

# 가속주행하는 차량의 배기 토출 소음 예측

김 봉 기

한국기계연구원 음향연구그룹

## Tailpipe Noise Prediction of an Accelerating Vehicle

Bong-Ki, Kim

Acoustics Research Group, KIMM

bkkim@kimm.re.kr

### 요약문

가속 주행하는 차량의 소음을 줄이기 위해서는 각 소음원의 기여도를 파악하는 것이 필요하다. 본 논문에서는, 가속 주행하는 차량의 배기 토출 소음을 ISO362에서 규정한 음압 측정 지점에서 예측하기 위하여, 시간 영역에서 근접장 배기 토출 소음을 예측할 수 있는 시뮬레이션 프로그램 'WAVE'와 움직이는 음원의 방사 모델을 이용하였다. 가속 주행중 차량의 소음원에 의한 음파의 전달은 도플러 효과와 시간 지연이 발생하며, 이를 고려하여 정지된 지점에서의 소음레벨을 예측하였으며, 배기 토출 소음의 예측을 통하여 가속주행소음에 대한 기여도와 그 소음 특성을 파악할 수 있다.

### ABSTRACT

Analysis of the contribution of each pass-by noise source to the overall pass-by noise is an important issue for reduction of pass-by noise. A technical approach for predicting tailpipe noise is used to identify the contribution of tailpipe noise to the pass-by noise in this study. Simulation program with a time domain engine modeling program called 'WAVE' and wave propagation theory of moving noise source are employed. Since the Doppler phenomenon causes a frequency shift during a pass-by noise test, the Doppler correction and time delay effects are incorporated into the estimation of tailpipe noise. The

developed program can furnish an in-depth understanding of the effect of tailpipe to pass-by noise.

### 1. 서 론

최근 차량 개발 기간의 단축으로 인해 개발 단계에서 차량 소음의 특성과 그 크기를 예측하려는 노력이 이루어지고 있다. 특히, 가속 주행 소음의 경우 세계적으로 점점 그 규제치가 낮아지고 있으며, 이로 인해 가속주행 소음원의 특성과 그 기여도를 파악하는 것이 경제적, 기술적 측면에서 매우 중요하다 할 수 있다.[1,2] 본 연구에서는 엔진/배기계 사시스템의 개발단계에서, 가속주행시 주요 소음원의 하나인 배기 토출음의 특성과 그 크기를 예측하고자 한다. 이를 위해 엔진/배기계의 설계정보로부터 배기계 토출 소음을 예측할 수 있는 상용 프로그램 'WAVE'를 이용하여 근접장에서의 방사 소음을 예측하였다. 이로부터 움직이는 음원의 방사 모델을 이용하여 ISO363에서 규정한 가속주행 소음 측정위치에서 방사소음을 예측하였다.

### 2. Moving Source

움직이는 차량의 도플러 효과는 주파수 변화와 시간 지연으로 표현된다.[3] 이 현상은 order tracking과 주파수 해석에 있어서 오차를 유발할 수 있다.[4] 따라서, 가속주행하는 차량의 소음레벨을 예측하기 위해서는 움직이는 음원을 모델링하는 것이 필요하다. 이를 위해 본

연구에서는 정지된 매질에 대해 일정한 속도  $V$ 로 움직이는 단극 음원을 고려하였다. 음원 강도  $Q$ 를 시간과 공간 영역에서 표현하면 다음과 같다.

$$Q(r, t) = q(t)\delta(x - Vt)\delta(y)\delta(z), \quad (1)$$

여기서  $q(t)$  시간에 따라 변화하는 음원 강도이다. 따라서, 움직이는 음원에 의해 발생하는 음압은 다음과 같이 파동방정식의 지배를 받는다.

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\frac{\partial}{\partial t} q(t)\delta(x - Vt)\delta(y)\delta(z), \quad (2)$$

식(2)를 풀기 위하여 좌표변환을 하면 정지된 음원에 의한 일반적인 파동방정식을 얻을 수 있으며, 최종적으로 다음과 같이 아음속 영역에서의 방사음압을 얻을 수 있다.[5]

$$p = \frac{q'(t - \frac{R}{c})}{4\pi R(1 - M \cos \theta)^2} + \frac{q(\cos \theta - M)V}{4\pi R^2(1 - M \cos \theta)^2}. \quad (3)$$

여기서 그림 1에 나타난 음원의 방사 지점과 그 소음의 수음점 사이의 거리는 다음과 같다.

$$R = \frac{M(x - Vt) \pm R_1}{1 - M^2}, \quad R_1 = R(1 - M \cos \theta). \quad (4)$$

식 (3)에서 거리에 반비례하는 첫 번째 항은 Doppler 효과를 나타내는 시간 지연항을 포함하고 있음을 볼 수 있다.

### 3. 배기 토출소음의 예측

배기 토출음은 그 특성상 맥동소음(pulsation noise)과 기류소음(jet noise)으로 구성된다. 일반적으로 500 Hz 이상의 고주파수 성분을 갖는 기류소음의 경우, 단극음원 가정만으로 파동전파 해석을 할 수 없기 때문에, 본 연구에서는 맥동소음만을 다루기로 한다. WAVE에서의 엔진/배기계 모델링은 실린더 행정에 따른 시간 영역 해석에 기초하고 있기 때문에 모든 음향학적 변수들은 엔진의 크랭크 각에 의해 표현된다.[6] 또한, 엔진과 배기계 내부의 유동 해석시, 배기계 끝단은 일반적으로 대기압 조건을 사용하며, 배기계 끝단에서의 음향 방사는 다음 식과 같이 단극음원의 선형방사 모델을 이용한다.

$$p(t) = \frac{\rho}{4\pi R_{wave}} \frac{dS(t)}{dt} \quad (5)$$

여기서,  $p(t)$ 는 방사음압,  $\rho$ 는 공기밀도,  $R_{wave}$ 는 음원에서 측정점까지의 거리,  $S(t)$ 는 음원의 강도( $\pi^2 u(t)$ ),  $u(t)$ 는 토출구의 입자속도, 그리고  $r$ 은 토출구의 반경이다. 일반적으로 배기 토출 소음은 비선형 효과가 나타나는 음압레벨보다 높지 않기 때문에(<140dB), 선형모델은 유효하다고 볼 수 있다.

본 연구에서 예제로 사용된 엔진은 6기통이며, 배기

계는 catalysts, Y-junction, 파이프, 그리고 소음기로 구성되어 있다. RPM에 따라 변화하는 과도응답을 해석하기 위하여 시간영역에서 유한차분법을 이용하였고, 편의상 엔진 RPM은 선형적으로 변화한다고 가정하였다.

배기 토출소음은 WAVE를 이용한 엔진/배기계 해석과 식 (5)를 이용해 예측할 수 있으며, 이때 크랭크 각을 시간영역으로 변환하기 위해 resampling 방법을 이용하였다. 본 연구에서는 가속 주행하는 차량의 배기 토출음의 예측을 위해 다음과 같은 가정을 하였다.

1. 배기계 토출 방사 소음의 주요 주파수는 배기 토출부의 직경에 비해 충분히 큰 파장을 갖는다.
2. 바닥은 완전 강체이며, 반사파는 Snell의 법칙을 만족한다.
3. 가속주행 시험구간 내에서 차량의 평균 속도는, 소음을 방사하는 음원의 속도를 대표한다.

이러한 가정을 바탕으로 다음과 같은 과정을 거쳐 토출소음을 예측하였다.

1. WAVE 해석을 이용해 근접장에서 배기 토출음을 예측하고 음원의 강도를 계산한다
2. 차량의 이동거리에 따른 시간지연( $t-R/c$ )을 계산하고, 균등한 시간 간격을 갖도록 데이터를 resample 한다.
3. 음원강도로부터 음원의 체적속도를 구하고, 20Hz 이하의 저주파수 성분을 제거한다.
4. 바닥 반사를 고려하여, 가속주행소음 측정지점에서의 음압레벨을 계산한다.

그림 2는 WAVE 해석을 통해 얻은 근접장 음압이다. 해석 대상인 차량과 엔진의 주요 제원을 표 1에 나타내었다. 여기서 진입 RPM은 1650 rev/min이며 차량의 가속에 따라 선형적으로 변화한다고 가정하였다. 이로부터 토출부의 음원 강도를 예측하였다. 해석시 근접장 예측 지점과 배기 토출부의 거리는 0.01m 이고 그 외의 다른 기하학적 위치들은 표 1에 나타난 바와 같다. 본 연구에서는 스펙트럼 정보로부터 주요 소음원의 주파수 성분이 1kHz 이하에 있음을 알 수 있었고, 따라서 resampling 주파수를 2048Hz로 하였다. 소음원의 시간-주파수 특성 파악을 위해 그림 2와 같이 short-time Fourier transform을 수행했으며, 결과로부터 가속주행하는 동안 배기 토출음의 주요 소음원 주파수는 200 Hz 이내에 있으며, 이는 엔진의 폭발음의 3차 harmonic 성분임을 알 수 있다.

식 (3)을 이용하여 그림 4와 같이 가속 주행 측정지점에서 음압을 예측하였으며, 결과로부터 200Hz 이하의 소음 중 특히 엔진 폭발음의 3차 성분이 가장 크게 수

음점으로 전파됨을 알 수 있다. 그림 5는 A-weighting된 overall 음압레벨을 나타내며, 차량의 속도가 33.5mph의 경우 0.85초에서 최대 음압레벨을 나타내고 있다. 차량의 평균 속도 변화에 따른 가속주행 소음의 변화를 보기 위해 실제 주행차량의 최소, 최대, 그리고 평균 속도를 이용하여 가속주행 소음을 예측하였다. 결과로부터 차량의 속도가 증가하면 최대 음압레벨이 그림 5의 우측으로 약간 이동하지만 그 크기는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 특히 차량의 속도가 증가할수록 최대 음압레벨 이후의 소음이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이는 차량 속도의 증가로 인해 높은 RPM이 예측시에 고려되었고, 이로 인해 음압이 커졌기 때문이다. 약간의 변화에도 불구하고 전체적인 소음레벨의 경향은 큰 변화가 없으며, 따라서 가속을 무시하고 단지 평균 속도를 이용한 해석이 타당함을 확인할 수 있다. 그림 6은 가속주행소음 측정시 좌측, 우측 측정지점에서 예측된 배기 토출 소음이다. 차량의 진행거리는 속도와 시간으로부터 계산이 가능하며, 만일 토출 소음이 다른 가속주행 소음원과 uncorrelate 되어 있으면, 다음과 같이 토출 소음의 기여도를 계산할 수 있다.[7]

$$\%NC = \left\{ 10^{\frac{L_T - L_s}{10}} \right\} \times 100\% \quad (5)$$

여기서,  $L_T$ 은 가속주행소음,  $L_s$ 은 토출 소음이다. 한 예로, 만일 측정된 가속주행소음이 77dBA이고 그림 5와 같이 배기 토출 소음이 예측되었다면 그 기여도는 15.5%이다.

#### 4. 결론

엔진/배기계 해석용 상용 프로그램 WAVE를 이용하여 배기 토출음의 근접장 음압을 예측하고, 이로부터 Doppler효과와 시간지연을 고려하여 배기 토출음의 가속주행소음을 예측하였다. 결과로부터 맥동소음의 경우 단극 음원의 가정이 성립 가능한 200Hz 이하의 주파수 영역에서 주요 소음이 방사되고 있음을 알 수 있었다. 또한, 몇가지 주행속도에 따라 음압을 예측하고 비교함으로써, 가속주행차량의 평균 주행속도를 이용하면 정속으로 움직이는 음원모델을 사용해 예측할 수 있음을 확인하였다.

#### 참고 문헌

[1] P.J.G. van der Linden, D. Otte, and Van de Pongeele, "New developments in vehicle pass-by noise measurement and diagnosis techniques," Proc. of Inter-Noise 93, 715-720(1993).

[2] H. V. Auweraer, L. Hermans, D. Otte, and M. Klopotek, "Time dependent correlation analysis of truck pass-by-noise signals," SAE paper 971986.  
 [3] R. Vancauter, "A Doppler correction procedure for exterior pass-by noise testing," SAE Noise and Vibration conference, 97NV57.  
 [4] J. Leuridn, and H. V. Auweraer, "The analysis of nonstationary dynamic signals," Sound & Vibration 28, 14-26(1994).  
 [5] P. M. Morse and K. U. Ingard, *Theoretical Acoustics, Chapter 11*, Mcgraw-Hill Inc., NewYork.  
 [6] Ricardo Software: WAVE Manual for Acoustic Analysis.  
 [7] 소음제어기술 : 음향학의 기본 개념 및 응용 사례, Chapter 6, 한국과학기술원 NOVIC Center, 1998.

Table 1. Geometrical and driving conditions of the vehicle.

Vehicle		Tailpipe		Driving Condition	
No. of Cylinder	Length (ft)	Height (ft)	Offset from center(ft)	Entering RPM (rev/min)	Entering Speed (MPH)
6	14.3	1	1.67	1650	33.4

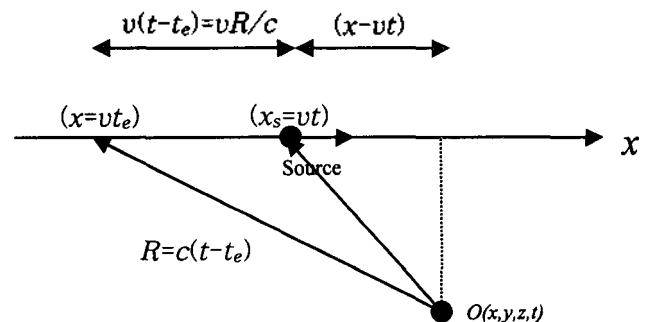


Fig.1. Geometrical configuration of a moving noise source.

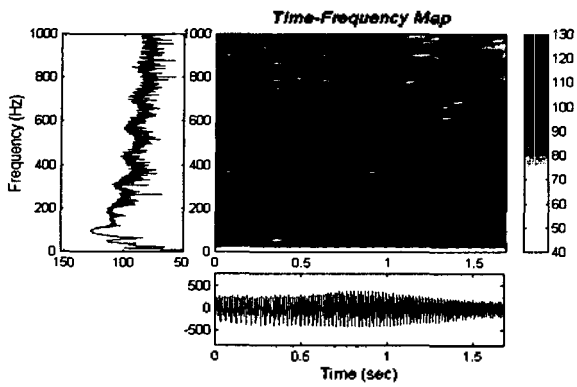


Fig.3. Time-frequency map and the spectrum of the near-field pressure.

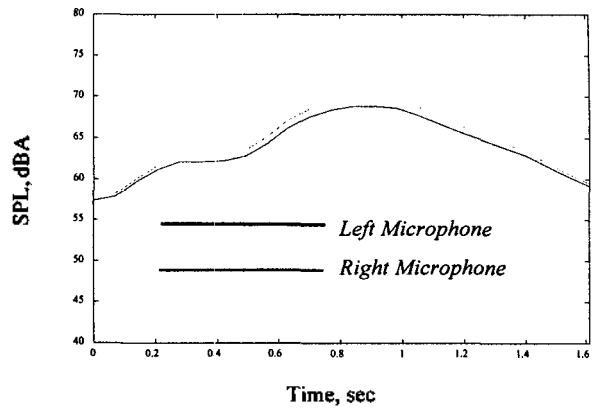


Fig.6. The predicted sound pressure of the tailpipe at the pass-by microphone.

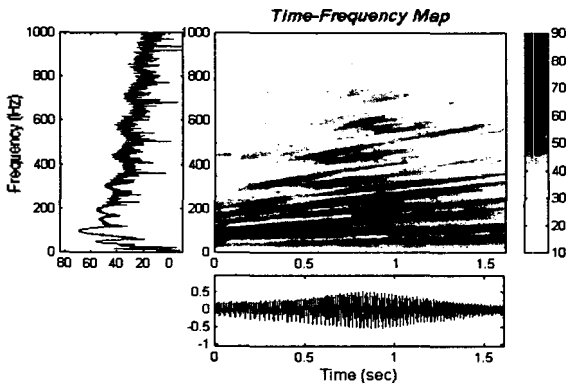


Fig.4. The predicted time-frequency map and the spectrum of the pass-by microphone.

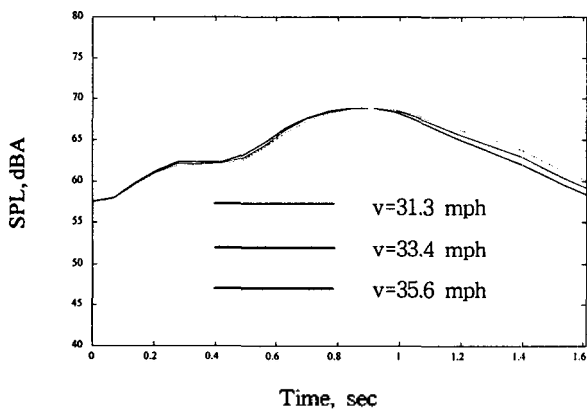


Fig.5. The predicted sound pressure of the tailpipe at the pass-by microphone.