GPS 자료를 활용한 도시부 도로교통망 내 교통사고 위험 인지 계수 분석 및 정지판단속도에 따른 민감도 분석

모대상¹ · 이재현¹ · 정종우² · 이청원^{3*}

¹서울대학교 건설환경공학부 석박사통합과정, ²서울대학교 건설환경공학부 석사과정,

³서울대학교 건설환경공학부 교수

Analysis of Crash Risk Perception Factors in Urban Road Network Using GPS Data and Sensitivity Analysis for Stop Speed Threshold

MOH, Daesang¹ · LEE, Jaehyeon¹ · JUNG, Jongwoo² · LEE, Chungwon^{3*}

¹The Integrated Master and Ph.D. Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

²Master Course, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

³Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

*Corresponding author: chungwon@snu.ac.kr

Abstract

Two-fluid Model, which describes traffic flow in urban road network macroscopically, was mainly used for operational analysis of network. Recently, the studies on driver's behavior and safety using Two-fluid Model were conducted. Especially, the estimation of the crash risk perception factors was analytically suggested based on the model. Accordingly, this study aimed to validate from the real data that the safety of urban road network could be macroscopically analyzed with the crash risk perception factors. The factors were estimated from digital tachograph data of taxis in Jongno, Seoul and Gangnam, Seoul, and the estimates showed that Gangnam with more average lanes had higher crash probability and Gangnam with less intersections had lower crash severity than Jongno. The results were consistent with the results from the previous studies with other methodologies. Meanwhile, stop speed threshold, which is introduced to accommodate the error in GPS data like digital tachograph, affects the estimation of Two-fluid Model parameters. The crash risk perception factors were also expected to vary with the stop speed threshold, and sensitivity analysis was therefore conducted. As a result, the factors increased with stop speed threshold increasing. In addition, the two factors fluctuated similarly, which implies the existence of the consistent relationship between them. This study estimated the crash risk perception factors of individual regions from taxi digital tachograph data, and verified the possibility of the macroscopic safety analysis in urban road network. The macroscopic studies on the crash risk in urban road network are anticipated in the future based on this study.

Keywords: risk perception, stop speed threshold, taxi digital tachograph data, two-fluid model, urban road network

J. Korean Soc. Transp.
Vol.38, No.2, pp.134-147, April 2020
<https://doi.org/10.7470/jkst.2020.38.2.134>

pISSN : 1229-1366
eISSN : 2234-4217

ARTICLE HISTORY

Received: 31 December 2019

Revised: 16 January 2020

Accepted: 28 February 2020

Copyright ©
Korean Society of Transportation

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.

초록

도시부 도로망의 교통류를 거시적으로 설명하는 Two-fluid Model은 주로 도로망의 운영성 분석에 활용되었다. 근래에는 Two-fluid Model을 활용한 운전자의 주행 행태와 안전성 관련 연구가 진행되었으며, 특히 해당 모형을 통해 교통사고 위험 인지 계수를 추정할 수 있음이 해석적으로 제시되었다. 이에 본 연구는 교통사고 위험 인지 계수를 활용한 도시부 도로망의 거시적인 안전성 분석이 가능함을 실증 데이터를 통해 확인하고자 하였다. 서울시 종로 지역과 강남 지역의 택시 디지털운행기록계 데이터를 활용하여 교통사고 위험 인지 계수를 추정한 결과, 종로보다 평균 차로 수가 많은 강남에서 교통사고 발생확률이 높았고, 종로보다 교차로 밀도가 낮은 강남에서 교통사고 심각도가 낮았다. 이러한 결과가 타 방법론을 활용한 기존 연구와 일관됨이 확인되었다. 한편, 디지털운행기록계와 같은 GPS 데이터의 오차를 수용하기 위해 도입되는 정지판단속도는 Two-fluid Model 파라미터 추정치에 영향을 준다. 따라서 교통사고 위험 인지 계수들도 정지판단속도에 영향을 받을 것으로 예상되어 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과, 정지판단속도가 높아질수록 교통사고 위험 인지 계수들이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 두 계수는 유사하게 변동하였으며, 이를 통해 두 계수 사이에 일정한 관계가 존재할 것으로 판단되었다. 본 연구는 택시 디지털운행기록계 데이터로부터 개별 지역의 교통사고 위험 인지 계수를 추정하고, 이를 통해 도시부 도로망의 거시적인 안전성 분석이 가능함을 확인하였다. 본 연구를 기초로 향후 도시부 도로망의 교통사고 위험도에 관한 거시적인 연구가 가능할 것으로 기대된다.

주요어: 위험인지, 정지판단속도, 택시 디지털운행기록계 데이터, two-fluid model, 도시부 도로교통망

연구배경 및 목적

Herman and Prigogine(1979)이 제안한 Two-fluid Model은 도시부 도로망의 교통류를 거시적으로 설명하는 모형이다. Two-fluid Model은 주로 도시부 도로망의 운영 성능을 분석하는데 활용되었으나, 근래에 운전 행태 및 안전성 관련 연구에도 활용되었다. 그 중 Dixit(2013)은 Two-fluid Model 파라미터로부터 운전자의 교통사고 위험 인지 분석이 가능함을 해석적으로 제시하였다.

외부 자극에 대한 인간의 신체적 반응은 지각(perception), 식별(identification), 행동판단(judgement, emotion), 반응(reaction, volition) 네 단계의 과정으로 이해할 수 있으며, 교통사고 위험에 대한 운전자의 반응도 같은 이론으로 설명할 수 있다(Doh, 2004). 예를 들어 운전자가 평면곡선을 시각으로 인지하거나 평면곡선 안에서 원심력을 느끼면, 이를 위험으로 식별하고, 위험을 줄이기 위해 의식적으로 또는 무의식적으로 속도를 줄이려는 판단을 내리며, 이를 이행한다. 위험 인지의 정도는 개인·상황·사회마다 다를 수 있으며, 교통사고 위험 인지 계수의 도입은 이러한 위험 인지의 차이를 표현할 수 있다.

한편, GPS 수신 장치가 보급되면서 GPS 데이터를 활용하여 교통류 상태를 추정하는 연구가 진행되었다. 택시, 버스와 같은 우리나라 사업용 자동차는 교통안전법에 의하여 차량의 GPS 좌표와 속도 등을 기록하는 디지털운행기록계(Digital TachoGraph, DTG)를 장착하여야 한다. 특히, 택시는 도시부 도로망을 순회하는 프로브(probe) 차량의 역할을 할 수 있으므로 택시 DTG 데이터를 활용한 교통류 분석 연구가 활발히 진행되었다.

Two-fluid Model은 교통류를 정지한 차량과 이동 중인 차량으로 이분하는 개념에서 시작하였다. 그러므로 Two-fluid Model 분석 시 정지를 판단하는 기준이 중요하다. 일반적으로 속도가 정지 판단의 기준으로 사용되나, GPS 데이터의 속도는 오차를 포함한다. 따라서 임계값을 도입하여 속도가 임계값보다 작은 경우를 정지로 판단하며, 이 임계값은 정지판단속도(stop speed threshold)라고 지칭되었다(Hong et al., 2003). 그런데 정지판단속도에 따라 Two-fluid Model 파라미터 추정치가 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Xiang et al., 2007). Two-fluid Model 파라미터를 활용하는 Dixit(2013)의 모형도 정지판단속도의 영향을 받을 것으로 예상되나, 이에 대한 검토는 수행되지 못하였다.

본 연구는 Dixit(2013)이 제시한 모형을 통해 도시부 도로망의 거시적 안전성 분석이 가능함을 실증 데이터를 통해 확인하고자 하였다. 이를 위해 서울의 대표적인 격자형 도로망인 종로 지역과 강남 지역의 Two-fluid Model 파라미터를 추정하고, 두 지역의 안전성을 도로망의 기하학적 특성과 함께 비교 분석하였다. 또한, 정지판단속도가 분석결과에 미치는 영향을 확인하기 위해 민감도 분석을 수행하였다.

선행연구 고찰

Two-fluid Model은 도시부 도로망의 교통류를 거시적으로 묘사하는 모형이다(Herman and Prigogine, 1979). Two-fluid Model 파라미터로 도시부 도로망의 특성을 상대적으로 평가할 수 있음이 알려지면서(Herman and Ardekani, 1984) Two-fluid Model을 활용하여 교통신호제어시스템의 효과를 분석한 연구와(Jayakrishnan et al., 2000; Jeong et al., 2009; Wu et al., 2011) 날씨가 도로망 성능에 미치는 영향을 분석한 연구가 진행되었다(Lee and Kwon, 2003b). 도로망의 운영성을 결정하는 요소를 찾기 위해 Two-fluid Model 파라미터와 도로망 특성 사이의 관계를 회귀 분석한 연구도 있었다(Ayadh, 1986; Ardekani et al., 1992; Ko et al., 2011).

운영성 분석뿐만 아니라 운전 행태와 안전성을 분석하기 위해 Two-fluid Model이 활용되기도 하였다. 공격적(aggressive) 또는 보수적인(conservative) 운전 행태가 Two-fluid Model 파라미터에 영향을 미친다는 것이 밝혀졌으며(Herman et al., 1988), 이러한 Two-fluid Model 파라미터의 성질을 토대로 성별에 따른 운전 행태가 분석되었다(Pande et al., 2015). 안전성 측면 연구에서는 여러 유형의 교통사고율이 Two-fluid Model 파라미터와 높은 상관성을 갖는 것으로 나타났다(Dixit et al., 2011). 이처럼 사례분석을 통해 Two-fluid Model과 운전 행태 및 안전성 사이의 관계성을 암시한 연구 결과들이 발표되었으나, 이러한 관계를 연역적으로 설명한 연구는 미비하였다.

한편, 운전자의 위험 인지에 관한 다양한 연구가 수행되었다. 이들은 크게 운전 환경이 운전자의 위험 인지에 미치는 영향을 분석한 연구, 집단 간 위험 인지를 비교하는 연구, 위험 인지와 실제 위험의 괴리를 보인 연구 등으로 분류할 수 있다. 인지란 물리적인 실제 세계가 개인의 정신과정으로 수용되는 것을 의미한다(Dixit, 2013). 이를 직접 관찰하는 것은 어려우므로 주로 설문조사를 통한 위험 인지 연구가 이루어졌다. Kim et al.(2014)은 설문조사를 통해 교통사고 위험요인을 조사하였다. 조사 결과에 따르면 운전자들은 평면곡선, 종단곡선, 주변 차량의 난폭운전으로부터 위험을 인지하고, 시거, 차로 수, 교통량에 따라 주행속도를 변화시키는 것으로 나타났다. 그 밖에 피부 감지기와(Taylor, 1964) 시선 추적기(eye tracker)를 이용하여(Charlton et al., 2014) 운전자의 무의식적 위험 인지를 분석한 연구와, 주행속도를 관찰하고 속도 선택 모형에 적용하여 위험 인지를 분석하는 연구도 수행되었다(Tarko, 2009).

도로의 특성으로부터 교통사고 발생 빈도 또는 심각도를 예측하는 계량경제모형도 꾸준히 연구되었다. 교차로에 대한 연구에서는 차로 수가 많을수록 교통사고 발생 빈도(Park et al., 2008) 및 심각도(Ryu and Lee, 2004)가 높아지는 것으로 나타났다. 간선도로 축에 관한 연구에서는 교차로가 많고, 교통량이 많을수록 교통사고가 발생할 가능성이 높다는 결과가 도출되었다(Won et al., 2006). 이러한 모형을 활용하기 위해서는 분석 지점의 기하학적 특성을 사전에 수집해야 하지만, Two-fluid Model은 이러한 정보를 필요로 하지 않으므로 Two-fluid Model은 안전성 분석의 새로운 방법론을 제시할 수 있다.

Dixit(2013)은 Two-fluid Model을 활용하여 운전자의 교통사고 위험 인지를 분석할 수 있음을 해석적으로 제시하였다. 운전자는 본인의 효용을 최대화시키는 속도를 선택한다는 이론인 속도 선택 모형에 교통사고 위험 인지 계수를 도입하였으며, 이를 Two-fluid Model과 통합하였다. 사례 분석에서는 Two-fluid Model 파라미터로부터 교통사고 위험 인지 계수를 추정하였고, 도로망의 특성이 운전자의 교통사고 위험 인지에 미치는 영향을 분석하였다. 그러나 데이터의 한계로 개별 도시가 아닌 21개의 도시의 통합적인 교통사고 위험 인지 계수만을 제시하였다.

GPS 수신 장치의 보급으로 GPS 데이터를 활용한 교통류 분석 연구가 활발히 진행될 수 있었다. 대표적으로 통행 시간을 추정하거나(Quiroga and Bullock, 1998; Chung and Choi, 1999; Shim and Choi, 2006) 대기행렬길이를 추정하는 연구가 수행되었다(Cheng et al., 2011). 택시 DTG 데이터도 통행시간 추정 연구(Lu et al., 2016), 통과교

통량 추정 연구(Kwon and Kim, 2018), Macroscopic Fundamental Diagram 도출 연구(Geroliminis and Daganzo, 2008; Lu et al., 2018)에 활용되었다. 택시 DTG 데이터를 비롯한 GPS 데이터를 활용하여 Two-fluid Model 파라미터를 추정하는 연구도 다수 수행되었다(Lee and Kwon, 2003a; Zeng, 2015; Kwon et al., 2019).

GPS 데이터를 활용한 안전성 연구도 진행되었다. 가속소음(acceleration noise) 등 안전성 지표를 GPS 데이터로부터 산출할 수 있었고(Ko, 2006; Boonsiripant, 2009), 이웃한 두 차량의 측위를 통해 안전성을 평가할 수 있었다(Williams et al., 2012; Park et al., 2017). 교통사고가 발생하기까지 주행거리를 변수로 한 생존분석을 수행하기 위해 GPS 데이터를 활용한 연구가 있었다(Ayuso et al., 2016). 이처럼 GPS 데이터를 활용한 안전성 연구가 다수 수행되었으나, GPS 데이터를 활용하여 도로망의 안전성을 거시적으로 분석한 경우는 많지 않았다.

따라서 본 연구는 택시 DTG 데이터로부터 Dixit(2013) 모형의 교통사고 위험 인지 계수를 추정하여 개별 지역의 거시적인 도시부 도로망 안전성 분석이 가능함을 보이고자 한다.

방법론

1. Two-fluid Model

Two-fluid Model은 두 가지 가정에 기초하고 있다. 첫째, 도로망 내 차량들의 평균주행속도(v_r)는 주행차량비율(f_r)에 비례한다(Equation 1). 둘째, 도로망 내 정지차량비율(f_s)은 도로망을 순회하는 프로브 차량의 정지시간비율과 같다(Equation 2).

$$v_r = v_m f_r^n = v_m (1 - f_s)^n \quad (f_r + f_s = 1) \quad (1)$$

$$f_s = T_s / T \quad (T_r + T_s = T) \quad (2)$$

여기서, v_r : 평균주행속도

v_m : 평균최대통행속도

f_r : 주행차량비율

f_s : 정지차량비율

n : Two-fluid Model 파라미터

T_s : 단위거리 당 평균정지시간

T_r : 단위거리 당 평균주행시간

T : 단위거리 당 평균통행시간

Equations 1, 2로부터 Two-fluid Model의 모형식이 도출된다(Equations 3, 4).

$$T_r = T_m^{\frac{1}{n+1}} T^{\frac{n}{n+1}} \quad (3)$$

$$\ln T_r = \frac{1}{n+1} \ln T_m + \frac{n}{n+1} \ln T \quad (4)$$

T_m 은 단위거리 당 평균최소통행시간을 의미하며, 혼잡이 없는 이상적인 상황일지라도 신호제어와 같은 교통운영 요소가 미흡한 도로망은 높은 T_m 값을 가질 수 있다. n 은 단위거리 당 평균정지시간(T_s) 또는 정지차량비율(f_s)이

증가함에 따라 단위거리 당 평균통행시간(T)이 증가하는 정도를 나타내는 파라미터이다. 낮은 n 값은 교통수요가 증가하여도 도로망의 운영상태가 쉽게 악화되지 않음을 의미한다. 따라서 T_m 과 n 은 도시부 도로망의 성능을 거시적으로 나타내는 지표로 사용될 수 있다.

Two-fluid Model 파라미터인 T_m 과 n 을 산출하기 위해 우선 프로브 차량의 운행 기록을 일정한 크기의 microtrip으로 분할해야 한다. microtrip의 크기는 거리 기준 또는 시간 기준으로 정할 수 있으며, 기존 연구는 주로 1mile의 거리를 기준으로 분석하였다(Herman et al., 1988; Ardekani et al., 1992; Hong et al., 2003; Dixit et al., 2011). 각 microtrip의 T_r 과 T 를 산출하고 Equation 4의 로그선형회귀모형을 통해 Two-fluid Model 파라미터인 T_m 과 n 을 추정할 수 있다.

2. 교통사고 위험 인지 계수의 정의 및 추정 방법

소비자가 기대효용(expected utility)을 최대화하는 행동을 선택한다는 개념은 경제학에서 널리 사용되고 있다(Parkin and Wu, 1972). 운전자가 겪는 사건 또는 상태(state)는 교통사고 발생과 미발생 두 가지라고 가정할 수 있다. Dixit(2013)의 속도 선택 모형은 교통사고 발생·미발생이라는 상태를 확률적으로 인지하는 운전자가 기대효용을 최대화시키는 주행속도를 선택한다는 가정으로 구성되었다.

$$v_r = \arg \max_{v_r} E[u] \quad (5)$$

$$E[u] = P_{no\ crash} u_{no\ crash} + P_{crash} u_{crash} \quad (6)$$

여기서, v_r : 평균주행속도

$E[u]$: 기대효용

P_{crash} : 운전자가 인지하는 교통사고 발생 확률

$P_{no\ crash}$: 운전자가 인지하는 교통사고 미발생 확률

u_{crash} : 교통사고 발생 시 운전자가 인지하는 효용

$u_{no\ crash}$: 교통사고 미발생 시 운전자가 인지하는 효용

Equation 6에서 각 항을 살펴보면, 먼저 운전자가 인지하는 교통사고 발생 확률(P_{crash})은 Equation 7과 같이 주행시간비율(f_r)에 대해 단조증가하는 함수로 모형화되었다.

$$P_{crash} = \alpha f_r^\beta = \alpha (T_r/T)^\beta = \alpha (v/v_r)^\beta \quad (7)$$

여기서, α : Baseline Perceptions of Causing a Crash ($0 < \alpha \leq 1$)

β : Perceived Crash Likelihood Factor ($\beta > 0$)

v_r : 평균주행속도

v : 평균통행속도

Equation 7의 경계 조건에서, 주행시간비율(f_r)이 0일 때 운전자가 인지하는 교통사고 발생 확률(P_{crash})은 0이다. 운전자가 주행하지 않는다면 교통사고 발생 확률이 0이라고 볼 수 있으므로, 이러한 경계조건은 합리적으로 보인다. Perceived Crash Likelihood Factor (β)는, 같은 f_r 에서, 그 값이 작을수록 운전자가 교통사고 발생 확률을 높

게 인지함을 나타낸다. α 는 속도 선택에 영향을 미치지 않는다.

운전자가 인지하는 교통사고 미발생의 확률($P_{no\ crash}$)은 여사건의 확률인 Equation 8로 나타낸다.

$$P_{no\ crash} = 1 - P_{crash} = 1 - \alpha f_r^\beta \quad (8)$$

통행 의사결정에서 중요한 역할을 하는 통행시간은 초기의 속도 선택 모형 연구부터 고려되고 있었다(Mohring, 1965). Tarko(2009)도 통행속도에 대한 감소함수를 부효용 모형에 포함하고 있었다. Dixit(2013)은 교통사고 미발생 시 운전자가 인지하는 효용($u_{no\ crash}$)을 평균통행속도(v)로 하였다.

$$u_{no\ crash} = v \quad (9)$$

일반적으로 속도가 높을수록 교통사고 심각도가 높다. Elvik et al.(2004)이 제시한 지수 모형(Power Model)과 고전 물리학의 운동에너지 공식을 고려하면 교통사고 심각도는 속도에 대한 지수함수의 형태로 가정함이 타당하다. Dixit(2013)은 교통사고 발생 시 운전자가 인지하는 효용(u_{crash})을 Equation 10과 같이 구성하였다.

$$u_{crash} = -wv_r^k \quad (10)$$

여기서, w : Crash Weighting Factor ($w > 0$)

k : Perceived Impact Factor ($k > 1$)

Crash Weighting Factor (w)는, v_r 과 k 가 같을 때, 그 값이 클수록 운전자가 교통사고 부효용(disutility)을 크게 인지함을, 즉 교통사고 심각도를 높게 인지함을 나타낸다.

Equation 5에서 기대효용의 최대를 구하기 위해 미분계수가 0인 점을 찾으면 Equation 11과 같이 운전자가 선택하는 평균주행속도를 구할 수 있다. 이를 Equation 12와 같이 치환하면 T_m , n , β , w 에 관한 관계식인 Equation 13이 유도된다.

$$\beta v = (k - \beta)wv_r^k \quad (k > \beta) \quad (11)$$

$$v = \frac{1}{T}, \quad v_r = \frac{1}{T_r}, \quad k = 1 + \frac{1}{n} \quad \text{where } n > 0 \quad (12)$$

$$T_m^{\frac{1}{n}} = \frac{w}{\beta} \frac{1}{n} + \frac{w}{\beta} - w \quad \text{or} \quad T_m = \left\{ \frac{(1 + n - n\beta)w}{n\beta} \right\}^n \quad (13)$$

Equation 13을 그래프로 나타내면 Figure 1과 같다. w 가 클수록, β 가 작을수록 $T_m - n$ 그래프는 우상향으로 이동하는 성질이 있다. 즉, 순서쌍 (T_m, n) 이 우상단에 있을수록 β 가 작아지거나 w 가 커질 것으로 예상할 수 있으며, 그러한 도로망은 교통사고 발생확률 또는 심각도가 높을 것으로 추론할 수 있다.

α , β , w , k 모두 운전자의 교통사고 위험 인지를 함의한다. 그러나 α 는 속도 선택과 무관하기 때문에 그 값을 산출할 수 없고, k 는 n 에 의해 결정되므로 독립된 변수로 볼 수 없다. 따라서 본 연구는 β 와 w 를 교통사고 위험 인지 계수라고 지칭하였다.

Figure 1. Variation of T_m - n curve with crash risk perception factors

Two-fluid Model 파라미터로부터 β 와 w 를 추정하기 위해 본 연구는 Equation 14와 같은 수리계획법을 고안하였다. Dixit(2013)이 제시한 선형회귀분석으로는 β 또는 w 가 음수로 도출될 우려가 있으며, 이는 계수의 정의에 부합하지 않기 때문이다.

$$(w, \beta) = \arg \min_{(w, \beta)} \sum_i \epsilon_i^2 \quad (14)$$

$$s.t. \quad \epsilon_i = T_{m,i}^{\frac{1}{n_i}} - \frac{w}{n_i \beta} - \frac{w}{\beta} + w, \quad i \in \{date1, date2, \dots\}$$

$$w > 0, \quad \beta > 0$$

Dixit(2013)의 선형회귀분석과 본 연구가 제시한 방법 모두 오차제곱합 최소화를 목적으로 하므로 두 방법론이 개념적으로 대동소이하다. 이때, 한 도로망의 교통사고 위험 인지 계수를 추정하기 위해 다수의 Two-fluid Model 파라미터 순서쌍을 필요로 한다.

연구 범위 및 데이터

본 연구는 서울시의 도심이며 격자형 도로망을 갖는 대표적인 지역인 종로와 강남 지역을 공간적 범위로 선정하였다. Figure 2와 같이 종로는 사대문 내부를 기준으로, 강남은 도시고속도로를 포함하지 않도록 지역을 설정하였다.

Two-fluid Model 파라미터를 산출하기 위해 2018년 11월 09일부터 2018년 11월 30일까지 22일간의 서울시 택시 DTG 데이터를 활용하였다. 택시 DTG 데이터는 Table 1과 같이 택시 차량 ID, 경도, 위도, 고도, 일시, 조향각, 속도, 승객재차여부 8개의 열로 이루어져 있다. 경위도 좌표는 도(°, degree) 단위이며 10^7 이 곱해져 기록된다. 속도는 kph 단위의 정수로 저장된다. 일시 열에 나타난 바와 같이 각 택시는 10초마다 차량 상태를 기록한다. 승객재차여부 열에서 1은 승객이 재차 중인 상태, 0은 승객이 없는 공차 상태를 의미한다. 공차 상태의 데이터는 택시가 승객을 탐색하거나 택시 정류장에서 대기하는 기록이 포함되어 있으므로, 합리적인 운전 행태를 반영하기 위해 승객이 재차 중인 상태의 데이터만을 분석에 사용하였다. 또한 심야시간에는 과속이나 휴식과 같이 주변 교통류 상태를 모사하지 않는 기록이 포함될 우려가 있으므로 23시부터 익일 05시까지 데이터는 분석에 제외하였다. 결과적으로, Table 2와 같이 종로 지역에는 일평균 4백만 여 개의 데이터를, 강남 지역에는 일평균 7백만 여 개의 데이터를 분석에 활용할 수 있었다.

Figure 2. Spatial scope, Jongno (left) and Gangnam (right)

Table 1. An example of Seoul taxi DTG dataframe

Vehicle ID	Longitude	Latitude	Altitude	Date and time	Head	Speed	Occupied
180783254	1268870158	376706578	381	20181122082935	158	42	1
180783254	1268874695	376696545	392	20181122082945	160	37	1
180783254	1268878875	376687946	396	20181122082955	156	39	1
180783254	1268884676	376679555	384	20181122083005	144	38	1
180783254	1268892668	376670718	359	20181122083015	144	44	1
180737977	1269221800	375441566	182	20181122082757	242	74	1
180737977	1269204883	375432416	154	20181122082807	238	54	1
180737977	1269188549	375427583	170	20181122082817	260	60	1
180737977	1269171400	375429616	197	20181122082827	283	50	1
⋮							

Table 2. Daily average number of vehicles and records in filtered Seoul taxi DTG data

Region	Vehicles	Records
Jongno	31,722	4,040,468
Gangnam	35,032	7,126,249

이렇게 얻어진 데이터를 택시 차량 ID와 일시에 대해 정렬한 후, 인접한 두 쌍의 경위도 좌표로부터 10초 간 이동 거리를 산출하고 1.5km microtrip으로 분할하였다. 즉, 연속된 데이터의 누적 이동거리가 1.5km 이상 될 때마다 해당 데이터를 하나의 microtrip으로 추출하였다. 각 microtrip에 정지판단속도 0kph를 적용하여 단위거리 당 평균주행시간(t_r)과 단위거리 당 평균통행시간(t)을 산출하고 Two-fluid Model 파라미터를 추정하였다.

분석결과

1. 종로 지역과 강남 지역의 Two-fluid Model 파라미터 분석

평균적인 t_m 값은 종로 지역이 1.32min/km, 강남 지역이 1.21min/km로 종로에서 더 높았으며, 이는 비혼잡 시 도로망의 운영성이 종로보다 강남에서 더 양호함을 의미한다. 두 지역의 평균적인 n 값은 종로 1.10, 강남 1.10으로 동일하였으므로 교통수요의 증가에 따른 도로망 성능 악화 정도는 두 지역에서 비슷한 것으로 보인다. Table 3에 따

르면 같은 지역일지라도 날짜에 따라 Two-fluid Model 파라미터 추정치가 변하였는데, 택시 DTG 데이터는 전수가 아닌 표본 데이터이며, 요일별로 교통신호 계획 및 운전자의 운전 행태가 동일하지 않기 때문으로 판단된다.

Table 3. Two-fluid model parameters of Jongno and Gangnam (T_m : min/km)

Date	Jongno		Gangnam		Date	Jongno		Gangnam	
	T_m	n	T_m	n		T_m	n	T_m	n
Fri, Nov 09, 2018	1.35	1.19	1.17	1.23	Wed, Nov 21, 2018	1.36	1.03	1.23	1.08
Sat, Nov 10, 2018	1.18	1.33	1.17	1.20	Thur, Nov 22, 2018	1.36	0.96	1.23	1.00
Sun, Nov 11, 2018	1.22	1.13	1.17	1.04	Fri, Nov 23, 2018	1.28	1.21	1.16	1.22
Mon, Nov 12, 2018	1.37	1.01	1.22	1.05	Sat, Nov 24, 2018	1.27	1.21	1.31	0.97
Tue, Nov 13, 2018	1.35	1.09	1.23	1.07	Sun, Nov 25, 2018	1.21	1.10	1.18	1.01
Wed, Nov 14, 2018	1.37	1.01	1.22	1.07	Mon, Nov 26, 2018	1.39	0.99	1.23	1.03
Thur, Nov 15, 2018	1.39	0.99	1.23	1.07	Tue, Nov 27, 2018	1.39	1.02	1.24	1.10
Fri, Nov 16, 2018	1.35	1.08	1.21	1.12	Wed, Nov 28, 2018	1.35	1.08	1.20	1.14
Sat, Nov 17, 2018	1.17	1.34	1.16	1.17	Thur, Nov 29, 2018	1.36	1.10	1.21	1.16
Sun, Nov 18, 2018	1.20	1.11	1.20	0.92	Fri, Nov 30, 2018	1.34	1.19	1.16	1.25
Mon, Nov 19, 2018	1.40	0.94	1.22	1.06	Average	1.32	1.10	1.21	1.10
Tue, Nov 20, 2018	1.31	1.12	1.21	1.11					

Figure 3에 지역별 Two-fluid Model 파라미터를 Equation 13에 적합(fitting)시킨 곡선을 도식하였다. 점군과 곡선의 위치가 다른 것으로 보아 두 지역의 Perceived Crash Likelihood Factor (β)와 Crash Weighting Factor (w)가 다르게 추정될 것으로 예상되었다.

Figure 3. Two-fluid model parameter scatter plot

2. 도로망의 기하학적 특성에 따른 거시적 안전성 분석

본 연구는 종로와 강남에서 차이가 있는 기하학적 특성으로 평균 차로 수와 교차로 밀도를 선정하였다. 그리고 두 가지 특성이 도로망의 안전성에 미치는 영향이 교통사고 위험 인지 계수를 통해 나타나는지 확인하였다.

Park et al.(2008)과 Kim et al.(2014)의 연구를 고려하면, 강남은 종로보다 평균 차로 수가 24% 많으므로 강남에서 교통사고 발생확률이 높을 것으로 예상할 수 있었다. Perceived Crash Likelihood Factor (β)는 Table 4와 같이 종로에서 0.525, 강남에서 0.006으로 추정되었다. P_{crash} 함수의 그래프와 함수값을 도식한 Figure 4에 의하면, 종로보다 β 가 낮은 강남의 교통사고 발생확률은 종로보다 높은 것으로 나타났다. 이렇듯 기존 연구와 일관된 결과는 β 를 통한 도로망의 안전성 분석이 가능함을 시사한다. 또한, 우리나라 교통사고분석시스템(Traffic Accident

Analysis System, TAAS)에서 구득한 자료에 따르면 인구 10만 명 당 교통사고 발생 건수는 2018년 기준 종로보다 강남에서 많았다. 이를 통해 β 의 함의가 통계자료와도 일치함을 확인하였다.

Table 4. The number of lanes, probability of a crash, and accident statistics

Region	Average number of lanes	β	f_r	$P_{crash} = \alpha f_r^\beta$	Accident per 100 thousand capita*
Jongno	1.92	0.525	0.590	0.758α	3,923
Gangnam	2.39	0.006	0.589	0.997α	4,136

*Data: Traffic Accident Analysis System (TAAS).

Figure 4. The perceived probability of a crash (P_{crash}) function

강남은 종로보다 평균 교차로 밀도가 6% 낮으므로 Won et al.(2006)에 의하여 강남은 종로보다 교통사고 심각도가 낮을 것으로 예상할 수 있었다. Crash Weighting Factor (w)는 Table 5와 같이 종로에서 0.448, 강남에서 0.004로 추정되었다. Figure 5에 도식한 u_{crash} 함수의 그래프와 함수값에 따르면, 종로보다 w 가 낮은 강남은 교통사고 심각도가 낮게 나타났다. 기존 연구와 w 추정의 일관된 결과는 w 를 통한 도로망의 안전성 분석이 가능함을 시사한다. 2018년 기준, TAAS에서 구득한 인구 10만 명 당 사망자 수도 종로보다 강남에서 적었으므로, w 의 함의가 통계자료와도 일관됨을 확인하였다.

Table 5. Intersection density, utility of a crash and accident statistics

Region	Intersection density (km^{-1})	w	v_r (kph)	$u_{crash} = -wv_r^k$	Fatality per 100 thousand capita*
Jongno	1.07	0.448	26.18	-248.068	5.0
Gangnam	1.00	0.004	27.87	-2.206	3.6

*Data: Traffic Accident Analysis System (TAAS).

Figure 5. The perceived utility of a crash (u_{crash}) function

3. 정지판단속도에 따른 민감도 분석

기존 연구들의 정지판단속도를 참고하여(Hong et al., 2003; Xiang et al., 2007; Dixit and Geroliminis, 2015; Pande et al., 2015; Lu et al., 2016; Lin et al., 2018; Lu et al., 2018) 본 연구는 정지판단속도를 0kph에서 5kph까지 변화시키면서 Perceived Crash Likelihood Factor (β)와 Crash Weighting Factor (w)의 민감도 분석을 수행하였다. Table 6을 보면, 종로 지역의 경우 정지판단속도 0kph에서 5kph까지 증가하는 동안 β 는 3배가량, w 는 4배 이상 증가하였다. 강남 지역의 경우 정지판단속도 0kph에서 4kph까지 β 와 w 가 거의 일정하였고, 5kph부터 두 값이 급증하였다.

Table 6. Sensitivity analysis of crash risk perception factors for stop speed threshold

Stop speed threshold (kph)	Jongno		Gangnam	
	β	w	β	w
0	0.525	0.488	0.006	0.004
1	0.647	0.611	0.005	0.003
2	0.779	0.758	0.008	0.004
3	0.922	0.938	0.010	0.006
4	1.156	1.304	0.025	0.014
5	1.521	2.075	0.472	0.303

결과적으로 Two-fluid Model 파라미터가 정지판단속도에 영향을 받는다는 기존 연구(Xiang et al., 2007)와 유사하게 교통사고 위험 인지 계수도 정지판단속도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 분석 시 설정한 정지판단속도에 따라 도로망 안전성의 결과 해석이 크게 바뀔 수 있음을 의미한다. 본 연구는 특정 지역에 대해서만 분석하였기 때문에 보편적으로 적용할 수 있는 정지판단속도를 제시하지는 않았다. 향후 신뢰성 있는 결과를 얻기 위한 정지판단속도를 결정하는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한, Figure 6에서 β 와 w 가 유사하게 변동하는 경향을 확인하였다. 이를 통해 두 계수 사이에 일정한 관계가 존재할 것으로 판단되며 이에 대한 추가적인 연구도 필요할 것으로 보인다.

Figure 6. Generally increasing crash risk perception factors with stop speed threshold increasing

결론

본 연구는 Dixit(2013)의 모형이 도시부 도로망의 안전성을 거시적으로 분석하는 데 활용될 수 있음을 실제 데이터를 통해 확인하고자 하였다. 이를 위해 택시 DTG 데이터를 이용하여 서울시 종로와 강남 지역의 교통사고 위험

인지 계수를 추정하였다. 차로 수가 많을수록 교통사고 발생확률이 높고, 교차로 밀도가 높을수록 교통사고 심각도가 높다는 기존 연구 결과와 종로 및 강남 지역을 비교한 본 연구 결과가 일관됨이 확인되었다.

GPS 데이터를 활용한 Two-fluid Model 분석 시 정지판단속도는 Two-fluid Model 파라미터 추정치에 영향을 미친다. 따라서 Two-fluid Model 파라미터를 활용하여 추정되는 교통사고 위험 인지 계수도 정지판단속도에 따라 영향을 받을 것으로 예상할 수 있었고, 이를 확인하기 위해 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과, 정지판단속도가 증가함에 따라 두 계수가 증가하는 경향이 있었으며 두 계수의 변동이 거의 유사하였다.

본 연구는 Dixit(2013)이 제시한 모형의 도시부 도로망의 거시적인 안전성 분석에서의 활용 가능성을 실증 데이터를 통해 확인하였다. 향후 다양한 지역과 다양한 도로망 기하특성에 대한 분석을 통해 Dixit(2013)의 모형을 검증할 필요가 있으며, 교통사고 위험 인지 계수 간 관계를 밝히는 연구가 진행되어야 한다. 본 연구를 기초로 도시부 도로망의 거시적인 교통사고 위험도 연구가 가능할 것으로 기대된다.

Funding

This research was supported by Projects for Research and Development of Police science and Technology under Center for Research and Development of Police science and Technology and Korean National Police Agency funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning (PA-A000001-2015-206). And the Institute of Engineering Research at Seoul National University provided research facilities for this work.

알림

본 논문은 대한교통학회 제81회 학술발표회(2019.09.27.)에서 우수논문상을 수상한 내용을 수정·보완하여 작성된 것입니다.

ORCID

MOH, Daesang <http://orcid.org/0000-0003-1282-0973>

LEE, Jaehyeon <http://orcid.org/0000-0002-6193-6270>

JUNG, Jongwoo <http://orcid.org/0000-0003-0985-438X>

LEE, Chungwon <http://orcid.org/0000-0002-2845-5002>

References

- Ardekani S., Williams J. C., Bhat S. (1992), Influence of Urban Network Features on Quality of Traffic Service, *Transp. Res. Rec.*, (1358), 6-12.
- Ayadh M. T. (1986), Influence of the City Geometric Features on the Two Fluid Model Parameters (Doctoral Dissertation, Virginia Tech).
- Ayuso M., Guillen M., Marín A. M. P. (2016), Using GPS Data to Analyse the Distance Travelled to the First Accident at Fault in Pay-as-you-drive Insurance, *Transp. Res. Part C: Emerg. Technol.*, 68, 160-167.
- Boonsiripant S. (2009), Speed Profile Variation as a Surrogate Measure of Road Safety Based on GPS-equipped Vehicle Data (Doctoral Dissertation, Georgia Institute of Technology).
- Charlton S. G., Starkey N. J., Perrone J. A., Isler R. B. (2014), What's the Risk? A Comparison of Actual and Perceived Driving Risk, *Transp. Res. Part F: Traffic Psychol. Behav.*, 25, 50-64.

- Cheng Y., Qin X., Jin J., Ran B., Anderson J. (2011), Cycle-by-cycle Queue Length Estimation for Signalized Intersections Using Sampled Trajectory Data, *Transp. Res. Rec.*, 2257(1), 87-94.
- Chung Y. S., Choi K. C. (1999), A Development of Travel Time Estimation Algorithm Fusing GPS Probe and Loop Detector, *J. Korean Soc. Transp.*, 17(3), Korean Society of Transportation, 97-116.
- Dixit V. V. (2013), Behavioural Foundations of Two-fluid Model for Urban Traffic, *Transp. Res. Part C: Emerg. Technol.*, 35, 115-126.
- Dixit V. V., Geroliminis N. (2015), Empirical Investigation of Dynamics of the Two-Fluid Model and Macroscopic Fundamental Diagram with Probe Vehicles, *TRB 94th Annual Meeting*, 1-18.
- Dixit V. V., Pande A., Abdel-Aty M., Das A., Radwan E. (2011), Quality of Traffic Flow on Urban Arterial Streets and Its Relationship with Safety, *Accid. Anal. Prev.*, 43(5), 1610-1616.
- Doh T. W. (2004), Principle of Transportation Engineering (2nd Ed., Vol. 1), Cheongmoongak (교통공학원론).
- Elvik R., Christensen P., Helene Amundsen A. (2004), Speed and Road Accidents: An Evaluation of the Power Model, TØI, Transportøkonomisk Institutt, Oslo - Norge: Transportøkonomisk Institutt.
- Geroliminis N., Daganzo C. F. (2008), Existence of Urban-scale Macroscopic Fundamental Diagrams: Some Experimental Findings, *Transp. Res. Part B: Methodol.*, 42(9), 759-770.
- Herman R., Ardekani S. (1984), Characterizing Traffic Conditions in Urban Areas, *Transp. Sci.*, 18(2), 101-140.
- Herman R., Malakhoff L. A., Ardekani S. A. (1988), Trip Time-stop Time Studies of Extreme Driver Behaviors, *Transp. Res. Part A: Gen.*, 22(6), 427-433.
- Herman R., Prigogine I. (1979), A Two-fluid Approach to Town Traffic, *Sci.*, 204(4389), 148-151.
- Hong S. Y., Chon K. S., Kho S. Y. (2003), Analysis of Two-Fluid Model Using GPS Data, In *Proceedings of the KOR-KST Conference*, 44, 1-6.
- Jayakrishnan R., Mattingly S. P., McNally M. G. (2000), Performance Study of SCOOT Traffic Control System with Non-Ideal Detectorization : Field Operational Test in the City of Anaheim, In Report UCI-ITS-WP-00-27.
- Jeong Y. J., Kim Y. C., Kim D. H. (2009), Analysis of the Macroscopic Traffic Flow Changes using the Two-Fluid Model by the Improvements of the Traffic Signal Control System, *J. Korean Soc. Transp.*, 27(1), Korean Society of Transportation, 27-34.
- Kim J. K., Kim J. H., Park J. I., Kim D., Choi S., Lim Y. T. et al. (2014), Safe Environment against Traffic Accidents, Korea Research Institute for Human Settlements.
- Ko J. (2006), Characteristics of Acceleration Noise Obtained from GPS-Equipped, In *Proceedings of the KOR-KST Conference*, 53, 873-880.
- Ko J., Lee C., Lee S. (2011), Evaluation of Seoul Regional Road Network Efficiency Using Two-fluid Model, In *Proceedings of the KOR-KST Conference*, 64, 306-311 (Two-fluid Model을 활용한 서울시 지역별 도로망 효율성 평가).
- Kwon M., Kim Y. (2018), Analysis of Traffic Flow Characteristics Using Taxi DTG Big Data, *J. Korean Soc. Transp.*, 36(6), Korean Society of Transportation, 415-428.
- Kwon Y. B., Lee J., Kim S., Lee C. (2019), A New Approach to the Parameter Calibration of Two-Fluid Model, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 39(1), Korean Society of Civil Engineers, 63-71.

- Lee C., Kwon B. (2003a), Comparative Analysis of Link-based and Distance-based Probe Vehicle Data in Two-fluid Model, In Proceedings of the KOR-KST Conference, 44, 1-6.
- Lee C., Kwon B. (2003b), Macroscopic Impact of Snowing and Raining on Urban Transportation Network, Seoul Studies, 4(1), 13-22.
- Lin P., Weng J., Yin B., Zhou X. (2018), Urban Road Network Operation Quality Evaluation Method Based on High-Frequency Trajectory Data, In 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 3602-3607.
- Lu S., Knoop V. L., Keyvan-Ekbatani M. (2018), Using Taxi GPS Data for Macroscopic Traffic Monitoring in Large Scale Urban Networks: Calibration and MFD Derivation, Transp. Res. Procedia, 34, 243-250.
- Lu S., Wang J., Xue Z., Liu X. (2016), Traffic Analysis and OD Travel Time Matrix Based on Two-Fluid Model, J. Highway. Transp. Res. Dev. (Eng. Ed.), 10(3), 78-84.
- Mohring H. (1965), Urban Highway Investments, Measuring Benefits of Government Investments, Brookings Institution, Washington, D.C., USA, 231-291.
- Pande A., Loy J., Dixit V. V., Spansel K., Wolshon B. (2015), Integrity of Estimates of the Two-fluid Model and Gender impacts, Transp. Res. Part C: Emerg. Technol., 50, 141-149.
- Park J. T., Lee S. B., Kim J. W., Lee D. M. (2008), Development of Traffic Accident Prediction Model in Urban Signalized Intersections, In Proceedings of the KOR-KST Conference, 58, 521-530.
- Park J., Oh C., Yun D. (2017), A Methodology for Evaluating Vehicle Driving Safety based on the Analysis of Interactions With Roads and Adjacent Vehicles, J. Korean Soc. Transp., 35(2), Korean Society of Transportation, 116-128.
- Parkin J. M., Wu S. Y. (1972), Choice Involving Unwanted Risky Events and Optimal Insurance, The American Economic Review, 62(5), American Economic Association, 982-987.
- Quiroga C. A., Bullock D. (1998), Travel Time Studies with Global Positioning and Geographic Information Systems: An Integrated Methodology, Transp. Res. Part C: Emerg. Technol., 6(1-2), 101-127.
- Ryu K. T., Lee Y. J. (2004), A Traffic Accident Analysis of at-Grade Intersections, In Proceedings of the KOR-KST Conference, 46, 1-6.
- Shim S. W., Choi K. C. (2006), Link Travel Time Estimation Using Uncompleted Link-passing GPS Probe Data in Congested Traffic Condition, J. Korean Soc. Transp., 24(5), Korean Society of Transportation, 7-18.
- Tarko A. P. (2009), Modeling Drivers' Speed Selection as a Trade-off Behavior, Accid. Anal. Prev., 41(3), 608-616.
- Taylor D. H. (1964), Drivers' Galvanic Skin Response and the Risk of Accident, Ergonomics, 7(4), 439-451.
- Williams T., Alves P., Lachapelle G., Basnayake C. (2012), Evaluation of GPS-based Methods of Relative Positioning for Automotive Safety Applications, Transp. Res. Part C: Emerg. Technol., 23, 98-108.
- Won J. M., Choi D. S., Mo M. (2006), A Development of Models for Predicting the Traffic Accidents Using Discriminant Analysis, In Proceedings of the KOR-KST Conference, 51, 187-194.
- Wu S. K., Hunter M. P., Lee C., Rodgers M. O. (2011), Evaluation of Traffic Signal Control System Using a System-wide Performance Measure under Two-fluid Model Theory, KSCE Journal of Civil Engineering, 15(2), Korean Society of Civil Engineers, 395-403.
- Xiang Z., Jian R., Jiancheng W., Changqiao S. (2007), Network-wide Performance Assessment of Urban Traffic Based on Probe Vehicle Data, In 2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, 442-447.
- Zeng S. (2015), A Study of Two-fluid Model with Ring Road Simulation (Doctoral dissertation, UC Irvine).