Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 39, No. 1: 63-71/ February, 2019
DOI: https://doi.org/10.12652/Ksce.2019.39.1.0063

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Transportation Engineering **교통공학**

Two-Fluid 모형 파라미터 정산의 새로운 접근방안

권영범* · 이재현** · 김선호*** · 이청원****
Kwon, Yeong-Beom*, Lee, Jaehyeon**, Kim, Sunho***, Lee, Chungwon****

A New Approach to the Parameter Calibration of Two-Fluid Model

ABSTRACT

The two-fluid model proposed by Herman and Prigogine is useful for analyzing macroscopic traffic flow in a network. The two-fluid model is used for analyzing a network through the relationship between the ratio of stopped vehicles and the average moving speed of the network, and the two-fluid model has also been applied in the urban transportation network where many signalized or unsignalized intersections existed. In general, the average travel speed and moving speed of a network decrease, and the ratio of stopped vehicles and low speed vehicles in network increase as the traffic demand increases. This study proposed the two-fluid model considering congested and uncongested traffic situations. The critical velocity and the weight factor for congested situation are calibrated by minimizing the root mean square error (RMSE). The critical speed of the Seoul network was about 34 kph, and the weight factor of the congestion on the network was about 0.61. In the proposed model, R^2 increased from 0.78 to 0.99 when compared to the existing model, suggesting that the proposed model can be applied in evaluating network performances or traffic signal operations.

Key words : Two-fluid model, Macroscopic traffic flow, Urban network, Traffic engineering, Taxi digital tacho graph data

초 록

Herman과 Prigogine에 의해 제안된 Two-fluid Model은 네트워크에서 거시교통류를 분석하는데 유용하다. Two-fluid Model은 정지차량 비율과 네트워크 평균속도의 관계를 통해 네트워크를 분석하는 것으로, 주로 신호 혹은 비신호교차로가 다수 존재하는 도시부 교통망에 적용되어왔다. 일반적으로 네트워크의 교통수요가 증가함에 따라 네트워크 내 평균주행속도와 평균통행속도 모두 감소하며, 네트워크 내 정지차량의 비율과 정체로 인한 저속차량의 비율도 증가한다. 본 연구는 정체상황을 고려한 Two-fluid Model을 제안하였다. 정체상황을 구분하는 임계속도와 정체상황이 네트워크에 미치는 가중치는 평균 제곱근 편차(RMSE)를 최소화하도록 값을 정산하여 적용하였다. 서울시 네트워크의 임계속도는 약 34 kph로 나타났으며, 정체상황이 네트워크에 미치는 영향의 가중치는 약 0.61로 나타났다. 본 연구에서 제안한 Model은 기존 Model에 비하여 R^2가 0.78에서 0.99로 크게 증가하였으며, 파라미터의 값은 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 제안한 Model이 네트워크 및 신호운영 평가에 사용될 가능성이 있음을 의미한다.

검색어 : Two-fluid model, 거시교통류, 도시가로망, 교통공학, 택시 DTG 자료

* 정회원 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 박사과정 (Seoul National University · yeongbeom@snu.ac.kr)
** 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 석사과정 (Seoul National University · jaehyeon@snu.ac.kr)
*** 정회원 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 박사과정 (Seoul National University · ohnus@snu.ac.kr)
**** 정회원 · 교신저자 · 서울대학교 공과대학 건설환경공학부 부교수 (**Corresponding Author** · Seoul National University · chungwon@snu.ac.kr)

Received December 13, 2018/ **revised** January 2, 2019/ **accepted** January 15, 2019

Copyright ⓒ 2019 by the Korean Society of Civil Engineers
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.

1. 서 론

교통수요의 증가로 인한 교통혼잡은 시간이 흐름에 따라 더욱 심각한 교통문제로 대두되고 있으며, 이는 교통공학자들이 해결해야 할 이슈 중 하나이다. 시스템 공급 측면에서 도로의 연장 및 차로 수를 늘리는 것은 한계가 있으며, 혼잡통행료, 신호운영개선, 램프미터링 등의 교통체계 종합관리(Transportation System Management; TSM)를 통해 해결하려는 시도가 많이 진행되어 왔다. 국내에서는 1991년 경찰청을 주체로 하여 첨단 교통신호체계 개발을 진행하였으며, 1997년 실시간 신호제어시스템(Cycle, offset, split model for Seoul; COSMOS)을 서울시 61개 교차로에 시범운영한 바 있다(Lee et al., 2002).

새로운 신호운영 시스템을 도입하기 전에는 시뮬레이션을 통한 사전평가가 진행되어야 하며, 도입 후에는 테스트베드를 통한 효과분석이 수행되어야 한다. 새로운 신호운영 시스템을 평가하기 위한 지표에 대한 연구는 많이 진행되어왔다. 평균 통행시간, 총 통행시간, 평균 지체시간, 총 지체시간, 평균 통행속도 등의 통행시간(속도) 관련 지표, 통과교통량, 포화도 등의 교통량 관련 지표가 대표적인 교통류 지표라 할 수 있으며, OSI (Oversaturation Severity Index), SOSI (Spatial OSI), TOSI (Temporal OSI) 등의 신호운영 관련 지표들도 신호운영체계를 평가하는데 많이 쓰여왔다(Hu et al., 2013). 이러한 지표들은 교통상황을 직관적으로 표현할 수 있는 장점은 있으나 네트워크 혹은 신호운영체계 자체를 평가하기에는 다소 무리가 있다.

Herman and Prigogine(1979)에 의해 제안된 Two-fluid Model은 거시적 교통류의 교통특성을 나타낼 수 있는 지표 중 교통류 이론으로 정립되어 활용되는 대표적인 지표이다(Lee, 2003a). Two-fluid Model은 네트워크의 정지차량 비율과 평균주행속도의 관계를 규명하는 것에 기초한다. 그러나 네트워크의 차량을 정지차량과 주행차량의 두 가지로 구분하는 것에는 한계가 있을 수 있다. 네트워크 내 정지차량은 신호교차로로 인하여 상시 존재하며, 네트워크가 정체상황일 때에는 정지차량 뿐만 아니라 저속차량의 비율 역시 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구에서 반영하지 못하였던 저속차량의 영향을 반영한 Two-fluid Model을 제안하고자 한다.

2. 문헌고찰

Two-fluid Model은 정지차량이 네트워크에 항상 존재하는 신호교차로 등의 도시부 단속류 네트워크를 분석할 때 주로 사용되어 왔다(Wu et al., 2011). Two-fluid Model의 파라미터인 T_m과 n은 각각 '단위거리 당 최소통행시간'과 '네트워크 저항계수'로 각각 네트워크의 성능과 네트워크의 교통수요에 대한 성능의 변화 정도를 의미한다. 따라서 이 파라미터들은 도시부 가로망, 신호운영 시스템을 평가하는데 널리 사용되었으며, T_m과 n의 값이 낮을수록 네트워크의 성능이 좋다는 것을 의미한다. Herman et al.(1979, 1988)은 런던, 댈러스 등 여러 도시를 비교분석 하였으며, Jones and Farhat(2004)은 미국 오마하의 도시부 간선도로망에 대한 Two-fluid Model이 적용될 수 있음을 밝힌 바 있다. Wu et al. (2011)은 Two-fluid Model의 파라미터들을 통하여 SCATS (Sydney Coordinated Adaptive Traffic System)와 ACTRA의 시스템을 비교분석하였고, 국내에서는 Lee et al.(2003b)은 ROTIS 자료를 사용하여 서울시 강남구의 네트워크 성능을 해외 주요 도시들과 비교하였으며, Jeong et al.(2009)은 교통시스템 개선에 따른 효과를 T_m과 n을 통해 산정한 바 있다.

Two-fluid Model의 파라미터인 T_m과 n에 미치는 영향은 모델의 제안 이후부터 현재까지 활발하게 이루어져 왔다. Herman et al.(1988)은 로어노크와 오스틴의 중심 업무지구(Central Business District; CBD)에서 운전자들의 성향(Aggressive, Normal, Conservative)과 Two-fluid Model 파라미터의 관계에 대해 연구하였다. 운전자의 운전성향이 공격적(Aggressive)일수록 T_m은 감소하며, n은 증가하는 경향을 보이는 것을 확인하였다. Lee et al.(2003)은 ROTIS 자료를 활용하여 강설이 Two-fluid Model의 파라미터에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 강설시 T_m은 유의미한 변화를 보이지 않았으나, n은 확연히 증가하는 것을 확인하였다. 즉, 교통량이 적을 때에는 T_m의 변화가 적으므로 강설은 가로망의 성능에는 큰 영향을 미치지 않으며, n이 높기 때문에 교통수요가 높을 때 강설의 영향이 크게 나타나는 것을 밝혔다. Pande et al.(2015)은 California의 남녀운전자별 GPS 주행자료를 통해 남녀간의 Two-fluid Model 파라미터를 각각 산정하였고, 이를 통해 남녀의 운전성향을 비교하였다. 비교 결과 여성운전자의 n이 높은 결과를 보였으며, 이를 통해 여성운전자들이 남성운전자들에 비해 더 공격적(Aggressive)이라는 것을 파악하였다. Dixit et al.(2011)은 Two-fluid Model 파라미터들과 교통사고유형 간의 상관관계를 분석하였다. 미국 Florida의 8개의 간선도로에서 각각 Two-fluid Model의 파라미터를 산정하였고, 간선도로 별 안전지표들을 산정하여 Two-fluid Model 파라미터와 교통사고유형의 상관관계를 분석하였다. 분석결과 "Rear-end crash rate"와 "Angle crash rate"가 Two-fluid Model 파라미터와 밀접한 관계가 있는 것을 파악하였고, 본 연구결과는 지역별 Two-fluid Model 파라미터를 통해, 지역별로 서로 다른 안전대책을 마련할 수 있음을 시사하고 있다.

Two-fluid Model은 거시교통류의 대표적 지표인 평균속도, 교통량, 밀도를 산출하는데 사용된 바 있다. Lu et al.(2018)은 택시 GPS 자료를 통한 네트워크의 MFD (Macroscopic Fundamental

Diagram) 추정에 대해 연구하였다. 네트워크 내 전체 차량의 평균 이동거리와 택시의 평균 이동거리가 동일하다는 가정을 기반으로 택시 차량의 궤적을 통해 네트워크의 교통량과 밀도를 산정하였고, 네트워크 내 정지차량의 비율 별 평균속도와 교통량을 추정하여 네트워크의 MFD를 구하는 방안에 대해 연구하였다. Artimy(2007)은 Two-fluid Model의 단위거리당 평균 주행시간과 단위거리당 평균 정지시간을 통하여 네트워크 내 평균밀도를 산정하는 방안에 대해 연구하였다. 또한 Two-fluid Model의 기본 가정과 Fundamental Equation ($q=\mu k$)에서 μ와 q를 정지차량의 비율과 주행차량의 비율을 통해 산정하고, 이를 통해 네트워크의 Local Density를 구하였다. Yao and Wang(2008)은 Two-fluid Model의 파라미터를 통해 링크의 등가 대기길이를 구하는 방안에 대해 연구하였다. 각 링크의 유입차량과 유출차량을 통해 해당 링크의 밀도를 산정하고, 이후 차량의 정지비율을 통해 등가 대기길이를 구할 수 있는 방안을 제시하였다. Lu et al.(2016)은 도시부를 1×1 km의 정사각형 형태로 구분한 후, 각 구역별 T_m을 산정하였다. 본 연구에서 T_m은 각 구역을 통과하는데 소요되는 최소 통행시간을 의미하므로, Dijkstra 알고리즘을 활용하여 각 구역별 O/D 통행시간 행렬(O/D travel time matrix)를 구하였으며, O/D 통행시간 행렬은 향후 동적 통행배정(dynamic traffic assignment)을 위한 최단경로를 찾는 것에 활용될 수 있음을 밝혔다. Two-fluid Model의 제안 이후 Model의 파라미터에 미치는 요소와 Model의 파라미터를 활용한 교통류 분석에 대해서는 많은 연구가 진행되어왔으나, Model의 발전에 관한 연구는 활발히 진행되지 않았다.

3. 방법론

3.1 시간대별 네트워크 내 차량 속도구성

네트워크의 교통수요가 증가함에 따라 네트워크 내 평균통행속도는 감소한다. 이에 따라 네트워크 내 정지차량의 비율은 증가하며, 저속차량의 비율도 증가한다. 2018년 9월 DGPS 주행실험 결과에 따르면 시간대별 교통특성은 Fig. 1과 같이 네트워크가 자유속도에 가까울 때는 신호제어에 의한 정지가 발생하며, 정체시에는 신호와 대기행렬에 의해 정지와 저속주행이 반복적으로 나타나는 것을 확인하였다. 따라서 저속주행차량 역시 네트워크의 교통상황을 분석할 수 있는 하나의 변수가 될 수 있을 것이며, 기존 Two-fluid Model의 저속주행차량이 네트워크에 미치는 영향을 반영하지 못한 한계점을 보완할 수 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 정지차량뿐만 아니라 저속차량이 네트워크에 미치는 영향을 고려한 Two-fluid Model을 제안하고자 한다.

3.2 Two-fluid Model

Two-fluid Model은 네트워크 내 평균 주행속도는 움직이는 차량의 비율에 비례한다는 가정에서 출발한다.

$$v_r = v_m \times {f_r}^n = v_m(1-f_s)^n \quad (f_r + f_s = 1) \tag{1}$$

(v_r: 평균 주행속도, v_m: 최대 주행속도, f_s: 정지차량 비율, f_r: 주행차량 비율, n: 네트워크 저항계수)

이때 네트워크 내 정지차량 비율은 차량의 단위거리 당 통행시간과 단위거리 당 정지시간의 비율을 통해 산정할 수 있다(Herman and Prigogine, 1979).

$$f_s = \frac{T_s}{T} \quad (T = T_s + T_r) \tag{2}$$

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

Eqs. (1) and (2)로부터 평균 주행속도는 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있으며, 평균 통행속도는 정의로부터 Eq. (4)와 같다.

$$v_r = \frac{1}{T_m}(1-f_s)^n \tag{3}$$

$$v = v_r \times f_r + v_s \times f_s = v_r \times f_r \tag{4}$$

Fig. 1. Prove Car Speed Diagram (Gangnam-gu, Seoul, 2018.9.15. 09:00~10:00)

(T_m: 단위거리 당 최소 통행시간, n: 네트워크 저항계수)
따라서 Two-fluid Model은 다음과 같은 식으로 표현이 된다.

$$v = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_m}(1-f_s)^n f_r \tag{5}$$

$$\text{or } \frac{T_m}{T} = (1-f_s)^{n+1} \tag{6}$$

Eq. (2)를 Eq. (6)에 대입하면 다음과 같다.

$$1-\frac{T_s}{T} = \left(\frac{T_m}{T}\right)^{\frac{1}{n+1}} \tag{7}$$

Eq. (7)을 T_s에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$T_s = T - T_m^{\frac{1}{n+1}} T^{\frac{n}{n+1}} \tag{8}$$

3.3 Two-fluid Model 적용 방법론

본 연구에서는 정체로 인해 저속으로 주행하는 차량이 네트워크에 미치는 영향을 고려할 수 있는 Two-fluid Model을 제안하고자 한다. 특정 임계속도 이하의 차량이 증가할수록 네트워크의 평균 주행속도는 감소할 것이다. 따라서 기존의 Two-fluid Model Eq. (1)을 다음과 같이 적용하였다.

$$v_r = v_m\left(1-(\omega f_{stop}+(1-\omega)f_{slow})\right)^n \tag{9}$$
$$(f_{stop}+f_{slow}+f_{fast}=1,\ f_r = f_{slow}+f_{fast})$$

(f_{stop}: 정지차량의 비율, f_{slow}: 임계속도 이하 주행차량의 비율, f_{fast}: 임계속도 이상 주행차량의 비율, w: 가중치)

$$v_r = \frac{1}{T_m}(1-(wf_{stop}+(1-w)f_{slow})^n \tag{10}$$

$$v = v_r \times (f_{slow}+f_{fast}) \tag{11}$$

$$v = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_m}(1-(wf_{fast}+(1-w)f_{slow}))^n (f_{slow}+f_{fast}) \tag{12}$$

$$\text{or } \frac{T_m}{T} = (1-(wf_{fast}+(1-w)f_{slow}))^n (f_{slow}+f_{fast}) \tag{13}$$

Model의 적합성을 판단하기 위해 각 경계조건 별 네트워크의 평균 통행속도를 산정하였다. 정지차량의 비율이 1일 때에는 평균 통행속도는 0으로 나타났으며, 임계속도 이상 주행차량의 비율이 1일 때 평균 통행속도는 최대 주행속도로 나타났다. 또한 임계속도 이하 주행차량의 비율이 1일 때 평균 통행속도는 최대 주행속도보다 낮은 값으로 산정되었다.

$$\text{if } \vec{f} = (f_{stop},\ f_{slow},\ f_{fast}) = (1,0,0) \tag{14}$$
$$\begin{aligned} v &= v_m(1-(wf_{stop}+(1-w)f_{slow}))^n \times (f_{slow}+f_{fast}) \\ &= v_m(1-(w\times 1+(1-w)\times 0))^n \times (0+0) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\text{if } \vec{f} = (f_{stop},\ f_{slow},\ f_{fast}) = (0,1,0) \tag{15}$$
$$\begin{aligned} v &= v_m(1-(wf_{stop}+(1-w)f_{slow}))^n \times (f_{slow}+f_{fast}) \\ &= v_m(1-(w\times 0+(1-w)\times 1))^n \times (1+0) \\ &= v_m(1-(1-w))^n = v_m \times w^n \end{aligned}$$

$$\text{if } \vec{f} = (f_{stop},\ f_{slow},\ f_{fast}) = (0,0,1) \tag{16}$$
$$\begin{aligned} v &= v_m(1-(wf_{stop}+(1-w)f_{slow}))^n \times (f_{slow}+f_{fast}) \\ &= v_m(1-(w\times 0+(1-w)\times 0))^n \times (0+1) \\ &= v_m(1)^n = v_m \end{aligned}$$

DeMarchi et al.(2010)은 평균 제곱근 편차(Root Mean Square Error; RMSE) 최소화가 전역해(Global Solution)와 가장 유사한 결과를 도출할 수 있는 방법론임을 말하고 있다. 그리고 Ertem et al.(2018)에 의하면 RMSE 최소화는 시계열 분석에서 높은 정확도뿐만 아니라, Peak의 시각과 크기의 추정에 가장 적합한 방법론으로 알려져 있다. 교통부문 적용사례로는 Tiaprasert et al.(2015)에서 대기행렬 추정에 RMSE 최소화를 사용한 바 있다. 이에 따라 본 연구에서 구하고자 하는 가중치와 정체판단의 임계속도는 평균 제곱근 편차를 최소화하는 값으로 산정하였다. 정체판단 속도와 가중치를 구하기 위한 Model은 다음과 같다. Two-fluid Model에서 n의 값이 1보다 작으면 정지차량 및 저속차량이 늘어남에 따라 주행속도가 증가하게 되므로 n에 대한 제약조건을 추가하였고, 또한 Eq. (16)으로부터 정체판단의 임계속도에 대한 제약조건을 추가하였다. RMSE는 정체판단의 임계속도 및 가중치에 의해 정해진다. 그러나 RMSE를 정체판단의 임계속도 및 가중치를 통해 수식화하는 어려움으로 인하여, 최적해는 전역검색을 통해 구하였다(Fig. 2 참고).

$$\min \text{ RMSE}(w,\ v_c) = \sqrt{\frac{\sum (x_t - y_t)^2}{T}} \quad (17)$$

(v_c: 정체판단의 임계속도, x_i: 관측 주행속도, y_i: Model 주행속도, t: 단위시간, T: 전체 관측시간)

$$\text{s.t. } 0 < w < 1$$
$$0 < v_c < v_m w^n$$
$$n > 1$$

3.4 연구 범위

본 연구의 공간적 범위는 서울특별시 10개 구(강남구, 강북구, 관악구, 도봉구, 동대문구, 동작구, 중구, 종로구, 용산구, 은평구)로 하였으며(Fig. 3 참고), 시간적 범위는 2016년 3월 17일(목)으로 하였다. 분석에 사용한 자료는 서울시 TOPIS의 택시 DTG 자료이며, Two-fluid Model 분석을 위한 단위시간은 TOPIS의 자료수집 주기와 동일한 150초로 하였다(구 별 총 576개 Data Set). TOPIS에서 제공하는 택시 DTG 자료는 10초 단위의 순간속도이므로 네트워크 내 정지차량의 비율과 평균주행속도를 정확히 산정하는 것에 한계가 있을 수 있다. 그러나 분석에 사용한 자료의 표본은 150초당 최소 386개에서 최대 27,991개로, 표본의 수가 충분하므로 10초 단위의 자료를 통해서 네트워크 내 정지차량 비율과 평균주행속도를 추정하는 것에는 문제가 없을 것으로 판단된다(Table 1 참고).

4. 연구결과

Table 2에 제시된 것과 같이 서울시 10개 구에 대해 분석을 수행한 결과, 서울시의 정체판단의 임계속도(v_c)는 약 32 kph에서

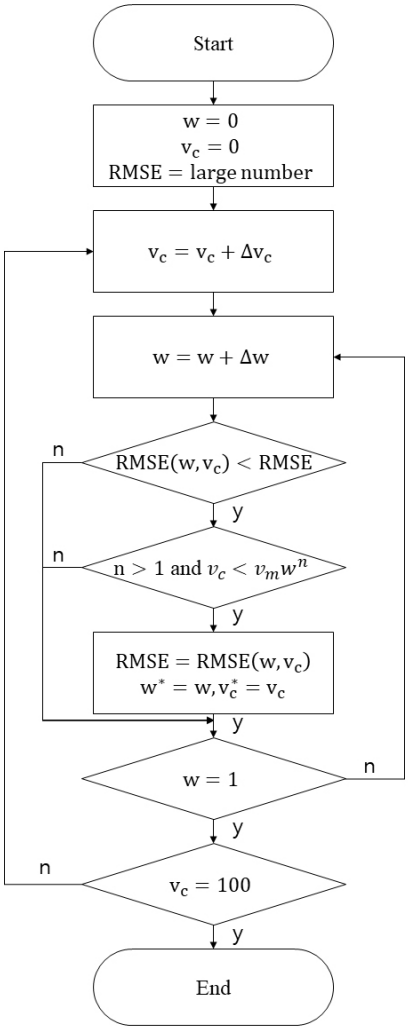


Fig. 2. Research Flow Chart

Table 1. Number of Data in 150 Second by Region

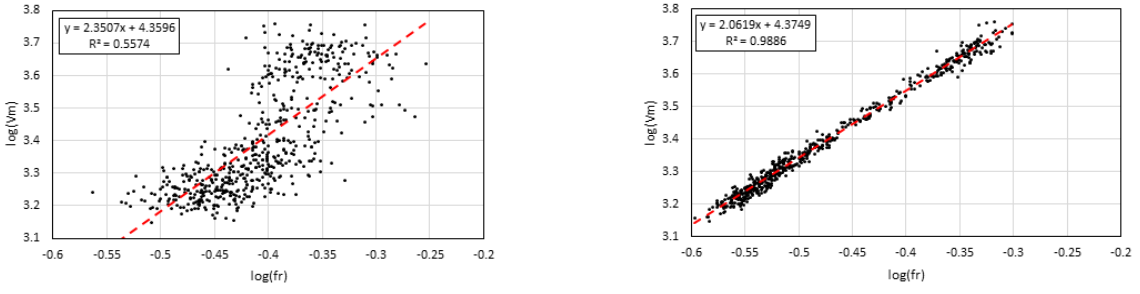
Region	Max	Min	Average
Dobong-gu	4,089	586	1,868
Dongdaemun-gu	3,135	386	1,669
Dongjak-gu	3,176	446	1,558
Eunpyeong-gu	4,230	683	2,343
Gangbuk-gu	27,991	4,244	14,710
Gangnam-gu	7,615	1,557	4,271
Gwanak-gu	24,304	2,755	13,738
Jongno-gu	14,852	1,275	8,224
Jung-gu	8,995	1,361	5,728
Yongsan-gu	6,266	479	3,858
Average	10,465	1,377	5,797

Fig. 3. Spatial Scope (Seoul)

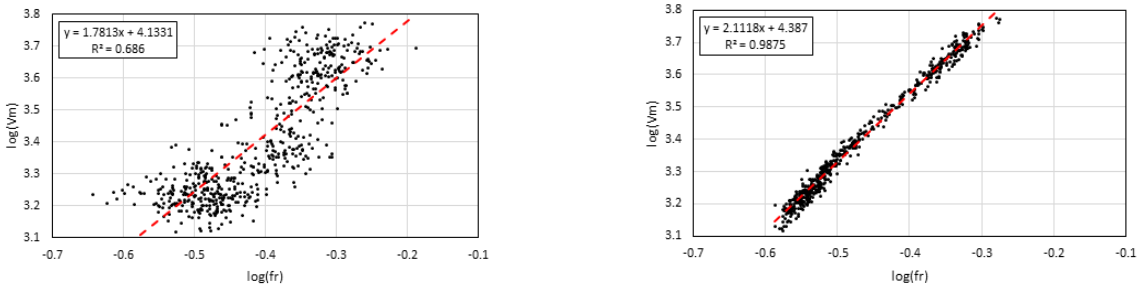
38 kph의 범위를 가지는 것으로 나타났으며, 정지차량에 대한 가중치(w)는 최소 0.35에서 최대 0.42의 값을 가지는 것으로 나타났다. 본 연구에서 의미하는 바는 정지차량의 비율은 네트워크의 평균속도에 0.39 만큼의 영향을 미치며, 임계속도 이하 정체차량의 비율은 0.61 만큼의 영향을 미친다는 것이다. 정지차량이 임계속도 이하 정체차량에 비해 네트워크에 미치는 영향이 더 적은 것으로 나타났다. 이는 도시부 가로망에는 신호교차로에 의해 정지차량이 항상 포함되어 있으므로 정지차량의 비율이 네트워크에 상대적으로 영향을 덜 미치는 것으로 판단된다. 기존 Model은 정지차량과 주행차량으로만 나누었는데, 본 연구결과를 통해 정체로 인한 저속차량도 정지차량만큼 네트워크 성능에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. Two-fluid Model의 파라미터인 T_m은 기존 Model에서 평균 0.76이었고 본 연구에서 제안한 Model은 평균 0.72로 큰 변화를 보이지 않았다. 마찬가지로 n의 평균 역시 기존 Model과 본 연구에서 제안한 Model의 값이 각각 2.39와 2.26으로 큰 차이를 보이지 않았다. 각 Model 적합성을 판단할 수 있는 결정계수(R^2)는 모든 지역에서 증가한 것을 알 수 있으며, 10개 구의 결정계수는 평균 0.78에서 평균 0.99로 적합성이 증가한 것을 확인하였다.

Table 2. Two-fluid Parameters by Regions

Region	T_m (min/km)		n		R^2		Congestion speed (km/h)	w
	Original	Proposed	Original	Proposed	Original	Proposed		
Dobong-gu	0.77	0.76	2.35	2.06	0.56	0.99	35	0.37
Dongdaemun-gu	0.96	0.75	1.78	2.11	0.67	0.99	35	0.37
Dongjak-gu	0.96	0.80	2.37	2.17	0.69	0.98	32	0.42
Eunpyeong-gu	0.73	0.74	2.54	2.09	0.68	0.99	36	0.40
Gangbuk-gu	0.75	0.78	2.55	1.97	0.78	0.99	35	0.37
Gangnam-gu	0.80	0.62	1.97	2.71	0.94	0.99	32	0.40
Gwanak-gu	0.62	0.65	2.67	2.32	0.94	1.00	35	0.37
Jongno-gu	0.68	0.78	2.59	2.23	0.90	1.00	32	0.41
Jung-gu	0.60	0.70	2.57	2.69	0.90	1.00	29	0.35
Yongsan-gu	0.68	0.64	2.53	2.26	0.78	0.99	38	0.40
Average	0.76	0.72	2.39	2.26	0.78	0.99	33.9	0.39

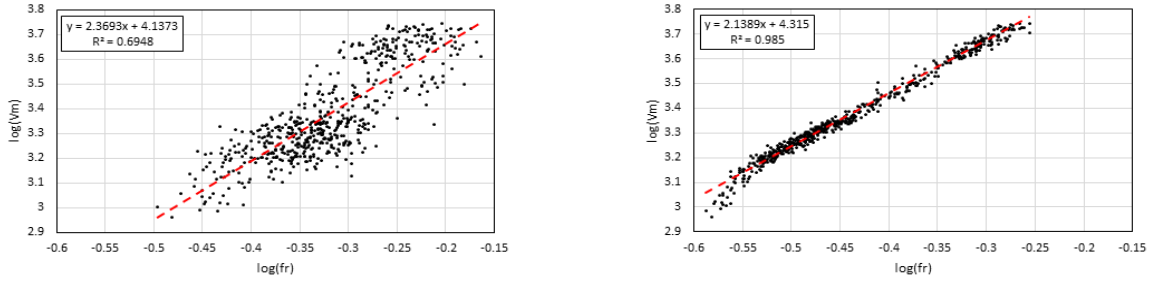


(a) Dobong-gu

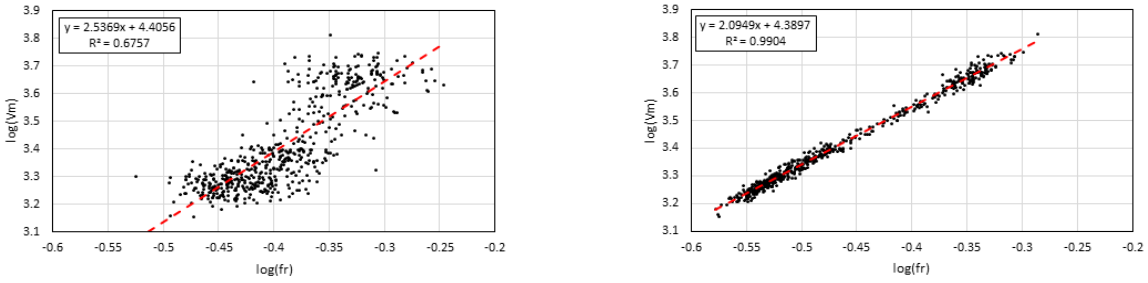


(b) Dongdaemun-gu

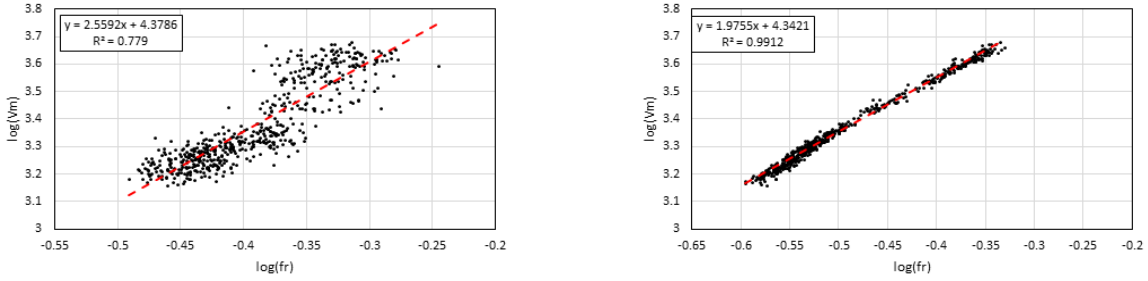
Fig. 4. Two-Fluid Model Parameters Diagram by Region (Left: Original Model, Right: Proposed Model) (Continue)



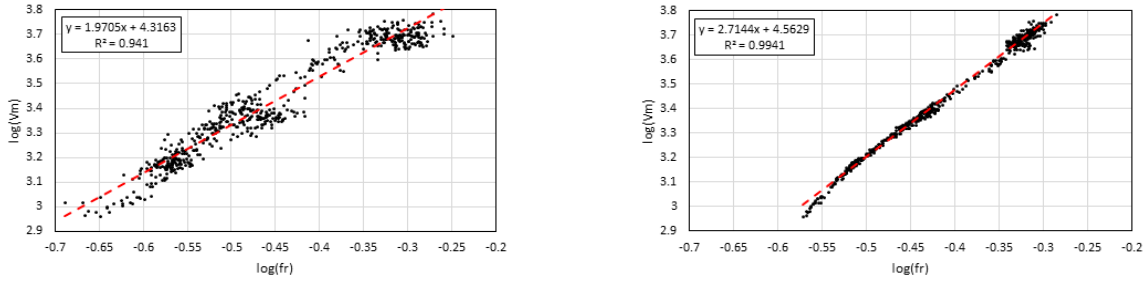
(c) Dongjak-gu



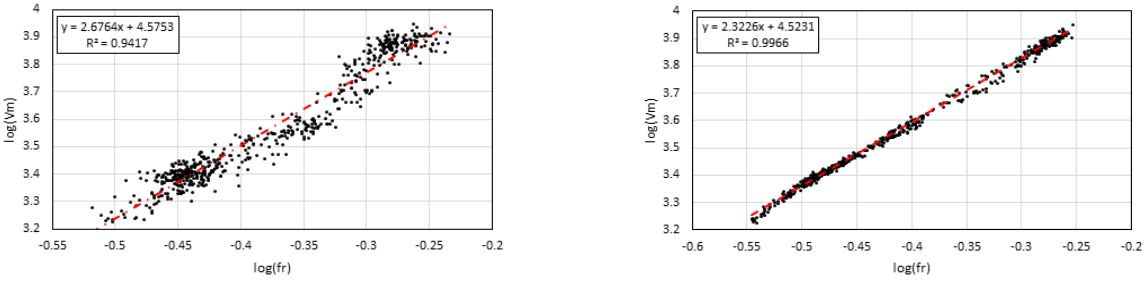
(d) Eunpyeong-gu



(e) Gangbuk-gu

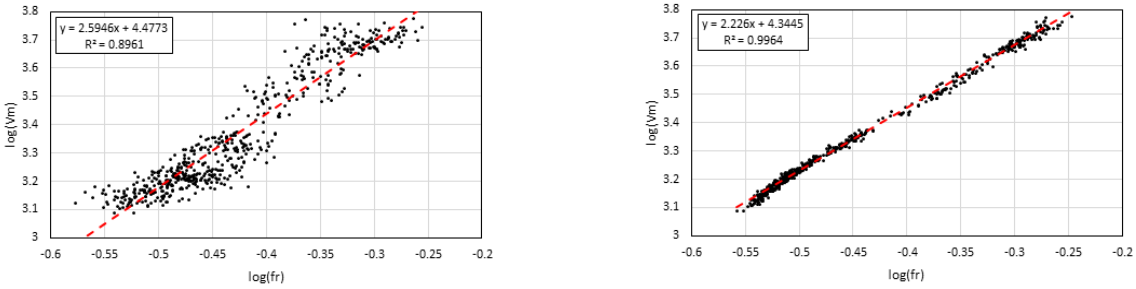


(f) Gangnam-gu

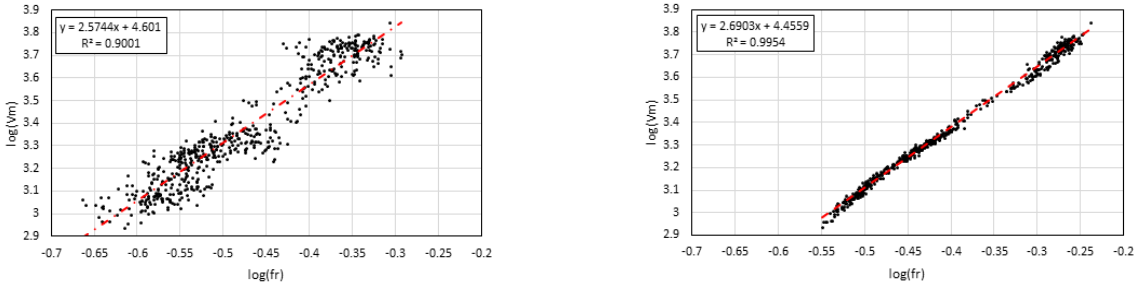


(g) Gwanak-gu

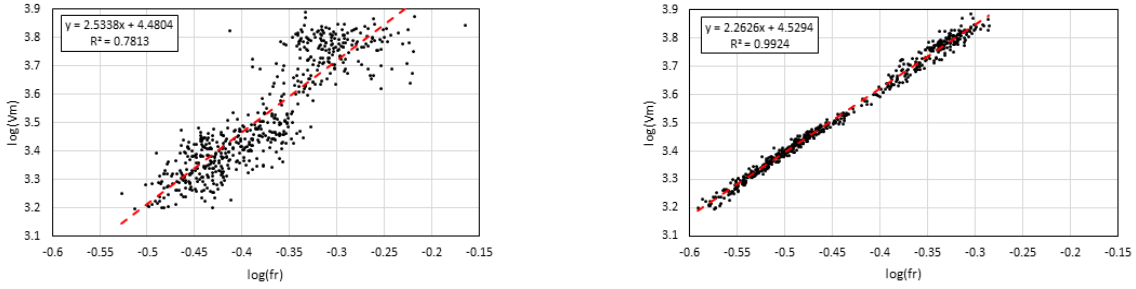
Fig. 4. Two-Fluid Model Parameters Diagram by Region (Left: Original Model, Right: Proposed Model) (Continue)



(h) Jongno-gu



(i) Jung-gu



(j) Yongsan-gu

Fig. 4. Two-Fluid Model Parameters Diagram by Region (Left: Original Model, Right: Proposed Model) (Continue)

Fig. 4의 도봉구(a), 동대문구(b), 은평구(d) 등의 지역은 기존 Model에서 주행속도와 정지차량 비율의 선형관계를 찾기 어렵고, 적합도 역시 낮은 값을 가졌다. 반면 본 연구에서 제안한 Model은 이러한 지역에서도 높은 적합도를 가지는 것으로 나타났다.

5. 결 론

기존의 Two-fluid Model은 네트워크의 차량을 정지차량과 주행차량의 두 가지로 구분하여 네트워크의 분석을 진행하였다. 네트워크 내 교통수요가 증가하면, 정지차량뿐만 아니라 정체로 인한 저속차량의 비율도 증가하게 된다. 따라서 본 연구에서는, 제안한 Two-fluid Model을 통해 네트워크의 평균 주행속도와 정지차량, 정체로 인한 저속차량의 관계를 분석하였다. 분석결과 정지차량과 정체로 인한 저속차량 모두 네트워크의 평균속도에 악영향을 미치는 것으로 나타났다. 서울시 10개 구에 대하여 기존 Two-fluid Model의 파라미터와 본 연구에서 제안한 Model의 파라미터를 각각 산정하였다. Model 간 파라미터를 비교한 결과, 10개 구에서 Two-fluid Model 파라미터 T_m과 n의 평균값은 크게 차이가 없음을 확인하였고, 가중치와 정체판단의 임계속도는 구 별로 큰 편차를 보이지 않았다. 이는 본 연구에서 제시한 Model이 기존 Two-fluid Model과 같이 네트워크 및 신호운영을 평가하는데 사용될 가능성이 있음을 의미한다. 또한 네트워크 및 신호운영을 평가하는데 있어서는 적합도가 높은 Model을 사용하는 것이 더 합리적일 수 있다. 본 연구에서는 정지차량과 정체로 인한 저속차량만을 고려하여 네트워크 분석을 진행하였으나, 향후에는 교통공학적 측면의 접근방법이 요구될 것이다. 이에 대한 방안으로는 정지차량의 w와 v_c에 대한 값을 단일 값으로 제시하지 않고, 통행속도에 대한 가중치를 단일 값이 아닌 속도에 대한 분포로 표현한 Model을 개발하는 연구가 대표적일 것이다.

감사의 글

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

References

Artimy, M. (2007). "Local density estimation and dynamic transmission-range assignment in vehicular ad hoc networks." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 8, No. 3, pp. 400-412.

DeMarchi, C., Xing, F., Croley, T. E., He, C. and Wang, Y. P. (2010). "Application of a distributed large basin runoff model to Lake Erie: model calibration and analysis of parameter spatial variation." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 16, No. 3, pp. 193-202.

Dixit, V. V., Pande, A., Abdel-Aty, M., Das, A. and Radwan, E. (2011). "Quality of traffic flow on urban arterial streets and its relationship with safety." *Accident Analysis & Prevention*, Vol. 43, No. 5, pp. 1610-1616.

Ertem, Z., Raymond, D. and Meyers, L. A. (2018). "Optimal multi-source forecasting of seasonal influenza." *PLoS computational biology*, Vol. 14, No. 9.

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.

Hu, H., Wu, X. and Liu, H. X. (2013). "Managing oversaturated signalized arterials: a maximum flow based approach." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 36, pp. 196-211.

Jeong, Y. J., Kim, Y.-C. and 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." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 27, No. 1, pp. 27-34 (in Korean).

Jones, E. G. and Farhat, W. (2004). "Validation of two-fluid model of urban traffic for arterial streets." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1876, pp. 132-141.

Lee, C. (2003a). "Macroscopic urban transportation network analysis with two-fluid theory." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 5D, pp. 615-622 (in Korean).

Lee, C. (2003b). "Mobility index for macroscopic urban transportation network analysis." *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 23, No. 6D, pp. 793-800 (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).

Lee, S. H., Oh, Y. T. and Lee, S. S. (2002). "Traffic signal control methods for functional improvements in COSMOS." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 20, No. 6, pp. 31-43 (in Korean).

Lu, S., Knoop, V. L. and Keyvan-Ekbatani, M. (2018). "Using taxi GPS data for macroscopic traffic monitoring in large scale urban networks: calibration and MFD derivation." *Transportation Research Procedia*, Vol. 34, pp. 243-250.

Lu, S.-F., Wang, J., Xue, Z.-G. and Liu, X.-M. (2016). "Traffic analysis and OD travel time matrix based on two-fluid model." *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, Vol. 10, No. 3, 078.

Pande, A., Loy, J., Dixit, V. V., Spansel, K. and Wolshon, B. (2015). "Integrity of estimates of the two-fluid model and gender impacts." *Transportation research part C: emerging technologies*, Vol. 50, pp. 141-149.

Tiaprasert, K., Zhang, Y., Wang, X. B. and Zeng, X. (2015). "Queue length estimation using connected vehicle technology for adaptive signal control." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 16, No. 4, pp. 2129-2140.

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*, Vol. 15, No. 2, pp. 395-403.

Yao, R. and Wang, D. (2008). "Equivalent queue length change rate models for congested traffic flow." *In Traffic and Transportation Studies*, pp. 384-396.