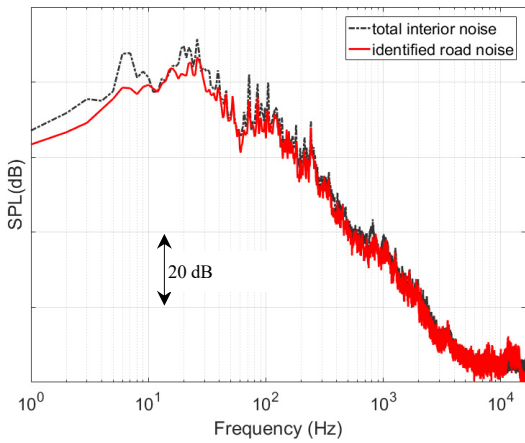
Fig. 2 Data lengths and variations of singular values

에 역변환하여 계산할 수 있다. 단위충격 응답함수와 참고 입력 신호를 컨볼루션하여 해당 채널의 출력 신호를 계산할 수 있지만, FFT(fast Fourier transform) 연산을 이용하여 출력의 푸리에 변환을 먼저 계산하고 이것을 푸리에 역변환 하여 출력 신호를 계산하면 연산 속도가 더 빠르다.

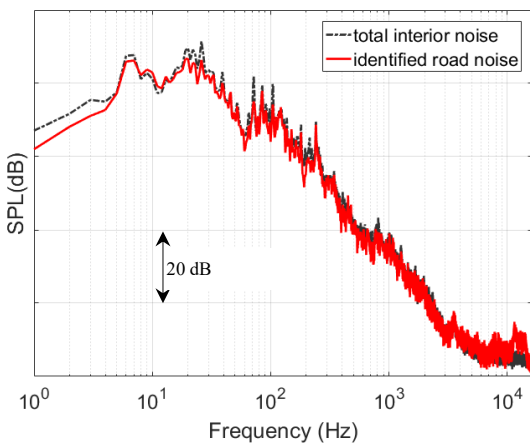
시험에서 얻은 단위충격 응답함수는 인과적 시스템(causal system)의 형태가 아닐 수 있다. 비인과적 시스템(noncausal system)이라는 의미는 단위충격 응답함수를 $h(t)$ 라고 할 때, $h(t < 0) \neq 0$ 이며, 채널의 현재 출력값을 컨볼루션 연산으로 계산할 때 입력의 현재와 과거 값뿐만 아니라 미래의 입력 값이 요구됨을 의미한다. 이러한 현상은 입력과 출력 신호가

서로 인과적 특성을 갖지 않아 생길 수도 있지만, 계산 과정의 오차에 의해서도 발생할 수 있다. 인과적 시스템의 주파수 응답함수의 실수부와 허수부는 힐버트 변환 관계(Hilbert transform relationship)가 있음이 알려져 있다⁽⁵⁾. 비인과적 주파수 응답 함수는 실수부와 허수부가 힐버트 변환 관계에 있지 않다. 이 연구에서는 주파수 응답 함수의 실수부에서 힐버트 변환 관계에 있는 허수부를 계산하여 인위적으로 인과적 시스템의 주파수 응답 함수를 복원하는 방법을 사용하였다.

주파수 영역 시스템식별을 통해 얻을 수 있는 주파수 응답함수는 일반적으로 비인과적(noncausal) 특성을 보였다. 벤치마킹 데이터에 대하여 비교한 것을 Fig. 3에 보였다. 인과적 필터가 4 kHz 이상에서 비인과적 필터에 비하여 소음 에너지를 조금 더

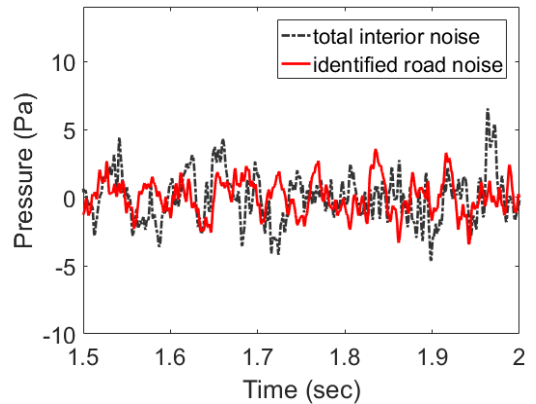


(a) Noncausal model

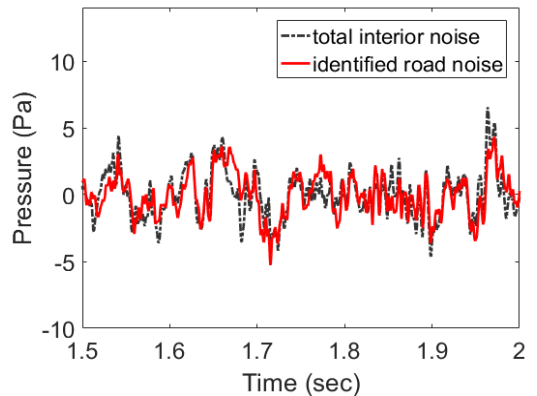


(b) Causal model

Fig. 3 Comparison of spectrum between noncausal and causal models



(a) Noncausal model



(b) Causal model

Fig. 4 Comparison of signals between noncausal and causal models

과장하는 경향이 있으나, 전체적으로는 인과적 필터를 사용할 때나 비인과적 필터를 사용할 때나 추출된 로드노이즈의 에너지는 스펙트럼 상에서 비슷하게 보인다(Fig. 3 참조). 그런데 추출된 로드노이즈 신호를 시간 영역에서 관찰하면 두 필터의 차이가 확인한 것을 알 수 있고(Fig. 4 참조), 인과적 필터를 사용한 쪽이 실제의 실내소음과 더 유사한 것을 알 수 있다. 인과적 필터가 비인과적 필터보다 우수하므로 이후 보이는 주파수 영역 시스템 식별기법을 이용한 로드노이즈 추출은 모두 인과적 필터를 사용하였다.

3. 시간 영역 시스템 식별기법을 이용한 로드노이즈 추출

모수모형(parametric model)으로 동적 시스템의 입출력 관계를 모델링 할 수 있다. 이 연구에서는 Fig. 1에 표현한 MISO 시스템을 가장 간단한 형태의 모수모형인 ARX(autoregressive exogenous) 모형⁽⁶⁾으로 모델링하고 실내소음 중에서 참고 신호로 설명이 가능한 소음 성분을 추출하고자 하였다. 다중 입력 단일 출력 시스템에서 ARX 모형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

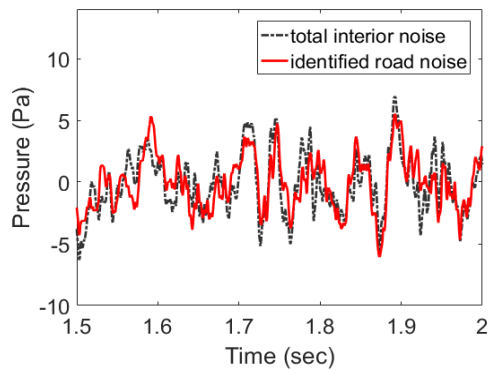
$$x(t) = -\sum_{k=1}^{n_a} a_k x(t-k) + \sum_{i=1}^{n_b} \sum_{k=1}^{n_b} b_{ik} u_i(t-k) + e(t) \quad (5)$$

여기서 $x(t)$, $u_i(t)$, $e(t)$ 는 각각 출력 신호, i -번째 입력 신호, 오차 신호다. 또한, n_a , n_b 는 ARX 모형의 차수이며 n_{cb} 는 입력 신호의 수이다. ARX 모수모형은 형태가 간단하고 모수 추정에 필요한 계산시간이 다른 형태의 모수모형에 비하여 짧다. MATLAB®의 ARX함수는 입·출력 신호와 모형의 차수에 최적화된 모수 a_k , b_{ik} 를 계산해준다.

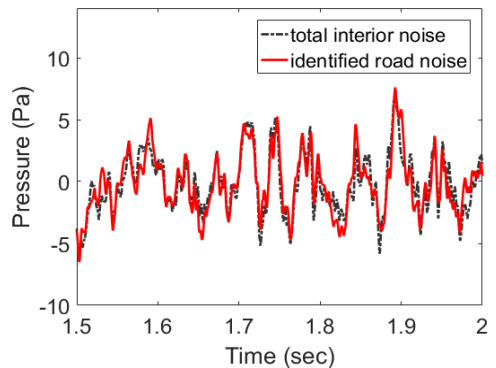
폴밴드의 로드노이즈에 대하여 모수모형을 적용하기 위해서는 큰 차수의 모형이 필요할 수 있다. 모수 추정 알고리즘의 내부에서 다루는 행렬의 크기는 모형의 차수에 따라 증가하며, 계산시간은 행렬의 크기에 따라 기하급수적으로 증가하기 때문에 너무 큰 차수(예를 들어 수백)의 모형에 대해서는 계산이 거의 불가능하다. 이러한 계산상의 문제를 해결하기 위해 서브밴드 신호처리 기법을 이용할 수 있다. 서브밴드 신호처리 기법은, 이산 신호를 저

샘플링 된 다중의 주파수 밴드 신호로 분해하고, 모수모형을 적용한 다음, 다시 폴 밴드의 신호로 복원하는 기법이다⁽⁷⁾. 서브밴드 신호처리 기법은 로드노이즈 옥타브 밴드 모델링에 성공적으로 적용된 바 있으며⁽⁸⁾, 이 연구에서는 폴밴드를 512개로 균등하게 분할 된 서브밴드로 나누어 신호 처리하는데 이용되었다.

모수 추정에서는 보통 가용 데이터를 두 그룹으로 나누고 첫 번째 그룹의 데이터를 이용해 모수를 추정하며, 두 번째 그룹의 데이터는 추정된 모형을 검증하는 데 사용한다. 이 논문에서도 같은 맥락에서 결과를 보였다. 모수 추정에 사용된 데이터에 대해서 모형을 적용한 결과와 모형 추정과는 독립적인 데이터 그룹에 대해서 모형을 적용한 결과를 같이 제시하여 비교할 수 있도록 하였다. 추정 모형이 시스템의 동적인 특성에 부합하는 방향보다는 특정 데이터에 단순히 수치상으로 부합하는 방향으로 최적화되었을



(a) Nonparametric method



(b) Parametric method

Fig. 5 Comparison of predicted signals between non-parametric method and parametric method

가능성이 있으므로 별도의 데이터로 모형을 검증하는 것이다. Fig. 5는 이 연구에서 소개한 주파수 영역과 시간 영역 시스템 식별기법에 근거한 로드노이즈 추출방법을 모델링에 사용한 데이터와는 독립적인 데이터를 사용하여 검증한 결과이다. 두 방법 모두 실제 측정된 신호를 비슷하게 예측하는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

주파수 영역 시스템 식별기법에 기반을 둔 비모수 모형과 시간 영역 시스템 식별기법에 기반을 둔 모수모형 모두를 MATLAB®으로 구현하고 분석 결과를 비교하였다. 비모수 모형의 경우에는 약 20초, 모수모형의 경우에는 약 10초 정도의 데이터만 있으면 모형을 추정하는 데 충분하였다.

비모수 모형의 경우에는 힐버트 변환 관계를 이용하여 주파수 응답 함수가 인과성을 갖도록 하는 것이 중요한 것으로 판단된다. 주파수 스펙트럼 상으로는 비인과적 주파수 응답 함수가 로드노이즈를 좀 더 잘 추출하는 것으로 보이나 실제로 추출된 신호를 들어 본 결과 인과적 필터를 사용한 경우가 훨씬 더 그럴듯하였다.

모수모형을 적용하기 위해서 주파수 밴드를 다수의 서브밴드로 나누었으며, 각 밴드마다 저 차의 ARX 모형을 사용하였다. 모수모형을 사용한 경우에는 좀 더 짧은 길이의 데이터만을 사용해서 로드노이즈를 추출하는 것이 가능하였고, 비모수 모형에 비하여 작은 감쇠를 가지는 스펙트럼 상의 피크 성분을 더 잘 모델링 하였다. 비모수 모형과 모수모형 모두에서 비교적 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

이 연구에서 제시한 로드노이즈 추출 방법은 로드노이즈의 실내소음에 대한 기여도 평가, 로드노이즈 감성평가, 로드노이즈 모델링 및 시뮬레이션에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

(1) Ko, K.-H., Heo, S.-J. and Kook, H., 2003, Integrated Test and Evaluation for Improvement of

Vehicle Road Noise, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 13, No. 5, pp. 327~333.

(2) Cho, Y.-H., Ko, K.-H., Heo, S.-J. Kook, H., Kim, C.-M. and Ki, J.-H., 2002, A Test Procedure for Road Noise Evaluation, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 980~985.

(3) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 2000, Random Data: Analysis and Measurement procedures. 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc. New York.

(4) Strang, G., 1988, Linear Algebra and Its Applications, 3rd ed., Harcourt Brace Jovanovich, Inc. Orlando, Florida.

(5) Oppenheim, A. V. and Schaffer, R. W., 1989, Discrete-time Signal Processing, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

(6) Ljung, L., 1999, System Identification: The Theory for the User, 2nd ed., Prentice-Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey.

(7) Vetterli, M. and Kovacevic, J., 1995, Wavelets and Subband Coding, Prentice-Hall PTR, Englewood Cliffs, New Jersey.

(8) Kook, H.-S., Ih, K.-D. and Kim, H.-G., 2015, Modeling and Simulation of Road Noise by Using and Autoregressive Model, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 12, pp. 888~894.



Hyung-Seok Kook is a professor at Department of Automotive Engineering, Kookmin Univ. He received Ph.D. in mechanical engineering from Purdue Univ. in 1997. His research interests are general NVH-related topics, such

as noise and vibration control in automobiles, noise source identification and sound visualization, and test methodology, simulation, evaluation, and engineering of vehicle's NVH.