

주행 차량의 엔진음을 이용한 속력 분석

최영수^{1,2)} · 박종찬²⁾ · 공승현^{*1)}

한국과학기술원 로봇공학제¹⁾ · 대전과학수사연구소 이공학과²⁾

Speed Analysis Based on Engine Sound of Driving Vehicle

Youngsoo Choi^{1,2)} · Jongchan Park²⁾ · Seung-Hyun Kong^{*1)}

¹⁾The Robotics Program, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 34141, Korea

²⁾Daejeon Institute, National Forensic Service, 1524 Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon 34054, Korea

(Received 31 August 2021 / Revised 5 October 2021 / Accepted 6 October 2021)

Abstract : Vehicle speed at the time of an accident has a significant impact on the reliability of the reconstruction of the traffic accident. Recently, vehicle speed analysis methods, based on acoustic data from cameras, have been studied to overcome the limitation of image data due to blind spots and environmental conditions. In this paper, we proposed a speed analysis technique based on external noise and the Doppler effect generated by a moving vehicle. In particular, the frequency of vehicle engine sound was analyzed by using STFT, and the speed of the vehicle with respect to time was estimated by correcting the two-dimensional Doppler effect. Finally, the reliability of the proposed method was verified through acoustic simulation by using Matlab and actual vehicle evaluation by using acoustic data from dashboard cameras. Therefore, the proposed technique that utilizes acoustic data from cameras under limited conditions could estimate the speed of the vehicle in an accident.

Key words : Vehicle speed(차량 속력), Traffic accident(교통 사고), Engine sound(엔진음), Doppler effect(도플러 효과), STFT(단시간 푸리에 변환)

1. 서 론

교통사고 분석에 있어 사고 전 차량의 속력은 사고 분석 결과의 신뢰성과 직결되는 매우 중요한 요소이다. 사고 당시 기본적인 교통법규 위반뿐 아니라 사고 회피 가능성 유무를 판단하고, 필요 시 교통사고 재구성의 필수 입력값으로 사용된다.¹⁾ 과거에는 사고 현장과 사고 차량에 남겨진 흔적을 통해 역학적 해석 기법으로 사고 전 차량의 속력을 추정하였지만,²⁾ 분석관의 역량과 주관적인 판단에 따른 편차가 크다는 한계가 있었다. 최근에는 블랙박스, CCTV 등과 같은 카메라의 보급이 폭발적으로 증가하고, 영상 분석이 비약적으로 발전하면서 지능형 교통시스템(ITS, Intelligent Transportation System)뿐 아니라,^{3,4)} 교통사고 분석에서도 영상 데이터가 적극적으로 활용되고 있다.⁵⁾ 하지만 영상을 활용한 방법은 제

시된 영상 데이터의 상태에 따라 해석 결과의 신뢰성이 크게 좌우된다. 카메라가 가지고 있는 화소나 화각, 녹화 시 주변 환경 조건에 따라 대상체를 구분할 수 없거나, 대상체가 영상 내 포함되지 않을 수 있다. 이에 카메라 영상 녹화 시 추가로 얻을 수 있는 음향 데이터를 이용하여 차량의 속력과 특징을 추정하는 연구가 진행되었다.^{6,7)} 일반적으로 음향 신호는 음원과 마이크로폰의 거리에 따라 구형파로 가정할 수 있고, 구면파로 가정될 경우, 모든 방향에서 음향 신호를 취득할 수 있어 카메라 영상과 비교하여 사각지대가 매우 작다는 장점이 있고, 단일 마이크로폰의 경우 카메라에 이미 설치되었거나 추가 설치가 쉬워 관리비, 설치비 등 경제적인 이점을 가지고 있다. 교통사고 분석 분야에서도 차량의 경직음을 이용하여 사고 전 차량의 속력을 분석하는 방법이

*Corresponding author, E-mail: skong@kaist.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

연구되었다.⁸⁾ 본 연구에서는 그 연장선으로 차량 엔진 음의 특징을 이용하고, 주변의 정차된 차량의 블랙박스나 CCTV에 음향 데이터만 녹음된 경우와 같은 제한적 조건을 가정하였다. 또한, 움직이는 음원의 속력을 계산하기 위해 마이크로폰과 음원 간의 기하학적 위치와 상대속도 차이에 의해 발생하는 도플러 효과를 보정하였다. 마지막으로 음향해석과 실차평가를 통해 사고 차량을 직선 주행 조건으로 가정할 경우, 제한적인 교통사고 분석 사례에서 적용 가능함을 확인하였다.

2. 차량 엔진룸 소음원

차량 엔진룸에서 발생하는 소음을 음원별로 구분하면 엔진음, 냉각계소음, 흡·배기계소음 등으로 나눌 수 있다.

2.1 엔진 소음

엔진 소음은 엔진이 구동할 때 발생하는 소음으로 연소 소음과 기계 소음으로 구분된다. 연소 소음은 엔진 실린더 내부의 연소 시 발생하는 폭발력에 의한 소음이고, 기계 소음은 피스톤, 커넥팅 로드의 관성력에 의한 소음, 벨브와 벨트 소음 그리고 엔진 부품 간의 마찰소음을 포함한다. 음향학적으로 엔진 소음은 결정적 성분(Deterministic component)과 통계적 성분(Stochastic component)으로 나눌 수 있다. 결정적 성분은 주로 흡기 시 공기의 교란 때문에 발생하는 소음원으로 다양한 주파수 대역을 가지는 특징이 있다. 통계적 성분은 엔진의 실린더 내 연소 시 발생하는 것으로 엔진 소음의 대부분을 차지한다. 통계적 성분의 가장 낮은 주파수는 한 개의 실린더에서의 폭발 주기를 의미한다. 예를 들어, 4행정 내연기관의 경우 엔진의 크랭크 샤프트가 2회전 하는 동안 각각의 실린더에서는 모두 한 번씩의 폭발과정이 있으며, 엔진진동수(F)는 아래 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \chi \times \frac{1}{60} \times \frac{2}{n} \times p \quad (1)$$

여기서, χ 는 엔진 RPM이며, n 은 행정수, p 는 실린더 개수를 의미한다. 따라서 실린더 수가 많을수록 주요 진동수 주파수가 높아지고, 조화(Harmonic)성분도 함께 발생한다. 4행정 엔진 기관의 경우에는 2차 성분(2nd order), 6행정 엔진 기관의 경우에는 3차 성분(3rd order)이 주 가진원에 해당한다. 또한, 4행정 엔진에서 가장 낮은 주파수인 실린더 주파수(f_0)는 아래 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$f_0 = \frac{\chi}{60 \times 2} \quad (2)$$

2.2 냉각계 소음

냉각계 소음은 차량 전면에 부착된 냉각팬(Cooling fan)의 팬 소음, 냉각팬과 라디에이터 사이에서 발생하는 와류 현상에 의한 소음 등으로 구성되어 있다. 따라서 냉각팬 자체의 벨런스나, 냉각팬과 라디에이터의 간격 등에 따라 소음의 크기가 결정된다.

2.3 흡·배기계 소음

흡·배기계 소음 중 맥동음은 엔진 연소에 따라 배기 가스가 배기밸브의 개폐로 인해 주기적으로 발생하는 것으로 엔진 폭발 주파수 성분과 같은 주기를 가지는 특징이 있다. 또한, 흡기, 배기관 내 공기에 흐름이 난류를 형성하면서 발생하는 기류음과 배기계 진동 때문에 발생하는 방사음 등으로 구성되어 있다.

3. 음향 신호의 분석

3.1 도플러 효과

도플러 효과는 음원과 관찰자의 상대속도에 의해 주파수가 달라지는 현상이며,⁹⁾ 음원의 이동 경로와 마이크로폰의 위치를 2차원 평면 관계로 나타내면 Fig. 1과 같고, 고정된 마이크로폰에서의 다가오는 음원의 속도는 식 (3)과 같다. 또한, 이로 인해 발생되는 2차원 도플러 효과는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$v_{sm} = v_s \cos\theta = \frac{v_s^2 t}{\sqrt{h^2 + (v_s t)^2}} \quad (3)$$

$$f_m = f_s \frac{c}{c + v_s \cos\theta} = f_s \frac{c}{c + \frac{v_s^2 t}{\sqrt{h^2 + (v_s t)^2}}} \quad (4)$$

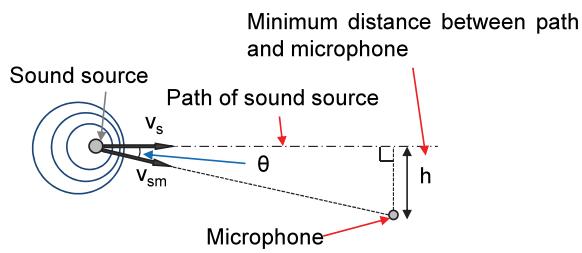


Fig. 1 2-D Geometry configuration of moving source and microphone

여기서 v_{sm} 와 h 는 각각 마이크로폰에서 바라본 음원의 속도, 그리고 음원의 경로와 마이크로폰 사이의 최소 거리를 의미하며, f_m 은 마이크로폰에서 수신된 신호의 주파수, f_s 는 음원에서 발생하는 신호의 주파수, v_m 은 마이크로폰의 이동속도, v_s 은 음원의 이동속도, c 는 공기 중에서의 음속을 나타낸다. $t=0$ 일 때는 음원과 마이크로폰의 상대 거리가 최소(h)인 시점을 나타내고, $t < 0$ 일 때는 음원이 마이크로폰으로 다가올 때를 의미하며, $t > 0$ 은 음원이 마이크로폰으로부터 멀어질 때를 나타낸다.

3.2 엔진음과 도플러 효과를 이용한 속력 계산

차량 주행 시 엔진에 의해 발생하는 회전운동이 차량의 바퀴로 전달되어 차량이 움직이는 데, 차량 바퀴로 동력이 전달될 때 변속기를 지나가면서 변속기의 기어비에 의해 차량 바퀴의 회전수가 결정되게 된다. 바퀴의 회전수가 결정되면, 바퀴의 원주 길이에 따라 직선운동의 속력이 계산될 수 있으며 아래 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v = 2\pi \times r \times \frac{\chi}{60 \times R_1 \times R_2} \quad (5)$$

r 은 타이어의 반지름, R_1 은 변속기 기어비, R_2 는 종감속 기어비를 나타낸다. 따라서 RPM을 제외한 나머지 항은 상수이므로 차량의 속력은 RPM과 비례관계이다. 엔진음의 주파수 모사를 위해 식(5)를 주파수로 표현하면, 속력을 제외한 나머지 변수를 비례상수 m 으로 치환하여 식(6), (7)로 나타낼 수 있다.

$$f = \frac{\chi}{60} = R_1 \times R_2 \times \frac{v}{2\pi \times r} = m \times v \quad (6)$$

$$m = R_1 \times R_2 \times \frac{1}{2\pi \times r} \quad (7)$$

마이크로폰 위치가 음원의 이동 경로상에 존재하는 ($h=0$) 상태라면, 식(6)의 f 와 v 를 각각 음원에 해당하는 f_s 와 v_s 로 표현하고, 음원이 마이크로폰으로 다가가는 조건일 경우, 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$v_s = \frac{cf_m}{cm + f_m} \quad (8)$$

나아가, 마이크로폰의 최소거리(h)로부터 2차원 도

플러 효과가 반영된 음원 속력을 구하기 위해서 식(8)을 식(4)에 대입하면, 식(9)와 같이 음원의 속력 v_s 에 대해 시간(t)과 주파수(f_m)가 변수인 4차 방정식으로 표현된다.

$$(m^2 c^2 t^2 - f_m^2 t^2) v_s^4 - (2f_m m c^2 t^2) v_s^3 + (f_m^2 c^2 t^2 + m^2 c^2 h^2) v_s^2 - (2f_m m c^2 h^2) v_s + (f_m^2 h^2 c^2) = 0 \quad (9)$$

따라서 시간에 따른 엔진음의 주파수와 최소거리(h), 주행 중인 차량의 기어 단수를 알면 차량의 이동 속력을 계산할 수 있다.

4. 음향 신호를 이용한 차량 속력 계산

4.1 음향해석

본 음향해석에서는 m 을 4로 가정하여 단일 기어 상태에서 직선 주행하는 차량의 등속, 등가속 상황을 모사하였다. 마이크로폰의 위치는 Fig. 2와 같이 음원의 이동 경로상에 있는 경우와 2 m, 5 m 떨어진 경우로 설정하였고 2차원 평면상의 음향해석을 위해 K-wave toolbox(Matlab)를 이용하였다.¹⁰⁾ 해석 범위는 가로 100 m, 세로 50 m로 설정하고, 격자(Mesh)의 간격은 0.1 m로, 공기 중 음속을 343 m/s로 설정하면, 해석 가능한 최대 주파수는 약 1.715 kHz이다. 해당 주파수는 일반적인 차량의 엔진 주파수 대역(~400 Hz)과 비교하여 충분히 높은 주파수 대역이다.

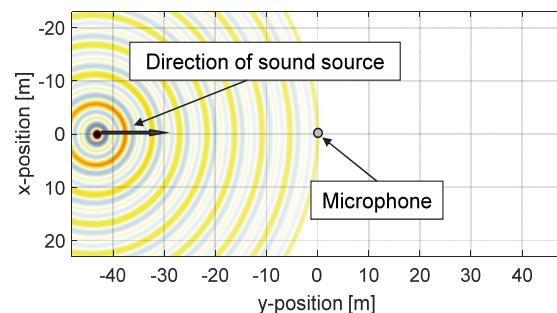


Fig. 2 Configuration of moving source and microphone in acoustic simulation

4.1.1 등속주행 차량의 엔진음 모사

엔진음 모사의 경우, 속력에 비례한 주파수를 가지기 때문에 25 m/s의 등속으로 이동하는 음원은 비례상수(m)를 곱한 100 Hz의 주파수를 가지는 순음이며, Fig. 3과 같은 신호와 주파수 특성을 가지고 있다.

다음으로 음원 이동 경로와의 최소거리가 0 m, 2 m, 5 m

떨어진 지점에 있는 마이크로폰에 녹음된 음향 신호는 Fig. 4와 같다. 등속으로 이동하는 음원의 특성으로 순음(Pure tone)과 같은 형태의 결과를 확인할 수 있다. 또한, 마이크로폰의 위치가 다른 세 경우 모두 음원과 마이크로폰의 거리가 최소가 되는 지점에서는 도플러 효과가 사라지고 음원의 원래 주파수와 같은 주파수가 마이크로폰에 저장된다. 마이크로폰에 가까워질 때는 실제 음원의 주파수보다 높게 측정이 되고, 마이크로폰에 멀어질 때는 실제 주파수보다 낮게 측정되는 도플러 효과가 나타난다. 또한, 마이크로폰이 위치한 최소거리(h)가 증가함에 따라 마이크로폰 주변에서 주파수 변화가 더 완만한 것을 볼 수 있다.

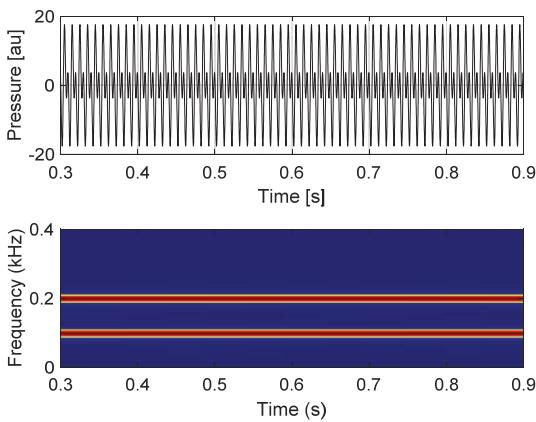


Fig. 3 Acoustic signal of moving source at constant speed

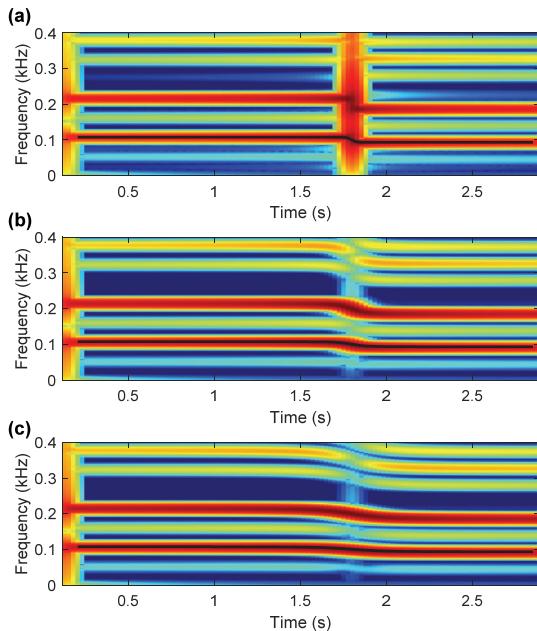


Fig. 4 STFT result of microphones at constant speed

(a) $h=0$ (b) $h=2$ (c) $h=5$

Matlab의 root 함수를 이용하여 Fig. 4에서 추출한 주파수(f_m)와 시간(t)에 따른 식(9)를 계산하면, 4개의 근을 구할 수 있으며,¹¹⁾ 각 해의 실근은 아래 Fig. 5와 같다. 구해진 실근을 시간(t)로 나타내면 4개의 Domain으로 나눌 수 있고, Domain 1에서는 1차원 도플러 효과만을 고려한 결과와 유사한 근을 취할 수 있으며, Domain 2,3에서는 직전 Domain과 연결될 수 있는 근, 즉 음원 속력의 연속성을 고려한 값을 취할 수 있다. 마지막으로 Domain 4에서는 1차원 도플러 효과만을 고려한 결과와 유사한 근을 취함으로써 2차원 도플러 효과를 고려한 음원의 속력을 추정하였다.

위 결과를 도플러 효과를 고려하지 않을 경우, 1차원 도플러 효과만을 고려한 경우, 마지막으로 2차원 도플러 효과를 고려한 경우로 나타내면 Fig. 6과 같다. 그 결과, Table 1과 같이 2차원 도플러 효과로 보정한 경우에

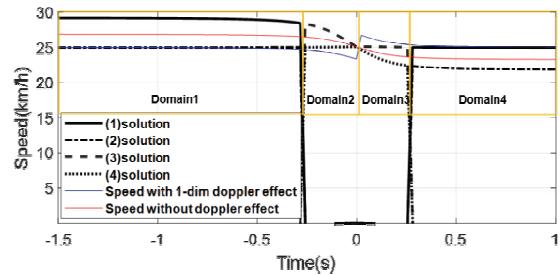


Fig. 5 Solutions of equation induced by 2-dim doppler effect

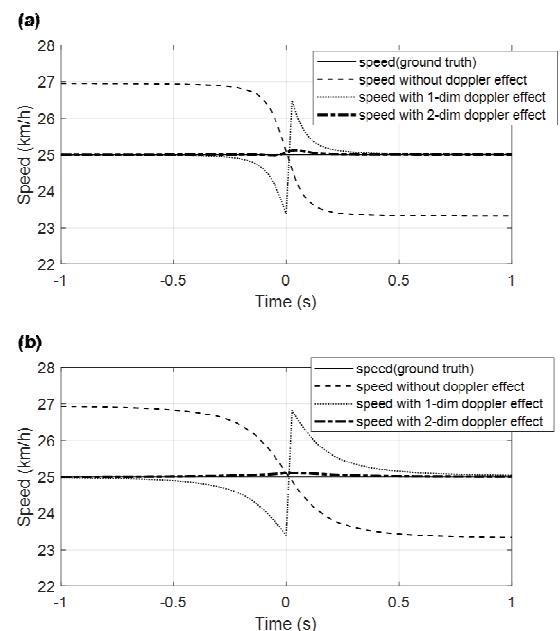


Fig. 6 Speed of acoustic source at constant moving

(a) $h=2$ (b) $h=5$