

경적음의 도플러 효과를 이용한 교통사고분석

최영수^{*,†} · 김종혁^{**} · 윤용문^{***} · 박종찬^{****} · 박하선^{*****}

Traffic Accident Analysis using Doppler Effect of the Horn

Youngsoo Choi^{*,†}, Jonghyuk Kim^{**}, Yongmun Yun^{***},
Jongchan Park^{****}, Hasun Park^{*****}

Key Words: Doppler effect(도플러 효과), Horn(경적음), Traffic accident(교통 사고), Velocity(속도)

ABSTRACT

In this study, we estimate the vehicle speed by analyzing the acoustic data recorded in a single microphone of a surveillance camera. The frequency analysis of the acoustic data corrects the Doppler effect, which is a characteristic of the moving sound source, and reflects the geometric relationship according to the location of the sound source and the microphone on the two-dimensional plane. The acoustic data is selected from the horn sound that is mainly observed in an urgent situation among various sound sources that may occur in a traffic accident, and the characteristics of the monotone source are considered. We verified the reliability of the proposed method by time domain acoustic analysis and actual vehicle evaluation. This method is effective and can be used for traffic accident analysis in the blind spot of the camera using a single microphone built into the existing surveillance camera.

1. 서론

최근 카메라 기술의 발전으로 CCTV, 블랙박스와 같은 감시카메라 영상을 이용하여 지능형 교통 시스템(ITS, Intelligent Transportation System)뿐 아니라 교통사고 분석에서도 다양하게 활용되고 있다.^(1,2) 사고 전 차량의 속도는 교통사고분석을 위한 중요 인자로써, 최근에는 카메라 영상을 이용하여 정량적인 분석이 가능하지만, 카메라 영상의 특성 상 제한적인 경우가 존재한다. 카메라 장착위치에 따라 사각 지역을 가지고 있으며, 주변 광량에 따라 영상의 선명도가 달라져 환경조건에 따라 녹화된 영

상이 사고분석에 적합한 상태가 아닐 수 있다. 따라서 사각 지역을 최소화하기 위해서는 물리적으로 카메라 수를 늘려야 하지만 현실적으로 설치비, 관리비 등과 같은 경제적인 문제를 고려하면 어려운 실정이다. 이에 마이크로폰에 녹음된 음향데이터를 이용한 다양한 애플리케이션 개발이 활발히 진행되고 있다.⁽³⁾ 특히 이동하는 차량으로부터 나오는 외부소음을 정밀하게 측정하여 음향 특징점을 추출한 후 차량의 종류나 크기 등을 추정하거나 차량의 이동속도를 구하기 위한 연구가 진행되고 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ 실제 환경에 정밀한 음향 측정 장비를 설치하기에는 어려움이 따르기 때문에 본 연구에서는 블랙박스 등과 같이 카메라 장치에 장착된 단일 마이크로폰에 저장된 음향데이터를 이용하였다. 다음으로 차량으로부터 방사되는 외부소음 중 순음인 경적음과 2차원 도플러 효과를 이용한 차량 이동속도 계산 방법을 제안하고, 이를 음향해석과 실차평가를 통해 검증하였다.

* 대전과학기술연구소 이공학과, 공업연구사

** 국립과학기술연구원 교통과, 공업연구사

*** 대전과학기술연구소 이공학과, 공업연구관

**** 대전과학기술연구소, 소장

***** 국립과학기술연구원 교통과, 과장

†교신저자, E-mail: yschoi29@korea.kr

2. 자동차 경적음

급박한 순간의 교통사고 현장에서는 운전자에 의한 경적음이 많이 발생한다. 차량의 경적은 일반적으로 전기식 혼 형태로 Fig. 1과 같이 코일에 직류 전기를 흘려서 발생한 자기력에 의해 폴과 아마추어가 서로 당기는 원리를 사용한다.⁽⁷⁾ 따라서 경적음은 혼에 있는 다이아프램 탄성부의 공진주파수와 같은 순음과 순음의 하모닉 성분들의 합성된 형태로 발견되게 된다. 또한, 같은 차종에는 같은 혼 부품을 사용하기 때문에 같은 차종 간의 경적음의 주파수는 해당 혼 부품의 주파수 공차 범위 내에서 동일한 주파수를 가지는 특징을 가진다.

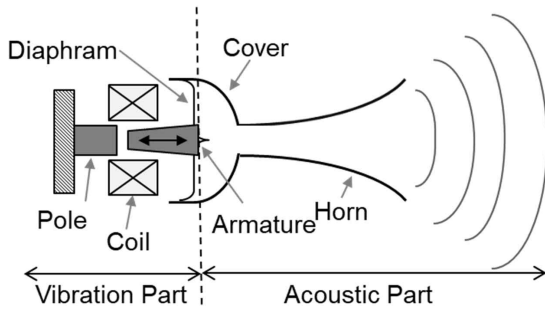


Fig. 1 Structure of electromagnetic type horn system

3. 음향 신호를 이용한 속도분석

3.1. 음향 신호 분석방법

3.1.1. 주파수 분석

실제 녹음된 음향 신호에는 분석하고자 하는 차량의 경적음과 다양한 주변 소음이 함께 포함되어 있다. 따라서 시간에 따른 각각의 주파수 성분을 효과적으로 분석하기 위해 STFT(Short-time Fourier Transform)를 사용하였고 그 수식은 식 (1), (2)와 같다.^(8,9) STFT는 녹음된 신호를 일정한 구간(window 함수)으로 나누고 각각의 구간 내에서 FT(Fourier Transform)를 수행하는 방법으로 계산 결과를 시간-주파수-크기의 3차원 그래프로 나타낼 수 있다는 장점이 있다.

$$STFT\{f(t)\} = F(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \omega(\tau - t) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (1)$$

$$STFT\{f(n)\} = F(m, \omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f[n] \omega[n - m] e^{-j\omega n} \quad (2)$$

$$\omega(n) = \alpha - \beta \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (3)$$

$\omega(t)$ 와 $\omega[n]$ 은 선정된 구간(window 함수)이며, $f(\tau)$ 와 $f[n]$ 은 음향 신호이고, 음향 신호 분석 시 보편적으로 사용하는 window 함수인 Hamming window는 수식 (3)과 같이 나타낼 수 있고, $\beta = 1 - \alpha$ 를 만족하고 N 은 window의 길이를 나타낸다.

3.1.2. 도플러 효과를 고려한 속도 계산 방법

도플러 효과는 파동의 특성을 가지는 음파 또는 전파의 발생원이 이동하거나 신호를 받아들이는 마이크로폰이 이동함에 따라 마이크로폰에서 받아들이는 신호의 주파수가 높아지거나 낮아지는 현상을 의미한다.⁽¹⁰⁾ 음파의 경우, 음원과 마이크로폰의 위치가 모두 이동하고 음원과 마이크로폰의 위치가 일직선인 1차원 직선 관계에서는 아래 식 (4)와 같은 관계식을 가진다.

$$f_m = f_s \frac{c \mp v_m}{c \pm v_s} \quad (4)$$

여기서 f_m 은 마이크로폰에서 수신된 신호의 주파수, f_s 은 음원에서 발생하는 신호의 주파수, v_m 은 마이크로폰의 이동속도, v_s 은 음원의 이동속도, c 는 공기 중에서의 음속을 의미한다. 만약 마이크로폰의 위치가 음원의 경로 상에 있지 않고 아래 Fig. 2와 같이 떨어진 지점에 고정된 경우에는 2차원 평면상의 각도를 고려하여 식 (5), (6)과 같이 표현된다.

$$v_{sm} = v_s \cos\theta = \frac{v_s^2 t}{\sqrt{h^2 + (v_s t)^2}} \quad (5)$$

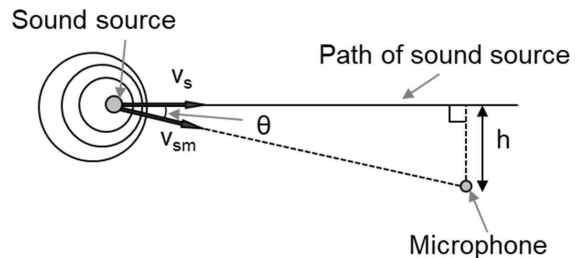


Fig. 2 Geometry configuration of moving source and microphone

$$f_m = f_s \frac{c}{c + v_s \cos\theta} = f_s \frac{c}{c + \frac{v_s^2 t}{\sqrt{h^2 + (v_s t)^2}}} \quad (6)$$

여기서 v_{sm} 은 마이크로폰 위치에서 바라본 음원의 속도, h 는 음원의 경로와 마이크로폰 위치 간의 최소거리를 의미한다. $t < 0$ 일 때는 음원이 다가오는 상황, $t > 0$ 의 경우는 음원이 멀어지는 상황을 의미한다. 식 (6)을 이용하여 음원의 이동속도(v_s)를 구하기 위해 식 (7), (8)로 나타낼 수 있고, 2차 방정식 근의 공식을 이용하면 음원의 속도는 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t^2 k^2 - At^2 k - Ah^2 = 0 \quad (7)$$

$$A = \left(\frac{f_s}{f_m} c - c \right)^2, \quad k = v_s^2 \quad (8)$$

$$k = \frac{At^2 \pm \sqrt{(At^2)^2 + 4Ah^2 t^2}}{2t^2} \quad (9)$$

따라서 2차원 도플러 효과를 보정한 음향신호의 주파수 변화와 음원의 원래 주파수, 마이크로폰과 음원의 이동경로 상의 최소거리(h)를 알면, 음원(차량)의 이동속도를 계산할 수 있다.

3.2. 음향해석

음향해석에서 순수인 경적음을 음원으로 모사하고, 등속, 가속, 감속으로 이동하는 상황을 선정하였다. 마이크로폰의 위치는 아래 Fig. 3과 같이 음원의 이동 경로로부터 0m, 2m, 5m 떨어진 조건으로 설정하였다.

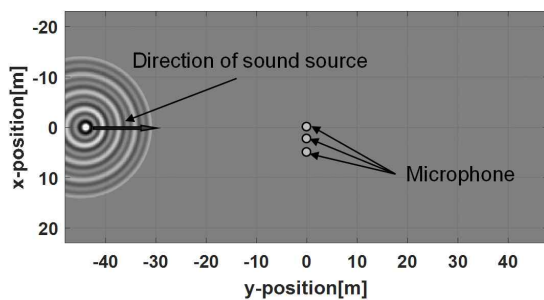


Fig. 3 Configuration of moving source and microphone

시간영역(time domain)의 음향해석에 널리 사용되는 K-wave toolbox(Matlab)를 이용하여,⁽¹¹⁾ 매질의 공간은

가로 100m, 세로 50m이며, 격자의 간격은 0.1m로 설정하였다. 매질인 공기에서의 음속은 343m/s로 하고, 공기 중에서 음파가 진행할 때 발생하는 감쇠, 분산 및 비선형 효과는 고려하지 않았다.

3.2.1. 등속 주행 차량의 경적음 모사

아래 Fig. 4와 같이 550Hz의 순음과 2차 배음(Harmonic component)를 가지는 음원이 25m/s의 등속으로 이동하는 상황을 모사하였다. 음원의 주파수 분석결과 전 시간에 걸쳐 550Hz, 1,100Hz로 일정하게 유지됨을 확인하였다.

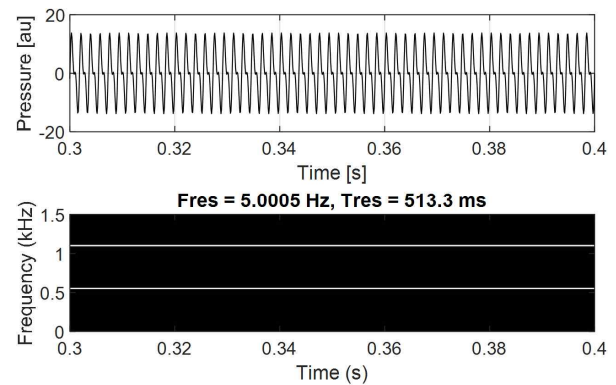


Fig. 4 Acoustic signal of moving source at constant speed

다음으로 음원의 이동 경로로부터 각각 0m, 2m, 5m 떨어진 마이크로폰에 녹음된 음향 신호의 STFT 결과는 Fig. 5와 같다. 시간에 따른 주파수 변화는 중앙주파수(Median frequency)를 이용하여 추출하였다. 중앙주파수는 사각형 적분법 가정(Rectangular Integration approximation)으로 파워스펙트럼(Power spectrum)을 같은 면적으로 나누는 주파수를 의미하여, 효과적으로 주파수 정점 값을 추출할 수 있다. 그 결과 음원이 마이크로폰으로 다가오는 상황에서는 원음(550Hz)보다 약 43Hz 높은 약 593Hz로 측정되며, 멀어지는 상황에서는 약 38Hz 더 낮은 약 512Hz로 측정된다. 등속으로 이동하는 음원의 특성으로 마이크로폰 위치 주변을 제외하고 주파수의 주파수 높이의 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 또한, 마이크로폰과 음원의 이동 경로와의 거리가 최소거리(h)가 되는 지점에서 도플러 효과는 사라지고, 음원이 방사하는 주파수와 같은 높이의 주파수로 마이크로폰에 저장된다. 이는 음원과 마이크로폰의 위치가 가까워지면서 식 (6)에서 $\cos\theta$ 의 값이 1에서 0으로 변하기 때문이다. 다음으로 Fig. 5에서 추출한 주파수와 식 (6)의 수치해석 결과

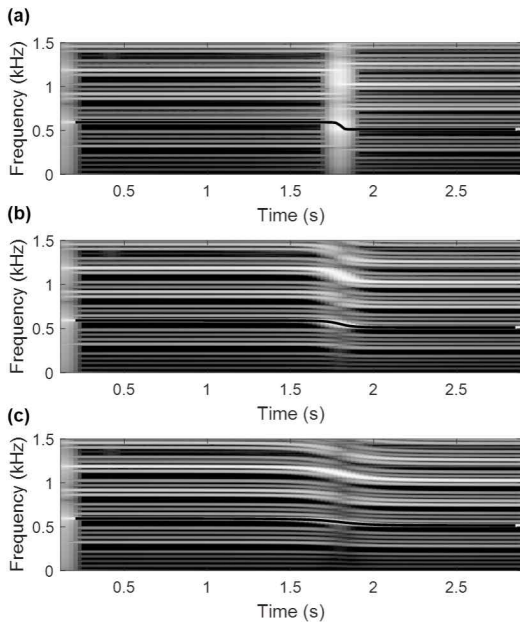


Fig. 5 STFT result of microphones at constant speed (a) $h=0$ (b) $h=2$ (c) $h=5$

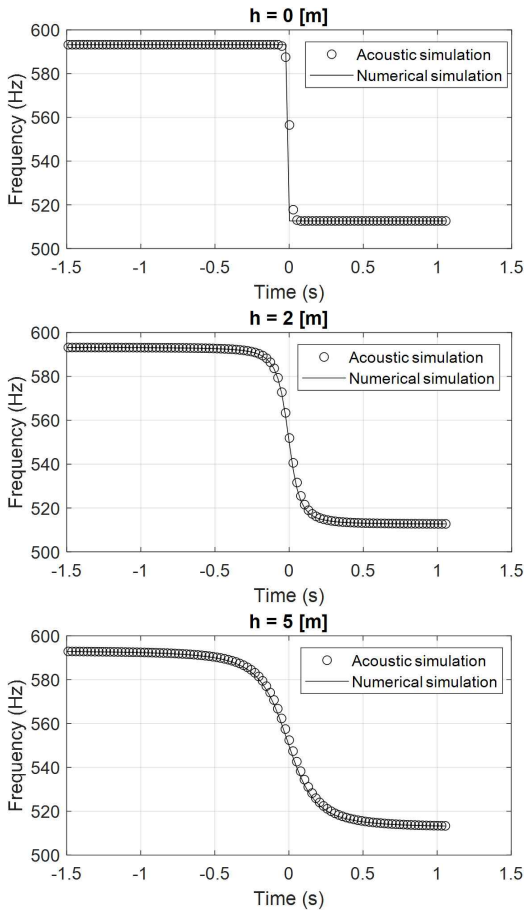


Fig. 6 Frequency changes according to h (Acoustic simulation vs. Numerical result)

를 비교하면 Fig. 6과 같다. 그 결과, 도플러 효과를 모사한 음향해석결과와 수치해석결과가 유사하며 음향해석을 이용한 도플러 효과 검증 방법의 신뢰성을 확인할 수 있다.

추출된 주파수 데이터, 순음의 주파수, 최소거리(h)에 1차원, 2차원 도플러 효과를 반영하였을 때 음원의 속도를 계산하면 Fig. 7, 8로 나타난다.

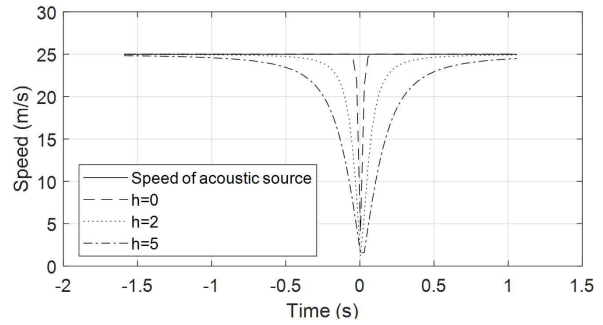


Fig. 7 Acoustic source speed considering 1-D Doppler effect at constant speed

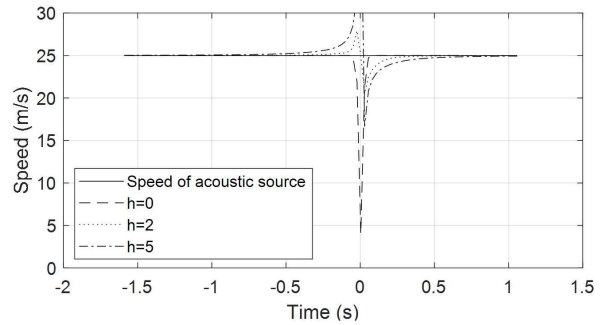


Fig. 8 Acoustic source speed considering 2-D Doppler effect at constant speed

마이크로폰과 음원 이동 경로와의 최소거리(h)가 큰 경우 오차가 더 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 6에서 보았듯이 최소거리(h)에 의한 $\cos\theta$ 의 기여도가 컸기 때문이다. 또한 음원의 이동속도 결과는 2차원 도플러 효과를 반영하였을 때가 1차원 도플러효과를 반영할 때 대비 높은 신뢰성을 가짐을 볼 수 있다.

Table 1 Error rate of proposed method at constant speed

$t < -0.2$ (s)	$h = 0$ (m)	$h = 2$ (m)	$h = 5$ (m)
1-D Doppler effect	0.01%	6.32%	25.76%
2-D Doppler effect	0.01%	0.68%	3.02%

3.2.2. 가속 주행 차량의 경적음 모사

550Hz, 1100Hz 순음을 가지는 음원이 15m/s의 속도에서 5m/s²로 등가속하는 상황을 해석하였다. 음원의 이동속도를 1차원, 2차원 도플러 효과를 고려하여 각각 계산하면 Fig. 9, 10과 같다. 그 결과 2차원 도플러 효과를 고려할 경우에 Table 2와 같이 최대 오차가 31.41%에서 4.93%로 감소하여 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있다.

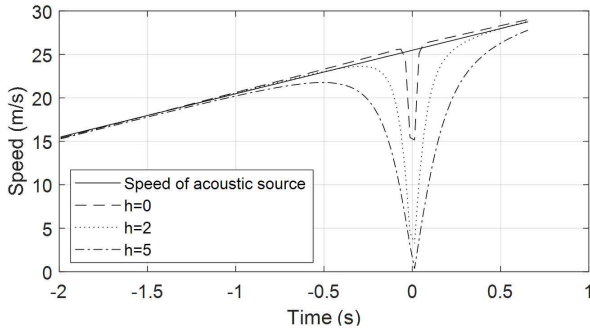


Fig. 9 Acoustic source speed considering Doppler effect at acceleration speed

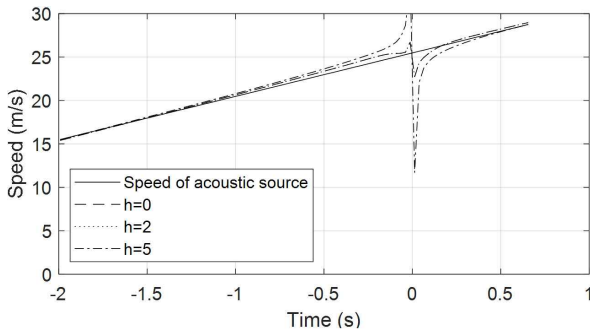


Fig. 10 Acoustic source speed considering Doppler effect and microphone position at acceleration speed

Table 2 Error rate of proposed method at acceleration speed (5 m/s²)

t < -0.2 (s)	h = 0 (m)	h = 2 (m)	h = 5 (m)
1-D Doppler effect	1.89%	7.51%	31.41%
2-D Doppler effect	1.89%	2.38%	4.93%

3.2.3. 감속 주행 차량의 경적음 모사

음원이 25m/s의 속도로 출발하여 5m/s²의 가속도로 감속하면서 마이크를 지나가는 상황을 해석하였다. 추

출된 주파수 변화와 도플러 효과를 이용한 음원의 이동속도를 계산하면 각각 Fig. 11, 12로 나타나고, 감속 주행의 경우에도 Table 3과 같이 2차원 도플러 효과를 반영한 음원의 이동속도가 더 높은 신뢰성을 가짐을 볼 수 있다.

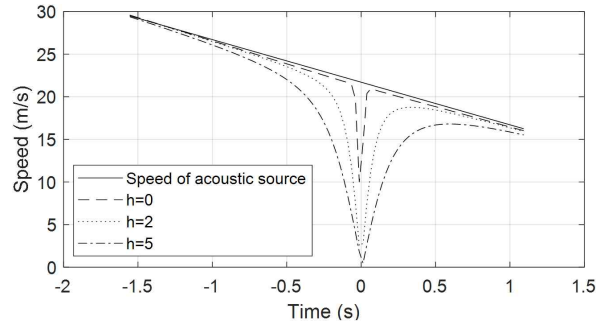


Fig. 11 Acoustic source speed considering Doppler effect at deceleration speed (-5 m/s²)

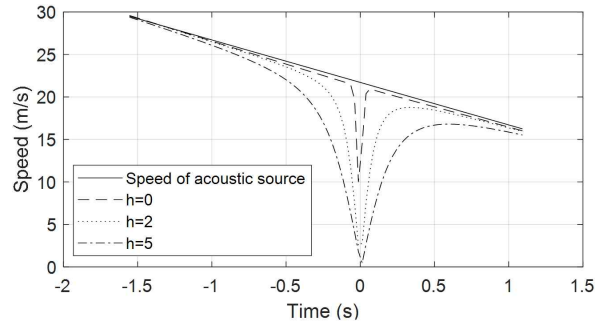


Fig. 12 Acoustic source speed considering Doppler effect and microphone position at deceleration speed (-5 m/s²)

Table 3 Error rate of proposed method at deceleration speed (-5 m/s²)

t < -0.2 (s)	h = 0 (m)	h = 2 (m)	h = 5 (m)
1-D Doppler effect	1.97%	9.42%	30.60%
2-D Doppler effect	1.97%	2.09%	1.09%

다음으로 음원이 25m/s의 속도로 출발하여 10m/s²의 가속도로 감속하여 마이크를 지나기 전에 정지한 경우를 해석하였다. 해당 경우에는 음원이 마이크를 지나가지 않기 때문에 식 (10)을 사용하여 차량의 속도를 구할 수 없다. 따라서 1차원 도플러 효과만을 반영하여 음원의 이동속도를 산출하였는데, 그 결과 마이크의 최소위치(h)에 큰 영향을 받지 않으며, Fig. 13 그리고 Table 4와 같이 실제 음원의 속도와 비교적 유사한 값을

가지는 것을 확인하였다. 이는 음원이 정지하기 직전에는 음원의 속도가 매우 낮아 도플러 효과가 작아지므로 최소 거리(h)에 따른 도플러 효과 변화의 영향이 감소하기 때문이다.

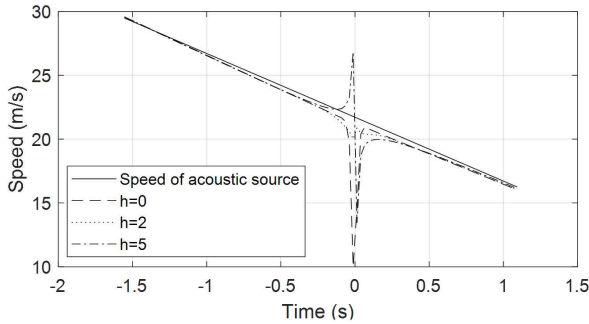


Fig. 13 Acoustic source speed considering Doppler effect at deceleration speed (-10 m/s^2)

Table 4 Maximum difference of proposed method at deceleration speed (-10 m/s^2)

km/h	$h = 0 \text{ (m)}$	$h = 2 \text{ (m)}$	$h = 5 \text{ (m)}$
1-D Doppler effect	2.24	2.41	3.84

3.3. 실차평가

실차평가 시 주행하는 차량에 Vbox를 장착하고, 정지된 다른 차량에 블랙박스를 장착하여 음향 신호를 녹음하였다. Vbox는 영국의 RACE LOGIC社에서 개발한 장비로써 100Hz 주기의 GPS 정보를 이용하여 차량의 진행 경로, 속도 등을 실시간으로 취득할 수 있으며, 그 결과를 본 연구에서 제안한 방법의 결과와 비교하였다. Fig. 14과 같이 시험 차량은 옵티마 하이브리드(기아자동차, 2014년식)와 옵티마 가솔린(기아자동차, 2015년식)을 이용

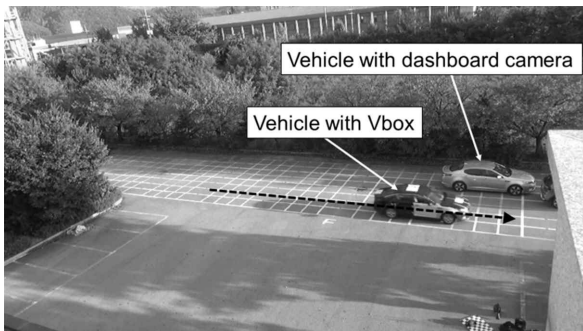


Fig. 14 Driving road for real vehicle test

하였고, 지면에 그려진 격자 한 칸의 거리는 1m이다.

Vbox가 장착된 옵티마 가솔린 차량이 정지된 상태에서 경적음을 울렸을 때, 정지된 옵티마 하이브리드 차량의 블랙박스에 해당 상황을 녹화하였다. 녹화된 영상의 음향 신호 분석결과 경적음의 주파수는 약 538Hz의 일정한 높이를 가지며, 순음으로 모사한 음향해석에서의 가정이 실제 상황과 일치됨을 알 수 있다. 실차평가는 Vbox가 장착된 옵티마 가솔린 차량이 블랙박스가 장착된 옵티마 하이브리드 차량의 옆을 지나가도록 하였고, 경음기와 블랙박스의 장착위치가 차량의 중심이라고 할 때, 음원에 해당하는 경음기와 마이크로폰에 해당하는 블랙박스 사이의 최소거리(h)는 격자 4칸에 해당하는 4m로 설정하였다.

3.3.1. 등속 주행 차량의 경적음

Vbox가 장착된 옵티마 가솔린 차량이 등속에 가까운 속도로 지나가도록 하였으며, 블랙박스의 녹음된 음향 신호를 분석한 결과 아래 Fig. 15와 같은 주파수 변화를 확인할 수 있다.

도플러 효과와 추출된 신호의 주파수 변화를 이용하여 속도를 계산한 결과 아래 Fig. 16과 같은 결과를 얻을 수

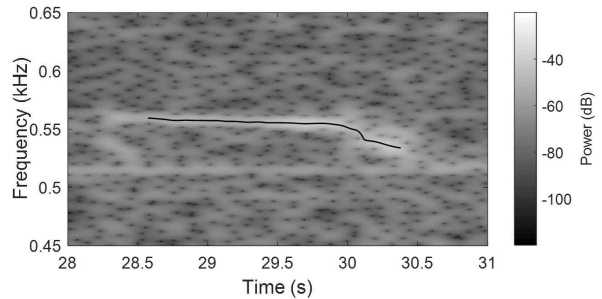


Fig. 15 STFT result of vehicle evaluation at constant speed

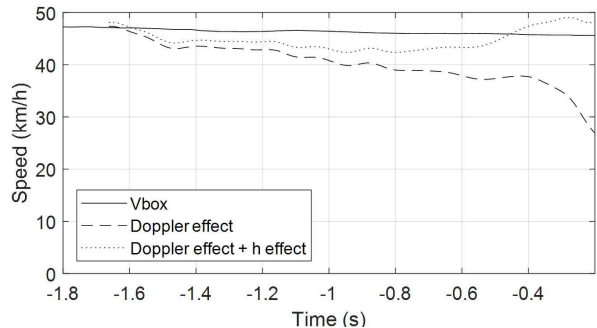


Fig. 16 Vehicle speed considering Doppler effect and microphone position in constant speed vehicle evaluation

있다.

단순히 도플러 효과를 이용하여 음원의 속도를 계산할 경우, 음향해석 결과와 같이 차량과 마이크로폰의 위치가 가까워질수록 더 큰 오차가 발생됨을 알 수 있다. 이 때 2차원 도플러 효과를 이용할 경우 실제 차량 속도와의 오차가 감소함을 확인할 수 있으며, 그 결과는 아래 Table 5와 같다.

Table 5 Error of proposed method in constant speed vehicle evaluation

	Max Difference (km/h)	Error (%)
1-D Doppler effect	15.06	33.00
2-D Doppler effect	2.97	6.44

3.3.2. 급제동 주행 차량의 경적음

경적음을 울리는 가장 일반적인 상황 중 하나인 정지된 차량을 미처 인지하지 못한 후행 차량이 전방의 정지된 차량을 발견 시 급제동을 하면서 경적음을 울리는 상

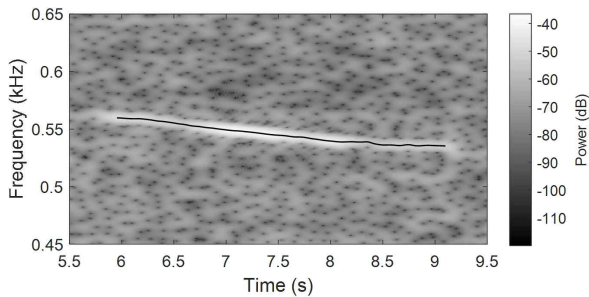


Fig. 17 STFT result of vehicle evaluation at deceleration speed

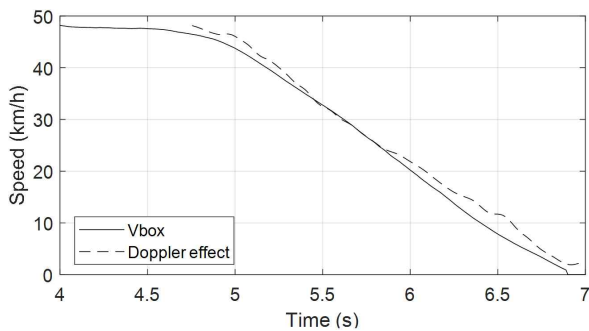


Fig. 18 Vehicle speed considering Doppler effect in deceleration speed vehicle evaluation

황을 모사하였다. 블랙박스의 음향데이터를 분석한 결과 Fig. 17과 같이 시간에 따라 주파수가 감소하는 것을 볼 수 있으며, 이를 이용하여 차량의 이동속도를 계산한 결과는 Fig. 18과 같다.

계산 결과를 보면 해석결과와 유사하게 1차원 도플러 효과만 고려한 결과가 실제 차량의 속도변화 양상을 잘 반영하며, 차량의 실제 속도와의 차이도 Table 6과 같이 크지 않는 것을 볼 수 있다. 이는 마이크로폰에 해당하는 블랙박스 장착 차량과 가까워지기 전에 음원에 해당하는 경적음을 울리는 차량이 정지하였고, 차량의 이동속도 자체가 매우 작아 제시된 방법에서 발생할 수 있는 상대적인 오차 비율을 고려하였을 때, 매우 작은 절댓값 차이가 발생했기 때문이다. 따라서 실제 사고 상황에서 급제동 시 경적음이 발생할 경우, 1차원 도플러 효과만 이용하여도 효과적으로 속도분석이 가능함을 확인할 수 있다.

Table 6 Maximum difference of proposed method in deceleration speed vehicle evaluation

	Max Difference (km/h)
1-D Doppler effect	4.19

4. 결론

본 연구에서는 음향해석과 Vbox를 이용한 실차평가를 통해 제한한 차량의 이동속도 계산 방법의 신뢰성을 확인하였다.

- 1) 음향해석에서 1차원, 2차원 도플러 효과를 비교하면, 2차원 도플러 효과를 이용하였을 때 등속의 경우에는 오차율이 25.76%에서 3.02%로 감소하고, 가속 상황의 경우 오차율은 31.71%에서 4.93%로 감소하며, 감속의 경우에는 30.60%에서 2.09%로 감소함을 보였다.
- 2) 음원이 급감속하여 마이크로폰이 위치한 지점 이전에 멈추는 경우에는 최소거리(h)의 상관관계가 줄어 도플러효과만을 보정하여도 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있다.
- 3) 실차평가 시 블랙박스 장착 차량과 경적음을 울리는 차량 간의 최소거리(h)를 고려한 경우, 등속 주행은 32.00%에서 6.44%로 오차율이 감소하였다.
- 4) 경적음을 울리는 차량이 급제동하는 경우에는 도플러 효과만을 고려하였을 때 4.19km/h의 차이가 발생하였다.

지금까지 해석 및 실차평가를 통해 본 연구에서 제안한 속도분석 방법의 신뢰성을 확인하였고, 특히 영상이 없는 경우 음향 데이터만으로 차량의 거동 특성과 속도를 분석할 수 있음을 보였다. 이를 통해 기존에 영상이 가지고 있는 한계점인 사각지역이나, 눈, 비와 같은 환경 변수에 의해 영상 관독이 불가할 경우, 음향 데이터를 통해 사고 상황을 분석하여 사고 재구성 결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 기대한다. 또한 향후 외부소음이 많은 조건에서 분석에 필요한 음향성분을 선별할 수 있는 기법 개발을 추가하여 분석 결과의 신뢰성을 높이고자 한다.

후 기

이 논문은 행정안전부 주관 국립과학수사연구원 중장기과학수사감정기법연구개발(R&D)사업의 지원을 받아 수행한 연구임(NFS2020TAA01).

참고문헌

- (1) Wang, L. L. and Tsai, W. H., 1991, "Camera calibration by vanishing lines for 3-D computer vision", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 13, No. 4, pp. 370~376.
- (2) Buch, N., Velastin, S. A., and Orwell, J., 2011, "A review of computer vision techniques for the analysis of urban traffic", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 12, No. 3, pp. 920~939.
- (3) 남용욱, 김용혁, 2015, "음향 정보 분석과 스마트 기기 기술의 융합을 통한 사물의 속도 측정", 한국융합학회논문지 Vol. 6, No. 5, pp. 233~240.
- (4) Cevher, V., Chellappa, R., McClellan, J. H., 2007, "Joint acoustic-video fingerprinting of vehicles, part I", In 2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - ICASSP'07, Vol. 2, pp. II~745.
- (5) Cevher, V., Guo, F., Sankaranarayanan, A. C., Chellappa, R., 2007, "Joint acoustic-video fingerprinting of vehicles, part II", In 2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-ICASSP'07, Vol. 2, pp. II~749.
- (6) Lo, K. W., Ferguson, B. G., 2000, "Broadband passive acoustic technique for target motion parameter estimation", IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, Vol. 36, No. 1, pp. 163~175.
- (7) 사종성, 박석태, 2014, "Horn 의 음향 모델링 연구: 음향 혼의 해석 및 설계", 한국소음진동공학회논문집, Vol. 24, No. 7, pp. 537~548.
- (8) Lu, W. K., Zhang, Q., 2009, "Deconvolutive short-time Fourier transform spectrogram", IEEE Signal Processing Letters, Vol. 16, No. 7, pp. 576~579.
- (9) 황보석, 천성용, 강소영, 이찬수, 2013, "음악의 주파수 분석을 이용한 조명 제어", Journal of Korea Multimedia Society, Vol. 16, No. 11, pp. 1325~1337.
- (10) https://en.wikipedia.org/wiki/Doppler_effect
- (11) <http://www.k-wave.org/documentation.php>