

# DSRC 기반 프로브 자료를 이용한 거시 교통류 모형 추정 방법

## Deriving Macroscopic Fundamental Diagrams Using Probe Vehicle Data Based on DSRC

심지섭\* · 여지호\*\* · 이수진\*\*\* · 장기태\*\*\*\*

\* 주저자 : KAIST 조천식녹색교통대학원 박사과정  
 \*\* 공저자 : KAIST 조천식녹색교통대학원 박사과정  
 \*\*\* 공저자 : KAIST 조천식녹색교통대학원 석사과정  
 \*\*\*\* 교신저자 : KAIST 조천식녹색교통대학원 부교수

Jisup Shim\* · Jiho Yeo\*\* · Sujin Lee\*\*\* · Kitae Jang\*\*\*\*

\* The Cho Chun Shik Graduate School of Green Transportation, KAIST  
 \*\* The Cho Chun Shik Graduate School of Green Transportation, KAIST  
 \*\*\* The Cho Chun Shik Graduate School of Green Transportation, KAIST  
 \*\*\*\* The Cho Chun Shik Graduate School of Green Transportation, KAIST

† Corresponding author : Kitae Jang, kitae.jang@kaist.ac.kr

Vol.16 No.6(2017)  
 December, 2017  
 pp.29~41

ISSN 1738-0774(Print)  
 ISSN 2384-1729(On-line)  
<https://doi.org/10.12815/kits.2017.16.6.29>

Received 31 August 2017  
 Revised 30 September 2017  
 Accepted 17 November 2017

© 2017. The Korea Institute of  
 Intelligent Transport Systems. All  
 rights reserved.

### 요약

본 연구에서는 개별 차량의 주행정보를 이용하여 대구광역시 도심부에서 네트워크 스케일의 거시 교통류 모형(Macroscopic Fundamental Diagram, MFD)을 추정하는 방법에 대해 고찰한다. 이를 위해 근거리 전용 통신(Dedicated Short Range Communication, DSRC) 방식으로 수집된 개별 차량의 원시 데이터 처리 방법 및 통행 경의 방법을 분석하고, 해당 자료를 활용하는 새로운 활용 방안을 제시한다. 이를 위해 프로브 자료인 DSRC 데이터와 교통량 조사 자료를 이용해 표본율을 산정하고 대구광역시 네트워크 내 MFD를 도출하는 방법을 설명한다. 도출된 MFD를 통해 시간적 재현성(reproducibility)의 확인과 선행 연구 가정 사항들에 대한 데이터 기반 검증을 수행하였으며, DSRC 자료의 새로운 활용 방법을 제시하고자 한다.

핵심어 : 거시 교통류 모형, MFD, DSRC, 프로브 차량

### ABSTRACT

In this study, we used individual trip data to estimate a macroscopic fundamental diagram (MFD) that relates flow (or production) to density (or state) in Daegu metropolitan city. The individual trip data were generated by processing data that were collected from DSRC-based (dedicated short range communication) traffic data collection system. Using the processed individual trip data, we first examined whether the assumptions for MFD are valid, and then the relation between outflow and accumulation was estimated in our study site. As a result, we found that i) the assumptions are valid to construct MFD; and ii) the reproducible and well-defined MFDs exist in the network level.

Key words : Macroscopic Fundamental Diagram, MFD, Individual Trip Data, DSRC

## I. 서 론

### 1. 개 요

교통기본도(Fundamental Diagram)는 교통류, 속도, 밀도와 같은 변수간의 관계를 정립하는 가장 기본적인 핵심적인 모형이다. 최초의 교통기본도(Greenshield, 1934)는 특정 구간에서의 교통량이 최대일 때 형성되는 임계밀도를 기준으로 선형 대칭의 교통량-밀도 관계를 보이며, 해당 초기 모형으로부터 파생된 비선형, Reverse-람다( $\lambda$ )형, 이중영역 모형 등이 교통 현상 설명을 위해 제시되어 왔다(Greenberg, 1959; Edie, 1961). 한편, 기존의 교통기본도는 기본적으로 한 지점 혹은 한 구간(link)에서의 교통 현상을 설명하기 위해 제시된 모형인 반면, 실제 교통류는 여러 개의 링크가 묶인 네트워크 관점에서 분석 및 제어되어야 할 필요가 있다. 도심 혼잡 문제를 거시적 차원에서 해소하기 위해서는 기존의 교통기본도와 마찬가지로 네트워크 단위에서 각 변수 간 관계를 규정하는 것이 필요한데, 이를 위해 거시 교통류 모형(Macroscopic Fundamental Diagram: MFD)의 개념이 제시되었다. 최근 연구들을 통해 이에 대한 이론적·실증적 타당성이 검증되었으며, 다양한 데이터를 활용한 MFD 추정 방법에 대한 연구 및 이를 효과적으로 활용하기 위한 방법론적 연구가 활발히 진행되고 있다(Geroliminis and Daganzo, 2008; Gayah and Daganzo, 2011).

본 연구에서는 대구광역시 내 개별 차량의 주행정보를 이용하여 MFD를 추정하는 방법 및 결과에 대해 고찰하고자 한다. 먼저, MFD는 네트워크를 구성하는 각 링크에서의 교통량, 밀도를 평균 또는 가중 평균하여 네트워크 전체 차원에서의 교통기본도를 산정하는 것으로 정의된다. 기존 연속류 위주의 교통류 이론과 달리, MFD는 도시부 내 단속류 도로에 대한 모니터링과 제어에 직접적으로 활용될 수 있으며, 도시부 도로 영역 전체를 하나의 경계(perimeter)로서 이해하고 분석한다. MFD를 구성하는 개념에 대한 이론적 연구는 그동안 많이 선행되어 왔으나(Daganzo and Geroliminis, 2008; Cassidy et al., 2011), 시뮬레이션 데이터 혹은 루프 검지기 데이터를 이용하는 방법이 주를 이루었다. 데이터 수집 방법의 발전 및 다양성·방대성의 증가와 함께 프로브 차량이나 택시 GPS 데이터를 이용해 MFD를 추정하는 방법이 해외 학술지에 최근 발표되고 있으나, 본 연구에서와 같이 대규모의 데이터를 활용할 수 있는 기반이 조성된 경우가 많지 않다(Gayah and Dixit 2013; Du et al., 2016). 우리나라 대구광역시의 경우 첨단교통관리시스템(Advanced Traffic Management System: ATMS) 도입을 통해 단거리 무선통신인 DSRC(Dedicated Short Range Communication) 방식을 기반으로 교통 정보를 수집하고 있으며, 기존 루프 검지기 자료와 달리 각 차량의 개별 통행 경로를 추출하여 분석할 수 있다. 이에 따라 본 연구에서는 대규모로 수집되는 개별 통행 자료의 또 다른 활용 방법을 모색하고, MFD 추정 방법 고찰을 통한 네트워크 통행 분석 및 운영 방법론 연구의 기틀을 마련하고자 한다.

## II. 데이터 및 처리 방법론

### 1. 데이터 개요

본 연구에서 활용하는 데이터는 대구광역시 ATMS에서 수집되는 자료를 기반으로 한다. ATMS에서는 DSRC 링크를 기준으로 교통정보를 수집 및 제공하고 있으며, 대구광역시 전역에 174개의 RSE(Road-Side Equipment) 장비가 설치되어 하이패스(Hi-pass) 단말기를 부착한 차량에 대해 DSRC 방식으로 통신하여 기기 고유 ID, 통신 시각, 차종, 신호 상태 등의 자료를 수집한다. 하루 간 전체 RSE에서 수집되는 차량 정보는 약 320만 행이며, 텍스트 파일 형태로 저장 시 크기는 250MB 정도이다. 1개월 데이터는 약 7GB이며, 저장하는 항목은 아래 <Table 1>에 정리된 바와 같다.

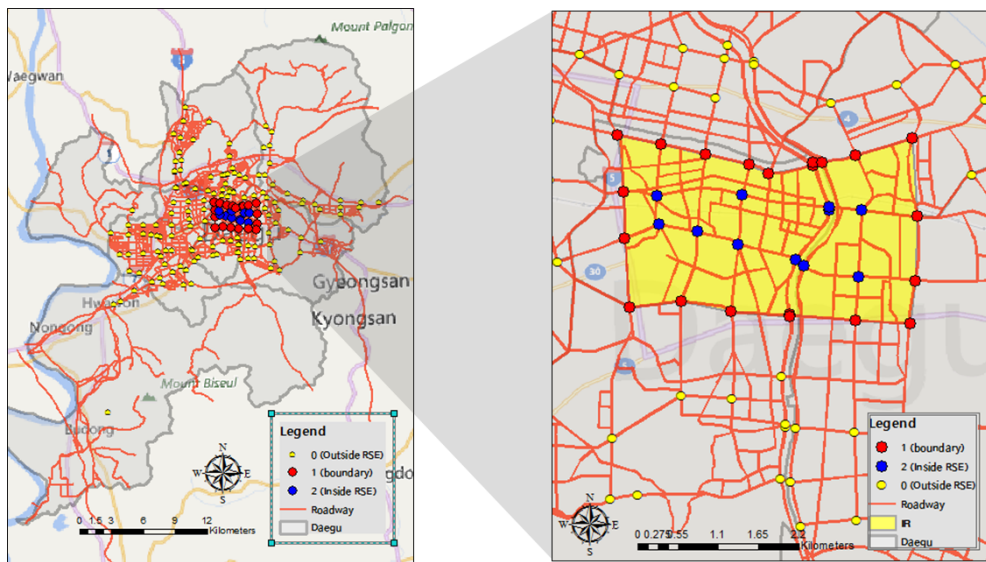
<Table 1> Data scheme for ATMS-DSRC raw data

Name	Data Type	Length	Description
OBU_COLL_SN	VARCHAR2	17	OBU serial number
OBU_SN		32	Vehicle ID
CAR_TYP		10	Vehicle type
OBU_TYPE		10	OBU Type (Equipment)
INFO_CRE_DATE		14	Date and Time
MANUFAC_ID		20	Manufacturer ID
INDI_ID		20	Location ID
DATA_TYP		1	Data Type

## 2. 데이터 범위

### 1) 공간적 범위

본 연구의 공간적 범위는 ATMS가 설치된 대구광역시 전역을 대상으로 하였으며, 그 중 상업지구가 밀집되어 통행량이 많이 발생하는 지역에 대해 MFD를 추정하기 위해 세부 분석 지역을 설정하였다. <Fig. 1>은 대구광역시 내 도로 및 전체 RSE 설치 지점도와 및 관심지역(Region of Interest: IR)으로 설정한 반월당역 근처 상업지구를 포함한 범위 내 32개 RSE 지점을 나타낸다. 분석 지역의 둘레 길이는 약 13km, 넓이는 8.63km<sup>2</sup>이며, 분석 지역의 경계(boundary) 지역 및 내·외부 지역으로 나누어 RSE의 속성을 결정하고 분석을 수행하였다.



<Fig. 1> Daegu ATMS-DSRC RSE locations and 32 RSEs in spatial range of analysis

### 2) 시간적 범위

본 연구에서는 2015년 10월에 수집된 DSRC 데이터를 분석에 활용하였다. 장마나 강설과 같은 계절적 영향을 최소화하기 위해 2015년 9-11월 가을 기간의 데이터를 확보하였으며, 2015년 9월의 경우 추석 명절 기간을 포함하고 있어 분석 대상에서 제외하였다. 요일에 의한 영향 역시 배제하기 위해 주말을 제외한 주중데

이더만을 분석 하였으며, MFD의 시간적 재현성(reproducibility)을 확인하기 위해 2015년 10월 1~3주의 목요일 데이터를 이용하여 MFD를 추정하였다.

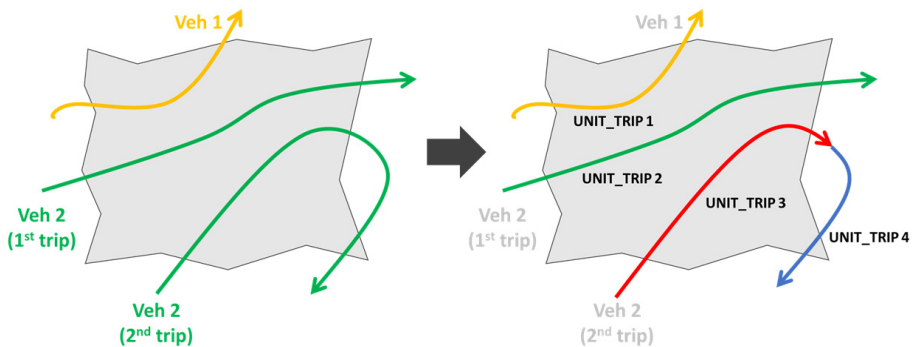
### 3. 데이터 처리 방법론

대구광역시 개별 통행 자료는 하루 평균 약 25만 대의 차량을 통해 60만 회 가량의 통행(Trip)이 형성된다. 개별 통행 자료의 장점인 개별 차량의 식별이 가능하다는 점을 이용하여 본 연구에서는 각 차량이 하루 동안 여러 개를 생성하는 통행(Trip)을 먼저 정의하였다. 또한 분석의 용이성을 위해 단위 통행(Unit Trip)의 개념을 정의하고 분석에 활용하였다.

#### 1) 통행(Trip) 및 단위통행(Unit Trip) 정의

통행을 정의하기에 앞서, 2장 1절에서 살펴본 데이터 명세와 관련하여 분석을 위한 몇 가지 데이터 전처리를 수행하였다. 먼저 각 차량의 고유 ID인 [OBU\_SN] 항목을 32자리 문자형에서 일련의 정수형으로 변환하여 원본 데이터의 형식 및 크기를 변경하였다. [DATA\_TYP] 항목의 경우 차량이 새로 통행을 시작할 때 NA로 구분되고, 이를 이용해 한 대의 차량이 구성하는 한 번의 통행을 구성할 수 있어 이를 통행(trip)의 식별자로 사용하였다. 차량 한 대는 하루에 여러 번의 통행을 생성할 수 있는데, <Fig 2>의 왼쪽 그림에 표시한 바와 같이 이를 구별할 수 있다. 첫 번째 차량(Veh 1)의 경우 연구 대상 지역을 지나는 통행을 한 번만 생성하지만, 두 번째 차량(Veh 2)은 분석 지역을 지나는 통행을 두 번 생성한다. 단, 두 번째 차량의 두 번째 통행(2nd trip, Veh 2)의 경우 분석 지역을 벗어났다가 다시 진입하는데, 이 경우 분석 지역 외부에서의 통행 시간이나 경로 등이 누락된다.

이에 본 연구에서는 ‘단위통행(unit trip)’ 개념을 설정하였다. 데이터를 통행(trip) 단위로 구분하여 분석할 경우, <Fig. 2>에 표시된 연구 대상지역(회색 음영)을 벗어났을 때의 데이터는 공백이 된 상태로 통행 자료가 생성된다. 따라서 <Fig. 2>의 오른쪽 그림과 같이 분석 지역 내의 차량이 밖으로 벗어나는 경우는 통행을 종료한 것으로 간주하고, 이어지는 통행이 다시 내부로 진입할 때에는 독립적인 통행으로 다시 식별된다. 즉, 두 번째 차량의 두 번째 통행의 경우(2nd trip, Veh 2)를 두 개의 단위통행으로 분리한다. 결과적으로 <Fig. 2>에서는 두 대의 차량이 세 개의 통행과 네 개의 단위통행을 생성한다. 즉, 거시 교통류 모형을 추정하는 데 있어 필요한 정보인 각 차량의 주행거리 및 주행시간을 연구 영역 내로 한정하여 정확하게 산정하기 위한 방법으로 단위통행 자료를 생성·이용하였다.



<Fig. 2> Definitions of trip and unit trip

2) 단위통행 테이블 스키마

단위통행 정의 이후, 원본 데이터를 가공하여 단위통행 단위로 구성된 테이블을 최종적으로 추출하는 과정을 거친다. 최초의 데이터는 <Fig. 3>에 보이는 바와 같이 행간 계산을 통해 각 RSE 지점에서 다른 지점으로 이동하는 시간을 계산하고, 이 때 차량 ID, 통행 ID, 단위통행 ID를 부여한다. 이후 해당 테이블이 가지는 정보는 단위통행 테이블로 변환되어 한 행이 1회의 단위통행을 기록하고, 이 통행 내에서 구분되는 5가지 종류의 노드로 분리된다(<Fig. 4> 참조).

행간BU_COLL_SN	OBU_SN	CAR_TYP	OBU_TYPE	INFO_CRE_DATE	MANUFAC_ID	INDL_ID	DATA_TYP	
1	20151015241616320	044ED16275C6641811706C31176CDD3F	1	0	20151015001625	3	20024	0
2	20151015241616332	2CC1776628098D3DE3CAE9F85CFDD	1	1	20151015001622	3	20025	NA
3	20151015241616456	57A1654D27AE05D5968A73AFFA27F911	1	0	20151015001636	3	20137	2
4	20151015241616668	2EC518C483D04A8318B6D4E1282040CE	1	1	20151015001649	3	20135	2
5	20151015241616812	1CF2B9E27127269FE947E07005A18638	1	0	20151015001703	3	20160	0

OBU_SN	VEH_ID	TRIP_ID	UNIT_TRIP_ID	DATA_TYP	INDL_ID	CAR_TYP	TIME	IR	IR_direction	NODE_CODE	
3204360	FFFF471658AA42EED3682E6CF62109DC	253269	607078	720931	2	20143	1	12:38:56	0	ONA	NA
3204361	FFFF471658AA42EED3682E6CF62109DC	253269	607079	720932	NA	20143	1	17:59:14	0	ONA	NA
3204362	FFAC86c3c337f405673148b32cc0	253270	607080	720933	NA	20176	1	07:10:35	0	ONA	NA
3204363	FFAC86C3C337F4405673148B32CC0	253271	607081	720934	NA	20109	1	07:12:31	0	NA	NA

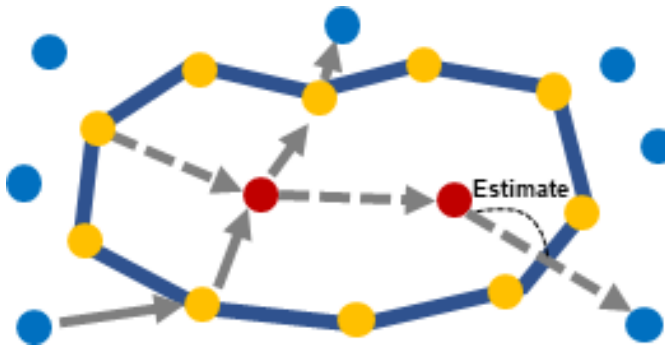
Showing 3,204,360 to 3,204,363 of 3,204,363 entries

<Fig. 3> Data preprocessing for raw data

TRIP			ESTIMATION		NODE_ID					NODE_TIME				
VEH_ID	TRIP_NUM	COMMUT	EST_IN	EST_OUT	ID_1	ID_2	ID_3	ID_4	ID_5	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5
1	1	T	NA	NA	20061					20062	7:22:15			
1	2	F	NA	1	20084		20073			30172	14:22:16		14:25:57	14:42:15
1	3	F	NA	NA	20073	20072	20061		20064	20062	15:30:12	15:31:28	15:33:21	15:38:26
2	1	F	1	1	20084					30172	16:33:45			19:42:15

<Fig. 4> Data scheme of unit trip

5가지 종류의 노드는 통행 시작 노드, 경계 진입 직전 노드, 경계 내 첫 노드, 경계 내 끝 노드, 경계 진출 직후 노드(혹은 통행 종료 노드)로 구분되며, 각각 노드의 ID와 해당 노드에서 기록된 시각을 저장한다. 노드를 구분하는 이유는 앞서 분석 지역의 경계 및 내부·외부로 구분한 것과 관련이 있다. <Fig. 4>에 표시된 Estimation 항목은 분석 지역을 벗어나기 전 혹은 지역 내로 진입하기 전 노드에서 경계지역까지의 거리 및 운행 시간을 추정할지 여부를 기록한다.



<Fig. 5> Estimation between boundary and adjacent nodes

<Fig. 5>의 점선으로 표시된 것과 같이 단위통행 중 기록된 노드 연결의 순서가 분석 지역 경계를 포함하

지 않고 밖으로 이어질 경우에는 내부 지역 통행 거리가 실제보다 더 있음에도 불구하고 이를 반영하지 못하므로, 해당 부분에서 발생하는 추가적인 시간에 대해 추정이 필요하다. 반대로 밖에서 안으로 들어오는 연결일 경우에도 경계를 포함하지 않고 노드 연결이 구성되면 추가 시간에 대한 추정을 필요로 한다.

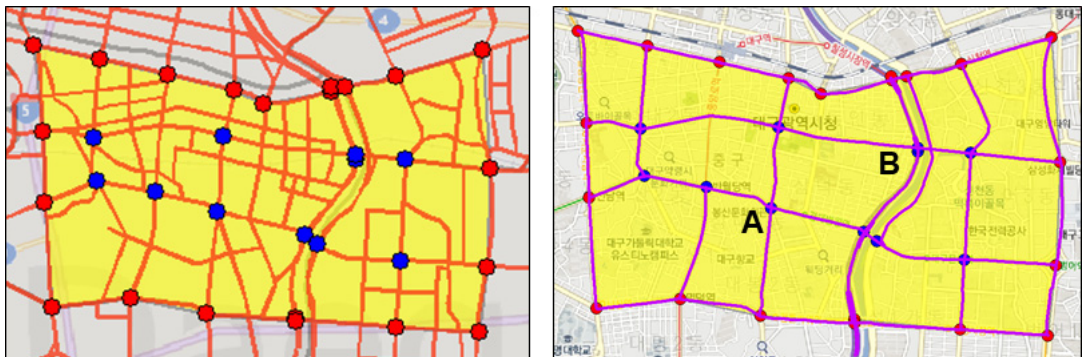
### Ⅲ. 거시 교통류 모형(MFD) 추정

#### 1. MFD 추정 개요

거시 교통류 모형은 교통량, 밀도, 속도의 관계를 네트워크 스케일에서 나타낸다. 본 연구에서는 이러한 변수를 측정하기 위해 앞서 정의한 분석 지역을 하나의 독립적인 네트워크로 분리하여, 해당 지역을 구성하는 노드 간의 연결인 링크(link)를 새롭게 정의하였다. <Fig. 6>의 좌측부는 분석 지역 내 지능형교통체계관리 시스템의 표준노드링크 기준 도로를 표시하고 있으며, 우측부는 새로 정의한 링크를 나타낸 것이다. 새로 정의한 링크의 선정 기준은 아래와 같다.

- i) 단위통행 테이블에서 1건 이상의 통행이 존재하는 노드를 연결
- ii) 좌·우회전 등 직접 연결에 있어 방향 전환이 필요한 노드의 연결은 제외

<Fig. 6>의 오른쪽 그림에서 표시한 바와 같이 A와 B 사이에는 다른 노드를 거치지 않고 갈 수 있는 여러 가지의 경로가 실제로 존재하지만, 이와 같은 연결을 링크로 상정할 경우 각각의 경로마다 주행 거리 및 통행 시간이 달라질 확률이 매우 크기 때문에 링크의 밀도 혹은 속도를 계산하는 데에 많은 오차가 발생할 수 있다. 따라서 위 기준과 같이 하나의 노드에서 다음 노드까지 직선으로 연결되는 도로가 있고, 그 중 통행이 1건 이상 존재하는 노드 쌍을 링크로 상정하였다. <Fig. 6>에서는 새로 정의된 네트워크가 표준노드링크 기준의 네트워크와 비교하여 간소화 된 것을 확인할 수 있다.



<Fig. 6> Node-link on actual arterial (left) and the newly defined link (right)

#### 2. MFD 추정 방법

##### 1) 교통량 및 밀도 추정

네트워크 내 MFD를 추정하기 위해, Edie(1965)의 일반화된 정의(generalized definitions)에 따라 네트워크

내 모든 링크에서 주어진 시간 단위 내의 평균 교통량  $q$ (시간당 교통량) 및 평균 밀도  $k$ (킬로미터당 교통량)는 아래 식 (1) 및 (2)와 같이 계산된다(Edie, 1965).

$$q = \frac{d_T}{LT} = \frac{N\bar{d}}{LT} \tag{1}$$

$$k = \frac{t_T}{LT} = \frac{N\bar{t}}{LT} \tag{2}$$

이 때  $d_T$ 는 네트워크 내 모든 자동차가 주어진 시간 단위 내에서 총 주행한 거리(vehicle kilometer traveled; VKT),  $L$ 는 네트워크 내 링크 길이(kilometer),  $T$ 는 총 분석 기간(hours),  $N$ 은 해당 기간 동안 네트워크를 주행한 총 차량의 대수(대),  $\bar{d}$ 는 차량의 평균 주행 거리(kilometer),  $t_T$ 는 네트워크 내에서 차량이 주행한 시간의 총합(대·hours),  $\bar{t}$ 는 차량의 평균 주행 시간(hours)을 나타낸다.

한편, DSRC 방식의 자료 수집은 루프 검지기와 달리 전체 차량에 대해 정보를 수집하는 것이 아니라 샘플(또는 프로브) 차량에 대해 부분적인 정보만을 생성한다. 표본 수집율에 따라 교통량 및 밀도는 과소 추정될 수 있으며, 이에 대한 적절한 보정 과정이 필요하다. 앞선 식 (1), (2)의 경우 네트워크 내 모든 차량의 모든 이동경로(trajectories)를 알 수 있다면 그대로 활용할 수 있다. 그러나 DSRC 방식과 같이 프로브 차량을 이용할 경우에는  $d_T$ ,  $t_T$ , 및  $N$ 을 추정할 수 없으므로, 프로브 데이터 및 표본율을 이용한 전수화 과정이 필요하다. Nagle and Gayah(2014)에 따르면 앞선 Edie's definition에 따른 식 (1), (2)는 표본 차량의 비율  $\rho$ 를 이용해 보정될 수 있으며, 그 식은 아래 (3), (4)와 같다.

$$\hat{q} = \frac{N_p \bar{d}_p}{\rho LT} \tag{3}$$

$$\hat{k} = \frac{N_p \bar{t}_p}{\rho LT} \tag{4}$$

표본 차량의 비율  $\rho$ 를 기준에 알고 있다고 가정하면, 분석 시간 내에 네트워크 상에 존재하는 프로브 차량의 비율은 전체 차량에 표본율을 곱한 것과 같다( $N_p = N\rho$ ). 또한, 네트워크 내 링크에 대해 프로브 차량의 비율이 일정하다고 가정할 경우에는 프로브 차량에서 계산된 차량 평균 이동거리 및 평균 주행시간이 전수 차량의 값을 대표한다고 상정할 수 있다( $\bar{d} = \bar{d}_p, \bar{t} = \bar{t}_p$ ).

## 2) 표본율( $\rho$ ) 추정

한국도로공사의 자료에 따르면 2017년 9월 기준 하이패스 단말기(OBU) 보급률은 80%에 육박하는 상황이지만, 보급 단계 및 모델에 따라 IR(적외선) 또는 RF(라디오주파수) 방식으로 나뉘고, 각 방식에 따른 인식률 저하 문제 등이 존재하여 실제 프로브 차량의 검지율과는 차이가 있다. 즉, 네트워크 내에서 주행 중인 프로브 차량의 비율을 실제로 추정하기 위해서는 네트워크 내 전체 차량의 수 및 RSE 검지기 상에 검지된 프로브 차량의 수를 검지해야한다.

본 연구에서는 2015년도 DSRC 정보를 이용하여 MFD를 추정하고자 하였으므로, 2015년도에 네트워크 내 교통량 정보 및 프로브 차량의 검지 대수가 필요하다. 한편 대구광역시시의 경우 루프 검지기를 통한 교통량 측정을 하지 않고 ATMS 기반의 DSRC 자료만을 가지고 교통 정보를 조사하기 때문에, 차량의 전수 자료를

도로별로 집계하는 데에 기존과 다른 방법을 적용해야만 한다. 이에 본 연구에서는 대구광역시 교통종합정보DB센터(<http://car.daegu.go.kr>)에서 제공하는 통계 자료 보고서를 이용하여 간선도로별 교통량을 확인하였다(대구광역시, 2015). 해당 교통량 조사는 영상촬영을 이용해 직접조사 되었으며, 대구광역시 내 20개 지점양 방향에 대해 교통량 및 속도 정보를 도출하였다.

<Table 2> The penetration rate estimated at 40 links

Link name	$N^d$	$N_p$	$\hat{\rho}$	Link name	$N^d$	$N_p$	$\hat{\rho}$
Shincheondaero	30,877	6,361	0.21	Chilgokjungangdaero	13,684	2,664	0.19
	34,046	7,203	0.21		16,456	3,230	0.20
Shincheondongro	18,966	4,445	0.23	Waryongro	13,391	3,521	0.26
	10,800	2,302	0.21		13,258	2,805	0.21
Dalgubuldaero	20,382	4,495	0.22	Gumaro	13,702	2,093	0.15
	21,634	4,553	0.21		14,176	2,595	0.18
Universiadro	15,809	NA	X	Walbaero	16,859	2,629	0.16
	19,003	NA	X		18,758	2,943	0.16
Hwarangro	20,425	3,971	0.19	Dongbukro	20,075	3,008	0.15
	20,643	3,720	0.18		17,237	2,892	0.17
Palgongro	11,007	2,266	0.21	Padongro	5,309	1,432	0.27
	11,959	2,632	0.22		4,906	1,200	0.24
Apsansunhwanro	24,549	5,420	0.22	Dalgubuldaero2	16,475	3,541	0.21
	21,821	5,199	0.24		18,972	3,985	0.21
Sanghwaro	20,714	4,906	0.24	Chunghoro	7,247	1,963	0.27
	19,976	4,622	0.23		6,732	1,833	0.27
Bumanro	12,019	2,360	0.20	Technopolisro	9,490	NA	X
	12,966	1,984	0.15		9,938	NA	X
Hogukro	18,271	3,589	0.20	Apsantunnulro	10,805	3,075	0.28
	20,994	3,095	0.15		9,904	2,579	0.26

<Table 2>는 총 40개 지점(20개 지점, 양방향)의 교통량 및 해당 기간의 DSRC 검지 차량 대수를 나타낸 것이다. 보고서에 기재된 교통량은 2015년 10월~11월의 평일 조사 결과를 통해 작성된 것이며, 간선도로의 경우 오전 7시부터 오후 19시까지 12시간에 대해 조사가 이뤄졌다. 본 연구에서는 정확한 표본을 산정을 위해 같은 기간 및 같은 시간대의 DSRC 검지 차량으로만 필터링 하여 검지 차량 대수( $N_p$ )를 산정하였다. 각 지점에서의 표본을  $\rho$ 는 아래 식 (5)와 같이 계산될 수 있으며, 영상자료를 통해 산정된 링크 내 총 교통량  $N^d$ 은 해당 지점을 지나는 모든 차량( $N$ )을 검지하고, 그 중 OBU를 장착한 차량 역시 모두 검지하였다는 전제를 두고 있다( $N = N^d$ ,  $N_p = N_p^d$ ).

$$\hat{\rho} = \frac{N_p^d}{N^d} \tag{5}$$



<Table 2>의 40개 지점에 대한 표본율의 차이는 크지 않은 것으로 나타났으나, 각 표본율에 대한 정확도는 다시 한 번 고려해야할 필요가 있다. 즉  $N_p^d = \rho N^d$ 의 관계가 성립되어야 하지만, 표본율은 시간 및 공간에 따라 달라질 수 있으며 임의성을 가지게 된다(Nagle and Gayah, 2014). 표본율의 분산을 구하기 위해  $N_p^d$ 를 이항확률변수로 상정하면, 식 (6), (7)을 도출할 수 있다.

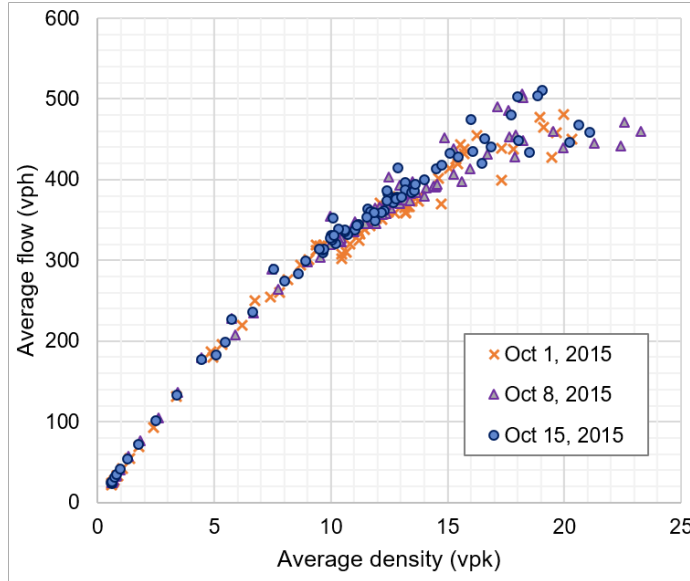
$$var(N_p^d) = \frac{\rho(1-\rho)}{N^d} \tag{6}$$

$$var(\hat{\rho}) = \frac{\rho(1-\rho)}{N^d} (\because N_p^d = \hat{\rho}N^d) \tag{7}$$

식 (7)에 따르면, 전체 차량의 비율이 높아질수록 표본율의 분산이 작아지게 된다. 즉 분석 기간이 길어지거나 검지 구간의 개수가 많아질수록 더 높은 표본율의 정확도를 갖는다. 본 연구에서는 충분히 긴 기간 동안의 검지 자료를 사용하고, 차량의 총 통행 빈도 역시 높은 대구시 중심지역(CBD)에서 분석을 수행하므로, 식 (5)를 통해 산정된 표본율을 적용하는 것이 타당하다고 볼 수 있다. 이에 연구 대상지역을 포함하는 달구벌대로와 신천대로의 표본율 평균인  $\hat{\rho}=0.21$ 을 분석 지역에 적용하였다. 한편, 표본율의 일괄 적용을 위해서는 두 가지 가정 사항이 필요한데, 첫 번째; 각 기종점 연결(O-D Pair)에 대한 표본율의 차이가 없어야 하며, 두 번째; 시간에 따른 표본율의 변화가 없어야 한다는 점이다. 즉 공간에 따른 표본율의 차이가 없어야 하는데, 본 분석에서는 분석 대상 네트워크의 크기를 대구광역시 도심부만으로 한정하였으므로 상대적으로 표본율의 공간적 분산이 작다. <Table 2>에서 구한 각 링크별 표본율은 대구광역시 전역에 걸쳐 나타난 결과이며, 이에 비해 분석 네트워크의 크기는 전체 대구 면적의 0.01배에 해당하여 공간적인 분포의 차이가 크지 않음을 상정할 수 있다.

### 3) 거시 교통류 모형(MFD) 추정

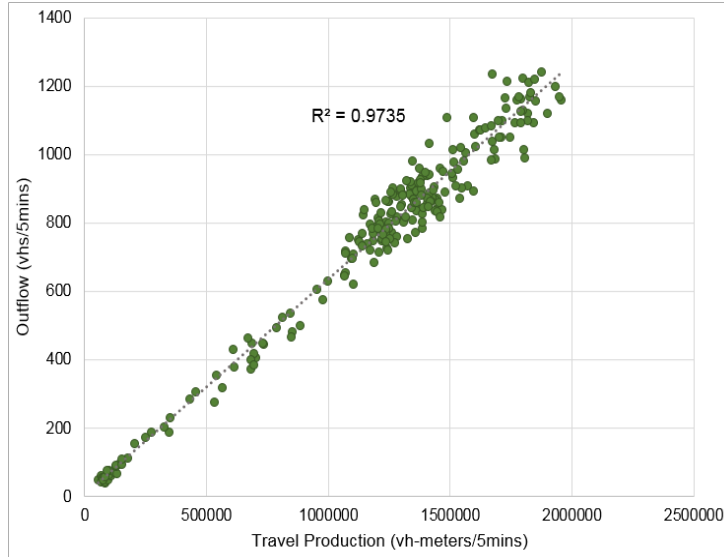
<Fig. 7>은 식 (3), (4)를 이용해 2015년 10월 1일, 8일, 15일 목요일의 MFD를 추정한 것을 나타낸다. II장에서 언급했던 바와 같이 시간적 재현성을 확인하기 위해 10월 중 여러 날짜에 대해 MFD를 추정하였으며, 집계 일자에 상관없이 같은 패턴으로 MFD가 형성되는 것을 확인할 수 있다. MFD는 시간에 따라 급격히 변화하는 O-D 수요(demand)에 상관없이 일정하게 나타나는 것으로 알려져 있으며, 형성되는 하나의 곡선 안에서 미미한 차이만을 보인다(Geroliminis and Daganzo, 2008). 검지기 자료를 이용해서 추정되는 MFD의 경우 일반적으로 한 개 지점에서는 교통량-밀도 관계가 매우 산포되는(scatter) 경향을 가지나, 네트워크 전체를 관점으로 볼 경우에는 MFD 곡선의 일부를 형성하며 명확한(well-defined) MFD를 나타내게 된다. 이 때 MFD의 명확성과 형태에 영향을 미치는 가장 주요한 요소는 네트워크 내 차량 밀도의 공간적 분포인데, 공간적 불균형이 심화될수록 <Fig. 7>과 같이 명확한 MFD의 형태에서 벗어나게 된다.



<Fig. 7> Reproducible MFDs estimated on weekday in October

한편, 식 (1) ~ (4)에서 고찰한 바와 같이 네트워크의 교통량 및 밀도 특성을 나타내는 지표는 주행거리와 주행시간으로 대변될 수 있다. 즉, 교통량은 일정 시간동안 지점을 통과하는 차량의 수를 집산하거나 네트워크 내 차량의 총 주행거리(VKT)를 통해 구할 수 있으며, 네트워크의 산출(production)을 나타내는 지표이다. 또한 밀도는 특정 시각에 네트워크 내에서 주행하고 있는 차량의 수를 집산하거나 총 통행시간(VHT)을 통해 도출할 수 있으며, 네트워크의 상태(state)를 나타내는 지표이다. 즉 산출 및 상태를 나타내는 각각의 측정 지표(measure)는 그 값의 크기(scale)에 차이가 있을 뿐 같은 대상을 가리킨다.

Geroliminis and Daganzo(2007)의 연구에서는 두 가지 기본 가정을 기준으로 MFD의 존재를 제시하였는데, 첫 번째는 네트워크 내 각 도로구간이 균일한 혼잡도를 가진다는 것이다. 이 때 MFD는 두 가지 값을 대변하여 추정되는데, 이 값이 통행 산출(Travel production) 및 통행 누적(Accumulation)이다. 통행 산출은 링크 내 모든 차량이 일정 시간( $t \sim t + \Delta t$ )동안 주행한 거리를 합산한 것이며, 통행 누적은 링크 내에서 특정 시간( $t$ )에 주행 중인 차량의 수를 나타낸다. 두 번째 가정은 이 중 통행 산출이 통행을 종료한 비율과 비례 관계에 놓인다는 것이다. 통행을 종료한 비율은 통행 종료(trip completion or outflow)로 정의되는데, 이러한 가정과 검증의 이유는 기존 자료의 경우 통행 종료를 측정할 수 있는 수단이 없었기 때문이다. 그러나 본 연구에서는, DSRC 자료를 활용하여 개별 차량의 통행 종료를 측정할 수 있다는 점을 이용하여 산출-상태 관계를 나타내는 MFD를 추정할 수 있었다. <Fig. 8>은 이러한 차량주행거리(VMT) 대 통행 종료에 대한 관계 그래프를 도시한 것이다. 이 때 통행 종료는 단위 통행이 분석 지역 내에서 끝나는 경우와 분석 지역 밖으로 벗어나는 두 가지 경우를 모두 고려한다. 차량주행거리는 각 노드에서 노드로 연결되는 링크 길이를 기반으로 산정하였으며, 2장 2절에서 정의한 Estimation 항목의 체크 여부에 따라 각 단위통행별로 최종 주행거리를 계산하였다. 결과적으로 주행거리와 통행 종료 사이의 결정계수( $R^2$ ) 값은 0.9735로 비례 관계에 놓이는 것을 확인할 수 있었다.



〈Fig. 8〉 Verification of the relation between outflow and travel production with real data

#### IV. 결 론

본 연구에서는 개별 통행 자료를 이용하여 대구광역시 도심부에서 네트워크 스케일의 거시 교통류 모형, 즉 MFD를 추정하는 방법에 대해 고찰하였다. 이를 위해 DSRC 방식으로 수집된 개별 통행 원시 자료의 데이터 처리 방법 및 통행 정의 방법을 연구하였고, 기존 교통량 조사 자료를 이용해 프로브 차량 자료와 표본율의 관계를 이용하여 네트워크 내 교통량-밀도를 추정하는 방법에 대해 고찰하였으며, 이를 활용한 MFD 추정 방식을 제시하고 기존 가정사항에 대한 데이터 기반의 검증 실시하였다.

먼저 대구광역시 교통 수집 체계의 특징인 DSRC 방식으로 수집되는 데이터의 세부 사항을 살펴보고, 해당 데이터를 가공하여 개별 통행을 추출 하는 방법에 대해 분석하였다. 개별 통행을 추출함에 앞서 통행 및 단위통행의 개념을 정립하고, 각각에 해당하는 통행 데이터를 재가공하였다. 이 때 DSRC 방식으로 수집되는 자료의 한계점인 노변 검지기 음영지역에 대한 통행시간 및 경로 추정 과정을 추가하였으며, 이는 MFD 추정에 있어 프로브 차량의 총 통행시간 및 통행거리를 산정하는데 활용되었다.

DSRC 자료는 개별 통행 자료를 추출할 수 있어 각 차량의 통행시간 및 거리, 통행 특성 정보를 얻어내는 데 매우 효과적이지만, 모든 차량에 대한 검지가 불가능하기 때문에 표본율( $\rho$ )에 대한 고려가 필수적이다. 본 연구에서는 40개 지점에 대한 표본율을 조사하고, 표본율의 분산에 따른 신뢰도를 고려하여 추정된 표본율을 교통량-밀도 추정 시의 전수화 계수로 사용하였다. 표본율은 차량의 통행 대수가 많을수록, 시간적 분석 범위가 길어질수록 더 높은 신뢰도를 보인다. 또한 O-D 쌍에 따른 공간적 분산이 크지 않아야 하는데, 본 연구에서는 대구광역시 전체 지역에 대한 표본율 자료를 조사한 뒤 분석 대상 지역에 대한 표본율의 일괄 적용을 통해 MFD를 추정하였다. 최종적으로, 추정된 MFD는 2015년 10월 3주 간의 자료를 통해 시간적 재현성을 확인할 수 있었고, 주행거리-통행종료 간의 관계 역시 확인되었다.

본 연구에서 제시한 MFD는 산출-상태 간 관계를 보여주는 도구로서 교통기본도와 기본적으로 케를 같이 하지만 교통 운영 측면의 활용에 있어 차이를 보일 수 있다. DSRC 자료를 통해 추정된 MFD는 통행종료(trip

completion or outflow) 측정치를 이용해 네트워크 출/입 차량 관리에 활용될 수 있다. 구체적으로는, 네트워크 주변부의 통행 누적 자료와 속도 자료에 기반한 영역 관리(perimeter control), 총량 배급관리(rationing), 유료화 정책(cordon pricing) 등에 활용될 수 있으며, 이 때 네트워크 내부와 외부를 종합적으로 측정하고 관리할 수 있기 때문에 지점별/링크별 교통 운영보다 훨씬 효율적이다(Daganzo, 2007). 특히 도시부 전체의 교통을 운영·관리하는데 있어서는 향후 필수적으로 도입되어야 할 개념이라고 사료된다.

본 연구가 의의하는 바는 크게 두 가지이다. 첫 번째는 방대한 규모로 생성되고 있는 개별 통행 자료의 활용 방안을 새로운 방향에서 모색한다는 점이고, 두 번째는 국내 데이터 및 인프라 실정에 맞는 거시 교통류 모형에 대한 연구의 초석을 제시한다는 점이다. 향후 연구에서는 루프 검지기 자료 및 GPS 자료 등 다양한 수집 체계에서 구득 가능한 자료를 이용하여 각 데이터를 이용한 MFD 추정에서 어떤 차이가 있는지 살펴보고자 한다. 또한 MFD에서 나타는 이력현상(hysteresis phenomena) 및 MFD의 형태에 영향을 미치는 요소에 대한 연구도 필요하다. DSRC 자료를 이용할 경우 기존 소수의 프로브 차량이나 택시 차량과는 달리 개별 차량의 O-D 및 통행지속시간(trip duration) 등 통행 특성을 정확하게 파악할 수 있으므로, 계속되는 연구에서는 개별적 특성이 네트워크 내 MFD 형성에 어떤 영향을 미치는지도 분석될 것이다.

## ACKNOWLEDGEMENTS

본 연구는 국토교통기술지역특성화사업(17DRP-B076278-04) 지원으로 수행하였으며, 한국ITS학회의 2017 한국ITS학회 춘계학술대회에 게재되었던 논문을 수정·보완하여 작성하였습니다.

## REFERENCES

- Buisson C. and Ladier C.(2009), "Exploring the impact of homogeneity of traffic measurements on the existence of macroscopic fundamental diagrams," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2124), pp.127-136.
- Cassidy M., Jang K. and Daganzo C.(2011), "Macroscopic fundamental diagrams for freeway networks: theory and observation," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2260), 8-15.
- Daegu Metropolitan City(2015), *2015 Transportation Survey (II): Traffic flow and speed*, Daegu Gyeongbuk Development Institute Report, 53-6270000-000203-11.
- Daganzo C. F.(2007), "Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 41, no. 1, pp.49-62.
- Daganzo C. F. and Geroliminis N.(2008), "An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 42, no. 9, pp.771-781.
- Du J., Rakha H. and Gayah V. V.(2016), "Deriving macroscopic fundamental diagrams from probe data: Issues and proposed solutions," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 66, pp.136-149.
- Edie L. C.(1961), "Following and Steady-State Theory for Non-congested Traffic," *Operations Research*, Vol. 9, pp.66-76.
- Edie L. C.(1965), "Discussion of Traffic Stream Measurements and Definitions. In 2nd Symposium

- on the Theory of Traffic Flow; Summary of Communications (J. Almond, ed.),” *Organisation for Economic Co-operation and Development*, Paris, pp.139-154.
- Gayah V. V. and Daganzo C. F.(2011), “Clockwise hysteresis loops in the macroscopic fundamental diagram: an effect of network instability,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 45, no. 4, pp.643-655.
- Gayah V. V. and Dixit V.(2013), “Using mobile probe data and the macroscopic fundamental diagram to estimate network densities: Tests using microsimulation,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2390), pp.76-86.
- Geroliminis N. and Daganzo C. F.(2007), “Macroscopic modeling of traffic in cities,” *Transportation Research Board 86th Annual Meeting*, No. 07-0413.
- Geroliminis N. and Daganzo C. F.(2008), “Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings,” *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 42, no. 9, pp.759-770.
- Greenberg H.(1959), “An Analysis of Traffic Flow,” *Operations Research*, vol. 7, pp.79-85.
- Greenshields B. D.(1935), “A study of traffic capacity,” *Highway Research Board Proceedings*, vol. 14, 448-477.
- Saberi M. and Mahmassani H.(2012), “Exploring properties of networkwide flow-density relations in a freeway network,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2315), pp.153-163.
- Tsubota T. Bhaskar A. and Chung E.(2014), “Macroscopic fundamental diagram for Brisbane, Australia: empirical findings on network partitioning and incident detection,” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2421), pp.12-21.