

Two-fluid Model 파라미터를 활용한 강우에 따른 도시부 네트워크 운영성 및 위험도 변화 분석

이재현* · 모대상** · 김선호*** · 이청원****

Lee, Jaehyeon*, Moh, Daesang**, Kim, Sunho***, Lee, Chungwon****

Analysis of Urban Network Operability and Crash Risk Change Caused by Rainfall Using Two-fluid Model Parameters

ABSTRACT

The Two-fluid Model, proposed by Herman and Prigogine in 1979, is a macroscopic model for describing network operability in urban networks. Since the Two-fluid Model parameters change according to the traffic flow characteristics, it is necessary to identify the cause of flow change when analyzing the operability using the parameters. This study compared the crash risk according to rainfall using the Two-fluid Model parameters, and explained that the driving behavior affects the operability of the urban network. The results of the parameters estimation showed poor network operation under rainfall condition. The factors of drivers' crash risk perception model were calculated, and driving behavior was analyzed due to crash risk according to rainfall. In both the morning and evening, drivers tended to slow down their speeds to reduce the crash risk, because the risk on rainy days could be high when the speed was the same as on a sunny days. However, the crash risk was still higher on rainy days than sunny. In the future, it is necessary to analyze the relationship between the network operation and the crash risk in various networks and to improve both.

Key words : Two-fluid Model, Crash risk, Rainfall, Traffic flow characteristics

초록

1979년 Herman과 Prigogine에 의해 제안된 Two-fluid Model은 도시부 네트워크의 운영성을 설명하는 거시적인 모형으로서 네트워크 내 정지차량 비율과 평균 주행속도의 관계에 기초하고 있다. 이러한 Two-fluid Model의 파라미터는 교통류 특성에 따라 변화하므로 파라미터를 통한 운영성 분석 시 교통류 상태 변화를 규명하는 단계가 수반되어야 한다. 이에 본 연구는 Two-fluid Model의 파라미터를 활용하여 강우에 따른 교통사고 위험도를 비교하였고, 이로 인한 주행 행태가 도시부 네트워크의 운영성에 영향을 미침을 확인하였다. 먼저 Two-fluid Model 파라미터 추정결과, 맑은 날 대비 비가 온 날의 네트워크 운영성이 저하된 것으로 나타났다. 이후 운전자의 교통사고 위험인지 모형 계수를 산출하고 강우 여부에 따른 교통사고 위험도와 그에 따른 주행 행태 변화를 분석하였다. 오전·오후 시간대 모두 운전자는 맑은 날과 동일한 속도를 유지하였을 때 비가 온 날의 교통사고 위험도가 높을 수 있기 때문에, 위험도를 낮추기 위해 주행속도를 감속하는 경향을 보였다. 그러나 맑은 날 보다 비가 온 날의 위험도는 여전히 높은 것으로 파악되었다. 향후에는 도시부 교통망의 거시적 운영성과 사고 위험도 간의 관계를 보다 다양한 네트워크에서 분석하고 동시에 개선할 수 있는 방안을 연구해볼 필요가 있겠다.

검색어 : Two-fluid 모형, 교통사고 위험, 강우, 교통류 특성

* 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 석박사통합과정 (Seoul National University · jaehyeon@snu.ac.kr)

** 서울대학교 건설환경공학부 석박사통합과정 (Seoul National University · mohdan@snu.ac.kr)

*** 정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 석박사통합과정 (Seoul National University · ohnus@snu.ac.kr)

**** 교신저자 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Corresponding Author · Seoul National University · chungwon@snu.ac.kr)

Received December 31, 2019/ revised January 31, 2020/ accepted February 5, 2020

1. 서론

Herman과 Prigogine이 1979년에 제안한 Two-fluid Model은 도시부 네트워크의 교통류를 설명하는 거시적인 모형으로서, 주로 네트워크 효율성 비교 및 신호 운영 시스템 적용 전·후의 운영성 분석에 활용되었다. 또한, 운전자의 성향에 따른 Two-fluid Model의 파라미터 변화, 기상 상태가 파라미터에 미치는 영향, 네트워크의 기하적 특성과 파라미터와의 관계 등 파라미터에 변화에 영향을 미치는 여러 요인에 대해서도 연구가 진행되었다.

Two-fluid Model은 네트워크 내의 정지차량비율과 평균주행속도의 관계에 기초하고 있어 네트워크 교통류 특성에 따라 파라미터가 변화하게 된다. 따라서 Two-fluid Model의 파라미터에 미치는 영향 분석에는 교통류 상태 변화를 규명하는 단계가 수반되어야 한다. 교통류 상태 변화는 운전자의 주행 행태로부터 기인하며, 주행 행태는 운전자의 교통사고 위험도에 따라 달라진다고 볼 수 있다.

주행 중인 운전자의 위험도에 관한 연구는 지속적으로 진행되어 왔다. 과거에는 주로 설문조사를 통해 운전자가 인지하는 위험에 관한 분석이 진행되었으나, 최근에는 주행 행태 데이터를 이용하여 운전자가 인지한 위험도를 분석하는 방법도 연구되었다. 사람은 기대 효용을 최대화하는 선택을 한다는 경제학적 관점에서 출발한 운전자 기대 효용 모형이 제안(O'Neill, 1977)된 이후로, 운전자의 부효용을 최소화하는 속도 선택모형을 이용한 위험도 분석이 연구되었고(Tarko, 2009), 속도 선택모형과 Two-fluid Model의 파라미터를 결합하여 운전자가 인지하는 교통사고 위험 모형을 구성 및 제안한 연구도 수행되었다(Dixit, 2013). 이러한 운전자의 교통사고 위험도 분석 방법은 교통류 상태 변화의 원인을 설명하는 데에 유용하게 활용될 수 있다.

현재까지 Two-fluid Model의 파라미터에 영향을 미치는 요인들에 대한 연구는 주로 파라미터와 요인 간의 관계를 밝히거나, 요인이 네트워크에 미치는 영향을 Two-fluid Model의 파라미터를 통해 설명하는 것에 초점을 두었을 뿐 그 원인은 분석하지 못하였다. 이에 본 연구는 강우에 따른 네트워크의 운영성 변화를 Two-fluid Model의 파라미터를 통해 확인하고, 이러한 네트워크 운영성에 영향을 미치는 교통류 상태 변화의 원인이 운전자의 교통사고 위험도 차이에서 기인하였음을 분석하고자 하였다.

2. 문헌 고찰

2.1 Two-fluid Model 연구

네트워크 평균 최소통행시간을 의미하는 T_m 과, 수요 증가 시 네트워크 운영성 저하 정도를 의미하는 n 의 두 파라미터가 분석

결과로 산출되는 Two-fluid Model은 주로 신호 교차로 등으로 인해 네트워크 내 정지차량이 항상 존재하는 도시부 네트워크 분석 시 활용되었다(Wu et al., 2011). 특히, Two-fluid Model 파라미터의 비교를 통해 도시부 네트워크의 효율성을 상대적으로 비교할 수 있다는 것이 밝혀진 이후(Herman and Ardekani, 1984) 새로운 신호 운영 시스템의 적용 전·후의 운영 효과를 분석한 연구(Jayakrishnan et al., 2001; Wu et al., 2011), 지역별 도로망의 효율성을 비교한 연구(Vo et al., 2007) 등이 진행되었다.

한편, Two-fluid Model의 파라미터에 영향을 미치는 여러 원인에 대해서도 연구가 진행되었다. Herman et al.(1988)은 운전자의 공격적이거나 보수적인 운전 행태가 파라미터에 미치는 영향을 분석하였으며, Ayadh(1986)은 네트워크 특성과 Two-fluid Model의 파라미터 사이의 관계를 회귀 분석을 활용하여 연구하였다. Lee and Kwon(2003)은 눈·비로 인한 도시부 교통망의 영향을 Two-fluid Model 파라미터의 변화를 통해 설명하고자 하였다. 해당 연구는 구조변동검정(Test of Structural Change)을 통해 맑은 날과 눈·비가 온 날의 파라미터에 차이가 있음을 확인하고, 자료를 구분하여 파라미터를 산정하는 것이 합당하다는 결론을 도출하였다. 그러나 분석 자료의 한계로 인해 비에 의한 영향이 미미한 수준임을 밝혔으며, 자료를 구분하여 분석하는 틀을 제시한 것에 의의를 두었다.

2.2 운전자의 교통사고 위험도 관련 연구

운전자가 인지하는 교통사고 위험도(Drivers' Crash Risk Perception)는 표면적으로 관찰하기 쉽지 않아(Dixit, 2013), 주로 설문조사를 활용하거나 주행 중 신체의 변화를 관찰하는 방법으로 연구되었다. Kim et al.(2014)은 도로 선형 등의 기하구조, 주변 차량의 운전 행태에 따라 인지하는 위험과 주행속도가 변화한다는 것을 설문조사를 통해 분석하였다. Taylor(1964)는 피부 감지장치를 이용하여 실제 주행하는 피실험자의 전기피부반응(Galvanic Skin Response)을 측정하여 운전자의 위험도를 연구하였으며, Charlton et al.(2014)은 운전 시뮬레이터와 시선 추적기를 이용하여 여러 주행 상황에서의 운전자의 위험도 인지 수준을 분석하였다.

한편, 주행속도를 이용한 운전자의 교통사고 위험도 분석에 관한 연구도 진행되었다. Mohring(1965)은 운전자가 주행하는 속도는 통행 시간과 차량 운행비용에 관련된다는 가정에 기반한 속도 선택모형을 제안하였다. O'Neill(1977)은 효용 최대화 선택이라는 경제학적 개념을 활용하여 운전자의 기대 효용 모형을 제안하였으며, Tarko(2009)는 속도 선택모형에 효용의 개념을 적용하여 운전자는 부효용을 최소화한다는 속도 선택모형을 제안하였다. Dixit(2013)은 일찍이 경제학 및 보험 분야에서 활용되던 State-dependent Utility의 개념(Parkin and Wu, 1972; Drèze and

Stem, 1987)과 속도 선택모형을 결합하여, 운전자의 주행 중 기대 효율을 교통사고 발생 시와 교통사고 미발생 시로 구분한 주행속도 및 주행시간비율에 따른 운전자의 교통사고 위험인지 모형을 제안하였다. 운전자가 인지하는 교통사고 발생 확률과 교통사고 발생 시의 부효용은 주행시간비율과 평균주행속도에 각각 비례한다는 가정에 기반하였으며, 변수의 치환을 통해 Two-fluid Model의 파라미터를 이용하여 해당 모형의 계수를 산출할 수 있음을 증명하였다. 본 연구는 Dixit(2013)이 제안한 모형과 Two-fluid Model 파라미터를 활용하여 네트워크의 운영성 및 위험도를 분석하고자 하였다.

3. 방법론

3.1 Two-fluid Model

Two-fluid Model은 개별 링크가 아닌 네트워크 단위의 거시적인 교통류를 묘사하고, 도시부 네트워크의 운영성을 평가하는데 유용하게 활용되는 모형이다(Herman and Prigogine, 1979). 여기서 Two-fluid란 네트워크 내 차량을 주행 중인 차량과 정지 중인 차량으로 구분하는 것을 의미하며, 복잡한 도시부 교통류에 대해 주행과 정지라는 간단한 개념을 적용하여 네트워크의 효율성을 거시적으로 분석 가능하다는 장점이 있다.

본 모형은 다음과 같은 두 가지의 가정에 기반을 두고 있다. 첫째, 네트워크 내 차량들의 평균주행속도는 주행 중인 차량의 비율에 비례하며, Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다. 이때 V_m 은 자유류 상태에서 네트워크를 통행할 때의 평균적인 최대 통행속도를 의미하며, f_r 과 f_s 는 정의에 의해 $f_r + f_s = 1$ 을 만족한다.

$$V_r = V_m f_r^n (= V_m(1 - f_s)^n) \quad (1)$$

(V_r : 네트워크 평균 주행속도, V_m : 네트워크 평균 최대통행속도, f_s : 네트워크 정지차량비율, f_r : 네트워크 주행차량비율, n : 네트워크 저항계수)

두 번째 가정은 네트워크에서 임의로 선택한 차량이 분석 네트워크를 벗어날 때까지 해당 차량을 추종하며 통행한 프로브 차량의 통행 시간 대비 정지한 시간의 비율은, 네트워크 내에 정지 중인 차량의 비율과 같으며, Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다. 이러한 ‘Ergodic’한 특징에 기반한 가정은 기존 연구에서 해석적으로 증명하였으며(Ardekani and Herman, 1987), 이론적으로 네트워크 특성을 한 대의 프로브 차량으로도 묘사하는 것이 가능함을 의미한다.

$$f_s = \frac{T_s}{T} \left(= 1 - \frac{T_r}{T} \right) \quad (2)$$

$$(T = T_s + T_r)$$

(T : 단위거리 당 통행시간, T_s : 단위거리 당 정지시간, T_r : 단위거리 당 주행시간)

평균통행속도는 정의에 의해 Eq. (3)과 같이 표현할 수 있으며, Eqs. (1) and (3)으로부터 Eq. (4)를 얻을 수 있다.

$$V = V_r f_r + V_s f_s = V_r f_r \quad (3)$$

$$(\because V_s = 0)$$

$$V = V_m f_r^{n+1} \quad (4)$$

두 번째 가정인 Eqs. (2) and (4)로부터 Eq. (5)를 얻을 수 있으며, 정리하면 최종적으로 Eq. (6)과 같이 Two-fluid Model의 모형식이 도출된다.

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_m} \left(\frac{T_r}{T} \right)^{n+1} \quad (5)$$

$$T_r = T_m \frac{1}{n+1} T^{\frac{n}{n+1}} \quad (6)$$

여기서 T_m 은 단위거리당 최소 통행시간을 의미하고 n 은 통행수요가 증가함에 따른 네트워크 성능 악화 정도를 의미하며, 두 파라미터의 값이 작을수록 네트워크의 운영성이 양호함을 의미한다. 두 파라미터를 추정하기 위해서는 프로브 차량에서 구득한 데이터를 일정한 거리 또는 시간을 기준으로 분할한 후 통행시간과 정지시간을 산출한 데이터를 활용하여야 한다. 이때 분할 기준을 분석 단위라고 하며, 대상 네트워크의 크기 또는 기하구조에 따라 연구자의 재량으로 설정하여 분석을 진행하게 된다. 분석 단위에 따라 산출한 통행시간과 정지시간을 활용하여 T 와 T_r 을 계산하고, Eq. (6)을 로그선형 회귀분석하여 T_m 과 n 을 추정할 수 있다. 이러한 T_m 과 n 이 Two-fluid Model의 파라미터이며 두 파라미터의 값을 활용하여 네트워크의 운영성을 거시적으로 평가할 수 있다.

3.2 운전자의 교통사고 위험인지 모형

경제학적 관점에서 소비자는 기대 효율을 최대화하는 방향으로 행동한다는 개념은 일찍이 정립되어 활용되고 있었다(Parkin and Wu, 1972). O'Neill(1977)은 이러한 개념을 운전자의 행태에 적용하여 주행 중 운전자가 겪는 상황을 교통사고 발생과 미발생의 두 가지 상황으로 구분하였고, 운전자가 사고 확률을 정확히 판단한다는 가정하에 운전자의 기대 효율은 교통사고 발생 시의 부

(Negative)효용 및 교통사고 미발생 시의 효용의 합으로 나타내는 모형을 제안하였다.

Dixit(2013)은 이러한 운전자 기대 효용 모형에 운전자가 인지한 위험도가 높을수록 주행속도를 감소시킨다는 가정을 추가하여, 관찰된 속도자료로 운전자가 인지한 교통사고 위험에 대한 효용을 분석하는 속도선택모형(Tarko, 2009)을 결합한 모형을 Eqs. (7) and (8)과 같이 구성하였다.

$$V_r = \operatorname{argmax}_{V_r} E[u]$$

$$E[u] = P_{crash} u_{crash} + P_{no\ crash} u_{no\ crash} \quad (7)$$

(V_r : 평균주행속도, $E[u]$: 기대 효용, P_{crash} : 운전자가 인지하는 교통사고가 발생할 확률, $P_{no\ crash}$: 운전자가 인지하는 교통사고가 발생하지 않을 확률, u_{crash} : 운전자가 인지하는 교통사고 발생 시 부효용, $u_{no\ crash}$: 운전자가 인지하는 교통사고 미발생 시 효용)

$$P_{crash} = \alpha f_r^\beta$$

$$P_{no\ crash} = 1 - P_{crash}$$

$$u_{crash} = -w V_r^k$$

$$u_{no\ crash} = V \quad (8)$$

(α : baseline perceptions of causing a crash ($0 < \alpha \leq 1$), β : perceived crash likelihood factor ($\beta > 0$), w : crash weighting factor ($w > 0$), k : perceived impact factor ($k > 1$), f_r : 주행시간 비율, V_r : 평균주행속도, V : 평균통행속도)

운전자의 기대 효용은 속도선택모형에 의해 V_r 에 대하여 위로 볼록한 함수의 형태이므로 $\partial E[u] / \partial V_r = 0$ 일 때 최대값을 가지며, 이에 따라 정리한 결과는 다음과 같다.

$$\beta V = (k - \beta) w V_r^k \quad (9)$$

이때 Eq. (10)을 활용하여 Two-fluid Model의 파라미터가 포함된 식을 유도할 수 있으며, Dixit(2013)이 최종적으로 제안한 모형은 Eq. (11)과 같다. 제안한 모형의 좌변을 종속변수로, 우변의 $1/n$ 을 독립변수로 하는 회귀분석을 통해 운전자의 교통사고 위험 인지 모형의 계수인 w 와 β 를 산출할 수 있다. 그러나 Eq. (8)에서 α 는 운전자의 Baseline Perceptions of Causing a Crash로서 본 모형에서는 산출할 수 없고, 운전자가 기본적으로 인지하는 교통사고 위험도 등의 설문조사를 통해 그 값을 얻을 수 있다.

$$V = \frac{1}{T}, \quad V_r = \frac{1}{T_r}, \quad k = 1 + \frac{1}{n} \quad (10)$$

$$T_m^{\frac{1}{n}} = \frac{w}{\beta} \frac{1}{n} + \frac{w}{\beta} - w \quad (11)$$

운전자의 교통사고 위험인지 모형의 계수(α, β, w, k)를 산출한 후 P_{crash} 와 u_{crash} 를 도식화하면 Fig. 1과 같은 형태를 보인다. P_{crash} 그래프를 통해 주행시간 비율이 높아지면 교통사고 발생 확률은 높아지고, u_{crash} 그래프를 통해 평균 주행속도가 높아지면 교통사고 발생 시의 부효용이 커짐을 알 수 있다. 여기서 부효용은 음의 값으로 나타나고 교통사고가 발생했을 때의 사고 심각도로 해석할 수 있으며, 절대값이 클수록 심각도가 더 높은 것으로 볼 수 있다. 즉, 동일한 평균 주행속도에서 w 가 클수록 운전자는 교통사고 발생 시의 부효용이 크기 때문에 운전자는 감속할 것을 그래프를 통해 예상할 수 있다. 본 연구에서는 강우에 따른 운전자의 주행 행태 변화를 설명하는데 본 모형이 유용할 것으로 판단하여 분석에 활용하였다.

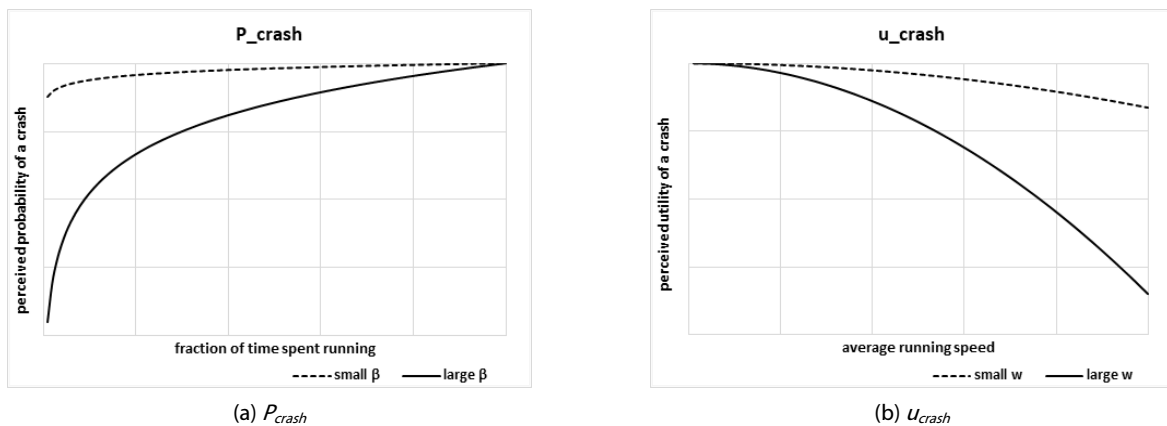


Fig. 1. Example of P_{crash} and u_{crash} Graph

4. 사례 연구

4.1 연구 범위

본 연구의 공간적 범위는 강남구 개포동 인근 4개 도로축을 포함하는 2 × 2 km 네트워크로 설정하였다(Fig. 2). 해당 지역의 남쪽에는 주간선도로인 양재대로와 성남시와 연결되는 구룡터널 및 언주로가 있고, 북쪽에는 강남구 중심 업무지구가 위치하여 차량의 통행이 상대적으로 많은 지역이다. 우리나라의 기후 특성상 강우가 잦은 여름을 대상으로 분석하기 위해 분석 기간을 2019년 6월 1일부터 2019년 8월 29일까지로 설정하였으며, 차량 통행의 변동이 많은 06시부터 10시까지의 오전 시간대 4시간과, 17시부터 21시까지의 오후 시간대 4시간을 분석 시간으로 설정하였다. 분석에 사용한 자료는 서울시 택시 DTG 자료와 학여울역 인근 기상관측소에서 기록된 시간당 강우량 자료이다. 수집 또는 기록이 되지 않아 누락된 데이터를 제외하고 오전 시간대는 86일, 오후 시간대는 87일을 대상으로 분석을 진행하였다.



Fig. 2. Spatial Scope (Gangnam-gu, Seoul)

4.2 분석 결과

서울시 택시 DTG 데이터 중 분석 네트워크에 포함되는 링크를 통과한 데이터만을 활용하여 오전 시간대와 오후 시간대 각각의 Two-fluid Model 파라미터를 추정하였다. 분석 단위는 대상 네트워크의 크기를 고려하여 2.0 km 거리 기준으로 설정하였고, 택시 DTG 데이터에 기록된 속도의 정지판단속도는 0 kph를 적용하였다. 또한 택시 DTG 데이터를 활용하여 네트워크의 평균통행속도와 평균주행속도를 산출하여 분석에 활용하였다.

오전 시간대의 파라미터 추정결과는 Table 1과 같다. 맑은 날의 평균 T_m 은 1.072, 비가 온 날은 1.053으로 비슷한 수준으로 나타났으나, 평균 n 의 경우 맑은 날이 0.900, 비가 온 날이 1.042로 약 15.7%가 증가하여 T_m 에 비해 상대적으로 큰 차이를 보였다. 이는 맑은 날 대비 비가 온 날의 네트워크 운영성이 저하되었으며, 특히 비가 온 날은 통행수요 증가 시 네트워크 운영성 악화 정도가 빠르게 진행된 것을 의미한다. T-test 결과에서도 유의수준 0.05에서 T_m 은 유의하지 않지만 n 은 유의한 것으로 나타났다.

오후 시간대의 경우 맑은 날의 평균적인 T_m 은 1.139, n 은 0.938로 나타났으며, 비가 온 날의 평균적인 T_m 은 1.144, n 은 0.980으로 오전 시간대의 결과보다 상대적으로 작은 차이를 보였다. 이는 오전 시간대에 비해 오후 시간대는 맑은 날 대비 비가 온 날의 네트워크 운영성이 저하된 정도가 상대적으로 작음을 의미하는데, 맑은 날 오전 시간대 대비 오후 시간대는 불법주정차와 같이 용량감소에 영향을 주는 가로변 마찰 등의 요인으로 인해 전반적인 네트워크 운영성이 오전 시간대보다 이미 상당히 저하되어 T_m 과 n 이 높게 추정되었고, 이로 인하여 강우로 인한 운영성 저하가 뚜렷이 나타나지 않은 것으로 볼 수 있다.

이러한 결과는 Fig. 3과 같이 그래프를 통해서도 확인할 수 있다. 오전 시간대의 경우 맑은 날 대비 비가 온 날의 n 이 상대적으로 높음을 알 수 있으며, 비가 온 날의 회귀직선(실선)이 맑은 날의 회귀직선(점선)보다 상대적으로 우상단에 위치하고 있어 뚜렷한 차이를 보인다. 그러나 오후 시간대의 경우 맑은 날과 비가 온 날의 회귀직선이 오전 시간대 대비 상대적으로 작은 차이를 보이고 있어 네트워크 운영성 저하 정도가 뚜렷하지 않음을 알 수 있다.

Table 1. Summary of Two-fluid Model Parameters

Period	Whether	Number of days	T_m (min/km)			n		
			Avg. T_m	t	P value	Avg. n	t	P value
Morning (06:00-10:00)	Sunny	70	1.072	0.97	0.33	0.900	-2.56	0.01*
	Rainy	16	1.053			1.042		
Evening (17:00-21:00)	Sunny	74	1.139	-0.15	0.88	0.938	-0.49	0.62
	Rainy	13	1.144			0.980		

*P value < Significant level 0.05

오전 시간대의 Two-fluid Model 파라미터 추정결과를 활용하여 운전자의 교통사고 위험인지 모형의 계수인 β (perceived crash likelihood factor), w (crash weighting factor), k (perceived impact factor)를 산출한 결과는 Table 2와 같다. 오전 시간대의 경우 β , w 는 맑은 날 대비 비가 온 날이 약 8~9배 크게, k 는 약 7 % 작게 산출되었다. 비교를 위해 산출된 결과를 모형에 적용한 결과는 Fig. 4과 같으며, 이때 α (baseline perceptions of causing a crash)는 방법론에서 언급한 것과 같이 설문조사 등을 통해 얻을 수 있는 값이므로 본 연구에서는 고려하지 않았다. P_{crash} 와 u_{crash} 모두 맑은 날 대비 비가 온 날에 전반적으로 낮은 경향을 보였다. 이는 맑은 날과 동일한 주행시간 비율 및 주행속도일

때 비가 온 날의 교통사고가 발생할 확률은 낮지만, 교통사고 발생 시의 사고 심각도는 높아진 것으로 볼 수 있으므로, 운전자는 교통사고로 인한 부효용의 기댓값을 감소시키기 위해 주행 행태를 변경할 것으로 예상할 수 있다.

오전 시간대의 맑은 날과 비가 온 날의 교통류 특성과 위험도를 산출한 결과는 Table 3와 같으며, 운전자가 맑은 날의 주행시간비율 및 평균 주행속도를 비가 온 날에도 동일하게 유지했다고 가정했을 때의 교통사고 위험도(Crash Risk)는 -3.5793α 로 맑은 날보다 상당히 높게 산출되었다. 또한, Table 3과 Fig. 5를 통해 맑은 날 대비 비가 온 날의 오전 시간대 네트워크 평균통행속도는 약 8.1 % 감소하였으며, 평균주행속도는 약 6.7 % 감소하였음을

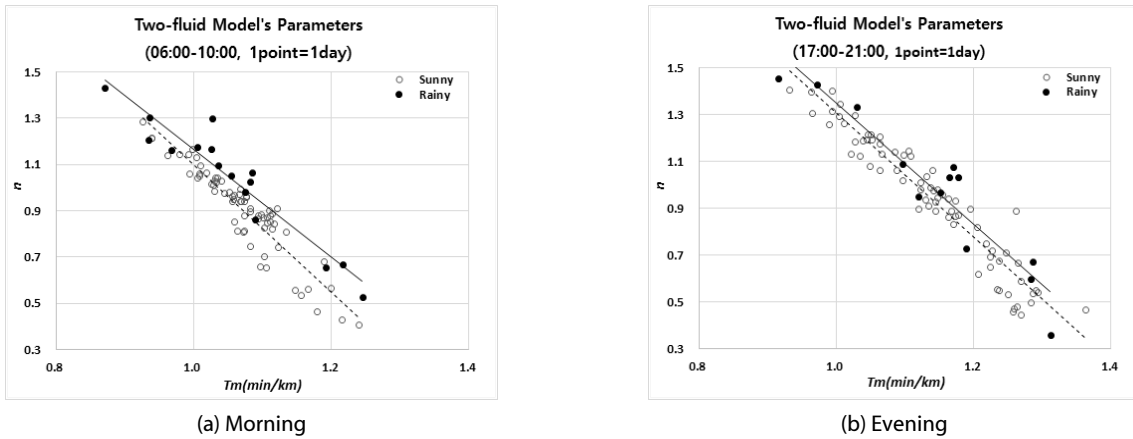


Fig. 3. Two-fluid Model Parameters Graph (Morning and Evening)

Table 2. Results of Drivers' Crash Risk Perception Model's Factors (Morning, 06:00-10:00)

	β	w	k
Sunny	0.00083	0.00042	2.11122
Rainy	0.00698	0.00374	1.95961

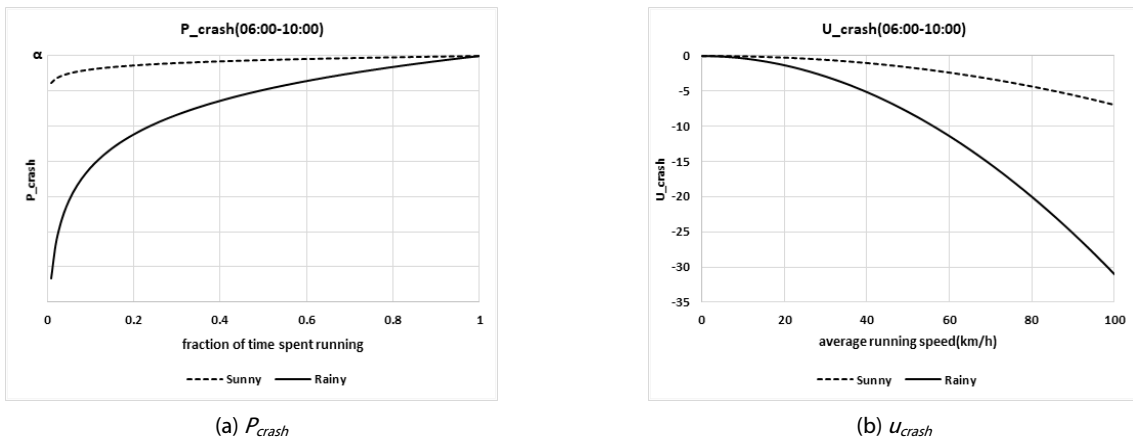


Fig. 4. Results of P_{crash} and u_{crash} (Morning, 06:00-10:00)

Table 3. Results of Traffic Flow Characteristics and Crash Risk (Morning, 06:00-10:00)

	Travel Speed (V)			Running Speed (V_r)			Fraction of Time Spent Running (f_r)	Crash Risk ($P_{crash} \cdot u_{crash}$)
	Avg. Travel Speed	t	P value	Avg. Running Speed	t	P value		
Sunny	19.69 (km/h)	2.35	0.02*	33.25 (km/h)	2.89	0.01*	0.5903	-0.6853α
Rainy	18.09 (km/h)			31.03 (km/h)			0.5811	-3.1254α
Rainy/Sunny	91.9 %			93.3 %			98.4 %	

*P value < Significant level 0.05

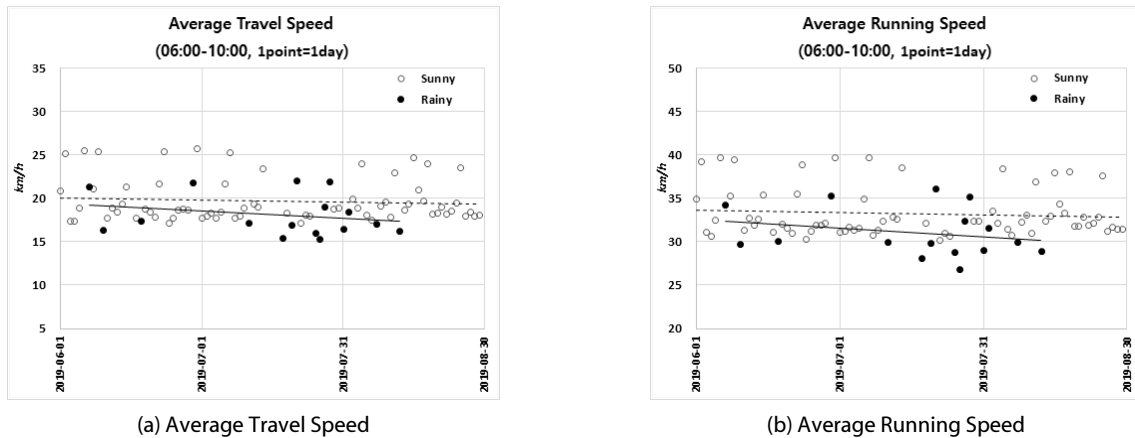


Fig. 5. Results of Average Travel Speed and Running Speed (Morning, 06:00-10:00)

Table 4. Results of Drivers' Crash Risk Perception Model's Factors (Evening, 17:00-21:00)

	β	w	k
Sunny	0.00100	0.00056	2.06611
Rainy	0.00158	0.00090	2.02088

알 수 있다. 이는 교통사고 위험도 변화가 운전자의 주행 행태에 영향을 미친다는 것을 수치적으로 확인한 결과로 볼 수 있다. 이러한 행태는 운전자들이 강우 시 교통사고 위험도가 높아 감속 운전을 하여 위험도를 낮춘 것으로 해석할 수 있다. 그러나 비가 온 날의 위험도는 -3.1254α 로 맑은 날보다 여전히 높은 수준임을 알 수 있다. 결과적으로 강우로 인한 교통사고 위험도 변화가 운전자의 감속 행태를 야기시켰고, 이로 인해 교통류의 소통 수준이 감소하여 네트워크의 운영성이 저하된 것으로 확인되었다.

오후 시간대의 Two-fluid Model 파라미터 추정결과를 활용하여 β , w , k 를 산출한 결과는 Table 4와 같다. β , w 는 맑은 날 대비 비가 온 날이 약 1.6배 크게, k 는 약 2 % 작게 산출되었으며, 비교를 위해 모형에 적용한 결과는 Fig. 6과 같다. P_{crash} 와 u_{crash} 모두 맑은 날 대비 비가 온 날이 아래에 위치하지만, 오전 시간대의

차이보다 상대적으로 그 정도가 상당히 작은 것을 알 수 있다.

맑은 날과 비가 온 날의 오후 시간대 교통류 특성과 교통사고 위험도를 산출한 결과는 Table 5와 같으며, 운전자가 맑은 날의 주행시간비율 및 평균 주행속도를 비가 온 날에도 동일하게 유지했다고 가정했을 때의 교통사고 위험도는 -0.8542α 로 맑은 날보다 높게 산출되었다. 또한, 오후 시간대 강우 시 네트워크 평균통행속도는 약 3.0 %, 평균주행속도는 약 3.1 % 감소하여 오전 시간대 대비 2배 이상 줄어든 감소율을 보였고, Fig. 7의 그래프 내 회귀직선을 통해서도 큰 차이가 없음을 알 수 있다. T-test 결과에서도 평균통행속도와 평균주행속도의 차이가 유의하지 않은 것으로 나타났다. 이는 맑은 날 오전 시간대 대비 오후 시간대는 불법주정차와 같이 용량감소에 영향을 주는 요인으로 인해 평균통행속도와 평균 주행속도가 낮아 네트워크 운영성이 상대적으로 저하되어있거나

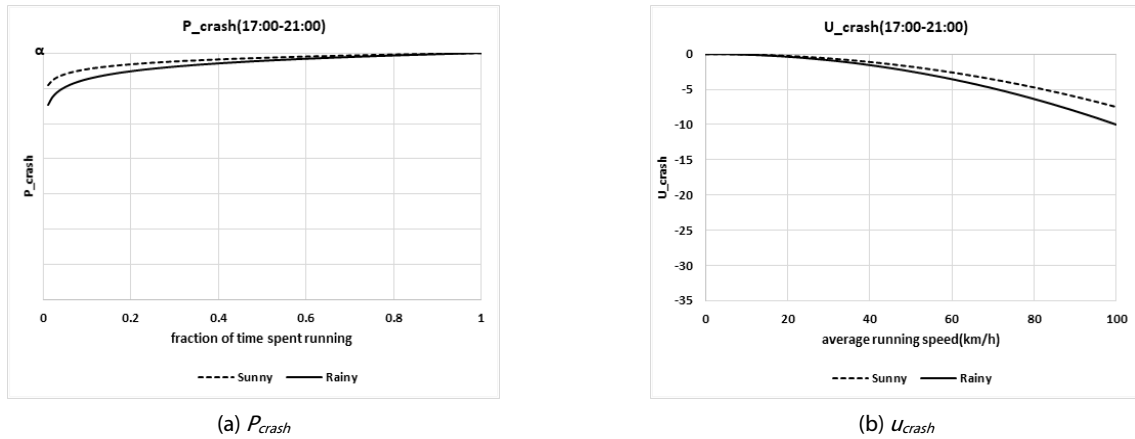


Fig. 6. Results of P_{crash} and u_{crash} (Evening, 17:00-21:00)

Table 5. Results of Traffic Flow Characteristics and Crash Risk (Evening, 17:00-21:00)

	Travel Speed (V)			Running Speed (V_r)			Fraction of Time Spent Running (f_r)	Crash Risk ($P_{crash} \cdot u_{crash}$)
	Avg. Travel Speed	t	P value	Avg. Running Speed	t	P value		
Sunny	17.14 (km/h)	0.66	0.51	29.70 (km/h)	0.86	0.39	0.5747	-0.6139α
Rainy	16.61 (km/h)			28.82 (km/h)			0.5734	-0.8046α
Rainy / Sunny	97.0 %			96.9 %			99.8 %	

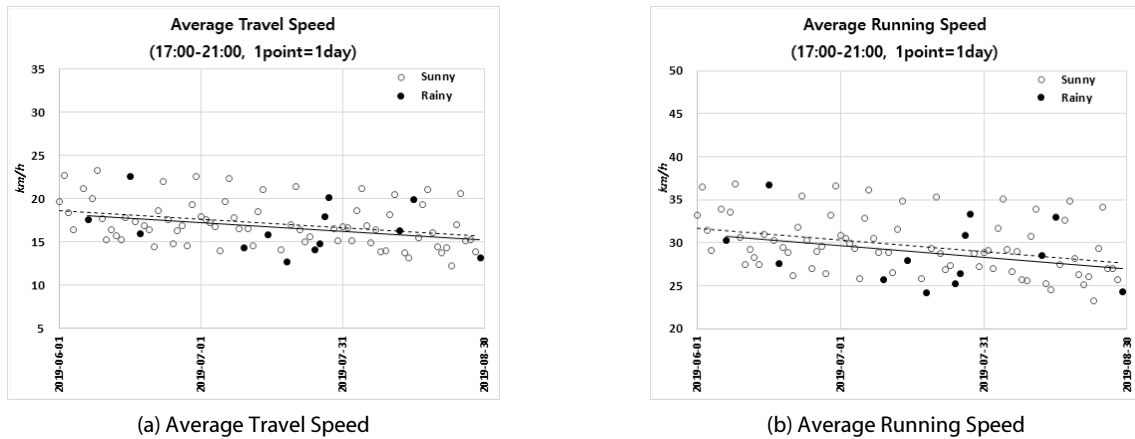


Fig. 7. Results of Average Travel Speed and Running Speed (Evening, 17:00-21:00)

타난 결과로 볼 수 있다. 그러나 오전 시간대와 마찬가지로 오후 시간대에도 운전자는 강우로 인해 높아진 위험도를 낮추기 위해 다소 감속하였고, 맑은 날보다는 여전히 높은 위험도이지만 감속으로 인해 위험도가 -0.8046α 로 근소하게 낮아졌음이 확인되었다. 지금까지의 과거 연구는 강우 여부가 네트워크에 미치는 영향을 Two-fluid Model의 파라미터를 통해 확인하였을 뿐 그 원인을

설명하지 못하였다(Lee and Kwon, 2003). 본 연구에서는 도시부 도로교통망에서 강우로 인한 운전자의 교통사고 위험도 및 주행 행태의 차이가 네트워크의 교통류 상태를 변화시켜, 강우 시 Two-fluid Model 파라미터가 네트워크 운영성이 저하된 방향으로 변화하여 나타난다는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 연구는 강우에 따른 운전자의 교통사고 위험도에 기인한 네트워크 운영성 변화를 Two-fluid Model 파라미터를 활용하여 분석하였다. 오전 시간대의 Two-fluid Model 파라미터 추정결과 맑은 날과 비가 온 날의 T_m 은 비슷한 수준을 보였으나, 맑은 날 대비 비가 온 날의 n 은 상당히 증가하여 네트워크의 운영성이 저하된 것으로 나타났다. 반면 오후 시간대는 맑은 날과 비가 온 날의 두 파라미터가 비슷한 수준을 보였다. 결과적으로 오후 시간대 대비 오전 시간대의 강우 시 네트워크 운영성은 높게 나타났으나, 강우로 인한 운영성 저하 정도는 더 큰 것으로 확인되었다.

앞서 추정된 Two-fluid Model의 파라미터를 활용하여 운전자의 교통사고 위험인지 모형의 계수 산출 후, 강우에 따른 위험도를 비교하였다. 오전·오후 시간대 모두 운전자는 맑은 날과 동일한 속도를 유지할 경우, 비가 온 날의 교통사고 위험도가 상당히 높아질 수 있음이 확인되었고, 강우 시 주행속도 감소는 사고 위험도를 낮추는 결과로 귀결됨을 알 수 있었다. 다만, 잠재적 위험도 자체는 비가 온 날이 맑은 날보다 여전히 높은 것으로 파악되었다.

향후에는 도시부 교통망의 거시적 운영성과 사고 위험도 간의 관계를 보다 다양한 교통망과 기하구조에서 분석하고 이 둘을 동시에 개선할 수 있는 방안을 모색해볼 필요가 있겠다. 최근 우리나라는 도시부 제한속도를 50 km/h로 낮추고 있는데 이로 인한 운영성 및 사고 위험도 변화를 분석하는 것도 흥미로운 주제일 것이다.

감사의 글

이 논문은 미래창조과학부 재원으로 경찰청과 치안과학기술연구개발사업단의 지원을 받아 수행된 치안과학기술연구개발사업임 (PA-A000001-2015-206). 그리고 서울대학교 공학연구원의 지원에도 감사를 드립니다.

References

Ardekani, S. and Herman, R. (1987). "Urban network-wide traffic variables and their relations." *Transportation Science*, Vol. 21, No. 1, pp. 1-16.

Ayadh, M. T. (1986). *Influence of the city geometric features on the two fluid model parameters*, Doctoral dissertation, Virginia Tech, Blacksburg, USA.

Charlton, S. G., Starkey, N. J., Perrone, J. A. and Isler, R. B. (2014). "What's the risk? A comparison of actual and perceived driving risk." *Transportation research part F: traffic psychology and Behaviour*, Vol. 25, pp. 50-64.

Dixit, V. V. (2013). "Behavioural foundations of two-fluid model for urban traffic." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 35, pp. 115-126.

Drèze, J. and Stern, N. (1987). "The theory of cost-benefit analysis." *In Handbook of Public Economics*, Vol. 2, pp. 909-989.

Herman, R. and Ardekani, S. (1984). "Characterizing traffic conditions in urban areas." *Transportation Science*, Vol. 18, No. 2, pp. 101-140.

Herman, R. and Prigogine, I. (1979). "A two-fluid approach to town traffic." *Science*, Vol. 204, No. 4389, pp. 148-151.

Herman, R., Malakhoff, L. A. and Ardekani, S. A. (1988). "Trip time-stop time studies of extreme driver behaviors." *Transportation Research Part A: General*, Vol. 22, No. 6, pp. 427-433.

Jayakrishnan, R., Mattingly, S. P. and McNally, M. G. (2001). "Performance study of SCOOT traffic control system with non-ideal detectorization: field operational test in the city of Anaheim." *In Transportation Research Board 80th Annual Meeting*, Washington, D.C., USA.

Kim, et al. (2014). *Safe environment against traffic accidents*, Korea Research Institute for Human Settlements (in Korean).

Lee, C. and Kwon, B. C. (2003). "Macroscopic impact of snowing and raining on urban transportation network." *Seoul Studies*, Vol. 4, No. 1, pp. 13-22 (in Korean).

Mohring, H. (1965). "Urban highway investments." *Measuring benefits of government investments*, Brookings Institution, Washington, D.C., USA, pp. 231-291.

O'Neill, B. (1977). "A decision-theory model of danger compensation." *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 9, No. 3, pp. 157-165.

Parkin, J. M. and Wu, S. Y. (1972). "Choice involving unwanted risky events and optimal insurance." *The American Economic Review*, Vol. 62, No. 5, pp. 982-987.

Tarko, A. P. (2009). "Modeling drivers' speed selection as a trade-off behavior." *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 41, No. 3, pp. 608-616.

Taylor, D. H. (1964). "Drivers' Galvanic Skin Response and the Risk of Accident." *Ergonomics*, Vol. 7, No. 4, pp. 439-451.

Vo, P. T., Mattingly, S. P., Ardekani, S. and Dilshad, Y. (2007). "Comparison of quality of service in two central business districts: two-fluid model approach in Texas." *Transportation Research Record*, Vol. 1999, No. 1, pp. 180-188.

Wu, S. K., Hunter, M. P., Lee, C. and 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*, KSCE, Vol. 15, No. 2, pp. 395-403.