

자기회귀 모형을 이용한 로드노이즈 모델링과 시뮬레이션

Modeling and Simulation of Road Noise by Using an Autoregressive Model

국형석[†]·이강덕^{*}·김형건^{*}

Hyung-Seok Kook, Kang-Duck Ih and Hyoung-Gun Kim

(Received November 11, 2015 ; Revised November 11, 2015 ; Accepted November 25, 2015)

Key Words : Road Noise Simulation(로드노이즈 시뮬레이션), NVH Simulator(NVH 시뮬레이터), Nonstationary Parametric Model(비정상 모수 모델), Wavelet Filter Bank(웨이블렛 필터뱅크), Stochastic Time-series (스토캐스틱 시계열)

ABSTRACT

A new method for the simulation of the vehicle's interior road noise is proposed in the present study. The road noise model can synthesize road noise of a vehicle for varying driving speed within a range. In the proposed method, interior road noise is considered as a stochastic time-series, and is modeled by a nonstationary parametric model via two steps. First, each interior road noise signal, obtained from constant speed driving tests performed within a range of speed, is modeled as an autoregressive model whose parameters are estimated by using a standard method. Finally, the parameters obtained for different driving speeds are interpolated based on the varying driving speed to yield a time-varying autoregressive model. To model a full band road noise, audible frequency range is divided into an octave band using a wavelet filter bank, and the road noise in each octave band is modeled.

기 호 설 명

- a_k : k 번째 모수
- $e(t)$: 스토캐스틱 시계열 모형의 잔여
- n_a : 자기회귀 모형의 차수
- $u(t)$: 주행 속도
- q^{-1} : 후방 연산자
- $x(t)$: 스토캐스틱 시계열

1. 서 론

운전자는 차종과 세그먼트에 어울리고 운전 조작

에 따른 차량의 적절한 반응을 소리로 즉각 확인할 수 있는 음질을 기대한다. 차량의 성능에 어울리는 음질은 소비자가 차량을 구매할 때 중요하게 생각하는 것 중의 하나이다. 이에 따라, 차량 NVH개발도 단순한 소음레벨의 저감을 목표로 하는 것에서 벗어나, 소비자에게 감성적으로 만족감을 줄 수 있으며 브랜드 이미지에 부합하는 음질을 개발하는 것에 점점 더 중점을 두고 있다.

차량의 주행소음도 이러한 음질의 관점에서 시험하고 평가하는 추세이다^(1,2). 전통적으로 NVH개발부서에서는 시험 조건이 정확화되고 일정하게 유지할 수 있는 평가 환경에서 반복적으로 측정할 수 있는 객관적인 수치를 바탕으로 차량의 주행소음 평가를

† Corresponding Author ; Member, Department of Automotive Engineering, Kookmin University
E-mail : kook@kookmin.ac.kr
* Member, Hyundai Motor Company

‡ Recommended by Editor Il Kwon Oh
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

하였으나, 소비자는 다양한 환경에서 차량을 자유롭게 운전할 때 느끼는 감성적인 만족으로 차량의 NVH 성능을 평가한다.

따라서, NVH 엔지니어와 소비자가 차량의 NVH 성능을 평가하는 방식이 다르므로, 둘 사이의 간극을 줄이기 위해서는 전통적인 방법과는 다소 다른 평가 방법이 필요하다. NVH 시뮬레이터는 소비자의 입장에서 차량의 음질을 감성적으로 평가하는 것을 가능하게 해주는 시스템이다. NVH 시뮬레이터를 이용하면 운전자(또는 음질 평가자)는 실내에 마련된 실차량 기반 또는 데스크탑 기반의 차량 시뮬레이터에서 자유롭게 운전하며 차량의 주행소음을 평가할 수 있어, 차량 NVH개발에 이용될 수 있다^(3,4,5).

NVH 시뮬레이터를 이용하여 자유로운 운전 상황에 맞는 차량 주행소음의 시뮬레이션이 가능하기 위해서는 주행 실내소음의 주요 성분인 로드노이즈, 윈드노이즈, 파워트레인노이즈를 주행속도, 풍향·풍속, 엔진 RPM 및 부하의 변화에 따라 실시간 시뮬레이션이 가능해야 한다. 이 연구에서는 주행속도의 변화에 따른 로드노이즈의 시뮬레이션 기법에 관하여 연구하였다.

먼저 기존의 로드노이즈 시뮬레이션 방법에 관하여 간단히 설명하면 다음과 같다. 정속주행시험을 여러 단계의 속도로 실시하여 실내소음을 마이크로폰으로 녹음한다. 녹음된 실내소음에는 로드노이즈 뿐만 아니라 엔진노이즈와 윈드노이즈도 포함되어 있으므로 이러한 성분을 적절한 방법으로 제거하여 로드노이즈 성분만을 뽑아내야 한다. 엔진노이즈의 하모닉 성분을 제거하기 위해 TSA(time synchronous averaging) 방법⁽⁶⁾, 또는 오더 트래킹 필터⁽⁷⁾를 이용할 수 있다. 두 방법 모두 엔진 타코 신호와 같은 엔진의 회전에 관한 측정 정보가 필요하다.

엔진 하모닉 소음성분이 제거된 소음신호에서 로드노이즈를 분리하기 위하여 흔히 네 개의 휠 부에 가속도계와 마이크로폰을 부착하여 여기서 얻은 신호와 상관성이 있는 실내소음을 분리한 것을 로드노이즈로 간주한다. 가속도계는 너클에, 마이크로폰은 휠하우스에 부착할 수 있다. 이렇게 분리된 로드노이즈는 속도 별로 정리되어 시험하지 않은 주행속도에서의 로드노이즈를 합성하는데 쓰인다⁽⁸⁾. 이 때 가장 많이 사용하는 방법은 두 정속주행 로드노이즈의 블렌딩이다. 예를 들어 시험데이터가

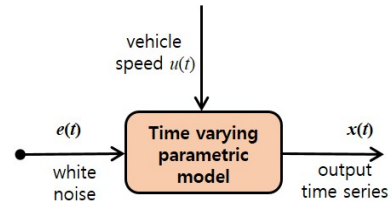


Fig. 1 A parametric model for road noise simulation

없는 75 km/h에서의 로드노이즈를 합성하기 위해서 정속주행시험 데이터가 있는 70 km/h와 90 km/h에서 추출한 로드노이즈를 각각 75%와 25% 블렌딩하여 합성해내는 방식이다.

이 연구에서는 블렌딩 방식이 아닌 모수 모형(parametric model)을 이용한 로드노이즈 모델링과 시뮬레이션 방법을 제안하고자 한다. 자기회귀 모형(autoregressive model)과 같은 모수 모형은 데이터의 저장 요구량이 작은 장점이 있다. Fig. 1에 모수 모형을 이용한 로드노이즈의 시뮬레이션을 블록선도 개념으로 표현하였다. 블록선도에서 입력 신호 $e(t)$ 는 스토캐스틱 백색소음이며 블록으로 묘사된 디지털 필터를 통과하여 로드노이즈와 유사한 소리 신호를 만드는 구조이다. 디지털 필터의 탭 값이 일정하면 변화하는 주행속도의 로드노이즈를 합성할 수 없기 때문에 주행속도 $u(t)$ 에 따라 모수가 정해진 규칙대로 시시각각 변화하는 시변(time-varying) 모수 모형의 구조를 가지고 있다.

2. 로드노이즈 모델링

2.1 오더 성분 소음의 제거

세단 형 시험차량의 운전석과 조수석 각각 좌우 귀 위치에 한 쌍의 마이크로폰으로 실내소음을 측정하였으며, 동시에 각 휠에서 3축 가속도계와 표면마이크로폰을 이용하여 로드노이즈의 레퍼런스 신호로 활용할 수 있는 신호들을 주행 중 측정하였다. 또한 엔진 회전속도와 전륜 회전속도를 타코 펄스신호로 측정하였다.

로드노이즈 모델링을 위하여 70 km/h, 90 km/h, 110 km/h에서 측정한 정속주행시험 데이터를 이용하였다. 윈드노이즈 성분은 크지 않은 것으로 가정하고 측정된 실내소음 신호에서 엔진 및 휠 회전에 관련된 하모닉 소음성분만을 제거한 것을 로드노이즈로 간주

하였다. 하모닉 소음제거에는 Vold-Kalman 오더 트래킹 필터를 이용하였다⁽⁷⁾.

전륜 회전수의 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 오더와 실내소음의 rpm-frequency 스펙트로그램(spectrogram)에서 확인되는 주요 엔진 오더 성분을 차례대로 제거하였다. 제거된 엔진 오더 성분에는 엔진 회전수의 정수 및 0.5 오더 성분뿐만이 아니라 2.94, 3.84와 같은 비정수 오더 성분도 다수 있었다. Fig. 2는 오더 성분 제거전과 후의 한 정속주행시험 데이터의 실내소음 주파수 스펙트럼을 보여준다. 그림에서 붉은 색은 엔진 하모닉 오더 성분이며, 하늘색은 전륜 회전 오더 성분을 나타낸다. 로드노이즈로 간주할 수 있는 최종적인 소음신호의 스펙트럼은 회색으로 표시하였다.

오더 성분의 제거 결과 대부분의 주파수 영역에서 강한 톤소음 성분은 없어지거나 상당히 약해지지만, 30 Hz 이하의 저주파에서는 주행속도에 따라 피크가 없어지지 않고 남아 있는 것을 확인 할 수 있었는데, 차체나 새시의 저주파 진동모드의 공진과 연관 있을 것으로 판단된다. 고주파에서도 일부 남아 있는 스펙트럼의 피크는 정속주행속도와 관련이 없이 일정한 주파수에서 관찰되었으며, 진동 또는 음향모드의 공진에 의한 것으로 추정된다. Fig. 2의 주파수 스펙트럼에서 1~2 kHz 주파수 밴드에 존재하는 피크성분들이 시스템의 음향-진동모드와 연관된 것으로 판단된다.

Fig. 3은 가속시험에서 측정한 실내소음과 엔진 하모닉 오더 성분을 시간 영역에서 표시한 것이다. 초기 5~10초 동안은 엔진 하모닉 소음이 실내소음의 대부분을 차지하지만, 그 후에는 엔진노이즈의 기여도가 낮아지는 것을 알 수 있다. 12초 이후에 관찰되는 높은 레벨의 충격음은 타이어가 노면과 노면을 잇는 틈새를 통과 할 때 발생한다. 충격음을 확대하여 관찰한 결과 공진 주파수는 약 30 Hz이며, 저주파의 차체 및 새시의 고유 진동과 연관된 것으로 추정된다.

2.2 자기회귀 모형과 서브 밴드 모델링

이 연구에서 제안하는 로드노이즈 모형의 기본형태는 Fig. 1에 보였던 모수 모형이다. 모수 모형에서는 로드노이즈 신호를 스토캐스틱 과정(stochastic process)의 확률 변수(random variable)로 모형화 한

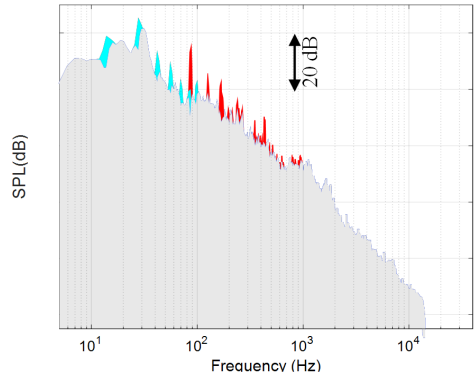


Fig. 2 Harmonic components(denoted by red and cyan) and the rest(denoted by gray) of a vehicle's interior noise measured at the driver's ear position when driving at a constant speed

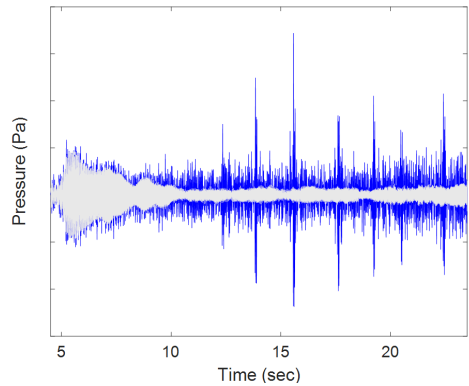


Fig. 3 Vehicle's interior noise measured at the driver's ear position when running-up with WOT: total noise(blue), sum of the engine harmonic order components(gray)

다. 자기회귀 모형은 모수 모형 중에서 가장 간단하면서도 유용하여 자주 쓰이는 모델이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = -\sum_{k=1}^{n_a} a_k x(t-k) + e(t) \tag{1}$$

여기서 $x(t)$ 는 스토캐스틱 시계열(time series)이며, a_k 는 모수, n_a 는 모수의 개수이며 차수라고 한다. 가상의 입력 신호 $e(t)$ 는 시스템의 출력 $x(t)$ 를 확정적으로 예측할 수 없게 만드는 부분이며, 이노베이션(innovation) 또는 잔여(residual)라고 한다. $e(t)$ 는 독립적이고, 동일한 확률분포를 가지는 확률 변수이다. 만

약 $e(t)$ 가 정규 분포라면 $x(t)$ 도 정규 분포이다.

다음과 같이 정의되는 후방 연산자(backward shift operator) q^{-1} 을 도입하면,

$$q^{-1}x(t) \triangleq x(t-1) \tag{2}$$

식 (1)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(q)x(t) = e(t) \tag{3}$$

여기서 $A(q)$ 는,

$$A(q) = 1 + \sum_{k=1}^{n_a} a_k q^{-k} \tag{4}$$

이며, $A(z) = 0$ 을 만족하는 z 를 극점이라고 하는데, 모든 극점이 복소수 평면의 단위 원(unit circle) 안쪽에 있으면 안정적인 시스템이다⁽⁹⁾.

식 (1)의 모수 모형으로 엔진 하모닉 성분이 제거된 로드노이즈를 시뮬레이션 할 수 있지만 모수가 시불변이므로 정상적 신호(stationary signal), 즉, 주행속도가 일정한 경우의 정상적 로드노이즈 만을 시뮬레이션 할 수 있다. 주행속도에 따라 피치와 라우드니스(loudness)가 바뀌는 로드노이즈를 시뮬레이션 하기 위해서는, 모수도 주행속도에 따라 적절하게 바뀌어야 한다. 이것은 시변 모수 모델링 방법을 활용하여 구현될 수 있다. 시변 모수 모형에서 가장 많이 쓰는 방법은 기저함수를 정의하고 기저함수의 선형 조합으로 시변 모수를 표현하는 방법이다⁽¹⁰⁾. 기저 함수는 푸리에 급수, 멱 급수 등 다양한 형태의 함수를 사용할 수 있는데, 이 연구에서는 주행속도 u 에 대한 기저 함수를, $1, u, u^2$ 로 정하고, 이것들의 선형 조합으로 모수를 모델링 하였다. 즉,

$$a_k(u) = a_{k1} + a_{k2}u + a_{k3}u^2 \tag{5}$$

식 (5)에서 볼 수 있는 것처럼 모수는 주행속도 u 의 이차 함수로 모델링 하였으며, 주행속도 u 가 70 km/h, 90 km/h, 110 km/h일 때 식 (5)의 모수 a_k 가 해당 정속주행 로드노이즈를 시뮬레이션 할 수 있는 시불변 모수 모형의 모수 값과 동일하게 되도록 가중치 a_{k1}, a_{k2}, a_{k3} 를 정할 수 있다. 결과적으로, 70 km/h ~ 110 km/h 구간에서, 주행속도가 70 km/h, 90 km/h, 110 km/h일 때 정해지는 시불변 모수를 기

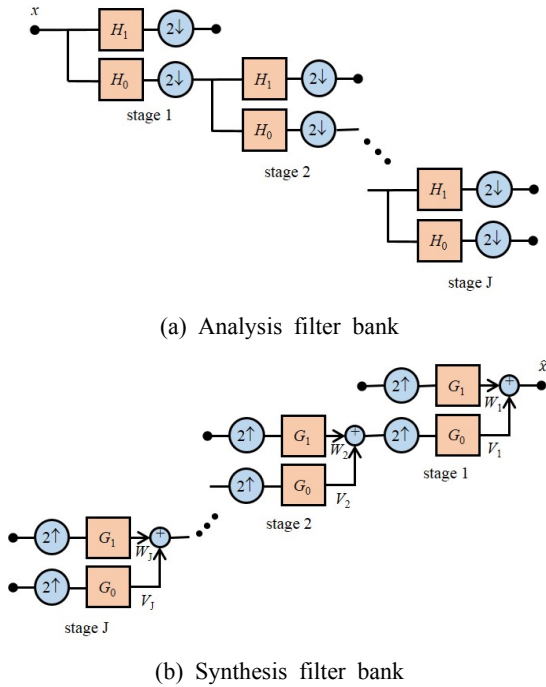
준으로 시험하지 않은 주행속도에 대한 모수를 속도의 이차 함수를 이용한 보간으로 계산하는 방식이다.

풀 밴드(full band)의 로드노이즈에 대하여 모수 모형을 적용하기 위해서는 의외로 큰 차수의 모형이 필요할 수 있다. 모수 추정 알고리즘의 내부에서 다루는 행렬의 크기는 모형의 차수에 따라 증가하기 때문에 너무 큰 차수(예를 들어 수 백)의 모형에 대해서는 PC에서 계산이 불가능하며, 계산 가능하더라도 비현실적으로 연산 시간이 길어질 수 있다.

이러한 계산상의 문제를 해결하기 위해 풀 밴드를 서브 밴드로 나누어 처리하는 기법을 이용할 수 있다. 서브 밴드 모델링 기법은, 이산 신호를 저 샘플링 된 다중의 주파수 밴드 신호로 분해하고, 모수적 모형을 적용한 다음, 다시 풀 밴드의 신호로 복원하는 기법이다.

서브 밴드 신호처리에는 다양한 방법이 있으나, 이 연구에서는 신호를 고주파와 저주파로 분해하고 다시 완전 복원(PR: perfect reconstruction)하는 2채널 필터 뱅크(filter bank)를 기본으로 하는 서브 밴드 신호처리 방법을 채택하였다. 2채널 필터 뱅크는 신호를 각각 저주파와 고주파로 분해하는 저역 통과 필터와 고역 통과 필터, 그리고 필터링 된 신호의 샘플링 주파수를 절반으로 줄여주는 데시메이터(decimator)로 이루어진 분석 필터 뱅크(analysis filter bank)와 샘플링 주파수를 두 배로 올려주는 인터폴레이터(interpolator)와 그 과정에서 발생하는 에일리어스를 제거하기 위해 저주파 신호와 고주파 신호를 저역 통과 필터와 고역 통과 필터로 각각 필터링하는 합성 필터 뱅크(synthesis filter bank)로 이루어진다⁽¹¹⁾. 2채널 필터 뱅크의 저주파 브랜치에 2채널 필터 뱅크를 계속 연결해지면 Fig. 4에 도시한 것처럼 옥타브 필터 뱅크를 구성할 수 있다. Fig. 4(a)에서 H_0, H_1 은 각각 분석 필터 뱅크의 저역 통과 필터와 고역 통과 필터이며, Fig. 4(b)에서 G_0, G_1 은 각각 합성 필터 뱅크의 저역 통과 필터와 고역 통과 필터이다.

Fig. 4는 2채널 필터가 J단계의 트리(tree) 구조로 계층적으로 연결된 모습을 보여주며, 계층 구조의 필터 뱅크로 총 J+1개의 옥타브 밴드를 얻을 수 있다. 데이터 계층에 사용한 샘플링 주파수가 32 768 Hz였기 때문에 고주파의 상한선은 16 384 Hz이며 9~10 단계의 계층구조를 사용하여 얻을 수 있는 옥타브



(a) Analysis filter bank

(b) Synthesis filter bank

Fig. 4 An octave-band filter bank with J stages. Figure is a reproduced version of Fig. 3.8 in M. Vetterli and J. Kovacevic⁽¹¹⁾

밴드 주파수 하한선은 8 Hz ~ 16 Hz 이어서 가청 주파수 전체 범위를 포함하기에 충분하였다. 필터 뱅크의 분석 필터와 합성 필터는 Matlab®에서 제공하는 탭수가 90개인 Daubechies(db45) 웨이블릿 필터를 사용하였다.

2.3 모델링 및 시뮬레이션 결과

옥타브 필터 뱅크의 분석 필터 뱅크를 이용하여 정속주행시험에서 추출된 로드노이즈 신호를 10개의 옥타브 서브 밴드에서 10차의 자기회귀 모형을 이용하여 모델링 하였으며, Matlab®에서 제공하는 기본함수를 이용하여 모수를 추정하였다.

Fig. 5에 5번째 옥타브 밴드(512 Hz ~ 1024 Hz)에서 추정한 세 정속주행시험 데이터의 자기회귀 모형의 모수와 주행속도 u에 대한 2차 함수를 이용한 모수 변화를 보였다. Fig. 6에 5번째 옥타브 밴드에서 모델링 시변 모수 모형의 극점이 주행속도에 대하여 변화하는 모습을 보였다. 주행속도가 변화하더라도 극점이 단위 원 안에 있어 모수 모형이 안정적이라는 것을 알 수 있다.

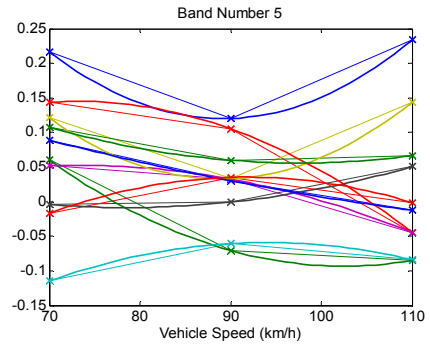


Fig. 5 Interpolated parameters as functions of vehicle speed

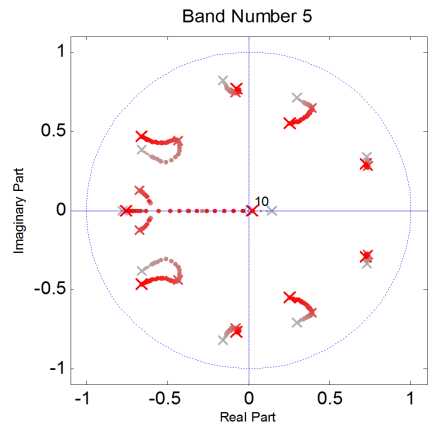


Fig. 6 Loci of varying pole positions in the unit circle

Fig. 7은 90 km/h의 정속 주행시험에서 측정된 실내소음에서 2.1절에 기술한 방법을 이용해서 하모닉 성분을 제거한 나머지 실내소음의 주파수 스펙트럼과 해당 정속 조건에서 모수 모형을 시뮬레이션 하여 합성한 로드노이즈의 주파수 스펙트럼을 비교해 보여준다. 즉, 엔진에 의한 하모닉 소음성분은 배제한 채 로드노이즈 성분만을 비교하고자 하였다. 스펙트럼상으로 상당히 비슷하며, 실제 번갈아 들어도 구분이 안될 만큼 시험에서 얻은 로드노이즈를 실감 있게 재현 할 수 있었다.

Fig. 8은 가속주행시험에서 측정된 실내소음에서 하모닉 성분을 제거한 나머지 실내소음의 주파수 스펙트럼과 가속주행시험에서 측정된 주행속도와 같은 조건으로 모수 모형을 시뮬레이션 하여 합성한 로드노이즈의 주파수 스펙트럼을 비교한 것이다. 합성한 로드노이즈의 스펙트럼이 약 1kHz 주파수

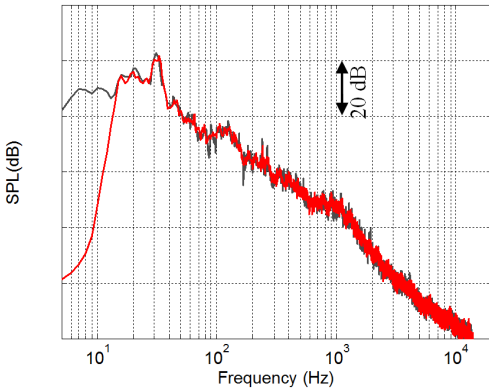


Fig. 7 Comparison of simulated road noise(red) and measured road noise(grey) for a constant cruising speed

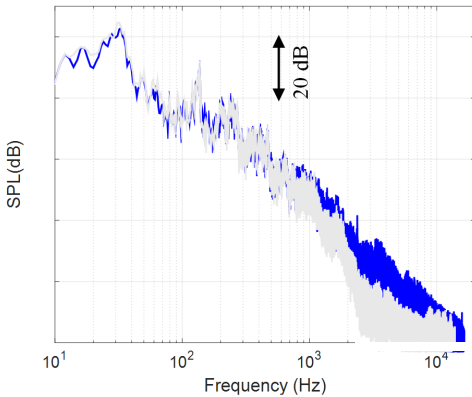


Fig. 8 Comparison of simulated road noise(gray) and measured road noise(blue) for the condition of a run-up test

대역까지는 측정된 스펙트럼과 거의 비슷하지만, 그 이후의 고주파 대역에서는 측정된 스펙트럼과 차이가 있었다. 이것은 정속 주행시험에서 발생하지 않았거나 소음레벨이 상대적으로 작았던 소음원이 가속주행시험에서 두드러지게 나타난 것으로, 엔진의 하모닉과는 연관이 없는 흡·배기계 소음에 의한 것으로 추정된다. 흡·배기계 소음은 광대역의 공기진달 소음이며 엔진 하모닉 소음성분과 같이 파워트레인 소음으로 모델링되어 시뮬레이션 되어야 한다.

3. 결 론

이 논문에서는 자기회귀 모형을 이용해서 로드노

이즈를 시계열로 모델링하고 시뮬레이션 하였다. 가청 주파수 전 영역에서 로드노이즈를 합성하기 위해서 분석 필터 뱅크를 이용하여 풀 밴드의 신호를 10개의 옥타브 서브 밴드로 분해하였다. 서브 밴드로 분해된 로드노이즈를 10차의 자기회귀 모형을 이용하여 밴드마다 독립적으로 모델링 하였다. 밴드별로 모형을 이용하여 시뮬레이션 한 서브 밴드의 로드노이즈를 다시 합성 필터 뱅크를 이용하여 풀 밴드의 로드노이즈로 합성하였다.

모수 모형으로 합성한 정속 주행의 로드노이즈는 시험에서 측정된 로드노이즈와 귀로 들어서는 구분하기 힘들 정도로 유사하였다. 가속 주행 로드노이즈의 경우 흡·배기계 소음에 영향 받지 않는 1 kHz 이하의 주파수 대역에서 모형으로 합성한 로드노이즈와 시험에서 측정된 로드노이즈의 스펙트럼이 잘 일치하였다. 이 연구에서 제시한 방법의 로드노이즈 모형은 모수 모형의 형태로 데이터의 크기가 작지만 사실적인 로드노이즈를 재현할 수 있어, NVH 시뮬레이터에 활용할 수 있다.

References

- (1) Lim, J.-T. and Lee, S.-K., 2007, Development of Sound Quality Index of a SUV' Axle for Evaluation of Enhancement of Sound Quality Based on Human Sensibility, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 4, pp. 298~309.
- (2) Park, S.-G., Lee, H.-J., Bae, C.-Y. and Oh, J.-E., 2008, Sound Quality Evaluation of Interior Noise of Driving Vehicle Using Mahalanobis Distance, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 57~60.
- (3) Allman-Ward, M., Venor, J., Williams, R., Cockrill, M., Distler, H., Crewe, A. and Heinz, T., 2003, The Interactive NVH Simulator as a Practical Engineering Tool, SAE Paper 2003-01-1505.
- (4) Genuit, K., 2004, The Sound Quality of Vehicle Interior Noise: A Challenge for the NVH-Engineers, International Journal of Vehicle Noise and Vibration, Vol. 1, Nos. 1/2, pp. 158~168.
- (5) Kavarana, F., Taschuk, G., Schiller, T. and Bogema, D., 2009, An Efficient Approach to Improving Vehicle Acceleration Sound Quality using an NVH

Simulator, SAE Paper 2009-01-2190.

(6) Bechhoefer, E. and Kingsley, M., 2009, A Review of Time Synchronous Average Algorithms, Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society, San Diego, CA, Sept., pp. 24~33.

(7) Herlufsen, H., Gade, S., Konstantin-Hansen, H. and Vold, H., 1999, Characteristics of the Vold-Kalman Order Tracking Filter, Sound and Vibration, Vol. 33, pp. 34~44.

(8) Heitbrink, D. A. and Cable, S., 2009, Design of a Driving Simulation Sound Engine, Driving Simulation Conference, North America 2007(DSC-NA 2007).

(9) Ljung, L., 1999, System Identification: the Theory for the User, 2nd Ed., Prentice Hall PTR.

(10) Grenier, Y., 1983, Time-dependent ARMA Modeling of Nonstationary Signals, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol.

ASSP-31, No. 4, pp. 899~911.

(11) Vetterli, M. and Kovacevic, J., 1995, Wavelets and Subband Coding, Prentice-hall.



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.