

TRANSIMS의 단속류 네트워크 적용 가능성에 대한 연구

정광수* · 도명식** · 이종달*** · 이용두****

Jung, Kwnagsu*, Do, Myungsik**, Lee, Jongdal***, Lee, Yongdoo****

A Study on Applicability of TRANSIMS to Interrupted Traffic Flow at Road Segments in Urban Area

ABSTRACT

This study aims to verify the applicability of TRANSIMS (TRansportion ANalysis SIMulation System) in interrupted traffic flow through calibration and validation process based on observation data; such as headway, traffic volume, speed, and travel time from Dalguberl Boulevard in Dae-gu metropolitan city. On this study, several micro-simulation parameters are derived from the calibration and validation process through performing a headway comparison and applying an ID back tracking methodology. As a result, it is figured out that actual circumstances of Korean roadway; for example, traffic volume per lane, speed, and travel time, can be applied on the TRANSIMS. Especially, it was possible to find out the influence of cell size parameter to traffic flow characteristic of simulation. However, it is hard to conclude that TRANSIMS is applicable to Korean roadway environment with studying particular target area. Therefore, additional studies; such as more case studies with various types of road, signal, and land use, will be required to localize TRANSIMS to Korea.

Key words : TRANSIMS, Interrupted traffic environment, Car-following model, Calibration, Cell size

초 록

본 연구에서는 대구광역시의 달구벌대로의 일부 단로부를 대상으로 신호교차로에서의 차두시간 특성과 교통량, 속도 및 통행시간 특성에 대한 관측 자료를 기반으로 시뮬레이션을 위한 calibration과 검증과정을 통해 TRANSIMS의 단속류에서의 적용 가능성을 살펴보는 것을 목적으로 한다. 특히, 차두시간의 특성과 우리 실정에 맞는 파라미터의 선정 및 ID 추적 등을 통해 Calibration 과정을 거쳤으며 이렇게 수정된 파라미터를 기반으로 구현된 가로구간의 차로별 교통량, 속도 및 구간 통행시간 등의 특성은 무난하게 우리 실정에 맞게 묘사할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 셀의 크기에 따른 교통류 특성 분석에서 기존 연구의 성과를 뒷받침 할 수 있는 결과도 얻을 수 있었다. 그러나 본 연구에서 대상으로 일부 구간만으로 TRANSIMS의 국내 적용가능성을 단정하기에는 무리가 있으며, 다양한 차로 특성, 신호 특성 및 연도 토지이용 특성 등을 고려한 시뮬레이션을 통해 객관적인 분석과 파라미터의 Calibration 과정 및 검증에 대한 향후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

검색어 : TRANSIMS, 단로부 교통특성, 차량추종 모형, 보정, 셀의 크기

1. 서론

단로부의 교통류 특성을 나타내는 요소들은 1) 속도(speed) 및 통행시간(travel time), 2) 교통량(volume)[또는 교통류율(flow rate)]

* 대구광역시 북구청 교통전문직 (gojks@korea.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 한밭대학교 도시공학과 교수 (Corresponding Author · Hanbat National University · msdo@hanbat.ac.kr)

*** 정회원 · 영남대학교 건설시스템공학과 교수 (jdlee@yu.ac.kr)

**** 펜실베이니아 주립대학 토목공학과 박사과정 (wistee@naver.com)

Received December 18 2012, Revised January 10 2013, Accepted February 20 2013

및 차두시간(headway)과 차간시간(gap), 3) 교통류의 밀도(density) 및 차두거리(spacing) 등이 있으며 이들은 서로 밀접한 관련을 가지고 있다. 그 가운데에서도 교통량과 속도의 관계는 매우 중요하여 도로망의 계획이나 차로 수의 결정과 교통량 배분의 기초 지표로 사용되고 있다.

최근 미시적인 교통시물레이션 모델과 거시적인 교통시물레이션의 단점을 보완하기 위해 개발된 TRANSIMS (TRansportation ANalysis and SIMulation System)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이 프로그램의 특성은 전체 교통을 구성하는 개개인의 활동특성을 반영하기 위해 활동기반모형(activity based model)으로 구성되어 있으면서 Cellular Automata (CA) 이론을 적용함으로써 대규모 도심지역을 대상으로 한 미시적인 분석까지 가능하게 되었다.

그러나 CA 모델이나 TRANSIMS 등 교통 시물레이션을 이용한 대부분의 연구가 고속국도나 도심 고속도로 등 연속류 혹은 가상 네트워크를 대상으로 이루어졌으며 신호교차로의 영향을 받는 단속류를 대상으로 한 연구는 상대적으로 많지 않은 실정이다(Cheon and Noh 2001; Jo et al. 2001; Yeon et al. 2002; Yoon, 2009). 한편 Park and Kwak(2011)은 미국의 도시부 도로를 대상으로 관측한 교통자료를 기반으로 TRANSIMS를 이용한 Calibration과 검증(validation)방안을 제시하였으며, Bar-Gera and Shinar(2005)는 선행 차량을 추월하려는 운전자의 성향에 대한 연구를 수행한 바 있지만 아직 국내 도시부 도로를 대상으로 한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 대구광역시의 달구벌대로의 일부 단로부를 대상으로 신호교차로에서의 차두시간 특성과 교통량, 속도 및 통행시간 특성에 대한 관측자료를 기반으로 시물레이션을 위한 calibration과 검증과정을 통해 TRANSIMS의 단속류에서의 적용 가능성을 살펴보는 것을 목적으로 한다.

2. TRANSIMS와 도시부 가로의 교통류 특성

2.1 TRANSIMS 개요

TRANSIMS는 Activity Based Model의 한 종류로 대상 지역의 인구조사 자료와 인구속성의 마이크로 샘플자료를 이용하여 전체 인구와 그 인구의 마이크로 자료를 생성한다. 생성된 전체 인구의 마이크로 자료와 활동 조사 자료를 이용하여 전체 인구의 활동을 생성하며 이 활동 자료를 이용하여 교통수요분석이 이루어진다. 또한 피드백 과정을 통하여 최단 경로, 최단 시간, 개인 간의 상호작용을 반영하여 교통의 흐름을 예측하고 반영하여, 실제 사람들이 반복되는 학습을 통하여 최적의 경로를 찾는 것과 유사한 행태가 나타나도록 하고 있다. TRANSIMS의 구조는 Fig. 1과

같이 크게 6개의 모듈로 구성되어 있다.

인구생성 모듈(Population Synthesizer Module)은 가구와 가구 구성원을 생성하고 생성된 가구를 대상지역의 네트워크상에 배치하는 과정이며, 활동생성 모듈(Activity Generator module)은 마이크로 샘플자료 수집 시 함께 수집한 활동통계자료와 인구생성 모듈에서 생성된 가구 구성원의 활동을 이용하여 전체 인구에 대한 활동을 생성하는 과정이다.

한편, TRANSIMS의 가장 큰 특징 중의 하나인 미시적 교통시물레이터 모듈(Traffic Microsimulator Module)은 경로계획모듈에서 생성된 활동에 대하여 차량을 이용한 통행을 미시적으로 분석하는 단계이다. 이 과정에서 CA 이론을 이용하여 분석하게 되는데, CA 이론은 네트워크를 일정한 크기의 cell로 분할하고, 매 초마다 차량이 cell을 점유하며 이동하는 방식으로 시물레이션을 하게 된다. 이러한 방법은 비교적 빠른 시간에 대규모 네트워크를 분석하는데 상당히 유리하다.

이 과정에서 사용자의 설정에 따라 차량의 이동경로를 따라 주행 거동을 기록하고, 링크의 교통량, 밀도, 속도 등의 교통류 정보를 추출할 수 있다. 또한, 차량 사이의 상호작용에 의하여

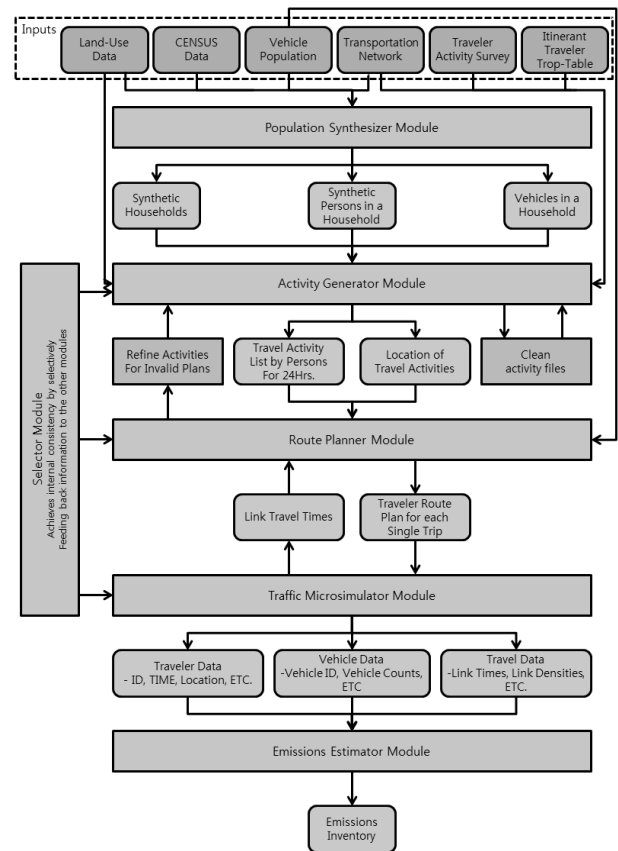


Fig. 1. Process and Components of TRANSIMS

교통류의 현상이 나타나며, 이러한 일련의 과정을 추가적인 시각화 모듈(Visualizer module)을 이용하여 사용자가 쉽게 파악할 수 있도록 시각화 할 수 있다. 한편, TRANSIMS에서 default값 (cell length : 7.5m)을 적용하였을 때, 일반적인 차량의 속도는 0~5cell/s의 값을 갖게 되며, km/h로 환산하게 되면 27km/h 단위로 속도가 변하게 되며, 최고 속도는 135km/h가 된다.

cell의 크기가 클수록 연산속도는 빨라지지만 차량 거동이 비교적 상세하지 못한 성향이 나타난다. 이와 반대로, 상세한 차량 거동을 살펴보기 위해 cell의 크기를 줄이게 되면 연산속도가 급격하게 느려진다. 이러한 점을 감안하여 사용자가 분석 대상지역의 특성에 맞는 cell의 크기를 설정하고 분석을 하여야 할 필요가 있다. 한편 cell 크기가 시뮬레이션에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구로는 Jung et al.(2012)가 7.5m(default) 보다는 1.0m 일 경우 현실적인 상황을 잘 묘사하는 것으로 분석한 연구가 있다.

2.2 도시부 가로의 교통류 특성

기존 연구에서 도시부 가로의 교통류 해석에 대한 연구가 많지 않은 것은 연속류에 비해 교통류에 미치는 영향인자가 많고 그들이 교통류에 어떤 영향을 미치고 있는가를 명확하게 규명하기 어렵기 때문이다. 특히 단로부의 교통류 특성 파악의 근간이 되는 교통량 속도의 관계에서도 차로 수, 차로 폭, 노상주차, 정차대, 보행자 횡단 등 각 구간별로 서로 상이한 조건들이 교통량과 속도에 영향을 미치고 있다(Lee, 1988).

도시부 가로의 교통류에 대한 해외의 선구적인 연구는 Greenshield(1947)의 교차로에 도착하는 차량의 특성파악을 위해 차두시간을 측정 한 연구, Wardrop(1952)의 대기시간을 최소로 하는 신호주기를 결정하는 연구와 Pipes(1953)의 교통동력학적 이론에 대한 연구 등이 있다. 또한 Bartle(1956)의 교차로 진입차량의 차두시간 분포에 대한 연구, Kometani and Sasaki(1958)의 교통류 추종이론에 및 안정화 문제 등에 대한 연구와 Richards(1959)의 도로의 교통류를 유체로 가정하여 유체역학이론을 도입한 파동이론에 대한 연구 등이 있었다.

국내의 연구로는 Nam(1985)의 교통류 특성파악을 위한 이론적 연구와 Kim et al.(2002)의 합류부의 간격수락행태에 대한 연구가 있으며, Lee (1988)은 교차로간의 차두시간이 전체 차로에서는 감미분포를 띄며, 차로별 승용차의 경우는 대수정규분포를 가진다고 밝혔다.

한편 Kim and Woo(1997)은 신호교차로에 접근하는 차량과 도착하는 차량의 차두시간이 대수정규분포를 띄고 있으며, 교통량과 차두시간의 관계는 음지수모형을 따른다고 밝혔으며, Lee and Doh(2002)은 교차로에 진입하는 차량의 차두시간이 차로 수, 차로 위치, 지역특성 및 신호현시에 영향을 받는다고 밝힌 바 있다.

한편 추종모델과 CA 모델 혹은 TRANSIMS를 이용한 대부분의 연구가 연속류나 가상 네트워크를 대상으로 이루어졌으며 도심부 가로의 단속류를 대상으로 한 연구는 상대적으로 많지 않은 실정이다(Lee and Choi, 2000; Cheon and Noh, 2001). 한편 Lawe et al.(2009)는 Vermont의 도시외곽 연속류를 대상으로 관측한 교통특성과 4단계 추정법과 TRANSIMS를 이용하여 추정된 교통량을 비교하는 연구를 수행한 바 있다.

3. 교통망(network) 구축 및 현장조사

3.1 교통망 자료 구축

국가교통DB센터의 자료 목록은 여객 OD, 화물OD, 교통유발원단위, 교통량, 교통분석용 네트워크, 교통네트워크 GIS DB로 구성되어 있다. 여객 OD는 목적OD, 수단OD로 구성되어 있고, 화물OD는 화물자동차 물동량, 화물자동차 통행량, 철도항공 물동량으로 구성되어 있다. 교통유발원단위는 광역권별, 광역시별, 도별로 나뉘어 구성되어 있으며, 교통분석용 네트워크 역시 광역권별로 구성되어 있다.

TRANSIMS에서 사용할 네트워크를 구축하기 위해 교통주제도를 변형하여 사용하였다. 교통주제도는 기존의 4원점 좌표계를 단일원점 좌표계로 변환한 좌표계를 사용한다. 지구의 형상 및 크기는 베셀타원체의 값을 사용하며, 투영도법으로는 횡메카토르(TM) 도법을 축적계수는 0.9999를 사용한다. 평면직각좌표계의 원점은 북위 38°00'00", 동경 128°00'00"이며 원점의 값은 X(N)=600,000m, Y(E)=400,000m이다(Kwon et. al., 2009).

TRANSIMS의 네트워크 구축은 사용자가 직접 출력자료형태로 구성하여도 되지만, 시간과 인적자원이 많이 소요되기 때문에 TRANSIMS 내의 네트워크 생성 모듈을 이용하는 것이 유리하다. 네트워크 생성모듈은 3개의 소형 모듈로 구성되어 있다.

Fig. 2는 대상구간인 대구시 수성구 존의 activity location을 보여주는 그림으로, 각 존 도로 변에 activity location이 생성되는



Fig. 2. Activity location of Targeted Network

데 이 특정 존의 activity location에서 다른 존 activity location으로 트립이 생성된다.

본 연구에서는 달구벌대로 상의 움직임 구현이 목적이기 때문에 그 외의 네트워크는 생략하였고 각 존의 activity location(도로 양변에 위치한 점)도 대상 네트워크 끝 부분에 위치한 activity location(사각형)으로 단순화 시켜주었지만, 달구벌대로 상에 기존 존의 activity location에서 다른 activity location으로의 이동을 구현시켜 줌으로써 activity-based 모델의 특성을 유지하면서 네트워크를 구성하였다.

한편, TRANSIMS에서의 입력자료는 주로 txt파일 형식을 따르며 Tab으로 필드를 구분한다. 입력자료는 10가지로 나뉘며, 이러한 입력용 네트워크 자료를 이용하여 TRANSIMS의 연산에 적용 가능한 네트워크 자료를 만들어야 한다. TRANSIMS에 사용되는 네트워크 자료는 필드별로 형식과 필드 값의 범위가 정해져있기 때문에 유의하면서 네트워크를 생성하였다.

위의 과정은 TransimsNet.exe파일을 이용하여 생성할 수 있고, 생성된 네트워크와 입력용 네트워크 자료를 이용하여 신호제어와 활동이 이루어지는 activity location, 주차장, 승강장 등의 네트워크 생성이 이루어진다.

신호제어 자료는 IntControl.exe파일을 이용하여 생성할 수 있다. 생성된 신호제어 자료는 TRANSIMS 자체적으로 임의로 만든 신호이기 때문에 실제 현시자료를 획득한 뒤 생성된 신호제어 자료를 수정하였다.

또한 activity location과 주차장, 승강장 등의 정보는 TransitNet.exe파일을 이용하여 생성할 수 있으며 여기서 생성된 출력 자료 역시, 실제 자료를 획득하여 수정하여야 한다. 도시 내부에서도 그린벨트와 같은 정책적인 이유로 개발이 제한되어 있는 지역이 있지만, 이러한 점을 모두 반영할 수 없기 때문에 사용자가 생성된 데이터를 수정하여야 한다(Kwon et. al., 2009).

3.2 현장조사 개요

도시부 교통류 특성 분석구간은 대구광역시의 달구벌 대로상 남부시의외버스터미널 삼거리에서 대륜고등학교 앞 횡단보도까지의 약 850m 연장으로 도로 폭은 50m, 왕복 10~11차로로 구성되어 있다.

통행속도, 밀도 등의 측정은 남부시의외버스터미널 삼거리와 대륜고등학교 앞 횡단보도 전방에 교통량, 밀도, 평균 속도 등을 측정할 수 있는 장비인 NC를 이용하여 3차로와 4차로 중앙지점에 방향별 2대씩 총 4대를 설치하여 오후 3시~7시까지 자료를 취득하였다.

차량의 추종현상을 분석하기 위하여 만촌화성파크드림 아파트 18층 옥상(도로 노면에서 60m)에서 2대의 비디오카메라로 대륜고등학교 앞 횡단보도 전후지역에 대하여 차량의 감속과 가속현상을

촬영하였다. 분석을 위하여 촬영된 동영상은 화상전환프로그램(Movie Maker)을 이용하여 동영상을 1/10초 단위로 정지화상으로 재 저장하고 정지 화상을 이용하여 1/10초 단위의 차량 움직임에 대하여 차량추종현상을 분석하였다.

구간통행시간 측정은 NC를 설치한 지점 850m구간에 비디오카메라 2대를 중앙녹지대에 설치하여 차량번호판 대조법을 이용해 차량 약 1,000대의 차종별 구간통행 시간을 측정하였으며, 현장 조사를 통해 관측된 교통류 특성자료는 TRANSIMS의 적용가능성을 알아보기 위한 calibration과 검증을 위해 사용되었다.

4. 차량추종 모형 적용과 Calibration

4.1 차두시간 특성 분석

본 절에서는 차로별 차두시간의 특성과 차두시간의 추세를 잘 나타내는 모형을 제시하고 cell size에 따른 TRANSIMS 결과를 비교 분석하기로 한다.

먼저 신호교차로에 정지한 후 출발하는 차량의 정렬 순서대로 차두시간을 차로별로 측정된 결과를 Fig. 3과 Table 1에 나타내었다. 관측된 차두시간의 평균을 살펴본 결과, 선두차량부터 4번째 차량까지 차두시간이 모두 4차로 > 3차로 > 5차로 순으로 나타났으며, 5번째 차량부터는 차로에 상관없이 차두시간이 분포하는 것을 알 수 있다.

여기서 알 수 있는 바와 같이 실제 관측값을 이용하여 교차로 정지선에서 출발하는 순서대로 차량(승용차)그룹 간 차두시간의 평균값은 순서가 뒤로 갈수록 작아지며, 평균값과 중앙값을 기준으로 다소 차이가 있으나 7번째에서 8번째 차량부터 차두시간이 거의 일정한 값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 특히 분산의 경우 첫 번째 차량이 첫 번째 이후 차량과 큰 차이를 보임을 알 수 있다.

승용차를 대상으로 관측된 차두시간의 평균값을 대상으로 추

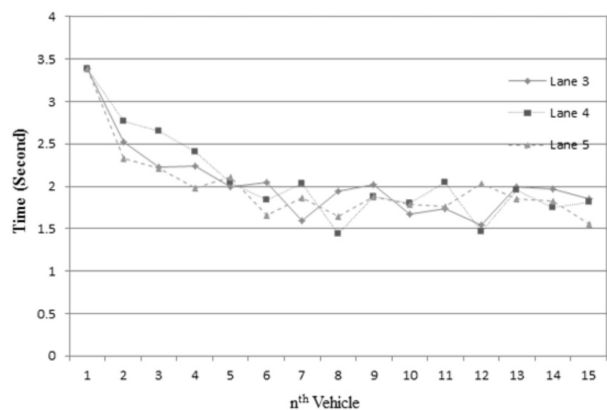


Fig. 3. Observed Headway in Each Lane(mean)

Table 1. Characteristics of Headway (passenger car)

Order	COUNT	MEAN	MEDIAN	STDEV	VAR	MAX	MIN
1	22	3.29	3.60	0.99	0.99	5.00	1.00
2	28	2.50	2.55	0.63	0.39	3.90	1.00
3	31	2.37	2.30	0.75	0.56	3.50	0.60
4	33	2.21	2.10	0.89	0.79	4.30	0.60
5	27	2.05	1.90	0.64	0.41	3.80	1.20
6	29	1.84	1.70	0.57	0.33	3.20	0.90
7	30	1.83	1.70	0.62	0.38	3.20	0.80
8	26	1.67	1.60	0.50	0.25	3.30	0.80
9	25	1.92	1.80	0.69	0.48	3.80	0.80
10	34	1.85	1.65	0.70	0.51	3.70	0.90
11	28	1.66	1.60	0.72	0.52	3.20	0.00
12	31	1.91	1.70	0.76	0.58	4.20	0.80
13	31	1.85	1.60	0.68	0.46	3.30	0.70
14	30	1.74	1.60	0.59	0.35	3.20	0.80
15	32	1.81	1.60	0.75	0.56	4.60	0.90

Table 2. Goodness of Fit for headway

Cell Size	Regression Type	Fitness	R ²
1.0m	Linear	$y = -0.0593x + 2.4106$	R ² = 0.5775
	Power	$y = 2.6814x^{-0.182}$	R ² = 0.7273
	Exponential	$y = 2.4081e^{-0.029x}$	R ² = 0.5998
	Logarithmic	$y = -0.386\ln(x) + 2.654$	R ² = 0.7481
7.5m	Linear	$y = -0.0275x + 1.7049$	R ² = 0.1275
	Power	$y = 1.8824x^{-0.139}$	R ² = 0.2759
	Exponential	$y = 1.6373e^{-0.015x}$	R ² = 0.1036
	Logarithmic	$y = -0.253\ln(x) + 1.9557$	R ² = 0.3304
Observed	Linear	$y = -0.0707x + 2.5987$	R ² = 0.556
	Power	$y = 2.9792x^{-0.214}$	R ² = 0.8498
	Exponential	$y = 2.5681e^{-0.031x}$	R ² = 0.5918
	Logarithmic	$y = -0.497\ln(x) + 2.9572$	R ² = 0.8399

x: Headway(mean) of n-th vehicle

세션을 그려보면, Fig. 4와 Table 2에서와 같이 비선형의 Power 모델이 차두시간의 추세를 가장 적합하게 표현하며, 기존연구와도 정합성을 가짐을 확인할 수 있다.

한편 TRANSIMS는 CA 모형을 기반으로 개발되었기 때문에 가로망을 차량 한 대가 점유할 수 있는 크기의 셀 단위로 나누고 셀 내부에 차량이 점유하는 가의 여부에 따라 차량추종모형과 차로변경모형을 적용하여 차량의 흐름을 분석하는 것이 특징이다.

그러나 디플트르 설정되어 있는 7.5m 크기의 셀은 정지 상태에서 의 가속 감속이 비현실적으로 구현되는 문제가 있다. 즉, cell size가

7.5m인 경우 본 절에서 대상으로 하고 있는 교차로에서 정지한 상태에서 1초에 27km/h로 주행하는 등 감속과 가속에서 차량들이 비현실적인 주행특성을 보였다.

Table 2와 Fig. 4에는 교차로에서 정지한 후 출발하는 차량순서 별 차두시간의 추세를 가장 잘 표현하는 모델을 셀의 크기(CS)에 따른 차이를 분석한 결과를 나타내고 있다.

즉, 실제 관측된 차두시간의 추세선과 셀의 크기가 1.0m인 경우와 디플트인 7.5m인 경우를 비교한 결과 1.0m로 시뮬레이션한 결과가 관측값과 거의 일치하는 것으로 나타났으며, 기존 연구와도

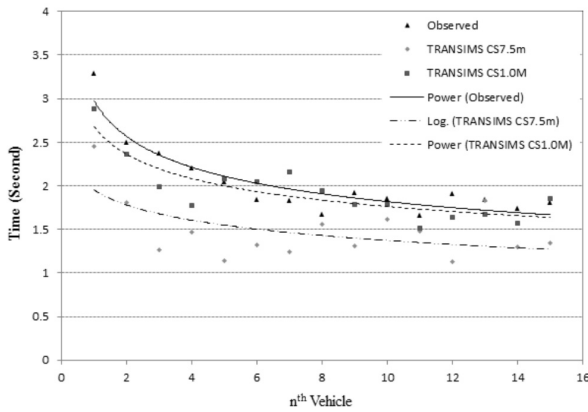


Fig. 4. Headways and Cell Sizes

정합성을 가지는 연구 결과이다(Jung, 2012). 여기서 관측결과를 기반으로 포화차두시간(saturation headway)과 포화유율을 산정해 보면, 대기행렬 내의 7번째 차량에서부터 대기행렬 내의 마지막 차량까지의 평균차두시간은 1.79초로 나타났다. 포화유율은 안정류 상태로 신호교차로를 통과하는 차량의 차로당, 녹색시간 한 시간당 교통량(vphgpl)을 의미하며, 식(1)에 의해 2011(vphgpl)을 얻을 수 있다(Doh, 2004).

$$s = \frac{3600}{h} \quad (1)$$

여기서, s: 포화유율(vphgpl)
h: 포화차두시간(초)

4.2 차량추종 모형

CA에서의 추종모형은 가속, 감속, 불규칙적 감속, 이동의 4가지 기본 규칙(식 2~5)을 가진다.

차량은 기본적으로 해당차량의 최고 속도까지 가속하기를 희망하지만, 전방 차량과의 차간거리(gap)와 감속확률에 의하여 속도가 결정되며, 해당차량의 최고속도와 전방 차량과의 차간거리 사이에서 작은 값만큼 이동하며, 전방 차량과의 거리가 영향을 받을 수 있는 만큼의 거리가 된다면 전방 차량과의 거리만큼 차량의 속도를 감속한다. 저속차량의 흐름 발생은 차량이 감속확률(p_{noise})을 가질 때, 자신의 속도를 1만큼 감속한다. 이런 속도의 제어과정이 끝나면 차량은 v 의 속도로 주행한다(Jung et. al., 2009).

$$v_{t+1} = \min[v_t + 1, v_{max}] \quad \text{when } v_t < g_n \quad (2)$$

$$v_{t+1} = \min[v_t, g_n] \quad \text{when } v_t \geq g_n \quad (3)$$

$$v_{t+1} = \max[v_{t+1} - 1, 0] \quad \text{when } p_{noise} \geq p_{random} \quad (4)$$

$$x_{n+1} = x_n + v_{t+1} \quad (5)$$

여기서,

v_{t+1} : 시간($t+1$)에서 차량속도($cell/s$)

v_t : 시간(t)에서 차량속도($cell/s$)

g_n : 추종 차량 간의 비점유된 cell 개수($cell$)

p_{noise} : 차량의 불규칙적인 감속 확률 값($0 \sim 1$)

p_{random} : 불규칙적인 감속을 위한 무작위 확률 값($0 \sim 1$)

x_n : 시간(t)에서 차량의 위치

식 (2)는 차량의 가속을 제어하는 식으로, 대상 차량의 속도가 선행 차량과의 거리보다 작을 때, 가속 할 수 있다. 여기서 속도의 단위는 $cell/s$ 이고, 거리의 단위는 $cell$ 이며, 다음 연산을 위한 time-step이 1초 단위이므로 속도 단위에 1초를 곱하여 주면, 속도와 거리의 단위가 일치하게 되어, 값의 비교만을 통하여 가속여부를 결정할 수 있다. 대상 차량에 대한 현재 time-step에서의 속도는 이전 time-step의 속도보다 $1cell/s$ 빠른 값을 가질 수 있다. 만약, 현재 time-step에서의 속도가 최고 속도라면, 더 이상 가속할 수 없고, 현재의 속도를 유지하게 된다.

식 (3)은 차량의 감속을 제어하는 식으로, 대상 차량의 속도가 선행 차량과의 거리보다 작을 때, 감속을 하여야 한다. 이 과정에서도 가속과 마찬가지로 값의 크기만을 비교하여 감속 여부를 결정할 수 있다. 대상차량에 대한 현재 time-step에서의 속도는 이전 time-step에서의 속도와 선행차량과의 거리 중에서 작은 값으로 결정된다. 여기서, 대상 차량의 속도가 선행차량과의 거리보다 작으면 무조건 감속을 하여야 하므로, 감속 할 때의 현재 속도는 선행 차량과의 거리가 된다.

식 (4)는 불규칙적 감속 조건으로 운전자가 특별한 이유 없이 감속을 하는 경우와 가속과 감속을 번갈아 가며 일정한 속도를 유지하는 행태를 나타내기 위한 식이다. p_{noise} 가 매개변수 값으로 정해져 있고, p_{random} (불규칙적 감속을 위한 무작위 값)을 생성하여 두 값을 비교하였을 때, p_{noise} 가 p_{random} 보다 더 크다면 불규칙적 감속의 조건을 만족하여 감속을 하게 된다. 이 감속은 선행 차량과의 무관한 감속으로, 현재 time-step에서의 속도는 이전 time-step에서의 속도보다 $1cell/s$ 작은 값을 취하게 된다.

식 (5)는 이동규칙에 관한 것으로 차량의 속도가 식 (2)와 식 (3), 식 (4)에 의하여 결정되면 이것을 이용하여 링크 상에서 차량의 위치를 결정하는 식이다. 이전 time-step에서 차량의 위치가 x_n 이었다면 다음 time-step에서 차량의 위치는 $x_n + v_{t+1}$ 이 된다. 여기서 차량의 위치 단위는 $cell$ 이 되고, 현재의 속도인 v_{t+1} 의 원래의 단위는 $cell/s$ 이지만, 1초가 지난 뒤이기 때문에 1초를 곱하여 단위가 $cell$ 로 바뀌고 이전 time-step에서의 위치에 현재의 속도를 더하여 현재의 위치를 구할 수 있다.

한편, TRANSIMS에서의 차로 변경의 목적은 3가지 경우로 나뉜다. 첫 번째는 대상 차량의 앞에 대상 차량보다 속도가 낮은 차량이 존재하고, 대상 차량이 감속을 하지 않고 선행 차량을 추월하여 원하는 속도로 주행하는 경우이다. 두 번째는 좌회전이나 우회전 또는 유턴을 하여 정해진 경로를 이용하여 주행하기 위하여 차로를 변경하는 경우이다. 세 번째는 현재 이용하고 있는 차로가 특정 구간에서 버스나 다인승차량(High Occupancy Vehicle)만 이용할 수 있는 차로로 변경되는 것과 같은 경우와 과중차량이 통행하는데 제한이 있는 차로와 같은 경우이다.

위 3가지 경우에 차로 변경에 대한 우선권이 부여되는데, 정해진 경로를 이용하여 주행하기 위하여 차로를 변경하는 경우와, 차로에 대한 이용이 제한되어 차로를 변경하는 경우에는 무조건 차로를 변경할 수 있도록 연산을 실행하게 되고, 원하는 속도로 주행을 하기 위하여 추월을 하는 것과 같은 경우에는 차로의 상태와 차량의 상태를 고려하여 차로를 변경하도록 제약을 두고 있다.

주행 중인 차량이 차로를 변경할 경우, 대상 차로의 상태를 확인하여 차로 변경이 가능한지 먼저 확인하여야 한다. 차로 변경이 가능한 조건은 다음과 같다. 1) 차로변경을 원하는 차로의 셀 값이 -1이어서는 안 된다(셀 값이 -1이면 차로가 존재 하지 않은 것을 의미한다). 2) 차로변경을 할 차로가 현재 차량이 이용할 수 없는 차로이어서는 안 되며, 3) 차로 변경할 차로의 셀에 다른 차량이 점유하고 있어서는 안 된다.

위의 3가지 조건에 대한 만족 여부에 따라 차로변경 가능 여부가 바뀌게 된다. 차로 변경을 위해서는 1번과 2번 조건은 반드시 만족시켜야 하지만 3번 조건은 만족 여부에 따라서 차로 변경에 대한 계획이 바뀌어 차로를 변경하게 된다.

먼저 차로변경을 위하여 1, 2번 조건만 만족 시키는 경우에는 협조적 차로변경(cooperative lane change) 연산을 통하여 차로 변경이 가능한지 확인을 하여야 한다. 협조적 차로변경 연산이란 변경할 차로의 셀을 점유하고 있는 차량의 다음 이동을 파악하여 다음 time-step에 원하는 차로로 이동이 가능한지 확인하는 과정이다.

이웃한 cell을 점유하는 차량이 single-cell 차량(차량의 크기가 1 cell을 점유하는 차량)이면서 차로변경을 할 예정이라면 차로 변경이 가능하지만, single-cell 차량이 아니라 multi-cell차량(차량의 크기가 2 cell 이상을 점유하는 차량)이며 차로 변경 대상 차량보다 선행하여 이웃한 cell을 점유하거나 차로변경을 할 예정이 없다면 차로변경이 불가능하다. 위의 조건을 만족시키는 경우 아래의 두 매개변수 값을 이용하여 두 차량의 속도 관계를 확인하여야 한다.

Maximum_swapping_speed: default 37.5m/s

Maximum_speed_difference: default 7.5m/s

두 차량이 차로변경을 하기 위해서는 위의 두 가지 값에 대한

조건을 만족시켜야 한다. 차로 변경을 하려는 차량(A)과 변경 대상 차로에 존재하는 차량의 차량(B)은 Maximum_swapping_speed의 값보다 커서는 안 되고, 두 차량의 속도 차이는 Maximum_speed_difference의 값보다 작거나 같아야 한다. 위의 경우를 만족하고, A차량과 B차량 모두 single-cell 차량인 경우, B차량이 A차량의 차로로 차로변경을 원하면 A차량과 B차량 위치는 서로 맞교환 하듯이 차로를 변경하게 된다.

만약 두 차량 중 한 차량이 multi-cell 차량이거나 B차량이 차로변경을 하지 않을 예정이라면, A차량은 B차량의 앞으로 차로 변경을 하는 가상의 시나리오를 구성한다. 그 시나리오에서 다음 time-step에 B차량이 A차량에 의하여 원하는 주행속도를 내지 못하게 된다면 이 시나리오는 차로 변경을 하지 못한다는 결론을 도출하게 되고, B차량의 주행에 영향을 미치지 않는다면 차로 변경이 가능하여 B차량의 앞 cell로의 차로변경을 고려하며 현재 차로를 이용하여 주행을 하게 된다.

그리고 두 번째는 차로변경을 위하여 1, 2, 3번 조건 모두 만족시키는 경우인데 협조적 차로변경 연산과정을 거치지 않고 차로 변경을 할 수 있다. 하지만 차로 변경을 위해서는 check-behind와 check-ahead 루틴을 이용하여 차로변경 대상 cell의 1 cell 앞과 1 cell 뒤를 확인하여 차로를 변경한다. 이것은 차로를 변경하려는 차량(A)에 대하여 충분한 거리가 존재하는지를 확인하는 단계이다.

충분한 거리가 있다고 판단되면 허용가능성을 점검하는데, 허용가능성이란 1 cell 뒤의 cell을 다른 차량(B)이 점유하고 있다면, 무작위 번호를 생성하고 매개변수와 비교를 통하여, A 차량이 차로를 변경하여 B 차량 앞으로 들어오는 것을 허용할지를 결정하는 것이다. 이것을 결정하는 허용가능성의 확률 값인 PERMISSIVE_PROBABILITY key는 매개변수로써 작용을 하고 초기 값은 50으로 설정이 되어 있다.

만약 차로 변경이 허용된다면, A 차량은 다음 time-step에서 우선적으로 B 차량의 앞으로 이동하게 된다. 반대로 차로 변경이 허용되지 않는다면, 차로 변경에 실패하여 다음 time-step에서 같은 방법을 통하여 차로변경을 시도하게 된다.

4.3 Calibration을 위한 파라미터 선정

본 연구에서 도시부 가로를 대상으로 TRANSIMS를 활용한 교통류 특성을 파악하기 위해 지금까지 분석된 파라미터를 요약하면 Table 3과 같다.

여기서, Max_routing_problems과 Max_walk_distance는 네트워크가 정지하는 상황을 방지하기 위해 수정하였으며, Number_of_iterations은 iteration이 클수록 침두시 교통량이 주변시간으로 더 많이 분포되기 때문에 input값으로 넣은 시간대 별 교통량 분포 반영을 위해 수정하였다.

Table 3. Parameters for TRANSIMS calibration

Module	Parameters	Default	this study
Intcontrol	TIME_PERIOD_BREAKS	None	0:00, 6:30, 10:00, 16:00, 23:00
TransitNet	TRANSIT_TIME_PERIODS	None	5:00, 7:00, 9:00, 15:00, 17:00, 20:00
Router	MAX_ROUTING_PROBLEMS	100000	1000000
Router	MAX_WALK_DISTANCE	2000	10000
Link Delay	NUMBER_OF_ITERATIONS	5	3
PlanSelect	SELECT_TIME_RATIOS	2	1
PlanSelect	SELECT_VC_RATIOS	1	1.2
Microsimulation	CELL_SIZE	7.5	1
Microsimulation	MAXIMUM_WAITING_TIME	3600	120
Microsimulation	MINIMUM_WAITING_TIME	180	60
Microsimulation	DRIVER_REACTION_TIME	1	1
Microsimulation	PERMISSION_PROBABILITY	50	55
Microsimulation	SLOW_DOWN_PROBABILITY	0	20
Microsimulation	SLOW_DOWN_PERCENTAGE	0	20

Table 4. Characteristics of Observed Traffic Volume(per lane)

Parameter	Lane	Estimated	Standard Error	95% Confidence Interval	
				Lower Limit	Upper Limit
Mean	3	60.062	1.597	56.93	63.19
	4	47.812	1.411	45.04	50.57
Standard Deviation	3	11.066	1.129	9.060	13.517
	4	9.782	0.998	8.008	11.948
Log-likelihood	3			-183.499	
	4			-177.577	
Anderson-Daring	3			0.668	
	4			0.748	

한편, Select_time_ratio와 Select_VC_ratio는 리라우팅할 차량의 time ratio와 VC ratio이며, 셀의 크기는 급속한 가속 및 감속을 방지하기 위해 1m로 수정하였다. 그리고 차량이 특정 셀에서 Max waiting time (=120)까지 움직이지 않으면 삭제하고, Min waiting time (=60) 까지 움직이지 않으면 그 대기행렬에 있는 차량보다 차선 변경할 우선권을 갖도록 하였다. 또한 자동차가 랜덤하게 감속하는 비율과 감속하는 정도를 20%로 설정하여 시뮬레이션을 하였다.

5. 시뮬레이션 결과의 검증

5.1 차종별 교통량과 속도 특성

본 절에서는 실제 가로를 대상으로 조사한 차종별 교통량, 속도 및 구간통행시간의 특성을 먼저 살펴보고, 앞 절에서 정한 시뮬레이

션을 위한 파라미터를 이용한 TRANSIMS의 결과와 비교를 통해 국내 가로에 적용할 수 있는지를 살펴보기로 한다.

먼저 Table 4에서 보는 바와 같이 대륜고 앞 가로의 차종별 교통량의 특성을 살펴보면, 정규분포를 따르는 3차로와 4차로의 5분 교통량의 평균이 각각 60.06대와 47.81대로 중간에 위치한 3차로에서의 교통량이 4차로보다 상대적으로 많은 것으로 나타났다. 한편 차종별 속도의 특성을 살펴보면 3차로와 4차로의 평균속도가 각각 56.13k/h와 61.87k/h로 나타나 4차로에서의 속도가 다소 빠르게 관측되었다.

여기서 정규분포를 따르는 차종별 교통량과 속도의 평균값이 서로 통계적으로 유의한 차이가 있는지를 살펴보기 위해 t 검정을 실시한 결과를 Table 5에 나타내었다. 교통량의 경우 Levene의 등분산 검정결과 p-value(유의 확률)는 0.348로 $\alpha=0.05$ 에서 등분산 가정을 기각하지 못하며, 등분산 가정이 성립하는 양측검정에서

Table 5. Comparison of T-test between Traffic Volume and Speed

		Levene's Test for Equality of Variances		t-test for Equality of Means						
		F	Sig.	t	df	Sig. (2-tailed)	Mean Difference	Std. Error Difference	95% C.I. of the Diff.	
									Lower	Upper
Vol.	Equal variances assumed	.890	.348	5.686	94	.000	12.250	2.154	7.972	16.527
	Equal variances not assumed									
Speed	Equal variances assumed	8.835	.004	-4.637	93	.000	-5.747	1.239	-8.208	-3.286
	Equal variances not assumed			-4.657	81.0	.000	-5.747	1.234	-8.202	-3.291

Table 6. Comparison between Observed and Simulated Traffic Volume (Unit: Number of vehicle)

	Intersection Name	08:00~09:00	13:00~14:00	18:30~19:30
Observed Vol.	Manchon 4	2638	2524	2875
	Daeryun high school	2122	1785	2568
TRANSIMS (CS 1.0m) Vol.	Manchon 4	2593	2573	2803
	Daeryun high school	1866	1991	2085
Observed - TRANSIMS	Manchon 4	45	-49	72
	Daeryun high school	256	-206	483
Percent Difference	Manchon 4	2%	-2%	3%
	Daeryun high school	12%	-12%	19%

t-value가 5.686이고 p-value는 0.000으로 나타나 $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ 는 $\alpha=0.05$ 에서 기각되어 3차로와 4차로의 교통량은 차이가 없다고 할 수 없다.

한편, 차로별 속도의 평균 차이가 있는지를 살펴보기 위한 t 검정에서는 $\alpha=0.05$ 에서 p-value는 0.0004로 나타나 등분산 가정이 성립하지 않으며, 등분산 가정이 성립하지 않는 양측 검정에서 t-value가 -4.657이고 p-value는 0.000으로 나타나 $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ 는 $\alpha=0.05$ 에서 기각되어 3차로와 4차로의 속도는 차이가 없다고 할 수 없다.

결과적으로 3차로와 4차로에서 관측된 교통량과 속도의 평균값에는 차이가 있음을 확인하였으며, 3차로가 4차로 보다 5분 기준으로 평균 12.25대의 교통량이 많으며, 속도는 5.747km/h 낮은 것으로 나타났다.

Table 5에서 알 수 있는 바와 같이, 관측된 교통특성과 2010년 대구광역시 교통량조사보고서 자료를 기반으로 TRANSIMS를 이용하여 calibration한 결과를 비교하여 국내 가로망에 적용가능성을 살펴보았다. 먼저 만촌네거리에서 대륜고등학교 방향(만촌4)의 시간당 직진 교통량과 시뮬레이션 결과를 비교해 본 결과, -2% ~3% 범위 내에서 교통량을 정산할 수 있었으며 비교적 정확한 시뮬레이션이 이루어졌다고 할 수 있다(Table 6 참조).

한편, 대륜고에서 경산방향(대륜고)의 시간당 직진 교통량과 시뮬레이션 결과를 비교한 결과는 -12%~19%의 범위 내에서 정산됨을 확인하였다. 이는 대륜고 앞 도로변의 토지이용 특성과 상대적

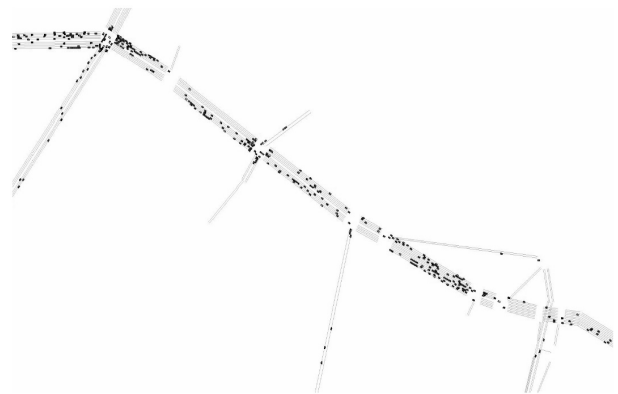


Fig. 5. Example of network in TRANSIMS

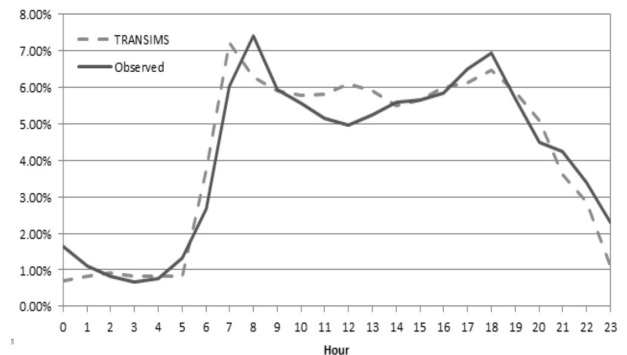


Fig. 6. Hourly Traffic Volume in TRANSIMS

으로 빈번한 진출입 등 주위 교통특성에 따른 차이로 해석된다.

Fig. 5에는 TRANSIMS를 이용한 시물레이션을 위해 구축한 도로 네트워크이며 도로 상에 구현된 차량의 흐름을 정지화면으로 표현한 것이다.

여기서 대륙고 앞 가로구간을 대상으로 설치한 NC로부터 얻은 속도 자료와 TRANSIMS의 시물레이션으로 얻은 값과 비교해 보았다. 한편 cell size를 1.0m로 설정하여 시물레이션한 결과 속도는 정규분포를 띄며 평균속도는 약 52.924k/h이고 표준편차는 약 2.39로 실제 관측한 속도보다는 약 10% 과소 추정되는 것으로 나타났다.

Fig. 6에는 TRANSIMS에서 cell size 1.0m일 때의 시간대별 차량의 분포를 나타낸 것으로 오전 및 오후 첨두 등 교통량 분포특성을 잘 나타낸 것으로 판단된다.

5.2 차종별 통행시간에 따른 시물레이션의 검증

본 절에서는 대상구간을 통행한 자동차들에 대하여 5개의 차종(승용차, 소형버스, 소형트럭, 중대형 트럭, 중대형 버스)으로 구분하여 번호판 대조법(plate matching)으로 통행시간을 측정하고 이를 시물레이션 결과 값과 비교해 보았다.

Table 7에는 실제 구간 통행시간 관측 값을 차종별로 구분하여 나타내고 있으며, 2012년 10월 5일 15시-19시까지 남부정류장 삼거리에서 대륙고 앞까지 통행한 자동차종 실제 관측된 5개 차종의 구간 통행시간 특성을 나타내고 있다.

먼저 승용차의 경우, 교통량이 771대의 평균통행시간은 46.87초이며, AD(Anderson-Daring)분석을 통해 통행시간의 분포는 로그 로지스틱(Log-logistic) 분포가 가장 적합한 것으로 나타났다. 소형버스의 경우, 실제 관측된 교통량은 97대이며 평균통행시간은 46.45초로 관측 되었으며, 로그 로지스틱분포가 가장 적합한 분포 형태로 나타났다.

소형 트럭의 경우는 구간통행시간은 49.07초로 관측되었고, 로그 로지스틱분포가 가장 적합한 분포 형태이며, 중대형 트럭의 경우에는 평균통행시간은 50.94초이며, 와이블(Weibull)분포가 AD값이 0.802로써 가장 적합한 분포형태임을 알 수 있었다. 마지막

으로 중대형버스는 실제 관측된 교통량은 8대로 충분한 관측값이 구해지지 않아 통계적인 의미는 없지만 평균통행시간은 56.87초로 관측 되었다.

Table 7에서 알 수 있는 바와 같이 차종별 구간통행시간의 특성을 살펴보면, 대형버스는 샘플 수가 작아 논의에서 제외하더라도 구간평균 통행시간은 소형버스 < 승용차 < 소형 트럭 < 중대형 트럭 순으로 나타났다.

한편 Fig. 7에는 동일한 구간을 대상으로 TRANSIMS로 cell size를 달리하여 시물레이션한 구간 통행시간의 특성을 나타내고 있다. 실제 번호판 대조법으로 구한 차종별 구간 통행시간 관측 시간대가 서로 상이하여 직접적인 비교는 힘들지만 cell size를 1.0m로 한 경우가 상대적으로 현실적인 교통류의 특성을 잘 반영하고 있음을 확인할 수 있다.

즉, cell size를 7.5m로 설정한 경우 급속한 가속 및 감속운행의 영향으로 구간 통행시간이 42~46초에 집중적으로 분포되어 있는 반면, cell size를 1.0m로 설정한 경우는 구간 통행시간이 50초를 기준으로 광범위 한 범위에 분포되어 있으며 신호 영향과 상대적으로 빠른 속도로 운전하는 운전자와 느린 속도로 운전하는 운전자가 골고루 분포되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 8에는 해당 구간을 대상으로 앞 절에서 정해진 파라미터를 이용하여 cell size 1.0m, 유입교통량은 차로 당 시간 당 최대 500대에서 최대 2,200대 범위 내에서 배분하여 발생시킨 시물레이션의 결과를 교통량(q)-속도(v)-밀도(k) 관계도로 나타내고 있다. 교통량-속도 그래프에서 교통량의 증가에 따라 속도의 감소가 발생하며, 교통량이 1,800대/h 부근에서로 정체 발생하고 교통량과 속도가 감소하는 것을 나타내고 있다.

한편, 교통량-밀도 그래프에서는 교통량의 증가에 따라 밀도가 증가하다가 정체가 발생한 이후에는 밀도는 증가하나 교통량은 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 속도-밀도 그래프에서는 밀도의 증가에 따라 지속적으로 속도가 감소되는 것을 볼 수 있으며, Underwood 모형이 가장 적합한 것으로 나타났으며, Underwood 모형의 속도-밀도 추정식과 교통량-속도 관계식은 식 (6), (7)과 같다.

Table 7. Observed Travel time in Each Vehicle Types (15-19PM)

	Passenger car	Small Truck	Mid & Large Truck	Small Bus	Mid & Large Bus
Count	771	96	33	97	8
Average	46.875	49.07292	50.93939	46.45361	56.875
STDEV	6.947	10.04856	7.491409	5.847045	12.12362
Max	75	104	79	73	75
Min	33	37	40	35	39
Median	45	46.5	51	45	55

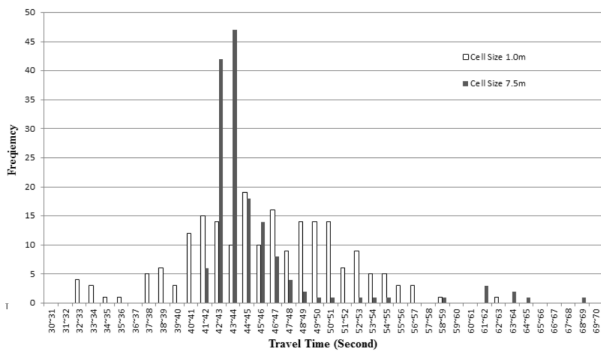


Fig. 7. Comparison of Travel time in Cell Sizes

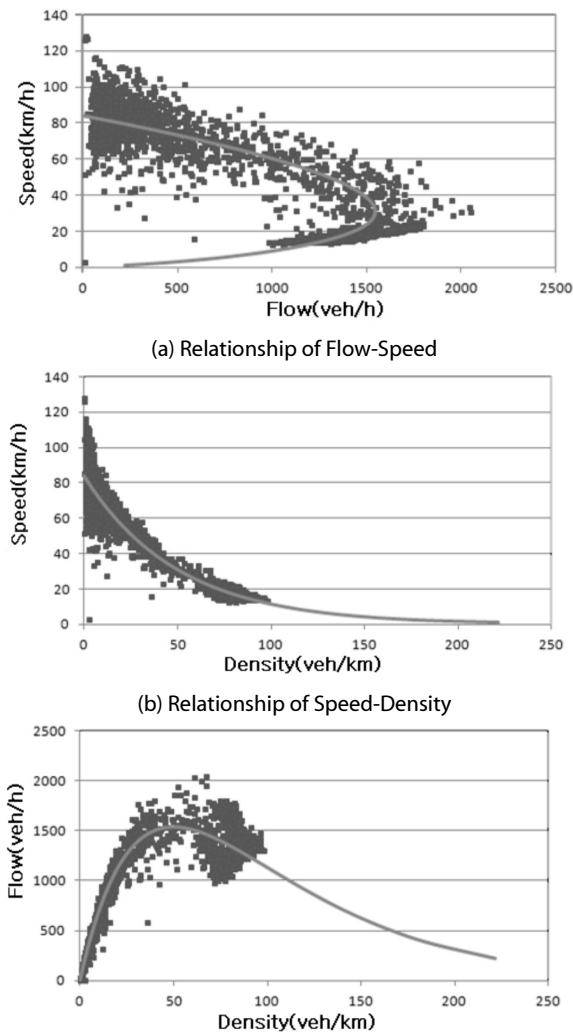


Fig. 8. (c) Relationship of Flow-Density

$$v = 83.901e^{-0.02k} \tag{6}$$

$$q = v \times \ln\left(\frac{83.901}{v}\right) \times 50 \tag{7}$$

한편 시뮬레이션에서 과도한 정체가 발생하지는 않았기 때문에 고밀도 상태에서 속도와 교통량이 매우 낮은 현상이 표현되지는 않았지만 전반적으로 단속류의 주행특성이 현실적으로 비교적 잘 구현되었음을 알 수 있다.

6. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 대구광역시의 달구벌대로의 일부 단로부를 대상으로 신호교차로에서의 차두시간 특성과 교통량, 속도 및 통행시간 특성에 대한 관측자료 및 신호 특성을 기반으로 activity 기반 시뮬레이션인 TRANSIMS를 이용해 구현된 교통 특성과의 비교 분석을 통해 단속류에서의 적용 가능성을 알아보았다. 특히 차두시간의 특성과 우리 실정에 맞는 파라미터의 선정 및 ID 추적 등을 통해 calibration 과정을 거쳤으며 이렇게 수정된 파라미터를 기반으로 구현된 가로구간의 차로별 교통량, 속도 및 구간 통행시간 등의 특성은 무난하게 우리 실정에 맞게 묘사할 수 있는 것으로 나타났다.

특히 cell size에 따른 교통류 특성 분석에서 기존 연구의 성과를 뒷받침 할 수 있는 결과도 얻을 수 있었다.

그러나 본 연구에서 분석 대상으로 한 소규모 단로부만으로 TRANSIMS의 국내 적용가능성을 단정하기에는 무리가 있으며, 다양한 차로 특성, 신호 특성 및 연도 토지이용 특성 등을 고려한 시뮬레이션을 통해 객관적인 분석과 파라미터의 calibration 과정 및 검증에 대한 향후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

Bar-Gera, H. and Shinar, D. (2005). "The tendency of drivers to pass other vehicles." *Transportation Research Part F* Vol. 8, pp. 429-439.

Bartle, R.M., Skoro, V. and Gerlough, D.L. (1956). "Starting delay and time spacing of vehicle entering signalized intersection." Bulletin 112, *TRB, National Research Council*, Washington, D.C., pp. 33-41.

Cheon, S. and Noh, J. (2001). "Development of a traffic simulation model analyzing the effects of highway incidents using the CA(Cellular Automata) model." *Journal of Korean Society of Transportation* Vol. 19, No. 6, pp. 219-227 (in Korean).

Doh, C. (2004). *Introduction to transportation engineering*, cheong-MoonGak (in Korean).

Greenshields, B. D., Schapiro, D. and Ericksen, E. L.(1947). *Traffic performance at urban street intersection*, Eno Foundation for Highway Traffic Control.

Jo, J., Kim, J., Ko, S. and Kim, C. (2001). "A traffic flow micro-simulation system using cellular automata." *Journal of Korean Society of Transportation* Vol. 19, No. 3, pp. 133-144 (in Korean).

- Jung, K., Do, M., Lee, J., and Lee, Y. (2012). "Vehicle running characteristics for interrupted traffic flow by using cellular automata." *The Journal of the Korea Institute of Intelligent Transport Systems*, Vol. 11, No. 6, pp. 31-29 (in Korean).
- Jung, K., Lee, J., Kang, C., Sim, C., and Choi, E. (2009). "Carfollowing model for freeway using TRASIMS microsimulation method." *Proceedings of Korean Society of Road Engineer Meeting*, pp. 297-302 (in Korean).
- Kim, D., and Woo, Y. (1997). "Analysis of traffic characteristics on the approach of signalized intersection." *J. of the Institute of Industrial Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 121-133 (in Korean).
- Kim, J., Kim, J., Jang, M., and Moon, Y. (2002). "Development of a gap acceptance model for the simulation of merging area on urban freeways." *Journal of Korean Society of Transportation* Vol. 20, No. 6, pp. 115-128 (in Korean).
- Kometani, E. and Sasaki, T. (1959). "A safety index for traffic with linear spacing." *O.R.S.A.* Vol. 7, No. 6.
- Kwon, K., Park, K., Kim, S., Song, J., and Lee, J. (2009). "Compatibility of TRANSIMS and transportation networks of KTDB." *Proceedings of Korean Society of Road Engineer Meeting*, pp. 307-312 (in Korean).
- Lawe, S., Lobb, J., Sadek, A.W., Huang, S., and Chi Xie. (2009). "TRANSIMS implementation in chittenden county, vermont : Development, Calibration and Preliminary Sensitivity Analysis." *J. of the Transportation Research Board*, Vol. 2132, pp. 113-121.
- Lee, H. and Doh, C. (2002). "Saturation headway of through movement at signalized intersections in urban area." *Journal of Korean Society of Transportation* Vol. 18, No. 5, pp. 23-31 (in Korean).
- Lee, J. (1988). *Basic study on the characteristics of traffic flow at road segments in urban district*, Ph. D. Thesis at Yeungnam University (in Korean).
- Lee, Y. and Choi, S. (2000). "Estimation of a car-following model for microscopic simulation model based on GM 5th model." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 18, No. 6, pp. 47-61(in Korean).
- Nam, Y. (1985). *A fundamental study of the characteristics of traffic flow on the road*, Ph. D. Thesis at Chungang University (in Korean).
- Park, B.B. and Kwak, J. (2011). "Calibration and validation of TRANSIMS microsimulator for and urban arterial network." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 1091-1100.
- Pipes, L. A. (1953). An operational analysis of traffic dynamics, *Applied Physics*, 24.
- Richards, P.I. (1959). Shock waves on the highway, *O.R.S.A.* Vol. 4.
- Wardrop, J. G. (1952). "Some theoretical aspect of road traffic research." *Institute of Civil Engineers, Road Paper*, No. 36, pp. 325-362.
- Yeon, J., Jang, M., Kim, J. and Son, B.(2002). "Development of a lane changing model yielding realistic lane usage." *Journal of Korean Society of Transportation*, Vol. 20, No. 5, pp. 99-111 (in Korean).
- Yoon, B. (2009). "Development of lane-changing model for two-lane freeway traffic based on CA." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 3D, pp. 329-334 (in Korean).