

# 대용량 모빌리티 궤적 자료를 이용한 과속 위험노출도 분석 방법론

## Analysis Method for Speeding Risk Exposure using Mobility Trajectory Big Data

이승봉<sup>1</sup> · 장현호<sup>2\*</sup> · 강태석<sup>3</sup>Soongbong Lee<sup>1</sup>, Hyunho Chang<sup>2\*</sup>, Taeseok Kang<sup>3</sup><sup>1</sup>Researcher, Department of Big Data Platform and Data Economy, Korea Transport Institute, Sejong, Republic of Korea<sup>2</sup>General researcher, Urban Science Institute, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea<sup>3</sup>General researcher, Urban Science Institute, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

\*Corresponding author: Hyunho Chang, nettrek@hanmail.net

### ABSTRACT

**Purpose:** This study is to develop a method for measuring dynamic speeding risks using vehicle trajectory big data and to demonstrate the feasibility of the devised speeding index. **Method:** The speed behaviors of vehicles were analysed in microscopic space and time using individual vehicle trajectories, and then the boundary condition of speeding (i.e., boundary speed) was determined from the standpoint of crash risk. A novel index for measuring the risk exposure of speeding was developed in microscopic space and time with the boundary speed. **Result:** A validation study was conducted with vehicle-GPS trajectory big data and ground-truth vehicle crash data. As a result of the analysis, it turned out that the index of speeding-risk exposure has a strong explanatory power ( $R^2=0.7$ ) for motorway traffic accidents. This directly indicates that speeding behaviors should be analysed at a microscopic spatiotemporal dimension. **Conclusion:** The spatial and temporal evolution of vehicle velocity is very variable. It is, hence, expected that the method presented in this study could be efficaciously employed to analyse the causal factors of traffic accidents and the crash risk exposure in microscopic space using mobility trajectory data.

**Keywords:** Mobility Big Data, Vehicle Trajectory, Dynamic Speed Behavior, Microscopic Space and Time, Speeding Risk Exposure

### 요약

**연구목적:** 본 연구는 대용량 차량궤적 자료를 이용하여 동적 과속 위험성을 측정하기 위한 방법론을 개발하고, 개발된 과속 지표의 적용성을 증명하는데 있다. **연구방법:** 개별 차량 궤적을 이용하여 차량의 속도 변화를 미시적 시공간으로 분석하고, 사고 위험성 관점에서 과속의 경계(즉, 경계속도)를 결정하였다. 결정된 경계속도를 이용하여 미시적 시공간 기반 과속 노출도 지표를 개발하였다. **연구결과:** 검증 연구는 대용량 차량 GPS 궤적 자료와 실제 교통사고 자료를 이용하여 수행되었다. 분석결과, 개발된 과속 노출도 지표는 고속도로 교통사고에 대해 우수한 설명력 ( $R^2=0.7$ )을 보였다. 이는 미시적 시공간 차원에서 과속이 분석되어야 함을 직접적으로 의미한다. **결론:** 차량 속도 상태의 시공간적 변화는 매우 가변적이다. 따라서 본 연구에서 제시된 방법론은 차량 궤적 자료를 이용한 미시적인 공간기반 교통사고 요인 및 사고 위험 노출도 분석에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어:** 모빌리티 대용량 자료, 차량 궤적, 동적 속도행태, 미시적 시공간, 과속 위험 노출도

Received | 3 September, 2021

Revised | 10 September, 2021

Accepted | 14 September, 2021

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

## 서론

과속은 심각한 교통사고 발생의 주요 요인 중 하나이다(Elvik, 2009; Kong et al., 2020; Pei et al., 2012; Richards et al., 2009). 과속은 증가된 물리에너지 때문에 차량의 정지에 필요한 시간과 거리를 증가시킴과 동시에 운전자의 시야를 감소시킨다. 따라서 과속 차량의 운전자는 다양한 돌발상황에 대한 대응 능력이 감소하게 되며, 교통사고 발생확률은 증가한다. 따라서 고속도로와 같은 상위 등급 도로를 통행하는 경우, 운전자들은 과속으로 인한 중대사고 위험에 상시 노출된다. 고속도로 교통사고 통계자료에 따르면 2015년부터 2019년까지 5년간 발생한 교통사고 사망자수는 1,079명으로 전체 사상자수 6,397명의 16.9%에 이른다(총 사고건수 36,850건, 사망자수 1,079명, 부상자수 5,318명). 특히, 과속으로 인한 사고는 8,493건으로 전체 사고 중 23.0%를 차지하였으며, 사망자와 부상자수는 각각 128명, 850명으로 높게 나타났다.

과속 요인 교통사고를 감소시키기 위하여 과속단속 카메라를 설치·운영 중에 있다. 특히, 고속도로의 경우 교통사고 주요 위험지점(내리막구간, 급커브 시점부, 터널 입구, 합분류에 의한 교통류 변화지점 등)을 중심으로 지점 과속단속이 수행되고 있다. 이러한 노력에도 불구하고, 과속으로 인한 고속도로 교통사고는 감소하지 않고 있다. 따라서 과속단속 효과가 특정 지점에 국한되는 지점 과속단속의 한계를 극복하고자 구간 과속단속을 확대하고 있다. 그러나 구간단속은 과속을 효과적으로 제어할 수 있지만, 구간단속 설치 예산과 더불어 운전자에게 심리적 압박감을 줄 수 있기 때문에 실제 과속으로 인한 사고위험도를 기반으로 구간단속의 효과를 최대화할 수 있는 도로구간을 선정해야 한다.

지능형 교통체계(ITS, Intelligent transportation system)에서 차량 속도는 루프 검지기, 영상검지기와 같은 지점검지 방식과 DSRC(Dedicated Short Range Communications)와 같은 구간검지 방식으로 수집되고 있다. 검지기 속도자료는 고정된 지점을 통과한 차량들의 속도를 일정 시간 단위(예, 5분)로 집계된 대표속도(예, 평균 속도)를 수집·제공한다. 그러나 차량의 속도는 매 순간마다 감·가속을 반복하며 연속적으로 변하는 동적 특성을 지니기 때문에, 집계된 속도자료를 이용한 속도 특성 분석에는 한계가 있다. 이러한 거시적 집계 속도 자료의 한계로 인해, 그동안의 학술적 노력에도 불구하고 속도와 사고의 관계를 미시적으로 규명하지는 못하고 있다. 다행히, IT기술의 급성장과 더불어, 차량 및 스마트폰 내비게이션, 디지털운행 기록계 등과 같은 차량 GPS가 급격히 보급됨에 따라 방대한 양의 차량 GPS 궤적자료를 수집/활용할 수 있는 환경이 조성되었다. 차량 GPS 궤적자료는 차량의 위치를 최소 1초 단위로 수집하기 때문에 차량의 가·감속도가 포함된 동적 차량 운행상태를 분석할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 1초 간격 차량 GPS 궤적 자료를 이용하여 차량의 미시적 속도 행태를 교통사고 위험도 측면에서 분석하기 위한 방법론을 제시하고자 한다.

본 연구의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 속도와 사고의 관계를 분석한 선행연구를 고찰하고 시사점을 도출한다. 제3장에서는 차량 GPS의 점(point) 궤적 기반으로 미시적 시공간 과속행태를 분석하기 위한 방법론을 제시한다. 제4장에서는 대용량 차량 GPS 궤적 자료와 실제 고속도로 교통사고 자료를 이용하여 제시된 방법론을 적용하고, 제시된 과속분석지표의 교통사고 위험성 설명력을 평가한다. 마지막으로 제5장에서 결론 및 향후 연구방향을 제시하도록 한다.

## 선행연구 고찰

차량 속도와 교통사고의 관계는 수십 년 동안 연구자들의 관심을 끌고 있는 연구주제이다. 속도와 사고의 관계에 관한 연구는 시대적 변화에 따라 ITS 정보수집체계(루프검지기, 영상검지기 등)로 수집한 자료를 사용한 연구와 차량 GPS 자료(내비게이션, DTG 등)를 사용한 연구로 구분할 수 있다. 두 가지 유형의 분석자료는 집계 자료와 비집계 자료로 구분되며 내포

하고 있는 정보가 다르기 때문에 분석의 접근방식이 다르다.

ITS 속도 자료는 정보수집 시간간격에 따라 일정 시간(예. 5분) 동안 검지기가 설치된 지점을 통과한 차량들의 평균 속도를 수집하여 제공한다. 따라서 개별 차량의 동적 속도변화를 분석할 수 없는 명백한 한계가 존재한다. 그럼에도 불구하고, 개별 차량의 속도를 측정할 수 없었던 과거에는 ITS 속도 자료를 사용하여 평균 속도와 사고와의 관계, 그리고 속도 표준편차와 사고와의 관계를 중점적으로 분석하였다. 먼저 평균 속도와 사고의 관계를 분석한 연구를 살펴보면, 평균 속도와 사고의 관계가 양의 관계가 있음을 밝힌 연구가 있는 반면에(Taylor et al., 2002), 반대로 음의 관계에 있거나 통계적 유의성이 없는 경우도 보고되었다(Garber et al., 2000; Quddus, 2013; Yu et al., 2013). Taylor et al.(2002)은 영국 전역 지방을 대상으로 총 174개 편도 도로구간의 평균 속도와 사고의 관계를 분석하였으며, 평균 속도가 1% 감소할 때 사고가 4.5%에서 7.5%까지 감소한다는 연구결과를 제시하였다. Yu et al.(2013)은 고속도로에 설치된 레이더검지기로 수집한 5분 단위 집계 속도 자료를 사용하여 사고가 발생했을 때의 속도변화를 분석하였다. 그 결과, 사고 발생 5분 전에 평균 속도가 감소하는 것으로 나타나 평균 속도와 사고가 음의 관계에 있다고 보고하였다. 이와 같이 ITS 속도 자료를 사용한 연구들은 평균 속도와 사고의 관계 분석결과가 일치하지 않았다. 이에 반해, 속도 표준편차와 사고의 관계를 분석한 연구들은 속도 편차가 증가함에 따라 사고가 많이 발생한다는 동일한 연구결과가 보고되었다(Garber et al., 1989; Quddus, 2013). Quddus(2013)는 검지기 속도자료를 사용하여 속도 표준편차에 따른 고속도로 사고율을 분석한 결과 속도 편차가 1% 증가할 때 사고율이 0.3% 증가하는 양의 관계가 있다고 제시하였다. 그러나 검지기로 수집한 자료는 개별 차량의 속도가 아니며 일정 시간 동안 통행한 차량들의 집계된 속도이기 때문에 차량 간 속도 편차로 볼 수 없으며, 침두시와 비침두시의 속도 편차에 따른 영향일 수 있다고 언급하였다.

근래에 들어 차량 GPS 시스템이 전국적으로 널리 보급됨에 따라 개별 차량의 궤적 자료를 수집할 수 있게 되면서 기존 ITS 자료의 한계를 극복할 수 있는 연구환경이 조성되었다. 차량 궤적으로부터 동적 속도변화를 초 단위로 측정할 수 있기 때문에 차량의 과속행태를 분석하기에 용이하다. Wang et al.(2018)은 차량 GPS로 수집한 시·공간적 속도자료를 사용하여 평균 속도 및 속도 표준편차와 사고의 관계를 분석하였다. ITS 자료를 사용한 연구들과 달리 차량 간 속도편차와 개별 차량의 속도변화를 모두 분석한 결과 속도 편차가 1% 증가할 때 사고가 0.74% 증가하는 양의 관계가 있음을 밝혀냈다. 평균 속도 또한 1% 증가할 때 사고는 0.7% 수준 증가하였으며, 지수곡선 형태를 띠는 양의 관계가 있는 것으로 나타났다. Yu et al.(2018)은 상하이 도시고속도로를 대상으로 속도와 사고율의 관계를 도로구간 기반의 집계방식과 시나리오 기반의 비집계방식으로 분석하였다. 도로구간을 기반으로 분석하였을 때 속도와 사고율이 음의 관계로 나타난 반면에, 시나리오 기반으로 분석한 결과 저속 및 고속 조건에서 사고율이 높게 나타나 U자형의 곡선형태를 띠는 것으로 두 접근법에 따라 다른 결과가 도출되었다. Pei et al.(2012)은 시·공간적인 제약이 있을 때 속도와 사고의 관계가 어떻게 달라지는지 분석하였다. 연구 결과, 시간적인 과속 노출도를 통제할 경우 평균 속도가 증가할 때 사고율이 높아지는 반면에, 공간적 과속 노출도를 통제할 경우 평균 속도가 증가할수록 사고율이 낮아지는 정반대의 결과가 나타났다. 즉, 과속에 노출되는 시간과 공간의 범위에 따라 사고와의 관계가 달라질 수 있음을 의미하는 것이며, 비집계방식으로 접근할 때 시·공간적 과속 노출도를 고려할 필요가 있음을 시사한다.

속도와 사고의 관계를 분석한 선행연구들은 대부분 평균 속도나 표준편차와 같이 전체 차량들의 속도를 중점적으로 분석하였다. 그러나 실제 과속으로 인한 사고는 일부 과속 차량에 의해 발생하기 때문에 사고 발생의 위험성을 가진 동적 과속행태를 포착하여 분석할 수 있는 연구 방법론이 필요하다. 차량 GPS 궤적 자료는 전국의 도로망을 통행하는 차량들의 동적 속도변화를 미시적으로 분석할 수 있는 기회를 제공하였으며, 이 기회를 활용하여 교통사고의 관점에서 과속 위험노출도를 분석할 수 있는 연구 방법론을 개발하고 정립할 필요가 있다.

## 분석 방법론

### 접근 개념

일반적인 고속도로 환경에서 높은 속도로 주행하는 차량일수록 제동거리가 증가하고 운전자가 인지할 수 있는 시야각이 좁아지기 때문에 차대시설물 또는 차대차 사고의 위험을 초래하는 것은 자명한 사실이다. 이러한 사실에 기반하여 고속도로 망에서 개별 차량의 실제 통행속도를 미시적으로 조사할 수 있다면 차량의 과속상태를 모니터링할 수 있는 기회가 주어진다. 그리고 이 기회는 일련의 도로구간을 따라 통행한 차량의 시·공간 위치를 직접적이고 정확하게 추적할 수 있는 차량 GPS 궤적 자료를 통해 실현될 수 있으며, 현재 차량용 GPS와 스마트폰 내비게이션 등이 광범위하게 활용되면서 차량 GPS 궤적 빅데이터가 수집되고 있다.

이 기회를 바탕으로 본 연구는 차량 GPS 궤적 자료를 사용하여 사고위험성의 관점에서 도로구간의 과속행태를 분석하는 방법을 제안하고자 하며, 이 방법은 다음의 두 가지 개념을 기반으로 개발되었다. 첫째, 차량 GPS 장치를 이용하는 차량의 속도분포는 동일한 구간을 통행하는 모든 차량의 속도분포와 통계적인 상관관계가 높다. 즉, 차량 GPS 프로브 자료는 전체 교통량을 직접적으로 대표할 수 있는 표본이다(Chang et al., 2019; Chang et al., 2018). 둘째, 특정 속도 이상으로 주행할 때 실제 사고위험성이 높아지는 현상이 나타난다는 개념이다. 이 속도는 법·제도적 과속기준인 제한속도와 달리 도로의 기하구조나 주행환경에 따라 달라질 수 있다. 두 가지 개념이 모두 합리적이라면, 차량 GPS 궤적 자료와 특정 과속기준(Speeding criterion)을 사용하여 도로구간의 과속 노출도를 측정할 수 있다. 그리고 과속 노출도가 높을수록 사고위험성이 높아지기 때문에 이 지표는 과속 관련 사고의 위험도 분석에 효과적으로 활용될 수 있다.

### 과속 노출도 분석방법

본 연구의 목표는 과속 노출도 지표를 사용하여 도로구간에서 과속으로 주행하는 차량들의 위험성을 모니터링하는 것이다. 사고 위험성을 분석하고자 하는 대상 도로구간의 과속 노출도를 산정하기 위해서는 두 가지 요소(차량 GPS 궤적 자료를 이용한 속도, 과속기준)를 필요로 한다. 따라서 본 연구를 통해 두 요소를 추정하기 위한 방법론을 개발하여 제안한다. 차량 GPS 궤적의 속도 빈도분포와 과속분석의 개념은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 만약 차량별로 도로구간을 주행한 평균 속도를 독립변수로 활용하면 실제 사고위험성이 존재하는 과속행태를 반영할 수 없다. 그리고 사고위험성이 높아지는 적절한 과속기준을 설정하는 것이 과속행태를 분석하기 위한 요구 조건이 된다.

도로구간별 과속의 위험성을 객관적으로 평가하기 위한 과속 노출도 지표를 산정하기 위해서는 구간별 통행특성을 고려하여 과속분석 대상구간을 설정해야 한다. 특히 차량의 주행속도에 영향을 주는 요인은 과속단속카메라와 휴게소 및 졸음쉼터의 존재여부이다. 대부분의 차량들은 과속단속카메라가 설치되어 있는 지점에 접근하는 동안 제한속도 수준으로 감속한 후 단속지점을 지나면서 다시 가속하는 경향을 보인다(Fig. 2a). 이러한 경향은 과속 단속지점 상하류부의 1km 내외에서 나타난다(Shim et al., 2015). 또한 운전자가 휴식을 위해 휴게소나 졸음쉼터를 이용할 경우 차량 GPS 궤적 자료에서 상당한 시간 동안 시속 0km에 가까운 상태로 유지된다(Fig. 2b). 만약 휴게소 및 졸음쉼터에서 정차한 자료를 포함하게 되면 전체적인 과속 노출도 분석결과가 과소추정될 수 있기 때문에 이를 분석에서 제외해야 한다. 따라서 본 연구의 과속 노출도 지표 산정은 고속도로 본선부 통행자료를 기본으로 하며, 과속 단속지점 반경 1km 이내의 통행자료와 휴게소 및 졸음쉼터에서 정차한 자료를 분석에서 제외한다.

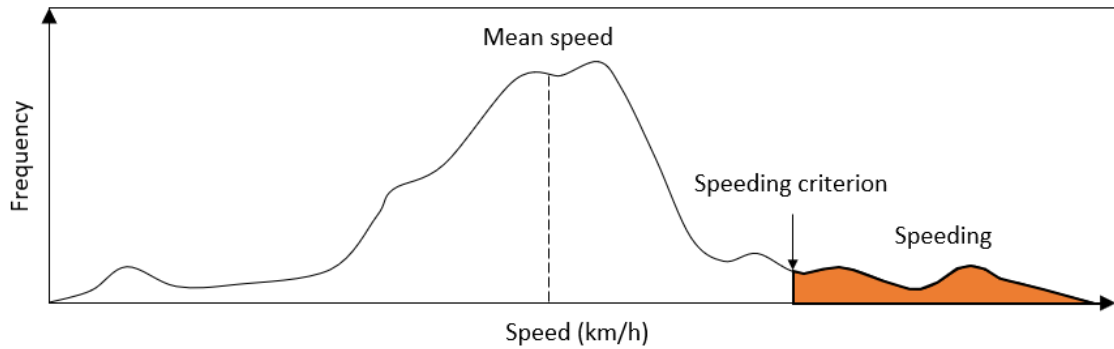


Fig. 1. Speed frequency distribution of vehicle GPS trajectory

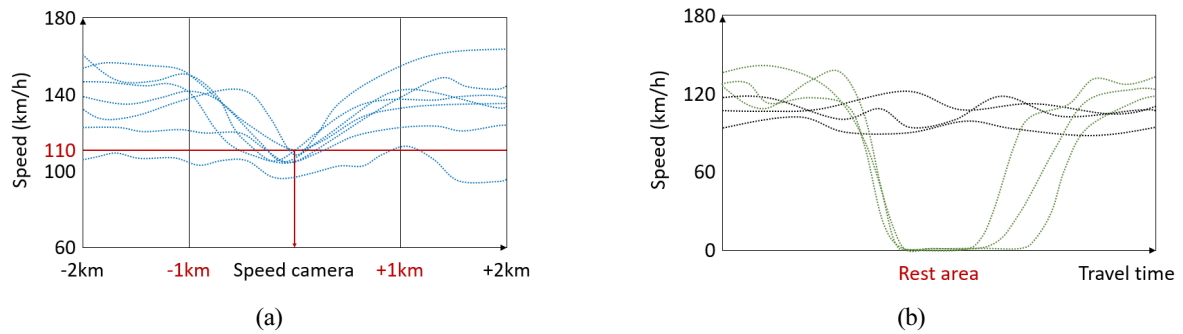


Fig. 2. Speed profiles for the spots of a speed camera (a) and a rest area (b)

본 연구는 차량 GPS 장치를 사용하는 개별 차량의 궤적 지점속도( $v$ )를 과속분석을 위한 기초자료로 사용한다. 궤적의 수집시점  $t$ 는 하루 24시간의 초 단위 시각(즉,  $1 \leq t \leq 86400$ )이며, 차량 GPS 궤적의 수집간격은 1초이므로 차량 한 대가 통행한 일련의 궤적( $T$ )은  $T = [(t_{min}), \dots, (t-1), (t), (t+1), \dots, (t_{max})]$ ,  $\forall t, t \in T$ 와 같다. 여기서,  $t_{min}$ 은 분석대상 도로구간에 진입한 시각이며,  $t_{max}$ 는 해당 구간을 진출한 시각이다. 궤적의 각 시점마다 차량의 위치와 차량의 속도는 각각  $p(t)$ ,  $v(t)$ 로 정의한다.

본 연구에서 개별 차량의 궤적을 기반으로 하는 시·공간적 과속 분석의 기본 개념은 Fig. 3과 같다. 여기서,  $v_r$ 는 과속기준, SC는 과속단속지점, RA는 휴게소 및 졸음쉼터를 의미한다. 그리고  $tt$ 와  $td$ 는 분석대상구간을 통행한 시간과 거리,  $tt_r$ 와

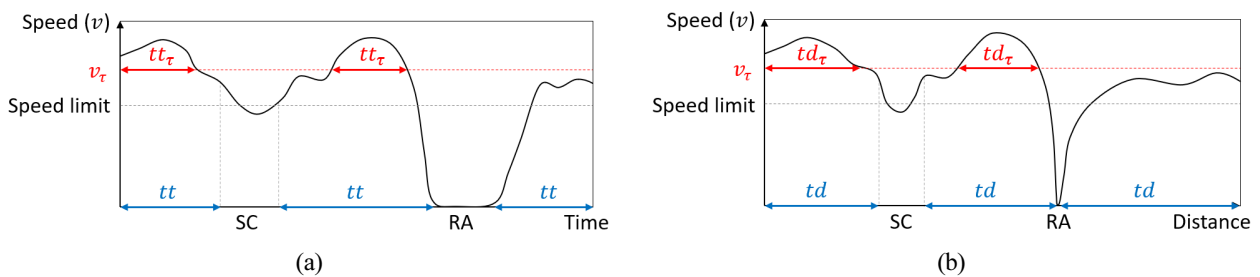


Fig. 3. Concepts of the speeding analysis from temporal and spatial perspective

$td_\tau$ 는 과속기준을 초과하는 속도로 통행한 시간(과속주행시간)과 거리(과속주행거리)이다. 이들 개념을 이용하여 개별 차량 궤적 기반의 시·공간적 과속주행비율을 구할 수 있으며, 이를 도로구간을 통행한 전체 차량에 적용하여 도로구간의 시·공간적 과속 노출도 지표를 산정한다.

차량 GPS 궤적 자료는 도로구간을 통행한 전체 교통량의 일부에 해당하는 표본 자료이다. 따라서 GPS 프로브 차량의 표본률은 각 도로구간과 시간대마다 다르며, 도로구간을 통행한 개별 차량의 과속주행비율을 집계하는 과정에서 표본률의 차이를 고려할 필요가 있다. 본 연구는 도로구간( $s$ ) 및 시간대( $h$ )별 GPS 프로브 교통량( $p_{s,h}$ )과 연평균 시간대별 교통량( $q_{s,h}$ )을 이용하여 식 (1)의 방법으로 집계가중치( $w_{s,h}$ )를 산정하며, 도로구간별 과속 노출도를 산정할 때 개별 궤적의 통행시간대에 따른 집계가중치를 적용한다.

$$w_{s,h} = \frac{q_{s,h}}{p_{s,h}} \tag{1}$$

여기서,  $w_{s,h}$  : 도로구간  $s$ , 시간대  $h$ (1시, 2시, ..., 24시)의 집계가중치

$q_{s,h}$  : 도로구간  $s$ , 시간대  $h$ 의 연평균 시간대별 교통량(대/시)

$p_{s,h}$  : 도로구간  $s$ , 시간대  $h$ 의 GPS 프로브 교통량(대/시)

본 연구에서 과속 위험성을 분석하기 위한 지표는 시간적 과속 노출도(TSE, Temporal speeding exposure)와 공간적 과속 노출도(SSE, Spatial speeding exposure)로 정의하며, 두 지표는 식 (2)의 방법으로 산정한다. 여기서, 도로구간  $s$ 를 통행한 전체 프로브 차량대수는  $n$ 대이며,  $i$ 는 각각의 차량 궤적을 의미한다( $\forall i, i \leq n$ ).

$$TSE_s = \frac{\sum_{i=1}^n (tt_{s,\tau}^i \times w_{s,h}^i)}{\sum_{i=1}^n (tt_s^i \times w_{s,h}^i)}, SSE_s = \frac{\sum_{i=1}^n (td_{s,\tau}^i \times w_{s,h}^i)}{\sum_{i=1}^n (td_s^i \times w_{s,h}^i)} \tag{2}$$

## 분석결과

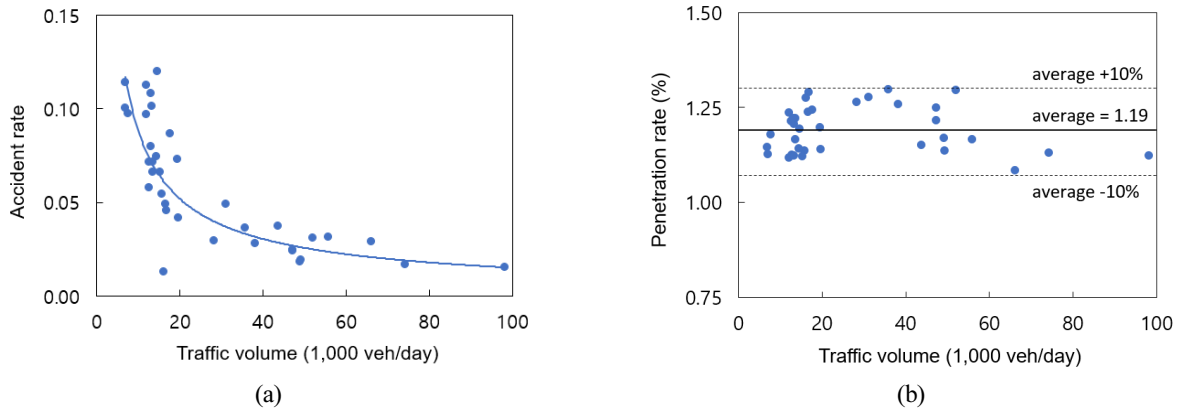
### 자료 및 특성

고속도로의 동적 과속 위험성을 미시적으로 분석하기 위하여 내비게이션 기반의 차량 GPS 궤적 자료(2017년 10월 10일 -11월 10일)와 한국도로공사의 고속도로 속보용 사고 자료(2015년-2019년)를 사용하였다. 차량 GPS 자료는 GPS 수신기의 수신 상태에 따라 약 10m 내외의 오차가 발생할 수 있기 때문에 차량 GPS 궤적 자료를 이용하여 차량의 정확한 속도를 산출하기 위해서는 데이터 전처리 및 가공작업이 필요하다. 따라서 차량 GPS 오차에 의한 오류 데이터를 제거하는 데이터 전처리 과정과 분석 네트워크를 활용한 도로 중심점과의 맵 매칭을 수행한 후에 초당 속도 자료를 구축하였다. 분석의 공간적 범위는 서해안고속도로 전체 구간(금천IC-죽림JC, 336.6km)으로 설정하였으며, 36개의 콘존 구간으로 구성된다. 현재 서해

**Table 1.** Characteristics of road segments

| Seg. | N | L    | Q      | AN  | AR     | Seg. | N | L    | Q      | AN   | AR     |
|------|---|------|--------|-----|--------|------|---|------|--------|------|--------|
| 1    | 2 | 4.3  | 49,113 | 1.4 | 0.0182 | 19   | 2 | 12.0 | 12,660 | 3.2  | 0.0577 |
| 2    | 4 | 2.9  | 66,178 | 2.0 | 0.0286 | 20   | 2 | 8.7  | 14,402 | 3.4  | 0.0743 |
| 3    | 4 | 0.9  | 74,261 | 0.4 | 0.0164 | 21   | 2 | 12.0 | 15,296 | 4.4  | 0.0657 |
| 4    | 3 | 6.2  | 98,290 | 3.4 | 0.0153 | 22   | 2 | 9.0  | 13,619 | 3.2  | 0.0715 |
| 5    | 3 | 5.2  | 38,189 | 2.0 | 0.0276 | 23   | 2 | 6.2  | 19,462 | 3.2  | 0.0727 |
| 6    | 3 | 3.5  | 49,268 | 1.2 | 0.0191 | 24   | 2 | 8.4  | 12,124 | 3.6  | 0.0968 |
| 7    | 3 | 4.4  | 55,908 | 2.8 | 0.0312 | 25   | 2 | 12.6 | 12,781 | 4.2  | 0.0715 |
| 8    | 3 | 13.6 | 47,335 | 5.6 | 0.0238 | 26   | 2 | 13.9 | 13,256 | 6.8  | 0.1011 |
| 9    | 3 | 7.8  | 43,840 | 4.6 | 0.0369 | 27   | 2 | 16.2 | 12,056 | 8.0  | 0.1122 |
| 10   | 3 | 6.5  | 52,080 | 3.8 | 0.0308 | 28   | 2 | 9.9  | 13,244 | 3.8  | 0.0794 |
| 11   | 3 | 12.3 | 47,302 | 5.2 | 0.0245 | 29   | 2 | 7.9  | 13,687 | 2.6  | 0.0659 |
| 12   | 3 | 8.0  | 35,909 | 3.8 | 0.0362 | 30   | 2 | 2.7  | 13,162 | 1.4  | 0.1079 |
| 13   | 3 | 9.4  | 31,170 | 5.2 | 0.0486 | 31   | 2 | 16.1 | 7,719  | 4.4  | 0.0970 |
| 14   | 2 | 6.6  | 28,279 | 2.0 | 0.0294 | 32   | 2 | 24.3 | 6,933  | 7.0  | 0.1138 |
| 15   | 2 | 10.7 | 19,724 | 3.2 | 0.0415 | 33   | 2 | 7.8  | 7,026  | 2.0  | 0.1000 |
| 16   | 2 | 13.7 | 16,786 | 3.8 | 0.0453 | 34   | 2 | 2.5  | 17,718 | 1.4  | 0.0866 |
| 17   | 2 | 10.8 | 16,583 | 3.2 | 0.0490 | 35   | 2 | 17.2 | 14,622 | 11.0 | 0.1198 |
| 18   | 2 | 19.7 | 15,880 | 6.2 | 0.0543 | 36   | 2 | 2.7  | 16,180 | 0.2  | 0.0125 |

Notes: N = number of lanes; L = road length (km); Q = annual average daily traffic volume (vehicle/day); AN = number of vehicle crashes (accidents/year); AR = accident rate.



**Fig. 4.** Relationship between the traffic volume and accident rate (a), and vehicle GPS penetration rate according to the traffic volume (b).

안고속도로는 지속적인 기하구조 개선사업을 통해 고속도로 설계규정을 만족하는 상태에 있어 전체 교통사고 중 운전자 요인에 의한 사고가 가장 큰 비중을 차지한다. 본 연구의 사고 위험성 지표는 도로구간별 사고율(AR, 백만대-km당 사고건수)이다. AR은 교통사고 분석에 널리 사용되고 있는 지표이며, 식(3)과 같이 산정한다.

$$AR(s) = \frac{a_s}{q_s \times l_s \times 365} \times 10^6 \tag{3}$$

여기서,  $a_i$  : 도로구간  $s$ 의 연간 사고건수

$q_i$  : 도로구간  $s$ 의 연평균일교통량(대/일)

$l_i$  : 도로구간  $s$ 의 도로연장(km)

36개의 분석대상 도로구간에 대한 속성정보는 Table 1과 같다. 도로구간별 AR은 0.0125에서 0.1198의 범위 내에서 분포하고 있으며, 교통량이 증가함에 따라 지수함수의 형태로 감소하는 특성을 보인다(Fig. 4a). 본 연구에서 사용한 차량GPS 궤적 자료의 표본률(연평균일교통량 대비 일평균 차량 GPS 프로브대수)은 평균 1.19%이며, 도로구간별로 ±10% 이내에서 안정적인 것으로 나타났다(Fig. 4b).

### 파라미터 추정

시·공간적 과속 노출도 지표(TSE, SSE)의 사고 설명력은 정상적인 운행상태(비과속상태)와 과속상태를 구분하는 과속기준에 좌우된다. 과속기준은  $v_\tau$ 로 정의되는 특정 속도(km/h)이며, 과속기준을 파라미터로 설정하여 주어진 차량의 속도 범위(0-180km/h) 내에서 최적의 파라미터 값을 추정한다. 파라미터 최적화 방법은 데이터 기반 예측연구에서 통상적으로 사용되는 데이터 시뮬레이션 기법을 이용한다. 이 방법은 실제 관측값을 알고 있을 때 파라미터 값의 공간을 한정하고, 그 범위 내에서 모든 가능한 시나리오에 대한 예측을 수행하여 그 예측오차의 변화량을 분석하는 방법이다.

본 연구의 과속 노출도 지표를 이용한 사고예측모형은 식 (4)와 같으며, 실제 도로구간별 사고율을 종속변수로 사용하고 TSE와 SSE를 각각의 단일 설명변수로 사용하는 단순선형 회귀모형이다. 그리고 파라미터의 평가를 위한 지표는 평균절대 백분위오차(MAPE, Mean absolute percentage error)로 설정하여 식 (5)와 같이 예측모형의 MAPE가 최소인 파라미터 값을 과속기준으로 결정한다. 본 연구의 분석대상구간은 도로구간별로 사고율이 0.0125에서 0.1198까지 큰 차이가 존재하기 때문에 상대적인 성능을 직관적으로 측정할 수 있는 MAPE는 공정한 평가를 할 수 있는 지표이다.

$$\hat{y}_s = \beta_0 + \beta_1 x_s, \forall s, 1 \leq s \leq 36 \tag{4}$$

여기서,  $\hat{y}_s$  : 도로구간  $s$ 의 추정 사고율(건/백만대-km)

$x_s$  : 도로구간  $s$ 의 시·공간적 과속 노출도

$$v_\tau = \operatorname{argmin} \left( \frac{1}{36} \sum_{s=1}^{36} \frac{|y_s - \hat{y}_s|}{y_s} \times 100 \right), s.t. 0 \leq v_\tau \leq 180 \tag{4}$$

여기서,  $v_\tau$  : 과속기준(km/h)

$y_s$  : 도로구간  $s$ 의 실제 사고율(건/백만대-km)



파라미터를 추정한 결과는 Fig. 5와 같다. TSE 지표는 127km/h, SSE 지표는 126km/h를 과속기준으로 설정하였을 때 MAPE가 각각 32.1%와 27.8%로 가장 낮은 것으로 분석되었다. 즉, TSE를 산정할 때에는 127km/h, SSE를 산정할 때에는 126km/h를 기준으로 차량 궤적의 과속상태를 판단하는 것이 과속 노출도 지표의 성능을 가장 높일 수 있다. 실제 사고 위험성이 높아지는 과속기준은 시간과 공간의 관점에 따른 차이가 1km/h 수준으로 거의 동일한 것으로 나타났다. 즉, 차량이 시속 126km/h 이상으로 주행할 때 과속으로 인한 사고가 발생할 가능성이 높아진다.

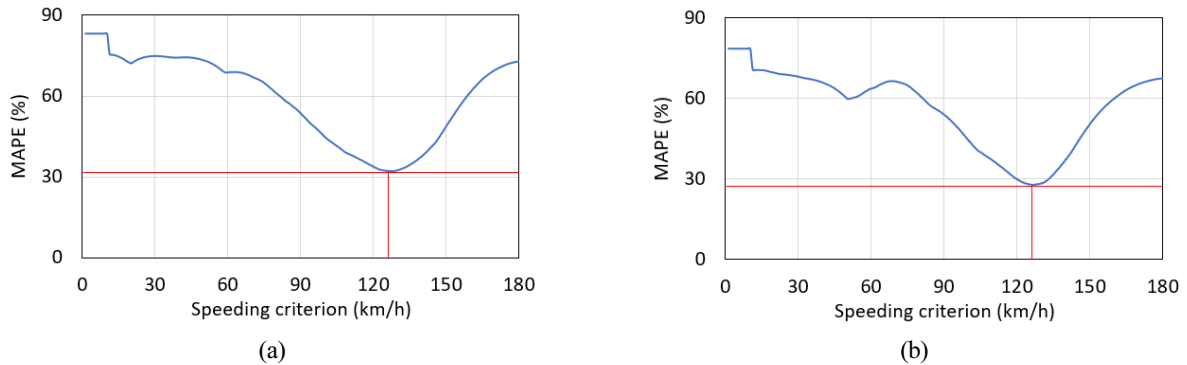


Fig. 5. Variation of accident explanation error of TSE (a) and SSE (b) according to speeding criterion change

### 시·공간적 과속 노출도 산정 및 평가

서해안고속도로 36개 구간에 대하여 구간별 TSE 및 SSE 지표를 산정하였으며, AR과의 관계를 분석하여 지표의 사고 설명력을 평가하였다(Fig. 6, 7). 그 결과, 과속 노출도가 높은 도로구간에서 AR 또한 높은 추세를 보이는 것으로 나타났다. 그리고 과속 노출도 지표와 사고율의 상관관계를 분석하여 각 지표가 사고율을 얼마나 잘 설명할 수 있는지 평가한 결과, TSE와 SSE 지표의 사고 설명력( $R^2$ )은 모두 약 0.7로 분석되었다. 하나의 변수만으로 고속도로 운전자요인 교통사고의 70%를 설명할 수 있다는 점을 고려할 때 두 지표 모두 우수한 성능을 가지는 것으로 판단된다.

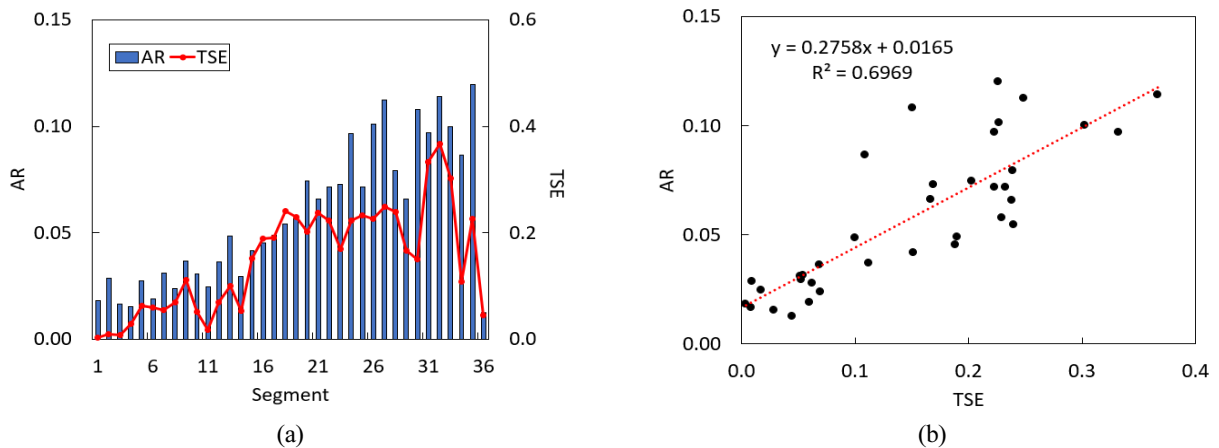


Fig. 6. Distribution of TSE and AR by road segment (a) and relationship between TSE and AR (b)

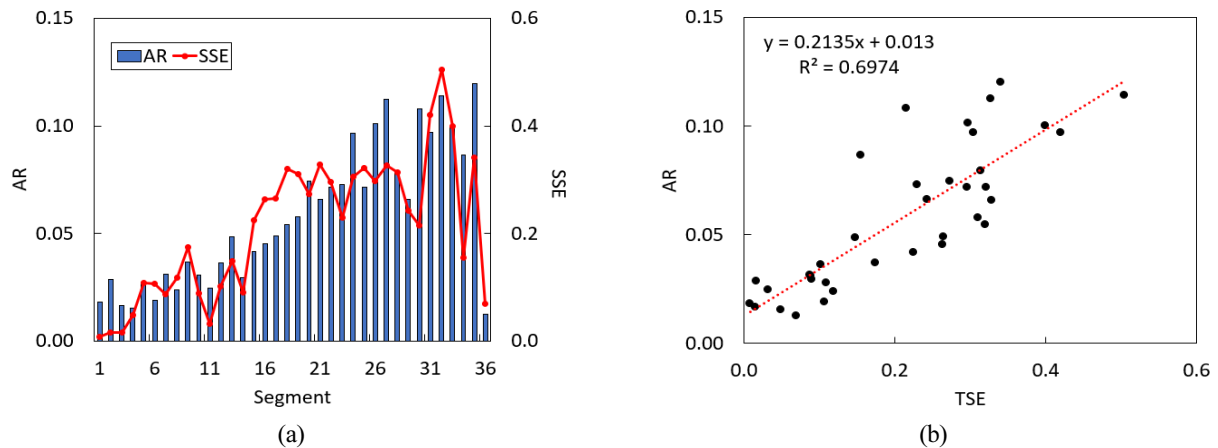


Fig. 7. Distribution of SSE and AR by road segment (a) and relationship between SSE and AR (b)

## 결론

고속도로에서 발생한 교통사고 중에서 과속으로 인한 사고는 약 23%로 가장 높은 수준이다. 그동안 과속을 예방하기 위해 고속도로의 주요 위험지점에 과속단속카메라를 설치·운영하고 있지만 과속 사고는 줄어들지 않고 있다. 이에 정부는 위험한 도로구간에서의 과속을 더욱 효과적으로 방지할 수 있는 구간식 과속단속을 확대하는 방안을 추진하고 있다. 구간식 과속단속의 실효성을 높이기 위해서는 실제 과속행태를 고려한 사고위험성을 기반으로 적절한 도로구간을 선정할 필요가 있지만, 실제 차량 통행자료를 기반으로 도로구간의 과속행태를 파악하는데 한계가 존재하였다. 지금까지 속도와 사고의 관계를 밝혀내기 위한 연구는 국내외에서 다수 수행되었지만, ITS 교통정보수집장치로 수집한 속도 자료는 차량들의 속도 정보를 집계하여 제공하기 때문에 개별 차량의 과속행태를 파악할 수 없었다. 그리고 차량 GPS 자료를 사용한 연구들 또한 대부분 평균 속도나 속도 편차에 따라 사고 발생률이 어떻게 달라지는지를 중점적으로 분석하였으며 도로구간의 과속 노출도를 평가할 수 있는 연구는 수행되지 않았다.

본 연구는 차량 GPS 궤적 자료를 사용하여 고속도로를 통행한 차량들의 동적 속도변화를 분석하였다. 그리고 실제 사고를 유발할 가능성이 있는 과속행태가 반영된 과속 노출도 지표를 개발하였다. 이 지표는 과속기준을 파라미터화하여 실제 도로 구간별 통행행태와 사고율 자료를 기반으로 사고위험성이 높아지는 속도를 동적으로 추정하여 적용한다는 점에서 기존에 사용되던 과속의 개념과 차별성이 있다. 일반적으로 사용되는 과속의 의미는 제한속도를 초과하는 속도를 의미한다. 그러나 실제 고속도로를 주행하는 대부분의 차량들이 제한속도보다 높은 속도로 주행하고 있지만 실제 사고로 이어지는 경우는 드물다. 따라서 본 연구는 사고위험성을 반영할 수 있는 과속기준 추정 방법을 적용하여 과속 노출도 지표를 산정할 때 사용함으로써 사고에 대한 설명력을 높일 수 있었다. 본 연구에서 서해안고속도로를 대상으로 추정한 과속기준은 126km/h이며, 이는 제한속도보다 약 15% 높은 수준으로써 상식에 부합하는 것으로 판단된다. 이 과속기준을 사용하여 시·공간적 과속 노출도를 산정한 결과, 운전자 요인 사고율에 대한 설명력이 0.7로 분석되었다. 운전자 요인 사고의 경우에는 보통 인적요인과 함께 도로 및 기상조건 등의 다양한 요인들이 복합적으로 작용하여 사고가 발생하기 때문에 단일 변수의 설명력으로는 상당히 우수한 것으로 판단된다. 더불어 본 연구에서 제시한 과속 노출도 지표는 고속도로 교통운영관리에서 보편적으로 사용되는 콘존 구간별로 산정할 수 있기 때문에 실무자가 이해하기 용이하며 기존의 운영관리시스템에도 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다.

지금까지 교통안전 분야에서는 자료의 제약으로 인해 개별 차량의 운전행태를 분석하지 못하였으며, 집계 자료로 수행할 수 있는 연구는 한계가 있었다. 이러한 상황에서 본 연구의 결과는 차량 GPS 자료를 활용하여 개별 차량의 과속행태를 충분히 분석해낼 수 있으며, 실제 도로이용행태가 반영될 때 사고 설명력을 더욱 높일 수 있다는 가능성을 제시하였다. 본 연구에서는 서해안고속도로를 대상으로 과속 노출도 지표를 산정하였지만, 다른 도로유형과 다른 구간에서도 본 연구 방법론을 적용할 수 있는지에 대한 공간적 이전성은 검토하지 못하였다. 차량 GPS 자료는 기본적으로 전국 도로망을 커버할 수 있고, 본 연구의 방법론 또한 도로유형이나 구간에는 별도의 제한이 없기 때문에 개념적으로는 공간적 이전성을 가질 것으로 판단된다. 따라서 향후 연구를 통해 과속 사고가 잦은 연속류 구간을 대상으로 과속 노출도 지표를 산정하여 다른 유형의 도로에서도 유의미한 사고 설명력을 가질 수 있는지 검증이 필요하다.

## Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 교통물류연구사업의 연구비지원(21TLRP-B148966-04)에 의해 수행되었습니다.

## References

- [1] Chang, H., Cheon, S. (2019). "The potential use of big vehicle GPS data for estimations of annual average daily traffic for unmeasured road segments." *Transportation*, Vol. 46, pp. 1011-1032.
- [2] Chang, H., Yoon, B. (2018). "High-speed data-driven methodology for real-time traffic flow predictions: Practical applications of ITS." *Journal of Advanced Transportation*, Vol. 2018, 5728042.
- [3] Elvik, R. (2009). *The Power Model of the relationship between speed and road safety. Update and new analyses. Report 1034/2009*, Institute of Transport Economics, Oslo, Norway.
- [4] Garber, N.J., Ehrhart, A.A. (2000). "Effect of speed, flow, and geometric characteristics on crash frequency for two-lane highways." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1717, No. 1, pp. 76-83.
- [5] Garber, N.J., Gadiraju, R. (1989). "Factors affecting speed variance and its influence on accidents." *Transportation Research Record*, Vol. 1213, pp. 64-71.
- [6] Kong, X., Das, S., Jha, K., Zhang, Y. (2020). "Understanding speeding behavior from naturalistic driving data: Applying classification based association rule mining." *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 144, 105620.
- [7] Pei, X., Wong, S.C., Sze, N.N. (2012). "The roles of exposure and speed in road safety analysis." *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 48, pp. 464-471.
- [8] Quddus, M. (2013). "Exploring the relationship between average speed, speed variation, and accident rates using spatial statistical models and GIS." *Journal of Transportation Safety & Security*, Vol. 5, No. 1, pp. 27-45.
- [9] Richards, D., Cuerden, R. (2009). "The relationship between speed and car driver injury severity." *Road Safety Web Publication 9*, Department for Transport, London, U.K.
- [10] Shim, J., Park, S.H., Chung, S., Jang, K. (2015). "Enforcement avoidance behavior near automated speed enforcement areas in Korean expressways." *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 80, pp. 57-66.
- [11] Taylor, M.C., Baruya, A., Kennedy, J.V. (2002). *The relationship between speed and accidents on rural single-carriageway roads. TRL Report 511*, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire.
- [12] Yu, R., Abdel-Aty, M. (2013). "Utilizing support vector machine in real-time crash risk evaluation." *Accident*

Analysis & Prevention, Vol. 51, pp. 252-259.

- [13] Yu, R., Quddus, M., Wang, X., Yang, K. (2018). "Impact of data aggregation approaches on the relationships between operating speed and traffic safety." *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 120, pp. 304-310.
- [14] Wang, X., Zhou, Q., Quddus, M., Fan, T., Fang, S. (2018). "Speed, speed variation and crash relationships for urban arterials." *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 113, pp. 236-243.